آب و توسعه پایدار

دوره دوازدهم . شماره سوم (پیاپی ۳۷) . آذر ماه ۱۴۰۴

امنیت غذا و بهره وری آب



فهرست مقالات

- **مدیریت سیلاب شهری با هدف تأمین بخشی از آب مورد نیاز فضای سبز پردیس دانشگاه فردوسی مشهد**
  سعید افراسیابی، سعیدرضا خداشناس، ابوالفضل مساعدی
- **امنیت غذایی در قرن بیست و یکم: بررسی چالش‌ها، تهدیدها و راهکارهای پایداری**
  ایمان حاجی‌راد، پریا پورمحمد
- **مدل‌سازی هیدرولیکی و ارائه اجرایی به منظور مدیریت کیفی آب ورودی به تصفیه خانه آب دارخوین**
  داود حری، جواد احدیان، محمود شفاعی بجستان، سید محسن سجادی
- **بررسی عددی میدان سه‌بعدی جریان پیرامون آبشکن‌های رودخانه‌ای در حالت قرارگیری گروهی**
  فریبا گلچین، نازیلا کاردان، مهدی دینی
- **مروری بر روش‌های آزمایشگاهی و عددی در مدل‌سازی فرونشست: چالش‌ها و راهکارها**
  علی اصغری، حسین سرباز
- **تحلیلی بر جریان برگشتی، اهمیت و مقدار آن در ایران و سایر کشورهای جهان**
  زهرا کاظمی، عزیز مجیدی، اسماعیل علیزاده، جهانبخش میرزاوند
- **شناسایی عوامل اجتماعی و روان‌شناختی موثر بر مصرف آب خانگی شهر تهران**
  مجید رامشینی، بهمن حاجی‌پور
- **بررسی امنیت تأسیسات آب شرب و زیرساخت‌های آن با رویکرد پدافند غیرعامل در یک شهر به صورت پایلوت**
  علی نصیریان، ابوالفضل اکبرپور، علی‌اکبر عامری، مهسا مردانی
- **طراحی یک برنامه درسی جامع آموزش حواس افزوده محیط زیست با تمرکز بر «آب» (ویژه متوسطه اول)**
  امیرعلی برومند، محمدجواد امیری
- **مروری بر کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت هوشمند آبیاری**
  زهرا ایاب کوشک گذر، سید محمدرضا ناقدی فر، علی‌نقی ضیایی
- **بررسی تاثیر تفاوت‌های اقلیمی بر تغییرات و نوسانات فصلی و سالانه بارش در کشور**
  امیرحسین کریمی خلیل آباد، ابوالفضل مساعدی، سیدمحمدرضا ناقدی فر
- **هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید در تصفیه آب: مکانیسم‌ها، کاربردها و چشم‌اندازهای آینده (یک مطالعه مروری)**
  علیرضا رادخواه، سهیل ایگدری، صدیقه آتش‌افرازه

شاپا چاپی ۵۴۷۴-۲۴۲۳

بسم الله الرحمن الرحیم

سال دوازدهم. شماره سوم. (پیاپی ۳۷). آذر ماه ۱۴۰۴

آب و توسعه پایدار

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد
مدیر مسئول: ناصر شاهنوشی فروشانی. استاد گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
سردبیر: کامران داوری. استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

اعضای هیئت تحریریه

کاظم اسماعیلی. دانشیار گروه مهندسی آب. دانشگاه فردوسی مشهد
حسین انصاری. استاد گروه مهندسی آب. دانشگاه فردوسی مشهد
علی باقری. دانشیار گروه مهندسی آب. دانشگاه تربیت مدرس
محمد جلینی. دانشیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی
حسین‌علی‌دادی. استادگروه مهندسی‌بهداشت‌محیط‌وحرفه‌ای. دانشگاه‌علوم‌پزشکی‌مشهد
سعید مرید. استاد گروه مهندسی آب. دانشگاه تربیت مدرس
حمیدرضا ناصری. استاد گروه زمین شناسی. دانشگاه شهید بهشتی

شورای سیاست گذاری

مجیدقنادی(ریاست‌شورا). مدیرکل مرکزتحقیقات، توسعه فناوری و ارتباط با صنعت شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور
حسین اسماعیلیان. مدیر عامل و رئیس هیات مدیره شرکت آب و فاضلاب مشهد
محمدعلی نعمت نژاد. مدیر عامل شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی
احمدقندهاری: رئیس‌حوضه‌های‌آبریز ارس، اترک و حوضه‌های شمالی، شرکت مدیریت منابع آب ایران
ناصر شاهنوشی فروشانی. مدیر مسئول نشریه
کامران داوری. سردبیر نشریه

مشاوران هیئت تحریریه

انوش نوری اسفندیاری. اندیشکده تدبیر آب ایران
حسین دهقانی سانیج . موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
سید حسین سجادی فر. شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور
غلامرضا کلائی. شرکت آب و فاضلاب مشهد
فریبا قنبری. شرکت آب و فاضلاب مشهد
سیدحمید میرقاسمی. شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی
محمود ارجمند شریف . شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی

اطلاعات نشر

کارشناس اجرایی: مهری شاهدی. فاطمه طالبی حسین آباد
ویراستاری: مرجان قوچانیان. مهری‌شاهدی. فاطمه طالبی‌حسین‌آباد (فنی وادبی). مائده اسکوهی (لاتین)
طراحی جلد: محمدرضا شیخی . **صفحه آرایی:** رحمان اسدی
ترتیب انتشار. ناشر: فصلنامه. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد
شماره شاپا چاپی. الکترونیکی: ۵۴۷۴-۲۴۲۳ / ۳۳۲۱-۲۷۱۷
تارنما. رایانامه: https://jwsd.um.ac.ir. Email: jwsd@um.ac.ir
آدرس: دانشگاه فردوسی مشهد. دانشکده کشاورزی. گروه علوم ومهندسی آب. دفترنشریه. کدپستی ۹۱۷۷۵۱۱۶۳
حامی مالی نشریه: شرکت آب و فاضلاب مشهد
حامی مالی کنکاش: شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی
پایگاه‌های نمایه شده: پایگاه استنادی علوم ایران (ISC). پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)
بانک اطلاعات نشریات کشور (Magiran). google scholar، DOAJ، CABI، Agris

این نشریه طبق نامه شماره ۳/۱۸/۱۲۶۶۳۱ مورخ ۱۳۹۴/۶/۲۹ ازکمیسیون بررسی نشریات علمی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، اعتبارعلمی دریافت نموده است. همچنین در تاریخ ۱۳۹۴/۱۱/۵ موفق به دریافت پروانه انتشار نشریه از وزارت فرهنگ و ارشاد اسامی به شماره ثبت ۷۶۷۶۶ شده است. این نشریه حاصل فعالیت علمی مشترک دانشگاه فردوسی مشهد و انجمن هیدرولیک ایران است.

فهرست مطالب

۱ **(سرمقاله) امنیت غذایی پایدار**
سعید مرید

٤ **مدیریت سیلاب شهری با هدف تأمین بخشی از آب مورد نیاز فضای سبز پردیس دانشگاه فردوسی مشهد**
سعید افراسیابی، سعیدرضا خداشناس، ابوالفضل مساعدی

۱۷ **امنیت غذایی در قرن بیست و یکم: بررسی چالش‌ها، تهدیدها و راهکارهای پایداری**
ایمان حاجی‌راد، پریا پورمحمد

۳۲ **مدل‌سازی هیدرولیکی و ارائه اجرایی به منظور مدیریت کیفی آب ورودی به تصفیه‌خانه آب دارخوین**
داود حری، جواد احدیان، محمود شفاعی بجستان و سید محسن سجادی

۴۵ **بررسی عددی میدان سه‌بعدی جریان پیرامون آب‌شکن‌های رودخانه‌ای در حالت قرارگیری گروهی**
فریبا گلچین، نازیلا کاردان، مهدی دینی

۶۳ **مروری بر روش‌های آزمایشگاهی و عددی در مدل‌سازی فرونشست: چالش‌ها و راهکارها**
علی اصغری، حسین سرباز

۸۰ **تحلیلی بر جریان برگشتی، اهمیت و مقدار آن در ایران و سایر کشورهای جهان**
زهرا کاظمی، عزیز مجیدی، اسماعیل علیزاده، جهانبخش میرزاوند

۱۰۵ **شناسایی عوامل اجتماعی و روان‌شناختی موثر بر مصرف آب خانگی شهر تهران**
مجید رامشینی، بهمن حاجی‌پور

۱۲۱ **بررسی امنیت تأسیسات آب شرب و زیرساخت‌های آن با رویکرد پدافند غیرعامل در یک شهر بصورت پایلوت**
علی نصیریان، ابوالفضل اکبرپور، علی‌اکبر عامری، مهسا مردانی

۱۳۹ **طراحی یک برنامه درسی جامع آموزش حواس افزوده محیط‌زیست با تمرکز بر «آب» (ویژه متوسطه اول)**
امیرعلی برومند، محمدجواد امیری

۱۵۶ **مروری بر کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت هوشمند آبیاری**
زهرا ایاب کوشک گذر، سید محمدرضا ناقدی فر، علی‌نقی ضیایی

۱۶۴ **بررسی تاثیر تفاوت‌های اقلیمی بر تغییرات و نوسانات فصلی و سالانه بارش در کشور**
امیرحسین کریمی خلیل‌آباد، ابوالفضل مساعدی، سیدمحمدرضا ناقدی‌فر

۱۸۱ **هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید در تصفیه آب: مکانیسم‌ها، کاربردها و چشم‌اندازهای آینده (یک مطالعه مروری)**
علیرضا رادخواه، سهیل ایگدری، صدیقه آتش‌افرازه

۲۰۶ **(یادداشت تحلیلی) ورشکستگی آبی و ناامنی غذایی: تحلیل چندلایه بحران امنیت آبی–غذایی ایران و راهبردهای گذار**
علیرضا رادخواه، سهیل ایگدری

۲۱۶ **کنکاشی بر علل و اثرات آلودگی منابع آب و محیط زیست در ایران**
دکتر کاظم اسماعیلی، وحیده مرتضوی امیری، مائده اسکوهی

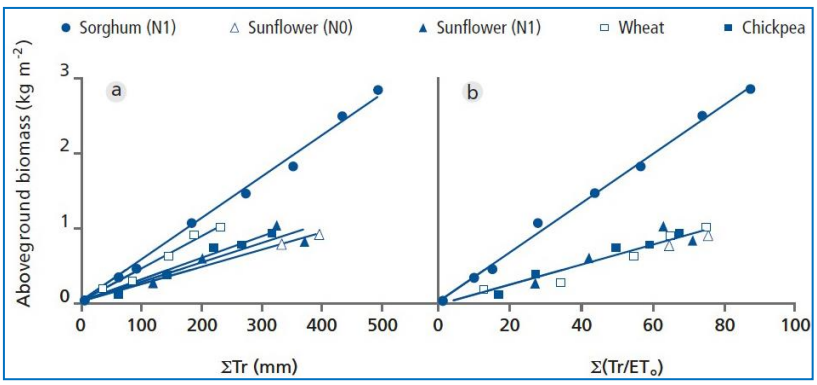
سرمقاله



سعید مرید
استاد دانشکده کشاورزی،
دانشگاه تربیت مدرس

امنیت غذایی و پایداری

میان امنیت ملّی و امنیت غذایی رابطه‌ای دوطرفه برقرار است. این‌که در تعریف امنیت ملّی تا چه اندازه توان اکولوژیکی کشور لحاظ شود و متقابلاً امنیت غذایی- به‌ویژه با تأکید بر خودکفایی در محصولات اساسی، تا چه حد می‌تواند امنیت ملّی را پشتیبانی کند، قسمتی از این فرایند دوسویه محسوب می‌شود. با توجه به شرایط کنونی کشور، بخش دوم این رابطه بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته و در نتیجه، فشار قابل‌توجهی بر منابع آب وارد کرده است. با وجود این، پرسش کلیدی همچنان پابرجاست: کشورها چگونه می‌توانند غذای بیشتری را برای تقویت امنیت ملّی تأمین کنند؟ یکی از مهم‌ترین پاسخ‌ها، افزایش بهره‌وری و «جبران خلأ عملکرد» است؛ موضوعی که در سطح جهان به شیوه‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته است (Davis و همکاران، ۲۰۱۴). هرچند، این پاسخ و راهبردهای متعاقب آن امیدبخش است، اما این دغدغه‌ها نیز وجود دارد که حجم نهاده‌هایی که چنین راهبردی نیاز دارد تا چه حد «پایدار» می‌باشد و آثار محیط‌زیستی آن چگونه است (Tilman و همکاران ، ۲۰۱۱؛ Garnett وهمکاران،۲۰۱۳)؟ معمولاً رفع خلأ عملکرد از طریق مدیریت بهینه سم، کود و آب صورت می‌گیرد. نهاده‌های نخست و دوم، قابلیت تجارت دارند، اما نهاده سوم یعنی آب از چنین ویژگی‌ای برخوردار نیست؛ ماده‌ای که در بسیاری از نقاط جهان- از جمله ایران، از پیش در معرض تنش شدید بوده و در عین حال، از مهم‌ترین عوامل رفع خلأ عملکرد به شمار می‌رود. برای نمونه، رابطه این دو متغیر در شکل (۱) مشاهده می‌شود. شکل نشان می‌دهد که چگونه افزایش تولید تعدادی از محصولات راهبردی، افزایش تبخیر و تعرق را نیز به همراه دارد.



شکل ۱- رابطه افزایش علمکرد و افزایش تبخیرو تعرق در تعدادی از محصولات زراعی (Intrigliolo، ۲۰۲۰)

در پژوهشی در سطح جهان توسط Davis و همکاران (۲۰۱۷) شکاف عملکرد محصولات کشاورزی و محدودیت آب ارزیابی شد و این پرسش مطرح گردید که آیا منابع آب لازم برای کاهش این شکاف در مقیاس ملّی در دسترس است یا خیر؟ نتایج نشان داد که برای کاهش این شکاف، تخصیص آب شیرین برای آبیاری باید دست‌کم ۱۴۶ درصد افزایش یابد. در بیشتر کشورهای مورد مطالعه- از جمله ایران، جهت جبران خلأ عملکرد، نیاز به آب آبی حداقل دو برابر می‌شد. قابل توجه آنکه ۷۱ درصد این افزایش به چهار محصول اصلی ذرت، برنج، سویا و گندم اختصاص داشت. همچنین گزارش شد که حجم آب موردنیاز، بسیار فراتر از سطوح پایدار مصرف آب شیرین در کشورهای مورد بررسی خواهد بود.

اما از منظری دیگر، در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، هنگامی که سخن از افزایش بهره‌وری آب و تولید بیشتر به میان می‌آید، عامل مهم دیگری وجود دارد که کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد، یعنی نمک و شور شدن اراضی. چالشی که سال‌هاست موجب نگرانی مسئولان شده است (خبرگزاری آنا، ۱۴۰۴) و سطح اراضی در معرض این پدیده را تا ۱۰ میلیون هکتار اعلام کرده‌اند (خبرگزاری دانشجویان ایران، ۱۴۰۳). بخشی از علت شور شدن اراضی را می‌توان در فقدان نگاه نظام‌مند به مدیریت آب کشاورزی و نادیده‌گرفتن نقش بی‌بدیل آبِ برگشتی جست‌وجو کرد. در حال حاضر، نظام برنامه‌ریزی آب کشور- از جمله در برنامه هفتم، منابع آب را به بخش‌هایی جداگانه تقسیم می‌کند؛ برای نمونه، از کل منابع آب تجدیدپذیر، ۶۵ میلیارد مترمکعب به بخش کشاورزی اختصاص داده می‌شود. در ادبیات مدیریتی این بخش، اغلب شنیده می‌شود که «بهره‌بردار حق دارد تا آخرین قطره را مصرف کند». نتیجه چنین نگرشی آن است که آبِ برگشتی عملاً به صفر می‌رسد. اما آنچه در این رویکرد نادیده باقی می‌ماند، نقش حیاتی آبِ برگشتی در آبشویی اراضی است. در واقع، سیاست‌گذاری‌ها در مسیری حرکت می‌کنند که آب‌های برگشتی که بخشی مهم از سازوکارهای پایداری محیط‌زیست در حوضه‌های آبریز بوده‌اند، حذف شده و تمام آن در خدمت افزایش تولید قرار گیرد.

چالش فوق را می‌توان در رابطه میان شوری و افزایش بهره‌وری از طریق افزایش راندمان آبیاری مشاهده کرد؛ موضوعی که در بسیاری از اسناد کلان کشور در راستای افزایش تولید و کاهش مصرف آب مورد تأکید قرار گرفته است. در تحقیقی توسط Raeisi و همکاران (۲۰۲۱) در حوضه طشک-بختگان نشان داده شد که افزایش راندمان آبیاری تا ۸۰ درصد می‌تواند عملکرد گندم را حدود ۲۰ درصد افزایش دهد. در نتیجه، بهره‌وری فیزیکی آب[1] تا ۲/۲ برابر افزایش می‌یابد، حال آنکه اصل بهره‌وری۲ تقریباً ثابت مانده و تنها ۱/۱ برابر بهبود پیدا می‌کند. نسبت‌هایی مشابهی توسط Ward و Pulido-Velazquez (۲۰۰۸) نیز گزارش شده است. در ادامه نیز گزارش شد که افزایش راندمان آبیاری به‌طور مستقیم موجب تجمع بیشتر نمک در پروفیل خاک می‌شود، به‌گونه‌ای که این مقدار می‌تواند تا دو برابر بیشتر از الگوی آبیاری با راندمان ۴۰ درصد باشد. روشن است که کاهش جریان برگشتی عامل اصلی این شرایط است.

آنچه در این مختصر بیان شد، تأکید بر این دغدغه است که در هر برنامه‌ریزی برای افزایش تولید و ارتقای امنیت غذایی، باید اصل پایداری به‌طور جدی مدنظر قرار گیرد. یافته‌های پژوهش‌هایی مانند (Davis و همکاران، ۲۰۱۴؛ Raeisi و همکاران، ۲۰۲۱)، تأکید می‌کنند که تلاش برای عملکرد بیشتر محصولات کشاورزی و یا افزایش بهره‌وری از طریق توسعه آبیاری، می‌تواند تقاضاهای جدیدی برای منابع آب ایجاد نماید. بنابراین، هرچند این افزایش در سطح ملّی می‌تواند به ارتقاء امنیت غذایی و کاهش وابستگی به واردات بینجامد، اما چنین راهبردهایی باید بطور سیستمی و نظامند، مولفه‌های دیگری خارج از صرف تولید را نیز مد نظر قرار دهند. مولفه‌هایی مانند: افزایش مصرف آب، تأثیر شوری خاک، تغذیه سفره‌های آب‌زیرزمینی و جریان‌های محیط زیستی. نگاه یک بعدی و برجسته شدن تولید بیشتر محصولات کشاورزی شاید در کوتاه مدت پاسخگو به برخی از اهداف امنیت غذایی باشد، ولی دربلند مدت، خود تهدیدی برای امنیت غذایی خواهد شد. متأسفانه، زمانی هم این تهدید خود را بروز می‌نماید که شاید دیگر آب و خاک، فرصتی برای برگشت نداشته باشند.

منابع

خبرگزاری دانشجویان ایران (ایسنا). (۱۴۰۳). ۱۰ میلیون هکتار از اراضی کشور شور شده است. کدخبر: ۱۴۰۳۰۴۲۳۱۵۴۸۴. isna.ir/news/14030423154 84/

خبرگزاری آنا. (۱۴۰۴). میلیون‌ها اراضی کشاورزی در حریم شهرها در تله توسعه. کدخبر: ۱۰۱۷۱۴۷. ana.ir/fa/news/1017147

Davis, K. F., Rulli, M. C., Garrassino, F., Chiarelli, D., Seveso, A., & D'Odorico, P. (2017). Water limits to closing yield gaps. Environmental Research Letters, 12(6), 064019. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6cd8

Garnett, T, et al. (2013). Sustainable intensification in agriculture: premises and poli- cies. Science 341, 33–34. http://dx.doi.org/10.1126/science.1234485

Intrigliolo, D. S. (2020). Deficit irrigation strategies and main results in real case studies. FAO online administered course: Management of water resources in agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/

Raeisi, L. G., Morid, S., Delavar, M., & Srinivasan, R. (2021). Effect and side-effect assessment of different agricultural water saving measures in an integrated framework. Agricultural Water Management, 243, 106468. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106468

Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B.L. (2011). Global food demand and the sustain- able intensification of agriculture. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 108, 20260–20264. http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1116437108

Ward, F. A., & Pulido-Velazquez, M. (2008). Water conservation in irrigation can increase water use. Proceedings of the National Academy of Sciences, pnas-0805554105.

پی‌نوشت‌ها

۱-عملکرد تقسیم بر آب برداشت شده

۲-عملکرد تقسیم بر تبخیروتعرق واقعی

Journal of Water and Sustainable Development. December 2025
Volume 12. Lssue 3 (Serial No. 37). pages 4 to 16

نشریه آب و توسعه پایدار. آذر ماه ۱۴۰۴
سال دوازدهم. شماره سوم (پیاپی ۳۷). صفحات ۴ تا ۱۶

Document Type: Applied Article

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

Urban Flood Management With the Aim of Supplying a Portion of the Water Required for the Green Spaces of Ferdowsi University of Mashhad Campus

S. Afrasiabi[1], S. R. Khodashenas[2*], A. Mosaedi[2]

1- M.Sc. Graduate in Water Structures, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*** Corresponding Author Email:** khodashenas@um.ac.ir

Received	21-01-2025
Revised	02-04-2025
Accepted	21-04-2025
Available online	16-12-2025

Abstract

The expansion of urbanization and increased impervious surfaces have led to higher peak discharge and flood volume in urban areas. Therefore, managing surface runoff in cities using BMP/LID strategies has become increasingly important. This study examines the impact of a storage basin on runoff management for the Delavaran, Sarafrazan, Chaharcheshmeh, and Ab-o-Barq watersheds within the Ferdowsi University of Mashhad (FUM) campus and its role in supplying part of the irrigation water demand for the campus's green spaces. The SWMM rainfall-runoff model was employed for runoff simulation, and model calibration was conducted considering the factors affecting peak discharge. Due to the absence of hydrometric stations, rainfall and peak discharge for 18 rainfall events from October 2023 to October 2024 were measured, and the model was calibrated using the first 13 events. In the validation stage, the average evaluation criteria for the subsequent five events were 2.5, 0.9, and 0.92, respectively. Additionally, the FUM campus's design of a flood storage reservoir with dimensions of 10×40×200 meters demonstrated that it could supply 190,000 cubic meters of the 320,000 cubic meters required for irrigating the campus's green spaces during the study period. The construction of this reservoir is expected to reduce peak flood discharge by up to 38%, decrease the total annual flood volume by 10% at the FUM campus outlet, and supply more than half of the irrigation water needed for the campus green spaces.

Keywords: Flood Storage Reservoir, Rainfall-Runoff Modeling, Ferdowsi University of Mashhad Campus, Green Space, SWMM.

مدیریت سیلاب شهری با هدف تأمین بخشی از آب مورد نیاز فضای سبز پردیس دانشگاه فردوسی مشهد

سعید افراسیابی[۱]، سعیدرضا خداشناس[۲*]، ابوالفضل مساعدی[۲]

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

***رایانامه نویسنده مسئول:** khodashenas@um.ac.ir

تاریخ دریافت	۱۴۰۳/۱۱/۰۲
تاریخ بازنگری	۱۴۰۴/۰۱/۱۳
تاریخ پذیرش	۱۴۰۴/۰۲/۰۱
تاریخ انتشار	۱۴۰۴/۰۹/۲۵

چکیده

گسترش شهرنشینی و افزایش سطوح غیرقابل نفوذ، باعث افزایش دبی اوج و حجم سیلاب‌ها در مناطق شهری شده است. بنابراین، مدیریت رواناب‌های سطحی در شهرها با استفاده از راهکارهای BMP/LID اهمیت زیادی پیدا کرده است. پژوهش حاضر به بررسی تاثیر حوضچه ذخیره در مدیریت رواناب برای حوضه‌های مسیل دلاوران، سرافرازان، چهارچشمه، آب و برق در محدوده پردیس دانشگاه فردوسی مشهد و تأمین بخشی از نیاز آبی فضای سبز این مکان پرداخته است. مدل بارش-رواناب SWMMبرای شبیه‌سازی رواناب استفاده شد و باتوجه‌به عوامل تأثیرگذار در دبی اوج، فرآیند کالیبراسیون مدل انجام شد. به دلیل عدم وجود ایستگاه‌های هیدرومتری، بارش و دبی اوج برای ۱۸ رخداد بارش از مهر ۱۴۰۲ تا مهر ۱۴۰۳ اندازه‌گیری و مدل بر اساس ۱۳ رخداد اولیه واسنجی شد. در مرحله صحت‌سنجی، میانگین معیارهای ارزیابی برای پنج رخداد بعدی ۲/۵، ۰/۹ و ۰/۹۲ به‌دست آمد. همچنین، نتایج طراحی یک مخزن ذخیره سیلاب در محل پردیس دانشگاه فردوسی مشهد به ابعاد ۱۰×۴۰×۲۰۰ متر، نشان داد که این مخزن قادر است ۱۹۰ هزار متر مکعب از ۳۲۰ هزار متر مکعب آب مورد نیاز آبیاری فضای سبز پردیس دانشگاه فردوسی مشهد را در بازه زمانی مطالعاتی تأمین کند. احداث این مخزن باعث کاهش حداکثر ۳۸% دبی پیک سیلاب و کاهش ۱۰% حجم کل سیلاب خروجی سالانه از خروجی پردیس دانشگاه فردوسی مشهد و تأمین بیش از نیمی از آب مورد نیاز فضای سبز این پردیس خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: مخزن ذخیره سیلاب، مدل‌سازی بارش-رواناب، پردیس دانشگاه فردوسی مشهد، فضای سبز، SWMM

How to cite this article:
Afrasiabi, S., KHodashenas, S.R. & Mosaedi, A. (2025). Urban flood management with the aim of supplying a portion of the water required for the green spaces of Ferdowsi University of Mashhad campus. Journal of Water and Sustainable Development, 12(3), 4-16. https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i3.2501-1398

مقدمه

با رشد سریع ساخت و سازهای شهری و همین‌طور ایجاد و توسعه زیر ساخت‌ها، سیلاب در حوضه‌های شهری شدیدتر و بیشتر شده است (Bhattacharya،۲۰۱۰). مدل‌سازی رواناب حاصل از بارندگی در حال حاضر اهمیت زیادی دارد. زیرا رویدادهایی چون شهرنشینی، رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی باعث تغییرات چشمگیر در خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه‌های شهری شده است. این تغییرات باعث افزایش رواناب شده و نیاز به سیستم‌های مناسب جهت مدیریت آن را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. در گذشته، سیستم‌های زهکشی و شبکه‌های آب سطحی برای تخلیه سریع سیلاب طراحی می‌شدند، اما توسعه سریع شهری و اشباع شبکه‌ها موجب ناکارآمدی سیستم‌ها و بروز آبگرفتگی در مناطق شهری شده است (تاج‌بخش و خداشناس، ۱۳۹۱). این مشکلات می‌تواند خسارات زیادی به زیرساخت‌ها و فعالیت‌های اقتصادی وارد کند و همچنین تردد را مختل کند (Schmitt و همکاران، ۲۰۰۴). آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا، برای حل این مشکلات، از مفهوم توسعه با اثرات کم (LID[1]) استفاده می‌کند که بر مدیریت رواناب و کاهش حجم سیلاب تأکید دارد. این اقدامات شامل استفاده از روش‌های مدیریتی همچون مخازن ذخیره سیلاب، ترانشه‌های نفوذ، جوی باغچه‌ها و روکش‌های نفوذپذیر است که علاوه بر کنترل سیلاب، به بهبود کیفیت آب، افزایش تغذیه آب‌های زیرزمینی و کاهش دمای محیط کمک می‌کنند (Jia و همکاران، ۲۰۰۲). مفهوم بهترین اقدامات مدیریتی سیلاب (BMP[2]) به مجموعه‌ای از تکنولوژی‌ها و روش‌های مدیریتی اطلاق می‌شود که هدف آن کاهش تأثیرات توسعه شهری بر رژیم جریان آب‌های سطحی است (Chow و همکاران، ۱۹۸۸). همچنین، در کشورهای پیشرفته‌ای چون هلند، سیلاب‌ها به‌طور هدفمند به مناطق پست هدایت و جمع‌آوری شده و از آن برای تأمین آب ایستگاه‌های آتش‌نشانی استفاده می‌شود (Jang و همکاران، ۲۰۰۷). پیش‌بینی سیلاب به عنوان یکی از مهمترین روش‌های کاهش خطر سیلاب محسوب می‌شود. مدیریت سیلاب در مناطق شهری در شرایط بارش‌های شدید و سیل‌آسا بسیار ضروری است، زیرا این پدیده‌ها می‌توانند آسیب‌های اقتصادی و اجتماعی فراوانی به بار آورند (قبادی، ۱۳۹۷).

خداشناس و تاج بخش (۱۳۹۱) شبکه زهکشی رواناب سطحی در حوضه آبریز اقبال شرقی واقع در شهر مشهد را با استفاده از شبیه‌سازي توسط SWMM بررسی کردند. آن‌ها همچنین کارایی حوضچه‌هاي تاخیري را نیز بررسی کردند و ۳ مکان جهت احداث این حوضچه‌ها را شناسایی کردند. ارزیابی عملکرد شبکه توسط مدل SWMM نشان داد که در محدوده مورد مطالعه ۶ مجرا دچار مشکل بود. بدیعی‌زاده و همکاران (۱۳۹۴) به منظور تعیین ابعاد بهینه‌ی شبکه زهکشی شهر گرگان از مدل هیدرولوژی- هیدرولیکی SWMM استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده از واسنجی مدل نشان داد که دبی اوج و حجم جریان ناشی از شبیه‌سازی با مقادیر مشاهداتی تطابق خوبی داشته است. احمدی شرف و تجریشی (۱۳۹۳) روشی ابتکاری برای جانمایی حوضچه‌های ذخیره برای استفاده بهینه از این تاسیسات با بهره گیری از SWMM برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی، GIS و روش‌های تصمیم گیری چندمعیاره برای حوضه درکه شهر تهران ارائه کردند. خروجی حاصل نقشه‌ای بود که میزان تناسب هر نقطه از حوضه را برای احداث حوضچه نشان داد. با الگوریتم ارائه شده می‌توان روند جانمایی این تاسیسات و سایر BMP ها را در سطح یک شهر بهبود بخشید. مختارپور و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از قابلیت‌های مدل SWMM برای منطقه ۴ شهر تهران، باتوجه‌به عوامل محیطی، دو طرح از بهترین راهکارهای مدیریتی (BMP) تحت سناریوی شبکه نفوذ و مخازن تاخیری جهت کنترل حداکثر رواناب از نظر کمی انجام دادند. نتایج نهایی گویای عدم کارایی مناسب در بخش‌های مختلف شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی موجود در محدوده مورد مطالعه بود. همچنین استفاده از راهکارهای مدیریتی موجب شد زمان رسیدن به دبی اوج هیدروگراف سیل ۱۵دقیقه افزایش یابد. شکوهی‌مهر و همکاران (۱۳۹۸) میزان اثر بخشی مخازن کنترل سیلاب در کاهش دبی اوج سیلاب با استفاده از مدل SWMM در آبریز شرق تهران برای بارش‌های با تداوم مختلف در ۴ نقطه شبکه، در دوره بازگشت‌های مختلف ۲ و ۲۵ سال را بررسی کردند. نتایج حاصل در این ۴ نقطه نشان داد که مخازن دارآباد و سرخه حصار در بارش بادوره بازگشت ۲ سال و تداوم ۳ ساعته و مخازن حوضه تهرانپارس در بارش با دوره بازگشت ۲۵ سال و تداوم ۲۴ ساعت، به ترتیب با مقادیر ۷۸٪ ، ۱۸٫۳۹٪ ، ۱۰٫۲۹٪، بیشترین تاثیر را در کاهش دبی اوج رواناب داشتند. وفایی و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی به ارزیابی خطر سیلاب در پردیس دانشگاه فردوسی مشهد پرداختند که با استفاده از مدل HEC-RAS و داده‌های میدانی، پهنه‌بندی سیلاب برای دوره‌های بازگشت مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که کانال‌های موجود توانایی عبور سیلاب‌های با دوره بازگشت ۲ و ۱۰ ساله را دارند، اما در دوره‌های بازگشت بالاتر، به دلیل محدودیت‌های سازه‌ای، آبگرفتگی رخ می‌دهد. در نتیجه، راهکارهایی مانند ایجاد دیواره‌های حفاظتی و افزایش ظرفیت مقاطع خروجی برای کاهش خسارات پیشنهاد دادند. جزائری و همکاران (۱۴۰۲) با هدف شبیه سازی شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی در منطقه دو شهرداری تهران مدل SWMM را استفاده کردند. ایشان به منظور استفاده از روش‌های توسعه کم‌اثر، روش‌هاي استفاده از بشکه باران، ترانشه نفوذ و ترکیب هر دو روش را بررسی کردند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد دبی اوج سیلاب در دوره بازگشت ۱۰ سال، در سناریوی اول (شامل ۱۰۴۹ بشکه باران) ۲۲٪، در سناریوی دوم (شامل ۲۰۹۸ بشکه باران) ۳۱٪، در روش ترانشه نفوذ ۲۹٪ و در روش ترکیبی ۵۰٪ کاهش خواهد داشت. امینی یزدی و

فغـور مغربـی (۱۴۰۲) در پژوهشـی، تـأثیر مخـازن تـأخیری بـر کنتـرل سـیلاب در حوضـه شـرق مشـهد را بررسـی کردنـد. مدل‌سـازی بـا اسـتفاده از SWMM5.0 و سـامانه اطلاعـات جغرافیـایی (GIS) انجـام شـد. بـا ارزیـابی ۱۱ سـناریو مختلـف (اقتصـادی-هیـدرولیک)، سـناریو اسـتفاده از چهـار مخـزن تـأخیری بـه‌عنوان بهتـرین راهکـار هیـدرولیکي شـناخته شـد. همچنـین، سـناریو اسـتفاده از دو مخـزن تـأخیری بـه‌عنوان بهتـرین راهکـار اقتصـادی شـناخته شـد. ایشـان بـه ایـن نتیجـه رسیدند که استفاده از مخازن تأخیری می‌تواند جریان سیلاب را به‌طور موثر کاهش دهد و زمان اوج سیلاب را افزایش دهد. Bhaskar و همکـاران (۲۰۱۶) بـا انجـام پژوهشـی بـر روی یـک حوضـه در کلارکسـبرگ، مریلنـد کـه شـامل ۷۳ تاسیسـات مدیریت آب باران با تمرکز بر نفوذ، در یک حوضه آبخیز ۱۱/۱ کیلومتری طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴، دریافتند که استفاده از روش‌هـای توسـعه کم‌اثـر عـلاوه بـر کـاهش خطـرات ناشـی از سـیلاب‌ها، باعـث بهبـود وضـعیت آب‌هـای زیرزمینـی نیـز می‌شـود. Jiang و همکـاران (۲۰۱۵) بیـان کردنـد چـین کشـوری است کـه سـریع‌ترین رشـد شهرنشـینی در دهـه‌های گذشـته را تجربه کرده که این مسئله سبب ایجاد سیلاب‌های جدی در شهرها شده است. به این منظور ایشان، سیلاب شهری در شهر دونگوان در جنوب چین را که به سرعت شهرنشین شده است، شبیه‌سازی نمودند. نتایج حاصل از شبیهسازی نشان داد که برای بارش‌های با دوره بازگشت ۱ ساله، منطقه مورد مطالعـه هـیچ سـیلابی نخواهـد داشـت، امـا بـرای بارش‌هـای بـا دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ ساله منطقه مورد مطالعه زیر آب خواهـد رفـت. نتـایج ایشـان نشـان داد کـه مـدل SWMM برای پیش بینی سیلاب در شهرها امیدوارکننده است. Takele و Bibi (۲۰۲۲) بـا هـدف بررسـی اثـرات اسـتفاده از زمـین و تغییرات آب و هوایی بر اوج رواناب و حجم سیل و همینطور ارزیابی اثر بخشی توسعه کم‌اثر با استفاده از SWMM (نسخه ۵/۱) بـه ایـن نتیجـه رسـیدند کـه شـهر Dodola افـزایش قابـل تـوجهی را در سـطح غیـر قابـل نفـوذ تجربـه کـرده و همینطـور نشان داد اوج رواناب و حجم سیلاب در منطقه مورد مطالعه تحت تاثیر جداگانه و ترکیبی تغییرات شدت بارندگی به دلیل تغییرات آب و هوایی و افزایش سطح غیرقابل نفوذ افزایش یافته است. Swathi و همکاران (۲۰۱۸) مدل مدیریت سیلاب SWMM را برای پردیس دانشگاهی BITS Pilani درحیدرآباد هند، بررسی کردند. در این پژوهش از رویداد بارندگی سال ۲۰۰۶، معادلـه نفـوذ هورتـون و آنـالیز مسـیریابی جریـان بـا استفاده از روش موج پویا برای مدل سازی استفاده شد. نتایج ایشان نشان داد در هیچ گره پس‌زدگی و سرریز جریان وجود نـدارد کـه حـاکی از آن اسـت سیسـتم جمـع‌آوری روانـاب دانشگاهي به خوبي برنامه‌ريزي شده و ظرفيت حمل كافي براي واقعه باراني شبيه‌سازي شده دارد.

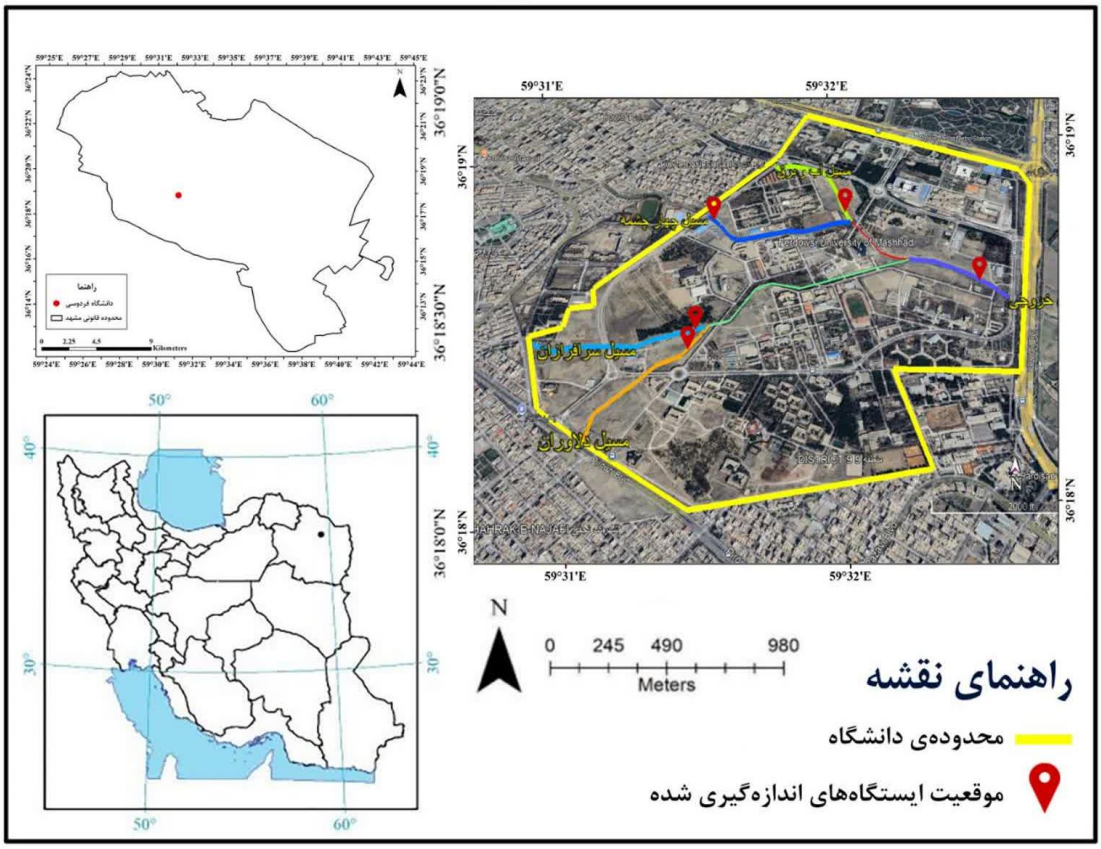
باتوجه‌به توسعه روز افزون و اهمیت منطقه‌ای و جهانی شهر مشهد به دلیل قرار گرفتن مرقد مطهر امام رضا (ع)، کنترل سـیلاب و رواناب در ایـن شـهر، طراحـی مناسـب و همینطـور آگاهی از عیوب طراحی قدیمی کانال‌ها و جوی‌های موجود در مشـهد اهمیـت خاصـی پیـدا می‌کنـد. بـه گفتـه مسـئولین شـهر مشـهد در سـال ۱۳۹۴، سـیلاب سـبب مصـدومیت ۲ نفـر در ایـن شـهر شـد (پایگـاه خبـری تابنـاک، ۱۳۹۴) از طـرف دیگـر، وقـوع بارنـدگي سيل‌آسـا در تـاريخ ۲۶ ارديبهشـت مـاه ۱۴۰۳ در ايـن شـهر کـه در ۲۰ سـال اخيـر بي‌سـابقه بـود متاسـفانه بـيش از۱۰ کشته و مصدوم را در پي داشت. بنابراين، باتوجه‌به اهميت فرهنگی، گردشگری، سیاسی و اقتصادی شهر مشهد در بعد ملـی و بین‌المللـی، نیـاز بـه مطالعـه و بررسـی‌های علمـی و به‌کارگیری روش‌های نوین کنترل و حفاظت شهرها در مقابل سیل ضروری به نظر می‌رسد. بنا براین، هدف از این پژوهش مدل‌سـازی سـیلاب شـهری (بـا اسـتفاده از مـدل SWMM) در بخشـي از حوضـه شـهري مشـهد (شـامل حوضـه‌هاي دلاوران، سرافرازان، چهارچشمه و آب و برق که رواناب آنها به پردیس دانشـگاه فردوسـی مشـهد وارد می‌شـوند) و همچنـین امکان‌سنجی ذخیره رواناب و طراحی حوضچه ذخیره رواناب در پـردیس ایـن دانشـگاه بـه منظـور آبیـاری فضـای سـبز ایـن پرديس مي‌باشد.

مواد و روش‌ها

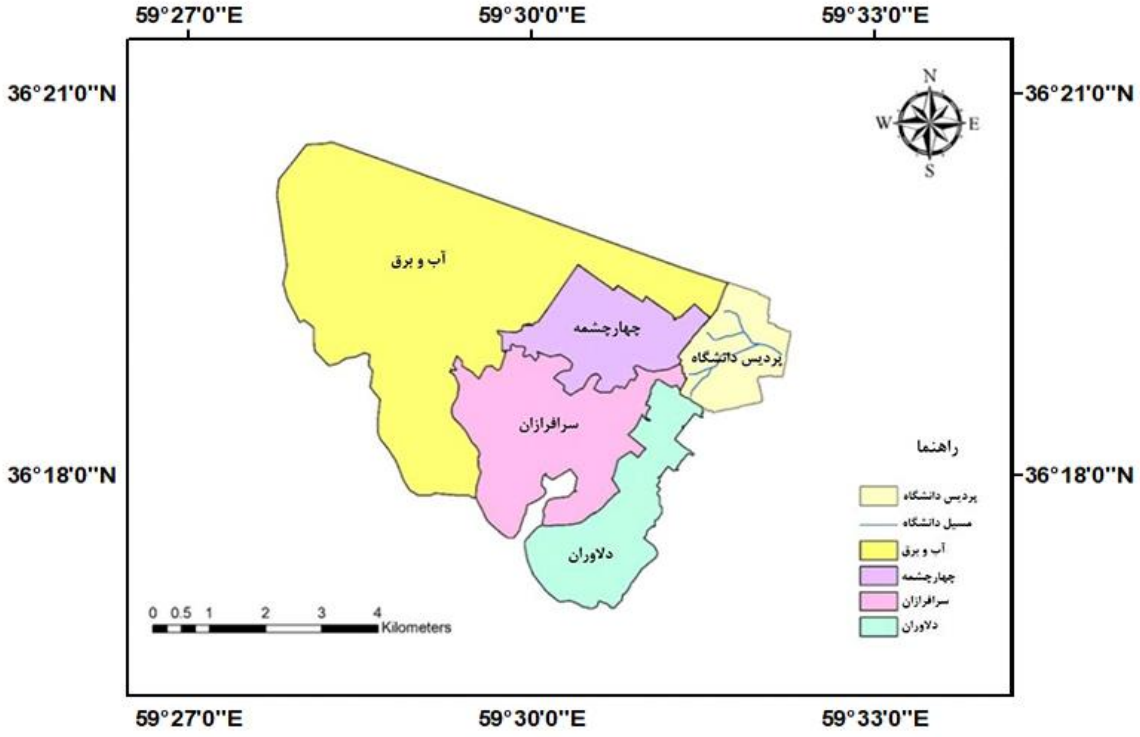
معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضـه شـهري بالادسـت پـرديس دانشـگاه فردوسـی مشـهد، محـدوده مـورد مطالعـه در ایـن پـژوهش می‌باشـد. پـردیس دانشگاه فردوسی مشهد با وسعت حدود ۲/۷۷ کیلومتر مربع در منطقه ۹ شهرداری شهر مشهد واقع شده است. این محل از شمال به بلوار وکیل آباد، از شرق به بلوار کلانتری، از جنوب به بلـوار پیـروزی و از غـرب بـه بلـوار بـاهنر محـدود مي‌شـود. در شـکل (۱) موقعیـت جغرافیـایی پـردیس دانشـگاه فردوسـی مشـهد بـه همـراه محـدوده و کانال‌هـای اصـلی آن نشـان داده شده است.

منطقـه ۹ مشـهد دارای ۳ ناحیـه و ۱۲ محلـه می‌باشـد کـه آب‌های سطحی در این منطقه به وسیله مسیل ناحیه آب و برق جمع‌آوری می‌شود. این مسیل از بلوار برونسی شروع و بعد از گذشتن از اراضی پاچنار و تقاطع با بلوارهای هفت‌تیر، هنرسـتان، هاشـمیه، کـوثر و بلـوار شـهید بـاهنر بـه محـدوده پردیس دانشگاه فردوسی مشهد وارد می‌شود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی پردیس دانشگاه فردوسی مشهد و کانال‌های اصلی آن



شکل ۲- مرز زیرحوضه‌های مربوط به محدوده مورد مطالعه

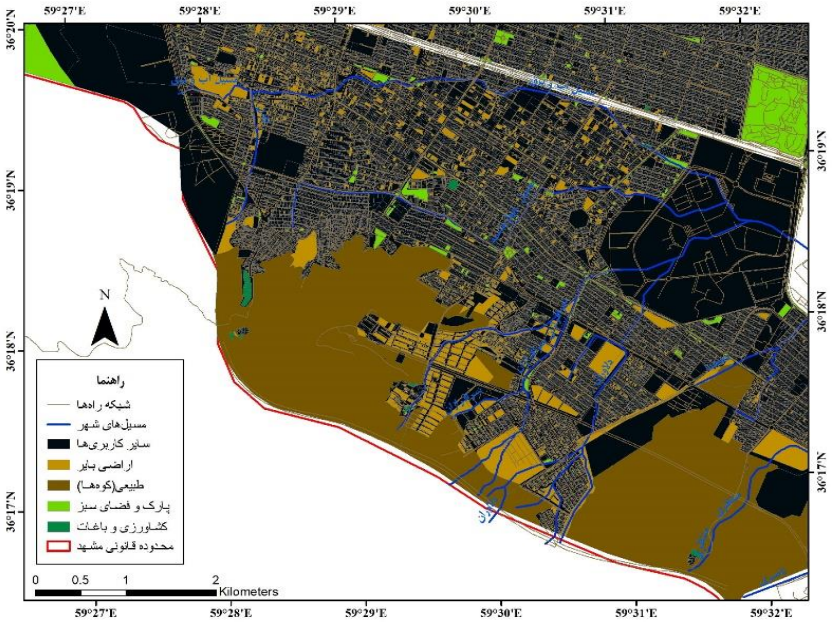
این مسیل در محدوده مورد مطالعه (دانشگاه فردوسی مشهد) با دیگر مسیل‌های دانشگاه مانند: مسیل دلاوران، سرافرازان و چهارچشمه ترکیب شده (شکل ۲) و در نهایت از قسمت شرقی دانشگاه خارج شده و بعد از ورود به باغ ملک

آباد در موقعیت ابتدا بلوار خیام به مسیل اقبال غربی پیوسته و در نهایت کل جریان وارد رود کشف رود می‌شود.

شبیه‌سازی در مدل SWMM

مدل مدیریت رواناب SWMM که برای اولین بار در سال ۱۹۷۱ توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده ارائه شد، یک مدل شبیه‌ساز بارش-رواناب پویا با مبنای فیزیکی است (Rossman، ۲۰۱۵). به طور کلی پارامترهای بخش ورودی مدل شامل ۶ مورد اصلی از متغییرهای محیطی می‌باشد که عبارتند از: ۱- داده‌های اقلیمی (بارش، دما، تبخیر و...)، ۲- مشخصات محدوده (زیرحوضه‌ها و پارامترهای نفوذ)، ۳- مشخصه‌های جریان‌های زیر سطحی، ۴- سیستم انتقال (لوله‌ها، کانال‌ها، مخازن ذخیره، گره‌ها و...)، ۵- پارامترهای مرتبط با کیفیت و آلودگی و ۶- کنترل‌های توسعه با اثرات کم.

برای همه مدل‌سازی‌ها ضرورتی بر وارد کردن تمام این پارامترها وجود ندارد (Niazi و همکاران ۲۰۱۷). یکی از کلیدی‌ترین پارامترهای ورودی در مدل SWMM، درصد سطوح یا اراضی نفوذ ناپذیر در زیرحوضه‌ها است. به همین دلیل، از لایه اطلاعاتی کاربری اراضی در حوضه جنوب غربی شهر مشهد که به طرح تفصیلی این ناحیه مربوط می‌شود، استفاده شد (شکل ۳). با این وجود تنها تکیه بر این اطلاعات کافی نیست، زیرا این نقشه‌ها جزئیات کاملی را ارائه نمی‌دهند. در بخش کوهستانی، کاربری‌ها به هتل‌ها، پردیس دانشگاه فردوسی و فضاهای سبز محدود است. بسیاری از زمین‌ها بایر هستند و این فضاها در نقشه کاربری اراضی به‌درستی نشان داده نشده‌اند. همچنین، فضاهای سبز در بلوارهای شهر و محوطه هتل‌ها وجود دارد.

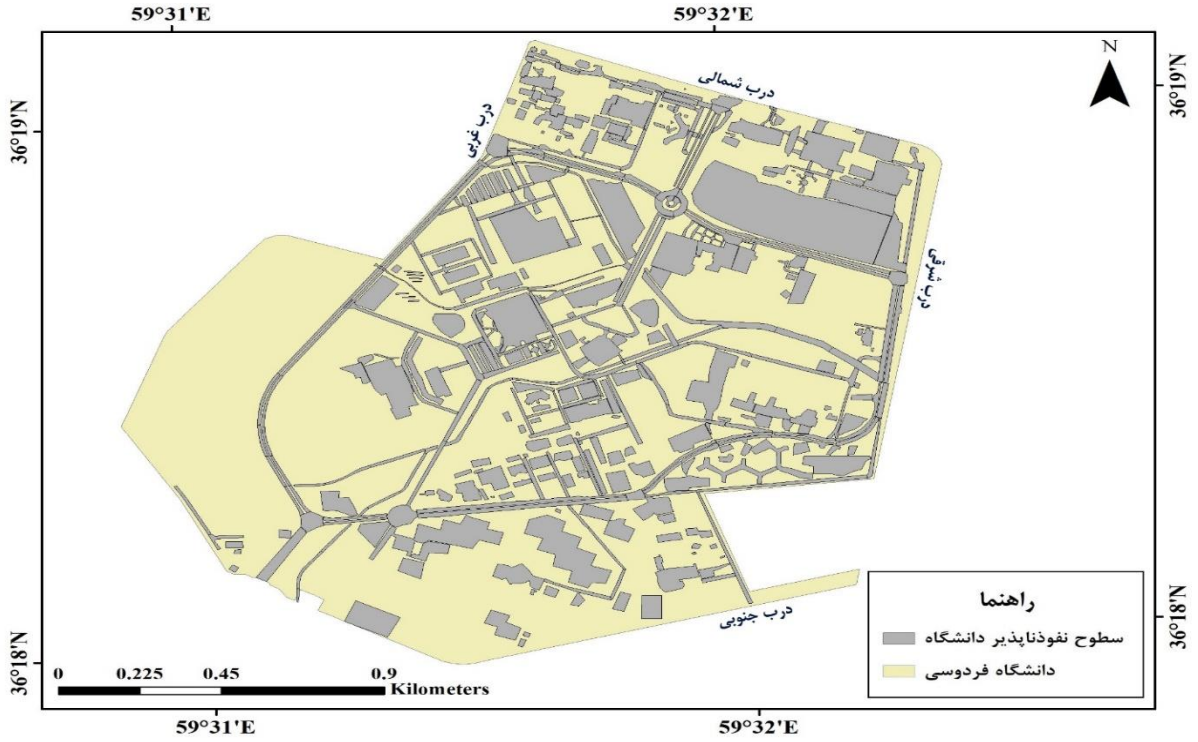


شکل ۳- تعیین سطوح نفوذ ناپذیر در زیر حوضه‌ها

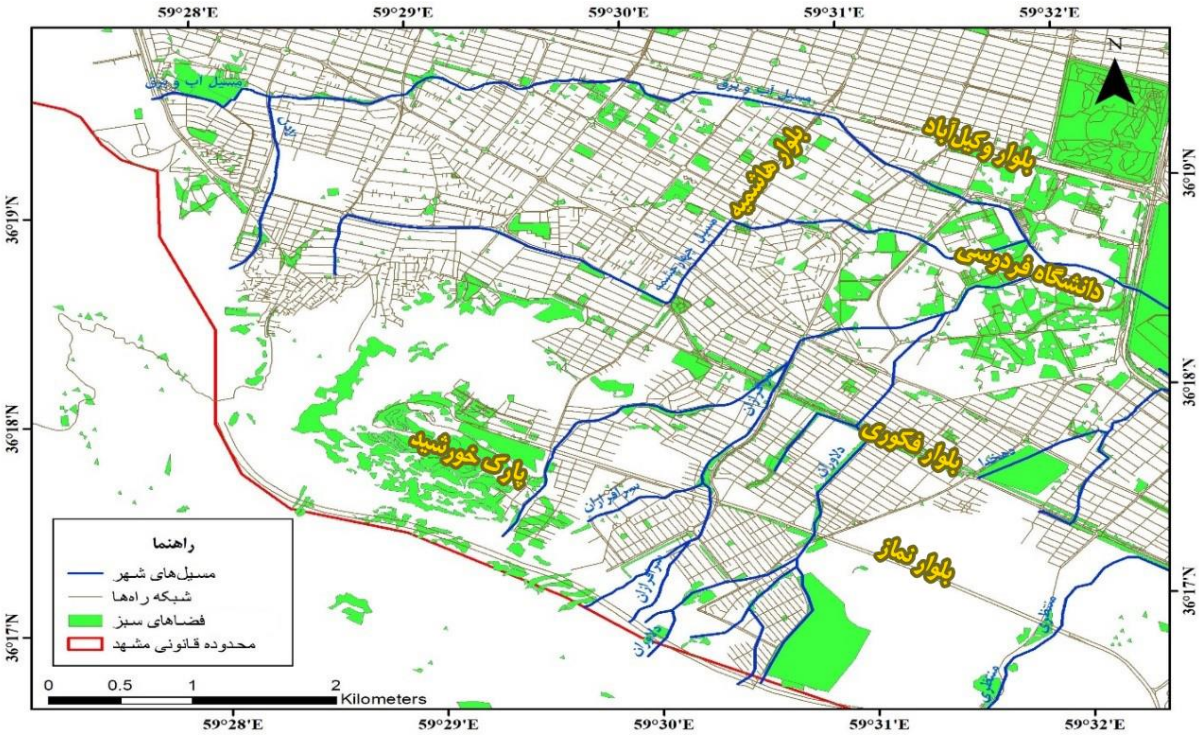
برای تحلیل داده‌ها، با بهره‌گیری از سامانه GEE [۳] از تصاویر سنجنده Sentinel 2 سال ۲۰۲۳ با رزولوشن ۳۰ متر استفاده شد. پس از بررسی مشخصات تصاویر، شاخص پوشش گیاهی (NDVI[۴]) به کمک کدنویسی در زبان جاوا اسکریپت محاسبه و استخراج شد. همچنین، از تصاویر ماهواره‌ای در سامانه Google Earth برای استخراج سطوح نفوذناپذیر و نفوذپذیر پردیس دانشگاه فردوسی استفاده شد که در شکل (۴) نمایش داده شده است.

اطلاعات استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای با داده‌های شهرداری همپوشانی شده تا میزان سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر هر زیرحوضه به دقت مشخص شود. وضعیت فعلی سطوح نفوذپذیر در حوضه در شکل (۵) نشان داده شده است. سپس با استفاده از ابزارهای Arctool box در محیط نرم‌افزار Arcmap 10.2، مساحت پیکسل‌های موجود (فضاهای سبز شهری) در هر حوضه محاسبه و میزان سطوح نفوذپذیر حوضه‌ها در مدل SWMM ثبت شد.

سایر پارامترها مانند: اطلاعات ارتفاعی در گره‌ها با استفاده از لایه داده‌های دیجیتال ارتفاع (DEM) برای شهر مشهد استخراج شد و در مدل ثبت شد. برای کانال‌ها، داده‌هایی شامل ابعاد، طول، زبری و دبی پایه از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی و جدول‌های راهنمای مدل ثبت شد. داده‌های ورودی برای زیرحوضه‌ها مانند مساحت زیرحوضه‌های تقسیم‌بندی شده، در نرم‌افزار Arcmap محاسبه شد، درصد نفوذناپذیری طبق توضیحات پیشین محاسبه و زبری سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر با استفاده از جدول‌های پیشنهادی به مدل افزوده شد.



شکل ۴- تعیین سطوح نفوذ ناپذیر پردیس دانشگاه فردوسی مشهد



شکل ۵- تعیین نهایی سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر در زیرحوضه‌های مطالعاتی

چالاب سطوح نفوذناپذیر بر اساس جدول‌های مربوطه تعیین و برای سطوح نفوذپذیر باتوجه‌به مقادیر پیشنهادی مدل و تفکیک کردن فضای سبز و زمین‌های بایر به‌صورت میانگین وزنی محاسبه شد. برای درصد سطوح نفوذ ناپذیر بدون چالاب، مقدار پیش‌فرض ۵۰ درصد در نظر گرفته شد، زیرا اطلاعات دقیقی در دسترس نبود. همچنین، پارامترهای نفوذ باتوجه‌به نوع خاک و عرض معادل در زیرحوضه‌ها باتوجه‌به راهنمای مدل بر اساس تقسیم مساحت هر زیر حوضه بر طول آبراهه همان حوضه محاسبه شده و در مراحل کالیبراسیون و واسنجی به‌طور دقیق‌تر تعیین شد. برای شبیه‌سازی در مدل، نوع فرآیند بارش-رواناب، روندیابی جریان به‌صورت موج دینامیک و روش محاسبه نفوذ انتخاب

شد. در تنظیمات مربوط به موج دینامیک، برای بخش اول نحوه حل معادلات سنت و نانت تعیین شده و سپس شرایط جریان در کانال باتوجه‌به عدد فرود و شیب سطح آب انتخاب شد. برای محاسبات افت جریان، از میان روابط هیزن ویلیامز و دارسی ویسباخ، رابطه هیزن ویلیامز انتخاب شد.

داده‌های اندازه‌گیری‌شده (بارش و ارتفاع سیلاب)

یکی از اصلی‌ترین ورودی‌های مدل، داده‌های مربوط به بارش است. به دلیل عدم یکنواختی بارش در شهر، فاصله زیاد حوضه مورد مطالعه تا ایستگاه سینوپتیک مشهد، اهمیت زمان شروع، پایان و شدت بارش، میزان بارش از ۰۱ مهرماه ۱۴۰۲ تا ۰۱ مهرماه ۱۴۰۳ که شامل ۱۸ رخ داد بود در محدوده پردیس دانشگاه فردوسی مشهد اندازه‌گیری شد. همچنین، ارتفاع آب در چهار کانال ورودی به دانشگاه فردوسی مشهد و یک کانال خروجی از پردیس دانشگاه فردوسی مشهد با نصب اشل اندازه‌گیری شد. نمونه‌ای از اندازه‌گیری ها در شکل (۶) مشاهده می‌شود.

یکی از نمونه اندازه‌گیری‌های صورت گرفته از عمق آب در کانال‌ها و ارتفاع بارش در طی مدت بارندگی و همینطور محاسبه دبی در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۶- اندازه‌گیری عمق رواناب حاصل از بارش در کانال‌های پردیس دانشگاه فردوسی مشهد

جدول ۱- برداشت دبی اوج در تاریخ ۱۴۰۲/۱۱/۰۷

کانال	موقعیت جغر افیایی	ساعت شروع	ساعت پایان	ارتفاع بارش (mm)	عمق آب در کانال (cm)	دبی (m3/s)
دلاوران	59°31'24.268" 36°18'20.471"	0:00	2:00	9	15	3.39
سرافرازان	59°31'23.774" 36°18'21.865"				9	1.25
چهارچشمه	59°31'24.639" 36°18'40.839"				75	4.13
آب و برق	59°31'47.504" 36°18'44.474"				12	2.02
خروجی	59°32'10.061" 36°18'32.074"				23	8.8

شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل

برای ارزیابی کمی عملکرد مدل از روابط ریاضی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE[۵])، ضریب نش-ساتکلیف (NS[۶]) و ضریب تبیین (R^2) با مقایسه مقادیر دبی اوج مشاهداتی و شبیه‌سازی استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{O_i} - Q_{S_i})^2}{n}} \quad (۱)$$

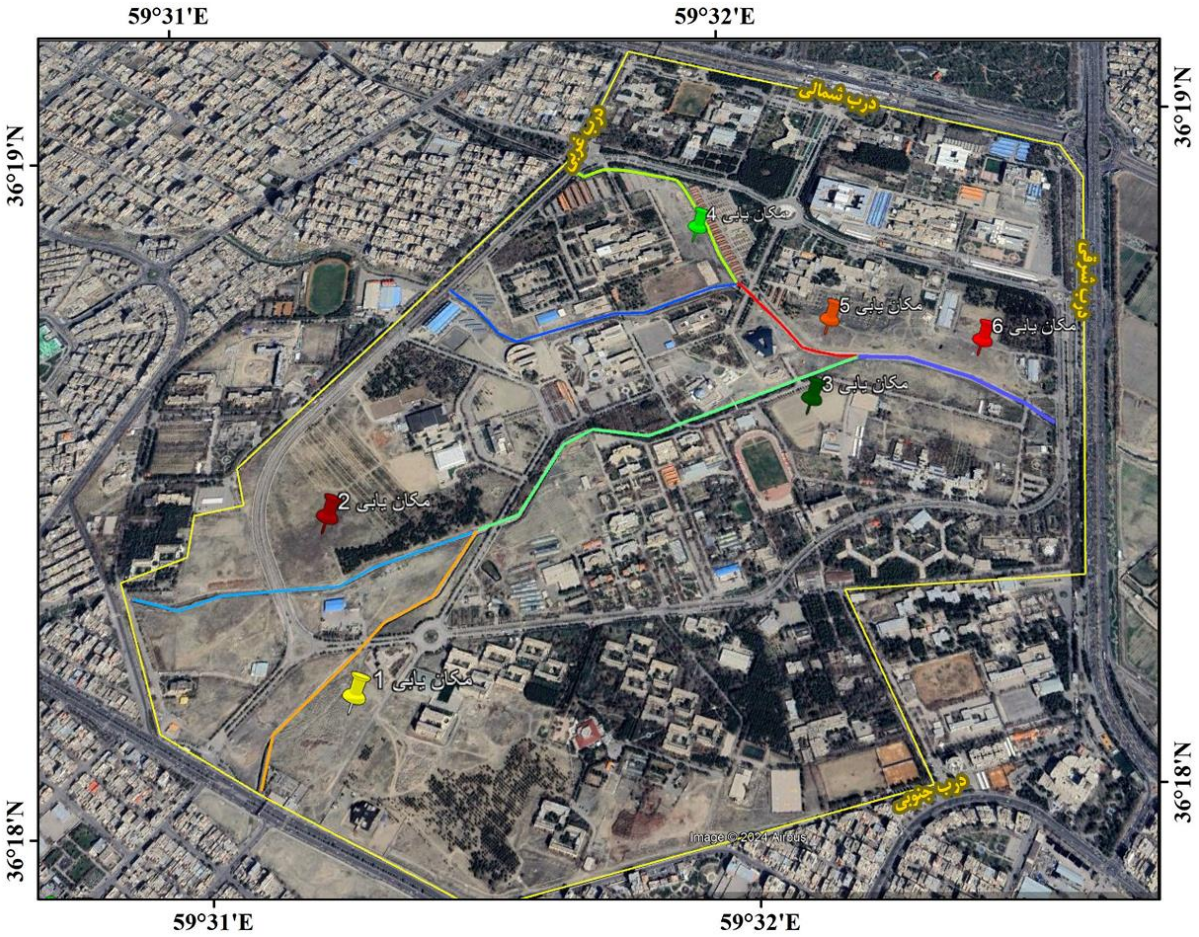
$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{O_i} - Q_{S_i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{O_i} - \overline{Q_O})^2} \quad (۲)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (۳)$$

$$SS_{res} = \sum(Q_o - Q_s)^2$$

$$SS_{tot} = \sum(Q_o - \overline{Q_o})^2$$

در این روابط، مجموع مربعات باقی مانده با نماد (SS_{res})، مجموع مربعات کل با نماد (SS_{tot})، دبی اوج مشاهداتی با نماد (Q_O) و دبی شبیه‌سازی شده با (Q_S) نشان داده می‌شود. همچنین، میانگین مقادیر مشاهداتی به صورت $\overline{Q_O}$ و n به تعداد داده‌های مشاهداتی یا شبیه‌سازی اشاره دارد. هرچه مقدار RMSE کوچکتر باشد، نشان‌دهنده اختلاف کمتر بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است و این امر به دقت بالاتر مدل اشاره دارد. ضریب ناش-ساتکلیف دارای دامنه تغییرات بین ۱ تا منفی بی‌نهایت است. اگر مقدار این ضریب مثبت باشد، به این معنا است که دقت مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به میانگین مقادیر مشاهداتی بهتر است. اما اگر مقدار آن منفی باشد، این نشان‌دهنده عدم تطابق خروجی مدل با ماهیت سیستم است. حداقل مقدار قابل قبول برای این ضریب در شبیه‌سازی ۰/۵ است و هرچه این ضریب به ۱ نزدیک‌تر باشد، دقت شبیه‌سازی مدل بیشتر خواهد بود (Nash و sutcliffe، ۱۹۷۰). مقدار ضریب تبیین یا تعیین بین ۰ تا ۱ متغیر است: هرچه این مقدار به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تطابق بهتر مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده و توانایی بیشتر مدل در پیش‌بینی تغییرات است. اگر مقدار $R^2=0$ باشد، به این معناست که مدل هیچ توضیحی برای واریانس داده‌ها ارائه نمی‌دهد.



شکل ۷- مکان‌یابی اولیه به منظور احداث مخزن ذخیره سیل در پردیس دانشگاه فردوسی مشهد

مخزن ذخیره

مخزن‌های نگهداشت یا ذخیره از جمله رویکردهای نوین مدیریت رواناب شهری می‌باشند که در مطالعات مهندسی ارزش قابل استفاده می‌باشند. مهمترین موضوع در استفاده از این مخازن، وجود فضای کافی جهت احداث آن‌ها در شهرهای پرتراکم است. مکان‌های مناسب برای ساخت این مخازن، قطعات فضای سبز، پارک‌ها یا برخی فضاهای باز شهر است، که به خطوط اصلی زهکشی نزدیک باشد تا طول خط

انتقال از کانال زهکش اصلی به مخزن کوتاه باشد و هزینه‌های مربوط به حداقل خود برسد. با استفاده از بازدیدهای میدانی در پردیس دانشگاه فردوسی و استفاده از نقشه‌های گوگل ارث، شش نقطه برای احداث مخزن مکان‌یابی شد که در شکل (۷) نشان داده شده است. از جمله عوامل تاثیر گذار در انتخاب این شش مکان می‌توان، وجود فضای کافی در این نقاط، نزدیک بودن این مکان‌ها به کانال‌های انتقال سیلاب و در نتیجه آن کاهش هزینه احداث کانال انتقال رواناب از کانال‌ها به مخازن را نام برد.

نتایج و بحث

نتایج مدل‌سازی بارش-رواناب در کل حوضه مطالعاتی

پس از انجام آنالیز حساسیت مدل، مشخص شد که درصد سطوح نفوذناپذیر و عرض معادل بیشترین تأثیر را بر دبی اوج سیلاب خروجی دارند. همچنین، پارامترهای درصد سطوح نفوذناپذیر، شیب متوسط، عرض معادل و ضریب زبری سطوح نفوذناپذیر به طور قابل توجهی بر رواناب ناشی از بارش‌های کم و زیاد تأثیر می‌گذارند، بنابراین باتوجه‌به این نکات مدل SWMM کالیبره شد.پس از کالیبره کردن مدل بر اساس دبی مشاهداتی اندازه‌گیری شده در ۱۳ رویداد بارش (از ابتدا مهر ۱۴۰۲ تا نیمه اول اردیبهشت ماه ۱۴۰۳، جدول (۳))، با تغییر موثرترین پارامترهای ورودی در محدوده مجاز و منطقی، مناسب‌ترین مقادیر معیارهای خطا سنجی در هر حوضه تعیین شدند (جدول ۲). در حوضه دلاوران RMSE از ۱/۳ به ۰/۲۸ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافت، NS از ۰/۰۶۴- به ۰/۹۵ افزایش و R^2 از ۰/۸۶ به ۰/۹۵، تغییر یافت. در حوضه سرافرازان RMSE از ۰/۳۶ به ۰/۱۱ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافت، NS از ۰/۲۶به ۰/۹۲ افزایش و R^2 از ۰/۹۴ به ۰/۹۷، در حوضه چهارچشمه RMSE از ۰/۷۸ به ۰/۳۱ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافت، NS از ۰/۶۲ به ۰/۹۴ افزایش و R^2 از ۰/۹۳ به ۰/۹۶، در حوضه آب و برق RMSE از ۳/۸ به ۰/۱۵ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافت، NS از ۳۶/۵۴- به ۰/۹۴ افزایش و R^2 از ۰/۶۲ به ۰/۹۴، و در آخر در حوضه پردیس دانشگاه فردوسی RMSE از ۲/۹۲ به ۰/۵۱ کاهش یافت، NS از ۰/۳۹- به ۰/۹۵ افزایش و R^2 از ۰/۸۸ به ۰/۹۶تغییر یافت.

برای مرحله صحت سنجی مدل نیز از ۵ رویداد بارش (از نیمه دوم اریبهشت ماه ۱۴۰۳ تا مهر ماه ۱۴۰۳، جدول (۳)) استفاده شد و نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است. شاخص‌های RMSE، NS و R^2 به ترتیب به طور میانگین برابر با ۲/۵m^3/s و ۰/۹ و ۰/۹۲ ارزیابی شدند. بر مبنای نتایج معیارهای خطاسنجی، مدل SWMM عملکرد مطلوب در حوضه شهری مورد مطالعه در برآورد دبی پیک سیلاب دارد.

جدول ۲- نتایج عملکرد مدل SWMM برای برآورد دبی اوج سیلاب در مراحل مختلف بر اساس شاخص‌های اعتبارسنجی

نام حوضه	نتایج اولیه مدل			واسنجی (۱۳ رویداد)			صحت‌سنجی (۵ رویداد)		
	RMSE	NS	R2	RMSE	NS	R2	RMSE	NS	R2
دلاوران	۱/۳۲۸	-۰/۰۶۴	۰/۸۶۰	۰/۲۸۲	۰/۹۵۰	۰/۹۵۰	۳/۰۴۵	۰/۹۳۴	۰/۹۴۴
سرافرازان	./۳۶۲	۰/۲۶۳	۰/۹۴۴	۰/۱۱۳	۰/۹۲۰	۰/۹۷۰	۲/۶۶۰	۰/۸۲۰	۰/۹۴۰
چهارچشمه	۰/۷۸۳	۰/۶۲۰	۰/۹۳۲	۰/۳۱۳	۰/۹۴۰	۰/۹۶۰	۲/۷۶۲	۰/۹۲۵	۰/۹۴۵
آب و برق	۳/۸۰۱	-۳۶/۵۳۸	۰/۶۱۷	۰/۱۵۰	۰/۹۴۰	۰/۹۴۰	۱/۵۸۱	۰/۹۲۵	۰/۹۳۰
خروجی حوضه	۲/۹۲۵	-۰/۳۹۰	۰/۸۸۰	۰/۵۱۲	۰/۹۵۰	۰/۹۶۰	۵/۱۱۶	۰/۹۲۸	۰/۹۳۲

جدول ۳- میزان بارش در طول دوره مطالعاتی (۱۴۰۲-۱۴۰۳)

۱۴۰۲								
تاریخ	۲۰ مهر	۲۳ مهر	۸ آذر	۱۷ دی	۷ بهمن	۲۸ بهمن	۵ اسفند	۱۵ اسفند	۲۲ اسفند
میزان بارش (میلی متر)	۷/۳	۳/۱	۶/۵	۲/۵	۹/۱	۶/۱	۶/۸	۴/۸	۱۳/۲
۱۴۰۳									
تاریخ	۲۴ فروردین	۲۵ فروردین	۲۶ فروردین	۵ اردیبهشت	۱۹ اردیبهشت	۲۶ اردیبهشت	۲۹ اردیبهشت	۲۲ تیر	۲۳ تیر
میزان بارش (میلی متر)	۹/۱	۶/۷	۸	۱۶/۵	۱۹	۲۵	۲۲	۸/۳	۱۰

نتایج احداث مخزن

همانگونه که در بخش قبل تشریح شد، بر اساس معیارهایی که برای مکان‌یابی مخزن وجود دارد، در ابتدا ۶ مکان به منظور ذخیره سیل در محدوده پردیس دانشگاه فردوسی مشهد شناسایی شدند. باتوجه‌به بازدیدهای میدانی به عمل آمده از این شش مکان، محاسبه مساحت‌های در دسترس در

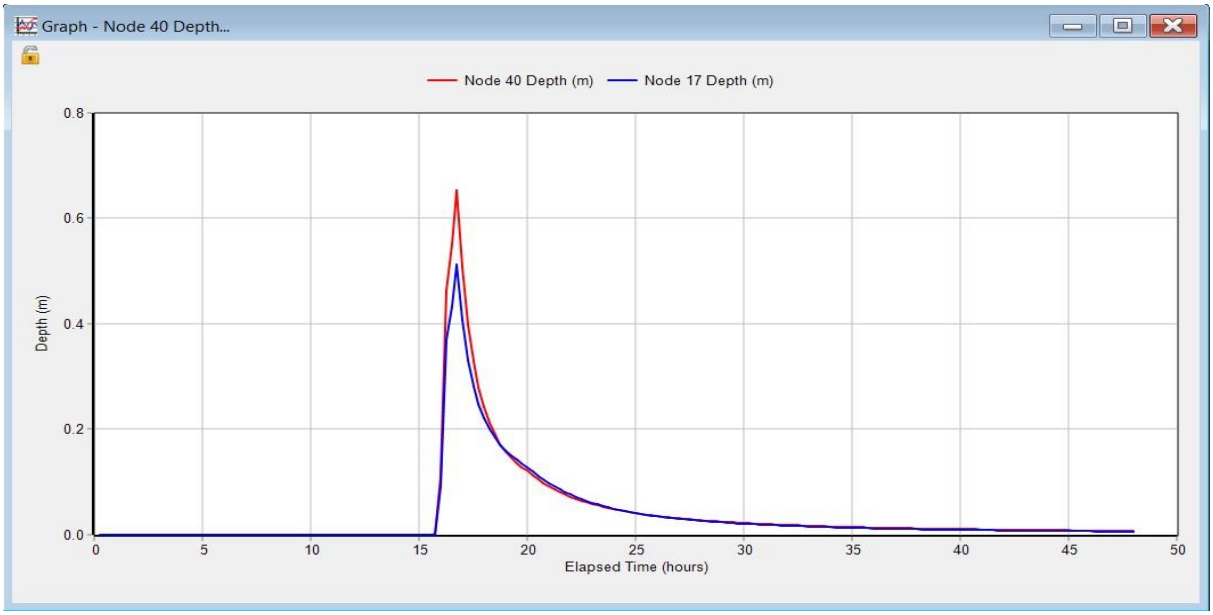
هر مکان و دیگر عوامل تاثیر گذار مکان شماره شش (پشت ساختمان حفاظت فیزیکی دانشگاه فردوسی مشهد) برای احداث مخزن و جانمایی در مدل انتخاب شد. لذا ظرفیت مخزن به گونه‌ای طراحی شد که ظرفیت کل مخزن در یک بارش کاملا پر نگردد چرا که ممکن است از بارش‌های گذشته نیز بخشی از ظرفیت مخزن اشغال شده باشد. از طرف دیگر، حقابه پایین‌دست هم باید رعایت شود و شاید نتوان تمامی جریان سیل را به سمت مخزن هدایت نمود. برای رعایت حقابه پایین‌دست تراز کانال انتقال آب به مخزن، مقداری بالاتر از کف کانال اصلی (خروجی) در نظر گرفته شد تا در بارش‌های کم، حقابه پایین دست رعایت شده و مشکلی برای پایین دست ایجاد نشود. با اجرای مدل در گزینه‌های مختلف از نظر تراز کف کانال، ارتفاع کف کانال انتقال آب به مخزن، ۱۳ سانتی‌متر بالاتر از کف کانال اصلی در نظر گرفته شد تا نکات بیان شده رعایت شود. نتایج به دست آمده از مدل بعد از طراحی کانال انتقال سیلاب، طراحی مخزن و اجرا شدن مدل برای هر بارش در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴- نتایج حاصل از شبیه‌سازی دبی و حجم سیل بر اساس مدل SWMM در دو حالت (قبل و بعد از احداث مخزن)

	تاریخ بارش	دبی اوج در خروجی حوضه (m^3/s)	حجم سیلاب در خروجی حوضه (10^3m^3)	دبی اوج خروجی پس از طراحی مخزن (m^3/s)	حجم سیلاب خروجی پس از طراحی مخزن (10^3m^3)	حجم آب ذخیره شده در مخزن (10^3m^3)	درصد پرشدگی مخزن
۱۴۰۲	۲۰ مهر	۵۶۳/۵	۲۵۲/۷۶	۰۵۹/۵	۳۰۱/۷۴	۸۷۸/۱	۳/۲
	۲۳ مهر	۰۲۸/۲	۲۳۶/۳۶	۰۲۸/۲	۲۳۶/۳۶	۰	۰
	۸ آذر	۶۱۵/۵	۳۰۱/۶۹	۱۰۱/۵	۹۰۸/۶۷	۳۲۶/۱	۷/۱
	۱۷ دی	۷۹۹/۰	۹۷۹/۲۱	۷۹۹/۰	۹۷۹/۲۱	۰	۰
	۷ بهمن	۶۴۹/۸	۳۵۲/۹۳	۰۹۴/۷	۸۵۷/۸۷	۴۲۲/۵	۸/۶
	۲۸ بهمن	۱۸۱/۶	۵۸۴/۶۸	۵۴۳/۵	۷۴۴/۶۷	۷۷۷/۰	۱
	۵ اسفند	۲۳۸/۲	۱۵۴/۷۲	۲۳۸/۲	۱۵۴/۷۲	۰	۰
	۱۵ اسفند	۵۴۸/۱	۰۷۴/۴۹	۵۴۸/۱	۰۷۴/۴۹	۰	۰
	۲۲ اسفند	۶۷۵/۲	۲۳۶/۱۵۱	۶۷۵/۲	۲۳۶/۱۵۱	۰	۰
۱۴۰۳	۲۴ فروردین	۶۴۴/۳	۴۹۳/۱۰۲	۶۲/۳	۳۶۱/۱۰۲	۰۹۸/۰	۱/۰
	۲۵ فروردین	۸۱۸/۳	۱۵/۷۲	۷۶۸/۳	۹۸۲/۷۱	۱۳۹/۰	۲/۰
	۲۶ فروردین	۰۸۴/۵	۶۷۵/۸۱	۷۴۱/۴	۱۲۴/۸۰	۵۱۳/۱	۹/۱
	۵ اردیبهشت	۱۰۵/۷	۶۸۴/۱۷۴	۱۲۸/۶	۸۸۶/۱۶۱	۷۴۱/۱۲	۹/۱۵
	۱۹ اردیبهشت	۰۸۹/۳۹	۲۳۴/۱۹۱	۸۸۸/۲۴	۱۷۹/۱۵۱	۷۸۱/۳۹	۷/۴۹
	۲۶ اردیبهشت	۸۱۱/۵۲	۵۴۲/۲۶۸	۶۵۵/۳۲	۸۵۱/۱۹۹	۴۵۱/۶۸	۶/۸۵
	۲۹ اردیبهشت	۶۵۸/۴۱	۸۹۸/۲۲۴	۲۱۶/۲۶	۱۹۷/۱۷۳	۴۸۲/۵۱	۴/۶۴
	۲۲ تیر	۷۳۹/۴	۸۸۴/۹۰	۴۸۹/۴	۳۰۷/۸۹	۵۴۶/۱	۹/۱
	۲۳ تیر	۵۵۴/۵	۱۷۴/۱۰۹	۰۷۶/۵	۴۰۶/۱۰۵	۷۳۱/۳	۷/۴

پس از طراحی مخزن به ابعاد۱۰×۴۰×۲۰۰ متر نتایج حاصل شده از مدل SWMM نشان داد این مخزن می‌تواند ۱۹۰هزار متر مکعب از ۳۲۰ هزار متر مکعبی که در پردیس دانشگاه فردوسی مشهد برای آبیاری فضای سبز مصرف می‌شود را تأمین کند. علاوه‌براین، حداکثر دبی پیک سیلاب در صورت احداث مخزن در مقایسه با شرایط موجود، ۳۸٪ کاهش پیدا می‌کند که در شکل (۸) به صورت گراف در گره قبل و بعد از مخزن آورده شده است. حجم کل سیلاب خروجی از حوضه ۱۰٪ کاهش پیدا می‌کند. ضمنا، میانگین دبی اوج در کل دوره شبیه‌سازی شده ۲۸٪ کاهش را نشان می‌دهد.

ازآنجایی‌که کانال خروجی سیلاب از پردیس دانشگاه فردوسی مشهد، از باغ ملک آباد، و از مجاورت ایستگاه مترو و بلوار خیام عبور می‌کند، با احتمال بالایی می‌توان ادعا کرد که ذخیره بخشی از سیل در مخزن به کاهش دبی اوج و در نتیجه کاهش خطرات احتمالی حاصل سیلاب‌ها در این محدوده‌ها کمک خواهد کرد. لازم به ذکر است در بارش‌های تاریخ‌های ۲۳ مهر ماه ۱۴۰۲ و ۵ام، ۱۵ام و ۲۲ام اسفند ماه ۱۴۰۲ حجم آب قابل ذخیره در مخزن صفر بوده است. زیرا حداکثر ارتفاع جریان حاصل از این بارش‌ها در خروجی کانال پردیس دانشگاه کمتر از ۱۳ سانتی‌متر بوده است و در نتیجه هیچ روانابی به سمت مخزن (که تراز کف کانال آن ۱۳ سانتی‌متر بالاتر از تراز کف کانال اصلی می‌باشد) هدایت نشده است.



شکل ۸- هیدورگراف سیل در گره قبل و بعد از مخزن مربوط به بیشترین دبی پیک سیلاب طی دوره مطالعاتی (۱۴۰۳/۰۲/۲۶)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش که با هدف بررسی امکان کاهش حجم و دبی پیک سیلاب شهری خروجی از پردیس دانشگاه فردوسی مشهد و تأمین بخشی از آب مورد نیاز فضای سبز این پردیس انجام شد، ابتدا مقادیر بارندگی و دبی حاصل شده از هر بارش در هر یک از کانال‌های ورودی به این پردیس طی دوره مطالعاتی از ۱۴۰۲/۰۷/۰۱ تا ۱۴۰۳/۰۷/۰۱ اندازه‌گیری و سپس باتوجه‌به دبی‌های اوج مشاهداتی برداشت شده در هرکانال از هر منطقه، از مدل SWMM استفاده شد. پس از انجام آنالیز حساسیت مدل، مشخص شد که پارامترهای درصد سطوح نفوذناپذیر، شیب متوسط، عرض معادل و ضریب زبری سطوح نفوذناپذیر به طور قابل توجهی بر رواناب ناشی از بارش‌ها تأثیر می‌گذارند. پس از تعیین پارامترهای تاثیرگذار، مدل با ۱۳ رویداد بارش که داده‌های آن اندازه‌گیری شده بود، کالیبره و با ۵ رویداد بارش بعدی صحت‌سنجی شد. با طراحی یک مخزن ذخیره سیلاب در محدوده پردیس دانشگاه فردوسی مشهد در مدل SWMM، اجرای مدل برای هر بارش نتایج نشان داد که با احداث مخزنی به حجم حدود ۸۰ هزار متر مکعب نه‌تنها دبی پیک سیلاب در طی این دوره مطالعاتی ۳۸ درصد کاهش پیدا می‌نماید، بلکه حداکثر حجم سیلاب خروجی از پردیس دانشگاه فردوسی مشهد در طی این دوره نیز ۲۶ درصد کاهش می‌یابد. علاوه‌براین، کل حجم سیلاب خروجی از پردیس دانشگاه فردوسی مشهد در طی این دوره مطالعاتی ۱۰ درصد کاهش پیدا می‌نماید. ضمن اینکه با احداث این مخزن با ذخیره ۱۹۰ هزار متر مکعب جریان در طی بارش‌های مختلف بیش از نیمی از آب مورد نیاز آبیاری فضای سبز دانشگاه فردوسی مشهد که ۳۲۰ هزار متر مکعب در سال است، به راحتی تأمین کرد و در نتیجه نه‌تنها فشار کمتری به منابع آب زیرزمینی این شهر وارد می‌شود بلکه تا حدودی پایین دست از خطر سیل محافظت می‌شود. پیشنهاد سناریوهای دیگری از نحوه انحراف جریان به مخزن و همچنین ابعاد دیگری از مخزن مورد بررسی قرار گرفته تا ایده‌آل‌ترین عمق آبگیری از مسیل اصلی و حجم مخزن با هدف تأمین بیشترین حجم آب قابل استفاده در آبیاری فضای سبز و همچنین مدیریت رواناب سطحی در پایین‌دست مسیل تأمین شود.

- **ابعاد حقوقی بهره‌برداری از رواناب‌های سطحی و احداث مخزن ذخیره سیلاب در پردیس دانشگاهی**
- **اصولا کنترل سیلاب شهری و بهره‌برداری از آن دو هدف اصلی را محقق می‌سازد**
  a. **از حجم و دبی سیلاب می کاهد و مانع خسارت به پایین دست می‌شود**
  b. **با ذخیره سازی یا نفوذ سیلاب از حجم آب مورد استفاده در فضای سبز شهری می‌کاهد و به آب زیر زمینی کمک می‌کند.**

باتوجه‌به موارد فوق شهرداری‌ها و نهادهای مرتبط با آب باید در جهت کمک به این مسئله به دانشگاه کمک نمایند و حتی بعضی از هزینه‌های مربوطه را باتوجه‌به اینکه مساحت قابل توجهی از زمین‌های دانشگاه در این جهت مورد استفاده قرار می گیرد را متقبل شوند. به هر صورت تعامل بین چند ارگان مانند آب منطقه‌ای، شهرداری، محیط‌زیست و دانشگاه برای استفاده بهینه در این مورد بسیار مهم است.

منابع

امینی یزدی، مهدی، و فغفور مغربی، محمود. (۱۴۰۲). بررسی استفاده از حوضچه تاخیری بر شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی به‌وسیله شبیه‌سازی (مطالعه موردی: کال اقبال شرقی مشهد). مجله علمی سامانه‌های سطوح آبگیر باران،۱۱(۲)،۱-۱۶. http://jircsa.ir/article-1-454-fa.html

احمدی شرف، ابراهیم، و تجریشی، مسعود. (۱۳۹۳). جانمایی حوضچه‌های ذخیره با استفاده از مدل شبیه‌ساز SWMM و تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی جله آب و فاضلاب، ۲۵(۶)، ۶۶-۵۷.

بدیعی‌زاده، سامان، بهره‌مند، عبدالرضا، و دهقانی، امیراحمد. (۱۳۹۴). مدیریت سیلاب شهري از طريق شبيه سازي رواناب سطحی با استفاده از مدل SWMM در شهر گرگان، استان گستان. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک،۲۲ (۴)، ۱۵۵ تا ۱۷۰. Dor: 20.1001.1.23222069.1394.22.4.9.7

پایگاه خبری تابناک. (۱۳۹۴). نگاه شما: باران سیل‌آسا در مشهد، کد خبر: ۴۹۸۴۳۷. تاریخ انتشار: ۱۳۹۴/۲/۲۰. https://www.tabnak.ir/fa/news

تاج بخش، محمد، و خداشناس، سعیدرضا. (۱۳۹۱). بازنگری شبکه زهکشی رواناب سطحی با استفاده از شبیه‌سازی و کاربرد حوضچه‌های تاخیری (مطالعه موردی: حوضه آبریز اقبال شرقی, مشهد). دانش آب و خاک (دانش کشاورزی)، ۲۲(۱)، ۱۰۹-۱۲۳. https://sid.ir/paper/147872/fa

جزائری، پریسا، فضل اولی، رامین، مسعودیان، محسن، و جواهری، نصراله. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر روش‌های توسعه‌ی کم‌اثر بشکه ذخیره آب باران و ترانشه نفوذ بر کاهش مقادیر دبی اوج سیلاب‌های شهری. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۳(۳).۴۳۷-۴۶۲. doi: 10.22125/iwe.2023.169909

شکوهی مهر، الهام، صالحی نیشابوری، سیدعلی اکبر، و یزدی، جعفر. (۱۳۹۸). ارزیابی استفاده از مخازن تعدیل سیلاب شهری در کاهش دبی اوج رواناب در بارش با تداوم‌های مختلف. هجدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه تهران، تهران ایران. https://civilica.com/doc/999057

قبادی، فاطمه. (۱۳۹۷). مدل‌سازي سيلاب شهري (مطالعه موردي: حوضه چهل بازه گلستان). پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

مختارپور، اکبر، خداشناس، سعیدرضا، و داوری، کامران. (۱۳۹۷). بررسی تغییرات دبی سیلاب شهری با دو روش روسازی متخلخل و ترانشه نفوذ، (مطالعه موردی: منطقه ۴ تهران). فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۸ (۴)، ۱۸-۲۹.

وفایی، مسعود، دستورانی، محمدتقی، و رستمی خلج، محمد. (۱۴۰۱). ارزیابی خطر سیلاب در پردیس دانشگاه فردوسی مشهد و ارائه سناریوهای مدیریتی با استفاده از مدل HEC-RAS. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۳)، ۲۲۵-۲۳۹. doi: 10.22098/mmws.2022.11815.1173

Bhaskar, A, S., Hogan, D, M., & Archfield, S, A. (۲۰۱۶). Urban base flow with low impact development. Hydrological Processes, 30(18), 3156-3171. Doi: 10.1002/hyp.10808

Bhattacharya, N. (2010). Flood risk assessment in Barcelonnette, France. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enscheda, The Netherlands.

Chow, V.T., Maidment, D.R., & Mays, L.W. (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York.

Jiang, L. E. I., Chen, Y. A. N. G. B. O., & Wang, H. U. A. N. Y. U. (2015). Urban flood simulation based on the SWMM model. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 368, 186-191. Doi; 10.5194/piahs-368-186-2015

Jang, S., Cho, M., Yoon, J., Yoon, Y., Kim, S., Kim, G., Kim, L., & Aksoy, H. (2007). Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment. Desalination, 212(1), 344-356. Doi: 10.1016/j.desal.2007.05.005

Jia, H., Lu, Y., Yu, S., & Chen, Y. (2002). Planning of LID–BMPs for urban runoff control (The case of Beijing Olympic Village). Separation and Purification Technology, 2012. 84, 112-119. Doi: 10.1016/j.seppur.2011.04.026

Niazi, M., Nietch, C., Maghrebi, M., Jackson, N., Bennett, B. R., Tryby, M., & Massoudieh, A. (2017). Storm water management model: Performance review and gap analysis. Journal of Sustainable Water in the Built Environment, 3(2), 04017002. Doi: 10.1061/JSWBAY.0000817

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. Journal of hydrology, 10(3), 282-290. Doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6

Rossman, L.A. (2015). Storm Water Management Model Users Manual Version 5.1. United States Environmental Protection Agency, EPA-600/R-14/413b

Swathi, V., Srinivasa Raju, K., & Singh, A. P. (2018). Application of Storm Water Management Model to an Urban Catchment. In V. Singh, S. Yadav & R. Yadava (Eds.), Hydrologic Modeling (Water Science and Technology Library, Vol. 81, pp. 175–184). Springer Singapore. DOI: 10.1007/978-981-10-5801-1_13

Schmitt, T.G., Thomas, M., & Ettrich, N. (2004). Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. Journal of Hydrology, 299(3–4), 300–311. DOI: 10.1016/S0022-1694(04)00374-9

Bibi, T. (2022). Modeling urban stormwater management in the town of Dodola based on landuse and climate change using SWMM 5.1. Journal of Hydrology: Regional Studies, 44, 101267. DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101267

پی‌نوشت‌ها

1. Low Impact Development
2. Best Management Practice
3. Google Earth Engine
4. Normalized Difference Vegetation Index
5. Root Mean Square Error
6. Nash-Sutcliffe

Journal of Water and Sustainable Development. December 2025
Volume 12. Lssue 3 (Serial No. 37). pages 17 to 31

نشریه آب و توسعه پایدار. آذر ماه ۱۴۰۴
سال دوازدهم. شماره سوم (پیاپی ۳۷). صفحات ۱۷ تا ۳۱

Document Type: Review Article

نوع مقاله: مروری

Food Security in the 21st Century: Exploring Challenges, Threats, and Solutions for Sustainability

I. Hajirad[1*], P. Pourmohammad[2]

1-Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2-Ph.D. Student, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

*** Corresponding Author Email:** i.hajirad@ut.ac.ir

Received ▶ 19-03-2025
Revised ▶ 19-07-2025
Accepted ▶ 04-08-2025
Available online ▶ 16-12-2025

Abstract

Food security is one of the most significant challenges of the 21st century, influenced by factors such as population growth, climate change, water crises, and political conflicts. Ensuring sufficient and sustainable food supply requires effective management of these challenges and the adoption of appropriate policies. This study, using a descriptive-analytical approach and library research sources, examines the impact of climate change, water resources, and political instability on food security. Climate change has led to fluctuations in rainfall, rising temperatures, and declining water resources, directly affecting agricultural production and food supply. Reduced water availability, frequent droughts, and shifting rainfall patterns have decreased agricultural productivity and disrupted food supply chains. Moreover, wars and political instability pose a serious threat to food security by destroying agricultural infrastructure, reducing production levels, and disrupting supply chains. Conflicts also lead to large-scale population displacement, further straining food resources. Ultimately, food security is not only an economic and environmental challenge but also a strategic and political issue. Addressing it requires precise policy-making, comprehensive planning, and international cooperation to mitigate threats and ensure sustainable access to food.

Keywords: Water Security, Accessibility, Conflicts, Climate Change, Food Governance.

امنیت غذایی در قرن بیست و یکم: بررسی چالش‌ها، تهدیدها و راهکارهای پایداری

ایمان حاجی‌راد[1*]، پریا پورمحمد[2*]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده مناطق طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

***رایانامه نویسنده مسئول:** i.hajirad@ut.ac.ir

تاریخ دریافت ◀ ۱۴۰۳/۱۲/۲۹
تاریخ بازنگری ◀ ۱۴۰۴/۰۴/۲۸
تاریخ پذیرش ◀ ۱۴۰۴/۰۵/۱۳
تاریخ انتشار ◀ ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

چکیده

امنیت غذایی یکی از مهمترین چالش‌های قرن بیست و یکم است که تحت تأثیر عواملی مانند رشد جمعیت، تغییرات اقلیمی، بحران‌های آبی و درگیری‌های سیاسی قرار دارد. تأمین غذای کافی و پایدار نیازمند مدیریت این چالش‌ها و اتخاذ سیاست‌های کارآمد است. در این مطالعه، با استفاده از روش توصیفی-تحلیلی و منابع کتابخانه‌ای، تأثیر تغییرات اقلیمی، منابع آبی و ناپایداری‌های سیاسی بر امنیت غذایی بررسی شده است. تغییرات اقلیمی موجب نوسانات بارندگی، افزایش دما و کاهش منابع آبی شده که مستقیماً بر تولیدات کشاورزی و عرضه غذا اثر می‌گذارد. کاهش منابع آبی، خشکسالی‌های مکرر و تغییر در الگوی بارندگی، بهره‌وری کشاورزی را کاهش داده و زنجیره تأمین غذا را مختل کرده است. علاوه‌براین، جنگ‌ها و ناپایداری‌های سیاسی از طریق تخریب زیرساخت‌های کشاورزی، کاهش سطح تولید و اختلال در زنجیره تأمین، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی محسوب می‌شوند. جنگ‌ها همچنین باعث جابه‌جایی گسترده جمعیت شده و فشار بیشتری بر منابع غذایی وارد می‌کنند. در نهایت، امنیت غذایی تنها یک چالش اقتصادی و محیط‌زیستی نیست، بلکه مسئله‌ای راهبردی و سیاسی است که نیازمند سیاست‌گذاری دقیق، برنامه‌ریزی جامع و همکاری‌های بین‌المللی برای مقابله با تهدیدات و تضمین دسترسی پایدار به غذا است.

واژه‌های کلیدی: امنیت آبی، دسترسی‌پذیری، منازعات، تغییر اقلیم، حاکمیت غذایی.

How to cite this article:
Hajirad, I. & Pourmohammad, P. (2025). Food Security in the 21st Century: Exploring Challenges, Threats, and Solutions for Sustainability. Journal of Water and Sustainable Development, 12(3), 17-31. https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i3.2503-1412

مقدمه

امنیت غذایی مفهومی گسترده و چندوجهی است که سازمان‌های مختلف در سراسر جهان آن را به شیوه‌های متفاوتی تعریف کرده‌اند. در ساده‌ترین تعریف، امنیت غذایی به توانایی افراد در تأمین غذای کافی به‌صورت روزانه اشاره دارد. در سطح بین‌المللی، امنیت غذایی به‌عنوان توانایی مردم در تأمین غذای کافی تعریف شده است. Anderson و Cook (۱۹۹۹) این مفهوم را به‌صورت دسترسی تمامی افراد، در تمامی زمان‌ها، به غذای کافی برای داشتن یک زندگی سالم و فعال توصیف کرده است. بر اساس بیانیه اجلاس جهانی غذا که در سال ۱۹۹۶ در رم برگزار شد، امنیت غذایی زمانی ایجاد می‌شود که تمامی افراد، در تمامی زمان‌ها، از نظر فیزیکی و اقتصادی به غذای کافی، ایمن و مغذی، مطابق با نیازهای تغذیه‌ای و ترجیحات غذایی خود برای یک زندگی سالم و فعال، دسترسی داشته باشند (FAO، ۱۹۹۶). این مفهوم در دنیای امروز یکی از اساسی‌ترین چالش‌های جهانی به شمار می‌آید که ابعاد گسترده‌ای در حوزه‌های اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی و سیاسی دارد (Varzakas و Smaoui، ۲۰۲۴). در حقیقت، امنیت غذایی نه تنها به میزان تولید غذا، بلکه به سیستم‌های توزیع، پایداری منابع و سیاست‌های حاکم بر آن وابسته است و مستلزم تحقق چهار رکن اساسی، یعنی دسترسی فیزیکی و اقتصادی به غذا، ثبات در تأمین، استفاده بهینه از مواد غذایی و پایداری نظام‌های تولید و توزیع است (Lefilef و همکاران، ۲۰۲۵). در دهه‌های اخیر، عواملی همچون رشد سریع جمعیت، تغییرات اقلیمی، کاهش منابع آبی، افزایش تقاضای غذایی، جنگ‌ها و ناپایداری‌های اقتصادی، امنیت غذایی را با چالش‌های بی‌سابقه‌ای مواجه کرده‌اند. در این میان، تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی از مهمترین تهدیدها برای امنیت غذایی در سطح جهانی، اثرات قابل توجهی بر سیستم‌های تولید و توزیع غذا گذاشته است. در ادامه، این مقاله با تمرکز بر چالش‌های یاد شده، به بررسی تفصیلی ابعاد مختلف آن‌ها و ارائه راهکارهایی برای دستیابی به پایداری در امنیت غذایی خواهد پرداخت. به‌عنوان‌مثال کمبود آب در ایران به یکی از چالش‌های عمده امنیت غذایی تبدیل شده است که ناشی از تغییرات اقلیمی و مدیریت ناصحیح منابع آبی است (Saatsaz، ۲۰۲۰). بنابراین، ضرورت دارد که این چالش‌ها نه تنها از جنبه‌های فنی، بلکه در چارچوب سیاست‌گذاری‌ها و اصلاحات زیربنایی مورد توجه قرار گیرد تا امنیت غذایی به‌عنوان یک هدف جهانی و در راستای توسعه پایدار، به‌طور موثر محقق شود. در میان مؤلفه‌های کلیدی پایداری امنیت غذایی، امنیت آبی[1] جایگاه ویژه‌ای دارد.

آب به عنوان منبعی ضروری برای تولید محصولات کشاورزی، نقشی بنیادین در تأمین غذای جوامع ایفا می‌کند و بحران آب[2]، تهدیدی مستقیم برای این امنیت محسوب می‌شود. بحران آب، ناشی از تغییرات اقلیمی، برداشت بی‌رویه از منابع زیرزمینی، آلودگی و سومدیریت، تولید محصولات کشاورزی را تهدید کرده و زنجیره تأمین غذا را دچار اختلال می‌کند. در بسیاری از مناطق جهان، کمبود آب منجر به کاهش تولید محصولات کشاورزی، افزایش قیمت مواد غذایی، نابرابری در دسترسی به منابع و تشدید فقر و سوتغذیه شده است. بنابراین، بررسی ارتباط میان امنیت غذایی و امنیت آبی برای درک بهتر چالش‌های پیش‌رو ضروری است (Adeyeye و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه‌براین، درگیری‌های نظامی و جنگ‌ها از مهمترین تهدیدهای امنیت غذایی محسوب می‌شوند. جنگ‌ها با تخریب زیرساخت‌های کشاورزی و منابع آبی، آوارگی جوامع و ایجاد اختلال در زنجیره تأمین غذا، بر امنیت غذایی تأثیر می‌گذارند. درگیری‌های مسلحانه می‌توانند به کاهش تولید غذا، افزایش قیمت‌ها و بروز بحران‌های انسانی منجر شوند (Kemmerling و همکاران، ۲۰۲۲). نمونه‌های تاریخی و معاصر نشان می‌دهند که جنگ‌ها و ناآرامی‌های سیاسی در بسیاری از مناطق جهان موجب بروز قحطی و ناامنی غذایی گسترده شده‌اند. ازاین‌رو، مطالعه تأثیر جنگ بر امنیت غذایی می‌تواند به تدوین راهکارهای مؤثر برای کاهش آسیب‌پذیری جوامع در برابر بحران‌های غذایی کمک کند (de Waal، ۲۰۲۵). در دهه‌های اخیر، موضوع امنیت غذایی به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی جوامع بشری، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، مورد توجه فزاینده قرار گرفته است. رشد سریع جمعیت، تغییرات اقلیمی و بحران‌های سیاسی از جمله جنگ‌ها، تهدیدات عمده‌ای برای تأمین غذا و دسترسی به منابع غذایی هستند. علاوه‌براین بحران آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک در کنار جنگ‌ها و ناپایداری‌های سیاسی، امنیت غذایی را با چالش‌های جدی مواجه کرده است. این عوامل، از طریق تخریب زیرساخت‌ها، کاهش تولید و اختلال در زنجیره تأمین، به طور مستقیم بر دسترسی و ثبات غذایی تأثیر می‌گذارند. در چنین شرایطی، درک دقیق ابعاد مختلف این تهدیدات و بررسی رابطه آن‌ها با منابع آبی و درگیری‌ها، برای تدوین استراتژی‌های مؤثر جهت مقابله با بحران‌های امنیت غذایی ضروری است (Vilakazi و همکاران، ۲۰۲۵). تحقیقات پیشین بیشتر به‌صورت جزئی به چالش‌های امنیت غذایی پرداخته‌اند و به بررسی هم‌زمان تأثیر تغییرات اقلیمی، منابع آبی و جنگ‌ها بر امنیت غذایی پرداخته نشده است. از این‌رو این مقاله مروری به‌منظور گسترش دانش موجود در این زمینه و شناسایی ارتباطات پیچیده میان این عوامل به‌ویژه در شرایط کنونی جهانی تدوین می‌شود. با رشد روزافزون جمعیت جهانی، تغییرات اقلیمی و افزایش رقابت بر سر منابع طبیعی، تهدیدات جدیدی برای امنیت غذایی به وجود آمده است.

جدول ۱- پیشینه مطالعات مرتبط در حوزه امنیت غذایی

منابع	مطالعه	هدف	نتیجه‌گیری
Moussa و همکاران، (۲۰۲۵)	اثر دسترسی به آب بر امنیت غذایی در کشورهای GCC: مرور نظام‌مند ادبیات و ارائه توصیه‌های سیاستی برای آینده‌ای پایدار	این مطالعه با مرور ۶۴ مقاله (۲۰۱۰-۲۰۲۴) راهکارهای مدیریت پایدار آب و بهبود امنیت غذایی در کشورهای GCCارائه می‌دهد.	کشورهای GCC به‌دلیل کم‌آبی و تغییرات اقلیمی با بحران امنیت غذایی مواجه‌اند. آبیاری قطره‌ای و شیرین‌سازی آب اجرا شده و همکاری علمی ضروری است.
Lee و همکاران، (۲۰۲۴)	تأثیر تغییرات اقلیمی بر امنیت غذایی: شواهدی از چین	بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر امنیت غذایی در چین با استفاده از داده‌های پانل ۳۱ شهر طی سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۰.	تغییرات اقلیمی امنیت غذایی چین را تهدید می‌کند. اثرات آن منطقه‌ای است و کاهش آن نیازمند سیاست‌های هماهنگ و افزایش تاب‌آوری است.
Wani و همکاران، (۲۰۲۴)	دیدگاه‌های نوین درباره امنیت غذایی و پایداری محیط‌زیست از طریق مدیریت ضایعات غذایی	هدف پژوهش، شناسایی راهکارهای کاهش ضایعات، بررسی پیوند ایمنی و امنیت غذا و تحلیل تأثیر کووید-۱۹ بر رفتارهای ضایعات است.	بیشترین ضایعات غذا در خانه است. هضم بی‌هوازی و بیوانرژی گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهند. کووید-۱۹ ممکن است ضایعات را کم کرده باشد.
Christoforidou و همکاران، (۲۰۲۳)	امنیت غذایی در شرایط کم‌آبی: تحلیل مقایسه‌ای مصر و اردن	این پژوهش با داده‌هایFAOSTAT ، استراتژی‌های غذایی مصر و اردن را پیش و پس از بحران ۲۰۰۸، با تمرکز بر واردات، نوسانات قیمت و کم‌آبی مقایسه می‌کند.	مصر و اردن با کمبود آب و تقاضای افزایش یافته روبه‌رو هستند؛ اردن واردات محور و منعطف‌تر، مصر بیشتر متکی به تولید داخلی است؛ ذخایر غلات و تغییر مصرف راهکارهای کلیدی‌اند.
Manikas و همکاران، (۲۰۲۳)	مرور نظام‌مند ادبیات درباره شاخص‌های اندازه‌گیری امنیت غذایی	هدف این پژوهش تحلیل شاخص‌ها و ابعاد امنیت غذایی از طریق مرور سیستماتیک مقالات علمی است.	شاخص کالری کافی خانوار رایج‌ترین معیار امنیت غذایی است. شاخص‌های تنوع و تجربه نیز کاربرد دارند، اما ابعاد استفاده و ثبات کمتر بررسی شده‌اند. ترکیب شاخص‌ها، ارزیابی را جامع‌تر می‌سازد.
Azmi و همکاران، (۲۰۲۳)	مروری بر خلاهای حیاتی در ادبیات امنیت غذایی: پرداختن به مسائل کلیدی برای توسعه پایدار	هدف مقاله شناسایی شکاف‌های ادبیات امنیت غذایی و ارائه توصیه‌هایی برای پژوهش‌های آینده با تأکید بر رویکردهای چند بعدی و بهبود روش‌های داده‌کاوی است.	این تحقیق کم‌توجهی به هدررفت غذا، حاکمیت غذایی و گروه‌های حاشیه‌ای را در امنیت غذایی نشان داده و بر لزوم رویکرد چندبعدی اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی تأکید کرده است.
Daniel و همکاران، (۲۰۲۲)	آینده امنیت غذایی و ایمنی غذا	هدف این پژوهش بررسی تأثیر کودهای زیستی و ارگانیسم‌های مفید بر بهبود کیفیت خاک، افزایش تولید و امنیت غذایی در مقایسه با کودها و آفت‌کش‌های شیمیایی است.	کودهای زیستی با کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی پرهزینه و زیان‌بار، تولید غذا و امنیت غذایی را افزایش داده و کشاورزی پایدار و سلامت انسانی را تقویت می‌کنند.
Young و همکاران، (۲۰۲۱)	اهمیت امنیت آبی برای تضمین امنیت غذایی، تغذیه مناسب و رفاه	این پژوهش امنیت آب را کلید سلامت و تغذیه می‌داند و رابطه آن با امنیت غذایی را بررسی و راهکارهایی برای بهبود سیاست‌ها پیشنهاد می‌کند.	امنیت آب، مهم برای سلامت انسان و تغذیه، بر اهمیت آن و تأثیر ناامنی بر سلامت و اقتصاد تأکید دارد.
Meijl و همکاران، (۲۰۲۰)	مدل‌سازی آینده‌های جایگزین امنیت غذایی جهانی: دیدگاه‌هایی از پروژه FOODSECURE	این پژوهش آینده امنیت غذایی جهانی را با مدل‌ها و شاخص‌های FAOبررسی و تأثیر محیط، قیمت و رویدادهای سیاسی-اجتماعی را تحلیل می‌کند.	این پژوهش چهار سناریو بلندمدت امنیت غذایی را بررسی کرد؛ برابری را افزایش می‌دهد اما محیط‌زیست را تهدید می‌کند. سناریوی ECO بهترین تعادل بود.
Mora و همکاران، (۲۰۲۰)	کاوش آینده کاربری زمین و امنیت غذایی: مجموعه‌ای جدید از سناریوهای جهانی	هدف پژوهش ، توسعه سناریوهای جهانی پیوند زمین با امنیت غذایی و تمرکز بر تغذیه و سلامت است.	رژیم‌های سالم‌تر، نیاز به زمین کمتر و بهره‌وری دام بالاتر را می‌طلبند. اتصال صنعت غذا به تولید محلی و افزایش تاب‌آوری سیستم‌ها ضروری است.
Candel (۲۰۱۴)	حکمرانی امنیت غذایی: مرور نظام‌مند ادبیات	این پژوهش نقش حکمرانی در تأمین امنیت غذایی را با مرور منابع و تمرکز بر چالش‌ها و اهمیت حکمرانی بررسی می‌کند.	حکمرانی امنیت غذایی حوزه‌ای نو با هفت موضوع کلیدی است که پیچیدگی و نیاز به دیدگاه‌های چندگانه و بررسی بیشتر درباره ساختارهای زیرملی دارد.

لذا پژوهش حاضر، به بررسی چالش‌ها و تهدیدهای اصلی امنیت غذایی می‌پردازد و به‌ویژه بر نقش منابع آبی و تأثیر جنگ‌ها و بحران‌های سیاسی بر آن تأکید می‌کند. شکل (۱) فاکتورهای اصلی بحث شده در امنیت غذایی را نشان می‌دهد. برای درک عمیق‌تر چالش‌ها و فرصت‌های پیش‌روی امنیت غذایی در قرن بیست و یکم، مروری بر مطالعات گذشته ضروری است. جدول (۱) خلاصه‌ای از پژوهش‌های مرتبط را ارائه می‌دهد که رویکردهای گوناگون پژوهشگران را در این حوزه نمایان می‌سازد.

بررسی منابع ارائه شده در جدول (۱) نشان‌دهنده رویکرد چند بعدی و پیش‌رونده پژوهشگران به مسئله امنیت غذایی است. مطالعات امنیت غذایی از سال ۲۰۲۰ با مدل‌سازی سناریوهای جهانی (Mora و همکاران، ۲۰۲۰؛ Meijl و همکاران، ۲۰۲۰) و تأکید بر اهمیت امنیت آب (Youngو همکاران، ۲۰۲۱) آغاز شد. در سال‌های بعد، پژوهش‌ها به بررسی پیامدهای تغییرات اقلیمی بر کشاورزی (Lee و همکاران، ۲۰۲۴) و مدیریت پسماندهای غذایی برای پایداری (Wani و همکاران، ۲۰۲۴) پرداختند. هم‌زمان، پژوهش‌های ۲۰۲۳ با تمرکز بر طراحی شاخص‌های امنیت غذایی (Manikas و همکاران، ۲۰۲۳) و بازاندیشی چارچوب‌های مفهومی (Azmi و همکاران، ۲۰۲۳) عمق بیشتری یافت. تازه‌ترین پژوهش‌ها مانند Moussa و همکاران، (۲۰۲۵)، بر پیوند امنیت آب و غذایی در مناطق خشک تأکید دارند و تحلیل مقایسه‌ای کم‌آبی در خاورمیانه توسط Christoforidou و همکاران، (۲۰۲۳) ارائه شده است. این روند زمانی و رویکردهای چند بعدی، چارچوبی جامع و میان رشته‌ای از امنیت غذایی فراهم کرده که از مدیریت منابع آب و تغییرات اقلیمی تا سیاست‌گذاری جهانی و حکمرانی را دربر می‌گیرد و می‌تواند پایه‌ای برای سیاست‌ها و اقدامات پایدار در سطوح مختلف باشد.

با وجود این پیشرفت‌ها، یک خلاء کلیدی در ادبیات موجود، فقدان یک رویکرد یکپارچه است که به طور هم‌زمان به تعامل پیچیده میان تغییرات اقلیمی، بحران‌های آبی، ناپایداری‌های سیاسی و همچنین نقش مدیریت آب مجازی و حکمرانی غذایی مشارکتی در ایجاد یک سیستم غذایی تاب‌آور بپردازد. درحالی‌که برخی مطالعات به صورت جزیی به این عوامل پرداخته‌اند، این مقاله با هدف پر کردن این شکاف، رویکردی جامع را برای تحلیل چالش‌ها و ارائه راهکارهای نوآورانه مطرح می‌کند. این امر به ویژه در شرایط کنونی جهانی، که با رشد روزافزون جمعیت، تغییرات اقلیمی و افزایش رقابت بر سر منابع طبیعی همراه است، اهمیت بالایی دارد.

مباحث نظری

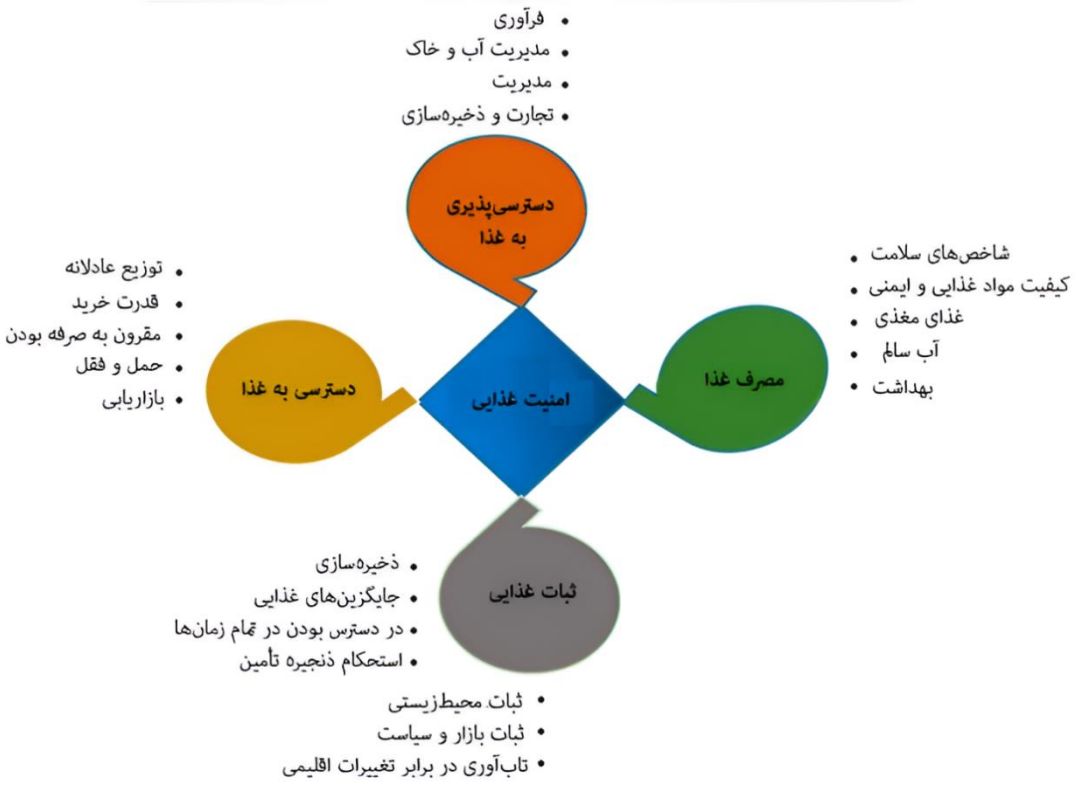
چالش‌ها و تهدیدهای امنیت غذایی جهانی

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از مهمترین و پیچیده‌ترین چالش‌های قرن بیست و یکم، اثرات گسترده‌ای بر امنیت غذایی در سطح جهانی داشته است. این پدیده، از طریق نوسانات بارندگی، افزایش دما، کاهش منابع آبی و افزایش فراوانی بلایای طبیعی مانند خشکسالی و سیل، مستقیماً بر تولیدات کشاورزی و عرضه غذا اثر می‌گذارد. پاسخ به تغییرات اقلیمی شامل دو رویکرد کاهش و تثبیت سطح گازهای گلخانه‌ای است که باعث گرمایش جو می‌شوند. در این بین دو مفهوم کاهش تغییرات اقلیمی و سازگاری با آن مطرح می‌شود. هدف از کاهش تغییرات اقلیمی جلوگیری از دخالت قابل توجه انسان در سیستم اقلیمی و تلاش برای تثبیت سطح گازهای گلخانه‌ای در مدت زمانی است که برای سازگاری طبیعی اکوسیستم‌ها با تغییرات اقلیمی کافی باشد (Smith و همکاران، ۲۰۰۷؛ Hulme، ۲۰۲۳). سازگاری، که به معنی تطبیق با زندگی در یک اقلیم در حال تغییر است، شامل سازگاری با شرایط اقلیمی واقعی یا پیش‌بینی شده در آینده است. بااین‌حال پیش‌بینی شرایط اقلیمی در آینده همواره با عدم قطعیت‌های قابل توجهی همراه است که پیچیدگی‌های بیشتری را به فرآیند سازگاری می‌افزاید. این عدم قطعیت‌ها می‌توانند بر برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌ها تأثیرگذار باشند و توجه ویژه‌ای را در توسعه استراتژی‌های سازگاری طلب کنند. هدف از سازگاری آن است که آسیب‌پذیری نسبت به اثرات منفی تغییرات اقلیمی (مانند افزایش سطح دریا، رویدادهای شدید و بحران‌های آب و هوایی یا ناامنی غذایی) کاهش یابد. همچنین این امر شامل بهره‌برداری از فرصت‌های مفید بالقوه مرتبط با تغییرات اقلیمی (مثلاً فصل‌های رشد طولانی‌تر یا افزایش بازده در برخی مناطق) است. یادگیری نحوه مدیریت بهینه زمین و جنگل‌ها، نحوه مقابله و برنامه‌ریزی برای کاهش منابع آب و توسعه انواع محصولات کشاورزی تاب‌آور نیز اهمیت ویژه‌ای دارد (Lefilef و همکاران، ۲۰۲۵). تغییرات اقلیمی تاثیرات فراوانی بر تولید غذای جهانی داشته است و اگر اقدامات قابل توجهی صورت نگیرد، در چند دهه آینده ممکن است میلیون‌ها نفر دیگر در معرض خطر گرسنگی و فقر قرار بگیرند. این پیام که بارها و بارها توسط دانشمندان اقلیمی تأکید شده، پایه‌گذار بسیاری از اهداف توسعه پایدار و مواضع سازمان ملل در مورد امنیت غذایی جهانی است. اما سال ۲۰۱۵ اولین باری بود که این موضوع به‌عنوان تمرکز اصلی گزارش سالانه وضعیت غذا و کشاورزی سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد قرار گرفت. بر اساس ارزیابی علمی که توسط وزارت کشاورزی ایالات متحده در جریان بیست و یکمین نشست کنفرانس طرفین کنوانسیون تغییرات اقلیمی سازمان ملل (COP21)[۳] در پاریس منتشر شد، پیش‌بینی می‌شود که تغییرات اقلیمی احتمالاً موجب اختلال در تولید غذا و کاهش ایمنی غذایی خواهد شد، که در نهایت منجر به محدودیت‌های موجودی محلی و افزایش قیمت‌های مواد غذایی می‌شود (Brown و همکاران، ۲۰۱۵). این تهدیدها بر فقیرترین جوامع جهانی و مناطق استوایی

تـأثیر می‌گـذارد. در کنـار چالش‌هـای اقلیمـی، عوامـل اجتماعی-اقتصادی نظیر فقر، نابرابری درآمدی و محرومیت اجتماعی نیز نقش حیاتی در تعیین سطح دسترسی به غذا و تغذیه ایفا می‌کنند و از عوامل اصلی ناامنی غذایی در سطح جهان محسوب می‌شوند. افرادی که در فقر زندگی می‌کنند، اغلب فاقد منابع مالی کافی برای خرید غذای کافی یا دسترسی به غذاهای مغذی هستند که این امر مستقیماً به سوءتغذیه و کمبودهای تغذیه‌ای منجر می‌شود. این بعد از ناامنی غذایی، ضرورت توجه به سیاست‌های حمایتی و برنامـه‌های کـاهش فقـر را برجسـته می‌سـازد (O'Hara و Toussaint، ۲۰۲۱؛ Fanzo، ۲۰۱۴).

با افزایش جمعیت جهانی، تقاضا برای گوشت، تخم مرغ و محصولات لبنی در کشورهای درحال‌توسعه به شدت در حال افزایش است. تولید و مصرف محصولات دامی به‌طور فزاینده‌ای در کشورهای در حال توسعه متمرکز شده است. در واقع، تقاضا در این کشورها در دهه‌های اخیر به سرعت افزایش یافته است. دو دلیل اصلی این افزایش را می‌توان شهرنشـینی و افـزایش درآمـدها، بـه‌ویژه در کشـورهای درحال‌توسعه و نوظهور بیان کرد. افزایش مصرف گوشت در کشورهای درحال‌توسعه امری قابل درک است. در جهان درحال‌توسعه، به‌ویژه در آفریقا و آسیا، گوشت می‌تواند محرک عظیمی برای بهبود رژیم غذایی مردم باشد. این مورد می‌توانـد مـواد مغـذی مهمـی را کـه پیشـتر دریافـت نمی‌کردند، به خصوص برای افراد و گروه‌هایی که سوءتغذیه دارنـد، فـراهم کنـد. نـاامنی غـذایی پیامـدهای جـدی و گسترده‌ای برای سلامت و رفاه انسان دارد. این پیامدهای شـناخته شـده از نـاامنی غـذایی از طریـق مکانیزم‌هـای تغذیه‌ای و غیر تغذیه‌ای ایجاد می‌شوند (National Research Council، ۲۰۱۲). بـه‌عنوان‌مثـال، نـاامنی غـذایی می‌توانـد مصرف غذا را کاهش داده و در نتیجه منجر به سوءتغذیه شـود. اضـطراب، تعـاملات خـانوادگی و اجتمـاعی منفـی، نگرانی، اضطراب، محرومیت و بیگانگی می‌توانند قبل از هر تغییر در وضعیت تغذیه‌ای رخ دهند. این موارد به نوبه خود منجر به نتایج ضعیف سلامت در بزرگسالان و کودکان، از جمله سلامت روانی ضعیف (مانند علائم افسردگی، خطر خودکشی، رفاه ذهنی ضعیف)، سلامت جسمانی ضعیف ناشـی از بـروز و مـدیریت ضـعیف بیماری‌هـای مـزمن و مشکلات یادگیری، تأخیر در توسعه اجتماعی و مشکلات رفتاری در کودکان می‌شوند (National Research Council، ۲۰۱۲). همان‌طور کـه امنیـت غـذایی بـا چالش‌هـای متعـدد روبه‌رو است، امنیت آب نیز به عنوان ستون اصلی تولید غـذا، تـأثیرات عمیقـی بـر سـلامت و معیشـت انسـانی دارد (Rosinger & Young، ۲۰۲۰). شـواهد نشـان می‌دهـد کـه نـاامنی آب پیامـدهای اقتصـادی جـدی بـه همـراه دارد، زیـرا می‌توانـد منجـر بـه اختصـاص بخـش بـزرگ‌تـری از درآمـد خانوارهـا بـرای خریـد آب شـده و اسـتراتژی‌های سـلامتی و معیشـت افـراد را مختـل کنـد (Collins، ۲۰۲۲؛ Adams و همکاران، ۲۰۲۱). بـه‌عنـوا مثـال، در شـرایط کمبـود آب کـافی بـرای پخـت‌وپز، آبیـاری محصـولات یـا دام‌هـا، اسـتراتژی‌های معیشتی اقتصادی دچار شکست می‌شوند. این موضوع نه تنهـا بـه نوبـه خـود بـر امنیـت غـذایی تـأثیر می‌گـذارد، بلکـه می‌توانـد پیامـدهای سیاسـی نیـز داشـته باشـد. در نتیجـه، بسیاری از آن‌ها به مراکز شهری منتقل شده و استراتژی‌های معیشتی خود را تغییر می‌دهند (Kartiki، ۲۰۱۱). خشکسالی شـدید و کمبـود آب، بـه‌ویژه در فصـل‌های بارنـدگی بسـیار مرطوب در هنـد، بـا خطـر بیشـتر خودکشـی در کشـاورزان، بـه‌ویژه آن‌هـایی کـه در فقـر هسـتند، بـه دلیـل پیامـدهای اقتصـادی از دسـت دادن محصـولات همـراه اسـت (Richardson، ۲۰۲۳). درنهایـت، نـاامنی آب می‌توانـد پیامدهای سیاسی بزرگی داشته باشد، از اختلافات محلی دربـاره دسترسـی و اسـتفاده از آب گرفتـه تـا بحران‌هـای سیاسـی و حتـی جنگ‌هـا بـین کشـورهای مختلـف (Gleick، ۲۰۱۴). ایـن اختلافـات می‌تواننـد بـه نوبـه خـود پیامـدهای اقتصادی و بهداشتی داشته باشند. در مجموع، ناامنی آب تـأثیرات منفـی بـر سـلامت روانـی، تغذیـه‌ای، جسـمانی، اقتصادی و سیاسی دارد، اما میزان این آسیب هنوز به‌طور کامل مستند نشده است.

باتوجه‌به چالش‌های چند وجهی مطرح شده، درک تعامل فاکتورهـای کلیـدی امنیـت غـذایی شـامل دسترسـی‌پذیری، دسترسـی، ثبـات و مصـرف غـذا، کـه در شـکل (۱) نیـز بـه تفصیل نشان داده شده است، برای تضمین یک سیستم غـذایی پایـدار و عادلانـه بـرای همگـان ضـروری اسـت. ایـن رویکرد یکپارچه، بر اهمیت فراتر از صرفاً تولید کافی مواد غذایی و تأکید بر توزیع عادلانه، توان اقتصادی افراد برای تـأمین نیازهای تغذیه‌ای و ثبات عرضه در برابر بحران‌های اقتصادی و محیط‌زیستی تمرکز دارد. در این میان، الگوهای صـحیح مصـرف و تغذیـه سـالم، همـراه بـا کـاهش ضـایعات غـذایی اهمیـت بـالایی دارد. باتوجـه‌بـه چالش‌هـایی ماننـد تغییرات اقلیمی، نوسانات اقتصادی و وابستگی به واردات، تـدوین سیاسـت‌های پایـدار کشـاورزی، توسـعه فناوری‌هـای نوین و حمایت از جوامع آسیب‌پذیر ضروری است. تنها از طریق یک رویکرد جامع، چندبخشی و مبتنی بر **تـاب‌آوری و پایداری** می‌توان امنیت غذایی را در سطح ملی و جهانی تضمین کرد.



شکل ۱- فاکتورهای مهم در امنیت غذایی (Animasaun و همکاران، ۲۰۲۳)

از سوی دیگر، دسترسی به غذای سالم صرفاً به دسترس‌پذیری فیزیکی محدود نمی‌شود، بلکه مسئله‌ای وابسته به توان مالی نیز هست، زیرا گزینه‌های غذایی سالم اغلب گران‌تر از غذاهای فرآوری‌شده و ناسالم هستند. این امر باعث می‌شود که خانوارهای کم‌درآمد در تهیه غذای مغذی با دشواری مواجه شوند (Anderson و همکاران، ۲۰۲۱). برای پرداختن به مسئله دسترسی به غذای سالم، اتخاذ رویکردی چند بخشی ضروری است که عوامل زیربنایی مؤثر بر ناامنی غذایی و بیابان‌های غذایی را در نظر بگیرد (Speich و همکاران، ۲۰۲۳). برخی از راهبردهای پیشنهادی شامل توسعه گزینه‌های خرده‌فروشی مواد غذایی سالم در مناطق محروم، افزایش قدرت خرید خانوارهای کم‌درآمد از طریق برنامه‌های حمایتی غذایی، ترویج کشاورزی شهری و باغبانی اجتماعی و حمایت از نظام‌های غذایی محلی که تولید غذاهای سالم و پایدار را در اولویت قرار می‌دهند، هستند (Diekmann و همکاران، ۲۰۲۰). پرداختن به چالش دسترسی به غذای سالم مستلزم رویکردی جامع است که عوامل مختلف مؤثر بر ناامنی غذایی را در نظر بگیرد. در این میان، حاکمیت و امنیت غذایی به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان جنبه‌های اساسی در تضمین دسترسی همگانی به غذای ایمن، مغذی و متناسب با فرهنگ‌های مختلف شناخته می‌شوند. حاکمیت غذایی به حق جوامع و افراد در کنترل نظام‌های غذایی خود اشاره دارد، از جمله تولید، توزیع و مصرف غذا، به‌گونه‌ای که پایدار، عادلانه و سازگار با فرهنگ آن‌ها باشد (Desmarais و همکاران، ۲۰۱۷). از سوی دیگر، امنیت غذایی بر اطمینان از دسترسی همگانی به غذای کافی، ایمن و مغذی برای تأمین نیازهای تغذیه‌ای و ترجیحات غذایی افراد تمرکز دارد (Ingram، ۲۰۲۰). حاکمیت و امنیت غذایی دو مفهوم به‌هم پیوسته‌اند که اهمیت نظام‌های غذایی محلی و اجتماعی و همچنین توزیع عادلانه منابع و قدرت را مورد تأکید قرار می‌دهند (Poirier و Neufeld، ۲۰۲۳). این مفاهیم بر تولید و توزیع غذایی تأکید دارند که از نظر محیط‌زیستی پایدار، از نظر اجتماعی عادلانه و از نظر فرهنگی مناسب باشد و حمایت از کشاورزان خرده‌مالک و نظام‌های غذایی محلی را در اولویت قرار دهد (Desmarais و همکاران، ۲۰۱۷). علاوه‌براین، آن‌ها بر لزوم مشارکت جوامع به حاشیه رانده شده و به رسمیت شناختن دانش و تخصص آن‌ها در نظام‌های غذایی تأکید دارند. مسئله حاکمیت و امنیت غذایی پیامدهای مهمی برای سیاست‌گذاری و اجرا دارد. برای مثال، سیاست‌های غذایی جهانی و توافقات تجاری می‌توانند بر توانایی جوامع در حفظ کنترل بر نظام‌های غذایی خود تأثیر بگذارند، زیرا شرکت‌های بزرگ اغلب تجارت جهانی غذا را در اختیار دارند (Clapp و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه‌براین تمرکز بر افزایش تولید غذا از طریق کشاورزی صنعتی می‌تواند پیامدهای منفی از جمله تخریب زمین، کاهش تنوع زیستی، و تشدید نابرابری‌های اجتماعی برای محیط‌زیست و کشاورزان خرده‌مالک داشته باشد (Dalin و Outhwaite، ۲۰۱۹). برای پرداختن به مسئله حاکمیت و امنیت غذایی، اتخاذ رویکردی جامع که نیازها و

دیدگاه‌های جوامع محلی و کشاورزان خرده‌مالک را در نظر بگیرد، ضروری است (Adu-Baffour و همکاران، ۲۰۲۳). برخی از راهبردهای پیشنهادی شامل ترویج روش‌های تولید غذایی پایدار و زیست‌سازگار، حمایت از نظام‌های غذایی محلی و کشاورزان خرده‌مالک، و ادغام رویکردهای مشارکتی در حکمرانی و تصمیم‌گیری‌های غذایی است (Desmarais و همکاران، ۲۰۱۷). پرداختن به مسئله حاکمیت و امنیت غذایی مستلزم رویکردی جامع است که نیازها و دیدگاه‌های جوامع محلی و کشاورزان خرده‌مالک را در نظر بگیرد.

دستیابی به آینده امن غذایی به شدت به نحوه اشتراک‌گذاری و مدیریت منابع آب بستگی دارد. اهمیت حیاتی آب در تأمین جوامع عادلانه، پایدار و تولیدی، همچنین حفظ خدمات اکوسیستمی که همگان به آن وابسته‌ایم، روز به روز بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. این توجه فزاینده به ویژه در راستای درک محدودیت‌های منابع جهانی و مرزهای سیاره‌ای اهمیت دارد (Rockström و همکاران، ۲۰۰۹). در سال ۲۰۱۲، حدود ۸۷۰ میلیون نفر با مشکل عدم امنیت غذایی مواجه بودند (Sasson، ۲۰۱۲). درحالی‌که باوجود رشد چشمگیر تولید غذا به ازای هر نفر در نیم قرن گذشته، تعداد بیشتری از افراد از سوءتغذیه میکرومغذی رنج می‌برند (Godfray و همکاران، ۲۰۱۰). امنیت غذایی به‌عنوان «وضعیتی که در آن همه افراد، در تمامی اوقات، از دسترسی فیزیکی، اجتماعی و اقتصادی به غذای کافی، ایمن و مغذی برخوردارند، که نیازهای رژیمی و ترجیحات غذایی آن‌ها را برای زندگی فعال و سالم تأمین کند» تعریف می‌شود (Pérez-Escamilla، ۲۰۱۷). دلایل عدم امنیت غذایی پیچیده هستند و تنها به در دسترس بودن غذا محدود نمی‌شوند. این دلایل شامل عواملی در زمینه تولید، مانند دسترسی به آب و انرژی، ویژگی‌های فیزیکی زمین (مانند باروری یا تخریب خاک) و کیفیت مواد کشت و نژادهای دام می‌باشند. علاوه‌براین عوامل اجتماعی و اقتصادی، همچون دسترسی به عوامل تولیدی مانند زمین، نیروی کار و اعتبار، همچنین دسترسی به بازارها و درآمد، نقش مهمی در وضعیت امنیت غذایی افراد دارند. همچنین، عوامل فرهنگی نظیر نابرابری‌ها، نقش‌های جنسیتی، رژیم‌های غذایی و تابوهای غذایی، و سیاست‌های عمومی شامل سیاست‌های کشاورزی، مدیریت ریسک بلایا و سیستم‌های حمایت اجتماعی می‌توانند به‌شدت بر وضعیت امنیت غذایی تأثیرگذار باشند (Peña و همکاران، ۲۰۲۳). دستیابی به امنیت غذایی همچنان مسئله‌ای پیچیده است، به‌ویژه باتوجه‌به مجموعه‌ای از چالش‌های مرتبط با: ۱) جمعیتی که احتمالاً تا سال ۲۰۵۰ به ۹ میلیارد نفر خواهد رسید، ۲) افزایش ثروت بسیاری از افراد و قدرت خرید بالاتر که منجر به افزایش مصرف و تغییر در الگوهای تغذیه می‌شود، که همگی فشار مضاعفی به سیستم تأمین غذا وارد می‌کنند، ۳) رقابت بیشتر برای منابع حیاتی مانند زمین‌های حاصلخیز، آب و انرژی و ۴) نیاز به کاهش اثرات منفی بخش‌های کشاورزی و غذایی، کاهش تخریب و شیوه‌های غیرقابل استمرار و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای درعین‌حال که باید به سازگاری و کاهش تغییرات اقلیمی کمک کنیم (Godfray و همکاران، ۲۰۱۰). آب می‌تواند هم به عنوان یک تهدید (مثلاً به دلیل کمبود، زیادی یا تأمین نامناسب) و هم عاملی برای تقویت تاب‌آوری باشد. ارتباط آب با تاب‌آوری به دسترس‌پذیری، توزیع و حق دسترسی مردم به آن بستگی دارد. در سطح کلان، مسائل زیرساختی و ذخیره‌سازی معمولاً محور اصلی سیاست‌ها هستند تا اطمینان حاصل شود که جوامع قادر به تأمین نیازهای آبی خانگی، تولیدی و محیطی خود هستند. در این زمینه، تاب‌آوری معمولاً به استحکام شیوه‌های جمع‌آوری، توزیع و مدیریت آب و نیز میزان افزوده شدن افزونگی در مدیریت منابع آب (در سطوح زیرساختی و نهادی) مرتبط است (Falkenmark، ۲۰۱۳). در سطح خرد، ویژگی‌های تاب‌آوری مشابه هستند، هر چند که از طریق شکل‌های مختلف بروز می‌کنند. بسیاری از مواقع، ترتیبات نهادی غیررسمی نقش مهمی در سطوح محلی در کشورهای در حال توسعه دارند. علاوه‌براین مسائل نرم مانند فرهنگ و ترتیبات اجتماعی-نهادی تأثیر زیادی بر حق دسترسی به منابع آب دارند و به طور مستقیم توانایی مردم برای استفاده از منابع آبی در مواقع نیاز را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Cleaver و همکاران، ۲۰۰۶). بسیاری از بحران‌های غذایی کنونی یا تحت تأثیر درگیری‌های خشونت‌آمیز قرار دارند یا خود به تشدید این درگیری‌ها دامن می‌زنند.

یکی از ملموس‌ترین آثار جنگ بر امنیت غذایی، تخریب زمین‌های کشاورزی، سامانه‌های آبیاری و زیرساخت‌های حیاتی است. علاوه‌براین جابه‌جایی اجباری جمعیت و بروز قحطی ناشی از درگیری‌های خشونت‌آمیز پیامدهای منفی عمیق و ماندگاری بر امنیت غذایی جوامع آسیب دیده برجای می‌گذارد. از سوی دیگر، ناامنی غذایی مزمن می‌تواند به عاملی در تداوم یا تشدید درگیری‌های مسلحانه تبدیل شود و یک چرخه معیوب از خشونت و گرسنگی ایجاد کند (Kemmerling و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر درگیری‌های خشونت‌آمیز، تغییرات اقلیمی و رویدادهای شدید جوی، همچنین پاندمی COVID-19 و بحران‌ها و رکودهای اقتصادی مرتبط با آن، گرسنگی در سطح جهانی را تشدید کرده‌اند. ۷۲۰ تا ۸۱۱ میلیون نفر در سال ۲۰۲۰ با مشکل گرسنگی روبه‌رو بودند و شیوع سوءتغذیه که در پنج سال گذشته ثابت باقی مانده بود، به میزان ۱/۵ درصد افزایش یافته و به ۹/۹ درصد رسیده است (WHO، ۲۰۲۱). جنگ‌ها و درگیری‌ها همچنان به عنوان یکی از عوامل عمده بحران‌های غذایی کنونی شناخته می‌شوند. در سال ۲۰۲۰، بیش از ۹۹/۱ میلیون نفر در ۲۳ کشور از بحران‌های غذایی ناشی از درگیری‌ها رنج بردند (Baquedan o و همکاران، ۲۰۲۱). این بحران‌ها عمدتاً در کشورها یا مناطقی مشاهده می‌شود که پیش از این تحت تأثیر تغییرات اقلیمی منفی قرار

داشته‌اند، به شدت به کشاورزی برای تولید غذا وابسته‌اند و در آنجا درگیری‌های با ضعف دولت‌ها و سابقه‌ای از تنش‌ها و درگیری‌های قبلی هم‌زمان شده است (Baquedano و همکاران، ۲۰۲۱). تاکنون هیچ دسته‌بندی برای درگیری‌های خشونت‌آمیز که ناامنی غذایی را به‌عنوان شاخص در نظر بگیرد، وجود ندارد (Kemmerling و همکاران، ۲۰۲۲). برای جبران این خلأ، در این بخش، چهار بعد «تخریب»، «جابه‌جایی اجباری»، «کنترل مواد غذایی» و «گرسنگی به‌عنوان سلاح جنگ» از تأثیر درگیری‌ها بر ناامنی غذایی مورد بررسی قرار گرفت. این ابعاد، به‌عنوان عوامل تشدیدکننده اصلی چرخه معیوب بین ناامنی غذایی و درگیری‌های خشونت‌آمیز عمل می‌کنند. استفاده هدفمند از چهار منطق جنگ منجر به تشدید ناامنی غذایی و افزایش آسیب‌پذیری ساختاری در جوامع متأثر از درگیری می‌شود (Kemmerling و همکاران، ۲۰۲۲). افزایش قیمت مواد غذایی، تشدید نابرابری‌های اجتماعی، اخراج از فرآیندهای تصمیم‌گیری سیاسی و (افزایش) ضعف دولت‌ها از جمله عواملی هستند که می‌توانند در بروز درگیری‌های خشونت‌آمیز نقش ایفا کنند. این چرخه معیوب تحت تأثیر عوامل خارجی نظیر پاندمی‌ها، شوک‌های اقتصادی، بلایای طبیعی یا تغییرات اقلیمی قرار دارد (Anderson و همکاران، ۲۰۲۱). در جنگ‌ها و درگیری‌های خشونت‌آمیز، تأمین مواد غذایی برای هر گروه مسلح، از گروه‌های شبه نظامی گرفته تا ارتش‌های بزرگ، اهمیت استراتژیک بالایی دارد. به همین دلیل، حضور و سلطه گروه‌های مسلح مستقیماً بر امنیت غذایی محلی و کنترل مناطق تولید تأثیر می‌گذارد. در گذشته، تأمین مواد غذایی برای ارتش‌های بزرگ با غارت ذخایر غذایی و دستبرد به خانه‌ها و بازارهای غیرنظامیان همراه بوده است. اگرچه غارت هنوز هم یک استراتژی رایج در میان گروه‌های مسلح است، ارتباط میان حضور گروه‌های مسلح و امنیت غذایی لزوماً مخرب نیست. گروه‌های مسلح اغلب به دنبال افزایش تولید مواد غذایی در مناطق تحت کنترل خود هستند. سربازان می‌توانند به‌طور مستقیم بر منابع کشاورزی و دامداری‌ها کنترل پیدا کنند یا از محصولات آن‌ها مالیات دریافت کنند (Martin-Shields و Stojetz، ۲۰۱۹).

تأثیرات جنگ بر امنیت غذایی در میان مدت (۶ ماه تا ۲ سال) و بلندمدت (بیش‌تر از ۲ سال) هنوز با عدم قطعیت‌های زیادی همراه است. این مورد شامل هزینه‌های فوری جنگ و تأثیرات تحریم‌های کنونی و آینده روسیه است. در این شرایط، ترکیب تحریم‌ها و جنگ تأثیرات گسترده‌ای بر بازارهای جهانی کشاورزی و امنیت غذایی خواهد داشت و باعث نگرانی‌های زیادی در سراسر جهان، به‌ویژه در کشورهای کم‌درآمد و با درآمد متوسط که وابسته به واردات هستند، خواهد شد. برای مثال، چندین کشور در منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA) بیش از ۵۰ درصد از نیازهای غلات خود، به‌ویژه گندم، را از اوکراین و روسیه وارد می‌کنند (Hellegers، ۲۰۲۲). درک چگونگی اختلالات ناشی از جنگ در بازارهای جهانی غذا و کود که می‌تواند پیامدهای بزرگی در قیمت‌ها و دسترسی به غذا داشته باشد، برای درک تأثیرات کلی جنگ بر امنیت غذایی جهانی ضروری است. همچنین، تأثیرات جنگ بر سیستم‌های غذایی و زنجیره‌های تأمین جهانی نشان می‌دهد که این بررسی بسیار ضروری و فوری است. ارزیابی پیامدهای جنگ بر امنیت غذایی دشوار است، چرا که ابعاد کامل تأثیرات آن هنوز به‌طور دقیق مشخص نیست. جنگ همچنین برخی از پیامدهای غیرمستقیم و زنجیروار دارد. نخست، قیمت‌های نهاده‌های ضروری مانند کود به نزدیک بالاترین سطح خود رسیده است (Glauber و Laborde، ۲۰۲۳). به همین دلیل، بسیاری از کشاورزان در سراسر جهان، مانند ایالات متحده، در حال جایگزینی محصولات نیازمند کود گران مانند گندم و ذرت با محصولات کم کود مانند سویا هستند. از آنجا که سویا عمدتاً در تغذیه دام و بیودیزل استفاده می‌شود، این امر ممکن است کمبودهای موجود در تأمین را تشدید کرده و قیمت نان، غلات و سایر اقلام غذایی حیاتی را افزایش دهد. کمبود کود و هزینه‌های بالای آن می‌تواند اثرات منفی به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه داشته باشد که به دلیل افزایش قیمت‌ها، استفاده از آن‌ها به‌طور قابل توجهی محدود می‌شود و منجر به کاهش عملکرد محصولات کشاورزی در شرایط کاهش عرضه جهانی و رکورد قیمت‌های جهانی می‌شود (Vos و همکاران، ۲۰۲۵). برای پرداختن به نقش سیاست‌های کشاورزی در امنیت غذایی، اتخاذ رویکردی جامع و یکپارچه که نیازها و دیدگاه‌های متنوع ذی‌نفعان مختلف، از جمله کشاورزان، مصرف‌کنندگان، سیاست‌گذاران و سازمان‌های جامعه مدنی را در نظر بگیرد، امری حیاتی است (Mattas و همکاران، ۲۰۲۲). در این راستا، راهکارهای پیشنهادی می‌تواند به طور مؤثری در بهبود امنیت غذایی و کاهش آسیب‌پذیری‌ها مؤثر واقع شود. یکی از راهبردهای اصلی، ترویج شیوه‌های کشاورزی پایدار است که به حفظ منابع طبیعی، بهبود خاک و کاهش آلاینده‌ها کمک می‌کند. این شیوه‌ها نه‌تنها از لحاظ محیط‌زیستی مفید هستند، بلکه به افزایش تولید محصولات کشاورزی به‌طور پایدار و کاهش وابستگی به واردات نیز کمک خواهند کرد. به‌علاوه، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها و خدمات روستایی، به‌ویژه در زمینه‌های آبیاری، جاده‌ها و سیستم‌های ذخیره‌سازی، می‌تواند تأثیر زیادی در تقویت سیستم‌های تولید و توزیع غذا داشته باشد. این سرمایه‌گذاری‌ها می‌تواند از هدررفت منابع جلوگیری کرده و توانمندی‌های کشاورزان را در برابر بحران‌ها و تغییرات اقلیمی افزایش دهد. تقویت استانداردهای ایمنی و کیفیت مواد غذایی نیز یکی از جنبه‌های کلیدی در امنیت غذایی است. این اقدام می‌تواند منجر به بهبود سلامت عمومی و اطمینان از دسترسی مصرف‌کنندگان به مواد غذایی سالم و ایمن شود. به‌علاوه،

ارتقای فرآیندهای تصمیم‌گیری مشارکتی، به‌ویژه در سطوح محلی، می‌تواند در ایجاد راهکارهای مناسب و قابل قبول از سوی ذی‌نفعان مختلف مؤثر باشد. در این فرآیند، حضور و مشارکت طیف وسیعی از افراد و نهادها می‌تواند منجر به اتخاذ تصمیماتی شود که به بهبود امنیت غذایی و پایداری آن در بلندمدت کمک کند (Geekiyanage و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، بهبود دسترسی به فناوری‌های نوین کشاورزی و ترویج استفاده از داده‌ها و اطلاعات به‌روز در تصمیم‌گیری‌های کشاورزی، می‌تواند بهره‌وری تولید را افزایش و هزینه‌ها را کاهش دهد. توسعه و تقویت سیاست‌های حمایتی برای کشاورزان، مانند تخصیص تسهیلات مالی و بیمه محصولات کشاورزی، همچنین می‌تواند امنیت غذایی را تقویت کند. این اقدام‌ها کمک خواهند کرد تا کشاورزان با چالش‌های مختلف، از جمله بحران‌های طبیعی یا نوسانات قیمت، بهتر مقابله کنند. این راهکارها، در کنار توسعه فناوری‌های نوین کشاورزی، ارائه تسهیلات مالی و بیمه برای کشاورزان، آموزش کشاورزان در زمینه شیوه‌های مدیریتی و فنی، بهبود سیستم‌های توزیع و بازارهای محلی، تقویت همکاری‌های بین‌المللی برای بهبود امنیت غذایی، کاهش ضایعات غذایی و اقدامات مقابله‌ای با تغییرات اقلیمی، می‌توانند به‌طور چشمگیری در کاهش چالش‌های امنیت غذایی در سطح جهانی و به ویژه در کشورهای در حال توسعه تأثیرگذار باشند (Behera و همکاران، 2024).

رویکردها و راهکارهای تاب‌آورانه در پایداری امنیت غذایی در شرایط اضطراری و جنگی

امنیت غذایی در شرایط اضطراری ناشی از جنگ‌ها و بحران‌های نظامی، به عنوان یکی از پیچیده‌ترین چالش‌های حوزه توسعه پایدار و مدیریت بحران، مستلزم به‌کارگیری رویکردهای جامع و چندوجهی است. در چنین شرایطی، اختلالات جدی در تولید، توزیع و دسترسی به مواد غذایی به وجود می‌آید که می‌تواند منجر به بحران‌های انسانی گسترده و کاهش شدید سلامت جامعه شود. بنابراین، دستیابی به پایداری امنیت غذایی در بحران‌ها، نه تنها به تأمین کالری کافی محدود نمی‌شود، بلکه نیازمند رویکردهای تاب‌آورانه برای تضمین دسترسی به غذای ایمن، مغذی و متناسب با فرهنگ بومی نیز هست. این بخش به بررسی جامع سایر روش‌ها و استراتژی‌های پایداری امنیت غذایی در شرایط اضطراری و جنگی می‌پردازد و راهکارهایی را برای تقویت تاب‌آوری نظام‌های غذایی در این دوران چالش‌برانگیز ارائه می‌دهد (Hillbruner و Moloney، ۲۰۱۲؛ Rembold و همکاران، ۲۰۱۹؛ Hassoun و همکاران، ۲۰۲۵). در ادامه به بررسی سایر روش‌های پایداری امنیت غذایی در شرایط اضطراری و جنگی پرداخته می‌شود:

توسعه کشاورزی مقاوم و تاب‌آور: یکی از رویکردهای کلیدی، توسعه کشاورزی مقاوم در برابر شوک‌های جنگی و شرایط نامساعد محیطی است که شامل کشت محصولات مقاوم به خشکی، آفات و آلودگی‌های زیستی می‌باشد. هدف این است که وابستگی به واردات مواد غذایی کاهش یافته و خودکفایی در مناطق جنگ‌زده افزایش یابد. استفاده از گونه‌های بومی و مقاوم که سازگاری بیشتری با شرایط منطقه دارند، می‌تواند به تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی کمک شایانی کند. علاوه‌براین معرفی و ترویج تکنیک‌های کشاورزی حفاظتی مانند حداقل خاک‌ورزی، تناوب کشت، و کشت محصولات پوششی، می‌تواند به بهبود سلامت خاک، حفظ رطوبت و کاهش فرسایش کمک کرده و پایداری سیستم‌های کشاورزی را در برابر شوک‌های محیطی و انسانی افزایش دهد. نمونه‌هایی از این رویکردها در مناطق درگیر جنگ، نشان داده است که انعطاف‌پذیری نظام‌های تولید محلی را به شکل چشمگیری ارتقا داده است (Wheeler و Von Braun، ۲۰۱۳).

مدیریت هوشمند ذخیره‌سازی و توزیع: بهره‌گیری از فناوری‌های نوین در ذخیره‌سازی، مانند سردخانه‌های پیشرفته با انرژی‌های تجدیدپذیر و بسته‌بندی‌های هوشمند، به حفظ کیفیت و افزایش عمر مفید مواد غذایی کمک می‌کند و از هدررفت منابع در زنجیره تأمین جلوگیری می‌نماید. علاوه‌براین شبکه‌های توزیع محلی و سیستم‌های بازاریابی کوتاه‌مدت که به‌سرعت قابلیت واکنش به تغییرات شرایط امنیتی و حمل‌ونقل را دارند، نقش مؤثری در تضمین دسترسی به غذا ایفا می‌کنند. ایجاد انبارهای اضطراری و توزیع غیرمتمرکز می‌تواند آسیب‌پذیری در برابر حملات هدفمند به زیرساخت‌ها را کاهش دهد. بهره‌گیری از سیستم‌های لجستیک معکوس برای بازیابی و بازتوزیع مازاد مواد غذایی یا اقلام ضروری، می‌تواند به کاهش ضایعات و استفاده بهینه از منابع موجود در شرایط بحرانی کمک کند. همچنین، توسعه پلتفرم‌های دیجیتال محلی برای اتصال مستقیم تولیدکنندگان به مصرف‌کنندگان، می‌تواند از اختلال در زنجیره‌های تأمین سنتی جلوگیری کرده و دسترسی به غذا را در مناطق آسیب‌دیده تسهیل نماید (Smith و همکاران، ۲۰۱۳؛ Tchonkouang و همکاران، ۲۰۲۴).

تقویت همکاری‌های بین‌المللی و منطقه‌ای: تقویت مشارکت‌های بین‌المللی و منطقه‌ای، از طریق ایجاد نهادهای تخصصی حمایت‌کننده و صندوق‌های مالی اضطراری، امکان تأمین سریع منابع غذایی و حمایت‌های مالی برای آسیب‌دیدگان جنگ را فراهم می‌آورد. سازمان‌های بین‌المللی مانند FAO و WFP نقش حیاتی در هماهنگی کمک‌های غذایی و اجرای

برنامه‌های اضطراری دارند. تبادل اطلاعات و تجربیات میان کشورها نیز می‌تواند به بهبود واکنش‌ها در بحران‌های آینده کمک کند (Sukanya، ۲۰۲۴).

بهره‌گیری از فناوری اطلاعات و سامانه‌های پایش هوشمند: استفاده از فناوری اطلاعات و سامانه‌های پایش هوشمند به مدیریت دقیق‌تر منابع و پیش‌بینی بحران‌های احتمالی کمک می‌کند. این سامانه‌ها امکان واکنش به‌موقع را افزایش داده و به شناسایی نقاط آسیب‌پذیر در زنجیره تأمین غذا کمک می‌کنند. سامانه‌های هشدار زودهنگام برای قحطی و ناامنی غذایی، مانند ASAP، می‌توانند داده‌های کلیدی را برای تصمیم‌گیرندگان فراهم کنند (Barrett و همکاران، ۲۰۱۰؛ Tadasse و همکاران، ۲۰۱۶).

برنامه‌های آموزشی و توانمندسازی جوامع محلی: برنامه‌های آموزشی و توانمندسازی جوامع محلی جهت مدیریت منابع غذایی و مقابله با بحران‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. مشارکت فعال جامعه در فرایند پایداری امنیت غذایی منجر به افزایش تاب‌آوری و کاهش آسیب‌پذیری می‌شود. آموزش کشاورزان در زمینه روش‌های نوین کشت، مدیریت آب و ذخیره‌سازی محصولات و همچنین ترویج باغچه‌های خانگی و کشاورزی شهری، می‌تواند به خوداتکایی محلی کمک کند (Béné و همکاران، ۲۰۱۶؛ Adelaja و George، ۲۰۲۱).

رویکردهای مالی و اقتصادی اضطراری: در شرایط جنگی، دسترسی به بازارهای سنتی ممکن است مختل شود. بنابراین، توسعه بازارهای جایگزین، سیستم‌های کوپن غذایی، و حمایت‌های نقدی مشروط[۴] می‌تواند به خانوارها در تأمین غذای مورد نیازشان کمک کند. این رویکردها انعطاف‌پذیری بیشتری را برای مصرف‌کنندگان فراهم می‌کنند و می‌توانند به تحریک اقتصاد محلی نیز یاری رسانند (Hassoun و همکاران، ۲۰۲۵).

این مرور جامع تلاش دارد تا با تحلیل روش‌های فوق و ارائه چارچوبی علمی، بستر مناسبی برای سیاست‌گذاری‌های مؤثر در حوزه امنیت غذایی در شرایط اضطراری جنگ‌ها فراهم آورد. امنیت غذایی در چنین شرایطی تنها به معنای تأمین کالری کافی نیست، بلکه شامل دسترسی به غذای ایمن، مغذی و متناسب با فرهنگ بومی نیز می‌شود. دستیابی به پایداری در امنیت غذایی مستلزم یک رویکرد جامع، چندبخشی و مبتنی بر تاب‌آوری است که ابعاد فنی، اقتصادی، اجتماعی و حکمرانی را در بر گیرد. تمرکز بر خوداتکایی محلی، تنوع‌بخشی به منابع غذایی، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم و توانمندسازی جوامع، از اصول اساسی در مقابله با تهدیدات جنگی بر امنیت غذایی است. همکاری‌های بین‌المللی و استفاده از فناوری‌های نوین نیز می‌تواند به تسریع و بهبود پاسخ‌ها در برابر بحران‌های آینده کمک کند، تا از این طریق آسیب‌پذیری جمعیت‌های متأثر از جنگ به حداقل برسد و کرامت انسانی حفظ شود. این رویکردها در کنار یکدیگر می‌توانند به جوامع کمک کنند تا در مواجهه با شدیدترین بحران‌ها نیز قادر به حفظ حداقل سطح امنیت غذایی باشند.

شکاف‌های اساسی در ادبیات امنیت غذایی

با وجود پژوهش‌های گسترده در زمینه امنیت غذایی، همچنان خلأهای مهمی در ادبیات این حوزه وجود دارد که پرداختن به آن‌ها برای تحقق توسعه پایدار در زمینه امنیت غذایی ضروری است. ازجمله این شکاف‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) بی‌توجهی به برخی موضوعات کلیدی: مسائلی مانند هدررفت مواد غذایی، حاکمیت غذایی و دیدگاه‌ها و تجربیات گروه‌های به حاشیه رانده شده، تاکنون در ادبیات امنیت غذایی به‌اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفته‌اند (Garnett ، ۲۰۱۳).

۲) هدررفت مواد غذایی: هدررفت مواد غذایی مفهومی کلی است که شامل دو بخش اصلی می‌شود: تلفات غذایی که در مراحل تولید، برداشت، ذخیره‌سازی، فرآوری و توزیع رخ می‌دهد و ضایعات غذایی که عمدتاً در مرحله خرده‌فروشی و مصرف نهایی اتفاق می‌افتد. هر دو بخش سالانه حجم قابل توجهی از منابع غذایی و طبیعی را از بین می‌برند و تأثیرات محیط‌زیستی و اجتماعی گسترده‌ای دارند. با وجود ابعاد وسیع این چالش، پژوهش‌ها در زمینه راه‌حل‌های جامع برای کاهش هدررفت و پسماند و ادغام آن در سیاست‌های امنیت غذایی، همچنان ناکافی است. براساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (Ishangulyyev و همکاران، ۲۰۱۹)، سالانه حدود یک سوم مواد غذایی تولید شده برای مصرف انسانی در مراحل مختلف زنجیره تأمین از بین می‌رود یا هدر می‌رود. این امر نه تنها باعث اتلاف منابعی همچون آب، زمین و انرژی می‌شود، بلکه پیامدهای محیط‌زیستی و اجتماعی گسترده‌ای نیز به همراه دارد. ازاین‌رو، تمایز دقیق میان هدررفت و پسماند غذایی و تدوین راهکارهای کاهش هر یک، از اقدامات کلیدی در تقویت امنیت غذایی و تحقق توسعه پایدار محسوب می‌شود.

۳) حاکمیت غذایی: مفهوم حاکمیت غذایی که بر حق جوامع در کنترل نظام‌های تولید، توزیع، و مصرف غذا تأکید دارد، باوجود ارتباط نزدیک آن با امنیت غذایی، تاکنون در پژوهش‌های این حوزه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. درحالی‌که رویکردهای مبتنی بر حاکمیت غذایی می‌توانند به افزایش تاب‌آوری و پایداری نظام‌های غذایی کمک کنند و نقش مهمی در کاهش آسیب‌پذیری جوامع در برابر بحران‌های غذایی داشته باشند. همچنین، تبادل مؤثر اطلاعات و بازخوردها

میان سطوح خرد (جوامع محلی و تولیدکنندگان) و کلان (نهادهای سیاست‌گذار) اهمیت بالایی دارد، چراکه بازخوردهای سطح خرد می‌توانند به اصلاح و بهبود سیاست‌گذاری‌ها در سطح کلان منجر شوند و انطباق بیشتری با واقعیت‌های میدانی ایجاد کنند (Nisbet و همکاران، ۲۰۲۲).

۴) نادیده گرفتن دیدگاه‌های گروه‌های به حاشیه رانده شده: کشاورزان خرده‌مالک، جوامع کم‌درآمد و دیگر گروه‌های آسیب‌پذیر اغلب با چالش‌های منحصربه‌فردی در تولید و دسترسی به غذا مواجه هستند. بااین‌حال، مطالعات امنیت غذایی کمتر به دیدگاه‌ها و تجربیات این گروه‌ها پرداخته‌اند (Scoones، ۲۰۲۲). این غفلت پژوهشی مانعی جدی در مسیر درک جامع‌تر عوامل مؤثر بر ناامنی غذایی و طراحی راهکارهای مؤثر برای کاهش آن است. برای رفع این شکاف‌ها، ضروری است که پژوهش‌های امنیت غذایی با رویکردی جامع‌تر انجام شوند و تنوع دیدگاه‌ها و تجربیات مختلف در آن‌ها منعکس شود. علاوه‌براین یکی از خلأهای مهم، فقدان سیاست‌گذاری مبتنی بر مفهوم آب مجازی متناسب با اقلیم هر منطقه است؛ توجه به مبادله آب مجازی می‌تواند نقش مهمی در مدیریت منابع و بهینه‌سازی واردات و صادرات کالاهای کشاورزی ایفا کند. همچنین، پژوهش‌های آینده باید موضوعاتی همچون هدررفت مواد غذایی و حاکمیت غذایی را در اولویت قرار دهند و اطمینان حاصل شود که دیدگاه‌های گروه‌های به حاشیه رانده شده به‌درستی در مطالعات این حوزه نمایان شده‌اند. تنها از طریق چنین رویکردی، که سیاست‌گذاری‌های اقلیم محور و مشارکتی را دربر می‌گیرد، می‌توان راهبردهای مؤثری برای تقویت نظام‌های غذایی پایدار، عادلانه و تاب‌آور تدوین کرد.

باتوجه‌به مباحث مطرح شده در این بخش، روشن است که امنیت غذایی در قرن بیست‌ویکم با چالش‌های چند وجهی و پیچیده‌ای مواجه است که فراتر از صرف تأمین حجم کافی غذا می‌رود. این چالش‌ها، به‌ویژه در بستر تغییرات اقلیمی، بحران‌های آبی و درگیری‌های ژئوپلیتیکی، نیاز به رویکردهای تاب‌آورانه و نوآورانه دارند. همانطور که مورد بررسی قرار گرفت، راهکارهایی مانند توسعه کشاورزی مقاوم، مدیریت هوشمند ذخیره‌سازی و توزیع، تقویت همکاری‌های بین‌المللی، و بهره‌گیری از فناوری‌های اطلاعاتی، همگی می‌توانند در افزایش تاب‌آوری نظام‌های غذایی نقش محوری ایفا کنند. تأکید بر سیاست‌گذاری‌های تاب‌آورانه به این معنا است که برنامه‌ریزی‌ها باید نه تنها به کاهش آسیب‌پذیری‌ها در برابر شوک‌ها بپردازند، بلکه ظرفیت بازیابی و انطباق نظام‌های غذایی را نیز تقویت نمایند. این شامل سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های انعطاف‌پذیر، تنوع‌بخشی به سیستم‌های تولید و عرضه، توانمندسازی جوامع محلی، و ایجاد مکانیزم‌های هشدار زودهنگام و واکنش سریع است. در نهایت، دستیابی به امنیت غذایی پایدار در محیطی سرشار از عدم قطعیت‌ها، مستلزم درک عمیق از تعامل این چالش‌ها و پیاده‌سازی راهبردهایی است که عدالت، پایداری محیط‌زیستی و تاب‌آوری اجتماعی را در کانون توجه قرار می‌دهند. این جمع‌بندی، چارچوبی نظری برای تحلیل یافته‌ها و ارائه پیشنهادهای کاربردی در بخش بعدی فراهم می‌آورد.

بحث و نتیجه‌گیری

امنیت غذایی در قرن بیست‌ویکم، به عنوان یک چالش چندوجهی، تحت تأثیر شدید عوامل محیط‌زیستی، اقتصادی، اجتماعی و سیاسی قرار دارد و نتایج این مطالعه بر پیچیدگی این تعاملات تأکید می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که دستیابی به امنیت غذایی پایدار تنها با افزایش تولید و بهبود بهره‌وری منابع محقق نمی‌شود؛ بلکه نیازمند اصلاحات ساختاری در سیاست‌ها، توسعه زیرساخت‌های توزیع، و تقویت حکمرانی غذا در سطوح ملی و بین‌المللی است. در این میان، عواملی چون رشد سریع جمعیت، تغییرات اقلیمی، تخریب منابع طبیعی و رقابت بر سر زمین و آب، به پیچیدگی این معضل افزوده و شکنندگی نظام‌های غذایی را تشدید کرده‌اند. از منظر محیط‌زیستی، تغییرات اقلیمی به عنوان یک تهدید کلیدی، پیامدهای گسترده‌ای بر تولید و عرضه غذا دارد.

افزایش دما، تغییر الگوهای بارندگی، کاهش منابع آبی و افزایش فراوانی بلایای طبیعی مانند خشکسالی و سیل، همگی باعث کاهش بازدهی محصولات کشاورزی و افزایش نوسانات تولید شده‌اند. همچنین، تخریب خاک و کاهش تنوع زیستی، پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی را تهدید کرده و موجب کاهش انعطاف‌پذیری این نظام‌ها در برابر شوک‌های محیطی شده است. برای مقابله با پیامدهای تغییر اقلیم، اتخاذ سیاست‌های سازگارانه از جمله توسعه کشاورزی هوشمند، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین در مدیریت منابع آب، بهبود روش‌های کشت و استفاده از گونه‌های مقاوم به تنش‌های محیطی، ضروری است. علاوه‌براین در کشورهای مواجه با تنش آبی شدید، همچون ایران، اتخاذ رویکردهای نوین در مدیریت منابع آب، به‌ویژه با در نظر گرفتن سیاست‌گذاری مبتنی بر آب مجازی، اهمیت حیاتی دارد. این رویکرد می‌تواند نقش کلیدی در تعادل‌بخشی میان امنیت غذایی و امنیت آبی ایفا کند. آب مجازی به میزان آبی اطلاق می‌شود که برای تولید یک کالا یا خدمت، از مرحله کشت و تولید اولیه تا فرآوری و توزیع نهایی، به صورت غیرمستقیم مصرف می‌شود. این مفهوم شامل تمام آب مصرفی در طول چرخه حیات یک محصول است که در محصول نهایی به صورت فیزیکی وجود ندارد، اما برای تولید آن ضروری بوده است. در واقع، آب مجازی کمک می‌کند تا حجم واقعی آب پنهان در هر کالایی درک

شود و به‌این‌ترتیب می‌توان تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تری در زمینه تجارت و سیاست‌گذاری منابع آبی اتخاذ نمود. در این میان یکی از مسائل حیاتی که اغلب در سیاست‌گذاری‌های امنیت غذایی نادیده گرفته می‌شود، تأثیرات مصرف منابع آبی در کشاورزی است. به‌ویژه در کشورهایی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، توجه به مفهوم آب مجازی اهمیت بالایی دارد. بهره‌گیری از تراز آب مجازی در تصمیم‌گیری‌های تجاری و سیاست‌گذاری واردات و صادرات محصولات کشاورزی می‌تواند با کاهش تولید داخلی محصولات پرمصرف آبی و واردات هدفمند آن‌ها، به تعادل میان امنیت غذایی و امنیت آبی کمک شایانی کند. این رویکرد باید به عنوان یک ابزار مکمل در مدیریت پایدار منابع آب و تولیدات غذایی مورد استفاده قرار گیرد. در بسیاری از کشورها، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، سیستم‌های کشاورزی هنوز از فناوری‌های نوین در مدیریت منابع آب استفاده نمی‌کنند. این امر موجب هدررفت مقادیر زیادی آب و کاهش بهره‌وری آن در تولیدات کشاورزی می‌شود. چنانچه سیاست‌های افزایش تولید داخلی بدون در نظر گرفتن بهینه‌سازی مصرف آب اتخاذ شوند، فشار مضاعفی بر منابع آبی وارد خواهد شد که در نهایت منجر به کاهش دسترسی به آب، و تضعیف ظرفیت کشاورزی و امنیت غذایی می‌شود. لذا، استراتژی‌هایی نظیر حمایت از تولید داخلی باید همواره با افزایش بهره‌وری منابع آب و استفاده بهینه از آن‌ها در کشاورزی همراه باشد. برای نمونه، فناوری‌های نوین در آبیاری، سیستم‌های آبیاری قطره‌ای، و کشاورزی دقیق می‌توانند به کاهش مصرف آب و بهبود تولیدات کشاورزی کمک کنند. همچنین، در مناطقی که با محدودیت‌های شدید منابع آبی روبه‌رو هستند، باید به سمت کشاورزی مقاوم به کم‌آبی حرکت کرد و سیاست‌های حمایتی از کشاورزی پایدار را تقویت نمود. افزون بر این، بهبود زیرساخت‌های ذخیره‌سازی آب و کاهش تلفات آب در فرآیندهای مختلف کشاورزی و تولید غذا نیز اهمیت بالایی دارد. این اقدامات نه‌تنها به بهبود بهره‌وری منابع آبی کمک می‌کند بلکه می‌تواند به کاهش وابستگی به واردات مواد غذایی و تقویت امنیت غذایی در سطح ملی کمک نماید. به این ترتیب، توسعه تولیدات داخلی باید در یک چارچوب کلان و منطبق با اصول مدیریت پایدار منابع طبیعی، به‌ویژه منابع آبی، قرار گیرد تا از به خطر افتادن امنیت آبی و در نهایت امنیت غذایی جلوگیری شود.

در سطح اجتماعی، فقر و نابرابری از مهمترین عوامل محدودکننده دسترسی پایدار به غذا محسوب می‌شوند. با وجود رشد تولید جهانی غذا، همچنان میلیون‌ها نفر در سراسر جهان از سوءتغذیه و ناامنی غذایی رنج می‌برند. این مسئله بیانگر آن است که افزایش تولید به‌تنهایی نمی‌تواند امنیت غذایی را تضمین کند، بلکه توزیع عادلانه و دسترسی همگانی به غذا نیز باید در اولویت سیاست‌گذاری‌ها قرار گیرد. توانمندسازی جوامع محلی، کاهش ضایعات غذایی، ایجاد سیستم‌های حمایتی برای گروه‌های آسیب‌پذیر و توسعه سیاست‌های رفاهی، می‌تواند نقش کلیدی در کاهش نابرابری‌ها و بهبود امنیت غذایی ایفا کند. در حوزه حکمرانی و سیاست‌گذاری، یافته‌ها نشان می‌دهد که نظام‌های غذایی پایدار نیازمند یک چارچوب حکمرانی جامع و یکپارچه هستند تا رویکردهای اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی را در قالب یک سیاست منسجم ترکیب کند. تدوین سیاست‌های کلان در سطح ملی و همکاری‌های بین‌المللی برای مقابله با بحران‌های غذایی، می‌تواند به ایجاد نظام‌های غذایی تاب‌آور کمک کند. در این راستا، سیاست‌گذاری‌های تاب‌آورانه در حوزه امنیت غذایی اهمیت ویژه‌ای دارد، به ویژه در مواجهه با شرایط بحرانی مانند خشکسالی شدید، اختلالات زنجیره تأمین یا بحران‌های ژئوپلیتیکی. این رویکرد می‌تواند شامل ایجاد ذخایر استراتژیک غذا و نهاده‌های کشاورزی، حمایت از کشاورزان آسیب‌پذیر از طریق بیمه و تسهیلات، تنوع‌بخشی به منابع واردات مواد غذایی برای کاهش وابستگی، توسعه کشاورزی سازگار با اقلیم و مقاوم در برابر شوک‌ها و استقرار سامانه‌های هشدار زودهنگام برای پیش‌بینی و پاسخ سریع به بحران‌ها باشد. گنجاندن این رویکردها در برنامه‌ریزی ملی می‌تواند به افزایش ظرفیت پاسخ‌گویی نظام غذایی در برابر شوک‌های آینده کمک کند. در مجموع، امنیت غذایی یک مسئله چندبُعدی است که تنها با یک رویکرد جامع، مشارکتی و مبتنی بر شواهد علمی قابل تحقق خواهد بود. اتخاذ سیاست‌های پایدار، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین، مدیریت بهینه منابع، کاهش نابرابری‌ها و تقویت همکاری‌های بین‌المللی، می‌تواند راهگشای عبور از بحران‌های کنونی و دستیابی به یک نظام غذایی پایدار و تاب‌آور باشد.

در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که امنیت غذایی یک مسئله چندبعدی است که تنها با یک رویکرد جامع، مشارکتی و مبتنی بر شواهد علمی و با تمرکز بر نوآوری‌هایی نظیر مدیریت آب مجازی و حکمرانی مشارکتی قابل تحقق خواهد بود. اتخاذ سیاست‌های پایدار، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین، مدیریت بهینه منابع، کاهش نابرابری‌ها، و تقویت همکاری‌های بین‌المللی، می‌تواند راهگشای عبور از بحران‌های کنونی و دستیابی به یک نظام غذایی پایدار و تاب‌آور باشد. این چارچوب نوآورانه، بینش‌های جدیدی را برای سیاست‌گذاران و پژوهشگران فراهم می‌آورد تا به طور موثرتری با چالش‌های امنیت غذایی قرن بیست‌ویکم مقابله کنند.

منابع

Adams, E. L., Caccavale, L. J., Smith, D., & Bean, M. K. (2021). Longitudinal patterns of food insecurity, the home food environment, and parent feeding practices during COVID-19. Obesity Science & Practice, 7(4), 415-424. https://doi.org/10.1002/osp4.499

Food System. United States Department of Agriculture. https://doi.org/10.7930/J0862DC7.

Candel, J. J. (2014). Food security governance: A systematic literature review. Food Security, 6, 585-601. https://doi.org/10.1007/s12571-014-0364-2

Christoforidou, M., Borghuis, G., Seijger, C., Van Halsema, G. E., & Hellegers, P. (2023). Food security under water scarcity: a comparative analysis of Egypt and Jordan. Food Security, 15(1), 171-185. https://doi.org/10.1007/s12571-022-01310-y

Clapp, J., Moseley, W. G., Burlingame, B., & Termine, P. (2022). The case for a six-dimensional food security framework. Food policy, 106, 102164. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2021.102164

Cleaver, K., Okidegbe, N., & De Nys, E. (2006). Agriculture and rural development: Hunger and malnutrition. In *World Bank Seminar Series: Global Issues Facing Humanity. Washington, DC: The World Bank*, 1-18.

Collins, A. M. (2022). Empowerment, rights, and global food governance: gender in the UN Committee for World Food Security. Globalizations, 19(2), 220-237. https://doi.org/10.1080/14747731.2021.1877006

Dalin, C., & Outhwaite, C. L. (2019). Impacts of global food systems on biodiversity and water: the vision of two reports and future aims. *One Earth*, *1*(3), 298-302. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.016.

Daniel, A. I., Fadaka, A. O., Gokul, A., Bakare, O. O., Aina, O., Fisher, S., & Klein, A. (2022). Biofertilizer: the future of food security and food safety. Microorganisms, 10(6), 1220. https://doi.org/10.3390/microorganisms10061220

De Waal, A. (2025). Hunger in global war economies: understanding the decline and return of famines. Disasters, 49(1), e12661. https://doi.org/10.1111/disa.12661

Desmarais, A. A., Qualman, D., Magnan, A., & Wiebe, N. (2017). Investor ownership or social investment? Changing farmland ownership in Saskatchewan, Canada. Agriculture and Human Values, 34, 149-166. https://doi.org/10.1007/s10460-016-9704-5

Diekmann, L. O., Gray, L. C., & Thai, C. L. (2020). More than food: The social benefits of localized urban food systems. Frontiers in Sustainable Food Systems, 4, 534219. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.534219

Falkenmark, M. (2013). Growing water scarcity in agriculture: future challenge to global water security. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 371(2002), 20120410. https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0410

Fanzo, J. (2014). Strengthening the engagement of food and health systems to improve nutrition security: Synthesis and overview of approaches to address malnutrition. Global food security, 3(3-4), 183-192. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.09.001

FAO. (1996). Rome Declaration on world food security and world food summit plan of

Adelaja, A., & George, J. (2021). Food and agricultural security: an introduction to the special issue. *Sustainability*, *13*(21), 12129. https://doi.org/10.3390/su132112129

Adeyeye, S. A. O., Ashaolu, T. J., Bolaji, O. T., Abegunde, T. A., & Omoyajowo, A. O. (2023). Africa and the Nexus of poverty, malnutrition and diseases. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 63(5), 641-656. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1952160

Adu-Baffour, F., Daum, T., Obeng, E. A., Birner, R., & Bosch, C. (2023). *Are community-based land restoration approaches sustainable? A mixed methods study of Ghana's small-scale mining sector*. In *Nachhaltige Ernährungssysteme und Landnutzungswandel: 63. Jahrestagung der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V.* (pp. 201–219). GEWISOLA. https://hdl.handle.net/10419/289832

Anderson, M. D., & Cook, J. T. (1999). Community food security: Practice in need of theory? Agriculture and human values, 16, 141-150. https://doi.org/10.1023/A:1007580809588

Anderson, W., Taylor, C., McDermid, S., Ilboudo-Nébié, E., Seager, R., Schlenker, W., & Markey, K. (2021). Violent conflict exacerbated drought-related food insecurity between 2009 and 2019 in sub-Saharan Africa. Nature Food, 2(8), 603-615. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00327-4

Animasaun, D. A., Adedibu, P. A., Shkryl, Y., Emmanuel, F. O., Tekutyeva, L., & Balabanova, L. (2023). Modern plant biotechnology: an antidote against global food insecurity. *Agronomy*, *13*(8), 2038. https://doi.org/10.3390/agronomy13082038

Azmi, F. R., Zailani, S., & Roni, M. (2023). A Review of the Critical Gaps in the Food Security Literature: Addressing Key Issues for Sustainable Development. Information Management and Business Review, 15(2), 35-46. https://doi.org/10.22610/imbr.v15i2(I).3440

Baquedano, F. G., Zereyesus, Y. A., Valdes, C., & Ajewole, K. (2021). International food security assessment 2021-31. Economic Research Service. U.S. Department of Agriculture. https://doi.org/10.22004/ag.econ.312952

Barrett, C. B. (2010). Measuring food insecurity. *Science*, *327*(5967), 825-828. https://doi.org/10.1126/science.1182768

Behera, B., Haldar, A., & Sethi, N. (2024). Agriculture, food security, and climate change in South Asia: a new perspective on sustainable development. Environment, Development and Sustainability, 26(9), 22319-22344.
DOI: 10.1007/s10668-023-03552-y

Béné, C., Headey, D., Haddad, L., & von Grebmer, K. (2016). Is resilience a useful concept in the context of food security and nutrition programmes? Some conceptual and practical considerations. *Food security*, *8*, 123-138. https://doi.org/10.1007/s12571-015-0526-x

Brown, M. E., Antle, J. M., Backlund, P., Carr, E. R., Easterling, W. E., Walsh, M. K., Tebaldi, C. (2015). *Climate Change, Global Food Security, and the U.S.*

Lee, C. C., Zeng, M., & Luo, K. (2024). How does climate change affect food security? Evidence from China. Environmental Impact Assessment Review, 104, 107324. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107324

Lefilef, A., Roucham, B., Kerrouche, N., & Belghaouti, N. T. B. (2025). Navigating the nexus between blue economy and food security through bibliometric analysis. Discover Food, 5(1), 39. https://doi.org/10.1007/s44187-025-00305-w

Manikas, I., Ali, B. M., & Sundarakani, B. (2023). A systematic literature review of indicators measuring food security. Agriculture & food security, 12(1), 10. https://doi.org/10.1186/s40066-023-00415-7

Martin-Shields, C. P., & Stojetz, W. (2019). Food security and conflict: Empirical challenges and future opportunities for research and policy making on food security and conflict. *World development*, *119*, 150-164.

Mattas, K., Tsakiridou, E., Karelakis, C., Lazaridou, D., Gorton, M., Filipović, J., & Veneziani, M. (2022). Strengthening the sustainability of European food chains through quality and procurement policies. Trends in Food Science & Technology, 120, 248-253. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.11.021

Mora, O., Le Mouël, C., de Lattre-Gasquet, M., Donnars, C., Dumas, P., Réchauchère, O., & Marty, P. (2020). Exploring the future of land use and food security: A new set of global scenarios. PloS one, 15(7), e0235597. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235597

Moussa, L. G., Mohan, M., Arachchige, P. S. P., Rathnasekara, H., Abdullah, M., Jaffar, A., & Abulibdeh, A. (2025). Impact of water availability on food security in GCC: Systematic literature review-based policy recommendations for a sustainable future. Environmental Development, 54, 101122. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2024.101122

National Research Council, Policy and Global Affairs, Science and Technology for Sustainability Program, & Committee on Food Security for All as a Sustainability Challenge. (2012). *A sustainability challenge: Food security for all: Report of two workshops*. The National Academies Press. Washington, DC, USA.

Nisbet, C., Lestrat, K. E., & Vatanparast, H. (2022). Food security interventions among refugees around the globe: a scoping review. Nutrients, 14(3), 522. https://doi.org/10.3390/nu14030522

O'Hara, S., & Toussaint, E. C. (2021). Food access in crisis: Food security and COVID-19. Ecological Economics, 180, 106859. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106859

Peña, M. R., Dhanya, C. T., Dawson, R. J., Gosain, A., & Yusop, Z. (Eds.). (2023). *Water security and sustainable development in an uncertain world*. Frontiers Media SA.

Pérez-Escamilla, R. (2017). Food security and the 2015–2030 sustainable development goals: From human to planetary health. *Current developments in nutrition*, *1*(7), e000513. https://doi.org/10.3945/cdn.117.000513.

Poirier, B., & Neufeld, H. T. (2023). "We need to live off the land": An exploration and conceptualization of action. Rome, Italy. https://www.fao.org/4/w3613e/w3613e00.htm

Garnett, T. (2013). Food sustainability: problems, perspectives and solutions. Proceedings of the nutrition society, 72(1), 29-39. https://doi.org/10.1017/S0029665112002947

Geekiyanage, D., Fernando, T., & Keraminiyage, K. (2023). Modelling interrelationships of the factors impeding community engagement in risk-sensitive urban planning: Evidence from Sri Lanka. Sustainability, 15(20), 14662. https://doi.org/10.3390/su152014662

Glauber, J., & Laborde, D. (2023). Repurposing food and agricultural policies to deliver affordable healthy diets, sustainably and inclusively: what is at stake? Background paper for *The State of Food Security and Nutrition in the World 2022*. Food & Agriculture Organization, Rome, Italy.

Gleick, P. H. (2014). Water, drought, climate change, and conflict in Syria. Weather, climate, and society, 6(3), 331-340. https://doi.org/10.1175/WCAS-D-13-00059.1

Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., & Toulmin, C. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *science*, *327*(5967), 812-818. https://doi.org/10.1126/science.1185383

Hassoun, A., Hamad, A., Iriqat, D., Nijim, M., Bouchikh, Y., Buheji, M., & Aldahdouh, T. Z. (2025). The Implications of the Ongoing War on Gaza for Food Sustainability. *Sustainable Futures*, 100473. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100473

Hellegers, P. (2022). Food security vulnerability due to trade dependencies on Russia and Ukraine. *Food security*, *14*(6), 1503-1510. https://doi.org/10.1007/s12571-022-01306-8.

Hillbruner, C., & Moloney, G. (2012). When early warning is not enough—Lessons learned from the 2011 Somalia Famine. *Global Food Security*, *1*(1), 20-28. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2012.08.001

Hulme, M. (2023). Climate change isn't everything: Liberating climate politics from alarmism. John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey, USA.

Ingram, J. (2020). Nutrition security is more than food security. Nature food, 1(1), 2-2. https://doi.org/10.1038/s43016-019-0002-4

Ishangulyyev, R., Kim, S., & Lee, S. H. (2019). Understanding food loss and waste—why are we losing and wasting food?. *Foods*, *8*(8), 297. https://doi.org/10.18485/meattech.2023.64.2.55.

Kartiki, K. (2011). Climate change and migration: a case study from rural Bangladesh. Gender & Development, 19(1), 23-38. https://doi.org/10.1080/13552074.2011.554017

Kemmerling, B., Schetter, C., & Wirkus, L. (2022). The logics of war and food (in) security. Global Food Security, 33, 100634. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100634

Kemmerling, B., Schetter, C., & Wirkus, L. (2022). The logics of war and food (in) security. Global Food Security, 33, 100634. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100634

its implications for food security and policy, 59-82. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28201-5

Tchonkouang, R. D., Onyeaka, H., & Nkoutchou, H. (2024). Assessing the vulnerability of food supply chains to climate change-induced disruptions. *Science of the Total Environment*, *920*, 171047. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171047

Varzakas, T., & Smaoui, S. (2024). Global food security and sustainability issues: the road to 2030 from nutrition and sustainable healthy diets to food systems change. Foods, 13(2), 306. https://doi.org/10.3390/foods13020306

Vilakazi, B., Mafongoya, P. L., Odindo, A. O., & Phophi, M. M. (2025). The role of neglected grain legumes in Food and Nutrition Security and Human Health. Sustainability, 17(1), 350. https://doi.org/10.3390/su17010350

Vos, R., Glauber, J., Hebebrand, C., & Rice, B. (2025). Global shocks to fertilizer markets: Impacts on prices, demand and farm profitability. Food Policy, 133, 102790. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2024.102790

Wani, N. R., Rather, R. A., Farooq, A., Padder, S. A., Baba, T. R., Sharma, S., & Ara, S. (2024). New insights in food security and environmental sustainability through waste food management. Environmental Science and Pollution Research, 31(12), 17835-17857. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26462-y

Wheeler, T., & Von Braun, J. (2013). Climate change impacts on global food security. *Science*, *341*(6145), 508-513. https://doi.org/10.1126/science.123940

World Health Organization (WHO). (2021). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2021: Transforming food systems for food security, improved nutrition and affordable healthy diets for all* (Vol. 2021). Food & Agriculture Org. https://doi.org/10.4060/cb4474en.

Young, S. L., Frongillo, E. A., Jamaluddine, Z., Melgar-Quiñonez, H., Pérez-Escamilla, R., Ringler, C., & Rosinger, A. Y. (2021). Perspective: the importance of water security for ensuring food security, good nutrition, and well-being. Advances in nutrition, 12(4), 1058-1073. https://doi.org/10.1093/advances/nmab003

پی‌نوشت‌ها

1. Water security
2. Water crisis
3. Conference of the Parties – 21st session
4. Cash Transfers

community-based Indigenous food sovereignty experiences and practices. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(5), 4627. https://doi.org/10.3390/ijerph20054627

Rembold, F., Meroni, M., Urbano, F., Csak, G., Kerdiles, H., Perez-Hoyos, A., & Negre, T. (2019). ASAP: A new global early warning system to detect anomaly hot spots of agricultural production for food security analysis. *Agricultural systems*, *168*, 247-257. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.07.002

Richardson, B. F. (2023). Urban Expansion and Food Security in New Zealand: The Collapse of Local Horticulture. Routledge, https://doi.org/10.4324/9781003400325

Rockström, J., Falkenmark, M., Karlberg, L., Hoff, H., Rost, S., & Gerten, D. (2009). Future water availability for global food production: The potential of green water for increasing resilience to global change. Water resources research, 45(7). https://doi.org/10.1029/2007WR006767

Rosinger, A. Y., & Young, S. L. (2020). The toll of household water insecurity on health and human biology: Current understandings and future directions. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 7(6), e1468. https://doi.org/10.1002/wat2.1468

Saatsaz, M. (2020). A historical investigation on water resources management in Iran. Environment, Development and Sustainability, 22(3), 1749-1785. https://doi.org/10.1007/s10668-018-00307-y

Sasson, A. (2012). Food security for Africa: an urgent global challenge. *Agriculture & Food Security*, *1*(1), 2. https://doi.org/10.1186/2048-7010-1-2.

Scoones, I. (2022). A new politics of uncertainty: towards convivial development in Africa. African futures, 101-110.

Smith, L. C., & Subandoro, A. (2007). *Measuring food security using household expenditure surveys* (Vol. 3). International Food Policy Research Institute. Washington, DC, USA.

Smith, P., Haberl, H., Popp, A., Erb, K. H., Lauk, C., Harper, R., & Rose, S. (2013). How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals?. *Global change biology*, *19*(8), 2285-2302. https://doi.org/10.1111/gcb.12160

Speich, C., Pannatier, M., Berlin, R., Freymond, M., Monroy-Gomez, J., Nwokoro, C. C., & Prytherch, H. (2023). The potential of digital tools to foster production, and thus availability, of healthy diets for city dwellers in secondary cities. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 418, p. 05001). EDP Sciences, France.

Sukanya, R. (2024). Global trade and food security. Springer Nature Switzerland, Cham, Switzerland. Tadasse, G., Algieri, B., Kalkuhl, M., & Von Braun, J. (2016). Drivers and triggers of international food price spikes and volatility. *Food price volatility and*

Journal of Water and Sustainable Development. December 2025
Volume 12. Issue 3 (Serial No. 37). pages 32 to 44

نشریه اب و توسعه پایدار. آذر ماه ۱۴۰۴
سال دوازدهم. شماره سوم (پیاپی ۳۷). صفحات ۳۲ تا ۴۴

Document Type: Case Study

نوع مقاله: مطالعه موردی

Hydraulic Modeling and Executive Proposal for Quality Management of Inflow Water to the Darkhoveyn Water Treatment Plant

D. Horri[1], J. Ahadiyan[2]*, M. Shafai Bejestan[2], S.M. Sajjadi[3]

1, 2, 3- Ph.D. Student, Professor, and Associate Professor of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

*** Corresponding Author Email**: j.ahadiyan@scu.ac.ir

Received ▶ 20-03-2025
Revised ▶ 16-07-2025
Accepted ▶ 23-07-2025
Available online ▶ 16-12-2025

مدل‌سازی هیدرولیکی و ارائه اجرایی به منظور مدیریت کیفی آب ورودی به تصفیه‌خانه آب دارخوین

داود حری[1]، جواد احدیان[2]*، محمود شفاعی بجستان[2] و سید محسن سجادی[3]

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و دانشیار سازه‌های آبی، دانشکده آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

***رایانامه نویسنده مسئول:** j.ahadiyan@scu.ac.ir

تاریخ دریافت ◀ ۱۴۰۳/۱۲/۳۰
تاریخ بازنگری ◀ ۱۴۰۴/۰۴/۲۵
تاریخ پذیرش ◀ ۱۴۰۴/۰۵/۰۱
تاریخ انتشار ◀ ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

Abstract

The Darkhoveyn water treatment plant supplies drinking water to the cities of Darkhoveyn, Shadegan, and surrounding villages. Its inflow is provided both gravitationally from the Dez diversion dam via the Ghadir Khuzestan water transmission system and simultaneously by pumping from the Karun River. After being combined in a mixing basin, the water enters clarifiers and is then transferred to the treatment plant. This study, using simulation in WaterGEMS software, conducts a hydraulic analysis and investigates a practical and feasible solution to separate and directly transfer the Ghadir water during incidents such as rainfall, river flooding, and seasonal turbidity events. To achieve this, a direct branch was connected from the Ghadir water transmission pipeline at the entry point of the Darkhoveyn facilities to the inlet of the treatment plant, and its optimal size was determined to maintain the pre-branch hydraulic conditions. The results from hourly measured turbidity values showed that after implementing the new branch, due to a 50% reduction in the volume of water entering the clarifiers and an increase in the retention time, the turbidity of the water exiting the clarifiers decreased by 25%. This is of great significance for the operation and maintenance of the clarifiers. Furthermore, based on the results, the turbidity of the water entering the treatment plant was reduced by 50%, and under conditions where no water is drawn from the river, 52% of the required water for the cities and surrounding villages can be supplied through the proposed solution using the Ghadir water transmission system.

Keywords: Ghadir Khuzestan Water Transmission System, Darkhoveyn Water Treatment Plant, Hydraulic Model and Water Turbidity.

چکیده

تصفیه‌خانه دارخوین، تأمین کننده آب شرب شهرهای دارخوین، شادگان و روستاهای حومه آن می‌باشد. آب ورودی به آن، به صورت ثقلی از سد انحرافی دز توسط سامانه انتقال آب غدیر خوزستان و به‌طور هم‌زمان توسط پمپاژ از رودخانه کارون تأمین می‌شود که پس از ترکیب در حوضچه اختلاط، وارد کلاریفایرها و به تصفیه‌خانه منتقل می‌شود. پژوهش حاضر با استفاده از روش شبیه‌سازی در نرم‌افزار WaterGEMS، به مطالعه هیدرولیکی و بررسی راهکار عملی و قابل اجرا به منظور تفکیک و انتقال مستقیم آب غدیر که کدورت مطلوب‌تری در مقایسه با آب کارون در شرایط بروز حوادثی مانند بارندگی، طغیان رودخانه و مواجهه با کدورت‌های فصلی دارد، پرداخته است. به‌این‌منظور، از سامانه انتقال آب غدیر در محل ورودی به تأسیسات دارخوین، یک انشعاب به‌صورت مستقیم به ورودی تصفیه‌خانه متصل شده و سایز بهینه آن با هدف حفظ شرایط هیدرولیکی قبل از انشعاب، تعیین شده است. نتایج حاصل از مقادیر کدورت ساعتی اندازه‌گیری شده نشان داد پس از اجرای انشعاب جدید به دلیل کاهش ۵۰ درصدی حجم آب ورودی به کلاریفایرها و افزایش دو برابری زمان ماند، کدورت آب خروجی از آنها ۲۵ درصد کاهش یافته است که این امر در انجام عملیات سرویس و نگهداری کلاریفایرها اهمیت زیادی دارد. همچنین بر اساس نتایج، کدورت آب ورودی به تصفیه‌خانه به میزان ۵۰ درصد کاهش یافته و در شرایط عدم آبگیری از رودخانه نیز می‌توان توسط راهکار پیشنهادی، ۵۲ درصد از آب مورد نیاز شهرها و روستاهای حومه آن‌ها را توسط سامانه انتقال آب غدیر تأمین کرد.

واژه‌های کلیدی: سامانه انتقال آب غدیر خوزستان، تصفیه‌خانه دارخوین، مدل هیدرولیکی و کدورت آب.

How to cite this article:

How to cite this article: Horri, D., Ahadiyan, J., Shafai Bejestan, M., & Sajjadi S.M. (2025). Hydraulic Modeling and Executive Proposal for Quality Management of Inflow Water to the Darkhoveyn Water Treatment Plant. Journal of Water and Sustainable Development, 12(3), 32-44. https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i3.2503-1413

مقدمه

سامانه‌های آبرسانی از جمله زیرساخت‌های اساسی محسوب می‌شوند که نقش اصلی را در تأمین آب با کمیت و کیفیت مناسب بر عهده دارند. هرگونه اخلال در عملکرد آنها می‌تواند موجب عدم دسترس بخش زیادی از جامعه به آب سالم شود. از اجزای اصلی سامانه‌های آبرسانی تصفیه‌خانه‌های آب هستند. تهدیدات یک تصفیه‌خانه آب شامل منشأ انسانی، منشأ طبیعی از قبیل زلزله، سیل و خشکسالی و یا حتی دارای منشأ عملکردی مانند خطای مدیریتی، عدم وجود طراحی صحیح و کنترل منظم اجزای یک تصفیه‌خانه آب است. عدم توجه کافی به این موارد و همچنین بی‌توجهی به شناخت نقاط آسیب‌پذیر، می‌تواند سلامت افراد جامعه را تهدید کرده و هزینه‌های درمانی را بالا ببرد. باتوجه‌به این عوامل، بررسی وضعیت فعلی تصفیه‌خانه‌ها و نیز پیشبینی و بررسی شرایط اضطراری و بحرانی محتمل در این سیستمها اهمیت زیادی دارد و بررسی وضعیت سیستم تصفیه‌خانه آب برای مواجهه با شرایط اضطراری و بحرانی ضروری است (تابش و همکاران، ۱۳۹۷).

طرح آبرسانی غدیر از سال ۱۳۸۷ با هدف آبرسانی جهت رفع نیاز شهرهای مرکزی، جنوب و غرب استان خوزستان (شامل ۲۵ شهر و ۱۶۰۸ روستا) و هدف نهایی تأمین حداکثر ۲۴ متر مکعب در ثانیه و سالانه ۷۵۷ میلیون مترمکعب آغاز شد. شرکت بهره‌برداری، تولید و انتقال آب غدیر خوزستان در سال ۱۳۹۴ تأسیس و پس از تکمیل فاز اول و دوم طرح، عهده‌دار بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات خطوط و تأسیسات طرح شد و در حال حاضر به طور متوسط ۱۲ متر مکعب در ثانیه و سالانه ۳۷۸ میلیون متر مکعب آب شرب ۱۶ شهر و ۴۹۵ روستا تأمین می‌شود (پوستی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳).

تصفیه‌خانه دارخوین به عنوان بخشی از طرح جامع آبرسانی غدیر، آب شرب شهرهای شادگان، خنافره و دارخوین و ۱۶۰ روستای تابعه آن با جمعیتی بالغ بر ۲۲۱ هزار نفر را تأمین می‌کند. منابع تأمین آب این تصفیه‌خانه، سامانه انتقال آب غدیر (آب کانال W2 سد انحرافی دز) و رودخانه کارون می‌باشد که پس از ورود به حوضچه اختلاط و تزریق پلی آلومینیوم کلراید به عنوان ماده منعقد کننده، آب خروجی از حوضچه، بین چهار دستگاه کلاریفایر با ظرفیت ۱۱۰۰ متر مکعب در ساعت (در مجموع ۴۴۰۰ مترمکعب) تقسیم شده و سپس با یک لوله ۱۴۰۰ میلی‌متر به حوضچه مقسم در ورودی به تصفیه‌خانه منتقل می‌شود. از آنجایی‌که در سال‌های اخیر در فصل بارندگی میزان کدورت آب رودخانه کارون در محل ورودی به تأسیسات دارخوین 12100 NTU نیز مشاهده شده است، این مسأله، بهره‌برداری و نگهداری را با مشکلات فراوانی مواجه کرده است.

از جمله نرم‌افزارهایی که برای مدل‌سازی هیدرولیکی در بازار موجود می‌باشد می‌توان به نرم‌افزار WaterGEMS اشاره نمود. این محصول با قابلیت ArcGIS توانایی انجام و انتقال نتایج حاصل از محاسبات جغرافیایی را دارد و تمام کارایی برنامه WaterCad در برنامه WaterGEMS موجود می‌باشد. این نرم‌افزار دارای سه برنامه اساسی است (Darwin Designer، Darwin Calibrator و Darwin Scheduler) که دو مورد آن مربوط به بهره‌برداری و یکی از آن‌ها مربوط به طراحی است و بر این اساس، برای حل مشکلات طراحان و بهره‌برداران موثر می‌باشد. از دیگر ویژگی‌های این نرم‌افزار می‌توان به تحلیل سیستم لوله‌کشی، ساخت مدل‌های هیدرولیکی و مدل‌سازی دقیق پمپ‌های آب، مدیریت خطوط انتقال آب، ایستگاه پمپاژ و سیستم آبیاری تحت فشار اشاره کرد. محاسبه پارامترهای هیدرولیکی، طراحی بهینه شبکه توزیع و تشخیص نشت آب در شبکه نیز ازجمله قابلیت‌های WaterGEMSاست. نرم‌افزار مذکور را می‌توان پیش از اجرای شبکه آبرسانی، برای طراحی و پس از اجرای آن نیز برای رفع نواقص و بهینه کردن عملکرد هیدرولیکی آن به کار برد (نظری، ۱۳۹۰).

در طی سالیان اخیر، مطالعات زیادی در زمینه اهمیت مدیریت کیفی منابع تأمین آب و آب ورودی به تصفیه‌خانه انجام شده است که در ادامه راهکارهای مدیریتی ارائه شده توسط پژوهشگران بررسی شده است.

فریدی‌راد و قلی‌نژاد (۱۴۰۰) به بررسی ویژگی‌های کیفیت شیمیایی و تعیین پتانسیل خورندگی آب آشامیدنی شهر پردیس پرداخته‌اند و به‌همین منظور طی یک سال، از پنج چاه فلمن اطراف رودخانه جاجرود و مخزن مربوط به آبگیر سد لتیان نمونه‌برداری انجام داد و بر اساس مقادیر پارامترهای کیفی نمونه‌های آب شامل PH، کل جامدهای محلول، سختی‌های دائم، موقت و کل، قلیاییت و آنیون‌های آب و پتانسیل خورندگی آب با محاسبه شاخص‌های لانژیه، لایزنر، خورندگی، پورکوریوس و لارسون مشخص شد. طبق نتایج به‌دست آمده، در کل، کیفیت آب ورودی متمایل به خورندگی بوده و توصیه شده که خطوط انتقال و توزیع آب از جنس مقاوم انتخاب شود یا اقداماتی همچون پوشش دیواره داخلی لوله یا اصلاح کیفیت آب انجام گیرد.

معصومی و همکاران (۱۳۹۸) چگونگی تأثیرگذاری کیفیت آب ورودی به تصفیه‌خانه در تغییر رنگ آب و همچنین ایجاد کف در واحدهای مختلف فرآیندی تصفیه آب را بررسی کردند. این پژوهش به صورت مطالعه موردی و در مقیاس واقعی برروی آب خام ورودی به تصفیه‌خانه آب کوه سبز انجام شده است. پژوهش در طول ۶ ماه در فاصله زمانی بهمن ماه سال ۹۵ تا تیر ماه سال ۹۶ انجام گرفته است. در مرحله اول کیفیت آب خام بر اساس روش‌های استاندارد ارزیابی شد. در مرحله بعد تأثیر هر یک از پارامترها از قبیل دما، کدورت، رنگ، EC، PH، TOCو DOC در ایجاد رنگ و کف در واحدهای فرآیندی تصفیه آب و مکانیسم تأثیرات بررسی شد. نتایج نشان داد

پارامترهای کیفی آب ورودی به تصفیه‌خانه در ایجاد رنگ و کف در واحدهای فرآیندی تصفیه آب موثر هستند.

حریف و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهش خود شبکه توزیع شماره ۲ آب شرب شهر زاهدان را به عنوان منطقه مطالعاتی مدنظر قرار دادند و نقاط مستعد با غلظت بالای آلاینده در شبکه را شناسایی کردند. شبیه‌سازی شبکه در اثر وقوع دو ساعته آلودگی، با استفاده از مدل عددی EPANET مدل‌سازی شد. جهت مدیریت کیفی آب در شبکه دو ابزار تخلیه آب با غلظت غیر مجاز و جریان رقیق‌ساز به کار گرفته شده و نتایج آنها در مدیریت بحران مذکور مقایسه شد. نتایج شبیه‌سازی حرکت آلاینده در خاک، غلظت غیرمجاز نیترات در مجاورت لوله با مقدار بیش از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر را نشان داد. نتایج به‌کارگیری ابزار مدیریت کیفی تخلیه آب با غلظت غیرمجاز نشان داد که با قطع نمودن جریان به مدت ۱/۱ تا ۳/۱ بازه زمانی تزریق آلودگی به شبکه و همچنین خروج آب به میزان ۵ تا ۸ درصد دبی پایه لوله، می‌توان از ورود آلودگی به نقاط دیگر شبکه جلوگیری نمود. علاوه‌براین برای اولین بار تأثیر مثبت و کارآمد جریان رقیق‌ساز در مدیریت کیفی شبکه آب به اثبات رسید؛ به‌گونه‌ای که مقدار جریان رقیق‌ساز لازم به‌منظور بهبود وضعیت کیفی شبکه، حدود ۱۶ درصد دبی پایه لوله محاسبه شد.

حریف و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی دیگر، سناریو شبیه‌سازی ۲۴ ساعته شبکه توزیع آب شرب شهر زاهدان پس از وقوع دو ساعته آلودگی، با استفاده از نرم‌افزارهای EPANET، EPANET-BAM و WaterGEMS را مدل‌سازی کردند. دو ابزار کارآمد و مقرون به صرفه زمان ماند و جریان رقیق‌ساز به منظور مدیریت کیفی شبکه استفاده شدند. برای شبیه‌سازی ابزار زمان ماند، شبکه به چهار منطقه نزدیک، میانه، دور و خیلی دور تقسیم شد. نتایج تحلیل کیفی شبکه بیانگر این بود که زمان ماند مورد نیاز گره‌های ناحیه میانه، دور و خیلی دور نسبت به حالت نزدیک به ترتیب بین ۳۳ تا ۵۰، ۵۸ تا ۶۲/۵ و ۷۵ درصد کاهش می‌یابد. در ادامه تأثیر مثبت و کارآمد جریان رقیق‌ساز به‌عنوان یک راهکار مدیریت و کنترل کیفی شبکه توزیع به اثبات رسید. مقدار جریان رقیق‌ساز لازم به‌منظور بهبود وضعیت کیفی آب شبکه، بین ۱۰/۶ تا ۱۵/۹ درصد دبی پایه لوله محاسبه شد.

تابش و همکاران (۱۳۹۷) روش تحلیل ریسک مشهور درخت خطا با دو رویکرد ساده و فازی را برای ارزیابی ریسک تصفیه‌خانه استفاده کردند. مدل آنها در قالب یک مطالعه موردی در تصفیه‌خانه جلالیه تهران ارائه شده است. رویداد نامطلوب در این ساختار، کمیت و کیفیت نامناسب آب بوده است. نتایج پژوهش آنها نشان داد که عملکرد تصفیه‌خانه در رویکرد فازی با احتمال ۱۹ درصد و در حالت غیر فازی حدود ۱۰ درصد با شکست مواجه می‌شود که این مقدار ریسک در بازه کم تا متوسط به‌وجود می‌آید. با رتبه‌بندی رویدادهای پایه مشخص شد تهدیداتی از جمله طراحی نامناسب مخزن، خرابی تجهیزات برق‌رسانی، شکست لوله انتقال و تعمیر و نگهداری نامناسب پمپ‌ها، بیشترین سهم را در رویکرد و عملکرد تصفیه‌خانه دارند.

Platikanov و همکاران (2019) امکان استفاده از روش‌های شیمی‌سنجی مانند آنالیز اجزای اصلی (PCA) برای تجزیه و تحلیل هم‌زمان چند پارامتر کیفیت آب با هدف اتخاذ استراتژی‌های نظارت جامع‌تر و کنترل کیفیت آب، کاهش زمان و تلاش‌های صرف شده در فرآیند پایش را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد در آینده نزدیک، تشخیص و تجزیه و تحلیل رویدادها/الگوها را می‌توان با جمع‌آوری داده‌ها از چندین حسگر متصل برای ارزیابی کیفیت آب که منابع اینترنتی را در مدیریت کیفیت آب رودخانه در ورودی آب تصفیه‌خانه‌های آب آشامیدنی به همراه روش‌های پیشنهادی در این کار برای ابزارهای تجزیه و تحلیل داده‌های چند متغیره در بر می‌گیرد، تسهیل کرد. استفاده از PCA بر روی داده‌های حسگرها در ورودی آب در تصفیه‌خانه‌های آب آشامیدنی، امکانات جدیدی را برای تضمین کیفیت بهبود یافته و رویه‌های کنترل برای مدیریت آنها و استراتژی آن ارائه می‌دهد.

Koley و همکاران (2024) کیفیت آب را قبل و بعد از فرآیند تصفیه آب آشامیدنی معمولی ارزیابی کردند. به‌این‌منظور کیفیت آب هر ماه از سه تصفیه‌خانه آب آشامیدنی اصلی در گواهاتی، آسام، هند به مدت یک سال تجزیه و تحلیل شد. این مطالعه تنوع قابل توجهی در کدورت آب رودخانه و سطوح پاتوژن نشان داد. در فصل بارش، کدورت آب رودخانه تا NTU ۲۰ ± ۴۷۰ رسید و افزایش غلظت پاتوژن در فصول خشک در شرایط جریان کم مشاهده شد. بارها، کدورت آب آشامیدنی و مقادیر MPN از مقدار دستورالعمل BIS در آب آشامیدنی فراتر رفت. کربن آلی کل (TOC)، یکی از پیش‌سازهای اصلی محصولات جانبی ضدعفونی مشاهده شده در آب آشامیدنی تصفیه شده، در محدوده بالاتری در آب قبل و بعد از درمان قرار دارد. پس از درمان، TOC (۰/۵ ± ۳/۲۵ میلی‌گرم در لیتر) پیدا شد. برای درک بهتر، کیفیت آب با استفاده از شاخص کیفیت آب با وزن آنتروپی اصلاح شده (MEWQI) ارزیابی شد که وضعیت بسیار ضعیفی را در آب خام جمع‌آوری شده از رودخانه براهماپوترا نشان داد. درحالی‌که کیفیت آب پس از تصفیه در ماه‌های خاصی از سال در دسته‌بندی مناسب تا خیلی خوب متفاوت بود، اما در هیچ یک از تصفیه‌خانه‌های منتخب هرگز کیفیت عالی حاصل نشد. نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که کدورت و MPN بیشترین سهم را در WQI آب خام به دنبال TOC در آب آشامیدنی دارند. با ارائه داده‌های دقیق کیفیت آب، این مطالعه به نفع محققان، سیاست‌گذاران و دانشمندان آب است. همچنین اتخاذ روش‌های تولید پاک را برای کاهش آلودگی و افزایش کیفیت آب تسهیل می‌کند.

Paca و همکاران (2019) مطالعه خود را با هدف: ۱) ارزیابی کیفیت آب (پارامترهای فیزیکوشیمیایی و میکروبیولوژیکی) سه رودخانه آنگولا (کوانزا، بنگو و دنده) در مکان‌هایی که آب

به عنوان آب آشامیدنی استفاده می‌شود یا برای مصارف انسانی انتزاع می‌شود، ۲) ایجاد یک شاخص کیفیت آب جدید که بتواند به طور کمی کیفیت آب را در آن سایت‌ها بیان کند و ۳) برای ارزیابی توزیع فضایی آلودگی آب از طریق تجزیه و تحلیل اجزای اصلی (PCA) انجام دادند. به‌این‌منظور، ارزیابی کیفیت آب با انجام چهار بررسی میدانی کمپین های I تا IV انجام شد. دو کمپین اول در فصل خشک و دو کمپین آخر در فصل بارانی انجام شد. در دو کمپین اول، کیفیت آب برای تصفیه برای تولید آب آشامیدنی مناسب بود، درحالی‌که در دو کمپین آخر، آب برای این منظور نامناسب بود (سطوح بالایی از کلیفرم‌های مدفوعی تشخیص داده شد). گندزدایی ابتدایی که معمولاً توسط تأمین‌کنندگان آب انجام می‌شود ممکن است کیفیت آب را بهبود بخشد، اما برای دستیابی به مقادیر پارامتری مورد نیاز برای مصرف انسانی در فصل باران کمپین‌های III وIV به جز سایت‌های بنگو کافی نبود.

Kumar و Singh (۲۰۲۱) کیفیت و خورندگی رودخانه گانگا را برای سال ۲۰۱۹ در فصول قبل، پس و فصل موسمی تعیین کردند. به‌این‌منظور، کیفیت آب گنگا بر اساس شاخص کیفیت آب (WQI) و پتانسیل خوردگی تعیین شد و بیست و یک نمونه در فصول پیش، پس و فصل موسمی گرفته شد. خصوصیات فیزیکوشیمیایی شامل کدورت، pH، کلسیم، سولفات، نیترات، کل جامد محلول، منیزیم، کلرید، سختی، اکسیژن محلول، قلیاییت، نیاز بیوشیمیایی اکسیژن، دما، هدایت الکتریکی، مقایسه شد، همچنین LSI، RSI، AI، PSI و Ls بر اساس بیان ریاضی محاسبه شدند. نتیجه‌گیری شد که باتوجه‌به افزایش مقادیر BOD، کدورت و MPN/100 میلی‌لیتر در تمامی نمونه‌ها، آب رودخانه گانگا برای مصارف شرب بدون تصفیه و همچنین انجام اقدامات مدیریتی لازم قبل از تصفیه مناسب نیست.

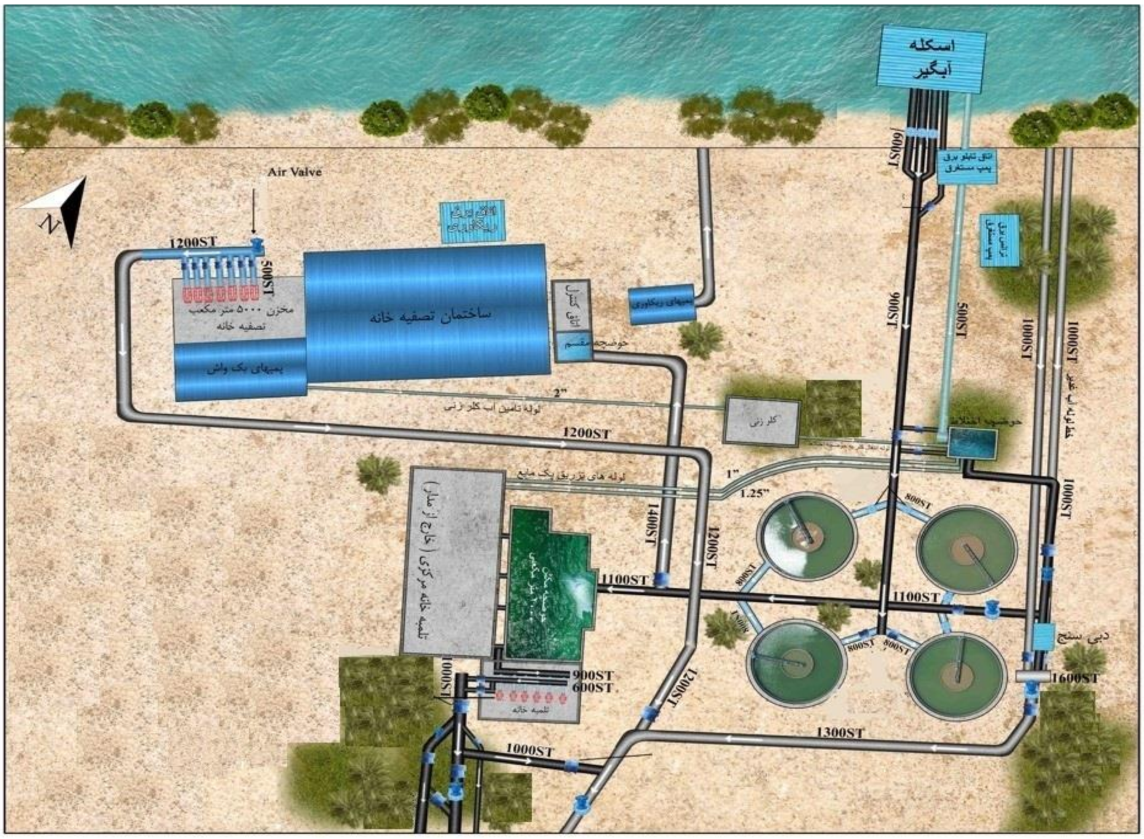
در این پژوهش مطالعات و تحقیقات انجام شده پیرامون مدیریت کیفی منابع تأمین آب سامانه‌های انتقال و توزیع آب و همچنین آب ورودی به تصفیه‌خانه‌ها به‌منظور بررسی راهکارهای ارائه شده پرداخته شد که نتایج آنها بر اهمیت کنترل کیفیت آب و اجرای راهکارهای مدیریتی در راستای ساماندهی مناسب برای بهره‌برداری بیشتر از آنها تاکید می‌کند. بر این اساس، در این پژوهش کدورت منابع تأمین آب ورودی به تصفیه‌خانه دارخوین (سامانه آبرسانی غدیر خوزستان و رودخانه کارون)، تأمین کننده آب شرب شهرهای دارخوین، شادگان و روستاهای حومه آن بررسی شد و به ارائه راهکار مدیریتی لازم در شرایط بروز حوادثی مانند بارندگی، طغیان رودخانه و مواجهه با کدورت‌های فصلی رودخانه که موجب کاهش کارایی فیلترها می‌شود، پرداخته شد. به‌این‌منظور ساخت مدل هیدرولیکی بهره‌برداری این سامانه انتقال مشتمل بر ایستگاه‌های پمپاژ، خطوط انتقال و مخازن متعادل‌کننده و همچنین تأسیسات دارخوین در نرم‌افزار WaterGEMS انجام شد و سپس در مدل موجود از نظر هیدرولیکی، یک راهکار عملی و قابل اجرا به منظور تفکیک و انتقال مستقیم آب غدیر (با کیفیت مطلوب‌تر در مقایسه با آب کارون) به تصفیه‌خانه دارخوین قبل از ارسال به حوضچه اختلاط (ترکیب آن با آب رودخانه کارون و ارسال به کلاریفایرها) بررسی شد و این امر با هدف حفظ شرایط بهره‌برداری قبل از اجرا انجام شد به‌طوری‌که پس از اجرای انشعاب، میزان کل حجم آب ورودی به تصفیه‌خانه (آب غدیر و کارون)، معادل با حجم آب ارسالی در شرایط بهره برداری قبل از اجرا باشد. پس از انجام عملیات اجرایی انشعاب پیشنهادی، تأثیر آن بر کدورت آب خروجی از کلاریفایرها و آب ورودی به تصفیه‌خانه با استفاده از مقادیر کدورت مربوط به سال‌های ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۳ که به صورت ساعتی قرائت و ثبت شد، ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

سامانه آبرسانی غدیر و تصفیه‌خانه مورد مطالعه

- در این سامانه آبرسانی، آب از کانال W2 (سد انحرافی دز) توسط ۱۲ دستگاه الکتروپمپ (پمپ ایران مدل ۵۰۰-۸۳۵) با توان ۱۲۵۰ کیلووات مستقر در تأسیسات غدیر شمالی و از طریق خط انتقال فولادی با سایز ۲۴۰۰ میلی‌متر و به طول ۷۳ کیلومتر به سمت لاگون‌های تأسیسات فتح‌المبین ارسال می‌شود.
- تأسیسات فتح‌المبین در دشت آزادگان، و در نزدیکی روستای ام‌الدبس واقع شده که در آن آب دریافتی از ایستگاه بالادست (غدیرشمالی) توسط ۸ دستگاه الکتروپمپ (6 عدد پمپ پتکو و 2 عدد پمپ صنعتی) با توان ۲۵۰۰ کیلووات از طریق دو خط انتقال فولادی با سایز ۲۰۰۰ میلی‌متر و به طول ۵ کیلومتر به سمت دو مخزن متعادل‌کننده به حجم هر کدام ۴۲۰۰۰ متر مکعب پمپاژ می‌شود. سپس از این مخازن به‌صورت ثقلی به تصفیه‌خانه‌های شماره ۱ و ۲ اهواز (ملی راه و کیان آباد)، دشت آزادگان، آبادان، خرمشهر و دارخوین و روستاها انتقال می‌یابد.
- آب ورودی به تصفیه‌خانه دارخوین علاوه‌بر خط آبرسانی غدیر، به‌طور مستقیم از رودخانه کارون توسط ۲ دستگاه الکتروپمپ (مدل پمپ ایران) با توان ۱۳۲ کیلووات و ۳ دستگاه الکتروپمپ فشار ضعیف (لولیفت) با توان ۱۳۲ تا ۱۶۰ کیلووات مستقر در اسکله آبگیر تأمین و بعد از عبور آب از حوضچه اختلاط و اضافه شدن پلی آلومینیوم کلراید جهت تهنشین شدن ذرات معلق، آب خروجی از حوضچه، بین چهار دستگاه کلاریفایر با ظرفیت ۱۱۰۰ متر مکعب در ساعت (در مجموع ۴۴۰۰ مترمکعب) تقسیم شده و سپس با یک لوله ۱۴۰۰ میلی‌متر به حوضچه مقسم تصفیه‌خانه منتقل می‌شود. سپس از طریق دو کانال بتنی به ۱۲ عدد فیلتر شنی با ظرفیت تصفیه هر فیلتر برابر ۱۱۲۵۰ متر مکعب در شبانه روز ارسال می‌شود که هر فیلتر

مجهز به دریچه کشویی پنوماتیک و لاین هوادهی و عملگر برقی جهت فرمان دادن برای ورود و خروج هوا و همچنین میز کنترل جهت ارسال فرمان و انجام فرآیند انتقال آب به مخزن پاک و عملیات بک واش می‌باشد. جریان‌به صورت ثقلی از ماسه‌های موجود در فیلترها با ضخامت ۱ متر به یک باکس بتنی مربوط به آن فیلتر هدایت می‌شود و در نهایت جریان تمامی اسلب‌ها وارد یک کانال بتنی تعبیه شده در زیر تصفیه‌خانه و از آنجا به مخزن آب پاک با حداکثر ظرفیت ۵۰۰۰ متر مکعب، منتقل می‌شود. آب هدایت شده به مخزن پاک توسط ۷ دستگاه پمپ مستغرق نوید سهند با توان ۲۰۰ کیلووات و حداکثر ظرفیت ۱۱۰۰ متر مکعب در ساعت توسط یک لوله با سایز ۱۲۰۰ میلی‌متر هدایت می‌شود. در کل، مجموع دبی ارسالی از تأسیسات دارخوین (معادل ۱۳۵۰۰۰ متر مکعب در شبانه روز)، آب مورد نیاز شادگان، خنافره و دارخوین و روستاهای منطقه را تأمین می‌کند. در شکل (۱) بخش‌های مختلف تأسیسات دارخوین نشان داده شده است.



شکل ۱- بخش‌های مختلف تأسیسات دارخوین، اخذ شده از واحد GIS شرکت آب غدیر خوزستان

تحلیل هیدرولیکی

به‌طورکلی مراحل انجام پژوهش در شکل (۲) نشان داده شده است که در ادامه پژوهش به شرح هر یک از مرحله‌ها پرداخته خواهد شد.

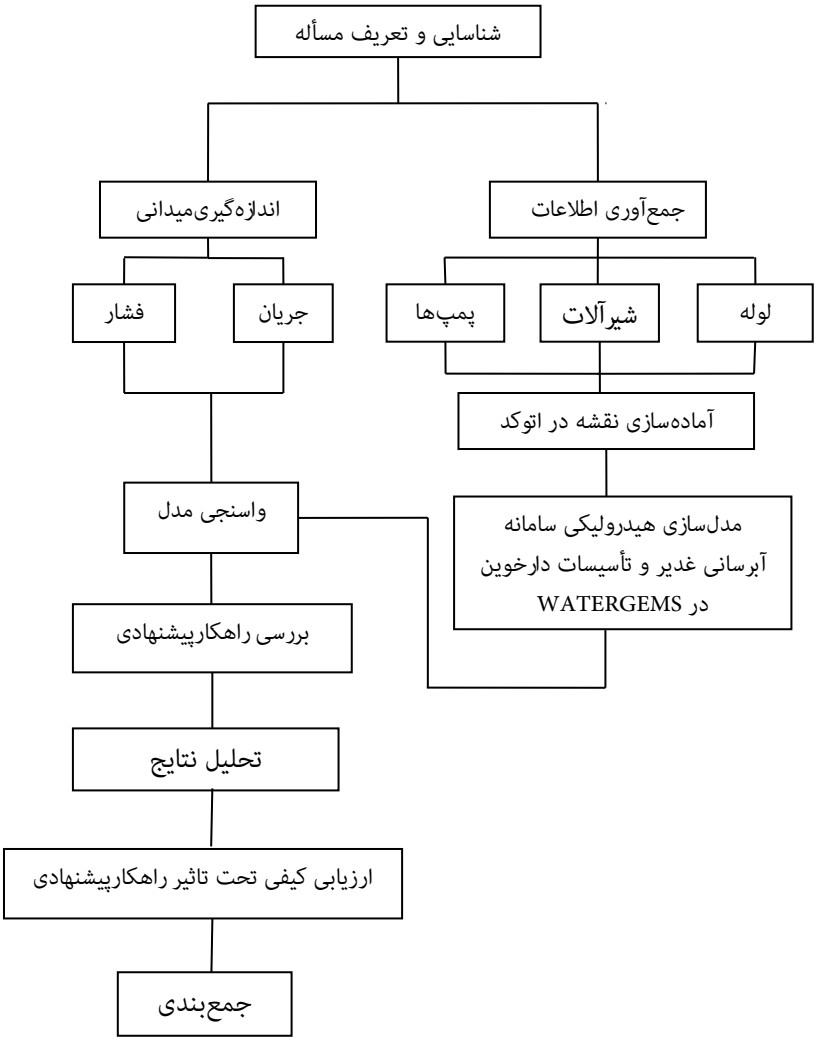
برای انجام مدل‌سازی هیدرولیکی، ابتدا در محیط نرم‌افزار AutoCAD، گره‌ها، لوله‌های مسیر انتقال آب و شیرآلات هوا و پروانه‌ای موجود بر روی خطوط (از قطر ۳۰۰ تا ۲۴۰۰ میلی‌متر) و درون تأسیسات دارخوین از آبگیر تا حوضچه اختلاط و سپس تا کلاریفایرها و ادامه مسیر تا تلمبه‌خانه اضطراری و تصفیه‌خانه ترسیم شده و پس از انجام اصلاحات نهایی، وارد نرم‌افزار WaterGEMS شده است. مشخصات لوله‌های سامانه انتقال آب غدیر شامل طول، قطر و جنس در جدول (۱) ذکر شده است.

پس از وارد کردن خطوط انتقال و شیرها و مشخصات آنها، به ترسیم ایستگاه‌های پمپاژ سامانه و مخازن متعادل‌کننده و اجزاء درون تأسیسات دارخوین از قبیل پمپ‌های مستقر در اسکله آبگیر، تلمبه‌خانه اضطراری، حوضچه اختلاط و کلاریفایرها و وارد کردن اطلاعات ارتفاعی نقاط و شیرها توسط ابزارهای نرم‌افزار پرداخته شد. برای ورود اطلاعات پمپ‌ها به نرم‌افزار، برای هر مدل پمپ، نمودار دبی-ارتفاع و برای شیرهای پروانه‌ای بسته به سایز،جنس شیر و PN آنها نمودار دبی- افت اعمال شد. در مدل مورد نظر، جهت شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی کلاریفایرها، ۴ عدد کلاریفایر به صورت مخزن تعادلی استوانه‌ای روباز با قطر ۴۱ متر و ارتفاع آب معادل ۴/۵ متر مطابق با ابعاد واقعی آنها در نظر گرفته شد. در ابتدا اطلاعات طرح اولیه اجرا شده را وارد کرده و پس از واسنجی که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد، راهکار موثر

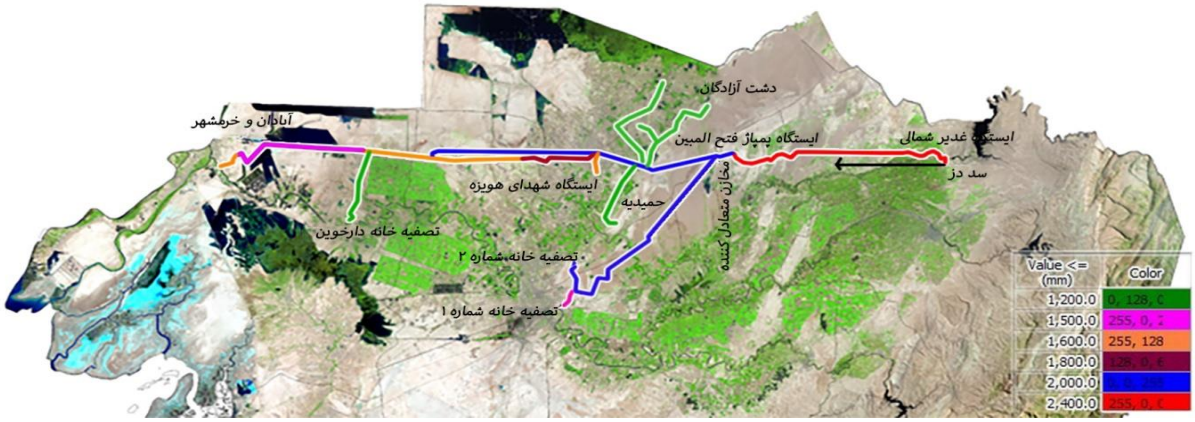
بـرای مـدیریت کیفـی از آب ورودی بـه تصـفیه‌خانه دارخـوین بررســی شــد. در شــکل (۳) و (۴) بــه ترتیــب تصــویری از شبیه‌سازی سامانه انتقال آب غدیر و تأسیسات دارخوین در محیط نرم‌افزار WaterGEMS آمده است.

جدول ۱- مشخصات لوله‌ها در سامانه انتقال آب غدیر

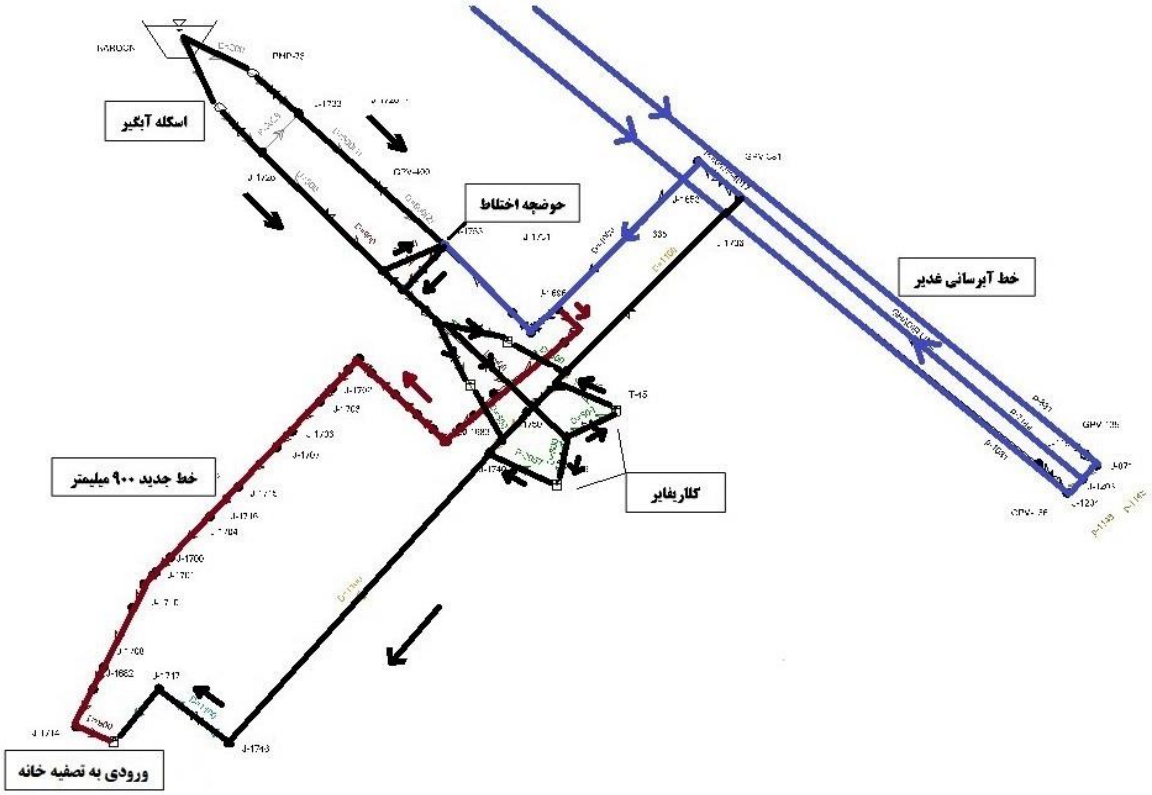
ردیف	قطر (mm)	طول (Km)	جنس
۱	۲۴۰۰-۳۰۰	۴۴۶	STEEL
۲	۱۸۰۰-۴۰۰	۲۵۶	GRP



شکل ۲- فرآیندپژوهش و نحوه بررسی راهکار پیشنهادی



شکل ۳- تصویر شبیه‌سازی سامانه انتقال آب غدیر خوزستان در نرم‌افزار WaterGEMS



شکل ٤- تصویر شبیه‌سازی تأسیسات دارخوین در نرم‌افزار WaterGEMS

اندازه‌گیری‌های میدانی و واسنجی

در مرحله اول، مدل هیدرولیکی بهره‌برداری سامانه موجود آبرسانی غدیر و تأسیسات دارخوین در نرم‌افزار تحلیل هیدرولیکی تهیه شد. پس از وارد کردن مشخصات کامل و مورد نیاز سامانه آبرسانی و ساخت مدل، باید با استفاده از اطلاعات میدانی، مدل بازبینی شود که این فرآیند واسنجی است. فرآیند کالیبراسیون معمولاً شامل تنظیم مقدار زبری، مصرف و وضعیت باز و بسته بودن شیرها است. در این پژوهش، کالیبراسیون زبری سامانه انتقال توسط ابزار واسنجی‌گر داروین در نرم افزار WaterGEMS انجام شد. این ابزار بر اساس نوعی از الگوریتم ژنتیک در هم ریخته، واسنجی مقدار زبری و مصرف را انجام می‌دهد. اولین گام، جمع‌آوری اطلاعات میدانی می‌باشد. مهمترین اطلاعات جمع‌آوری‌شده میدانی معمولاً اندازه‌گیری‌های فشار و جریان می‌باشند. به‌این‌منظور جهت واسنجی نقاطی که در مسیر انتقال، اندازه‌گیری فشار در آنها امکان‌پذیر می‌باشد با بررسی نقشه‌های موجود و بازدیدهای محلی شناسایی شده و اندازه‌گیری فشار قبل و بعد از آنها انجام و همچنین بروز نشتی‌های احتمالی در مسیر انتقال بررسی و ثبت شد. همچنین فشار در خروجی ایستگاه‌های پمپاژ غدیر شمالی، فتح‌المبین، چمران و دارخوین نیز توسط اپراتورها به صورت ساعتی قرائت و ثبت شد. بدیهی است هرچه تعداد نقاط (گره‌های) آزمون در یک سامانه بیشتر باشد، مطالعات صورت گرفته در این سامانه دقت عمل و قابلیت اطمینان بیشتری

خواهند داشت. به‌طور هم‌زمان دبی تولیدی توسط دبی‌سنج‌های نصب شده در ایستگاه‌های پمپاژ مذکور و مصارف نیز بر اساس برداشت داده‌های کنتورهای مشترکین و تصفیه‌خانه‌ها تعیین شد. سپس مطابق شرایط بهره‌برداری موجود برای یک ساعت معین به عنوان زمان آزمون، تعداد پمپ‌های فعال در تلمبه‌خانه‌های سامانه آب غدیر، مقادیر واقعی سطح آب مخازن متعادل‌کننده، دبی و فشار در محل خروجی از ایستگاه‌های پمپاژ، ورودی به تصفیه‌خانه‌ها و دبی تعدادی از نقاط خط انتقال سامانه که به صورت هم‌زمان توسط دبی‌سنج پرتابل اندازه‌گیری و ثبت شد، کالیبراسیون زبری مدل انجام شد تا سامانه انتقال طراحی شده به واقعیت نزدیک شود. در این پژوهش ۱۰ گره به عنوان آزمون بررسی شد. دبی‌های اندازه‌گیری شده در گره‌های آزمون سامانه در جدول (۲) ارائه شد. کالیبراسیون، فرآیند مقایسه نتایج مدل با نتایج میدانی برداشت شده و در صورت نیاز تنظیم پارامترهای سامانه انتقال تا رسیدگی به هماهنگی مناسب بین نتایج مدل با نتایج میدانی در بازه گسترده‌ای از شرایط مختلف عملکردی سامانه می‌باشد (Ormsbee، ۱۹۸۹).

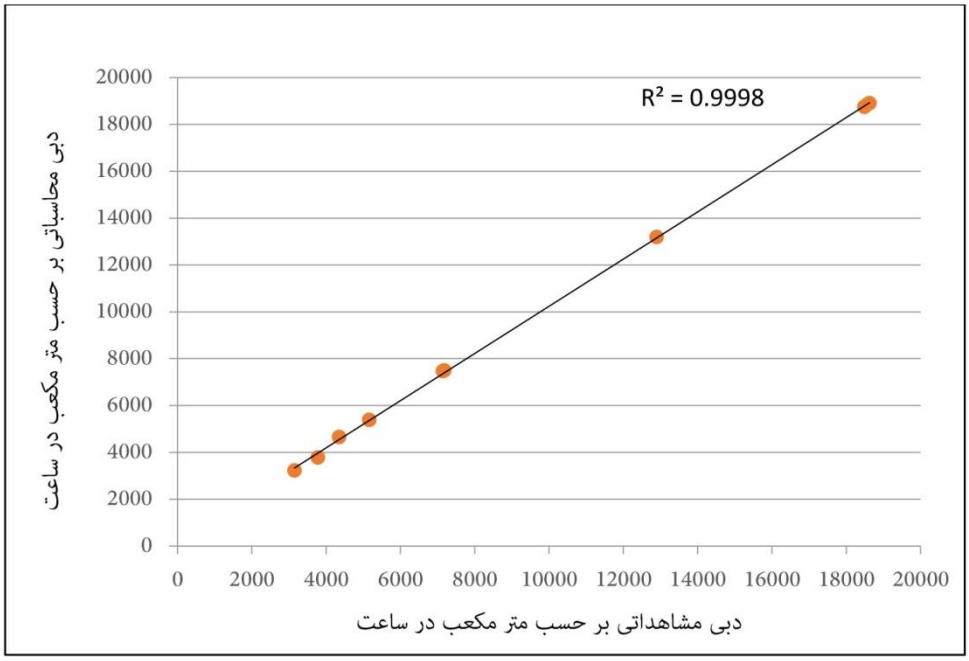
جدول ۲- مقادیر دبی در گره‌های آزمون سامانه در ساعت آزمون (۹ صبح)

شماره گره	محل گره (Km)	دبی (متر مکعب در ساعت)
۱	۰۰+۰۰۰	۱۸۶۲۸
۲	۱۸+۶۳۸	۱۸۵۷۰
۳	۲۰+۹۵۱	۱۸۴۹۰
۴	۲۲+۰۰۰	۱۲۸۹۸
۵	۴۳+۹۰۰	۷۱۸۰
۶	۷۳+۰۰۰	۷۱۴۸
۷	۱۵۲+۰۰۰	۴۳۵۲
۸	تصفیه خانه ۱	۳۷۸۰
۹	تصفیه خانه ۲	۵۱۶۰
۱۰	تصفیه خانه ۳	۳۱۵۰

تعیین مقدار زبری لوله‌ها با روش‌هایی مانند اندازه‌گیری در آزمایشگاه، اندازه‌گیری مستقیم در داخل سامانه و کالیبراسیون امکان‌پذیر است. در یک سامانه، هر لوله یک زبری منحصربه فرد دارد ولی باتوجه‌به سایر خطاهای موجود در مدل‌سازی و محدودیت‌های کالیبراسیون، معمولاً لوله‌های دارای زبری‌های نزدیک به یکدیگر، در دسته‌هایی گروه‌بندی می‌شوند. این دسته‌بندی‌ها می‌تواند بر اساس قطر، جنس و عمرلوله‌ها باشد. بر اساس جدول (۱)، جنس لوله‌های مورد استفاده در این سامانه شامل دو نوع فولادی و GRP است که قطر لوله‌های GRP در بازه ۴۰۰ تا ۱۸۰۰ میلیمتر و لوله‌های فولادی در بازه ۳۰۰ تا ۲۴۰۰ میلیمتر قرار دارند که بر اساس مشخصات مشابه گروه‌بندی شده‌اند، عمر لوله‌ها نیز در گروه‌بندی تا حدودی رعایت شده است. از آنجایی‌که در این پژوهش، لوله‌های با قطر بزرگ بخش زیادی از مسیر سامانه را تشکیل می‌دهند و زبری این لوله‌های اصلی با قطر زیاد تأثیر بیشتری بر فشارهای گره‌ای و به‌طورکلی مشخصات جریان در سامانه دارد عملیات کالیبراسیون از این دسته آغاز شده است و زبری سایر دسته‌ها همان مقدار اولیه فرضی در نظر گرفته شده است و سپس به ازای هریک از این مقادیر، دبی‌های گره‌ای سامانه به دست آمده و با مقادیر واقعی که در جدول (۲) در ساعت آزمون اندازه‌گیری شده‌اند مقایسه شد. در مرحله بعد، بهترین مقدار زبری برای گروه اول در مدل جایگزین و تحلیل برای دسته بعدی توسط داروین انجام شد.

در نهایت نرم‌افزار توسط ابزار داروین توانست با ۳۲ تکرار دبی‌ها را به مقدار مشاهداتی (جدول ۲) نزدیک کند و زبری لوله‌ها را با دقت خوبی تعیین کند. به منظور ارزیابی نتایج حاصل از نرم افزار و مقایسه آن با مقادیر واقعی از شاخصهای آماری R^2 و ریشه دوم میانگین مربع خطاها RMSE استفاده شد. در حالت آرمانی، مقدار این شاخص‌ها به ترتیب $R^2 = 1$ و RMSE=0 خواهند بود. بر این اساس، نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی مدل با مقادیر واقعی در شکل (۵) مقایسه شد. با مقایسه دبی‌های حاصل از مدل هیدرولیکی و اندازه‌گیری شده با استفاده از مقادیر واقعی از شاخصهای آماری R^2 و RMSE که به ترتیب برابر ۰٫۹۹ و ۷۸ می‌باشند، می‌توان به دقت بالای واسنجی مدل WaterGEMS اشاره نمود.

پس از واسنجی مدل، در مدل موجود از نظر هیدرولیکی، یک راهکار عملی و قابل اجرا به منظور تفکیک و انتقال مستقیم آب غدیر به به تصفیه‌خانه دارخوین قبل از ارسال آن به حوضچه اختلاط، ترکیب آن با آب رودخانه کارون و ارسال به کلاریفایرها، بررسی شد. به طوری‌که مجموع دبی ورودی به تصفیه‌خانه (آب غدیر و کارون)، معادل با حجم آب ارسالی در شرایط بهره‌برداری فعلی باشد و در مرحله دوم، پس از انجام عملیات اجرایی انشعاب پیشنهادی، تأثیر آن بر کدورت آب خروجی از کلاریفایرها و آب ورودی به تصفیه‌خانه با استفاده از مقادیر کدورت مربوط به سال‌های ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۳ که به صورت ساعتی قرائت و ثبت شده، ارزیابی شد.



شکل ۵- همبستگی بین مقدار دبی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده

ارائه راهکار عملی و بررسی هیدرولیکی

در شرایط بهره برداری قبل از اجرای انشعاب جدید، آب ورودی به تصفیه‌خانه دارخوین به صورت ثقلی از سامانه انتقال آب غدیر (سد انحرافی دز) و هم‌زمان توسط پمپاژ از رودخانه کارون توسط پمپ‌های مستقر در اسکله آبگیر تأمین می‌شود که پس از ورود آنها به درون حوضچه اختلاط و اضافه شدن پلی آلومینیوم کلراید جهت تهنشین شدن ذرات معلق، آب خروجی از حوضچه، بین چهار دستگاه کلاریفایر تقسیم شده و سپس با یک لوله ۱۴۰۰ میلی‌متر به حوضچه مقسم تصفیه‌خانه منتقل می‌شود. در این پژوهش، به دلیل اینکه آب غدیر، در مقایسه با آب کارون کدورت مطلوب‌تری دارد از نظر هیدرولیکی، یک راهکار عملی و قابل اجرا بررسی شد. به‌طوری‌که قبل از ارسال آب غدیر به حوضچه اختلاط و ترکیب آن با آب رودخانه کارون مستقیم به تصفیه‌خانه منتقل شود. بنابراین در محیط نرم‌افزار WaterGEMS، از خط لوله آبرسانی غدیر در تأسیسات دارخوین با سایز ۱۰۰۰ میلی‌متر که تا حوضچه اختلاط امتداد دارد، یک خط لوله فولادی به طول ۱۵۰ متر به‌صورت مستقیم به حوضچه مقسم در ورودی تصفیه‌خانه متصل شد و تعیین سایز بهینه برای انشعاب پیشنهادی با هدف حفظ شرایط هیدرولیکی قبل از اجرای آن بررسی شد. به‌طوری‌که حجم آب ورودی به تصفیه‌خانه (آب غدیر و کارون) در شرایط پیشنهادی نسبت به شرایط قبل از اجرای آن تغییری نداشته باشد. در ادامه در مدل هیدرولیکی، میزان حجم آب ارسال شده از کارون و سامانه انتقال غدیر و همچنین مجموع حجم آب ورودی به تصفیه‌خانه به تفکیک تحت تاثیر راهکار پیشنهادی بررسی شد.

بررسی کیفی آب ورودی به تصفیه‌خانه دارخوین بر اساس راهکار ارائه شده

باتوجه‌به اهمیت تصفیه‌خانه دارخوین، تأمین‌کنندگان آب شرب شهرهای دارخوین، شادگان و روستاهای حومه آن و بروز حوادثی مانند بارندگی، طغیان رودخانه و مواجهه با کدورت‌های فصلی در آب ورودی به تصفیه‌خانه، روند تغییرات کدورت آب خروجی از کلاریفایرها و آب ورودی به تصفیه‌خانه پس از انجام عملیات اجرایی در تأسیسات دارخوین، نسبت به شرایط قبل از اجرای انشعاب پیشنهادی بر اساس مقادیر کدورت که هر یک ساعت یکبار توسط کدورت‌سنج پرتابل اندازه‌گیری و ثبت شده، مقایسه شد.

نتایج و بحث

در این پژوهش، به‌منظور انتقال مستقیم آب سامانه غدیر به تصفیه‌خانه قبل از هدایت به حوضچه اختلاط و ترکیب آن با آب رودخانه کارون، در مدل هیدرولیکی تأسیسات دارخوین یک خط لوله فولادی از خط انتقال غدیر به ورودی تصفیه‌خانه در نظر گرفته شده و با حفظ شرایط بهره‌برداری قبل از اجرای انشعاب، آبگیری از رودخانه کارون توسط ۲ دستگاه الکتروپمپ (مدل پمپ ایران) و ۳ دستگاه الکتروپمپ فشار ضعیف (لولیفت) انجام می‌شود و پس از تزریق مواد پلی آلومینیوم کلراید جهت ته‌نشینی به کلاریفایرها منتقل و سپس به سمت تصفیه‌خانه هدایت می‌شود و به طور

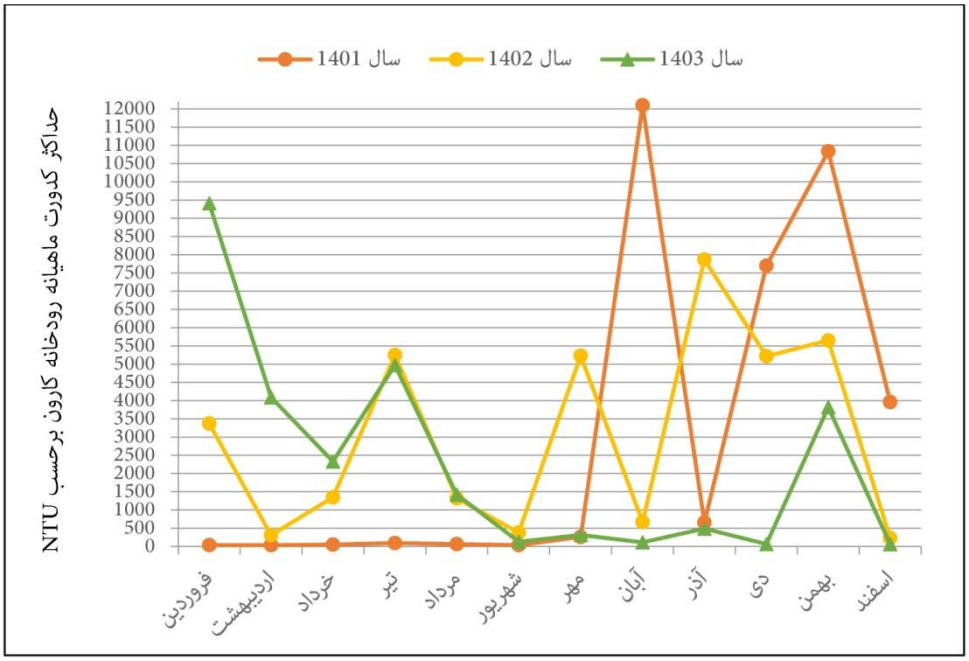
هم‌زمان آب غدیر نیز توسط انشعاب پیشنهادی به صورت مستقیم به حوضچه ورودی تصفیه‌خانه منتقل می‌شود. در شبیه‌سازی انجام شده، با هدف حفظ شرایط بهره‌برداری به‌طوری‌که مجموع حجم آب ورودی به تصفیه‌خانه (آب غدیر و کارون) پس از اجرای انشعاب جدید تغییری نداشته باشد، سایز بهینه برای انشعاب پیشنهادی ۹۰۰ میلی‌متر تعیین شد (در شکل (۴) نشان داده شده است). بر اساس نتایج هیدرولیکی حاصل از نرم‌افزار که در جدول (۳) ارائه شده است، مجموع حجم دبی ورودی به تصفیه‌خانه بعد از ایجاد انشعاب پیشنهادی با سایز مذکور، معادل ۶۳۸۰ مترمکعب در ساعت می‌باشد که با میزان آن در شرایط قبل از اجرای انشعاب (۶۳۱۴ متر مکعب در ساعت) اختلاف کمی دارد.

همچنین بر اساس نتایج جدول (۳) در شرایط تأمین آب از سامانه انتقال غدیر و عدم آبگیری از رودخانه کارون، ۳۳۰۸ متر مکعب آب توسط انشعاب جدید به تصفیه‌خانه منتقل خواهد شد یعنی حدود ۵۲ درصد از آب مورد نیاز شهرها و روستاهای هدف را می‌توان تأمین کرد که این امر موجب جلوگیری از بروز بحران‌های سیاسی و اجتماعی در منطقه خواهد شد.

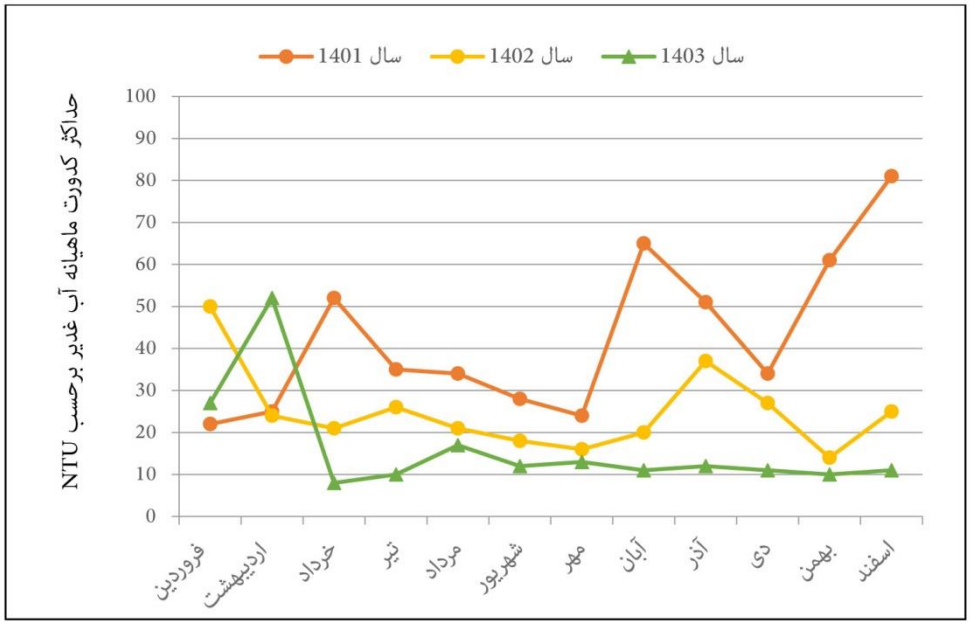
به منظور بررسی تغییرات کدورت آب انتقالی به تصفیه‌خانه تحت تاثیر راهکار پیشنهادی، در مرحله اول، تغییرات حداکثر کدورت ماهیانه آب رودخانه کارون و سامانه انتقال آب غدیر در محل ورودی به تأسیسات دارخوین، در شرایط قبل از اجرای انشعاب، بر اساس مقادیر کدورت که هر ساعت یک بار توسط کدورت‌سنج پرتابل اندازه‌گیری و ثبت شده‌اند برای سال‌های ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۳ به‌ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) مقایسه شده است.

جدول ۳- میزان حجم آب ارسال شده بر اساس انشعاب پیشنهادی

حجم آب برداشت شده از منابع تأمین آب (مترمکعب در ساعت)		حجم آب عبوری از خطوط درون تأسیسات (مترمکعب در ساعت)		حجم آب ورودی به تصفیه‌خانه (مترمکعب در ساعت)
آبگیر	خط غدیر	انشعاب پیشنهادی	خروجی از کلاریفایرها	مجموع حجم آب ورودی به تصفیه‌خانه
۳۰۴۰	۳۲۷۷	بسته	۶۳۱۴	۶۳۱۴
۳۳۰۸	۳۰۷۲	۳۳۰۸	۳۰۷۲	۶۳۸۰



شکل ۶- مقایسه مقادیر حداکثر کدورت ماهیانه رودخانه کارون در محل اسکله آبگیر تأسیسات دارخوین



شکل ۷- مقایسه مقادیر حداکثر کدورت ماهیانه آب غدیر در محل تأسیسات دارخوین

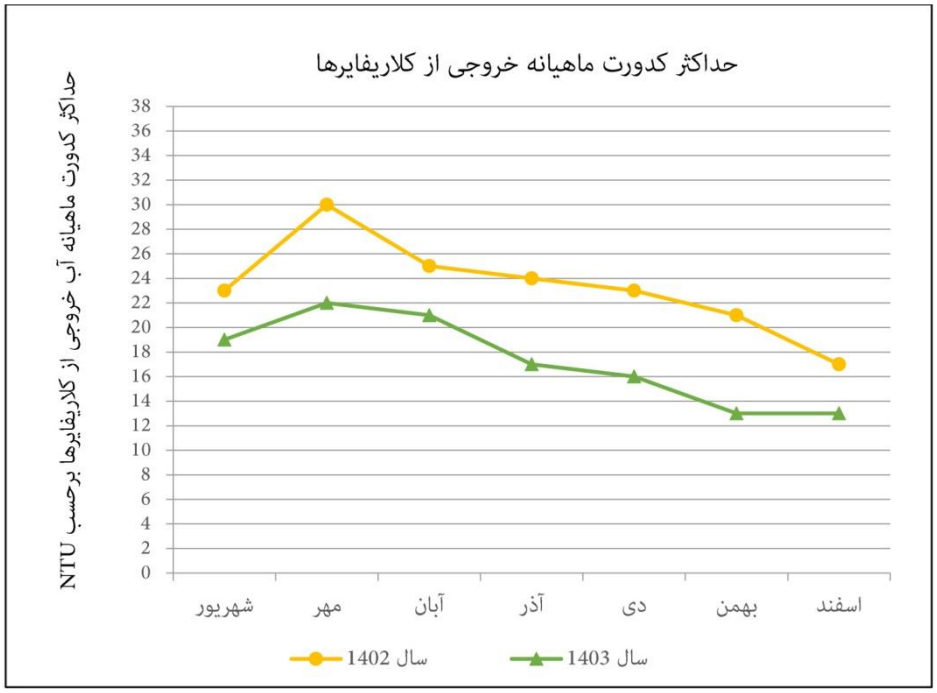
مقایسه نتایج شکل (۶) و (۷) نشان می‌دهد که حداکثر کدورت رودخانه کارون در مواقع سیلابی در سالهای ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۳ به ترتیب NTU ۱۲۱۰۰، ۷۸۷۰ و ۴۹۷۰ مشاهده شده که در مقایسه با حداکثر کدورت آب غدیر NTU ۸۱، ۳۷ و ۱۳ اختلاف چشمگیری داشته است. بنابراین به دلیل اهمیت کنترل کدورت آب و هزینه بسیار بالای مربوط به انجام عملیات سرویس و نگهداری کلاریفایرهای و همچنین جلوگیری از بروز بحران‌های احتمالی به دلیل وجود آلاینده‌های شیمیایی در شرایط خاص در رودخانه کارون (از قبیل مواد نفتی و غیره) که امکان برداشت و تأمین آب از رودخانه را غیر ممکن خواهد ساخت، انتقال مستقیم آب از طرح غدیر به ورودی تصفیه‌خانه در چنین شرایط بحرانی امری مهم می‌باشد.

در مرحله دوم، پس از اجرای انشعاب پیشنهادی در محل تأسیسات و ارسال مستقیم آب غدیر توسط آن به تصفیه‌خانه و به‌طور هم‌زمان هدایت آب رودخانه به کلاریفایرها و سپس به تصفیه‌خانه، تغییرات کدورت آب خروجی از کلاریفایرها و همچنین ورودی به تصفیه‌خانه تحت شرایط جدید بر اساس مقادیر کدورت که هر یک ساعت یک بار توسط کدورت‌سنج پرتابل اندازه‌گیری شده، بررسی و مقایسه شد. بر این اساس، تغییرات حداکثر کدورت ماهیانه آب خروجی از کلاریفایرها و آب ورودی به تصفیه‌خانه دارخوین، برای یک دوره شش ماهه (شهریور تا اسفند) مربوط به سال‌های ۱۴۰۲ (در شرایط قبل از اجرای انشعاب جدید) و ۱۴۰۳ (پس از اجرای انشعاب جدید) به‌ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) مقایسه شده است.

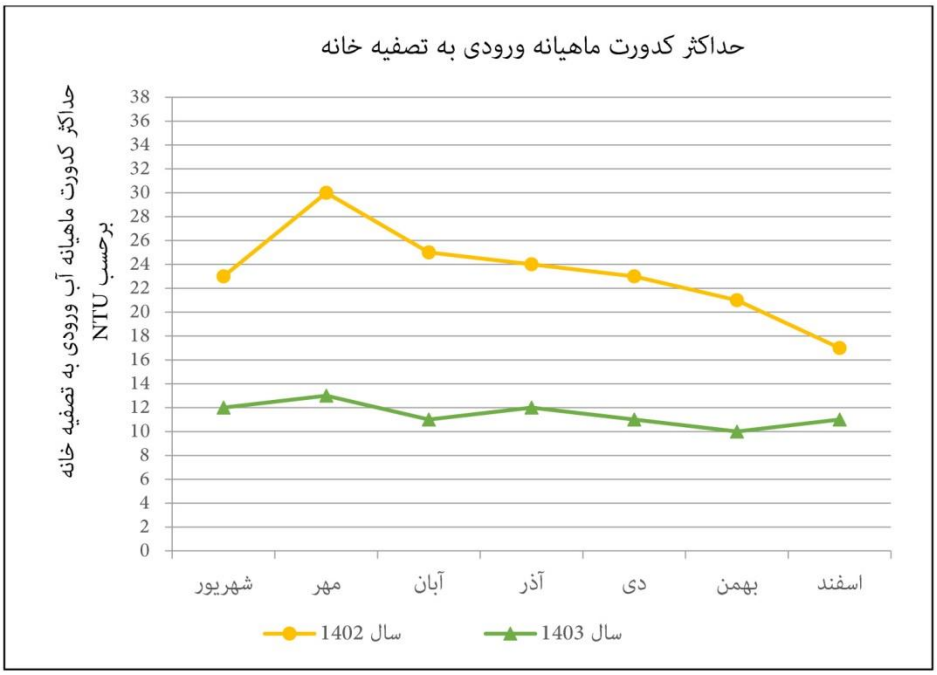
مقایسه نتایج شکل (۸) نشان می‌دهد در شرایط تفکیک و انتقال مستقیم آب غدیر به تصفیه‌خانه توسط انشعاب پیشنهادی و ارسال آب رودخانه کارون به کلاریفایرها، میزان حداکثر کدورت آب خروجی از آنها حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد به‌گونه‌ای که در سال ۱۴۰۲ قبل از اجرای این انشعاب و تفکیک منابع تأمین آب، میزان حداکثر کدورت ماهیانه آب خروجی از کلاریفایرها در بازه NTU ۳۰ تا ۱۷ مشاهده و ثبت شد اما در سال ۱۴۰۳ تحت راهکار پیشنهادی، بازه تغییرات آن به NTU ۲۲ تا ۱۳ تقلیل یافته است به دلیل اینکه مطابق نتایج جدول (۲)، در شرایط قبل از اجرای انشعاب پیشنهادی، مجموع آب ورودی به کلاریفایرها ۶۳۱۴ مترمکعب در ساعت (مشتمل بر ۳۲۷۷ متر مکعب آب غدیر و ۳۰۴۰ متر مکعب آب رودخانه) بوده اما تحت شرایط جدید، این حجم به ۳۰۴۰ متر مکعب (فقط آب رودخانه) یعنی ۵۰ درصد کاهش یافته است، بنابراین با اینکه کدورت آب ورودی به کلاریفایرها افزایش یافته اما به دلیل افزایش دو برابری زمان ماند آب رودخانه، کدورت آب خروجی از کلاریفایرها کاهش یافته است.

همچنین بر اساس نتایج شکل (۹) تحت شرایط انشعاب پیشنهادی، کدورت آب ورودی به تصفیه‌خانه به میزان ۵۰ درصد کاهش یافته است چون در سال ۱۴۰۲ قبل از اجرای این انشعاب، ترکیب آب رودخانه کارون و آب غدیر پس از تزریق مواد پلی آلومینیوم کلراید و انجام عملیات ته‌نشینی در کلاریفایرها به سمت تصفیه‌خانه منتقل می‌شد که میزان حداکثر کدورت ماهیانه آب ورودی به تصفیه‌خانه در بازه NTU ۳۰ تا ۱۷ مشاهده و ثبت شده است اما در سال ۱۴۰۳ تحت راهکار پیشنهادی، از آنجایی‌که مطابق نتایج شکل (۸) کدورت آب رودخانه کارون پس از خروج از کلاریفایرها ۲۵ درصد کاهش یافته است و سپس به حوضچه تصفیه‌خانه منتقل می‌شود و همچنین به‌طور همزمان آب غدیر که کیفیت مطلوب‌تری دارد نیز به صورت مستقیم وارد این حوضچه شده بنابراین کدورت آب حوضچه در محل ورودی به

تصفیه‌خانه نسبت به شرایط قبل مطلوب‌تر خواهد بود به گونه‌ای که بازه تغییرات آن به NTU ۱۳ تا ۱۰ تقلیل یافته است که این امر نیز در عملکرد و راندمان تصفیه‌خانه و هزینه‌های بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری آن اهمیت زیادی دارد.



شکل ۸- مقایسه مقادیر حداکثر کدورت ماهیانه آب خروجی از کلاریفایرها در شرایط قبل و بعد از راهکار پیشنهادی



شکل ۹- مقایسه مقادیر حداکثر کدورت ماهیانه آب ورودی به تصفیه‌خانه در شرایط قبل و بعد از راهکار پیشنهادی

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با استفاده از روش شبیه‌سازی در نرم‌افزار WaterGEMS، به مطالعه و بررسی راهکار مناسب برای مدیریت کیفی و بهره‌برداری بهتر از آب ورودی به تصفیه‌خانه دارخوین، تأمین کننده آب شرب شهرهای دارخوین، شادگان و روستاهای حومه آن، در شرایط بروز حوادثی مانند بارندگی، طغیان رودخانه و مواجهه با کدورت‌های فصلی در آب ورودی

به آن که موجب کاهش کارایی فیلترها می‌شود، پرداخته است. به‌این‌منظور، با حفظ شرایط هیدرولیکی موجود، می‌توان از خط لوله آبرسانی غدیر درون تأسیسات دارخوین با سایز ۱۰۰۰ میلی‌متر که تا حوضچه اختلاط امتداد دارد، قبل از ورودی به حوضچه یک خط لوله فولادی با سایز ۹۰۰ میلی‌متر و به طول ۱۵۰ متر به‌صورت مستقیم به حوضچه مقسم در ورودی تصفیه‌خانه متصل و ارسال آب غدیر به صورت مستقیم بدون مخلوط شدن با آب رودخانه به سمت تصفیه‌خانه هدایت شود. در این حالت بر اساس نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی، در شرایط کدورت بالای رودخانه و تأمین آب به‌طور همزمان از رودخانه و سامانه انتقال آب غدیر، می‌توان از کل حجم آب غدیر که به تأسیسات دارخوین انتقال می‌یابد و کیفیت مطلوبتری نسبت به آب رودخانه دارد قبل از ورود به حوضچه اختلاط و مخلوط آن با آب کارون، به طور مستقیم توسط خط لوله پیشنهادی به سمت حوضچه مقسم در محل ورودی به تصفیه‌خانه منتقل کرد و آب رودخانه نیز به سمت کلاریفایرها هدایت شده و پس از عملیات ته‌نشینی به تصفیه‌خانه منتقل شود که بر اساس نتایج حاصل از مقادیر کدورت اندازه‌گیری شده به صورت ساعتی، پس از اجرای انشعاب جدید در مقایسه با شرایط قبل آن، به‌دلیل افزایش دو برابری زمان ماند آب رودخانه، کاهش ۲۵ درصدی کدورت آب خروجی از آنها مشاهده شده است. همچنین بر اساس مقادیر کدورت اندازه‌گیری شده، کدورت آب ورودی به تصفیه‌خانه به میزان ۵۰ درصد کاهش یافته و این امر در عملکرد و راندمان تصفیه‌خانه و هزینه‌های بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری آن و همچنین انجام عملیات سرویس و نگهداری کلاریفایرها اهمیت زیادی دارد. در شرایط عدم آبگیری از رودخانه نیز می‌توان توسط راهکار پیشنهادی، حدود ۵۲ درصد از آب مورد نیاز شهرها و روستاهای حومه آن‌ها را توسط سامانه انتقال آب غدیر تأمین کرد.

منابع

پوستی‌زاده، ندا، حری، داود، و رامشی، رامین. (۱۴۰۳). بهره‌برداری از سامانه انتقال آب غدیر خوزستان در شرایط پدافندی با استفاده از مدل‌سازی هیدرولیکی. نشریه آب و توسعه پایدار، ۱۱(۳)، ۱۷-۲۶. Doi: 10.22067/jwsd.v11i3.2409-136

تابش، مسعود، روزبهانی، عباس، و هادیگل، فرهاد. (۱۳۹۷). ارزیابی خطرپذیری و تصفیه‌خانه‌های آب با استفاده از تحلیل درخت خطای فازی (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه جلالیه تهران). مجله آب و فاضلاب، ۲۹(۴)، ۱۳۲-۱۴۴. Doi: 10.22093/wwj.2017.67314.2273

حریف، سیروس، عزیزیان، غلامرضا، گیوه‌چی، محمد، و دهقانی درمیان، محسن. (۱۴۰۱). تحلیل و ارزیابی مدیریت کیفی در شبکه‌های توزیع آب در مقابل ورود آلودگی در شبکه آب شرب شهر زاهدان. نشریه علمی و پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۲(۳)، ۴۳۷-۴۵۰. Doi: 10.22125/iwe.2022.146421

حریف، سیروس، عزیزیان، غلامرضا، گیوه‌چی، محمد، و دهقانی درمیان، محسن. (۱۴۰۲). تحلیل و مدیریت کیفی شبکه‌های توزیع آب تحت نفوذ آلودگی در شرایط کاهش فشار آب (مطالعه موردی: بخشی از شبکه توزیع آب زاهدان). نشریه علمی و پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۴(۵۳)، ۲۹۷-۳۰۸. Doi: 10.22125/iwe.2020.216105.1280

فریدی‌راد، فرزانه، و قلی‌نژاد، معصومه. (۱۴۰۰). بررسی شاخص‌های خورندگی و رسوب‌گذاری آب شرب تصفیه‌خانه پردیس. نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۶(۳)، ۱۶-۲۴. Doi: 10.22112/JWWSE.2021.261859.1234.

معصومی، بهمن، طباطبایی، طیبه، جعفرزاده حقیقی‌فرد، نعمت‌اله، جرفی، سهند، و کوهگردی، اسماعیل. (۱۳۹۸). تأثیر کیفیت آب ورودی به تصفیه‌خانه در ایجاد رنگ و کف در واحدهای فرآیندی تصفیه آب (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه آب کوه سبز). مجله مهندسی بهداشت محیط، ۷(۲)، ۲۱۱-۲۲۸. Doi: 10.29252/jehe.7.2.211

نظری، علی. (۱۳۹۰). طراحی شبکه‌های آبرسانی با WaterGEMS. انتشارات الیاس. چاپ اول. تهران، ایران.

Koley, S., Rao, K.B., Khwairakpam, M., & Kalamdhad, A.S. (2024). Identification and assessment of Critical parameters affecting drinking water quality: A case study of water treatment plants of India. Groundwater for Sustainable Development, 26, 101221, 1-12. Doi: 10.1016/j.gsd.2024.101221.

Kumar, S., & Singh, S. (2021). Qualitative assessment and corrosiveness of the Ganga water: A comparative assessment. Groundwater for Sustainable Development, 45(6), 5695-5701. Doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.503.

Ormsbee, L.E. (1989). Implicit Network Calibration. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 115(2), 243-257. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1989)115:2(243).

Paca, J.M., Santos, F.M., Pires, J.C.M., Leitão, A.A., & Boaventura, R.A.R. (2019). Quality assessment of water intended for human consumption from Kwanza, Dande and Bengo rivers (Angola). Environmental Poluution, 254, 113037, 452-462. Doi: 10.1016/j.envpol.2019.113037.

Platikanov, P., Baquero, D., González, S., Alonso, J.M., Paraira, M., Cortina, J.L., & Tauler, R. (2019). Chemometric analysis for river water quality assessment at the intake of drinking water treatment plants. Science of The Total Environment, 667, 552-562. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.423.

Journal of Water and Sustainable Development. December 2025
Volume 12. Issue 3 (Serial No. 37). pages 45 to 62

نشریه آب و توسعه پایدار. آذر ماه ۱۴۰۴
سال دوازدهم. شماره سوم (پیاپی ۳۷). صفحات ۴۵ تا ۶۲

Document Type: Applied Article

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

Numerical Analysis of the Three-Dimensional Flow Field Around Riverbank Spur Dikes in a Grouped Arrangement

F. Golchin[1], N. Kardan[2*], M. Dini[2]

1,2- M.Sc. Graduate and Associate Professor of Civil Engineering-Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Technical and Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

*** Corresponding Author Email:** n.kardan@azaruniv.ac.ir

Received 12-04-2025
Revised 10-06-2025
Accepted 15-06-2025
Available online 16-12-2025

Abstract

The construction of erosion-controlling structures like spur dikes can unintentionally create local flow structures, leading to downstream flow affecting the channel bed upstream of the spur dike. This can result in shear layers, turbulence, localized erosion, and threats to the spur dike structure. Therefore, studying the placement of spur dikes in proximity under different hydraulic conditions is crucial for enhancing the design of these structures. In this study, the three-dimensional flow field around river spur dikes in grouped configurations was numerically analyzed using Fluent software to explore how the spacing of spur dikes influences the hydraulic behavior of the flow. The findings suggest that increasing the distance between spur dikes reduces the length of vortices. On average, the bed shear stress decreased to 0.6 N/m² at a distance ratio of Li/LAP equal to 5, and to 0.13 N/m² at a ratio of 7. Furthermore, at a distance ratio of 4 and flow velocities of 0.345, 0.7, and 1.2 m/s, the maximum bed shear stress was found to be 0.6, 2.6, and 7 N/m², respectively. This indicates the direct impact of flow velocity on the intensity of erosional phenomena on the bed. The reduction in bed shear stress suggests that as the distance between the spur dikes increases, the interactive effects of vortices and the intensification of shear stresses on the bed significantly decrease.

Keywords: Spur Dike, Flow Pattern, Numerical Model, Bed Shear Stress, Fluent Software.

بررسی عددی میدان سه‌بعدی جریان پیرامون آب‌شکن‌های رودخانه‌ای در حالت قرارگیری گروهی

فریبا گلچین[1]، نازیلا کاردان[2*]، مهدی دینی[2]

۱ و ۲- به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و دانشیار مهندسی عمران-مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: n.kardan@azaruniv.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۱/۲۳
تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۳/۲۰
تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۳/۲۵
تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

چکیده

احداث سازه‌هایی مانند آب‌شکن اگرچه به کنترل فرسایش کمک می‌کند، اما ممکن است به دلیل ایجاد ساختارهای موضعی جریان، پیامدهای ناخواسته‌ای به همراه داشته باشد. این ساختارها شامل انبساط و انقباض ناگهانی در مقطع عبور جریان هستند که می‌توانند منجر به شکل‌گیری جریان رو به پایین و برخورد آن به بستر آبراهه در بالادست آب‌شکن شوند. این برخورد، لایه‌های برشی و آشفتگی‌های ناشی از آن را ایجاد می‌کند که می‌تواند به فرسایش موضعی و تهدید پایداری خود سازه آب‌شکن منجر شود. ازاین‌رو، بررسی قرارگیری آب‌شکن‌ها در مجاورت یکدیگر تحت شرایط هیدرولیکی مختلف، به بهبود طراحی این سازه‌ها کمک شایانی می‌کند. این پژوهش به بررسی سه‌بعدی میدان جریان پیرامون آب‌شکن‌های رودخانه‌ای در حالت قرارگیری گروهی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت پرداخته و تأثیر فاصله قرارگیری آب‌شکن‌ها بر رفتار هیدرولیکی جریان را مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج نشان داد با افزایش فاصله بین آب‌شکن‌ها، طول گردابه‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. به‌طور میانگین، تنش برشی بستر در نسبت فاصله L_i/L_{AP} برابر ۵ به ۰/۶ نیوتن بر مترمربع و در نسبت فاصله ۷ به ۰/۱۳ نیوتن بر مترمربع کاهش یافت. همچنین در نسبت فاصله ۴ و در سرعت‌های جریان ۰/۳۴۵، ۰/۷۰ و ۱/۲۰ متر بر ثانیه، بیشینه تنش برشی بستر به ترتیب برابر ۰/۶، ۲/۶ و ۷ نیوتن بر مترمربع به‌دست آمد که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم سرعت جریان بر شدت پدیده‌های فرسایشی بستر است. کاهش تنش برشی بستر بیانگر آن است که با افزایش فاصله بین آب‌شکن‌ها، اثرات متقابل گردابه‌ها و تشدید تنش‌های برشی در بستر به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: آب‌شکن، الگوی جریان، مدل عددی، تنش برشی بستر، نرم‌افزار فلوئنت.

How to cite this article:
Golchin, F., Kardan, N., and Dini, M. (2025). Numerical Analysis of the Three-Dimensional Flow Field around Riverbank Spur Dikes in a Grouped Arrangement. Journal of Water and Sustainable Development, 12(3), 45- 62. https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i3.2504-1417

مقدمه

آب‌شکن‌ها از جمله سازه‌های متداول در مهندسی رودخانه می‌باشند که به‌منظور تعدیل در شرایط هیدرولیکی جریان و کاهش میزان حمل رسوب استفاده می‌شوند. این نوع سازه برحسب نیاز و اهداف مورد نظر در شکل و انواع مختلفی طراحی و احداث می‌شود. سازه آب‌شکن هرچند که به‌منظور کاهش فرسایش و تثبیت موقعیت رودخانه و کانال‌های آبیاری احداث میشود، درعین‌حال تحت تأثیر پدیده فرسایش در مسیر جریان و ایجاد جریان‌های آشفته چرخشی و گردابی در اطراف آن قرار می‌گیرد (تیموری یگانه، ۱۴۰۱). در نتیجه بررسی حالت‌های مختلف قرارگیری و اشکال مختلف آب‌شکن‌ها به لحاظ کاهش آشفتگی‌های جریان و در نتیجه کنترل فرسایش کناره‌های رودخانه‌ها بسیار اهمیت دارد. در زمینه بررسی الگوی جریان پیرامون آب‌شکن‌ها پژوهش‌های متعددی انجام یافته است که در ادامه به بررسی اجمالی آن‌ها پرداخته می‌شود.

Ahmad (۱۹۵۳) با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی تغییر سطح آب حول تک آب‌شکن واقع در یک کانال مستقیم را اندازه‌گیری کرد و نتیجه گرفت در میدان اطراف آب‌شکن جریان غیریکنواخت شکل خواهد گرفت. Chen و Ikeda (۱۹۹۷) الگوی جریان حول تک آب‌شکن در مسیر جریان را بررسی کردند و دریافتند گردابه‌های چرخشی از ابتدای آب‌شکن جدا شده و به‌صورت متناوب با دوره‌های تناوب معینی به سمت پایین‌دست منتقل می‌شوند. همچنین نتایج این بررسی‌ها نشان داد سرعت متوسط حرکت گردابه‌ها تقریباً ثابت بوده و مقدار آنها کمی بیشتر از ۱/۵ درصد سرعت متوسط است. Ghodsian و Vaghefi (۲۰۰۹) میدان جریان و آبشستگی را در کانال تغییر شکل یافته پیرامون آب‌شکن T شکل منفرد در قوس توسعه یافته بررسی کردند.

Yazdi و همکاران (۲۰۱۰) الگوی جریان اطراف تک آب‌شکن با استفاده از مدل عددی FLOW-3D را بررسی کردند و میدان جریان سه‌بعدی متلاطم و آبشستگی موضعی بستر در اطراف آب‌شکن با زوایای مختلف را بررسی کردند. Xiufang و همکاران (۲۰۱۲) الگوی جریان آشفته پیرامون تک آب‌شکن با هندسه متفاوت را مطالعه کردند و دریافتند بیشترین آشفتگی پیرامون آب‌شکن ذوزنقه‌ای به وقوع می‌پیوندد. Lee و Jang (۲۰۱۶) اثر فاصله بین آب‌شکن‌های سری بر آبشستگی بستر و الگوی جریان را بررسی کردند و دریافتند عمق آبشستگی در حالت تعادل دینامیک ثابت و عمق آبشستگی بی‌بعد با زیاد شدن فاصله زیاد می‌شود. Vaghefi و همکاران (۲۰۱۷) شرایط جریان در اطراف آب‌شکن T شکل با حضور سازه محافظ را مطالعه کردند و بیان کردند حداکثر تنش برشی بستر برای سازه محافظ در حالت‌های جاذب و دافع حدود ۲۰ درصد نسبت به حالت عمود افزایش می‌یابد. همچنین قدرت جریان ثانویه در نزدیکی آب‌شکن برای زوایای کمتر از ۱۵ درجه در حالات جاذب و دافع نیز حدود ۲۰ درصد افزایش داشته است. این مقادیر برای سایر زوایا کاهشی بوده است. Kumar و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی آبشستگی اطراف آب‌شکن‌آب‌شکن‌های ساده و T شکل نشان دادند آب‌شکن T شکل در حفاظت از بستر و کاهش عمق آبشستگی و خرابی سازه‌های آبی مؤثرتر می‌باشد.

Patel و Kumar (۲۰۲٤) به‌صورت تجربی به بررسی تغییرات زمانی در مورفولوژی بستر و فرسایش اطراف آب‌شکن‌های مستطیلی با زوایای مختلف پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داده است در زاویه قرارگیری ۹۰ درجه بیشترین عمق فرسایش حاصل شده و زاویه ۱۲۰ درجه کمترین عمق فرسایش را دارد. Li و همکاران (۲۰۲۶) عمق و حجم فرسایش موضعی ناشی از آب‌شکن‌ها را با رویکرد بهینه‌سازی طراحی آب‌شکن‌ها برای حفاظت از زیستگاه‌های آبی و تثبیت دیواره رودخانه‌ها بررسی نمودند. این مطالعه شامل آزمایش‌های آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری حجم حفره فرسایش در شرایط مختلف جریان است. Ohtsuki و همکاران (۲۰۲٤) با بررسی تأثیر آب‌شکن‌ها بر حفظ ظرفیت جریان کانال در بخش‌های مستقیم و قوس‌دار رودخانه‌ها نشان داد آب‌شکن‌ها می‌توانند در کاهش رسوب‌گذاری و ایجاد زیستگاه‌های محیطی مؤثر باشند.

کشاورز و حکیم زاده (۱۳۸۷) به بررسی عددی الگوی جریان اطراف آب‌شکن‌های عمود بر ساحل و مایل نسبت به ساحل پرداختند و دریافتند تشکیل گردابه در آب‌شکن مایل به‌صورت ملایم‌تری نسبت به آب‌شکن عمود بر ساحل صورت می‌گیرد که می‌تواند سبب آبشستگی کمتری در بالادست این آب‌شکن‌ها شود. همچنین نتیجه گرفتند تنش برشی در بستر در حالت آب‌شکن مایل کمتر از آب‌شکن عمود بوده و باعث افزایش طول عمر آب‌شکن مایل خواهد بود. صفرزاده (۱۳۸۹) به‌صورت آزمایشگاهی هیدرودینامیک سه‌بعدی حول تک آب‌شکن با شکل‌های مختلف دماغه، در یک کانال با بستر صلب و تخت را بررسی و نشان داد ساختار جریان متوسط و آشفته حول آب‌شکن‌های مستقیم و غیرمستقیم کاملاً متفاوت است و این موجب می‌شود جریان حول سازه و توزیع تنش برشی بستر کاملاً تحت تأثیر قرار گیرد. اعزی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از مدل عددی دوبعدی CCHE-2D الگوی جریان و تغییرات بستر آبراهه در اطراف سازه آب‌شکن را شبیه‌سازی کردند. در این پژوهش مدل عددی با دقت مناسبی الگوی جریان را در اطراف آب‌شکن منفرد و سری آب‌شکن‌ها شبیه‌سازی می‌نماید.

اسمعیلی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر حضور و عدم حضور آب‌شکن‌های سری بر مؤلفه‌های طولی سرعت در یک کانال پیچان‌رود پرداختند و دریافتند حضور

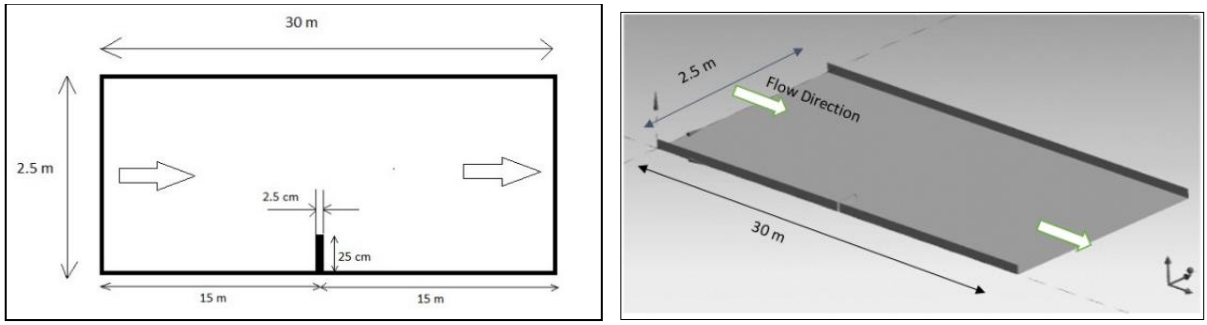
آب‌شکن‌های سری ساده موجب کاهش سرعت جریان در دیواره خارجی می‌شود. در پژوهش حاضر با استفاده از مدل عددی دوبعدی SRH-2D که دارای پایه عددی قوی و پایدار و با الگوریتم مشخص است، به بررسی تأثیر زاویه قرارگیری آب‌شکن در کانال، بر الگوی جریان حول آب‌شکن با زوایای ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ پرداخته شده است. تیموری یگانه (۱۴۰۱) با استفاده از مدل عددی SRH-2D الگوی جریان در اطراف دیواره آب‌شکن، با زوایای قرارگیری مختلف در کانال را شبیه‌سازی نمود. نتایج نشان داد در آب‌شکن با زاویه ۴۵ درجه، طول ناحیه برگشت جریان نسبت به زاویه قرارگیری ۹۰ و ۱۳۵ به ترتیب نزدیک به ۲ و ۸ برابر کمتر خواهد شد. همچنین تنش برشی در نواحی نزدیک به کف در حالت آب‌شکن با زاویه ۴۵ درجه کمترین مقدار و آب‌شکن با زاویه ۱۳۵ درجه بیشترین مقدار را دارد.

بررسی تأثیر فاصله آب‌شکن‌ها بر الگوی جریان، به‌ویژه تغییرات سرعت و تنش برشی بستر اهمیت بالایی دارد. این پارامترها تأثیر مستقیم بر عملکرد و کارایی آب‌شکن‌ها در کنترل فرسایش و تثبیت کناره‌های رودخانه‌ها دارند. فاصله بهینه بین آب‌شکن‌ها می‌تواند به شکل‌گیری الگوهای جریان مناسب و کاهش نوسانات سرعت کمک کند که به‌نوبه خود می‌تواند منجر به کاهش تنش‌های برشی و حفاظت مؤثرتر از بستر رودخانه شود. همچنین، در شرایط مختلف هیدرولیکی، فاصله میان آب‌شکن‌ها ممکن است تأثیرات متفاوتی بر پدیده‌های گردابه‌ای و توزیع جریان داشته باشد؛ بنابراین، درک و ارزیابی این تأثیرات می‌تواند به بهبود طراحی و استقرار سازه‌های آب‌شکن و در نتیجه حفاظت بهتر از مناطق ساحلی و رودخانه‌ای کمک کند. این بررسی‌ها نه‌تنها به تأمین امنیت سازه‌ها و کاهش خطرات ناشی از فرسایش کمک می‌کند، بلکه به توسعه راهکارهای پایدار برای مدیریت منابع آبی و حفاظت از محیط‌زیست نیز انجامیده و در نهایت به افزایش کارایی آب‌شکن‌ها در کاربردهای مختلف منجر می‌شود. ازاین‌رو بررسی گردابه‌های پشت آب‌شکن‌ها، سرعت جریان در ترازهای مختلف و نیز ارزیابی میزان تنش برشی بستر در نواحی مختلف قرارگیری آب‌شکن‌ها به‌صورت عددی و با نرم‌افزار Fluent مورد توجه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی در صحت‌سنجی نتایج عددی

در تمامی مدل‌های عددی، برای اطمینان از صحت نتایج عددی، مقادیر به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های عددی با مقادیر متناظر آن که به‌صورت آزمایشگاهی و یا میدانی در دسترس می‌باشند مقایسه شده و درستی آنها بررسی می‌شود. در این مدل‌سازی عددی، اثر تعداد سلول‌های شبکه در میدان محاسباتی، شرایط مرزی و نیز مدل‌های آشفتگی بررسی می‌شود. همچنین در شبیه‌سازی با نرم‌افزار فلوئنت انتخاب پارامترهای حل نظیر مقادیر پایه گسسته سازی اهمیت ویژه‌ای دارد که مورد توجه قرار گرفته‌اند. برای این مقایسه، از مطالعه آزمایشگاهی Holtz (۱۹۹۱) استفاده شده و مقایسه مقادیر عددی و آزمایشگاهی انجام یافته است. مدل تجربی Holtz (۱۹۹۱) در کانالی به طول ۳۰ متر و عرض ۲/۵ متر با دیوارهای عمودی صاف انجام شده است. میانگین عمق جریان ۰/۲۳ متر و میانگین عمقی سرعت جریان ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه است. آب‌شکنی مستطیل به طول ۲۵ سانتی‌متر و عرض ۲/۵ سانتیمتر براساس شکل (۱) در وسط کانال تعبیه شده است.



(ب) (الف)

شکل ۱- (الف) نمای سه‌بعدی کانال آزمایشگاهی Holtz (۱۹۹۱) و (ب) نمای دوبعدی از کانال و آب‌شکن.

برای کاهش زمان محاسبات، تنها قسمتی از طول کانال آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است، با این شرط که جریان پیش از رسیدن به آب‌شکن به حالت کاملاً توسعه‌یافته رسیده باشد. Çengel (۲۰۱۸) رابطه $L_{e\,Turbulent} = 1.359D(Re_D)^{1/4}$ را برای محاسبه طول توسعه یافتگی کامل در جریان‌های آشفته ارائه کرده است. همچنین، توجه شده است که مقطع خروجی جریان در فاصله‌ای کافی دور از محل آب‌شکن قرار گیرد تا اثر آن بر الگوی جریان و آشفتگی‌ها حذف شود. رویکرد مشابهی توسط پژوهشگران دیگر، از جمله Tarek و همکاران (۲۰۰۴) نیز به‌کار گرفته شده است. بر این اساس، طول کانال ۶ متر تعریف شد و آب‌شکن در فاصله ۲ متری از ابتدای کانال قرار داده شد.

نرم‌افزار فلوئنت

نرم‌افزار فلوئنت (Fluent) به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین ابزار شبیه‌سازی در زمینه مدل‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت شناخته می‌شود و توانایی بالایی در تحلیل هندسه‌های پیچیده دارد. این نرم‌افزار بر پایه روش حجم محدود عمل می‌کند و به کاربران این امکان را می‌دهد که به‌راحتی شبکه‌های بی‌سازمان را برای تحلیل جریان در هندسه‌های مختلف ایجاد و مدیریت کنند.

فلوئنت قابلیت تولید شبکه‌های متنوعی را دارد که شامل المان‌های مثلثی و چهارضلعی برای هندسه‌های دوبعدی و همچنین چهاروجهی، شش‌وجهی و هرمی برای هندسه‌های سه‌بعدی می‌باشد. یکی از ویژگی‌های بارز این نرم‌افزار، توانایی بهینه‌سازی شبکه است که به کاربر امکان می‌دهد در نواحی خاصی که تغییرات شدید (مانند لایه‌های مرزی) دارد، شبکه را به‌طور دقیق‌تری تنظیم کند. این ویژگی به افزایش دقت نتایج شبیه‌سازی کمک می‌کند و زمان لازم برای تولید شبکه‌های مؤثر را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. نرم‌افزار فلوئنت به زبان برنامه‌نویسی C نوشته شده است و از تمامی امکانات و قابلیت‌های انعطاف‌پذیر این زبان بهره می‌برد. این امر موجب می‌شود تا فلوئنت بتواند از حافظه دینامیک و ساختار داده‌های بهینه استفاده کند و اطلاعات محاسباتی را به‌صورت منعطف و کارآمد مدیریت نماید .به همین دلیل، فلوئنت به‌عنوان یک ابزار کارآمد در حوزه‌های مختلف علمی و مهندسی، از جمله مهندسی مکانیک، مهندسی شیمی و مهندسی محیط‌زیست، شناخته شده است. با استفاده از فلوئنت، پژوهشگران و مهندسان می‌توانند به تحلیل‌های دقیق و قابل اعتمادی در مسائل پیچیده بپردازند و در نتیجه به بهبود طراحی و عملکرد سیستم‌های مختلف کمک کنند.

معادلات حاکم

معادلات دوبعدی انتگرال‌گیری شده در عمق در مدل عددی فلوئنت شامل روابط (۱) تا (۳) می‌باشد (کاردان و همکاران، ۱۳۹۲):

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (hU)}{\partial x}+\frac{\partial (hV)}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

معادله مؤمنتم

$$\frac{\partial (hU)}{\partial t}+\frac{\partial (hUU)}{\partial x}+\frac{\partial (hVU)}{\partial y}=\frac{\partial hT_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial hT_{xy}}{\partial y}-gh\frac{\partial z}{\partial x}-\frac{\tau_{bx}}{\rho}+D_{xx}+D_{xy} \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial (hV)}{\partial t}+\frac{\partial (hUV)}{\partial x}+\frac{\partial (hVV)}{\partial y}=\frac{\partial hT_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial hT_{yy}}{\partial y}-gh\frac{\partial z}{\partial y}-\frac{\tau_{by}}{\rho}+D_{yx}+D_{yy} \qquad (۳)$$

در معادلات فوق، t زمان، x و y مختصات دکارتی، h عمق آب، U و V مولفه‌های سرعت میانگین‌گیری شده در عمق در جهات x و y هستند، g شتاب ثقل، T_{xx}، T_{xy} و T_{yy} تنش‌های آشفته ناشی از جریان متلاطم D_{xx}، D_{xy}، D_{yx}، D_{yy} عبارت‌های پراکندگی ناشی از میانگین عمقی، $z=z_b+h$ تراز سطح آب، z_b تراز بستر، ρ چگالی آب و τ_{bx}، τ_{by} تنش‌های برشی بستر (اصطکاک) می‌باشند. اصطکاک بستر با استفاده از معادله ضریب زبری مانینگ به‌صورت رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$\begin{pmatrix}\tau_{bx}\\ \tau_{by}\end{pmatrix}=\rho C_f\begin{pmatrix}U\\ V\end{pmatrix}\sqrt{U^2+V^2},\ C_f=\frac{gn^2}{h^{1/3}} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، n ضریب زبری مانینگ می‌باشد. تنش‌های آشفتگی بر اساس معادله بوسینسک به‌صورت رابطه (۵) در نظر گرفته می‌شوند:

$$T_{xx}=2(\nu+\nu_t)\frac{\partial U}{\partial x}-\frac{2}{3}k \qquad (۵)$$

$$T_{xy}=2(\nu+\nu_t)(\frac{\partial U}{\partial y}+\frac{\partial U}{\partial y}) \qquad (۶)$$

$$T_{yy}=2(\nu+\nu_t)\frac{\partial V}{\partial y}-\frac{2}{3}k \qquad (۷)$$

در معادلات فوق، ν ویسکوزیته سینماتیکی آب، ν_t ویسکوزیته گردابی و k انرژی جنبشی آشفته می‌باشد. در نرم‌افزار فلوئنت مدل‌های آشفتگی مختلفی برای سازی آشفتگی‌های جریان وجود دارند. مدل‌های صفر معادله‌ای، مدل‌های یک معادله‌ای، مدل‌های دو معادله‌ای، مدل RSM [۱] و مدل LES [۲].در مدل‌سازی عددی هر پدیده خاص، انواع مدل‌های آشفتگی باید ارزیابی و در نهایت بهترین مدل انتخاب شود.

در مدل دو معادله‌ای k-ε مقیاس طول مشخصه حرکت آشفتگی با استفاده از معادله انتقال محاسبه می‌شود. مدل k-ε از یک معادله برای k و یک معادله برای ε تشکیل شده است که در معادلات (۸) و (۹) آورده شده است.

$$\frac{\partial (hk)}{\partial t}+\frac{\partial (hUk)}{\partial x}+\frac{\partial (hVk)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h\nu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{h\nu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial y}\right)+P_h+P_{kb}-h\varepsilon \qquad (۸)$$

$$\frac{\partial (h\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial (hU\varepsilon)}{\partial x}+\frac{\partial (hV\varepsilon)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h\nu_t}{\sigma_k}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{h\nu_t}{\sigma_k}\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)+C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}P_h+P_{\varepsilon b}-C_{\varepsilon 2}h\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (۹)$$

در معادلات فوق، ضرایب به‌صورت معادلات (۱۲-۱۰) در نظر گرفته می‌شود (Rodi، ۱۹۹۳):

$$P_h = h\nu_t\left[2\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y}\right)^2\right] \quad (۱۰)$$

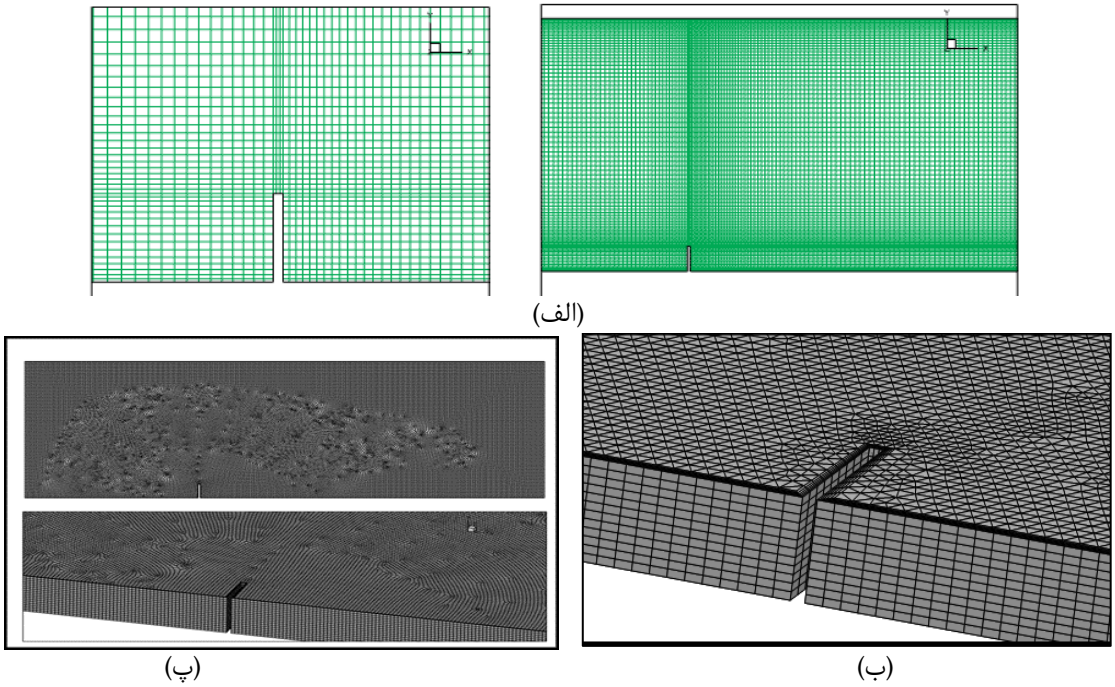
$$P_{kb} = C_f^{-\frac{1}{2}} U_*^3 \quad (۱۱)$$
$$P_{\varepsilon b} = C_{\varepsilon\Gamma} C_{\varepsilon 2} C_\mu^{1/2} C_f^{-3/4}\, U_*^4/h$$

$$C_\mu = 0.09,\ C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{\varepsilon\Gamma} = 1.8\sim 3.6 \quad (۱۲)$$

C_μ ثابت تجربی مدل k-ε برای محاسبه تنش‌های رینولد، $C_{\varepsilon 1}$ ضریب تولید انرژی جنبشی تلاطم در معادله ε، $C_{\varepsilon 2}$ ضریب استهلاک انرژی جنبشی تلاطم در معادله ε، σ_k عدد پرنتل تلاطمی برای انرژی جنبشی تلاطم k، σ_ε عدد پرنتل تلاطمی برای نرخ اتلاف تلاطم ε، $C_{\varepsilon\Gamma}$ ضریب اصلاح تولید تلاطم ناشی از گروین (بسته به هندسه و شرایط جریان تغییر می‌کند).

مدل‌سازی هندسه کانال و آب‌شکن

برای مدل‌سازی عددی، ابتدا هندسه مدل در نرم‌افزار DISIGNMODELER ترسیم و سپس هندسه مدل به نرم‌افزار ANSYSMESHING فراخوانده شده و شبکه‌بندی شد. در مدل‌سازی سه‌بعدی از شبکه‌های منشوری در طول و عرض کانال استفاده شده و شبکه‌های نزدیک آب‌شکن برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، ریزتر انتخاب شده است. نتایج پژوهش کاردان و همکاران (۱۳۹۲) نشان داده است در شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان در کانال، شبکه‌بندی نوع نامنظم نتایج بهتری حاصل می‌کند، اما بااین‌وجود در پژوهش زیر نیز دو نوع شبکه‌بندی منظم و نامنظم بررسی شد. این شبکه‌بندی‌ها در شکل (۲) نمایش داده شده است. در حالت شبکه‌بندی نامنظم (شکل ۲-ب) شبکه‌بندی به دو شکل متفاوت انجام یافته است. این کار برای بررسی تأثیر استفاده از شبکه‌های مثلثی با ابعاد کوچک‌تر در اطراف آب‌شکن انجام شد.



شکل ۲- (الف) شبکه‌بندی منظم در پلان و در عمق جریان (چهاروجهی منظم)، (ب) شبکه‌بندی نامنظم در پلان و منظم در عمق جریان (مش‌های هرمی) و (پ) شبکه‌بندی نامنظم در پلان و منظم در عمق جریان (مش‌های شش‌وجهی).

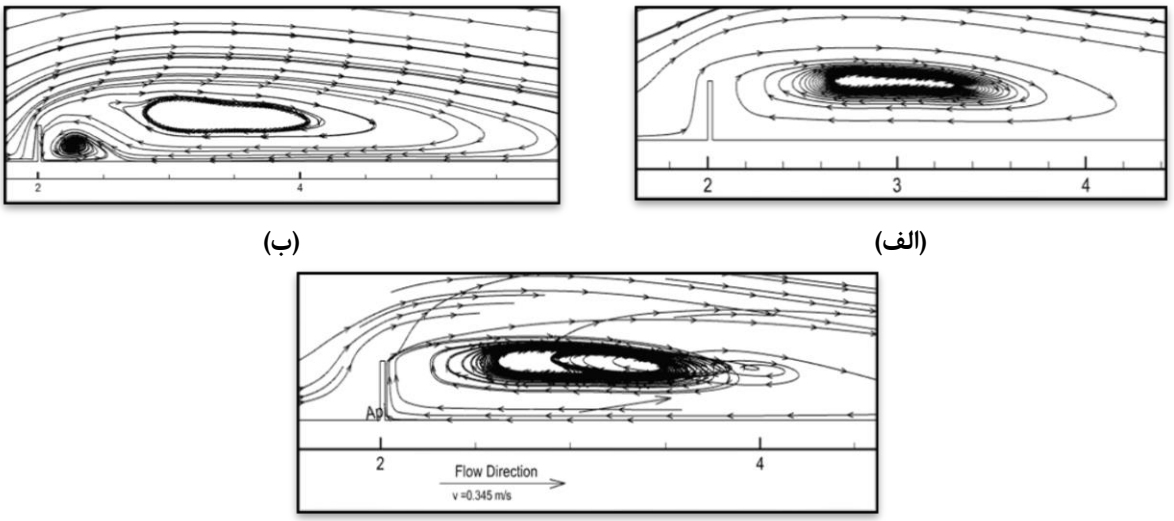
نتایج حاصل از هر سه نوع شبکه‌بندی در شکل (۲) از نظر پارامترهای کلی جریان مانند پروفیل‌های سرعت و توزیع کمیت‌های هیدرولیکی، بسیار نزدیک به یکدیگر و همچنین نزدیک به نتایج مقاله مبنا (داده‌های صحت‌سنجی) بودند. بااین‌حال تفاوت اساسی در رفتار گردابه‌ها[۳] در ناحیه ویک[۴] پشت آب‌شکن مشاهده شد. همان‌طور که در شکل (۲-الف) مشاهده می‌شود، در شبکه‌بندی کاملاً منظم، گردابه‌ها به صورت کاملاً متقارن تشکیل می‌شوند. این تقارن با پدیده واقعی جریان در عدد رینولدز بالا سازگار نیست، زیرا در شرایط آزمایشگاهی، ریزش گردابه (vortex shedding) به صورت نامتقارن رخ می‌دهد: گردابه ابتدا در یک سمت نزدیک آب‌شکن تشکیل شده، رشد می‌کند، جدا می‌شود و در پایین‌دست مستهلک می‌شود، این فرآیند به طور متناوب از دو سمت تکرار می‌شود.

در مقابل، شبکه‌های نامنظم نشان داده شده در شکل (۲-ب و پ) با ایجاد اختلال جزئی در تقارن هندسی، امکان تشکیل و ریزش گردابه‌های نامتقارن را فراهم می‌کنند که با مشاهدات آزمایشگاهی همخوانی دارد. این رفتار نامتقارن ناشی از شکست طبیعی تقارن در جریان‌های با عدد رینولدز بالا است که در شبکه منظم به دلیل حفظ کامل

تقارن المان‌ها سرکوب می‌شود. بنابراین، برای شبیه‌سازی دقیق‌تر پدیده‌های واقعی جریان، در مدل عددی نهایی از شبکه‌بندی نامنظم (شکل ۲- ب و پ) استفاده شد.

شکل (۳) نمای دوبعدی خطوط جریان در ناحیه نزدیک آب‌شکن را برای سه نوع شبکه‌بندی مورد بررسی نشان می‌دهد: (الف) شبکه‌بندی با المان‌های شش‌وجهی (نامنظم در پلان و منظم در عمق)، (ب) شبکه‌بندی با المان‌های هرمی (نامنظم در پلان و منظم در عمق) و (پ) شبکه‌بندی کاملاً منظم با المان‌های چهاروجهی .همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، در هر سه نوع شبکه‌بندی، خطوط جریان در پایین‌دست آب‌شکن به صورت گردابه‌ای تشکیل شده‌اند و موقعیت مرکز این گردابه‌ها در هر سه حالت تقریباً یکسان است. این مشابهت در موقعیت و شکل‌گیری گردابه‌ها، همراه با نتایج کانتورهای تراز سطح آب (که در بخش‌های بعدی ارائه خواهد شد)، نشان‌دهنده آن است که تغییرات سطح آب در مدل عددی با مشاهدات آزمایشگاهی همخوانی مناسبی دارد.

با مقایسه دقیق‌تر شکل (۳-الف، ب و پ) می‌توان دریافت که شبکه‌بندی شش‌وجهی (شکل ۳-الف) خطوط جریان روان‌تر و منظم‌تری تولید کرده است. در مقابل، در شبکه‌بندی هرمی (شکل ۳-ب) و به‌ویژه در شبکه‌بندی چهاروجهی منظم (شکل ۳-پ) خطوط جریان کمی نامنظم‌تر به نظر می‌رسند. این تفاوت بیانگر برتری نسبی شبکه‌بندی شش‌وجهی در بازتولید دقیق‌تر الگوی جریان و کاهش اثرات مصنوعی ناشی از ساختار شبکه است. باتوجه‌به این مشاهدات، شبکه‌بندی شش‌وجهی برای ادامه شبیه‌سازی‌های عددی انتخاب شد.



(الف) (ب)

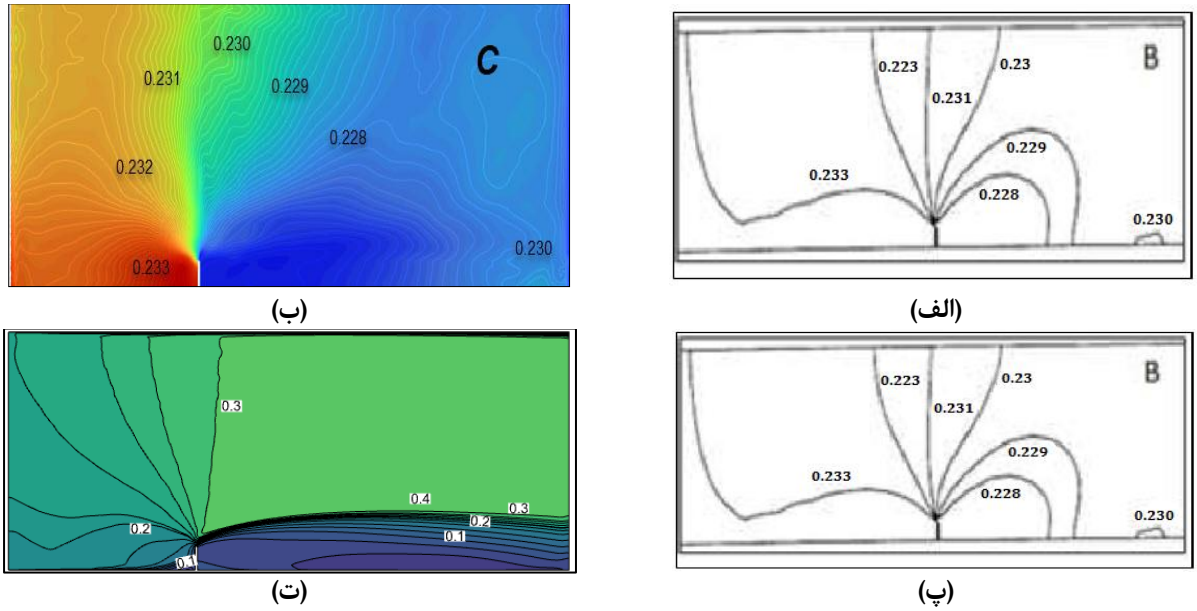
(پ)

شکل ۳- الف) تشکیل گردابه در شبکه‌بندی به روش شش‌وجهی، ب) به روش هرمی و پ) به روش چهاروجهی منظم.

شکل (۴) مقایسه‌ای بین نتایج مدل آزمایشگاهی Holtz (۱۹۹۱) و نتایج مدل عددی حاضر را ارائه می‌دهد: (الف) کانتورهای هم‌تراز سطح آب در مدل آزمایشگاهی هولتز (۱۹۹۱)، (ب) کانتورهای هم‌تراز سطح آب به‌دست‌آمده از مدل عددی با شبکه‌بندی نامنظم شش‌وجهی، (پ) کانتورهای سرعت جریان در تراز y/h = ۰/۷۵ نسبت به بستر در مدل آزمایشگاهی Holtz (۱۹۹۱) و (ت) کانتورهای سرعت جریان در همین تراز به‌دست‌آمده از مدل عددی.

همان‌طور که در شکل ۴ (الف) و (ب) مشاهده می‌شود، الگوی کانتورهای هم‌تراز سطح آب در مدل عددی (شکل ۴-ب) با نتایج آزمایشگاهی (شکل ۴-الف) همخوانی بسیار خوبی دارد. حداکثر ارتفاع آب در ناحیه بالادست آب‌شکن و حداقل ارتفاع در ناحیه نزدیک به آب‌شکن در هر دو مورد تقریباً در موقعیت‌های یکسانی رخ داده و مقادیر آن‌ها نیز نزدیک به یکدیگر است. همچنین، مقایسه کانتورهای سرعت جریان در تراز y/h = ۰/۷۵ (شکل ۴-پ و ت) نشان‌دهنده تطابق مناسب بین مدل عددی و آزمایشگاهی است. در هر دو شکل، ناحیه کاهش سرعت در پشت آب‌شکن (ناحیه ویک) و ناحیه افزایش سرعت در کناره‌ها به‌خوبی قابل تشخیص است و موقعیت و گستردگی این نواحی در مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی Holtz (۱۹۹۱) سازگار می‌باشد. این تطابق تأیید می‌کند که مدل عددی با شبکه‌بندی شش‌وجهی نامنظم قادر است الگوهای پیچیده جریان اطراف آب‌شکن، از جمله تغییرات سطح آب و توزیع سرعت، را با دقت قابل قبولی بازتولید کند.

در مدل‌های عددی، تعداد المان‌های شبکه در میدان محاسباتی تأثیر قابل‌توجهی بر دقت نتایج دارد. به همین منظور، سه تعداد مختلف المان برای شبکه‌بندی کانال بررسی شد و درصد خطای نتایج عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی محاسبه گردید. نتایج این بررسی در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۴- الف) منحنی‌های هم‌تراز سطح آب در مدل آزمایشگاهی Holtz (۱۹۹۱)، (ب) منحنی‌های هم‌تراز سطح آب در مدل عددی با شبکه‌بندی نوع شش‌وجهی، (پ) کانتورهای سرعت جریان در نسبت y/h برابر ۰/۷۵ از تراز بستر در مدل آزمایشگاهی Holtz (۱۹۹۱) و (ت) کانتور سرعت جریان در همین تراز به‌دست آمده از مدل عددی.

جدول ۱- ابعاد کانال و تعداد شبکه‌ها در هر بعد در شبکه‌بندی نامنظم.

		ارتفاع (m)	عمق جریان (m)	عرض (m)	طول (m)	کیفیت مش	طول گردابه (m)	سرعت در تراز مشخص (m/s)	اختلاف (%)
ابعاد کانال (m)		۰/۳۳	۰/۲۳	۲/۵	۶	-	---	---	---
نتایج آزمایشگاهی		۰/۳۳	۰/۲۳	۲/۵	۳۰	--	۲/۵	۰/۳۸	---
تعداد مش در هر بعد	خیلی ریز	۱۵	۱۲	۱۰۲	۲۷۸	۰/۹۲۴	۲/۴۳	۰/۳۶	۲
	ریز	۱۲	۸	۸۹	۲۲۸	۰/۹۰۳	۲/۴	۰/۳۵	۷
	متوسط	۱۰	۶	۷۵	۲۰۰	۰/۸۸۱	۲/۲	۰/۳۱	۱۸

در شبکه‌بندی متوسط، نتایج عددی اختلاف قابل توجهی با داده‌های تجربی Holtz (۱۹۹۱) نشان می‌دهند. به‌طور خاص، مقادیر سرعت جریان در تراز y/h = ۰/۷۵ نسبت به بستر، بر اساس مقایسه کانتورهای سرعت (شکل ۴-پ و ت) و همچنین محاسبه میانگین خطای نسبی در نقاط منتخب، حدود ۱۸ درصد با نتایج آزمایشگاهی تفاوت دارد. با ریزتر کردن اندازه المان‌های شبکه، این اختلاف به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در شبکه‌بندی ریز، میانگین خطای نسبی سرعت در همان تراز به حدود ۷ درصد می‌رسد. در شبکه‌بندی خیلی ریز نیز این مقدار به حدود ۲ درصد کاهش می‌یابد. علاوه‌براین کیفیت کلی شبکه (بر اساس معیارهای استاندارد مانند معیار Orthogonal Quality یا Skewness) از مقدار ۰/۸۸۱ در شبکه‌بندی متوسط به ۰/۹۲۴ در شبکه‌بندی خیلی ریز بهبود یافته است. با توجه به اینکه افزایش تعداد المان‌های شبکه تأثیر قابل‌توجهی بر مدت‌زمان محاسبات و منابع مورد نیاز دارد، انتخاب شبکه‌بندی بهینه باید تعادلی بین دقت نتایج و زمان شبیه‌سازی برقرار کند. بر اساس مقایسه خطای میانگین نسبی سرعت جریان در تراز y/h =۰/۷۵ و کانتورهای هم‌تراز سطح آب (شکل ۴)، و همچنین در نظر گرفتن زمان محاسباتی، شبکه‌بندی ریز به‌عنوان گزینه مناسب انتخاب شد. در این شبکه‌بندی، تعداد کل المان‌ها در حوزه محاسباتی برابر ۲۳۷۰۹۶ است و نتایج حاصل از آن دقت کافی را با زمان محاسباتی معقول ارائه می‌دهند.

برای شبیه‌سازی آشفتگی‌های جریان، از سه مدل آشفتگی k-ε standard، k-ε RNG و k-ω SST استفاده شد. در هر سه مدل آشفتگی نتایج قابل‌قبول و نزدیک به هم به دست آمد. تنها با این تفاوت که در مدل آشفتگی k-ω SST کانتورهای سرعت با دقت بیشتری نسبت به مدل آشفتگی k-ε بود (به‌ویژه در نواحی مرزی) اما در ادامه اجرای مدل‌ها با مدل آشفتگی k-ω SST مشکل عدم همگرایی اتفاق افتاد. نتایج بعدی نشان داد این مدل آشفتگی در

سرعت‌های بالای جریان عملکرد خوبی نداشته و دچار عدم همگرایی می‌شود، ولی در سرعت‌های پایین مشکل خاصی مشاهده نشد. باتوجه‌به اینکه در مرحله صحت‌سنجی سرعت جریان پایین و برابر با ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه است از مدل آشفتگی k-ω SST نتایج بسیار مطلوبی حاصل شد؛ ولی در مدل‌های دیگر با افزایش سرعت جریان به مقدار ۰/۷ متر بر ثانیه و یا ۱/۲ متر بر ثانیه این مدل آشفتگی دیگر مناسب نبود. ازاین‌رو مدل آشفتگی k-ε اعمال شد. در مدل آشفتگی k-ε standard در مقایسه با مدل آشفتگی k-ε RNG در سرعت‌های پایین (سرعت جریان ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه) تقریباً نتایج مشابهی حاصل شد؛ ولی در سرعت‌های بالا، شبیه‌سازی مدل RNG بهتر بود که در نهایت مدل آشفتگی k-ε RNG انتخاب و به کارد برده شد. معیار ارزیابی عملکرد مدل‌های آشفتگی، نزدیک بودن سرعت جریان شبیه‌سازی شده به مقادیر آزمایشگاهی و نیز الگوی جریان و گردابه‌ها در پایین‌دست آبشکن بود.

برای شرایط مرزی، در دیواره‌ها[5]، شرایط مرزی غیرلغزشی با زبری برابر صفر در دیواره‌ها و زبری بستر[6] برابر با ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است (براساس با قطر متوسط رسوبات در مدل آزمایشگاهی). برای ورودی کانال[7]، ورودی فشار[8] است که برای سیال آب تعریف شده است. تراز آب[9] در کانال برابر ۰/۲۳ متر و سرعت[10] جریان ورودی به کانال ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه وارد شد. خروجی کانال[11] و سقف کانال[12]، شرط مرزی از نوع فشار خروجی[13] تعریف شده است.

تعریف مدل‌ها

هدف پژوهش حاضر، ارزیابی عملکرد آبشکن‌های سری در شرایط مختلف و بررسی تأثیر آن‌ها بر پارامترهای کلیدی جریان نظیر سرعت بیشینه و تنش برشی بستر است. بررسی این پارامترها می‌تواند درک ارزشمندی در مورد مکانیسم فرسایش بستر در اطراف آبشکن‌ها ارائه دهد، بدون نیاز به انجام شبیه‌سازی‌های پیچیده و زمان‌بر انتقال رسوب. مدل‌های عددی مورد بررسی در این پژوهش در جدول (۲) تعریف شده‌اند.

جدول ۲- مدل‌های عددی مورد بررسی در پژوهش حاضر

پارامتر مورد ارزیابی	فواصل آبشکن‌ها	نسب بی‌بعد شده نسبت به طول آبشکن	سرعت جریان در ورودی
مقادیر	۱۰۰ سانتی‌متر	۴	۰/۳۴۵ متر بر ثانیه
	۱۳۰ سانتی‌متر	۵	۰/۷ متر بر ثانیه
	۱۷۰ سانتی‌متر	۷	۱/۲ متر بر ثانیه

در ادامه پژوهش، با استفاده از مدل عددی صحت‌سنجی‌شده (با شبکه‌بندی شش‌وجهی نامنظم و تعداد المان‌های بهینه ۲۳۷۰۹۶)، شبیه‌سازی‌های لازم برای هر یک از حالت‌های مندرج در جدول (۲) انجام شد تا تأثیر فاصله آبشکن‌ها و سرعت ورودی بر الگوهای جریان، توزیع سرعت و تنش برشی بستر بررسی گردد.

نتایج و بحث

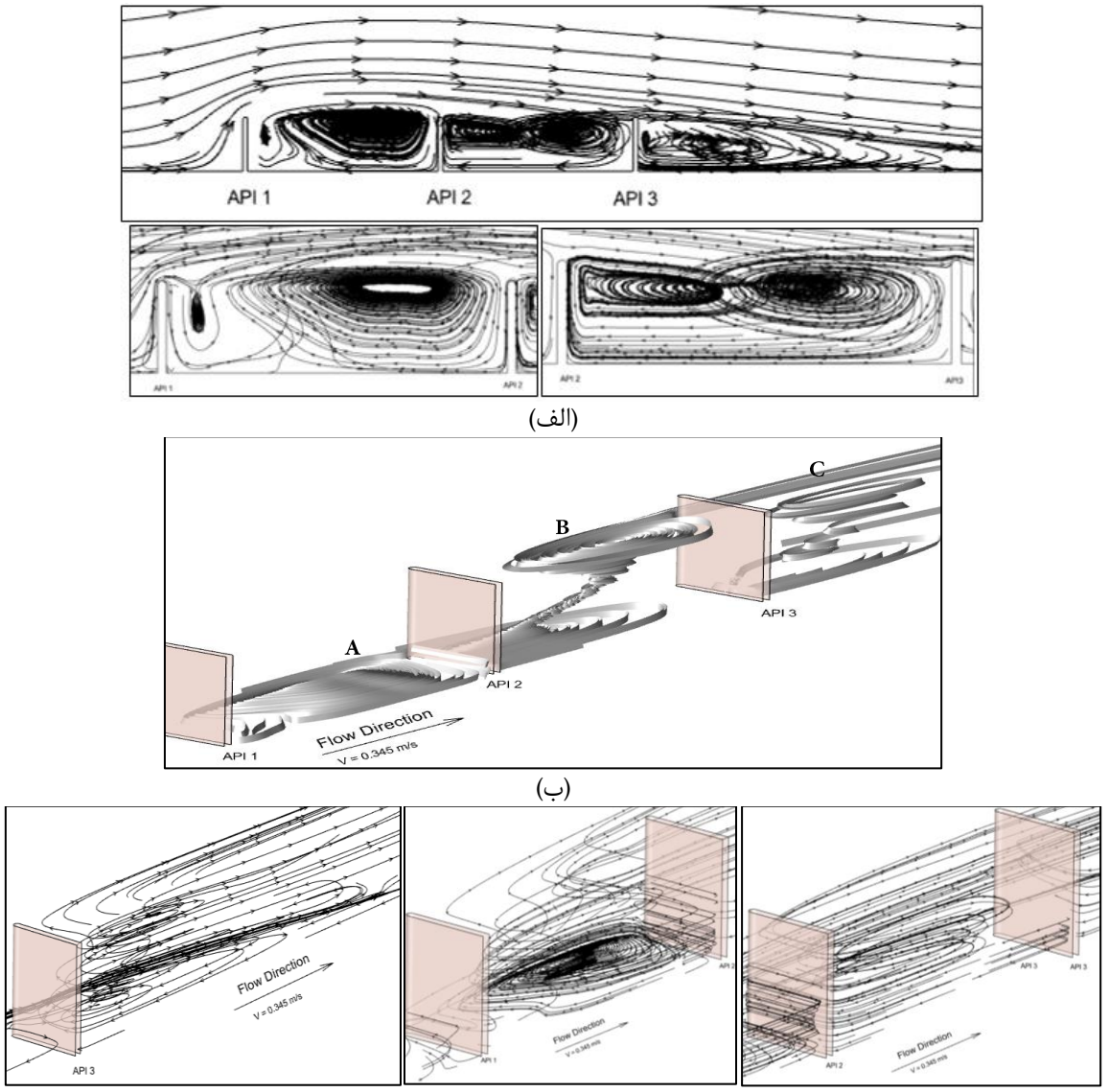
-آبشکن‌های سرگرد با نسبت فاصله L_{AP}/L_h برابر ۴ از یکدیگر

نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل عددی برای حالتی که سرعت جریان در ورودی کانال برابر ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه است، در شکل (۵) ارائه شده است.

بررسی خطوط جریان در پلان و عمق (شکل ۵) نشان می‌دهد که در فاصله بین آبشکن اول و دوم ناحیه (A-B)، گردابه‌ها عمدتاً در نزدیکی بستر کانال و تراز بستر تشکیل می‌شوند و تأثیر آن‌ها به لایه‌های نزدیک بستر محدود است. در فاصله بین آبشکن دوم و سوم ناحیه (B-C)، تداخل گردابه‌های جداشده از آبشکن دوم با گردابه‌های برگشتی ناشی از آبشار سوم رخ می‌دهد که منجر به ایجاد جریان چرخشی پیچیده‌تری در این ناحیه می‌شود. در این فاصله، گردابه‌ها تا نزدیکی سطح آزاد جریان گسترش یافته‌اند. پس از آبشکن سوم پایین‌دست ناحیه (C)، شدت و قدرت گردابه‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و گردابه‌ای با شدت کمتر در پشت آبشکن سوم تشکیل می‌شود که با حرکت جریان به پایین‌دست کشیده و مستهلک می‌گردد. در این ناحیه نیز گردابه‌ها تا سطح آزاد جریان امتداد دارند.

با توجه به اینکه در فاصله اول (بین آبشکن اول و دوم)، گردابه‌ها عمدتاً به تراز بستر محدود هستند و نزدیک‌ترین تماس را با بستر دارند، می‌توان نتیجه گرفت که پتانسیل فرسایشی و تخریبی این گردابه‌ها در مقایسه با دو فاصله بعدی بیشتر است، زیرا انرژی چرخشی آن‌ها مستقیماً بر بستر کانال متمرکز می‌شود. در ادامه، این نتایج با بررسی توزیع سرعت و تنش برشی بستر در ترازهای مختلف تکمیل خواهد شد.

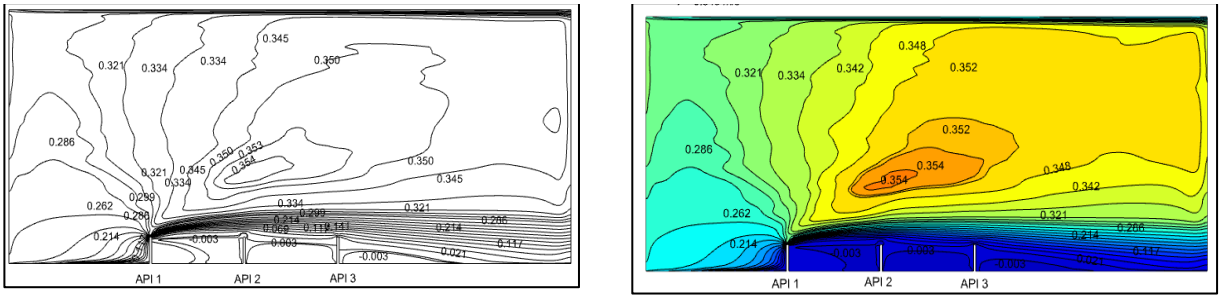
کانتورهای سرعت جریان در تراز y/h = ۰/۷۵ نسبت به بستر و کانتورهای تنش برشی بستر برای سرعت جریان ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه به‌ترتیب در شکل (۶-الف) و (ب) نشان داده شده‌اند.



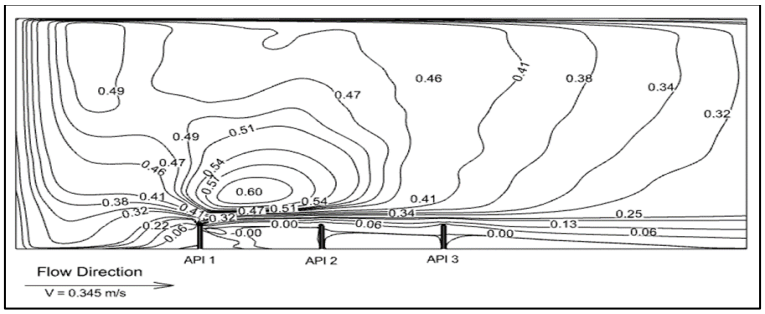
شکل ۵- الف) گردابه‌های تشکیل یافته در ناحیه ویک آب‌شکن‌ها، (ب) نمای سه‌بعدی گردابه‌ها در عمق جریان و (پ) خطوط جریان سه‌بعدی در پیرامون آب‌شکن‌ها در نسبت فاصله L_i/L_{AP} برابر ۴ و سرعت جریان ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه.

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، حداکثر تنش برشی بستر در ناحیه بین آب‌شکن اول و دوم ناحیه (A) رخ می‌دهد و مقدار آن حدود ۰/۶ نیوتن بر مترمربع است. در همین ناحیه، سرعت جریان نیز به بیشینه مقدار خود یعنی حدود ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه می‌رسد. در ناحیه بین آب‌شکن دوم و سوم ناحیه (B)، مقدار حداکثر تنش برشی بستر به حدود ۰/۳۴ نیوتن بر مترمربع کاهش می‌یابد. این کاهش در ناحیه پایین‌دست آب‌شکن سوم ناحیه (C) ادامه یافته و مقدار تنش برشی به حدود ۰/۱۳ نیوتن بر مترمربع می‌رسد. این تغییرات تنش برشی مستقیماً با الگوی گردابه‌ها (که در شکل (۵) نشان داده شده) مرتبط است. در ناحیه A، گردابه‌ها عمدتاً به تراز بستر محدود هستند و انرژی چرخشی آن‌ها مستقیماً بر بستر اعمال می‌شود، که منجر به تنش برشی بالاتر و در نتیجه پتانسیل فرسایشی بیشتر می‌گردد. در مقابل، در نواحی B و C، گردابه‌ها تا نزدیکی سطح آزاد جریان گسترش می‌یابند. این گسترش عمودی باعث پراکندگی انرژی گردابه‌ها در ستون آب شده و تماس مستقیم آن‌ها با بستر را کاهش می‌دهد. به‌ویژه در این نواحی، کاهش قابل‌توجه تنش برشی بستر مشاهده می‌شود که انتظار می‌رود فرسایش بستر را به‌طور مؤثری محدود کند.

این نتایج بر اهمیت فاصله‌گذاری مناسب بین آب‌شکن‌های سری تأکید دارد. قرارگیری آب‌شکن‌ها با فواصل مناسب می‌تواند نواحی با تنش برشی بالا را کنترل کرده و توزیع یکنواخت‌تری از تنش‌ها ایجاد کند، که در نهایت به کاهش فرسایش محلی بستر و افزایش پایداری کناره‌های رودخانه کمک می‌نماید. بنابراین، در طراحی سازه‌های هیدرولیکی مانند آب‌شکن‌های سری، توجه به تأثیر فاصله بین آن‌ها بر الگوی گردابه‌ها و توزیع تنش برشی بستر ضروری است.

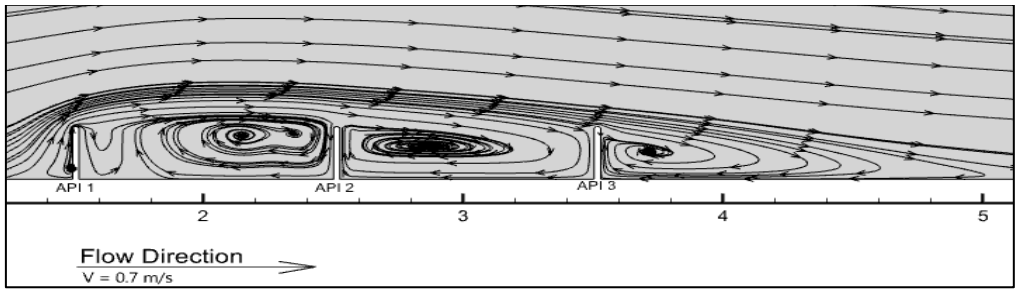


(الف)

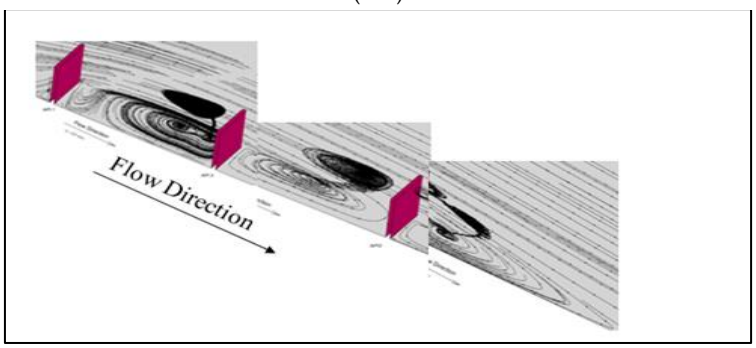


(ب)

شکل ٦- الف) کانتورهای سرعت جریان در تراز y/h برابر ۰/۷۵ از تراز بستر و (ب) کانتورهای تنش برشی بستر در سرعت جریان ۰/۳۴۵m/s.



(الف)



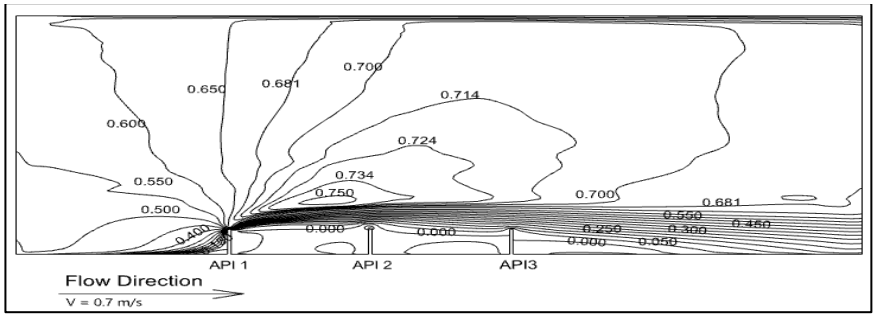
(ب)

شکل ۷- (الف) نمای دوبعدی بردارهای سرعت در اطراف آب‌شکن‌ها و (ب) نمای سه‌بعدی گردابه‌ها در ناحیه ویک آب‌شکن‌ها در سرعت ۰/۷ متر بر ثانیه.

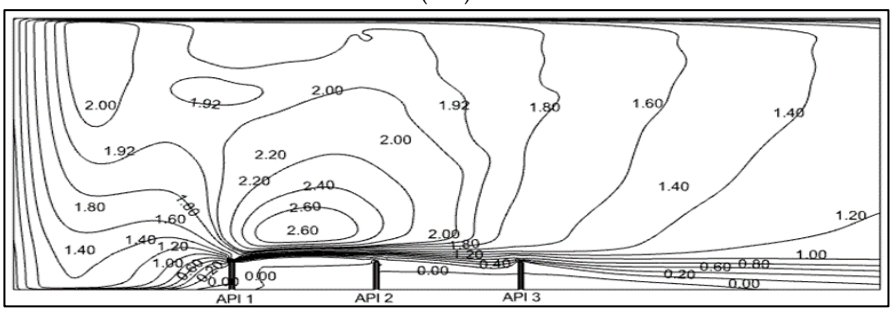
نتایج حاصل از حل مدل با سرعت ۰/۷ متر بر ثانیه

نتایج حاصل از حل مدل عددی برای حالتی که سرعت جریان در ورودی کانال برابر ۰/۷ متر بر ثانیه است، در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل (۷-الف) مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت جریان به ۰/۷ متر بر ثانیه، بردارهای سرعت در اطراف آب‌شکن‌ها شدت بیشتری یافته و جریان با شتاب بالاتری از کنار و بالای آب‌شکن‌ها عبور می‌کند. این امر منجر به کاهش نسبی ابعاد و شدت گردابه‌ها در نواحی بین آب‌شکن‌ها می‌گردد که در نمای سه‌بعدی شکل (۷-ب) به‌خوبی قابل تشخیص است. بررسی کانتورهای سرعت و تنش برشی در شکل (۸) نشان می‌دهد که بیشینه تنش برشی بستر در ناحیه بین آب‌شکن اول و دوم ناحیه (A) به حدود ۲/۶ نیوتن بر مترمربع می‌رسد. این مقدار تقریباً چهار برابر بیشینه تنش برشی در همان ناحیه برای سرعت جریان ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه (۰/۶ نیوتن بر مترمربع) است. در نواحی B و C نیز تنش برشی به‌ترتیب به حدود ۰/۴ و ۰/۲ نیوتن بر مترمربع افزایش یافته است.



(الف)



(ب)

شکل ۸- (الف) کانتورهای سرعت در تراز y/h برابر ۰/۷۵ از تراز بستر و (ب) کانتورهای تنش برشی در تراز بستر.

این نتایج تأیید می‌کنند که با حدود دو برابر شدن سرعت جریان ورودی (از ۰/۳۴۵ به ۰/۷ متر بر ثانیه)، بیشینه تنش برشی بستر تقریباً چهار برابر می‌شود که با رابطه تقریبی تنش برشی بستر ($\tau \propto V^2$) سازگار است. با وجود افزایش کلی تنش برشی، نسبت ابعاد نواحی با تنش بالا در فواصل بین آب‌شکن‌ها کاهش می‌یابد و گردابه‌ها فشرده‌تر می‌شوند. این پدیده نشان‌دهنده تأثیر دوگانه سرعت جریان است: از یک سو افزایش مستقیم تنش برشی و پتانسیل فرسایشی، و از سوی دیگر محدود شدن گستردگی نواحی آسیب‌پذیر.

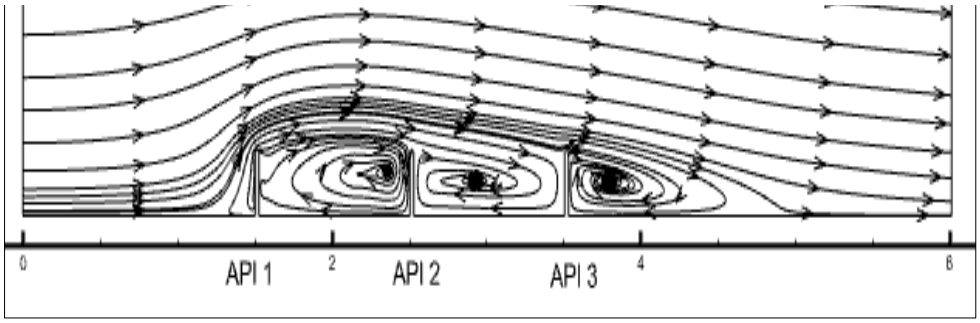
در تمامی حالت‌های بررسی‌شده، ناحیه بین آب‌شکن اول و دوم به‌عنوان بحرانی‌ترین نقطه از نظر فرسایش بستر شناسایی شد.

نتایج حاصل از حل مدل با سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه

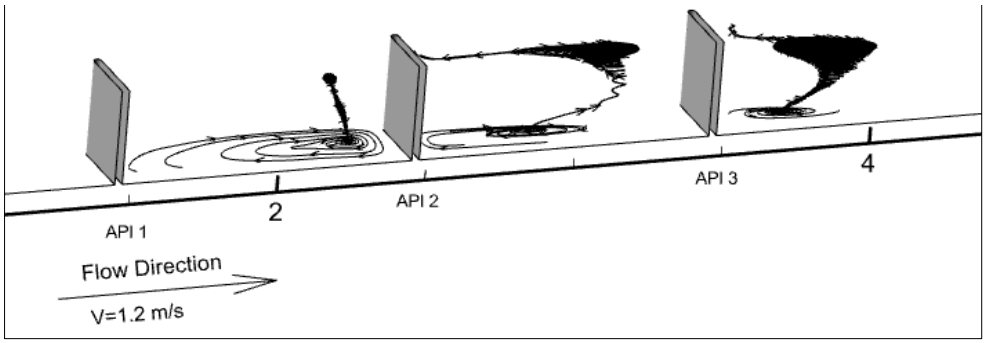
نتایج حاصل از حل مدل مورد نظر در سرعت جریان ۱/۲ متر بر ثانیه است در شکل (۹) ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، در سرعت جریان بالاتر (۱/۲ متر بر ثانیه)، گردابه‌ها در نواحی B (بین آب‌شکن دوم و سوم) و C (پایین‌دست آب‌شکن سوم) به‌طور قابل توجهی از بستر فاصله گرفته و ابعاد آن‌ها در نزدیکی سطح آزاد جریان به مراتب بزرگ‌تر از نزدیکی بستر است. این گسترش عمودی گردابه‌ها باعث پراکندگی انرژی چرخشی در ستون آب شده و تماس مستقیم با بستر را کاهش می‌دهد، که در نتیجه شدت تنش برشی بستر در این نواحی به‌طور مؤثری کمتر می‌شود. علاوه بر این، تمرکز گردابه‌ها در نواحی مجاور آب‌شکن دوم منجر به اعمال نیروی فشاری شدید از دو سمت می‌گردد: از سمت ناحیه A (گردابه‌های جداشده از آب‌شکن اول) و از سمت ناحیه B (گردابه‌های محلی). این تمرکز نیروها آب‌شکن دوم را از نظر سازه‌ای در شرایط بحرانی قرار می‌دهد و طراحی بدنه آن باید با ضریب ایمنی بالاتری برای مقاومت در برابر فشارهای هیدرولیکی در نظر گرفته شود.

بررسی کانتورهای ارائه شده در شکل (۱۰) نشان می‌دهد که بیشینه تنش برشی بستر در ناحیه A به حدود ۵/۸ نیوتن بر مترمربع می‌رسد، که این مقدار تقریباً ۱۰ برابر بیشینه تنش در سرعت ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه و بیش از دو برابر سرعت ۰/۷ متر بر ثانیه است. در نواحی B و C، تنش برشی به‌ترتیب به حدود ۰/۹ و ۰/۵ نیوتن بر مترمربع محدود می‌شود، که تأییدی بر کاهش شدت فرسایشی در این نواحی به دلیل گسترش گردابه‌ها به سمت سطح آزاد است. این الگوها بر لزوم تنظیم سرعت جریان و فاصله آب‌شکن‌ها در طراحی واقعی تأکید دارد تا تعادلی بین کنترل فرسایش بستر و پایداری سازه‌ای آب‌شکن‌ها برقرار شود. در جدول (۳) نتایج عددی به‌دست آمده برای فواصل مختلف آب‌شکن ارائه شده است.

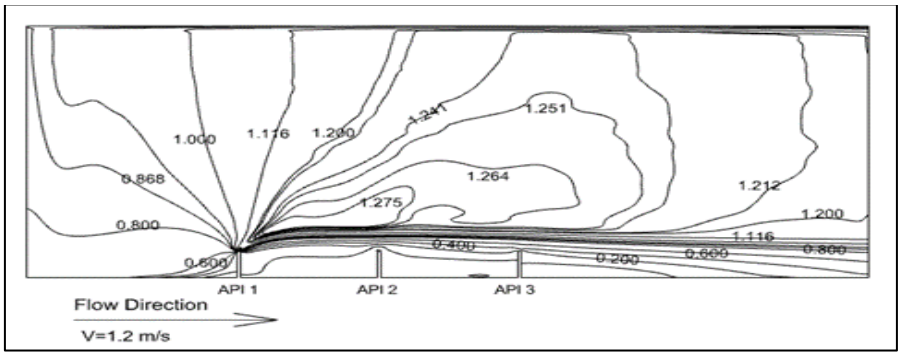


(الف)

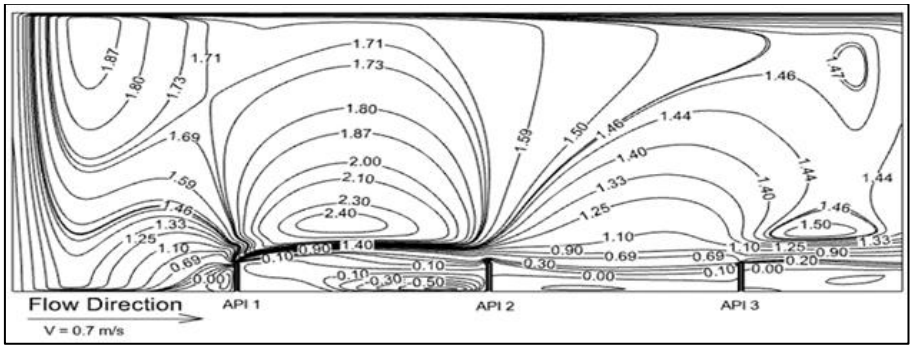


(ب)

شکل ۹- الف) نمای دوبعدی از خطوط جریان در تراز بستر و (ب) نمای سه‌بعدی از خطوط جریان در اطراف آب‌شکن‌ها در سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- (الف) کانتورهای سرعت جریان، (ب) کانتورهای تنش برشی بستر در سرعت جریان ۱/۲ متر بر ثانیه.

جدول ۳- جمع‌بندی نتایج عددی به‌دست آمده برای فواصل مختلف آب‌شکن

نسبت فاصله آب‌شکن‌ها (L_i/L_{AP})	سرعت ورودی (متر بر ثانیه)	ناحیه (شکل ۵)	مقدار تنش برشی (نیوتن بر مترمربع)
۴	۰/۳۴۵	فاصله A	۰/۶
		فاصله B	۰/۳۴
		فاصله C	۰/۱۳
	۰/۷	فاصله A	۲/۴
		فاصله B	۰/۴
		فاصله C	۰/۲
	۱/۲	فاصله A	۷
		فاصله B	۲/۵
		فاصله C	۱/۲
۵	۰/۳۴۵	فاصله A	۰/۵۶
		فاصله B	۰/۲۶
		فاصله C	۰/۰۲
	۰/۷	فاصله A	۲/۶
		فاصله B	۰/۴
		فاصله C	۰/۰۳
	۱/۲	فاصله A	۷/۵
		فاصله B	۱
		فاصله C	۰/۵
۷	۰/۳۴۵	فاصله A	۰/۶
		فاصله B	۰/۰
		فاصله C	۰/۰
	۰/۷	فاصله A	۲/۴
		فاصله B	۰/۱
		فاصله C	۰/۰
	۱/۲	فاصله A	۳/۴
		فاصله B	۰/۰۳
		فاصله C	۰/۰

بر اساس نتایج جدول (۳)، در نسبت فاصله آب‌شکن‌ها (L_i/L_{AP})برابر ۵ و سرعت جریان ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه، بیشینه تنش برشی بستر در ناحیه A به ۰/۵۶ نیوتن بر مترمربع می‌رسد که نسبت به حالت L_i/L_{AP} =۴ (۰/۶ نیوتن بر مترمربع) حدود ۷ درصد کاهش نشان می‌دهد. در نواحی Bو C نیز این مقدار به‌ترتیب به ۰/۲۶ و ۰/۰۲ نیوتن بر مترمربع کاهش یافته است. در سرعت جریان ۰/۷ متر بر ثانیه و همان نسبت فاصله ۵، بیشینه تنش برشی در ناحیه Aبرابر ۲/۶ نیوتن بر مترمربع است که نسبت به سرعت پایین‌تر (۰/۳۴۵ متر بر ثانیه) افزایش قابل‌توجهی دارد، اما در مقایسه با نسبت فاصله ۴ تغییر چندانی نکرده است.

در سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه، بیشینه تنش برشی در ناحیه Aبرای نسبت ۵ به ۷/۵ نیوتن بر مترمربع می‌رسد که نسبت به سرعت ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه حدود ۱۳ برابر افزایش یافته است. در این نسبت فاصله، تنش برشی در نواحی B و C نسبت به نسبت فاصله ۴ به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته که نشان‌دهنده اثر مثبت افزایش فاصله در کاهش پتانسیل فرسایشی نواحی پایین‌دست است.

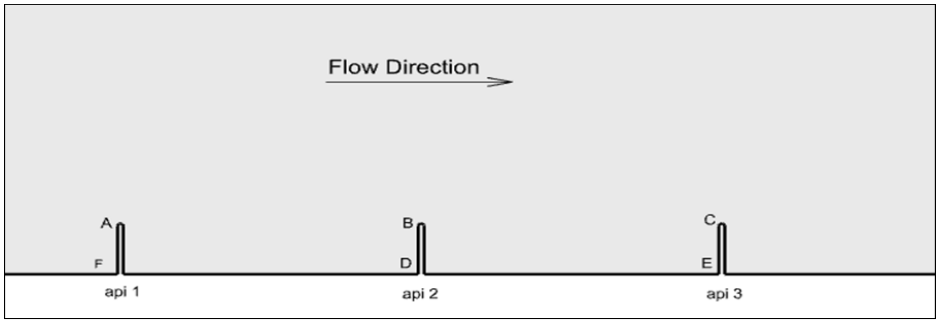
در نسبت فاصله L_i/L_{AP} =۷، بررسی الگوهای گردابه (که در شکل‌های مربوطه قابل مشاهده است) نشان می‌دهد حتی در ناحیه A نیز گردابه‌ها همانند نواحی B و C از بستر فاصله گرفته و تا نزدیکی سطح آزاد جریان گسترش یافته‌اند. این امر باعث کاهش شدت تماس گردابه‌ها با بستر و در نتیجه کاهش کلی تنش برشی در تمام نواحی می‌شود. شدت گردابه‌ها پس از آب‌شکن سوم به‌طور چشمگیری کاهش یافته و از آب‌شکن فاصله می‌گیرند. همچنین، افزایش فاصله باعث می‌شود جریان با انحنای بیشتری از دماغه آب‌شکن اول عبور کند و تمرکز گردابه‌ها عمدتاً به پشت آب‌شکن دوم منتقل شود. در نتیجه، محل تمرکز بیشینه تنش برشی نیز از ناحیه بین آب‌شکن اول و

دوم به دماغه آب‌شکن اول (نقطه جدایش جریان) جابه‌جا می‌شود.

در سرعت جریان ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه و نسبت فاصله ۷، بیشینه تنش برشی بستر در دماغه آب‌شکن اول به ۰/۶ نیوتن بر مترمربع می‌رسد که تفاوت قابل‌توجهی با نسبت‌های ۴ و ۵ ندارد. اما در سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه، بیشینه تنش برشی با افزایش فاصله به این مقدار (از حدود ۷ نیوتن بر مترمربع در نسبت ۴ به ۳/۴ نیوتن بر مترمربع) حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. به‌طورکلی افزایش فاصله آب‌شکن‌ها از ۴ به ۵ (حدود ۲۵ درصد افزایش فاصله واقعی) تأثیر محدودی بر بیشینه تنش برشی دارد، اما افزایش به نسبت ۷ (حدود ۷۵ درصد افزایش فاصله واقعی) منجر به کاهش حدود ۵۰ درصدی بیشینه تنش برشی در سرعت‌های بالا می‌شود.

افزایش فاصله بین آب‌شکن‌ها (L_i/L_{AP}) به‌طور کلی باعث کاهش تنش برشی بستر در نواحی مختلف می‌گردد، زیرا تداخل گردابه‌های مجاور کاهش یافته و انرژی چرخشی در حجم بیشتری از ستون آب پراکنده می‌شود. در مقابل، افزایش سرعت جریان به دلیل رشد انرژی جنبشی و فشار هیدرودینامیکی، تنش برشی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. این نتایج بر اهمیت بهینه‌سازی فاصله آب‌شکن‌های سری در طراحی تأکید دارد تا ضمن کنترل فرسایش بستر، پایداری سازه‌ای نیز حفظ شود.

برای تحلیل دقیق‌تر سرعت جریان و تنش برشی در نقاط کلیدی پیرامون آب‌شکن‌ها، مقادیر این پارامترها در نقاط تعریف‌شده در شکل (۱۱) ارائه شده است.



شکل ۱۱- نقاط A، B، C، F، D، E (نقاط تعریفی برای ارزیابی سرعت و تنش برشی

جدول (۴) مقادیر سرعت جریان در تراز y/h =۰/۷۵ نسبت به بستر را در نقاط کلیدی تعریف شده در شکل (۱۱) (پیرامون آب‌شکن‌ها) برای ترکیب‌های مختلف نسبت فاصله آب‌شکن‌ها (L_i/L_{AP}) و سرعت ورودی جریان ارائه می‌دهد.

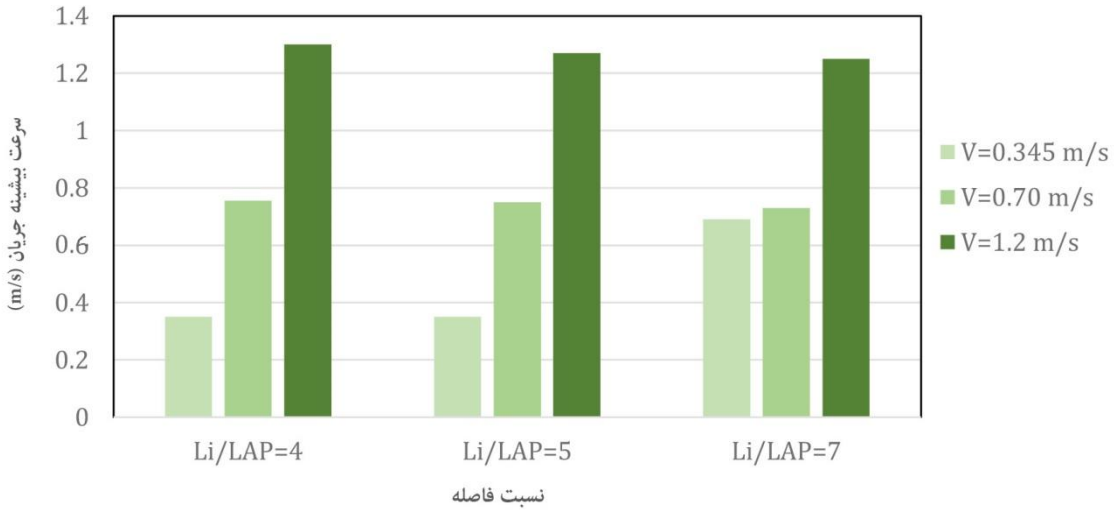
این نقاط شامل نواحی نزدیک دماغه آب‌شکن‌ها، مراکز گردابه‌ها، نقاط جدایش جریان و نواحی بازیابی جریان در پایین‌دست می‌باشند.

جدول ۴- مقایسه سرعت در تراز y/h برابر ۰/۷۵ از تراز بستر در نقاط مشخص شده پیرامون آب‌شکن‌ها.

سرعت جریان	نسبت فاصله آب‌شکن	سرعت در مختصات زیر					
		A	B	C	D	E	F
۰/۳۴۵ m/s	۴	۰/۳۵۰	-۰/۰۳۰	۰/۰۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	۵	۰/۲۸۰	-۰/۰۰۱	۰/۰۳۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	۷	۰/۳۹۰	-۰/۰۱۰	۰/۱۳۰	-۰/۰۱۰	-۰/۰۱۰	-۰/۰۱۰
۰/۷۰ m/s	۴	۰/۷۹	-۰/۱۷۰	-۰/۰۲۰	-۰/۰۰۵	-۰/۰۰۵	-۰/۰۰۲
	۵	۰/۶۶۰	-۰/۰۸۰	۰/۱۸۰	-۰/۰۱۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	۷	۰/۸۵۰	-۰/۱۷۰	۰/۳۴۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۲
۱/۲۰ m/s	۴	۱/۴۵	-۰/۳۳۰	-۰/۲۶۲	-۰/۰۰۵	-۰/۰۱۰	-۰/۰۰۴
	۵	۱/۱۷	-۰/۱۰۰	۰/۴۲۰	۰/۰۱۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	۷	۱/۵۲۰	-۰/۲۶۰	۰/۶۶۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	-۰/۰۲۰

بر اساس نتایج جدول (۴) در سرعت جریان ورودی ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه، مقادیر سرعت در نقاط کلیدی پیرامون آب‌شکن‌ها تفاوت قابل‌توجهی نشان می‌دهند. برای مثال، در نقطه A (معمولاً نزدیک دماغه یا ناحیه انقباض جریان) سرعت به حدود ۱/۰ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد، در حالی که در نقطه C (ناحیه بازیابی جریان در پایین‌دست) سرعت به حدود ۰/۳۹ متر بر ثانیه می‌رسد. این تفاوت‌ها بیانگر تأثیر شدید هندسه آب‌شکن‌ها بر الگوی جریان است. در

نقـاط B و D (واقـع در مراکـز نـواحی ویـک و گردابـه‌ها) سرعت‌ها به مقادیر بسیار پایین (نزدیک به صفر یا حتی منفی در نواحی برگشتی) می‌رسند که نشان‌دهنده وجود جریان‌های آرام و چرخشی قوی در پشت آب‌شکن‌ها است. در سرعت جریان ورودی ۰/۷ متر بر ثانیه، دامنه تغییرات سرعت در نقاط مختلف به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. سرعت در نقطه A به حدود ۰/۷۹ متر بر ثانیه و در نقطه C به حـدود ۰/۳۴ متـر بـر ثانیـه می‌رسـد. ایـن تغییـرات گسترده‌تر، تأثیر مستقیم افزایش سرعت ورودی بر شدت انقبـاض جریـان در نـواحی جـانبی آب‌شـکن‌ها و گسـترش نواحی کم‌سرعت در پشت آن‌ها را تأیید می‌کند. نقاط B و Dهمچنان کمترین مقادیر سرعت را دارند که نشان‌دهنده حفظ نقش آب‌شکن‌ها در ایجاد نواحی آرام و کاهش محلی تنش برشی بستر، حتی در سرعت‌های بالاتر، است.



شکل ۱۱- نمودار ستونی تغییرات سرعت بیشینه جریان بر حسب نسبت فاصله آب‌شکن‌ها

در سرعت جریان ورودی ۱/۲ متر بر ثانیه، روند کلی مشابه باقی می‌ماند، اما شدت تغییرات بیشتر می‌شود. برای مثال، سرعت در نقطه A به حدود ۱/۴۵ متر بر ثانیه و در نقطه C بـه حـدود ۰/۶۶ متـر بـر ثانیـه می‌رسـد. ایـن افـزایش کلـی سرعت در نقاط مختلف، تغییرات دینامیکی شدیدتری را با رشـد سـرعت ورودی نشـان می‌دهـد کـه منجـر بـه تقویـت گردابه‌ها و نواحی انقباض جریان می‌شود (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه سرعت برگشتی گردابه‌ها تحت مقادیر مختلف سرعت جریان ورودی.

سرعت جریان	نسبت فاصله آب‌شکن‌ها	سرعت منفی حداکثر بین آب‌شکن‌ها (متر بر ثانیه)	
		Api1 - Api2	Api2 - Api3
۰/۳۴۵ m/s	۴	-۰/۰۱۰	-۰/۰۲۰
	۵	۰	-۰/۰۲۰
	۷	-۰/۱۱۵	-۰/۰۳۵
۰/۷۰ m/s	۴	-۰/۰۶۲	-۰/۰۹۴
	۵	-۰/۱۰۰	-۰/۰۷۰
	۷	-۰/۲۷۰	-۰/۰۷۰
۱/۲۰ m/s	۴	-۰/۱۹۰	-۰/۲۰۰
	۵	-۰/۲۴۰	-۰/۱۳۰
	۷	-۰/۴۰۰	-۰/۴۰۰

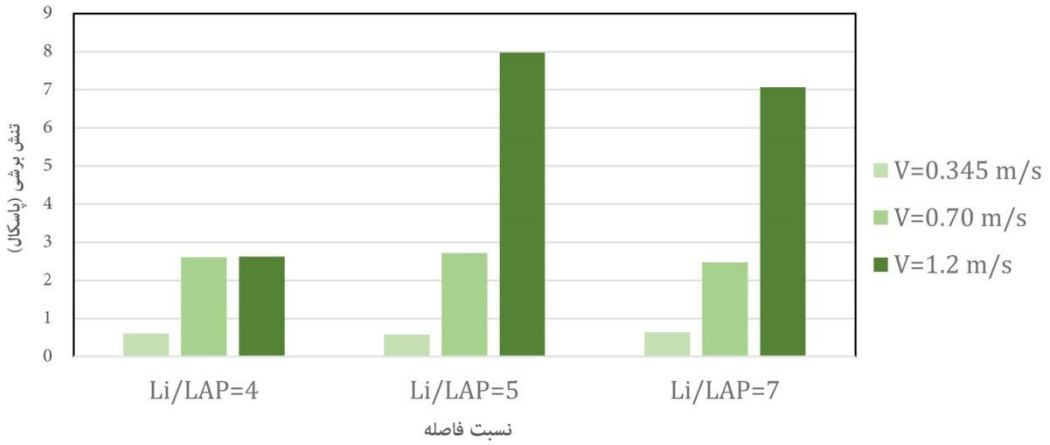
بر اساس نتایج جدول (۵) در سرعت جریان ورودی ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه، بیشینه سرعت منفی (جریان برگشتی) در نواحی بین آب‌شکن‌ها نسبتاً پایین است. به‌ویژه در نسبت فاصله آب‌شکن‌ها (L_i/L_{AP}) برابر ۷، این مقدار در ناحیه A (بـین آب‌شـکن اول و دوم) بـه ۰/۱۱۵ - متـر بـر ثانیـه و در ناحیه B (بین آب‌شکن دوم و سوم) به ۰/۰۳۵ - متر بر ثانیه می‌رسد. مقادیر منفی سرعت بیانگر وجود جریان برگشتی قوی و تشـکیل گردابـه‌های پایـدار در ایـن نـواحی اسـت کـه می‌توانـد بـه فرسـایش محلـی بسـتر و تغییـر الگـوی جریـان کمـک کنـد. در سـرعت جریـان ورودی ۰/۷ متـر بـر ثانیـه، بیشـینه سـرعت منفـی در گردابـه‌ها بـه‌طور قابـل‌توجهی افزایش می‌یابد. برای مثال، در نسبت فاصله ۷، این مقدار در ناحیه A به ۰/۲۷ - متر بر ثانیه و در ناحیه B به ۰/۷ - متر بر ثانیه می‌رسد. این افزایش نشان‌دهنده تقویت شدت

گردابه‌ها و گسترش جریان‌های برگشتی با رشد سرعت ورودی است.
در نهایت، در سرعت جریان ورودی ۱/۲ متر بر ثانیه، بیشینه سرعت منفی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در نسبت فاصله ۷، سرعت منفی در هر دو ناحیه A و B به حدود ۰/۴ - متر بر ثانیه ثبت شده است. این نتایج تأیید می‌کنند که با افزایش سرعت جریان ورودی، شدت گردابه‌ها و جریان‌های برگشتی در نواحی بین آب‌شکن‌ها به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد، که منجر به پیچیدگی بیشتر الگوی جریان و تشدید پتانسیل فرسایشی در بستر می‌شود. به‌طورکلی جدول (۶) تأثیر مستقیم سرعت جریان ورودی را بر تشکیل و شدت گردابه‌ها در نواحی بین آب‌شکن‌ها نشان می‌دهد. این گردابه‌ها نه‌تنها تنش برشی بستر را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بلکه به شکل‌گیری الگوهای جریان پیچیده‌تر و پایدارتر منجر می‌شوند که در طراحی آب‌شکن‌های سری باید مد نظر قرار گیرد.

جدول ۶- مقایسه سرعت بیشینه، تنش برشی بیشینه و محل تنش برشی و طول گردابه آخر با سرعت جریان ورودی ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه

سرعت جریان	نسبت فاصله آب‌شکن	سرعت بیشینه (m/s)	تنش برشی بیشینه (Pa)	محل تنش برشی بیشینه (x,y)	طول گردابه آخر (m)
m/s ۰/۳۴۵	۴	۰/۳۵۰	۰/۶۰۰	(۱/۲۵ و ۰/۶۱)	۲/۲۴۰
	۵	۰/۳۵۰	۰/۵۸۰	(۱/۷۷ و ۲/۰۳)	۱/۶۰۰
	۷	۰/۳۶۹	۰/۶۳۳	(۲/۱۰ و ۰/۵۳)	۱/۰۰
۰/۷۰ m/s	۴	۰/۷۵۵	۲/۶۰۰	(۰/۵۸ و ۲)	۱/۱۵۷
	۵	۰/۷۵۰	۲/۷۱۰	(۰/۵۷ و ۱/۹۸)	۰/۹۲۰
	۷	۰/۷۳۰	۲/۴۷۰	(۰/۱۶ و ۲/۱۷)	>۱
۱/۲۰ m/s	۴	۱/۳۰۰	۲/۶۲۰	(۰/۵۰۰ و ۱/۹۶)	۱/۱۲۰
	۵	۱/۲۷۰	۷/۹۷۰	(۰/۴۸۰ و ۱/۹۶)	۱/۳۰۰
	۷	۱/۲۵۰	۷/۰۶۰	(۰/۵۹۰ و ۲/۱۱)	>۱

جدول (۶) جمع‌بندی جامعی از پارامترهای کلیدی جریان ارائه می‌دهد. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت ورودی، بیشینه سرعت جریان و تنش برشی بستر به‌طور قابل‌توجهی رشد می‌کند، در حالی که افزایش نسبت فاصله آب‌شکن‌ها (L_i/L_{AP}) منجر به کاهش طول گردابه‌ها و جابه‌جایی موقعیت بیشینه تنش برشی به سمت بالادست (دماغه آب‌شکن اول) می‌شود.
بر اساس نتایج جدول (۶) در سرعت جریان ورودی ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه، بیشینه سرعت جریان در تمامی نسبت‌های فاصله آب‌شکن‌ها برابر ۴، ۵ و ۷ تقریباً ثابت و برابر با حدود ۰/۳۵ متر بر ثانیه است. تنها در نسبت فاصله ۷، این مقدار به‌طور جزیی به ۰/۳۶۹ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. این افزایش ناچیز نشان‌دهنده تأثیر محدود آرایش آب‌شکن‌ها بر بیشینه سرعت محلی در سرعت‌های پایین ورودی است، زیرا جریان فرصت کافی برای بازیابی و توزیع یکنواخت‌تر در فواصل بزرگ‌تر دارد. در مقابل، بیشینه تنش برشی بستر در سرعت ورودی ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه تفاوت‌های بیشتری نشان می‌دهد. بالاترین مقدار (۰/۶۳۳ نیوتن بر مترمربع یا ۶۳۳ پاسکال) در نسبت فاصله ۷ مشاهده می‌شود، درحالی‌که در نسبت‌های ۵ و ۴ به‌ترتیب حدود ۰/۵۸ و ۰/۶۰ نیوتن بر مترمربع (۵۸۰ و ۶۰۰ پاسکال) است (شکل ۱۲). این نتایج بیانگر آن است که افزایش فاصله آب‌شکن‌ها در سرعت‌های پایین، تمرکز تنش برشی را در نقاط خاص (مانند دماغه آب‌شکن اول) افزایش می‌دهد، زیرا تداخل گردابه‌های مجاور کاهش یافته و انرژی محلی در نواحی جدایش جریان متمرکزتر می‌شود.
همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، در سرعت‌های بالاتر ورودی (۰/۷ و ۱/۲ متر بر ثانیه)، روند تغییرات بیشینه تنش برشی با افزایش نسبت فاصله معکوس می‌شود و کاهش قابل‌توجهی نشان می‌دهد، که این امر بر برتری نسبت‌های فاصله بالاتر در کاهش پتانسیل فرسایشی در رژیم‌های پرسرعت تأکید دارد. موقعیت مکانی بیشینه تنش برشی نیز با تغییر نسبت فاصله جابه‌جا می‌شود. برای مثال، در نسبت فاصله ۴، این نقطه در مختصات تقریبی x= ۱/۲۵ متر، y= ۰/۶۱ متر قرار دارد که معمولاً در ناحیه بین آب‌شکن اول و دوم است. در نسبت فاصله ۵، به مختصات x= ۱/۷۷ متر، y= ۲/۰۳ متر و در نسبت فاصله ۷ به x= ۲/۱۰ متر، y= ۰/۵۳ متر منتقل می‌شود. این جابه‌جایی به سمت بالادست (دماغه آب‌شکن اول) با افزایش فاصله، تأییدی بر کاهش تداخل گردابه‌ها و تمرکز تنش در نقاط جدایش جریان اولیه است.



شکل ۱۲- نمودار ستونی تغییرات تنش برشی بر حسب نسبت فاصله آب‌شکن‌ها.

طول گردابه‌ها در سرعت جریان ۰/۳۴۵ متر بر ثانیه نیز با افزایش نسبت فاصله به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد: از حدود ۲/۴ متر در نسبت ۴، به ۱/۶۰ متر در نسبت ۵ و ۱ متر در نسبت ۷. این کاهش مستقیماً ناشی از کاهش اثرات متقابل بین آب‌شکن‌های سری است. با افزایش فاصله، هر آب‌شکن تأثیر هیدرولیکی مستقل‌تری بر جریان اعمال می‌کند و فرصت بیشتری برای بازیابی جریان یکنواخت در نواحی بین آن‌ها فراهم می‌شود. در نتیجه، شدت تغییرات سرعت و فشار کاهش یافته، تشکیل گردابه‌های بزرگ محدودتر شده و انرژی چرخشی سریع‌تر مستهلک می‌گردد. این پدیده نه‌تنها طول گردابه‌ها را کوتاه‌تر می‌کند، بلکه تنش برشی بستر را در نواحی پایین‌دست کاهش می‌دهد و توزیع یکنواخت‌تری از تنش‌ها ایجاد می‌نماید. بنابراین، افزایش فاصله آب‌شکن‌ها (به‌ویژه تا نسبت $L_i/L_{AP}=7$) می‌تواند به‌عنوان استراتژی مؤثری برای کنترل فرسایش محلی بستر و بهبود پایداری کلی سیستم حفاظتی در سرعت‌های پایین تا متوسط جریان مورد توجه قرار گیرد.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، به بررسی عددی سه‌بعدی میدان جریان پیرامون آب‌شکن‌ها در حالت قرارگیری گروهی پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان داد اهمیت و تأثیرات قابل توجه آب‌شکن‌ها بر الگوی جریان و فرسایش بستر در سرعت‌های مختلف جریان متفاوت است. تحلیل‌های انجام شده نشان داد با افزایش فاصله بین آب‌شکن‌ها، طول گردابه‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش طول گردابه‌ها به دلیل توزیع یکنواخت‌تر جریان در نواحی بین آب‌شکن‌ها است که می‌تواند به کاهش نوسانات سرعت و تنش‌های برشی در بستر رودخانه منجر شود. در واقع، فاصله بیشتر بین آب‌شکن‌ها به کاهش اثرات متقابل بین آن‌ها کمک کرده و موجب می‌شود که جریان به حالت طبیعی‌تر نزدیک شود. این یافته‌ها نشان دهنده اهمیت در نظر گرفتن فاصله بهینه بین آب‌شکن‌ها در طراحی و استقرار آن‌ها است. نتایج همچنین نشان می‌دهد با افزایش سرعت جریان، تنش‌های برشی بستر به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند. به‌ویژه، در شرایط با سرعت‌های بالاتر، گردابه‌ها به سطح آزاد آب نزدیک‌تر شده و قدرت تخریبی جریان افزایش می‌یابد. این پدیده می‌تواند به فرسایش شدیدتر بستر در نواحی نزدیک به آب‌شکن‌ها منجر شود. به‌طور خاص، در بررسی‌های انجام شده، مشخص شد که بیشینه تنش برشی در ناحیه اول بین آب‌شکن‌ها به‌طور قابل توجهی بیشتر از نواحی دیگر است که این امر به‌وضوح نشان دهنده تأثیر هندسه و طراحی آب‌شکن‌ها بر الگوی جریان و فرسایش بستر می‌باشد. در نهایت، این پژوهش تأکید می‌کند در طراحی و استقرار آب‌شکن‌ها، توجه به عوامل مختلف از جمله فاصله بین آب‌شکن‌ها و سرعت جریان می‌تواند به کاهش فرسایش و بهبود عملکرد سازه‌های آب‌شکن کمک کند.

منابع

اسمعیلی، پدرام، بوداقپور، سیامک، رستمی، محمد، و میرزایی، مهدی. (۱۳۹۹). مطالعه آزمایشگاهی مؤلفه‌های طولی سرعت پیرامون آب‌شکن‌های سری ساده. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۱(۴۲)، ۶۰-۷۴.
doi: 10.22125/iwe.2020.120721

اعزی، سودابه، خانجانی، محمد جواد، و کرمانی، محمد. (۱۳۹۷). شبیه‌سازی دوبعدی الگوی جریان و تغییرات بستر در آبراهه‌های مستقیم و پیچانرودی تحت تأثیر سازه آب‌شکن. نشریه علمی آبیاری و زهکشی ایران، ۱۲(۴)، ۹۷۰-۹۸۱.

تیموری یگانه، مریم. (۱۴۰۱). شبیه‌سازی دوبعدی الگوی جریان در اطراف آب‌شکن با استفاده از مدل عددی SRH-2D. نشریه آب و توسعه ی پایدار، ۹(۱)، ۱۲۷-۱۳۴.
https://doi.org/10.22067/jwsd.v9i1.2110.1092

صفرزاده، اکبر. (۱۳۸۹). مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان آشفته حول آب‌شکن با شکل‌های مختلف دماغه. رساله دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

کاردان، نازیلا، حکیم زاده، حبیب و حسن زاده، یوسف. (۱۳۹۲). شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی پارامترهای هیدرودینامیکی اطراف پایه استوانه‌ای با استفاده از مدل‌های آشفتگی مختلف. علوم و مهندسی آبیاری، ۳۷(۴)، ۳۹-۵۴. Dor: 20.1001.1.25885952.1393.37.4.4.8

کشاورز، محمد حسین و حکیم زاده، حبیب. (۱۳۸۷). شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی الگوی جریان و گردابه‌ها اطراف آب‌شکن‌های L شکل نفوذناپذیر در پنج زاویه مختلف از نیمه اول قوس نیم دایره. یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران .دانشگاه ارومیه، ارومیه.

Ahmad, M. (1953). Experiments on design and behavior of spur dikes. Proceedings of the international hydraulics convention. University of Minnesota. Minneapolis, USA.

Çengel, Yunus A. (2018). Fluid mechanics: fundamentals and applications. John M. Cimbala (Fourth Ed.). New York, NY. ISBN 978-1-259-69653-4. OCLC 958355753.

Chen, F. Y., & Ikeda, S. (1997). Horizontal separation in shallow open channels with spur dikes. Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, 15(2), 15-30.

Ghodsian, M., & Vaghefi, M. (2009). Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90° bend. International Journal of Sediment Research, 24(2), 145-158. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(09)60022-6

Holtz, K. P. (1991). Numerical simulation of recirculating flow at groynes. Journal of computer Methods in Water Resources, 2(2), 463- 477.

Li, G., Sui, J., Dziedzic, M., & Ali, F. (۲۰۲۶). Local scour around submerged spur dikes under ice-covered conditions: experimental and numerical investigation. Cold Regions Science and Technology, 241, 104695. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2025.104695

Kumar, T., Tyagi, L. D., & Kumar, M. (2018). Comparison of scour around different shapes of groynes in open channel. International Journal of Recent Trends in Engineering and Research, 4(3), 382-392. https://doi.org/10.18280/mmep.090515

Lee, K. S., & Jang, C. L. (2016). Numerical investigation of space effects of serial spur dikes on flow and bed changes by using Nays2D. Journal of Korea Water Resources Association, 49(3), 241-252. https://doi.org/10.3741/JKWRA.2016.49.3.241

Ohtsuki, K., Kono, T., Arikawa, T., Taniwaki, H., & Itsukushima, R. (2024). Spur Dike Applications for the Sustainability of Channels in Incised Steep Bend Streams. Water, 16(4), 575. https://doi.org/10.3390/w16040575

Patel, H. K., & Kumar, B. (2024). Optimal spur dike orientation for scour mitigation under downward seepage conditions. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 27(3), 386-397. https://doi.org/10.2478/johh-2024-0019

Rodi, W. (1993). On the simulation of turbulent flow past bluff bodies. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 46-47, 3-19.

Tarek, M., Imran, J., & Chaudhry, H. (2004). Numerical modeling of three dimensional flow field around circular piers. Journal of Hydraulic Engineering, 130(2), 91-100. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:2(91)

Vaghefi, M., Ghodsian, M., & Akbari, M. (2017). Experimental investigation on 3D flow around a single T shaped spur dike in a bend. Period. Polytech. Civil Engineering, 61(3), 462-470. https://doi.org/10.3311/PPci.7999

Xiufang, Z., Pingyi M., & Chengyu, Y. (2012). Experimental study on flow turbulence distribution around a spur dike with different structure. Procedia Engineering, 28(5), 772-775. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.807

Yazdi, j., Sarkardeh, H., Azamathulla, H., & Ghani, A. (2010). 3D simulation of flow around a single spur dike with free-surface flow. International Journal of River Basin Management, 8(1), 55-62. https://doi.org/10.1080/15715121003715107

پی‌نوشت‌ها

1. Reynolds Stress Models (RSM)
2. Large Eddy Simulation (LES)
3. Vortices
4. Wake
5. Walls
6. Bed
7. Channel Inlet
8. Pressure Inlet
9. Free Surface Level
10. Velocity Inlet
11. Outlet
12. Top
13. Pressure Outlet

Journal of Water and Sustainable Development. December 2025
Volume 12. Lssue 3 (Serial No. 37). pages 63 to 79

نشریه آب و توسعه پایدار. آذر ماه ۱۴۰۴
سال دوازدهم. شماره سوم (پیاپی ۳۷). صفحات ۶۳ تا ۷۹

Document Type: Review Article

نوع مقاله: مروری

A Review of Laboratory and Numerical Methods in Subsidence Modeling: Challenges and Solutions

A. Asghari[1]*, H. Sarbaz[2]

1- Ph.D. Candidate in Geotechnical Engineering, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran.
2- Assistant Professor, Civil Engineering, Geotechnical Engineering, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran.
*** Corresponding Author Email:** a.asghari@iau.ac.ir

Received ▶ 09-04-2025
Revised ▶ 30-07-2025
Accepted ▶ 16-08-2025
Available online ▶ 16-12-2025

Abstract

Land subsidence is one of the most serious geotechnical hazards affecting urban areas and plains that experience intensive groundwater exploitation. The phenomenon is primarily triggered by groundwater-level decline and the consequent stress redistribution within the soil profile, posing a significant threat to infrastructure. This paper presents a comprehensive literature review of recent research on laboratory techniques and numerical modeling approaches used for the analysis and prediction of subsidence. Laboratory investigations, particularly physical modeling at various scales, reproduce field conditions in a controlled environment, allowing the assessment of soil behavior under different stress states and groundwater drawdown. Numerical models, implemented through finite-element, distinct-element, and coupled methods, are capable of simulating subsidence over large spatial extents and within complex geological settings. The synthesis of the reviewed studies demonstrates that integrating laboratory data with numerical simulations markedly improves prediction accuracy and deepens the understanding of subsidence mechanisms. Key strategies include improving the quality of input data, developing more accurate constitutive models for fine-grained soils, employing remote-sensing tools for model validation, and integrating intelligent, machine learning based models. These methods provide a pathway for developing more precise approaches to managing and reducing the risk of subsidence.

Keywords: Land Subsidence, Numerical Modeling, Geotechnical Testing, Groundwater Drawdown, Soil Mechanical Behavior, Geotechnical Analysis.

مروری بر روش‌های آزمایشگاهی و عددی در مدل‌سازی فرونشست: چالش‌ها و راهکارها

علی اصغری[1]*، حسین سرباز[2]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران.
۲-استادیار مهندسی عمران - ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران.
***رایانامه نویسنده مسئول:** a.asghari@iau.ac.ir

تاریخ دریافت ◀ ۱۴۰۴/۰۱/۲۰
تاریخ بازنگری ◀ ۱۴۰۴/۰۵/۰۸
تاریخ پذیرش ◀ ۱۴۰۴/۰۵/۲۵
تاریخ انتشار ◀ ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

چکیده

فرونشست زمین یکی از مهمترین مخاطرات ژئوتکنیکی در مناطق شهری و دشت‌هایی که بهره‌برداری شدید از منابع آب زیرزمینی میکنند است. این پدیده عمدتاً ناشی از افت سطح آب زیرزمینی و تغییرات تنش در لایه‌های خاک رخ می‌دهد و تهدیدی جدی برای زیرساخت‌های عمرانی محسوب می‌شود. این مقاله یک مطالعه مروری کتابخانه‌ای است که به بررسی پژوهش‌های اخیر در زمینه روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی در تحلیل و پیش‌بینی فرونشست می‌پردازد. روش‌های آزمایشگاهی شامل مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس‌های مختلف است که شرایط واقعی را در محیط کنترل شده بازسازی کرده و رفتار خاک تحت تنش‌های متفاوت و افت آب زیرزمینی را بررسی می‌کنند. مدل‌های عددی با استفاده از روش‌هایی مانند المان محدود و المان مجزا، توانایی شبیه‌سازی فرونشست در مقیاس بزرگ و شرایط زمین‌شناختی پیچیده را دارند. نتایج مرور مطالعات نشان می‌دهد که ترکیب داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی سبب افزایش دقت پیش‌بینی‌ها و درک بهتر مکانیسم‌های فرونشست می‌شود. از جمله راهکارهای کلیدی می‌توان به بهبود کیفیت داده‌های ورودی، توسعه مدل‌های دقیق‌تر برای خاک‌های ریزدانه، استفاده از ابزارهای سنجش از دور برای اعتبارسنجی مدل‌ها و به‌کارگیری مدل‌های هوشمند مبتنی بر یادگیری ماشین اشاره کرد. این روش‌ها مسیر توسعه رویکردهای دقیق‌تر برای مدیریت و کاهش ریسک فرونشست را فراهم می‌آورند.

واژه‌های کلیدی: فرونشست زمین، مدل‌سازی عددی، آزمایش‌های ژئوتکنیکی، افت آب زیرزمینی، رفتار مکانیکی خاک، تحلیل ژئوتکنیکی.

How to cite this article:
Asghari, A., & Sarbaz, H. (2025). A Review of Laboratory and Numerical Methods in Subsidence Modeling: Challenges and Solutions. Journal of Water and Sustainable Development, 12(3), 63-79. https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i3.2504-1418

مقدمه

فرونشست زمین یکی از پدیده‌های ژئوتکنیکی با پیامدهای گسترده محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی است که به علت‌های مختلف از جمله کاهش حجم مواد زیرسطحی مانند آب‌های زیرزمینی، نفت و گاز و استخراج منابع معدنی اتفاق می‌افتد بااین‌وجود در حال حاضر در ایران و در بسیاری از مناطق دیگر جهان اغلب فرونشست‌ها ناشی از عدم مدیریت منابع آبی و بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی می‌باشد. این نوع فرونشست پدیده‌ای تدریجی و زمان‌بر است. در این فرآیند، با افت سطح آب زیرزمینی و زهکشی آب از لایه‌های ریزدانه، تنش مؤثر افزایش می‌یابد. این افزایش تنش منجر به تراکم غیرالاستیک در خاک و در نتیجه کاهش حجم و ضخامت قائم لایه خاک و شکل‌گیری پدیده فرونشست می‌شود. در فرونشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی، رسوبات دانه درشت تقریباً هم‌زمان با برداشت آب نشست می‌کنند، اما لایه‌های رسی و سیلتی به دلیل نفوذپذیری کمتر، ممکن است دهه‌ها برای زهکشی و تراکم کامل زمان نیاز داشته باشند. این تراکم حتی با تعادل در میزان برداشت و تغذیه آب زیرزمینی در آبخوان نیز ممکن است ادامه یابد. مناطق با پتانسیل بالای فرونشست شامل نهشته‌های جوان تحکیم نیافته، رسوبات آواری نیمه تحکیم یافته با تخلخل بالا، و آبخوان‌های بسته یا نیمه بسته ماسه‌ای یا شنی همراه با میان لایه‌های رسی هستند. این مناطق معمولاً در زیر نهشته‌های آبرفتی، دریاچه‌ای یا نهشته‌های دریایی کم عمق قرار دارند. به‌طورکلی برای وقوع پدیده فرونشست ناشی از افت تراز آب زیرزمینی، دو شرط وجود خاک مستعد فرونشست با ضخامت کافی و کاهش تراز آب زیرزمینی به صورت هم‌زمان موردنیاز است (سرباز و آقامیری، ۱۴۰۲).

فرونشست زمین پدیده‌ای پیچیده است که تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی متعددی قرار دارد و در دهه‌های گذشته با استفاده از رویکردهای متنوع به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. Galloway و همکاران (۱۹۹۹) از جمله پیشگامانی هستند که به طور سیستماتیک فرونشست ناشی از برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی را در ایالات متحده، به ویژه در دره مرکزی کالیفرنیا و منطقه هوستون-گالوستون در تگزاس، مستند کرده‌اند. مطالعات بعدی توسط xue و همکاران (۲۰۰۵) بر ماهیت گسترده این مشکل تأکید کرد و بیش از ۱۵۰ شهر بزرگ در سراسر جهان را تحت تأثیر فرونشست زمین شناسایی کرد.

در دهه‌های اخیر، افت تراز آب زیرزمینی بر اثر پمپاژ و برداشت، نفوذناپذیر کردن سطوح شهری، انحراف رواناب‌های سطحی یا جریان آب زیرزمینی و اجرای سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری مشکلات و آسیب‌های فراوانی را در بسیاری از کشورهای جهان از جمله مکزیک، استرالیا، کلمبیا، چین، آمریکا، تایلند، هند، ژاپن، ایران، ایتالیا، هلند ، ونزوئلا ، مصر، عربستان سعودی، انگلستان، فرانسه، فلسطین، لهستان ایجاد نموده است. به‌عنوان‌مثال بررسی‌ها در ایالات متحده نشان داده‌اند که فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی باعث آسیب‌های جدی به زیرساخت‌های شهری در ایالت‌هایی مانند کالیفرنیا و تگزاس شده است. از طرفی راهکارهای به‌کار رفته برای جلوگیری از تداوم فرونشست زمین در این مناطق عمدتا شامل مدیریت منابع آب و محدود کردن و کنترل برداشت از آب‌های زیرزمینی و همچنین هدایت آب‌های سطحی به سمت آبخوان‌ها می‌باشند (سرباز و آقامیری، ۱۴۰۲). برای نمونه Herrera و همکاران (۲۰۲۱) با تحلیل فرونشست در سطح جهانی تأثیرات این پدیده را بر امنیت محیط‌زیستی و شهری در کشورهای مختلف بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که کنترل منابع آب زیرزمینی برای کاهش خطر فرونشست ضروری است.

مطالعه فرونشست زمین به دلیل چندگانگی عوامل تأثیرگذار، از جمله تغییرات هیدرولوژیکی، نوع خاک و فعالیت‌های انسانی، بسیار چالش‌برانگیز است. در بسیاری از مناطق شهری که میزان برداشت آب از منابع زیرزمینی زیاد است، بررسی دقیق فرونشست به دلیل عدم دسترسی به داده‌های میدانی جامع و نیاز به مدل‌سازی پیچیده سختی‌های زیادی را به دنبال دارد. روش‌های آزمایشگاهی که معمولاً در مقیاس کوچک انجام می‌شوند، توانایی بررسی جزئیات رفتار مکانیکی خاک را دارند؛ اما این روش‌ها به دلیل محدودیت‌های مقیاسی و انتقال نتایج به شرایط واقعی، دقت کافی در پیش‌بینی گسترده پدیده فرونشست را ندارند. به‌عنوان‌مثال Abidin و همکاران (۲۰۰۸) در مطالعه ای در جاکارتا از داده‌های GPS برای تأیید مدل‌های آزمایشگاهی استفاده کردند و نشان دادند که هرچند این روش‌ها می‌توانند به پیش‌بینی فرونشست کمک کنند اما برای برآورد دقیق‌تر به داده‌های میدانی بیشتری نیاز است (Abidin و همکاران، ۲۰۰۸). از سوی دیگر، مدل‌سازی‌های عددی به‌ویژه روش اجزای محدود[1] ابزار قدرتمندی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی فرونشست در مقیاس‌های بزرگ‌تر و تحت شرایط پیچیده‌تر هستند (Zhu و همکاران، ۲۰۲۰).

در سال ۲۰۲۰ در پژوهشی با استفاده از مدل اجزای محدود، تأثیر فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک چین را بررسی کردند و نشان دادند که مدل‌های عددی در پیش‌بینی رفتار خاک تحت شرایط فرونشست عملکرد بسیار بهتری دارند. بااین‌حال یکی از چالش‌های اصلی در مدل‌سازی‌های عددی، کالیبراسیون دقیق مدل‌ها بر اساس داده‌های تجربی است. که با مقایسه نتایج آزمایش‌های فشار خاک و

شبیه‌سازی‌های عددی آن، نشان داده شد که مدل‌های عددی می‌توانند به پیش‌بینی دقیق‌تر فرونشست کمک کنند، اما همواره به داده‌های آزمایشگاهی برای کالیبراسیون نیاز است (Shang و همکاران، ۲۰۲۱).

همچنین علاوه بر مدل‌سازی‌های عددی، استفاده از داده‌های اینترفرومتری و تصاویر ماهواره‌ای به عنوان یک ابزار کمکی برای بررسی و پیش‌بینی فرونشست مورد توجه قرار گرفته است (Chaussard و همکاران، ۲۰۱۳). در سال‌های اخیر در بسیاری از کشورهای دنیا از داده‌های راداری برای مطالعه فرونشست استفاده شده است. در مکزیکوسیتی نشان دادند این فناوری می‌تواند به شناسایی مناطق مستعد فرونشست کمک کند. همچنین، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در مکزیکوسیتی نشان دادند فرونشست ناشی از برداشت منابع آب زیرزمینی می‌تواند به‌صورت دقیق با این روش شناسایی و پایش شود(López-Quiroz و همکاران، ۲۰۰۹).

فرونشست زمین ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، پدیده‌ای جهانی است و بیش از ۱۵۰ شهر بزرگ در سراسر جهان را تحت تاثیر گسترده قرار داده است(Hu و همکاران، ۲۰۰۴). خطرات زمین‌شناسی ناشی از فرونشست زمین به دلیل پمپاژ بیش از حد آب‌های زیرزمینی در شهرهایی مانند جاکارتا و سمارانگ در اندونزی (Chaussard و همکاران، ۲۰۱۳)، ونیز در ایتالیا (Teatini و همکاران، ۲۰۱۲) ، مکزیکوسیتی در مکزیک (Osmanoğlu و همکاران، ۲۰۱۱؛ Yan و همکاران، ۲۰۱۲؛ Chaussard و همکاران، ۲۰۱۳)، شانگهای در چین (Hu و همکاران، ۲۰۰۴)، پکن در چین (Ng و همکاران، ۲۰۱۲) تیانجین در چین (Lixin و همکاران، ۲۰۱۱)، دره آنتلوپ در کالیفرنیای ایالات متحده (Galloway و همکاران، ۱۹۹۸)، هیوستون-گالوستون در تگزاس ایالات متحده (Gabrysch، ۱۹۷۴) دره سانتا کلارا در کالیفرنیای ایالات متحده (Poland و Ireland، ۱۹۸۸)، بانکوک در تایلند (Phien-wej و همکاران، ۲۰۰۶) و دره کویته در پاکستان (Khan و همکاران، ۲۰۱۳) گزارش شده است. در ایران نیز این پدیده در رفسنجان (Rahnama و Moafi، ۲۰۰۹؛ Mousavi و همکاران، ۲۰۰۱) مهیار، نیشابور و کاشمر (لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۵ و لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۶ و لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۹) و مشهد (Motagh و همکاران، ۲۰۰۷) گزارش شده است. پیامدهای شدید محیط‌زیستی و اقتصادی ناشی از توزیع جهانی فرونشست زمین نشان می‌دهد که این پدیده نیازمند تحقیقات و انتقال فناوری در سطح بین‌المللی است (Hu و همکاران، ۲۰۰۴). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که در اثر برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و کاهش سطح آبخوان‌ها، بخش‌های وسیعی از دشت اصفهان با نرخ‌های قابل توجهی از فرونشست زمین مواجه هستند که این موضوع تهدیدی جدی برای زیرساخت‌های شهری و کشاورزی منطقه محسوب می‌شود.

۱- ادبیات موضوع

پایش و مدل‌سازی فرونشست زمین در ایران و جهان

Motagh و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از فناوری InSAR به پایش فرونشست در دشت مشهد پرداختند و نرخ‌های قابل توجهی از تغییر شکل زمین را که ناشی از برداشت مداوم آب زیرزمینی بود، شناسایی کردند. به طور مشابه لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۵ و لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۶ و لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۹) مطالعات هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناسی گسترده‌ای را در نیشابور، مهیار و کاشمر انجام دادند و رسوبات آبرفتی جوان و غیرمتراکم همراه با افت شدید سطح آب زیرزمینی را به عنوان عوامل اصلی وقوع فرونشست معرفی کردند. یافته‌های آن‌ها تأکید داشت که هم‌زمانی لایه‌های خاک فشرده‌پذیر با ضخامت کافی و افت قابل توجه سطح آب زیرزمینی برای آغاز فرونشست زمین در این مناطق ضروری است.

Rahnama و Moafi (۲۰۰۹) و Mousavi و همکاران (۲۰۰۱) فرونشست قابل توجهی را در رفسنجان گزارش کردند و تغییر شکل زمین را به برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی در مناطق کشاورزی با تقاضای بالای آب نسبت دادند؛ امری که منجر به آسیب به زیرساخت‌ها و کاهش بهره‌وری کشاورزی شده است. این مشاهدات با یافته‌های جهانی Galloway و همکاران (۱۹۹۸) و Hu و همکاران (۲۰۰۴) همسو است که بر ماهیت تدریجی و غیرقابل بازگشت فرونشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی و پیامدهای اقتصادی-اجتماعی و محیط‌زیستی آن تأکید دارند.

مطالعات آزمایشگاهی

اگرچه مطالعات آزمایشگاهی در ایران نسبتاً محدود بوده‌اند، اما برای درک رفتار مکانیکی دقیق خاک‌های رسی تحت شرایط کاهش آب زیرزمینی اهمیت دارند. این مطالعات نشان می‌دهند که کاهش فشار آب منفذی باعث افزایش تنش مؤثر در خاک شده و منجر به تراکم غیرالاستیک، کاهش ضخامت لایه‌ها و در نتیجه فرونشست سطحی در بازه‌های زمانی طولانی می‌شود. نرخ زهکشی متفاوت در رسوبات دانه درشت و دانه ریز، الگوهای نشست پیچیده‌ای ایجاد می‌کند؛ به‌طوری‌که رسوبات دانه درشت بلافاصله پس از برداشت آب نشست می‌کنند، اما لایه‌های رسی و سیلتی به دلیل نفوذپذیری پایین ممکن است دهه‌ها برای زهکشی و تحکیم کامل زمان نیاز داشته باشند.

کاربردهای InSAR و سنجش از دور

Abidin و همکاران (۲۰۰۸) در مطالعه‌ای در جاکارتا با استفاده از پایش GPS و کالیبراسیون داده‌های آزمایشگاهی، دقت پیش‌بینی فرونشست را بهبود دادند و ضرورت ترکیب آزمایش‌های آزمایشگاهی با مدل‌های عددی را برای افزایش

دقت نشان دادند؛ رویکردی که برای چالش‌های مشابه در ایران نیز قابل استفاده است.

رویکردهای مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی عددی با استفاده از روش اجزای محدود به ابزاری اساسی برای پیش‌بینی فرونشست تحت سناریوهای مختلف زمین‌شناسی و برداشت تبدیل شده است Zhu و همکاران (2020) و Shang و همکاران (2021) اثربخشی مدل‌های هیدرو-مکانیکی کوپل‌شده را در پیش‌بینی فرونشست در مناطق خشک چین نشان دادند و تأکید کردند که کالیبراسیون دقیق با داده‌های آزمایشگاهی و میدانی برای نتایج قابل اعتماد ضروری است. این مدل‌ها ساختار لایه‌ای سفره‌های آب، رفتار غیرخطی خاک و اثرات نشست تدریجی و پیوسته خاک وابسته به زمان را در نظر می‌گیرند که برای شرایط ایران با سفره‌ها و آکیتاردهای ضخیم و چندلایه نیز مرتبط است.

در ایران، مدل‌سازی عددی پتانسیل بالایی برای شبیه‌سازی فرونشست در شهرهایی با چالش‌های شدید آب زیرزمینی مانند مشهد، تهران و رفسنجان دارد. با این حال، دستیابی به دقت بالا در پیش‌بینی نیازمند پایش میدانی جامع و تعیین دقیق ویژگی‌های خاک است.

استفاده از InSAR و پایش ماهواره‌ای به طور قابل توجهی درک الگوهای فرونشست را در ایران و جهان ارتقا داده است López-Quiroz و همکاران، (۲۰۰۹) و Chaussard و همکاران (۲۰۱۳) کارایی InSAR را در پایش فرونشست با وضوح بالا نشان دادند که قادر به ثبت تغییر شکل‌های مکانی و زمانی زمین است و برای شناسایی مناطق پرخطر جهت برنامه‌ریزی کاهش ریسک حیاتی است. در ایران، Motagh و همکاران (۲۰۰۷) با موفقیت از InSAR برای پایش توزیع مکانی فرونشست در مشهد استفاده کردند و قابلیت این روش را در مناطقی با داده‌های زمینی محدود نشان دادند.

شکاف‌های پژوهشی و نیاز به رویکردهای یکپارچه

با وجود پیشرفت در پایش و مدل‌سازی، چالش‌هایی در پیش‌بینی دقیق فرونشست به دلیل محدودیت داده‌های میدانی بلندمدت، پیچیدگی شرایط هیدروژئولوژیکی و نیاز به شناسایی دقیق خاک و سفره‌های آب وجود دارد. ادغام آزمایش‌های آزمایشگاهی، شبیه‌سازی‌های عددی پیشرفته و پایش مستمر InSAR مسیر امیدوارکننده‌ای برای افزایش قابلیت اطمینان چارچوب‌های پیش‌بینی فرونشست در ایران فراهم می‌کند.

علاوه‌براین فقدان یک چارچوب جامع و یکپارچه مدیریت فرونشست در ایران، نیاز به مطالعات نظام‌مند را که مدیریت منابع آب زیرزمینی، برنامه‌ریزی کاربری زمین و ارزیابی‌های ژئوتکنیکی را به هم پیوند دهد، برجسته می‌کند تا بتوان به طور مؤثر پیامدهای اقتصادی-اجتماعی فرونشست را کاهش داد. رویکردی چند رشته‌ای که نقاط قوت آزمایشگاهی، عددی و سنجش از دور را ترکیب کند، می‌تواند به مدیریت پایدار منابع آب و زمین در مناطق مستعد فرونشست کشور کمک شایانی نماید.

به‌طورکلی ادبیات اخیر نشان می‌دهد که ترکیب تکنیک‌های پیشرفته پایش با رویکردهای آزمایشگاهی و عددی می‌تواند به طور قابل توجهی درک مکانیسم‌های فرونشست زمین را بهبود بخشد، قابلیت‌های پیش‌بینی را افزایش دهد و از استراتژی‌های مدیریت پایدار آب و زمین در مناطق مستعد فرونشست پشتیبانی کند.

لذا این مقاله مروری با هدف بررسی روش‌های آزمایشگاهی و عددی در زمینه مدل‌سازی فرونشست زمین به تحقیقات صورت گرفته در کشورهای مختلف دنیا به منظور شناخت وضعیت فعلی مطالعات و چالش‌های موجود و ارائه پیشنهادهایی برای مطالعات آتی پرداخته است. در این مقاله، مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی در زمینه فرونشست بررسی شده و به مزایا، معایب و چالش‌های هر کدام پرداخته شده و تلاش شده در این بررسی‌ها ضمن شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی موجود، راهکارهایی برای بهبود روش‌های مدل‌سازی فرونشست ارائه شود.

۲- مدل‌سازی آزمایشگاهی و مطالعات صحرایی

آزمایش‌های شبیه‌سازی فشار مخزن یکی از روش‌های اساسی برای بررسی تأثیرات برداشت منابع زیرزمینی (مانند آب، نفت یا گاز) بر فرونشست زمین است. این روش‌ها معمولاً در محیط آزمایشگاهی شبیه‌سازی می‌شوند تا تغییرات فشار مخازن زیرزمینی و تأثیر آن بر نشست سطح زمین در مقیاس‌های کوچک‌تر مطالعه شود.

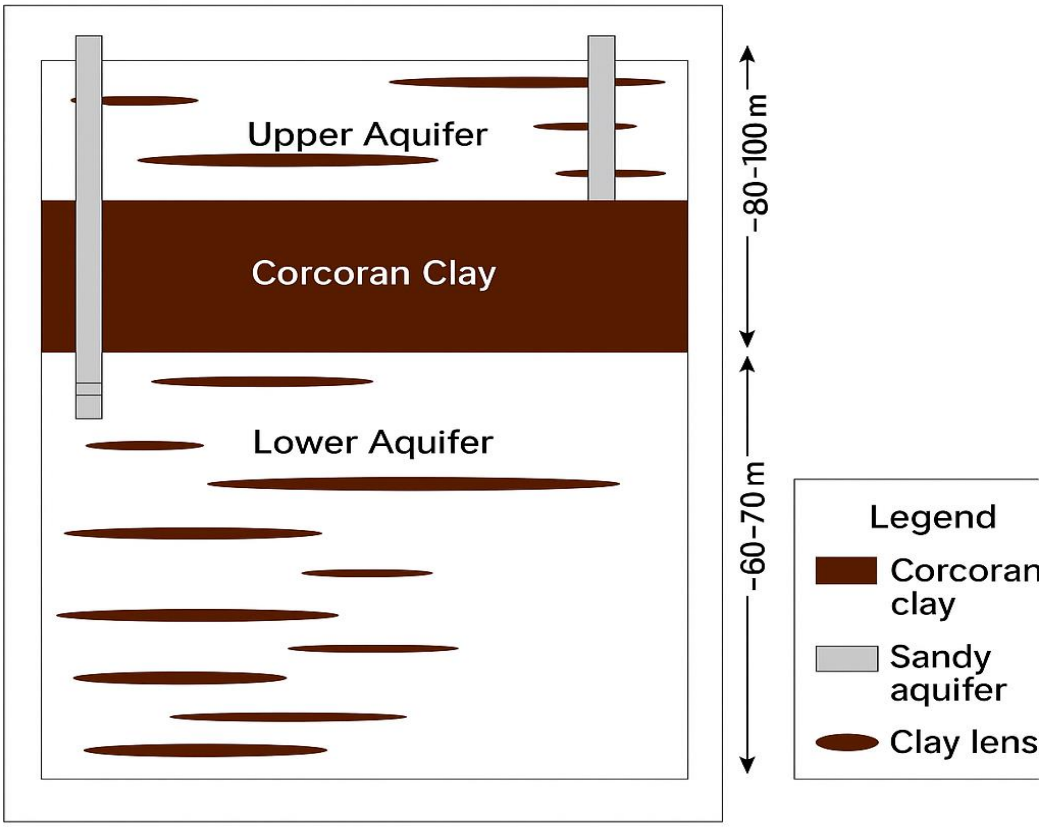
Poland و Ireland (۱۹۸۸) یکی از قدیمی‌ترین و جامع‌ترین مطالعات در زمینه فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی در دره سن‌جواکین کالیفرنیا را انجام دادند. آن‌ها از مخازن مصنوعی و سنسورهای فشار برای شبیه‌سازی کاهش سطح آب زیرزمینی استفاده کردند. نتایج نشان داد که هر ۱۰ متر کاهش سطح آب زیرزمینی منجر به ۱٫۵ متر نشست زمین می‌شود (Poland و Ireland، ۱۹۸۸).

Li و Song (۲۰۲۰) فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی در مناطق ساحلی چین را بررسی کردند. آن‌ها از مخازن آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی کاهش فشار در سفره‌های آبی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد نشست زمین با نرخ برداشت آب رابطه خطی دارد. اما پس از رسیدن به نقطه بحرانی، نشست به شکل نمایی افزایش می‌یابد (Li و Song، ۲۰۲۰).

Galloway و همکاران (۱۹۹۸) به بررسی کاهش فشار مخازن زیرزمینی و تأثیر آن بر فرونشست زمین در کالیفرنیا پرداختند. مقطع عرضی مورد استفاده در مطالعه در شکل

(۱) نشان داده شده است. آن‌ها مشاهده کردند کاهش فشار در مخازن زیرزمینی ناشی از برداشت منابع آبی، باعث نشست سالانه تا ۳۰ سانتی‌متر در برخی مناطق می‌شود.

در این مطالعه از ابزارهای دقیق هیدرولیکی برای اندازه‌گیری نشست استفاده شد (Galloway و همکاران، ۱۹۹۸).

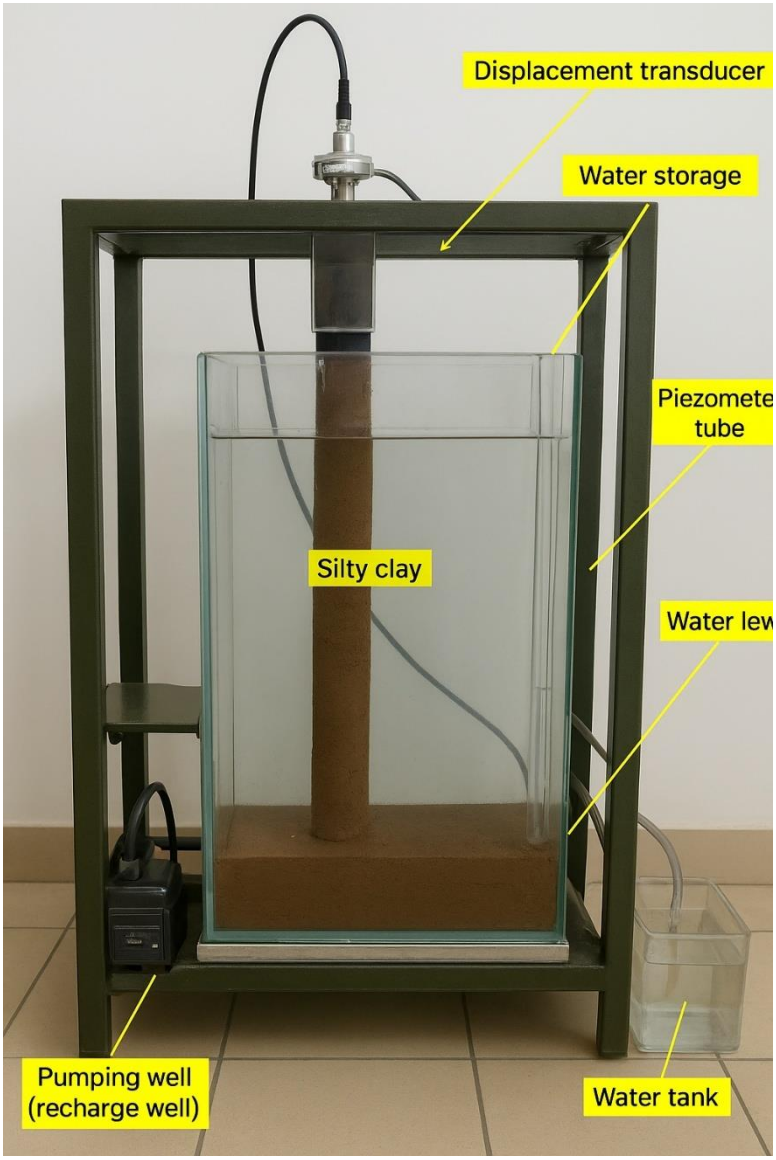


شکل ۱- مقطع عرضی ژئولوژیک مطالعه (Galloway و همکاران، ۱۹۹۸).

Cao و همکاران (۲۰۲۰) یک آزمایش مدل‌سازی فیزیکی برای شبیه‌سازی فرآیندهای استخراج و تغذیه آب‌های زیرزمینی انجام دادند (شکل ۲). هدف اصلی این آزمایش، بررسی ویژگی‌های تغییر شکل خاک و تغییرات فشار آب منفذی در لایه‌های مختلف خاک بود. نتایج آزمایش به بررسی مکانیسم فرونشست زمین و تأثیر حالت‌های مختلف پمپاژ بر آن پرداخت. حالت‌های پمپاژ مورد بررسی شامل پمپاژ تک چاه، پمپاژ و شارژ مجدد تک چاه، و پمپاژ و شارژ مجدد دو چاه بودند (Cao و همکاران، ۲۰۲۰).

نتایج نشان داد که لایه‌های ماسه و رس رفتار متفاوتی در برابر تغییرات فشار آب منفذی و تغییر شکل از خود نشان می‌دهند. در لایه ماسه، فشار آب منفذی در حین پمپاژ کاهش یافته و با توقف پمپاژ افزایش می‌یابد. در مقابل، در لایه رس، فشار آب منفذی ابتدا به سرعت افزایش یافته، سپس در حین پمپاژ کاهش یافته و پس از توقف پمپاژ دوباره افزایش می‌یابد. این تغییرات فشار آب منفذی در لایه رس با اثر ماندل مطابقت داشت و به فاصله از لایه پمپ شده وابسته بود. هرچه این فاصله بیشتر بود، اثر ماندل نیز بیشتر مشهود بود. نتایج کلی آزمایش نشان داد هر سه حالت پمپاژ می‌توانند فرونشست زمین را کاهش دهند، اما حالت پمپاژ و شارژ و تزریق دو چاهی مؤثرتر از دو حالت دیگر بود. در این حالت، نرخ افزایش نشست کوچکتر شده و به تدریج به حالت پایدار رسید. به‌طورکلی این سه حالت پمپاژ می‌توانستند به طور مؤثر فرونشست زمین را کنترل کنند (He و همکاران، ۲۰۲۰).

طبق مطالعه Modoni و همکاران (۲۰۱۳) ابزارهای تحلیل فضایی مانند GIS برای ترسیم الگوهای فرونشست، شناسایی مناطق در معرض خطر و همبستگی نقاط بحرانی فرونشست با مناطق برداشت شدید آب زیرزمینی مؤثر هستند (Modoni و همکاران، ۲۰۱۳). مطالعه وی و همکاران در سال ۲۰۱۷نشان می‌دهد رابطه‌ای غیرخطی بین برداشت آب زیرزمینی و فرونشست وجود دارد که تحت تأثیر عوامل مانند ناهمگنی خاک قرار دارد. تزریق مصنوعی ممکن است تا حدی بتواند فرونشست را معکوس کند، اما روند آن به ویژگی‌های خاک بستگی دارد (Wei و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل۲- شماتیک مدل‌سازی آزمایشگاهی (Cao و همکاران، ۲۰۲۰)

مداخلات مهندسی مانند دیوارهای آب‌بند می‌توانند جریان آب زیرزمینی را در طول فعالیت‌های ساختمانی کنترل کنند و به این ترتیب، فرونشست زمین را کاهش دهند. فرونشست زمین که ناشی از برداشت بیش از حد آب از منابع زیرزمینی است، با استفاده از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)[۳] قابل ارزیابی است. این مدل‌ها کمک می‌کنند تا تأثیرات برداشت آب و تزریق مصنوعی منابع زیرزمینی بر فرونشست زمین بررسی شود و نقش عواملی مانند نفوذپذیری لایه‌های زمین نیز مورد توجه قرار گیرد. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد فرونشست زمین ناشی از برداشت بیش از حد آب زیرزمینی، یک مسئله پیچیده است و برای کاهش آن نیاز به رویکردهای چند رشته‌ای و جامع وجود دارد. برخی از یافته‌های کلیدی این پژوهش‌ها عبارتند از:

- برداشت بیش از حد آب زیرزمینی باعث فشرده شدن غیرقابل بازگشت لایه‌های خاک می‌شود.
- ابزارهای تحلیل فضایی برای نظارت و پیش‌بینی مناطق در معرض خطر فرونشست بسیار حیاتی هستند.
- کنترل رابطه غیرخطی بین میزان برداشت آب و فرونشست زمین، نیازمند استراتژی‌های مدیریتی دقیق و حساب شده است.
- راه‌حل‌های مهندسی مانند دیوارهای آب‌بند می‌توانند به کاهش فرونشست کمک کنند.
- مدل‌های عددی پیشرفته مانند CFD درک بهتری از رفتار منابع آب زیرزمینی تحت شرایط برداشت آب ارائه می‌دهند.

پژوهش‌های آینده باید بر ادغام این یافته‌ها در روش‌های مدیریت پایدار منابع آب متمرکز شوند تا بین نیازهای آبی و اقدامات حفاظتی محیط‌زیست تعادل ایجاد شود. این کار

از آسیب‌های بلند مدت ناشی از فرونشست زمین جلوگیری خواهد کرد. مطالعه‌ای توسط Cigna و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی پایش نشست زمین و خطرات زمین‌شناختی مرتبط با آن در شهر مورلیا، مکزیک، پرداخته است. این پژوهش با استفاده از فناوری تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر هوش مصنوعی (InSAR) انجام شد و یکی از چالش‌های مهم محیط‌زیستی در مناطق شهری را بررسی کرد.

شهر مورلیا، مرکز ایالت میچوآکان در مکزیک، به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. این شهر با جمعیتی نزدیک به ۸۰۰,۰۰۰ نفر، در دره‌ای با رسوبات آبرفتی قرار دارد و از دهه ۱۹۸۰ با مشکل فرونشست زمین مواجه بوده است. دلیل اصلی این پدیده، برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی شناسایی شده است. پژوهشگران در این مطالعه از تکنیک پیشرفته‌ی InSAR استفاده کردند تا تغییرات سطح زمین را با دقت بالا اندازه‌گیری کنند. نتایج نشان داد استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی عامل اصلی فرونشست در این منطقه است. همچنین، رابطه مستقیمی بین ضخامت رسوبات کواترنری و میزان فرونشست زمین مشاهده شد (Cigna و همکاران، ۲۰۱۲). این مطالعه بر اهمیت مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی و لزوم نظارت دقیق بر تغییرات زمین‌شناختی در مناطق شهری تأکید می‌کند. Bakr (۲۰۱۵) از روش‌های پیشرفته برای مطالعه فرونشست زمین در شهر جاکارتا، اندونزی، استفاده کرد. در این پژوهش، سال ۱۹۶۵ به عنوان سال مرجع در نظر گرفته شد، چرا که در آن زمان به دلیل برداشت بسیار محدود آب‌های زیرزمینی، نشست قابل توجهی برای زمین وجود نداشت. مدل ارائه شده بر اساس داده‌های فرونشست زمین در بازه زمانی ۱۹۷۴ تا ۲۰۱۰، با استفاده از فرمول‌بندی MAP کالیبره شد و تطابق خوبی بین مقادیر نشست زمین اندازه‌گیری شده و نتایج شبیه‌سازی‌شده ایجاد کرد. این مدل سپس برای پیش‌بینی فرونشست زمین در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۲۵، ۲۰۳۰ و ۲۱۰۰ استفاده شد. نتایج نشان داد در منطقه فشردگی ناشی از نشست ثانویه نقش بسیار مهمی در محاسبه نشست زمین دارد. به‌طوری‌که در مطالعه موردی انجام شده، با استفاده از پارامترهای کالیبره شده، خزش حدود ۹۹٪ از کل نشست زمین را تا سال ۲۱۰۰ تشکیل می‌دهد. همچنین، نتایج نشان داد ترکیب فرآیندهای تحکیم و خزش شرایط مطلوبیایجاد کرده‌اند که در آن، تحکیم توانسته است نشست کلی زمین را در مقایسه با حالت لایه‌های کاملاً زهکشی شده (که تنها تحکیم رخ می‌دهد) تا ۶۶٪ کاهش دهد (Bakr، ۲۰۱۵). این یافته‌ها بر اهمیت در نظر گرفتن هم‌زمان فرآیندهای تحکیم و خزش در مطالعات فرونشست زمین تأکید می‌کنند و نشان می‌دهند که مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی و در نظر گرفتن این عوامل می‌تواند به کاهش قابل توجه نشست زمین در مناطق شهری مانند جاکارتا کمک کند. دو مطالعه اخیر بینش ارزشمندی را در مورد علل و پیامدهای فرونشست زمین ارائه می‌دهند، اما آنها در تمرکز جغرافیایی، تأکید روش شناختی، و پیامدهای سیاست‌گذاری متفاوت هستند. مطالعه مورلیا بیشتر فنی است و بر پایش و ارزیابی خطر متمرکز است، درحالی‌که مطالعه جاکارتا تأکید بیشتری بر نقش مدیریت آب‌های زیرزمینی در کاهش فرونشست در یک محیط دلتای آسیب‌پذیر دارد. اما این مطالعات ماهیت جهانی فرونشست زمین و نیاز به راهحل‌های مناسب بر اساس زمینه‌های منطقه‌ای را برجسته می‌کنند. دینامیک طبیعی و انسانی آب‌های زیرزمینی در سفره‌های بیش از حد خشک، نقش مهمی در پدیده فرونشست ایفا می‌کند. منطقه مورد مطالعه در پژوهش Othman و Abotalib (۲۰۱۹)، منطقه القاسم در عربستان سعودی است که در طول دو دهه گذشته شاهد رخدادهای متعدد تغییر شکل زمین (فرونشست زمین و شکاف‌ها) بوده است. برای شناسایی مناطق متأثر از تغییر شکل زمین و درک بهتر نقش دینامیک آب زیرزمینی ناشی از فعالیت‌های انسانی در شکل‌گیری این ویژگی‌ها، یک مطالعه یکپارچه سنجش از دور و مشخصات هیدروژئولوژیک به‌کار گرفته شده است. این رویکرد مطالعاتی شامل چهار مرحله زیر است:

۱. انجام بررسی‌های میدانی برای جمع‌آوری مشاهدات و اعتبارسنجی ویژگی‌های تغییر شکل گزارش‌شده، ۲. استفاده از یک همبستگی فضایی در محیط GIS برای تحلیل مکان‌های آسیب‌دیده گزارش‌شده، همراه با ویژگی‌های زمین‌شناسی سطحی و زیرسطحی و داده‌های استخراج آب‌های زیرزمینی، ۳. استخراج نرخ‌های فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر روش SBAS و به‌کارگیری داده‌های ماهواره‌ای ENVISAT، ۴. ارتباط مکانی و زمانی این نرخ‌های فرونشست با داده‌های تغییرات جرمی ماهواره‌ای GRACE.

نتایج نشان می‌دهد نرخ‌های فرونشست بالای ۵ تا ۱۲ میلی‌متر در سال در امتداد جهت شمال غربی-جنوب شرقی، با مناطقی که کاهش قابل توجه سطح آب‌های زیرزمینی فسیلی (تا ۱۵۰ متر) و کاهش نرخ تغییرات جرمی (۱۰.۱ ± ۱.۲ میلی‌متر آب در سال) را تجربه کرده‌اند، تطابق دارد. یافته‌های این مطالعه توجه را به دینامیک آب‌های زیرزمینی ناشی از فعالیت‌های انسانی در شرایط بیش از حد خشک جلب می‌کند (Othman و Abotalib، ۲۰۱۹).

Nguyen و همکاران (۲۰۲۲) نشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی در ویتنام را بررسی کردند. آنها از ۱۲ سال داده سری زمانی InSAR و ۲۲ سال داده پیزومتریک استفاده کرده تا تکامل مکانی و زمانی فرونشست زمین و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در هانوی را ردیابی کنند. نتایج نشان می‌دهد فرونشست در مرکز هانوی کاهش یافته است، درحالی‌که مناطق حومه‌ای جنوبی و غربی (ها دونگ و منطقه هوآی دوک) در سال‌های اخیر به کانون‌های جدید فرونشست تبدیل شده‌اند. حداکثر نرخ فرونشست در این مناطق به ۵۰ میلی‌متر در سال می‌رسد و حداکثر نشست

تجمعی می‌تواند تا ۵۰۰ میلی‌متر باشد و حداکثر کاهش ذخیره آب زیرزمینی در طول ۲۲ سال حدود ۲۳ متر بوده است. یکی از یافته‌های جالب این مطالعه این است که مشکل فرونشست در هانوی در مقایسه با سایر شهرهای جنوب شرق آسیا نسبتاً خفیف است. این مقاومت در برابر فرونشست ممکن است ناشی از ضریب تحکیم کوچکتر و مهمتر از آن، فشار کمتر به منابع آبی و در نتیجه تقاضای کمتر برای آب زیرزمینی باشد.

مطالعه Nguyen و همکاران (۲۰۲۲) نشان می‌دهد در مواردی که داده‌های زمین‌یابی مطمئن در دسترس نیستند، سری‌های زمانی فرونشست حاصل از ادغام داده‌های مختلف راداری (SAR) می‌توانند به همان اندازه دقیق و مفید باشند. این روش به‌ویژه برای تعیین ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی حوضه‌های آب‌زیرزمینی کاربرد دارد. علاوه‌براین در مواجهه با پدیده تأخیر هیدرودینامیکی، داده‌های تغییر شکل با دوره‌های زمانی طولانی‌تر، پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از فرونشست‌های آینده ارائه می‌دهند. چالش اصلی در تولید یک سری زمانی طولانی مدت تغییر شکل با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، نیاز به تطبیق ویژگی‌های داده‌های مختلف از هر SARاست. این تطبیق برای به‌حداکثر رساندن دقت تشخیص و پوشش فضایی ضروری است. در این مطالعه، نمونه‌ای از تنظیم تکنیک‌های پردازش داده‌ها ارائه شده است که به دستیابی به اهداف علمی نهایی کمک می‌کند (Nguyen و همکاران، ۲۰۲۲). این یافته‌ها نشان می‌دهند که ادغام داده‌های چند SAR و استفاده از روش‌های پردازشی پیشرفته می‌تواند ابزار قدرتمندی برای پایش و پیش‌بینی فرونشست زمین، به‌ویژه در مناطقی با داده‌های محدود، فراهم کند.

Wang و همکاران (۲۰۱۹) شهرستان دچنگ در استان شاندونگ چین به عنوان منطقه هدف تحقیق انتخاب شد. با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (BPNN) و روش جنگل تصادفی (RF)، تحلیل و پیش‌بینی فرونشست زمین منطقه‌ای با به‌کارگیری داده‌های پایش چند منبعی، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام شده است. تأثیر سطوح مختلف آب‌های زیرزمینی بر فرونشست زمین به‌صورت کمی با استفاده از الگوریتم‌های BPNN و RF بررسی شده است. همچنین، یک مدل پیش‌بینی برای فرونشست زمین در این منطقه توسعه داده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد فرونشست زمین در منطقه تحقیقاتی عمدتاً تحت تأثیر آب‌های زیرزمینی عمیق و کم‌عمق است. همچنین این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب فناوری‌های پیشرفته مانند SBAS-InSAR، GIS و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند ابزارهای مؤثری برای تحلیل و پیش‌بینی فرونشست زمین فراهم کند (Wang و همکاران، ۲۰۱۹).

مقاله مروری Wang و همکاران (۲۰۱۹) بر فرونشست زمین ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی در شهر شیان، چین ارائه می‌کند. با رشد جمعیت و توسعه اقتصادی در طول فرآیند شهرنشینی و به دلیل برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی شیان با خطرات جدی ناشی از فرونشست زمین مواجه شده است. براساس سوابق گذشته، توسعه فرونشست زمین در شیان را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد: ۱. مرحله مقدماتی (۱۹۵۹ تا ۱۹۷۱): آغاز فرونشست زمین، ۲. مرحله توسعه سریع (۱۹۷۲ تا ۱۹۹۰): افزایش قابل توجه نرخ فرونشست و ۳. مرحله توسعه آهسته (۱۹۹۱ تا زمان مطالعه): کاهش نسبی نرخ فرونشست. در دهه ۱۹۹۰، حجم برداشت سالانه آب‌های زیرزمینی در این منطقه به حداکثر مقدار خود، یعنی حدود ۱۳۸۸*۱۰^{۶} مترمکعب در سال رسید و نرخ فرونشست زمین نیز به اوج خود (حدود ۱۳۰ میلی‌متر در سال) افزایش یافت. با اعلام سیاست کنترل برداشت آب‌های زیرزمینی توسط شهرداری شیان در سال ۱۹۹۶، نرخ فرونشست زمین روند نزولی معناداری را نشان داد.

Wang و همکاران (۲۰۱۹) در این مطالعه ضمن پرداختن به روش‌های مختلف برای پیش‌بینی فرونشست زمین ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی، شامل ۱- رویکردهای ریاضی-آماری، ۲- رویکردهای عددی و ۳- رویکردهای هوش مصنوعی و بررسی مزایا و معایب این رویکردها، سه حوزه تحقیقاتی جدید در مورد فرونشست زمین در شیان را نیز بررسی کردند. این تحقیقات بر اهداف زیر متمرکز بودند: ۱. تجزیه و تحلیل رابطه بین فرونشست و شکاف‌های زمین، ۲. جستجوی تکنیک‌های نظارتی برای جمع‌آوری داده‌های دقیق‌تر و ۳. بررسی اثر خرد شدن ذرات ماسه تحت تنش‌های بالا بر توسعه فرونشست زمین. این مطالعه نشان داد که درک بهتر فرونشست زمین و عوامل مؤثر بر آن، به ویژه در مناطق شهری دارای رشد و گسترش سریع، برای مدیریت پایدار منابع و برنامه‌ریزی شهری ضروری است (Wang و همکاران، ۲۰۱۹).

تمامی این مقالات به‌طور مشترک نشان می‌دهند که برداشت منابع زیرزمینی و کاهش فشار در آبخوان نقش کلیدی در فرونشست زمین دارد. رابطه فشار و نشست در بیشتر این مقالات به‌طور خطی بیان شده است، اما در برخی موارد Li و Song (۲۰۲۰) مشاهده شد نشست پس از رسیدن به یک نقطه بحرانی، به صورت نمایی افزایش می‌یابد. این تحقیقات تأکید دارند که کنترل برداشت منابع زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق صنعتی و کشاورزی، ضروری است تا از نشست‌های شدید و غیرقابل بازگشت جلوگیری شود.

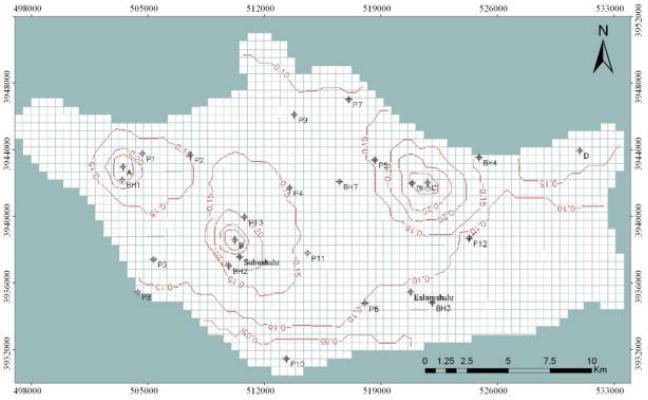
۳-مطالعات عددی

شبیه‌سازی‌های عددی به‌طور گسترده‌ای برای مطالعه فرونشست زمین ناشی از بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های

زیرزمینی در مناطق مختلف استفاده شده‌اند. این مطالعات اهمیت درک مکانیسم‌های فرونشست از طریق مدل‌سازی عددی را برجسته کرده و مشخص می‌کند چگونه استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی بر تراکم و تغییرشکل خاک تأثیر می‌گذارد. از سوی دیگر مطالعات عددی می‌تواند نقش تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی را به‌عنوان یک راه‌حل بالقوه برای کنترل فرونشست زمین شبیه‌سازی نماید و اثربخشی آن در افزایش سطح آب‌های زیرزمینی و کاهش فرونشست بیشتر مشخص کند(Wu و همکاران، ۲۰۰۹؛ Yuو Yung، ۲۰۱۵).

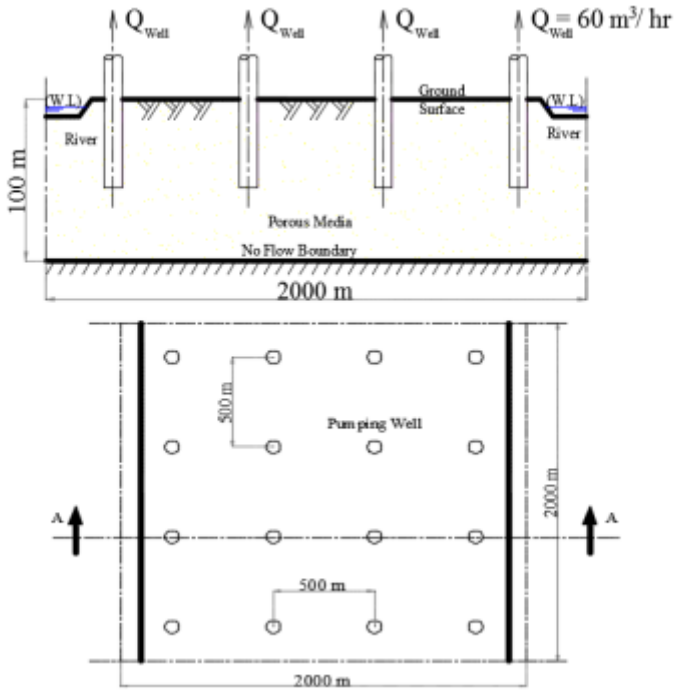
مدل‌سازی عددی با استفاده از روش‌های مختلفی مانند روش المان محدود و تفاضل محدود، قابلیت شبیه‌سازی دقیق پدیده‌های پیچیده را دارد. این روش‌ها به پژوهشگران اجازه می‌دهند تا تأثیرات غیرخطی استخراج آب‌های زیرزمینی را بر روی فرونشست زمین تحلیل کنند و نتایج حاصل از این مدل‌ها می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در زمینه منابع آب زیرزمینی کمک کند (Zu و Feng، ۲۰۱۱). مدل‌های جریان آب‌های زیرزمینی با پیش‌بینی تغییرات سطح آب و فشار آبخوان‌ها برای تخمین فرونشست زمین استفاده می‌شوند (Li و همکاران، ۲۰۲۵). استفاده از روش‌های المان محدود در مطالعات موردی همانند مطالعه دشت رفسنجان و مدل‌سازی عددی فرونشست زمین مرتبط با برداشت آب‌های زیرزمینی در مناطقی مانند حوضه فلورانس-پراتو-پیستویا در مرکز ایتالیا با موفقیت برای شبیه‌سازی الگوهای فرونشست به‌کار گرفته شده است. این مطالعات به‌طورکلی تأکید می‌کنند که شبیه‌سازی‌های عددی ابزارهای ضروری برای درک و کاهش فرونشست زمین ناشی از بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی هستند. با ادغام داده‌های تجربی با تکنیک‌های پیشرفته مدل‌سازی، پژوهشگران می‌توانند استراتژی‌های مؤثری برای مدیریت پایدار منابع آب توسعه دهند که از آسیب‌های بلند مدت محیط‌زیستی جلوگیری کرده و در عین حال دسترسی به منابع را برای نسل‌های آینده تضمین کند (Zu و Feng، ۲۰۱۱؛ Li و همکاران، ۲۰۲۵؛ Wu و همکاران، ۲۰۰۹؛ Yu و Yung، ۲۰۱۵). به عنوان‌مثال Rajabi (۲۰۱۸) با استفاده از مدل عددی PLAXIS و در نظر گرفتن تغییرات فشار آبخوان، داده‌های هیدرولوژیکی و ژئوتکنیکی، فرونشست زمین در برخی نقاط فلات قم، به‌ویژه دشت علی‌آباد، را ارزیابی نمود. نتایج این مطالعه نشان داد از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳، میانگین کاهش سطح آب زیرزمینی۳۵/ ۲۶متر و فرونشست مربوط به آن در مناطق مختلف دشت بین ۰ تا ۷۶ سانتی‌متر بوده است. همچنین آنها بیان کردند که فرونشست زمین به ویژگی‌های مصالح زمین‌شناسی بستگی داشته و درک رفتار واحدهای زمین‌شناسی مختلف و تأثیر آن‌ها بر فرونشست زمین برای مدیریت پایدار منابع آب و کاهش خطرات ناشی از این پدیده ضروری است (Rajabi، ۲۰۱۸). در مطالعه‌ای Lin و Song (۲۰۲۰) یک رویکرد نوآورانه برای بررسی فرونشست زمین ارائه شده است. در این روش،توزیع‌های تصادفی رخساره‌های آبی (ساختارهای زمین‌شناسی مرتبط با آب) با استفاده از شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی به روش المان محدود سه‌بعدی و شبیه‌سازی ژئومکانیکی ترکیب شده‌اند. این رویکرد یکپارچه در قالب یک چارچوب آماری برای تحلیل فرونشست زمین و حرکات افقی ناشی از برداشت آب زیرزمینی به‌کار گرفته شده است. این روش در دشت آبرفتی Chaobaiدر چین، منطقه‌ای به وسعت حدود ۱۱۰۰ کیلومتر مربع که شامل چاه‌های اصلی تأمین‌کننده آب پکن است، اعمال شد. از دهه ۱۹۶۰، پمپاژ بی‌رویه آب زیرزمینی در این منطقه باعث فرونشست بیش از ۱ متر و نرخ فرونشست تا ۷۰ میلی‌متر در سال شده است. در این پژوهش، از شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۱۰۰ نسل از رخساره‌های آبی استفاده شد تا تأثیر ساختار ناهمگن این رخساره‌ها بر میدان‌های جابه‌جایی زمین بررسی شود. نتایج مدل نشان داد ساختار ناهمگن رخساره‌های آبی در مخروط افکنه‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر الگوهای فرونشست زمین دارد. برای اعتبارسنجی این نتایج، فرونشست زمین با استفاده از تداخل‌سنجی پراکنده مداوم (InSAR) نیز اندازه‌گیری شد. این مطالعه بر اهمیت درک ساختار ناهمگن رخساره‌های آبی و تأثیر آن بر فرونشست زمین تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که این درک برای مدیریت پایدار منابع آب و پیش‌بینی دقیق‌تر تغییرات سطح زمین ضروری است (Zhu و همکاران، ۲۰۲۰). این پژوهش راه‌حلی جامع برای تحلیل فرونشست زمین ارائه می‌دهد که می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری‌ها در زمینه مدیریت منابع آب و کاهش خطرات ناشی از فرونشست کمک کند.

Mahmoudpour و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل‌سازی عددی، فرونشست زمین در دشت جنوب غربی تهران را بررسی و پیش‌بینی کردند. در طول ۲۸ سال (۱۹۸۴–۲۰۱۲)، سطح آب زیرزمینی در این منطقه ۱۱٫۶۵ متر کاهش یافته است. آنها برای مدل‌سازی فرونشست از نرم‌افزار PMWIN (نسخه ویندوزی MODFLOW) استفاده نمودند. مدل با استفاده از اندازه‌گیری‌های هد هیدرولیک و داده‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR) کالیبره شد به‌طوری‌که پارامترهای هیدروژئولوژیکی مدل به‌صورت تکرارشونده تنظیم شد تا اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده به حداقل برسد. آنها مشاهده کردند که نتایج شبیه‌سازی تطابق نسبتاً خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده واقعی دارند. همچنین پس از کالیبره‌سازی و ارزیابی مدل، آنها از این مدل برای پیش‌بینی فرونشست زمین تا پایان سال ۲۰۱۸ استفاده کردند. نتایج عددی نشان داد با فرض ثابت ماندن نرخ پمپاژ در آینده، فرونشست زمین در دشت جنوب غربی تهران تا سال ۲۰۱۸ به ۳۳ سانتی‌متر خواهد رسید (شکل ۳) (Mahmoudpour و همکاران، ۲۰۱۸).



شکل ۳- مدل‌سازی و پیش‌بینی فرونشست زمین ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی در دشت جنوب‌غربی تهران با استفاده از MODFLOW و داده‌های InSAR. Environmental Earth Sciences، ۷۷، ۳۹۸. (Mahmoudpour و همکاران، ۲۰۱۸).

Elhamid و همکاران (۲۰۲۲) از مدل MODFLOW برای ارزیابی تأثیر تغییرات سطح آب زیرزمینی و پارامترهای آبخوان، از جمله ضریب هدایت هیدرولیکی و ذخیره‌سازی ویژه، بر روی فرونشست زمین استفاده شد. در این مطالعه، جریان آب زیرزمینی با استفاده از حل تحلیلی مبتنی بر نظریه ترزاقی برای محاسبه تراکم سیستم آبخوان شبیه‌سازی شده است (شکل ۴).



شکل ٤-پلان و مقطع مطالعه موردی (Elhamid و همکاران، ۲۰۲۲)

نتایج نشان می‌دهد افزایش نرخ پمپاژ باعث افزایش فرونشست زمین می‌شود. بااین‌حال، تغییر در خواص آبخوان اثرات متفاوتی دارد: کاهش ضریب هدایت هیدرولیکی هم کاهش سطح آب زیرزمینی و هم فرونشست زمین را افزایش می‌دهد، درحالی‌که کاهش ذخیره‌سازی ویژه تنها باعث افزایش فرونشست زمین می‌شود و تأثیری بر کاهش سطح آب زیرزمینی ندارد. از سوی دیگر، تغییر تخلخل هیچ تأثیری بر کاهش سطح آب زیرزمینی یا فرونشست زمین ندارد. در این مطالعه، رابطه بین فرونشست زمین با نرخ برداشت آب (Q)، هدایت هیدرولیکی (K)، و ذخیره‌سازی ویژه (Ss) توسعه یافته که می‌تواند برای پیش‌بینی فرونشست زمین باتوجه‌به تغییرات آینده استفاده شود (Elhamid و همکاران، ۲۰۲۲).

۴-معایب و مزایای روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی

روش‌های آزمایشگاهی

مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس آزمایشگاهی محیطی کنترل شده فراهم می‌کند که در آن متغیرهایی مانند بار اعمالی، فشار منفذی، میزان رطوبت و شرایط مرزی را می‌توان با دقت تنظیم کرد. این امکان را به پژوهشگران می‌دهد تا رفتار خاک را تحت مسیرهای تنش خاص، افت سطح آب زیرزمینی و شرایط بارگذاری به طور مستقیم مشاهده و اندازه‌گیری کنند و داده‌هایی بسیار دقیق و قابل تکرار به دست آورند که برای درک مکانیک تحکیم و نشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی ضروری است (Poland و Ireland، ۱۹۸۸).

از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی، پارامترهای کلیدی خاک مانند فشار پیش‌تحکیم، شاخص‌های تراکم‌پذیری و رفتار تغییر تدریجی تحت شرایط مختلف تنش مؤثر با دقت شناسایی می‌شوند و بینش‌های تجربی ارزشمندی ارائه می‌دهند که اغلب در شرایط میدانی به‌سختی قابل دستیابی است. این مشاهدات به‌ویژه در تعیین تراکم‌پذیری و نفوذپذیری خاک‌های ریزدانه اهمیت دارند، زیرا این ویژگی‌ها به طور قابل توجهی بر نرخ و میزان فرونشست در شرایط افت سطح آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارند.

بااین‌حال روش‌های آزمایشگاهی ذاتاً با محدودیت مقیاس مواجه‌اند. آزمایش‌ها روی نمونه‌ها یا مدل‌های کوچک انجام می‌شوند که نمی‌توانند به طور کامل پیچیدگی چینه‌بندی، ناهمگنی و شرایط مرزی محیط واقعی را بازسازی کنند، به‌ویژه در مناطقی با سیستم‌های لایه‌ای آبرفت-آکیتارد یا ساختارهای زمین‌شناسی متغیر (Poland و Ireland، ۱۹۸۸). این محدودیت ممکن است هنگام تعمیم نتایج آزمایشگاهی به مقیاس میدانی منجر به اختلاف شود.

علاوه‌براین آزمایش‌های آزمایشگاهی می‌توانند پرهزینه و زمان‌بر باشند. آزمایش‌های بلندمدت، مانند شبیه‌سازی تحکیم آهسته در لایه‌های رسی با نفوذپذیری پایین تحت شرایط افت پایدار سطح آب، ممکن است ماه‌ها یا حتی سال‌ها طول بکشند تا پدیده‌های فشردگی و نشست ثانویه را به‌درستی ثبت کنند (Li و Song، ۲۰۲۰). نیاز به تجهیزات تخصصی، پایش دقیق و کنترل محیطی پایدار نیز پیچیدگی عملیاتی و هزینه را افزایش می‌دهد.

مدل‌سازی عددی

مدل‌های عددی، به‌ویژه روش اجزای محدود (FEM) ، ابزارهای قدرتمندی برای شبیه‌سازی رفتار خاک‌ها در سناریوهای پیچیده، بزرگ‌مقیاس و بلندمدت هستند که بازآفرینی آن‌ها در محیط آزمایشگاهی ممکن نیست. این مدل‌ها امکان تحلیل فرونشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی تحت شرایط هیدروژئولوژیکی مختلف، پروفیل‌های خاک ناهمگن و تاریخچه‌های بارگذاری متفاوت را فراهم می‌کنند و بینش‌هایی درباره الگوهای مکانی و زمانی تغییر شکل زمین در مناطق مورد مطالعه ارائه می‌دهند.

مدل‌سازی عددی امکان تحلیل سناریوهای مختلف را فراهم می‌کند و پژوهشگران می‌توانند اثر نرخ‌های مختلف برداشت، طرح‌های تغذیه مصنوعی یا بارهای سازه‌ای را بر فرونشست ارزیابی کنند. همچنین، این مدل‌ها امکان کوپل فرآیندهای هیدرو-مکانیکی را فراهم می‌کنند، به‌طوری‌که تغییرات توزیع فشار منفذی در سفره‌های آب به طور پویا با تغییر شکل خاک مرتبط می‌شود و درک جامعی از مکانیزم‌های فرونشست در شرایط میدانی به دست می‌دهد.

بااینحال، یکی از محدودیت‌های اصلی مدل‌های عددی، وابستگی زیاد آن‌ها به داده‌های ورودی و کالیبراسیون دقیق است (Rajabi، ۲۰۱۸؛ Elhamid و همکاران، ۲۰۲۲ و Mahmoudpour و همکاران، ۲۰۱۸). اعتبار پیش‌بینی‌های عددی به کیفیت کالیبراسیون با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و میدانی، از جمله ویژگی‌های خاک، سطح آب زیرزمینی و داده‌های مشاهده شده فرونشست بستگی دارد. کالیبراسیون ناکافی یا نادرست می‌تواند منجر به اختلاف قابل توجه بین پیش‌بینی مدل و رفتار واقعی میدان شود.

علاوه‌براین مدل‌های عددی برای امکان‌پذیری محاسباتی نیازمند فرضیات ساده‌کننده هستند، مانند فرض همگن و همسان بودن رفتار خاک یا قوانین رفتاری خطی-الاستیک یا الاستوپلاستیک، که ممکن است پیچیدگی‌های خاک‌های طبیعی را به طور کامل منعکس نکند (Rajabi، ۲۰۱۸). این فرضیات می‌توانند به‌ویژه در مناطق با شرایط زیرسطحی بسیار ناهمگن یا ناهمسان، عدم قطعیت‌هایی ایجاد کند.

نشست ناشی از برداشت نفت و گاز

نشست زمین ناشی از برداشت نفت و گاز یکی از مسائل مهم در میادین هیدروکربنی است که می‌تواند باعث آسیب به تجهیزات سطحی، خطوط لوله و تأسیسات صنعتی شود. برداشت نفت و گاز از مخازن زیرزمینی موجب کاهش فشار درون مخزن شده و تعادل تنش‌ها را به هم می‌زند، که این موضوع باعث تراکم و نشست در لایه‌های مخزنی و لایه‌های بالایی می‌شود (Galloway و همکاران، ۱۹۹۸).

روش‌های آزمایشگاهی در این زمینه به بررسی تراکم‌پذیری سنگ‌های مخزنی و رفتار خزش و تحکیم در شرایط کاهش فشار مخزن می‌پردازند. این آزمایش‌ها امکان شبیه‌سازی شرایط فشار بالا و بررسی تغییرات حجم و تراکم سنگ‌های مخزن در طول زمان را فراهم می‌کنند. بااین‌حال شبیه‌سازی دقیق شرایط فشار و دما در عمق زیاد و طولانی‌مدت بودن آزمایش‌ها، از چالش‌های این روش است.

مدل‌سازی عددی به عنوان ابزار اصلی در تحلیل نشست ناشی از برداشت نفت و گاز، امکان ارزیابی اثرات مختلف برداشت بر نشست سطح زمین را فراهم می‌کند. این مدل‌ها

با ترکیب داده‌های برداشت، فشار مخزن، خصوصیات مکانیکی سنگ و داده‌های زمین‌لرزه‌ای، امکان شبیه‌سازی نشست در میدان‌های نفتی و گازی و تحلیل سناریوهای مختلف بهره‌برداری را فراهم می‌نمایند. بااین‌حال نیاز به داده‌های دقیق از فشار مخزن، خصوصیات سنگ و شرایط مرزی دقیق برای کالیبراسیون از چالش‌های اصلی در این زمینه است (Galloway و همکاران، ۱۹۹۸).

رویکرد یکپارچه برای افزایش قابلیت اطمینان

در مجموع، روش‌های آزمایشگاهی مزیت مشاهده مستقیم و دقت بالای اندازه‌گیری در شرایط کنترل‌شده را دارند اما با محدودیت‌هایی مانند مقیاس، هزینه و زمان مواجه‌اند؛ درحالی‌که مدل‌های عددی امکان شبیه‌سازی سناریوهای پیچیده و بزرگ‌مقیاس را فراهم می‌کنند اما به داده‌های کالیبراسیون باکیفیت و فرضیات ساده‌کننده وابسته‌اند.

برای رفع این محدودیت‌ها، رویکردی یکپارچه که آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی را ترکیب کند توصیه می‌شود. آزمایش‌های آزمایشگاهی می‌توانند پارامترهای لازم و بینش‌های رفتاری مورد نیاز برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌های عددی را فراهم کنند و شبیه‌سازی‌های عددی نیز می‌توانند یافته‌های آزمایشگاهی را به سناریوهای واقعی، بزرگ‌مقیاس و بلندمدت تعمیم دهند که برای ارزیابی و برنامه‌ریزی کاهش فرونشست منطقه‌ای اهمیت دارد.

این روش ترکیبی به پژوهشگران و متخصصان اجازه می‌دهد تا دقت و قابلیت اطمینان داده‌های آزمایشگاهی را با مقیاس‌پذیری و توان پیش‌بینی مدل‌های عددی تلفیق کنند و دقت پیش‌بینی فرونشست را افزایش داده و از مدیریت مؤثر منابع آب زیرزمینی و راهبردهای کاهش فرونشست زمین حمایت نمایند.

۵- چالش‌ها و جهت‌گیری‌های آینده

در زمینه مدل‌سازی فرونشست زمین، هر دو روش آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی با چالش‌های متعددی مواجه هستند. مطالعات انجام شده تاکنون اطلاعات ارزشمندی درباره عوامل مؤثر بر نشست زمین و ارتباط آن با برداشت منابع زیرزمینی ارائه کرده‌اند، اما همچنان نقاط ضعف و کمبودهایی وجود دارد که نیاز به توجه در پژوهش‌های آینده دارد. در ادامه این موارد در سه بخش مجزا شامل چالش‌های اصلی، کمبودهای موجود در تحقیقات فعلی و پیشنهادهایی برای بهبود مطالعات آینده آورده شده است.

۵-۱- چالش‌های اصلی

در سال‌های گذشته مدل‌سازی فرونشست زمین با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و عددی پیشرفت‌های قابل‌توجهی داشته است، اما همچنان با چالش‌هایی روبه‌رو هستند. برخی از این چالش‌ها شامل شبیه‌سازی دقیق نشست زمین و پیش‌بینی اثرات برداشت منابع زیرزمینی است که نیاز به توجه بیشتر در پژوهش‌های آینده دارد. در ادامه، چالش‌های اصلی روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی آورده شده است.

۵-۱-۱- چالش‌های روش‌های آزمایشگاهی

- **مقیاس کوچک و محدودیت‌های تجربی:**

مطالعات آزمایشگاهی معمولاً در مقیاس کوچک و در شرایط کنترل شده انجام می‌شوند، که تکرار شرایط پیچیده زمین‌شناسی و رفتارهای متغیر خاک در محیط واقعی را دشوار می‌کند. به‌عنوان‌مثال در پژوهش‌های Galloway و همکاران (۱۹۹۸)؛ Zhu و همکاران (۲۰۲۰) مشاهده شد انتقال نتایج آزمایش‌های مخزن فشار به مقیاس‌های بزرگ‌تر، به‌ویژه در مناطق شهری و صنعتی، با چالش‌هایی مواجه می‌باشد. این محدودیت باعث می‌شود که آزمایش‌های فیزیکی نتوانند فرونشست زمین در مقیاس بزرگ و همچنین در شرایط متغیر را به‌درستی شبیه‌سازی کنند.

- **هزینه و زمان‌بر بودن:**

آزمایش‌های آزمایشگاهی به‌طور قابل‌توجهی زمان‌بر و هزینه‌بر هستند، به‌ویژه زمانی که نیاز به شبیه‌سازی شرایط بلندمدت و فرایندهای نشست چندساله وجود دارد. برای مثال، در پژوهش Galloway و همکاران (۱۹۹۸) انجام آزمایش‌های طولانی‌مدت برای بررسی نشست زمین ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی به منابع مالی و زمانی زیادی نیاز داشت. همچنین، تجهیزات پیشرفته و گران‌قیمت مورد نیاز برای این آزمایش‌ها، استفاده از این روش‌ها را محدود می‌کند.

۵-۱-۲- چالش‌های مدل‌سازی‌های عددی

- **وابستگی به داده‌های کالیبراسیون:**

مدل‌های عددی مانند روش اجزای محدود (FEM) و مدل‌های تحلیلی برای پیش‌بینی نشست زمین نیاز به داده‌های کالیبراسیون دقیق دارند. در صورت عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی یا میدانی کافی، نتایج مدل‌های عددی ممکن است نادرست یا غیرقابل اعتماد بوده و منجر به خطاهای بسیار بزرگ شود. پژوهش‌های Yan و همکاران (۲۰۱۲) و Li و Song (۲۰۲۰) نشان دادند که در صورت عدم وجود داده‌های کافی برای کالیبراسیون، دقت پیش‌بینی‌ها به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد.

- **فرضیات ساده‌سازی:**

مدل‌های عددی اغلب از فرضیات ساده‌سازی استفاده می‌کنند که ممکن است شرایط پیچیده زمین‌شناسی را

به‌طور کامل منعکس نکنند. این فرضیات می‌تواند منجر به بروز خطاهای قابل توجهی در پیش‌بینی میزان فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی شود.

- **تأثیرات غیرخطی:**

بسیاری از مدل‌های عددی برای کاهش پیچیدگی، روابط خطی بین پارامترها را در نظر می‌گیرند. درحالی‌که تأثیرات فرونشست، به‌ویژه در مناطق با خاک‌های رسی و متغیرهای مختلف مانند برداشت آب، فشار زیرزمینی، و نوع خاک، به‌صورت غیرخطی است. مدل‌های عددی ممکن است توانایی پیش‌بینی دقیق این تأثیرات غیرخطی را نداشته باشند و منجر به نتایج اشتباه شوند. پژوهش Chen و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که مدل‌های هیبریدی می‌توانند به حل این چالش کمک کنند، اما همچنان نیاز به داده‌های دقیق‌تر وجود دارد.

۲-۵- کمبودهای موجود در تحقیقات فعلی

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در درک و پیش‌بینی فرونشست زمین، چندین شکاف اساسی در پژوهش‌های فعلی وجود دارد که دقت مدل‌ها و اثربخشی راهبردهای کاهش را محدود می‌کند.

۱-۲-۵- فقدان تحلیل تعامل چندعاملی

اکثر پژوهش‌های موجود درباره فرونشست زمین، عوامل منفردی مانند برداشت آب زیرزمینی (Poland و Ireland، ۱۹۸۸ و Galloway و همکاران، ۱۹۹۸) یا بارگذاری لرزه‌ای را جداگانه بررسی می‌کنند و تأثیر هم‌زمان چندین عامل مؤثر را نادیده می‌گیرند. در واقعیت، فرونشست معمولاً نتیجه عوامل پیچیده و وابسته به هم است که شامل موارد زیر می‌شود:

- نرخ‌ها و الگوهای برداشت آب زیرزمینی (Chen و همکاران، ۲۰۲۰)
- تأثیرات تغییرات اقلیمی بر تغذیه و تبخیر و تعرق
- تغییرات کاربری زمین که بر نفوذپذیری و بارهای سطحی تأثیر می‌گذارد
- فعالیت‌های لرزه‌ای و حرکات گسل
- تأثیرات شهرنشینی (سطوح غیرقابل نفوذ، مدیریت آب‌های سطحی)

برای مثال، تعامل بین نوسانات فصلی آب زیرزمینی و بارش‌های شدید در شرایط اقلیمی در حال تغییر می‌تواند نرخ فرونشست را تشدید کند، اما به ندرت به صورت سیستماتیک در چارچوب مدل‌سازی یکپارچه تحلیل شده است. .

Chen و همکاران (۲۰۲۰) تأکید کردند که مطالعات آینده باید این تعاملات چندعاملی را در نظر بگیرند تا رفتار واقعی فرونشست، به‌ویژه در مناطق شهری‌شده سریع و دارای تنش آبی، به درستی مدل‌سازی شود.

۲-۲-۵- پوشش ناکافی داده‌های بلندمدت و منطقه‌ای

پیش‌بینی قابل اعتماد فرونشست زمین نیازمند داده‌های پایش بلندمدت در گستره‌ای از شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی متنوع است که اغلب در مطالعات فعلی وجود ندارد. بسیاری از تحقیقات بر موارد زیر تمرکز دارند:

- پایش کوتاه‌مدت (۱ تا ۳ سال)
- مطالعات موردی در یک مکان خاص
- این محدودیت‌ها توانایی را در موارد زیر کاهش می‌دهد:
- ارزیابی الگوهای زمانی و رفتارهای نشست با تأخیر (مانند فشردگی ثانویه در خاک‌های ریزدانه)
- ارزیابی تنوع منطقه‌ای تحت سیستم‌های مختلف سفره آب
- تعمیم‌یافته‌ها برای چارچوب‌های مدیریت منطقه‌ای یا ملی

برای مثال، مطالعات در رفسنجان (Mousavi و همکاران، ۲۰۰۱ و Rahnama و Moafi، ۲۰۰۹) و مشهد (Motagh و همکاران، ۲۰۰۷) دیدگاه‌های محلی ارزشمندی ارائه داده‌اند اما تنوع هیدروژئولوژیکی گسترده‌تر ایران را پوشش نمی‌دهند. نبود داده‌های بلندمدت و منسجم، توسعه مدل‌های کالیبره و اعتبارسنجی شده را که بتوانند فرونشست را در مناطق مختلف و تحت سناریوهای آینده اقلیمی و برداشت پیش‌بینی کنند، دشوار می‌سازد.

۳-۲-۵- فقدان استانداردهای یکپارچه برای مدل‌سازی و روش‌های آزمایشی

پژوهش‌های کنونی از رویکردهای متنوعی استفاده می‌کنند:

- مدل‌سازی عددی مختلف (روش اجزای محدود، روش تفاضل محدود، مدل‌های پوروالاستیک، ویسکوپلاستیک)
- روش‌های کالیبراسیون (داده‌های میدانی در مقابل داده‌های آزمایشگاهی)
- پروتکل‌های گزارش‌دهی نتایج و عدم قطعیت‌ها

که این تنوع باعث دشواری در مقایسه نتایج بین مطالعات می‌شود (Minderhoud و همکاران، ۲۰۱۸ و Nguyen و همکاران، ۲۰۲۲)، به‌عنوان‌مثال تفاوت در تعریف شرایط مرزی، انتخاب پارامترهای ماده و شبکه‌بندی مدل‌های عددی می‌تواند به طور قابل توجهی نرخ‌های پیش‌بینی شده فرونشست را تحت تأثیر قرار دهد، اما چنین جزئیاتی به طور یکنواخت گزارش نمی‌شوند.

Nguyen و همکاران (۲۰۲۲) تأکید کردند که نبود دستورالعمل‌های یکپارچه باعث اختلاف در مطالعات فرونشست شده و پتانسیل انجام مرورهای سیستماتیک، متاآنالیزها و ترکیب یافته‌ها در سطح منطقه‌ای را محدود می‌کند. این ناهماهنگی در تدوین راهکارهای مؤثر کاهش و سازگاری، به‌ویژه برای سیاست‌گذاران که قصد اولویت‌بندی

مداخلات بر اساس ارزیابی ریسک را دارند، چالش‌برانگیز است.

۵-۲-۴- ادغام محدود روش‌های آزمایشگاهی و عددی

آزمایش‌های آزمایشگاهی بینش‌های دقیق و با دقت بالا درباره رفتار خاک تحت شرایط کنترل شده فراهم می‌کنند (Zhou و همکاران، ۲۰۲۴). اما با محدودیت‌هایی در مقیاس و بازتولید شرایط ناهمگن میدانی مواجه‌اند. از سوی دیگر، مدل‌های عددی می‌توانند سناریوهای پیچیده در مقیاس بزرگ‌تر را شبیه‌سازی کنند (Rajabi، ۲۰۱۸ و Mahmoudpour و همکاران، ۲۰۱۸) اما دقت آن‌ها به شدت به داده‌های کالیبراسیون قابل اعتماد وابسته است که اغلب به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی یا داده‌های میدانی کافی نیست.

درحال‌حاضر تعداد کمی، از مطالعات به صورت سیستماتیک پارامترهای کالیبره شده آزمایشگاهی را در مدل‌های عددی وارد کرده‌اند تا دقت پیش‌بینی بهبود بخشند، به‌ویژه در شرایط پیچیده شامل سفره‌های آب لایه‌ای و رفتارهای خزش وابسته به زمان بهبود بخشند.

۵-۲-۵- تحلیل ناکافی عدم قطعیت و حساسیت

بسیاری از مدل‌های فرونشست به طور کافی به موارد زیر نمی‌پردازند:

- عدم قطعیت در پارامترهای ورودی (مانند هیدرولیکی، تراکم‌پذیری، نرخ‌های تغذیه)
- حساسیت پیش‌بینی فرونشست به تغییرات در برداشت آب زیرزمینی یا تغییرات اقلیمی
- کمی‌سازی بازه‌های اطمینان در پیش‌بینی‌ها

این کمبود در کمی‌سازی عدم قطعیت، اعتماد به پیش‌بینی‌های فرونشست را کاهش داده و کاربرد آن‌ها را در مدیریت ریسک عملی محدود می‌کند.

۵-۳- پیشنهادهایی برای بهبود مطالعات آینده

۵-۳-۱- توسعه مدل‌های هیبریدی

استفاده از مدل‌های هیبریدی که ترکیبی از روش‌های آزمایشگاهی و عددی هستند، می‌توانند به کاهش محدودیت‌های هر دو روش کمک کند. این مدل‌ها می‌توانند با استفاده از داده‌های دقیق‌تر و در نظر گرفتن تأثیرات غیرخطی، دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهند.

۵-۳-۲- ایجاد بانک‌های داده جامع

ایجاد بانک‌های داده طولانی‌مدت و گسترده جغرافیایی می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و افزایش قابلیت تعمیم نتایج کمک کند. این بانک‌های داده باید شامل اطلاعاتی از مناطق مختلف و دوره‌های زمانی طولانی‌تر باشند. در کنار بانک داده‌های جامع، وجود سامانه‌ای یکپارچه که تمام اطلاعات و داده‌های مورد نیاز برای تخمین و پیش‌بینی فرونشست زمین را در هر کشور باتوجه‌به تقسیمات سیاسی فراهم کند بسیار موثر می‌باشد. در این سامانه تمام دستگاه‌ها و سازمان‌های مسئول اطلاعات و داده‌هایی که براساس وظایف سازمانی خود تهیه می‌کنند در آن سامانه در اختیار مسئولین ذی‌ربط قرار می‌دهند. این کار ضمن کاهش زمان و هزینه، سبب یکپارچگی در مطالعات می‌شود.

۵-۳-۳- توسعه استانداردهای یکپارچه

ایجاد استانداردهای یکپارچه برای مدل‌سازی و آزمایش‌های فرونشست می‌تواند مقایسه نتایج مطالعات مختلف را تسهیل کند. این استانداردها باید شامل روش‌های مشترک برای جمع‌آوری داده‌ها، کالیبراسیون مدل‌ها و گزارش نتایج باشند.

۵-۳-۴- توجه به تعاملات چندعاملی

در مطالعات آینده، باید به تعاملات چندعاملی مانند تغییرات اقلیمی، تغییرات ژئوتکنیکی، مشخصات ژئوهیدرولوژی، زمین‌شناسی، توپوگرافی، زمین‌لرزه‌ها، گسل‌ها، موقعیت چاه‌ها و میزان برداشت آنها، پوشش گیاهی، مصارف آب شرب، کشاورزی، صنعتی، تغییرات فشار آب زیرزمینی و تغییر کاربری زمین و سایر عوامل موثر توجه بیشتری شود. این رویکرد می‌تواند به درک بهتر عوامل مؤثر بر فرونشست زمین و بهبود دقت پیش‌بینی‌ها کمک کرده و از طرف دیگر برای مدیریت بحران فرونشست و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی موثر واقع شود.

باتوجه‌به این چالش‌ها و کمبودها، پژوهش‌های آینده باید بر توسعه روش‌های نوین، بهبود دقت داده‌ها و ایجاد استانداردهای یکپارچه تمرکز کنند تا بتوانند به شبیه‌سازی دقیق‌تر و پیش‌بینی مؤثرتر فرونشست زمین دست یابند.

نتیجه‌گیری

کاهش سطح آب‌های زیرزمینی بر اثر برداشت بی‌رویه، تغذیه ناکافی یا زهکشی‌های موضعی، یکی از مهمترین عوامل فرونشست زمین، به‌ویژه در مناطق دارای خاک‌های نرم و تراکم‌پذیر است. این فرایند با افزایش تنش مؤثر و فشردگی لایه‌های زمین همراه بوده و می‌تواند به ایجاد نشست‌های قابل توجه (حتی تا ۸ متر)، آسیب جدی به زیرساخت‌های شهری، خطوط انتقال، شبکه حمل‌ونقل و ساختمان‌ها منجر شود. در سال‌های اخیر، با تسریع فرآیندهای برداشت و تغییر اقلیم، ابعاد خسارات ناشی از فرونشست در بسیاری از مناطق ایران و جهان فزونی یافته است.

روش‌های عددی و مدل‌سازی

در این مطالعه، با بهره‌گیری از روش‌های عددی پیشرفته مانند اجزای محدود (FEM)، تفاضل محدود (FDM) و مدل‌های هیدرو-ژئوتکنیک کوپل‌شده، امکان شبیه‌سازی دقیق رفتار خاک، افت سطح آب زیرزمینی، تحکیم و

نشست‌های تدریجی خاک فراهم شد. مدل‌سازی عددی این ظرفیت را ایجاد می‌کند که بتوان سناریوهای مختلف برداشت، تغییرات اقلیمی، ویژگی‌های لایه‌بندی خاک، رفتار غیرخطی، پدیده‌های وابسته به زمان (مانند نشست ثانویه و تغییر شکل آهسته خاک) و اثرات هم‌زمان چند عامل طبیعی و انسانی را تحلیل کرد. با این وجود، باید تاکید کرد که اعتبار و خروجی مدل‌ها به شدت به کیفیت داده‌های ورودی (ویژگی‌های ژئوتکنیکی، نتایج آزمایشگاهی، داده‌های صحرایی و برداشت‌های میدانی از سطح آبخوان‌ها) وابسته است. در بسیاری از موارد، محدودیت داده‌های میدانی، عدم یکنواختی نتایج آزمایشگاهی و نبود استانداردهای یکپارچه برای تفسیر و کالیبراسیون، دقت پیش‌بینی و کارایی مدل‌ها را کاهش می‌دهد.

از سوی دیگر، **روش‌های مدل‌سازی فیزیکی (مدل‌های آزمایشگاهی و پایلوت‌های صحرایی)**، امکان مشاهده مستقیم پاسخ خاک را تحت سناریوهای کنترل‌شده فراهم می‌کنند و به تحلیل مکانیسم‌های پایه‌ای نشست و تحکیم کمک شایانی می‌نمایند. هرچند، مقیاس‌پذیری محدود، هزینه بالا و دشواری بازتولید ناهمگنی‌های طبیعی از جمله نقاط ضعف این روش‌هاست.

ترکیب روش‌های عددی و مدل‌سازی (مدل‌های هیبریدی یا یکپارچه)

پیشنهاد می‌شود برای فائق آمدن بر نقاط ضعف هر رویکرد، از مدل‌های هیبریدی استفاده شود؛ بدین صورت که داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌های عددی به‌کار روند. همچنین، استفاده از داده‌برداری پیوسته (مانند GPS، سنجش از دور InSAR، و سامانه‌های IoT) می‌تواند به پایش دقیق‌تر فرآیند فرونشست کمک کند و امکان به‌روزرسانی و اصلاح مدل‌ها را بر مبنای واقعیت‌های جاری فراهم آورد.

روش کار پیشنهادی برای مطالعات آینده

۱. **جمع‌آوری داده‌های جام:** تلفیق داده‌های تاریخی سطح آب زیرزمینی، داده‌های ژئوتکنیکی، نتایج آزمایشگاهی خاک، داده‌های GPS وInSAR ، و ثبت برداشت آب از چاه‌ها.

۲. **انجام مدل‌سازی عددی پیشرفته:** استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی مانند PLAXIS، FLAC و MODFLOWجهت تحلیل تأثیر پارامترهای مختلف و سناریوهای مدیریتی.

۳. **کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌ها:** با تکیه بر داده‌های مشاهداتی و آزمایشگاهی، مدل‌ها باید به‌طور مکرر اعتبارسنجی شده و تطابق نتایج پیش‌بینی با رفتار واقعی زمین سنجیده شود.

۴. **تحلیل عدم قطعیت و حساسیت:** بررسی تاثیر تغییرات پارامترها بر خروجی مدل و تعیین مهم‌ترین ورودی‌های مؤثر بر فرونشست.

۵. **ارائه راهکارهای مدیریتی و سیاستی:** بر اساس نتایج مدل‌ها و تحلیل‌ها، تدوین دستورالعمل‌های اجرایی، سناریوهای پایش و راهبردهای بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع آب.

جمع‌بندی کاربردی

باتوجه‌به پیچیدگی‌های سیستم‌های هیدروژئولوژیک و اثرات چندعاملی بر فرونشست، آیندهٔ مدیریت منابع آب زیرزمینی در گرو توسعه مدل‌های یکپارچه، پایش مداوم، تقویت بانک‌های داده ملی و تقویت همکاری بین نهادهای پژوهشی، اجرایی و سیاست‌گذار است. ارتقای آموزش عمومی و اطلاع‌رسانی در خصوص پیامدهای فرونشست نیز می‌تواند نقش چشمگیری در کاهش ریسک و خسارات ناشی از این پدیده داشته باشد.

منابع

سرباز، حسین، آقامیری، محمد. (۱۴۰۲). سیاست‌گذاری و مدیریت فرابخشی حل معضل پدیده فرونشست در ایران، پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی. ۹(۲)، ۱۰۶- ۱۴۷. http://epprjournal.ir/article-1-1118-fa.html.

لشکری‌پور، غلامرضا،، رستمي باراني، حمیدرضا. کهندل، اصغر، ترشیزی، حسین. (۱۳۸۵). افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین در دشت کاشمر. دهمین کنفرانس انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. https://civilica.com/doc/28612/

لشکری‌پور، غلامرضا، غفوری، محمد، کاظمی گلیان، رمضان، دمشناس، مهدی. (۱۳۸۶). افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین در دشت نیشابور. پنجمین همایش زمین شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران، انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، تهران، ایران. https://civilica.com/doc/34249/

لشکری‌پور، غلامرضا، غفوری، محمد. (۱۳۸۹). فرونشست دشت مهیار جنوبی و تأثیر شکاف‌های ناشی از آن بر مناطق مسکونی، صنعتی و کشاورزی. پنجمین همایش ملی زمین شناسی و محیط‌زیست. دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، تهران. https://civilica.com/doc/102065/

Abidin, H. Z., Andreas, H., Djaja, R., Darmawan, D., & Gamal, M. (2008). Land subsidence characteristics of Jakarta between 1997 and 2005, as estimated using GPS surveys. Journal of Geodesy, 82(8), 543–556 . doi:[10.1023/A:1011144602064].

Abd-Elhamid, H. F., Abd-Elkader, B. S., & Wahed, O. (2022). Assessment of changing the abstraction and recharge rates on land subsidence in the Nile Delta, Egypt. Water, 14(7), 1103.doi:[10.3390/w14071096].

1962–2030. Applied Geography, 122, 102247. doi: [10.1016/j.apgeog.2020.102247].
Li, H., Guo, Z., Chen, K., Zhan, Y., Wang, Y., Ding, C., Lu, C., & Zheng, C. (2025). Modeling land subsidence under future water stress: The influence of groundwater exploitation, climate change, and inter-basin water diversion.doi:[10.1029/2025WR041105].
Lixin, Y., Fang, Z., He, X., Shijie, C., Wei, W., & Qiang, Y. (2011). Land subsidence in Tianjin, China. Environmental Earth Sciences, 62, 1151–1161. doi: [10.1007/s12665-010-0604-5]
López-Quiroz, P., Doin, M. P., Tupin, F., Briole, P., & Nicolas, J. M. (2009). Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. Journal of Applied Geophysics, 69(1), 1–15. doi: [10.1016/j.jappgeo.2009.02.006]
Minderhoud, P. S. J., Coumou, L., Erban, L. E., Middelkoop, H., Stouthamer, E., & Addink, E. (2018). The relation between land use and subsidence in the Vietnamese Mekong delta. Science of the Total Environment, 634, 715–726. doi: [10.1016/j.scitotenv.2018.03.372Get rights and content]
Modoni, G., Darini, G., Spacagna, R., Saroli, M., Russo, G., & Croce, P. (2013). Spatial analysis of land subsidence induced by groundwater withdrawal. Engineering Geology, 167, 59–71. doi: [10.1016/j.enggeo.2013.10.014]
Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T. R., Wetzel, H. U., Zschau, J., & Arabi, S. (2007). Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: Results from InSAR, levelling and GPS. Geophysical Journal International, 168(2), 518–526. doi: [0.1111/j.1365-246X.2006.03246.x]
Mahmoudpour, M., Hosseini, S. A., & Nazari Samani, A. A. (2018). Numerical modeling and prediction of land subsidence induced by groundwater withdrawal in the southwestern Tehran Plain using MODFLOW and InSAR data. Journal of Applied Research in Geographical Sciences, 18(46), 1–18. doi: [10.1016/j.enggeo.2015.12.004].
Mousavi, S. M., Shamsai, A., El Naggar, M. H., & Khamehchiyan, M. (2001). A GPS-based monitoring program of land subsidence due to groundwater withdrawal in Iran. Canadian Journal of Civil Engineering, 28(3), 452–464. doi: [10.1139/cjce-28-3-452]
Ng, A. H. M., Ge, L., Li, X., & Zhang, K. (2012). Monitoring ground deformation in Beijing, China with persistent scatterer SAR interferometry. Journal of Geodesy, 86, 375–392. doi: [10.1007/s00190-011-0525-4]
Nguyen, M., Lin, Y. N., Tran, Q. C., Ni, C. F., Chan, Y. C., Tseng, K. H., & Chang, C. P. (2022). Assessment of long-term ground subsidence and groundwater depletion in Hanoi, Vietnam. Engineering Geology, 299, 106555. doi: [10.1016/j.enggeo.2022.106555]
Osmanoğlu, B., Dixon, T. H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Jiang, Y. (2011). Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13(1), 1–12. doi: [:10.1016/j.jag.2010.05.009]
Othman, A., & Abotalib, A. Z. (2019). Land subsidence triggered by groundwater withdrawal under hyper-arid conditions: case study from Central Saudi Arabia. Environmental Earth Sciences, 78(7), 243. doi: [10.1007/s12665-019-8254-8]
Phien-wej, N., Giao, P. H., & Nutalaya, P. (2006). Land subsidence in Bangkok, Thailand. Engineering
Bakr, M. (2015). Influence of groundwater management on land subsidence in deltas: A case study of Jakarta (Indonesia). Water Resources Management, 29(5), 1541–1555. doi: [10.1007/s11269-014-0893-7]
Chaussard, E., Amelung, F., Abidin, H. Z., & Hong, S. H. (2013). Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction. Remote Sensing of Environment, 128, 150–161. doi: [10.1016/j.rse.2012.10.015]
Cao, Y., Wei, Y.-n., Fan, W., Peng, M., & Bao, L. (2020). Experimental study of land subsidence in response to groundwater withdrawal and recharge in Changping District of Beijing. PLOS ONE, 15(5), e0232828. doi: [10.1371/journal.pone.0232828]
Chen, B., Gong, H., Chen, Y., Li, X., Zhou, C., Lei, K., Zhu, L., Duan, L., & Zhao, X. (2020). Land subsidence and its relation with groundwater aquifers in Beijing Plain of China. Science of The Total Environment, 735, 139111. doi: [10.1016/j.scitotenv.2020.139111]
Cigna, F., Osmanoğlu, B., Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., DeMets, C., & Wdowinski, S. (2012). Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico. Remote Sensing of Environment, 117, 146–161. doi: [10.1016/j.rse.2011.09.005]
Galloway, D. L., Hudnut, K. W., Ingebritsen, S. E., Phillips, S. P., Peltzer, G., Rogez, F., & Rosen, P. A. (1998). Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. Water Resources Research, 34(10), 2573–2585. doi: [10.1029/98WR01285]
Gabrysch, R. K. (1974). Land-surface subsidence in the Houston, Texas. U.S Galveston region. Geological Survey Water-Supply Paper 2198. Galveston, Houston. Texas, United States. Link[https://pubs.usgs.gov/of/1974/0123/report.pdf]. https://doi.org/10.3133/ofr74123.
Galloway, D. L., Jones, D. R., & Ingebritsen, S. E. (1999). Land subsidence in the United States. U.S. Geological Survey Circular 1182. Link [https://pubs.usgs.gov/circ/circ1182/pdf/circ1182_intro.pdf]
He, G., Yan, X., Zhang, Y., Yang, T., Wu, J., Bai, Y., & Gu, D. (2020). Experimental study on the vertical deformation of soils due to groundwater withdrawal. International Journal of Geomechanics, 20(7), 04020076. doi: [10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001709]
Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R. M., Carreón-Freyre, D., Lambert, J., Teatini, P., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D., Hung, W. C., Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wang, H., & Yi, S. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. Science, 371(6524), 34–36. doi: [10.1126/science.abb8549].
Hu, R. L., Yue, Z. Q., Wang, L. C., & Wang, S. J. (2004). Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. Engineering Geology, 76(1-2), 65–77. doi: [10.1016/j.enggeo.2004.06.006].
Khan, A. S., Khan, S. D., & Kakar, D. M. (2013). Land subsidence and declining water resources in Quetta Valley, Pakistan. Environmental Earth Sciences, 70, 2719–2727. doi: [10.1007/s12665-013-2328-9]
Li, H., & Song, W. (2020). Pattern of spatial evolution of rural settlements in the Jizhou District of China during

Geology, 48, 713–720. doi: [10.1007/s00254-005-0010-6]
Yan, Y., Doin, M. P., López-Quiroz, P., Tupin, F., Fruneau, B., Pinel, V., & Trouvé, E. (2012). Mexico City subsidence measured by InSAR time series: Joint analysis using PS and SBAS approaches. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 5(4), 1312–1326. doi: [10.1109/JSTARS.2012.2191146]
Zhu, L., Franceschini, A., Gong, H., Ferronato, M., Dai, Z., Ke, Y., Pan, Y., Li, X., Wang, R., & Teatini, P. (2020). The 3-D facies and geomechanical modeling of land subsidence in the Chaobai Plain, Beijing. Water Resources Research, 56(3), e2019WR027026. doi: [10.1029/2019WR027026]
Zhou, X., et al. (2024). Soil–Pipeline interaction under localized soil subsidence: Experimental investigation. Journal of Pipeline Engineering. [in press]. doi: [10.1016/j.measurement.2024.116175]
Wu, J., Zhang, R., & Yang, J. (2009). Analysis of land subsidence caused by groundwater exploitation and artificial recharge using numerical simulation. Hydrogeology Journal, 17(5), 1141–1152. doi: [10.1007/s00254-008-1419-5].
Yu, J., & Yung, C. P. (2015). Numerical simulation of groundwater extraction and land subsidence with consideration of artificial recharge. Environmental Earth Sciences, 73(8), 4037–4048. doi: [10.1007/s12205-015-0505-y].
Zu, X., & Feng, Q. (2011). Numerical simulation of land subsidence induced by groundwater overexploitation using finite element and finite difference methods. Environmental Earth Sciences, 64(7), 1879–1891. doi: [10.1007/s10586-022-03771-4]

پی‌نوشت‌ها

1–FEM: Finite Element Method

2–CFD: Computational Fluid Dynamics

Geology, 82(4), 187–201. doi: [DOI:10.1016/j.enggeo.2005.10.004]
Poland, J. F., & Ireland, R. L. (1988). Land subsidence in the Santa Clara Valley, California, as of 1982. U.S. Geological Survey Professional Paper 497-F.
Rajabi, A. M. (2018). A numerical study on land subsidence due to extensive overexploitation of groundwater in Aliabad plain, Qom–Iran. Natural Hazards, 93(2), 1085–1103. doi: [10.1007/s11069-018-3448-z]
Rahnama, M., & Moafi, H. (2009). Investigation of land subsidence due to groundwater withdraw in Rafsanjan plain using GIS software. Arabian Journal of Geosciences, 2(3), 241–246. doi: [10.1007/s12517-009-0034-4]
Shang, Y., Dang, H., Huang, S., & Zhang, G. (2021). Retracted: Experimental Study on the Settlement Properties of Silt Containing Fine Particles after Liquefaction: Case of Xiong'an New Area of China. International Journal of Geomechanics, 21(1), 05020007. doi: [10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001864]
Teatini, P., Tosi, L., Strozzi, T., Carbognin, L., Cecconi, G., Rosselli, R., & Libardo, S. (2012). Resolving land subsidence within the Venice Lagoon by persistent scatterer SAR interferometry. Physics and Chemistry of the Earth, 40–41, 72–79. doi: [/10.1016/j.pce.2010.01.002]
Wang, Y. Q., Wang, Z. F., & Cheng, W. C. (2019). A review on land subsidence caused by groundwater withdrawal in Xi'an, China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78, 2851–2863. doi: [10.1007/s10064-018-1278-6]
Wei, Y. N., Fan, W., & Cao, Y. (2017). Experimental study on the vertical deformation of aquifer soils under conditions of withdrawing and recharging of groundwater in Tongchuan region, China. Hydrogeology Journal, 25(2), 441–453. doi: [10.1007/s10040-016-1498-4]
Xue, Y. Q., Zhang, Y., Ye, S. J., Wu, J. C., & Li, Q. F. (2005). Land subsidence in China. Environmental

نشریه آب و توسعه پایدار. آذر ماه ۱۴۰۴
سال دوازدهم. شماره سوم (پیاپی ۳۷). صفحات ۸۰ تا ۱۰۴

Journal of Water and Sustainable Development. December 2025
Volume 12. Lssue 3 (Serial No. 37). pages 80 to 104

نوع مقاله: مروری

Document Type: Review Article

تحلیلی بر جریان برگشتی، اهمیت و مقدار آن در ایران و سایر کشورهای جهان

زهرا کاظمی[1*]، عزیز مجیدی[2]، اسماعیل علیزاده[3]، جهانبخش میرزاوند[4]

۱. دکتری فیزیک و حفاظت خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۲. دانشیار پژوهشی، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران.
۳. استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات گیاه‌پزشکی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران.
۴. استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.

***رایانامه نویسنده مسئول:** zkazemi2016@gmail.com

تاریخ دریافت ◄ ۱۴۰۴/۰۱/۲۴
تاریخ بازنگری ◄ ۱۴۰۴/۰۵/۲۵
تاریخ پذیرش ◄ ۱۴۰۴/۰۵/۲۸
تاریخ انتشار ◄ ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

چکیده

کم‌آبی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن حاضر به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک بوده و سرمنشأ بسیاری از تحولات مثبت و منفی جهان است. در مقیاس جهانی، کشاورزی فاریاب بزرگترین مصرف‌کننده آب‌های زیرزمینی است. جریان برگشتی، آب آبیاری مازادی است که در نتیجه نفوذ عمقی به یک سفره آب زیرزمینی باز می‌گردد. میزان آب برگشتی به سفره‌های آب زیرزمینی بسته به اقلیم منطقه، توپوگرافی، خاک، روش آبیاری و مقدار آن بین دو تا بیش از ۷۰ درصد و در ایران بطور متوسط بین ۰/۸ تا ۱۷/۱ درصد است. مقاله مروری حاضر به بررسی پژوهش‌های مختلف صورت گرفته در زمینه آب برگشتی آبیاری، اهمیت و میزان آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران و سایر کشورها و تأثیر بکارگیری روش‌های نوین آبیاری بر آن پرداخته است. بطورکلی، میزان آب برگشتی در روش‌های آبیاری نوین (موضعی، بارانی و ...) در مقایسه با روش‌های آبیاری غرقابی، در شرایطی که کم‌آبیاری اعمال نمی‌شود به مقدار قابل توجهی کاهش یافته و کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی و شوری خاک را نیز در مناطق مستعد به آلودگی به دنبال دارد. علاوه بر این، با کم‌آبیاری در مقایسه با آبیاری کامل، مقدار آب برگشتی آبیاری کاهش پیدا خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری غرقابی، آبیاری قطره‌ای، آلودگی، سفره آب زیرزمینی، کم‌آبیاری.

An Analysis of Return Flow, Its Importance, and Amount in Iran and Other Countries in the World

Z. Kazemi[1*], A. Majidi[2], E. Alizadeh[3], J. Mirzavand[4]

1- Ph.D. in Soil Physics and Conservation, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2- Research Associate Professor, Soil and Water Research Department, West Azarbaijan, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran.
3- Research Assistant Professor, Plant Protection Research Center, West Azarbaijan, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran.
4- Research Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran.

***Corresponding Author Email:** zkazemi2016@gmail.com

Received ▶ 13-04-2025
Revised ▶ 16-08-2025
Accepted ▶ 19-08-2025
Available online ▶ 16-12-2025

Abstract

Water shortage is one of the greatest challenges of the current century, especially in arid and semi-arid areas. It is the source of many positive and negative changes in the world. Globally, irrigated agriculture is the largest consumer of groundwater. The return flow is the excess of irrigation water that returns to the groundwater table as a result of deep penetration. The amount of return flow to the groundwater tables has been reported between 2% and more than 70% and in Iran, its average value is between 0.8% and 17.1%, depending on the climatic conditions of the region, topography, soil and the irrigation method and water used. The current paper has reviewed the various research conducted in the field of return flow, its importance and amount in arid and semi-arid areas such as Iran and other countries and the impact of using modern irrigation systems on it. Generally, the return flow amount under modern irrigation systems (drip irrigation, sprinkler, etc.) is significantly reduced compared to flood irrigation methods, when deficit irrigation is not applied, and this also reduces groundwater pollution and soil salinity in areas prone to pollution. Additionally, compared to full irrigation, using the deficit-irrigation method, the amount of return flow will be reduced.

Keywords: Flood Irrigation, Drip Irrigation, Pollution, Groundwater Table, Deficit Irrigation.

How to cite this article:
Kazemi, Z., Majidi, A., Alizadeh, E., & Mirzavand, J. (2025). An Analysis of Return Flow, Its Importance, and Amount in Iran and Other Countries in the World. Journal of Water and Sustainable Development, 12(3), 80-104. https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i3.2504-1420

مقدمه

طی قرن گذشته تقاضا برای مصرف آب در سراسر جهان ۸۰۰ درصد افزایش یافته است. طبق پیش‌بینی سازمان ملل، جمعیت جهان در سال ۲۰۵۰ به ۹/۸ میلیارد نفر می‌رسد و برداشت آب نیز حدود ۶۰ درصد نسبت به سال ۲۰۱۰ افزایش خواهد یافت (Berbel و همکاران، ۲۰۲۴). این در حالی‌است که بر مبنای یافته‌های Ma و همکاران (۲۰۲۴) نسبت تخصیص آب کشاورزی تا سال ۲۰۵۰ از ۶۹/۷-۵۳/۲ درصد به ۵۶/۶-۴۵/۴ درصد کاهش می‌یابد تا برای اطمینان از احیای اکولوژیکی و تامین انرژی در مصرف آب بیشتر صرفه‌جویی شود. در ایران در شرایط فعلی بخش کشاورزی سهم عمده‌ای از منابع آب را به خود اختصاص داده است (بیش از ۹۰ درصد) (ابراهیم‌پور و هاشم‌نیا، ۱۳۹۴). آب‌های زیرزمینی همیشه منبع مهم و قابل اعتمادی از آب بوده و حدود ۹۷ درصد از آب شیرین در سراسر جهان را تامین می‌کنند (Jakeman و همکاران، ۲۰۱۶). در مناطق نیمه‌خشک، آب‌های زیرزمینی یکی از منابع مهم آب در طول سال هستند (Usman و همکاران، ۲۰۱۵)؛ بنابراین، تغذیه آب زیرزمینی یکی از عوامل حاکم بر سیستم آب زیرزمینی منطقه است. آب زیرزمینی عمدتاً توسط بارندگی و منابع آب سطحی مانند دریاچه‌ها و رودخانه‌ها تغذیه می‌شود (Liu و Yamanaka، ۲۰۱۲). علاوه بر اینها، آبیاری و جریان برگشتی[1] آبیاری (RF) می‌تواند منبع مهمی برای تغذیه آبخوان در مناطق زیر کشت محصولات کشاورزی باشد (Jiménez-Martínez و همکاران، ۲۰۰۹؛ Séraphin و همکاران، ۲۰۱۶). بخش معینی از آب آبیاری از سطح خاک تبخیر شده یا طی تعرق توسط گیاهان مصرف و بخشی دیگر در قالب رواناب سطحی به نهرها یا کانال‌های زهکشی تخلیه می‌شود. آب باقیمانده به خاک نفوذ کرده و می‌تواند به آب‌های زیرزمینی بپیوندد. این آب اضافی که پتانسیل بازگشت به سفره زیرین را دارد، جریان برگشتی آبیاری نامیده می‌شود (Rushton و همکاران،۲۰۲۰؛ Morrisett و همکاران، ۲۰۲۴). جریان برگشتی آبیاری به عنوان "مازاد آب آبیاری که توسط تبخیر و تعرق مصرف نشده، طی زهکشی مستقیم سطحی تخلیه نمی‌شود و در نهایت به یک سفره آب باز می‌گردد" تعریف می‌شود و می‌تواند مقدار قابل توجهی به منابع آب کمک کند (Dewandel و همکاران، ۲۰۰۸). از اصطلاح جریان برگشتی کمتر استفاده شده و به جای آن واژه‌هایی همچون تغذیه و نفوذ عمقی به کار برده شده است. مدیریت کارآمد شبکه‌های آبیاری نیازمند برنامه‌ریزی و اتخاذ تصمیمات درست بر پایه پیش‌بینی‌ها و ابزارهای اندازه‌گیری و سنجش دقیق است. همانطور که جریان برگشتی از عوامل کاهش فشار بر منابع آب محسوب می‌گردد، در سوی دیگر به عنوان یکی از عوامل کاهش راندمان آبیاری مطرح است. از این‌رو برآورد دقیق و شناخت تاثیرپذیری آن نسبت به پارامترهای مختلف و ارائه راهکارهای مدیریتی در کنترل مقدار کمّی و یا استفاده بهینه از آن می‌تواند نقش بسزایی در ارتقای عملکرد و بهره‌وری شبکه‌های آبیاری و حفظ منابع آب داشته باشد. شناخت و درک صحیح از تغذیه منابع آب زیرزمینی در مدیریت موفق منابع آب و همچنین مدل‌سازی سیال و انتقال آلودگی در ناحیه زیرسطحی و بررسی آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی مورد نیاز است (Healy، ۲۰۱۰). در زمینه آب برگشتی و مقدار آن در سراسر جهان تحقیقات اندکی صورت گرفته است. بنابراین، بررسی دقیق آبیاری و تأثیر آن بر تغذیه مجدد، در سیاست‌گذاری برای اطمینان از پایداری آب‌های زیرزمینی در سطح جهانی و به ویژه در مناطق نیمه خشک حیاتی است. در این مقاله، تحقیقات انجام شده در زمینه آب برگشتی در کشورهای مختلف جهان و ایران در روش‌های سنتی و نوین آبیاری، روش‌های اندازه‌گیری آن، فواید و چالش‌های کاهش مقدار یا حذف آن در سیستم‌های نوین آبیاری و تاثیر کم‌آبیاری بر آن، بررسی شده است.

روش‌های اندازه‌گیری و برآورد مقدار جریان برگشتی و کاربرد آنها

تخمین میزان آب برگشتی (تغذیه، شارژ مجدد) یک فرآیند پیچیده است؛ زیرا با عوامل مختلفی مانند خاک، آب و هوا، پوشش زمین و توپوگرافی تغییر می‌کند. همچنین مقدار جریان برگشتی تابعی است از قیمت آب، قابلیت دسترسی به آب، شیوه کاربرد آب، تجهیزات استفاده مجدد آب در مزرعه، فرهنگ مردم منطقه و محدودیت هایی که برخی عناصر نظیر بر، سدیم و کلر بر کیفیت آب دارند. روش‌های تخمین تغذیه بر اساس مناطق هیدرولوژیکی که اطلاعات مورد نیاز از آنها به دست می‌آید به سه گروه روش‌های آب سطحی، منطقه غیراشباع و منطقه اشباع تقسیم می‌شوند. روش‌های تخمین تغذیه در هر منطقه به انواع روش‌های فیزیکی مانند تخمین اجزای مختلف بیلان آب، روش‌های شیمیایی مانند ردیابی و مدل‌سازی عددی تقسیم می‌شوند. روش مدل‌سازی عددی در هر سه منطقه هیدرولوژیکی قابل کاربرد است. روش‌های سنتی تعیین دبی برگشتی آبیاری شامل استفاده از لایسیمتر، تعادل جرم کلرید (CMB)[2]، ایزوتوپ‌های محیطی، قانون دارسی[3] و تعادل جرم آب[4] است (Scanlon و همکاران، ۲۰۰۲؛ Jafari و همکاران، ۲۰۱۲).

۱- لایسیمترها

لایسیمترها در اندازه‌گیری مستقیم زهکشی ناحیه ریشه و مقدار تغذیه آب‌های زیرزمینی موفق بوده‌اند (Bethune و همکاران، ۲۰۰۱). لایسیمترها عموماً برای مناطقی با پوشش گیاهی ریشه‌دار مناسب نیستند؛ زیرا اگر کف لایسیمتر از ناحیه ریشه عمیق‌تر نباشد، جریان‌های زهکشی اندازه‌گیری

شده، میزان تغذیه آبخوان را بیش از حد تخمین می‌زنند. با این روش، میزان تغذیه را می‌توان در مقیاس‌های زمانی از دقیقه تا سال تخمین زد (جدول ۱؛ شکل ۱). حداقل جریان آبی که می‌توان با استفاده از لایسیمتر اندازه‌گیری کرد، به دقت اندازه‌گیری‌های زهکشی و مساحت سطح لایسیمتر بستگی دارد. طیف گسترده‌ای از نرخ‌های تغذیه با استفاده از لایسیمترها اندازه‌گیری شده است: ۳۴۲ تا ۴۷۸ میلی‌متر در سال در طول یک دوره ۳ ساله در انگلستان (مساحت سطح ۱۰۰ متر مربع؛ Kitching و همکاران، ۱۹۷۷)، ۲۰۰ میلی‌متر در سال برای سفره آب چاک در انگلستان (مساحت سطح ۲۵ متر مربع؛ Kitching و Shearer، ۱۹۸۲) و ۱ تا ۲۰۰ میلی‌متر در سال در یک لایسیمتر با عمق ۱۸ متر در یک منطقه نیمه‌خشک (Gee و همکاران، ۱۹۹۲). لایسیمترها به طور معمول برای تخمین تغذیه استفاده نمی‌شوند؛ زیرا ساخت آنها گران و دشوار است و هزینه نگهداری بالایی دارند. بنابراین برای ارزیابی تبخیر و تعرق مناسب‌تر از تغذیه هستند (Scanlon و همکاران، ۲۰۰۲).

۲- ردیاب‌های محیطی کلرید

این رویکرد، متکی بر تشخیص کامل منشاء کلرید است و بر این فرض استوار است که طی تبخیر و تعرق کلرید در خاک باقی می‌ماند. استفاده از این رویکرد برای تخمین ضرایب جریان برگشتی آبیاری موقعی ممکن است که غلظت کلرید آب زیرزمینی که صرفاً با جریان برگشتی شارژ می‌شود، از غلظت کلرید آب زیرزمینی جدا شود. بنابراین کاربرد آن برای تخمین نرخ شارژ به دلیل نفوذ بارندگی نیازمند کمی‌سازی قوی ورودی‌های کلرید جو است که ممکن است شرایط را برای یک کاربرد قوی، به ویژه در مناطق ساحلی که با تغییرات مکانی قوی مواجه می‌شود، محدود کند. استفاده از ردیاب‌های محیطی، مانند Cl، یکی از معدود روش‌هایی است که می‌تواند نرخ‌های شارژ مجدد بسیار پایین را تخمین بزند و عموماً در این محدوده دقیق‌تر است. نرخ تغذیه تخمین زده شده از غلظت‌های کلر آب‌های زیرزمینی از صفر تا ۸ میلی‌متر در سال در آفریقای جنوبی (Sami و Hughes، ۱۹۹۶)، ۱۱میلی‌متر در سال در دشت‌های جنوبی مرتفع، ایالات متحده آمریکا (Wood و Sanford، ۱۹۹۵)، ۱۳ تا ۱۰۰ میلی‌متر در سال در جنوب غربی استرالیا (Johnston، ۱۹۸۷) و ۱۵۰ تا ۶۶۰ میلی‌متر در سال در شمال شرقی استرالیا (Cook و Böhlke، ۲۰۰۰) متغیر است. نرخ‌های تغذیه براساس Cl آب‌های زیرزمینی توسط Johnston (۱۹۸۷) دو برابر بزرگتر از نرخ‌های تغذیه براساس Cl در آب‌های نفوذ یافته در منطقه غیراشباع بود که اختلاف بین این دو نرخ به جریان ترجیحی نسبت داده شد. کاربرد رویکرد CMB از مقیاس‌های مکانی حدود ۲۰۰ متر تا چندین کیلومتر و مقیاس‌های زمانی از یک تا هزاران سال متغیر است (Scanlon و همکاران، ۲۰۰۲) (جدول ۱؛ شکل ۲). تعدادی از کاربردهای موفق رویکرد تعادل جرم کلرید (CMB) توسط محققین مختلف گزارش شده است (Eriksson و Khunakasem، ۱۹۶۹؛ Naranjo و همکاران، ۲۰۱۵؛ Alcalá و Custodio، ۲۰۱۴).

۳- ایزوتوپ‌ها

ایزوتوپ‌های پایدار هیدروژن (H، D) و اکسیژن (^{16}O، ^{18}O) به طور گسترده در مطالعات هیدرولوژیکی برای ارزیابی فرآیندهای تغذیه آب‌های زیرزمینی، تعیین منابع آب‌های زیرزمینی و شناسایی تعاملات بین بدنه‌های آبی مختلف استفاده شده‌اند. Guo و همکاران (۲۰۱۹) روش‌های ایزوتوپ پایدار[۵] را برای شناسایی منابع تغذیه آب‌های زیرزمینی و ارزیابی کمی نسبت مشارکت آن‌ها در واحه Dunhuang در شمال غربی چین استفاده کردند. ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن (O) و دوتریوم (D) در آب رفتار محافظه‌کارانه‌ای دارند. غلظت آنها تحت تأثیر واکنش‌های ژئوشیمیایی در آبخوان‌ها قرار نمی‌گیرد (Yang و همکاران، ۲۰۱۶؛ Richards و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، آب زیرزمینی اثر انگشت ایزوتوپی اصلی خود را حفظ می‌کند (یعنی $\delta^{18}O$ و δD) که می‌تواند برای ردیابی منابع تغذیه آب زیرزمینی و تعیین کمیت منشأ آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک مختلف استفاده شود (Huang و همکاران، ۲۰۱۳؛ Guo و همکاران، ۲۰۱۵). نتایج Guo و همکاران (۲۰۱۹) نشان داد ایزوتوپ‌های سنگین در آب‌های زیرزمینی کم‌عمق، منفی‌تر از ایزوتوپ‌های موجود در آب‌های زیرزمینی عمیق هستند، که به آب‌های زیرزمینی کم‌عمق که مدرن بودند و آب‌های زیرزمینی عمیق قدیمی نسبت داده می‌شوند. Richards و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار هیدروژن و اکسیژن، منبع آب‌های زیرزمینی و تعاملات بین بدنه‌های آبی مختلف را در استان کندال کامبوج، منطقه‌ای که به شدت تحت تأثیر آرسنیک قرار دارد و نمونه‌ای از بسیاری از سفره‌های آب کم‌عمق اطراف هیمالیا است، بررسی نمودند. مدل‌های اختلاط دو نقطه‌ای مبتنی بر $\delta^{18}O$ و δD امکان تخمین میزان نسبی تبخیر منابع آب زیرزمینی را فراهم کردند و امکان تمایز گسترده بدنه‌های آبی مختلف را در سیستم سفره آب فراهم کردند. Vallet-Coulomb و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند ردیاب‌های ژئوشیمیایی می‌توانند برای تعیین منابع تغذیه، فرآیندهای اختلاط[۶]، و در برخی موارد، نرخ شارژ مستقل از هر گونه داده‌های هیدروژئولوژیکی، به عنوان جایگزینی برای ابزارهای مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی استفاده شوند. این پژوهش‌گران موازنه جرمی کلرید را با یک مدل اختلاط ایزوتوپی ($\delta^{18}O$ و δD) ترکیب نمودند تا ضرایب جریان برگشتی را در یک آبخوان آبرفتی در جنوب فرانسه که در طولانی‌مدت به روش غرقابی آبیاری می‌شد، تعیین کنند. تضاد ایزوتوپی بالای بین آب آبیاری و بارندگی منطقه‌ای،

امکان تقسیم تغذیه بین نفوذ ناشی از بارندگی و جریان‌های برگشتی آبیاری را فراهم نمود. سپس از نسبت‌های اختلاط ایزوتوپی برای تعیین غلظت کلرید آب‌های زیرزمینی که صرفاً توسط جریان برگشتی تغذیه می‌شوند، استفاده نمودند. این امر امکان استفاده اولیه از رویکرد موازنه جرم کلرید را برای تخمین ضرایب جریان برگشتی فراهم می‌کند، که به هیچ بررسی کلرید جوی متکی نیست. در کل بر مبنای یافته‌های این پژوهش‌گران ردیاب‌های ژئوشیمیایی یک روش جایگزین مناسب هستند که می‌توانند برای تعیین مقدار جریان برگشتی، تخمین تغییرات مکانی آنها و پایش تغییرات زمانی آنها استفاده شوند (Vallet-Coulomb و همکاران، ۲۰۱۷). ایزوتوپ‌های پایدار مولکول آب ($\delta^{18}O$ و δD) می‌توانند سهم نسبی منابع مختلف آب‌های زیرزمینی را تعیین کنند. با این وجود، پارتیشن‌بندی ایزوتوپی فقط نسبت‌های شارژ را فراهم می‌کند، و کمی‌سازی نرخ شارژ همچنان نیاز به تخمین تغذیه دارد (Vallet-Coulomb و همکاران، ۲۰۱۷).

۳- قانون دارسی

قانون دارسی برای تخمین جریان عبوری از یک مقطع عرضی در یک آبخوان آزاد یا محصور استفاده می‌شود. این روش با فرض جریان آب ثابت و عدم استخراج آب از خاک قابل کاربرد است. اگر اطلاعات مربوط به هدایت هیدرولیکی ($k(h)$) در مقیاس بزرگ و گرادیان هیدرولیکی در دسترس باشد، استفاده از این روش آسان است. تخمین‌های تغذیه براساس قانون دارسی به دلیل تغییرپذیری بالای $k(h)$ بسیار نامطمئن هستند. کاربردپذیری $k(h)$ اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی در مقیاس میدانی نیز مورد سوال است. این روش را می‌توان در مناطق وسیع (حدود ۱ تا ۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع) اعمال کرد. دوره‌های زمانی قابل کاربرد برای تخمین تغذیه نیز از یک تا صدها سال متغیر است (Scanlon و همکاران، ۲۰۰۲) (شکل ۱؛ جدول ۱).

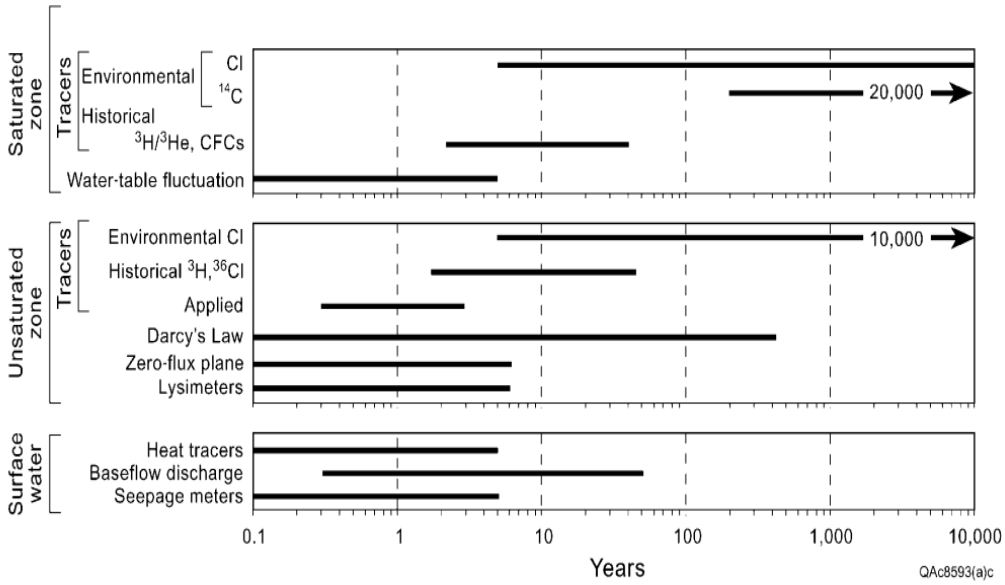
Batelaan و De Smedt (۲۰۰۷) تخمین تغذیه آب زیرزمینی را با روش نوسانات سطح آب (WTFM[۷])، روش تعادل آب (WBM)[۸]، قانون دارسی، روابط تجربی، مدل‌های آب زیرزمینی و روش‌های ردیاب انجام دادند. Islam و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند روش WTFM فقط برای سفره‌های زیرزمینی محدود قابل اجرا است و روش‌های ردیاب بسیار زمان‌بر هستند. به همین دلیل Scanlon و همکاران (۲۰۰۲) از روش WBM به دلیل کاربرد آن در طیف وسیعی از متغیرهای مکانی و زمانی، استفاده نمودند. در WBM، تغذیه بالقوه آبخوان، متغیر ناشناخته است و بقیه پارامترهای بیلان آب (آبیاری و بارندگی، تبخیر و تعرق، رواناب و تغییر در ذخیره آب خاک) اندازه‌گیری یا برآورد می‌شوند (Ben-Asher و Ayars، ۱۹۹۰). فراوانی داده‌های سطح آب زیرزمینی و سادگی روش تخمین تغذیه از نوسانات گذرای سطح آب یا الگوهای فضایی سطح آب زیرزمینی، WTFM را به یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای تخمین تغذیه آبخوان تبدیل کرده است (Healy و cook، ۲۰۰۲).

۴- مدل‌سازی عددی

مدل‌های کامپیوتری مفیدترین ابزار موجود در مدیریت منابع آب زیرزمینی معرفی شده‌اند (Healy، ۲۰۱۰). Jiménez-Martínez و همکاران (۲۰۰۹) و Poch-Massegú و همکاران (۲۰۱۴) از نرم‌افزار هایدروس تک‌بعدی (HYDRUS-1D) برای تخمین جریان برگشتی آبیاری در سیستم تحت تناوب زراعی کاهو-خربزه استفاده کردند. نرم‌افزار هایدروس دو/سه‌بعدی (HYDRUS-2D/3D) برای شبیه‌سازی جریان برگشتی آبیاری مناسب است (Skaggs و همکاران، ۲۰۰۴؛ Šimunek و همکاران، ۲۰۱۲). Skaggs و همکاران (۲۰۰۴) دقت شبیه‌سازی‌های HYDRUS-2D از میزان آب در یک خاک لوم شنی تحت آبیاری قطره‌ای را ارزیابی نموده و نتایج حاصل از تخمین با HYDRUS-2D با داده‌های تجربی مطابقت بسیار خوبی داشت. نتایج، استفاده از HYDRUS-2D را به عنوان ابزاری برای بررسی و طراحی شیوه‌های مدیریت آبیاری قطره‌ای تأیید نمودند.

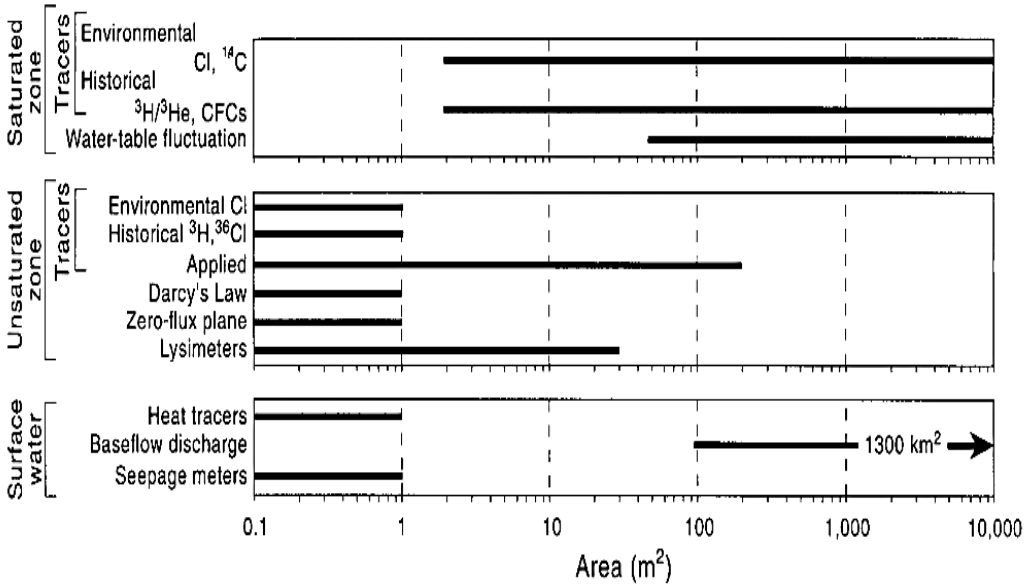
مدل‌های HYDRUS به هیچ مقیاس مکانی یا زمانی خاصی محدود نمی‌شوند، مشروط بر اینکه معادلات حاکم به درستی فرموله شده و در آن مقیاس قابل استفاده باشند. کاربردهای موفقیت‌آمیز زیادی از HYDRUS-1D در مقیاس‌های مختلف از ستون‌های خاک کوچک آزمایشگاهی گرفته تا کاربردهای کشاورزی برای پروفیل‌های خاک با عمق یک یا چند متر (Hanson و همکاران، ۲۰۰۶) تا پروفیل‌های خاک با عمق چند صد متر (Scanlon و همکاران، ۲۰۰۲) وجود داشته است. HYDRUS (2D/3D) به طور مشابه برای حوضه‌های انتقال با عرض کمتر از ۱ متر تا ترانسکت‌هایی با عرض چند ده یا صدها متر و شامل کاربردهای آزمایشگاهی (Silliman و همکاران، ۲۰۰۲) و میدانی (Siyal و همکاران، ۲۰۰۹) به کار گرفته شده است. مدل‌های HYDRUS را می‌توان هم برای مسائل مستقیم، زمانی که شرایط اولیه و مرزی برای همه فرآیندهای درگیر و پارامترهای مدل مربوطه مشخص هستند و هم برای مسائل معکوس، زمانی که برخی از پارامترها نیاز به کالیبره شدن یا تخمین از داده‌های مشاهده‌شده دارند، استفاده کرد. با این حال، معمولاً استفاده از HYDRUS برای کاربردهای سه‌بعدی بزرگ (یعنی اندازه حوضه آبریز) توصیه نمی‌شود. زیرا معادله ریچاردز که به شدت غیرخطی است، در مکان‌هایی که گرادیان‌های هیدرولیکی بزرگی وجود داشته باشد، تخمین‌های دقیقی ارائه نمی‌دهد. از سوی دیگر، هیچ محدودیتی در مقیاس زمانی وجود ندارد، که می‌توانند از چند دقیقه برای مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس کوچک

تا صدها هزار سال متغیر باشد (Šimunek و همکاران، ۲۰۱۲) (جدول ۱). در ادامه، مقیاس زمانی (شکل ۱) و محدوده مکانی (شکل ۲) آب برگشتی قابل تخمین به روش‌های مختلف مورد بحث در بالا آورده شده است.



شکل ۱ –مقیاس زمانی تغذیه مجدد قابل برآورد به روش‌های مختلف (Scanlon و همکاران، ۲۰۰۲)

(دوره‌های زمانی قابل تخمین توسط ردیاب‌ها در مناطق هیدرولوژیکی اشباع و غیر اشباع، فراتر از دامنه نشان داده شده در شکل است.)



شکل ۲–مقیاس مکانی شارژ مجدد قابل برآورد به روش‌های مختلف (Scanlon و همکاران، ۲۰۰۲)

(تخمین‌های با مقیاس نقطه‌ای در دامنه ۱ تا یک متر قابل ارائه هستند)

افزایش استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)[9] در مدیریت منابع آب، به ویژه در تفسیر و تجسم داده‌های مکانی بسیار مؤثر است. Tiwari و همکاران (۲۰۱۶) با موفقیت کاربرد نقشه‌برداری زمین‌آماری[10]، نوسانات سطح آب در دره آئوستا در ایتالیا را نشان دادند. Singh و Kasana (۲۰۱۷) کاربرد GIS را در درک تغییرات مکانی و زمانی در نوسانات سطح آب زیرزمینی (GWL)[11] در هاریانا را گزارش کردند. Anand و همکاران (۲۰۲۰) تغییرات بلندمدت و مکانی-زمانی در سطح آب‌های زیرزمینی را براساس کاربردهای GIS در حوضه رودخانه باوانی پایین هند شناسایی کردند. نوسانات سطح آب زیرزمینی در ناحیه تانجاور با استفاده از روش‌های نقشه‌برداری هیدروژئولوژیکی و GIS مطالعه شد. برای این منظور، داده‌های بلندمدت ۳۲ ساله سطح آب‌های زیرزمینی (۲۰۱۵-۱۹۸۴) از ۵۷ چاه مشاهده‌ای که در منطقه مورد مطالعه پراکنده بودند، از ادارات دولتی جمع‌آوری و تغییرات فصلی

سطح آب‌های زیرزمینی به صورت مکانی برای فصول مختلف با استفاده از GIS ترسیم شد. نتایج نشان داد که میانگین سطح آب زیرزمینی سالانه در تمام فصول بارندگی در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ بیش از ۱۵ متر (زیر سطح زمین) کاهش یافته است که نشان‌دهنده نفوذ کمتر بارندگی و بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی است (Anand و همکاران، ۲۰۲۰).

Batelaan و De Smedt (۲۰۰۷) با بکارگیری روش WetSpass[۱۲] مبتنی بر GIS در ترکیب با یک مدل آب زیرزمینی، توزیع مکانی تغذیه متوسط در بلندمدت را به طور دقیق برای ۱۷ حوضه آبریز در بلژیک و هلند با موفقیت شبیه‌سازی کردند و نتیجه گرفتند تغذیه به میزان زیادی به بافت خاک و پوشش زمین بستگی دارد و رواناب سطحی حدود ۵۵٪ روی سطوح غیرقابل نفوذ و با بافت خاک سنگین تولید می‌شود که ۲ تا ۵ برابر بیشتر از رواناب حاصل از پوشش‌های طبیعی و کشاورزی است. در حدود ۲۵٪ از منطقه مورد مطالعه، شرایط سطح آب کم‌عمق باعث تعرق از آب‌های زیرزمینی می‌شود که به طور متوسط ۱۱٪ از کل تعرق را تشکیل می‌دهد. تغذیه در این مناطق در مقایسه با میانگین کلی، ۱۵٪ کاهش می‌یابد (Batelaan و De Smedt، ۲۰۰۷).

برخی از محققین در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی مقدار RF را معادل باقیمانده ضریب استاندارد هیدرولوژیکی (E_0) نسبت به واحد در نظر گرفته‌اند ($RF=1-E_0$) (Kahil و همکاران، ۲۰۱۸؛ Maneta و همکاران، ۲۰۲۰). E_0 به طور معمول یک مقدار ثابت برای هر سیستم آبیاری است و حدود ۹۵ درصد برای روش‌های آبیاری قطره‌ای، ۸۰ درصد برای روش‌های آبیاری بارانی و ۶۰ درصد برای روش‌های آبیاری جویچه‌ای در نظر گرفته می‌شود (Berbel و همکاران، ۲۰۲۴). آژانس آب[۱۳] (CHG) مقدار E_0 را برای آبیاری بارانی ۰/۸۳ و برای آبیاری جویچه‌ای ۰/۷۸ در نظر می‌گیرد (CHG، ۲۰۲۳). Dewandel و همکاران (۲۰۰۸) مقدار جریان برگشتی آبیاری را برای کشت برنج با استفاده از آبیاری با آب راکد بیش از ۵۰ درصد و در مورد روش آبیاری قطره‌ای صفر درصد گزارش کردند.

۵- برآورد میزان آب برگشتی با بکارگیری فناوری سنجش از دور (RS[۱۴])

بررسی‌ها نشان می‌دهد که تحقیقات و مطالعات در خصوص آب برگشتی کشاورزی، در حوزه فناوری سنجش از دور شرایط ضعیف‌تری داشته و کمتر به این موضوع پرداخته شده است. عمده تلاش‌های صورت گرفته در استفاده از فناوری سنجش از دور در زمینه بیلان آب بوده که در آن بر موضوع آب برگشتی آبیاری در بزرگ مقیاس توجه جدی نشده است.

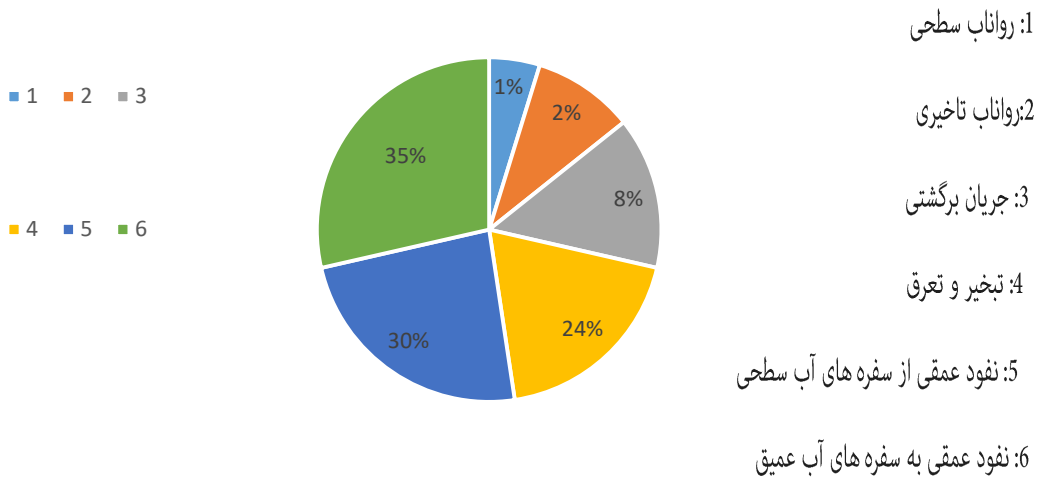
Zegait و همکاران (۲۰۲۴) به منظور بررسی چالش‌های مدیریت منابع آب، به ویژه در مورد مسائل آب در جنوب الجزایر و محدودیت‌های مدیریتی مرتبط، از روش‌های سنجش از دور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ برای تجزیه و تحلیل تغییرات زمین‌های شهری و کشاورزی استفاده نمودند. این پژوهشگران برای توسعه مدل اصلی، مدل ارزیابی و برنامه‌ریزی آب (WEAP[۱۵]) را با داده‌های ماهواره‌ای ادغام نموده و سناریوهای مدیریتی متعدد (بهبود یافته، استاندارد شده، بهینه، پایدار) را از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ پیش‌بینی نمودند. این تحلیل شامل پیش‌بینی تقاضای جهانی آب و جریان بازگشتی کلی برای سناریوهای مختلف آینده بود. نتایج این مطالعه بر ضرورت اجرای سیاست‌های مدیریت پایدار، از جمله استراتژی‌هایی برای کاهش هدررفت آب و ایجاد استانداردهای خاص مصرف و همچنین بر اهمیت اتخاذ روش‌های جدید آبیاری و ترویج استفاده مجدد از آب تصفیه شده برای اهداف آبیاری تأکید می‌کند.

Rautela و همکاران (۲۰۲۲) از فناوری سنجش از دور، بارش و دمای شبکه‌ای با وضوح بالا و مدل SWAT در داخل GIS، برای تعیین اجزای بیلان آب در حوضه رودخانه کوتیادی در چین استفاده نمودند. نتایج نشان داد در این منطقه ساحلی که میانگین دمای هوای محیط ۳۳/۵- ۳۰/۳ درجه سانتی‌گراد است، حدود ۳۰٪ از کل بارندگی به جریان برگشتی اختصاص داشت (شکل ۳).

مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری و برآورد مقدار جریان برگشتی و کاربرد آنها به طور خلاصه در جدول (۱) ارائه شده است.

کشاورزی فاریاب، مقدار جریان برگشتی و عوامل موثر بر آن

در سطح جهانی، کشاورزی فاریاب بزرگترین استخراج‌کننده و مصرف‌کننده غالب منابع آب زیرزمینی است و با اقتصادهای کشاورزی وابسته به آب‌های زیرزمینی که به طور گسترده ای تکامل یافته‌اند، حدوداً ۷۰ درصد برداشت آب در سراسر جهان را به خود اختصاص می‌دهد (Crovella و همکاران، ۲۰۲۲). اما در بسیاری از مناطق خشک و مستعد خشکسالی، استفاده بی‌رویه باعث تخلیه جدی آبخوان‌ها و تخریب محیط‌زیست می‌شود و شیوه‌های کشت نیز تأثیر عمده‌ای بر تغذیه و کیفیت آب زیرزمینی دارند (Willis و همکاران، ۱۹۹۷). بر مبنای برآورد Siebert و همکاران (۲۰۱۰) در مجموع در خاورمیانه و آفریقای شمالی ۲/۹ میلیون هکتار زمین تحت آبیاری از منابع آب زیرزمینی وجود دارد که حدود ۴۳ درصد مجموع اراضی این مناطق را شامل می‌شود و ۴۴ درصد حجمی آب زیرزمینی برای آبیاری این مناطق استفاده می‌گردد که حدود ۸۷ کیلومترمکعب بر ایکر[۱۶] است (جدول ۲).



شکل ۳- اجزاء بیلان آب برای حوضه رودخانه کوتیادی در چین (Rautela و همکاران، ۲۰۲۲)

جدول ۱- مقایسه روش‌های اندازه‌گیری و برآورد مقدار جریان برگشتی و کاربرد آنها (Scanlon و همکاران، ۲۰۰۲)

نام روش	مقیاس زمانی	مقیاس مکانی	توضیحات
لایسی‌متر	دقیقه تا سال	بسته به دقت اندازه‌گیری و مساحت لایسی‌متر از چند میلی مترمربع تا چندین متر مربع	برای ارزیابی تبخیر و تعرق مناسب‌تر از تغذیه هستند.
تعادل جرم کلرید (CMB)	یک تا هزاران سال	حدود ۲۰۰ متر تا چندین کیلومتر	یکی از معدود روش‌هایی که می‌تواند نرخ‌های شارژ مجدد بسیار پایین را تخمین بزند و عموماً در این محدوده دقیق‌تر است
ایزوتوپ‌ها	-	-	ایزوتوپ‌های پایدار مولکول آب ($\delta^{18}O$ و δD) می‌توانند سهم نسبی منابع مختلف آب های زیرزمینی را تعیین کنند. با این وجود، پارتیشن‌بندی ایزوتوپی فقط نسبت‌های شارژ را فراهم می‌کند، و کمی‌سازی نرخ شارژ همچنان نیاز به تخمین تغذیه دارد
قانون دارسی	از یک تا صدها سال	در مناطق وسیع (حدود ۱ تا ۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع	تخمین‌های تغذیه براساس قانون دارسی به دلیل تغییرپذیری بالای k(h) بسیار نامطمئن هستند.
مدل‌سازی عددی با استفاده از HYDRUS	به هیچ مقیاس مکانی خاصی محدود نمی‌شوند، مشروط بر اینکه معادلات حاکم به درستی فرموله شده و در آن مقیاس قابل استفاده باشند	هیچ محدودیتی در مقیاس زمانی وجود ندارد، که می‌تواند از چند دقیقه برای مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس کوچک تا صدها هزار سال متغیر باشد.	برای کاربردهای سه‌بعدی بزرگ (یعنی اندازه حوضه آبریز) توصیه نمی‌شود. زیرا معادله ریچاردز که به شدت غیرخطی است، در مکان‌هایی که گرادیان‌های هیدرولیکی بزرگی وجود داشته باشد، تخمین‌های دقیقی ارائه نمی‌دهد.
مدل‌سازی عددی با فناوری سنجش از دور (RS)	-	-	استفاده از این فناوری عمدتاً در زمینه بیلان آب بوده که در آن بر موضوع آب برگشتی آبیاری در بزرگ مقیاس توجه جدی نشده است.

تعاملات بین کشاورزی فاریاب، آب‌های سطحی و منابع آب زیرزمینی اغلب بسیار نزدیک است. برای استفاده بهتر از ذخایر آب زیرزمینی برای کاهش خشکسالی و انطباق با تغییرات آب و هوایی، به راهنمایی‌های سیاستی روشن و اقدام محلی متمرکز نیاز است. برای مؤثر بودن، سیاست‌ها باید متناسب با شرایط هیدروژئولوژیکی محلی و واقعیت‌های کشاورزی و اقتصادی باشد و اجرای آنها مستلزم «ترتیبات نهادی» مناسب با قدرت قانونی برای

مدیریت آب‌های زیرزمینی، مشاکت کامل جامعه کشاورزی و همسویی بیشتر توسعه کشاورزی است. آبیاری توسط تمدن‌های باستانی چین، آمریکای جنوبی و بین‌النهرین در نهایت منجر به شورشدن خاک و توقف تولید کشاورزی شد. ارتباط تاریخی بین شوری خاک و آبیاری منجر به نگرانی در مورد توسعه آبیاری غرقابی و شوری در مناطق تحت آبیاری استرالیا شده است (Willis و همکاران، ۱۹۹۷).

جدول ۲- ارزیابی چهانی آبیاری با آب‌های زیرزمینی (برگرفته از Siebert و همکاران، ۲۰۱۰)

منطقه	آبیاری با آب زیرزمینی Mha	آبیاری با آب زیرزمینی درصد از کل	حجم آب زیرزمینی بکار رفته Km^3a^{-1}	حجم آب زیرزمینی بکار رفته درصد از کل
کل جهان	۱۱۲/۹	%۳۸	۵۴۵	%۴۳
جنوب آسیا	۴۸/۳	%۵۷	۲۶۲	%۵۷
غرب آسیا	۱۹/۳	%۲۹	۵۷	%۳۴
جنوب غرب آسیا	۱/۰	%۵	۳	%۶
خاورمیانه و آفریقای شمالی	۱۲/۹	%۴۳	۸۷	%۴۴
آمریکای لاتین	۲/۵	%۱۸	۸	%۱۹
صحرای جنوب آفریقا	۰/۴	%۶	۲	%۷

آبیاری غرقابی در مقیاس منطقه‌ای، بدون ایجاد زهکشی کافی، سطح ایستابی کم‌عمق و شوری خاک را در مناطق وسیعی از دشت رودخانه نیوساوت‌ولز[۱۷]، استرالیا ایجاد کرده است (Slavich، ۱۹۹۲). افزایش سطح آب در دره Macquarie در نیوساوت‌ولز، استرالیا در اواخر دهه ۱۹۸۰ شناسایی شد که نشان‌دهنده تغذیه آب زیرزمینی است (Willis و همکاران، ۱۹۹۷). گسترش آبیاری غرقابی به عنوان عامل اصلی افزایش تغذیه آب زیرزمینی در این دره ذکر شده است. علاوه بر این افزایش سطح آب منطقه‌ای، آبیاری خاک‌های دوبلکس با تشکیل سفره آبی کم‌عمق همراه بوده است (Loveday و همکاران، ۱۹۷۸؛ Rab و Willatt، ۱۹۸۷؛ Dowling و همکاران، ۱۹۹۱). یک لایه زیرسطحی کمتر نفوذپذیر در برخی از مناطق دره Macquarie مانع نفوذ عمودی آب ناشی از آبیاری بیش از حد و نفوذ افقی از کانال‌ها و مخازن شده است (Willis و همکاران، ۱۹۹۷). این امر منجر به غرقابی و شوری خاک گردیده است. طبق گزارش اخیر، سطح آب زیرزمینی منطقه‌ای به طور متوسط ۳۵۰ میلی‌متر در سال افزایش یافته بود و فشارهای پیزومتریک نشان داد که در منطقه‌ای به وسعت ۱۷۰۰۰ هکتار، سطح ایستابی در حال حاضر کمتر از ۵ متر از سطح زمین است که نشان‌دهنده ۲۰ درصد از زمین‌های توسعه‌یافته برای آبیاری است (Willis و همکاران، ۱۹۹۷). Willis و همکاران (۱۹۹۷) در طی یک مطالعه به برآورد نفوذ عمیق تحت آبیاری در دو خاک در دره Macquarie، به منظور استنباط تغذیه آب زیرزمینی از سه روش استفاده کردند؛ بیلان آب، محاسبات جریان دارسی و مدل‌سازی تعادل جرم کلرید. نتایج نشان داد مدل‌سازی موازنه جرم کلرید و روش بیلان آب تخمین‌های قابل مقایسه‌ای از نفوذ عمیق برای هر خاک ارائه می‌دهند. مدل‌سازی موازنه جرم کلرید به‌عنوان قابل اعتمادترین روش برای تخمین نفوذ عمیق شناسایی شد، اما تنها تخمینی برای کل فصل رشد ارائه داد. نتایج محاسبه‌شده با استفاده از معادلات جریان دارسی بسیار متغیر بودند و بنابراین تخمین‌های نفوذ عمیق غیرقابل اعتماد بودند. تغذیه آب زیرزمینی، با استنتاج از برآورد نفوذ عمیق تعیین شده با مدل موازنه جرم کلرید، برای تخمین میزان افزایش بالقوه سالانه آب زیرزمینی استفاده شد. افزایش بالقوه آب زیرزمینی در طول فصل رشد پنبه (۱۹۹۳-۱۹۹۲) از ۴۶۵ میلی‌متر در زیر خاک رس ترک خورده (G) تا ۲۶۷ میلی‌متر در خاک قهوه‌ای قرمز (C) متغیر بود. Willis و همکاران (۱۹۹۷) نتیجه گرفتند که تغذیه و افزایش آب زیرزمینی به شدت به شرایط آب و هوایی حاکم در این دوره بستگی دارد. مقدار جریان برگشتی آبیاری برای دو نوع خاک G و C به ترتیب ۳۱ و ۲۳ درصد برآورد شد. هدایت هیدرولیکی پایین‌تر زیرزمینی و وجود سطح آب زیرزمینی کم عمق، نفوذ عمیق در خاک C را نسبت به خاک G محدود می‌کند. نفوذ عمیق در هر دو خاک معنی‌دار بود (جدول ۳) (Willis و همکاران، ۱۹۹۷).

کارایی طراحی و روش‌های آبیاری فعلی نیازمند ارزیابی برای شناسایی یک روش آبیاری است که نفوذ عمیق را در روش‌های آبیاری شیاری برای گیاه پنبه به حداقل برساند (Willis و همکاران، ۱۹۹۷). همچنین سیستم‌های تناوب زراعی، شامل محصولات زمستانه برای استفاده از آب باقیمانده در پروفیل خاک پس از فصل آبیاری و بارندگی زمستان، ممکن است به عنوان گزینه‌ای برای کاهش نفوذ عمیق در نظر گرفته شود.

جدول ۳- مقادیر نفوذ عمقی و کسر آبشویی برای دو بافت خاک با بکارگیری روش‌های مختلف (Willis و همکاران، ۱۹۹۷)

روش	خاک	نفوذ عمیق (mm)	انحراف استاندارد (mm)	کسر آبشویی[18]
بیلان آب[19]	Mullah (G)	236	n/a	31
	Wilga ©	145	n/a	23
تعادل جرم کلرید	Mullah (G)	214	13	28
	Wilga ©	104	2	17
محاسبات جریان دارسی[20]	Mullah (G)	67	53	8

Asare و همکاران (۲۰۰۰) با برنامه‌ریزی دقیق آبیاری، در یک سایت خشک کانزاس و Mankin و Koelliker (۲۰۰۰)، در یک سایت در نیومکزیکو، تلفات آب در زیر منطقه ریشه‌زایی را برای یونجه شبیه‌سازی کردند و نتایج آنها تا ۵۰٪ نشت عمیق را در هر دو سایت نشان داد. همچنین نفوذ کل زیر ناحیه ریشه‌زایی از نظر عمق کل در سال از ۹/۵ میلی‌متر در سال در جنوب استرالیا (Leaney و Herczeg، ۱۹۹۵) تا ۲۰۲ میلی‌متر در سال در جنوب‌شرقی استرالیا (Willis و Black، ۱۹۹۶) و ۲۹۰ میلی‌متر در سال در کالیفرنیا (Young و Wallender، ۲۰۰۲) متغیر است.

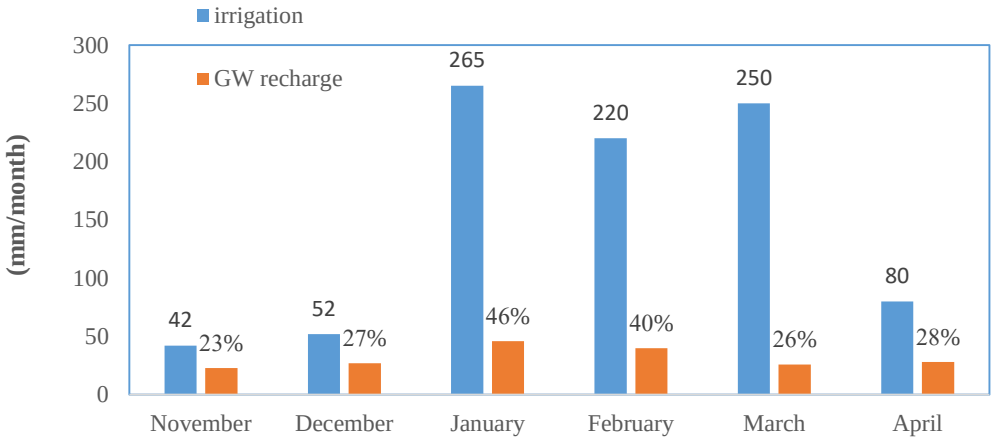
Ochoa و همکاران (۲۰۰۷) دریافتند که در یک خاک لومشنی، درصد قابل توجهی (۶۰-۲۵ درصد) از آب استفاده شده برای آبیاری سیستم کشت مخلوط یونجه-علف در طی آبیاری غرقابی به زیر ناحیه ریشه نفوذ کرده بود و افزایش موقت سطح آب تا ۳۸۰ میلی‌متر در سال اتفاق افتاد. با این حال، ویژگی‌های خاک سطحی و زیرسطحی و روش آبیاری، می‌توانند به طور قابل توجهی بر میزان نفوذ عمیق تاثیر بگذارد. Willis و Black (۱۹۹۶) به این نتیجه رسیدند که محتوای خاک رس در افق B با نرخ نفوذ عمیق مرتبط باشد. همچنین Ochoa و همکاران (۲۰۰۹) دریافتند که خاک‌های با محتوای رس بالا یا خاک‌های درشت‌بافت با لایه‌های رسی غیرقابل نفوذ در عمق، می‌توانند سرعت و مقدار نفوذ آب از طریق ناحیه توسعه ریشه و رسیدن به سفره آب زیرزمینی را کاهش دهند. این پژوهش‌گران همچنین نفوذ عمقی آب مازاد آبیاری را به عنوان منبع مهمی برای تامین آبخوان‌های کم‌عمق در مناطق خشک جنوب غربی ایالات متحده گزارش کردند. تغذیه آبخوان حاصل از نفوذ آبیاری می‌تواند در دره‌های آبرفتی پوشاننده سفره‌های آب زیرزمینی کم‌عمق، جایی که خاک‌های بسیار نفوذپذیر اجازه نفوذ سریع آب و پر کردن آبخوان را می‌دهند، قابل توجه‌تر باشد. روش WBM و روش WTFM برای تخمین تغذیه آبخوان در سطح مزرعه (کمتر از یک هکتار) و WTFM برای تعیین تغذیه در سطح دره (۴۰ کیلومترمربع) استفاده شد. نتایج نشان داد که بسته به روش آبیاری، در سطح مزرعه مقادیر تغذیه آبخوان از ۰ تا ۳۶۹ میلی‌متر در سال هنگام استفاده از WBM و از ۰ تا ۲۳۰ میلی‌متر سال در هنگام استفاده از WTFM متغیر بود. برای فصل آبیاری، در سطح دره تغذیه مجدد تجمعی، از ۱۰۴۴ تا ۱۳۵۰ میلی‌متر در سال متغیر بود. هنگامی که مشاهدات میدانی قابل اعتماد در دسترس باشد، WBM می‌تواند تخمین خوبی از تغذیه آب بالقوه ارائه دهد. مشخص شد که WBM در مقیاس میدانی تمایل دارد برآوردهای بالاتری از تغذیه آبخوان (۲۶۹ میلی‌متر) نسبت به WTFM (۱۳۲ میلی‌متر) ارائه دهد. همچنین، در سطح دره، مقادیر بالایی از تغذیه کل آبخوان با میانگین ۱۱۶۹ میلی‌متر در سال مشاهده شد. این مقادیر بالای تغذیه آبخوان به ترکیبی از عوامل، از جمله آبیاری غرقابی، خاک‌های آبرفتی بسیار نفوذپذیر و سطح ایستابی نسبتاً کم‌عمق که امکان انتقال سریع آب آبیاری از سطح خاک، از طریق ناحیه توسعه ریشه و به داخل آبخوان نامحدود را می‌دهد، نسبت داده می‌شود (Ochoa و همکاران، ۲۰۰۷).

Liu و همکاران (۲۰۰۴) نشان دادند که ۲۱/۲ تا ۲۳/۴ درصد آب آبیاری به تغذیه مجدد سفره‌های آب زیرزمینی در شالیزارهای پلکانی کمک می‌کند. Dewandel و همکاران (۲۰۰۸) دریافتند که جریان برگشتی بین ۴۳ تا ۵۹ درصد برای برنج و ۱۵ تا ۳۷ درصد برای سبزیجات متغیر است. Vallet-Coulomb و همکاران (۲۰۱۷) جریان برگشتی آبیاری را کمی ارزیابی کردند و گزارش کردند که جریان برگشت سالانه ۱۴۰ ± ۱۱۹۰ میلی‌متر است که ۵۱ تا ۸۶ درصد از کل آب آبیاری را تشکیل می‌دهد.

سایر مطالعات در سرتاسر جهان نیز نشان داده‌اند که ضرایب جریان برگشتی آبیاری از ۲% تا بیش از ۵۰% برای محصولات مختلف تحت شیوه‌های مدیریتی مختلف متفاوت است (Jalota و Arora، ۲۰۰۲؛ Causapé و همکاران، ۲۰۰۴؛ Hanasaki و همکاران، ۲۰۱۸؛ Jafari و همکاران، ۲۰۱۹؛ Burek و همکاران، ۲۰۱۹). در کره جنوبی، طبق مطالعات Kim و همکاران (۲۰۱۰) نرخ برگشت آب کشاورزی بسته به ویژگی‌های منطقه‌ای و روش‌های کشت محصول مورد استفاده، از ۷۰/۵-۳۸/۱ درصد متغیر است. در پژوهشی دیگر Song و همکاران (۲۰۱۵) جریان برگشتی آبیاری را به سه قسمت جریان برگشت سریع از کانال آبیاری (RFI[21])، جریان برگشت سریع از کانال زهکشی (RFD[22]) و جریان برگشت تاخیری (DRF[23]) تقسیم نمودند. RFI از سطح آب و مقدار خروجی آب در انتهای کانال‌های آبیاری محاسبه و DRF با استفاده از میزان نفوذ عمقی اندازه‌گیری شده از شالیزارهای منطقه آبیاری شده برآورد شد. نتایج نشان داد نسبت جریان برگشتی RFI و RFD به ترتیب در جولای و می بیشترین مقدار را داشتند (۳۴/۹٪ و

۷۲/۳٪). میزان تأمین روزانه آب آبیاری برای کشاورزی با RFD به جز در ماه جولای همبستگی نزدیک داشت (ضرایب همبستگی مساوی ۰/۸۶-۰/۷۶ ، در حالی که ضریب همبستگی با RFI در ژوئن و ژوئیه به ترتیب ۰/۵۶و ۰/۴۲ بود ($p<0.01$) و نسبت دبی برگشتی کل در ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ به ترتیب ۸۴/۶ و ۷۹/۱ درصد بود. این نتایج نشان می‌دهد که مقادیر قابل توجهی از آب کشاورزی به عنوان جریان برگشتی آبیاری به نهرها برگشت داده شده است، بنابراین، جریان برگشتی آبیاری باید به طور کامل در برنامه‌ریزی منابع آب کشاورزی در نظر گرفته شود.

Tulip و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند کشاورزی فاریاب در بنگلادش به شدت به آب‌های زیرزمینی متکی است. از سال ۲۰۱۹، آب‌های زیرزمینی منبع آب آبیاری ۷۹ درصد از مناطق آبی در بنگلادش هستند (Mainuddin و همکاران، ۲۰۱۹). طی یک مطالعه که بر ارزیابی تأثیر آبیاری بر تغذیه آب زیرزمینی در منطقه شمال غربی بنگلادش، راجشاهی، متمرکز بود، تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از مدل بیلان آب WetSpass انجام گرفت و در نهایت، تأثیر آبیاری بر تغذیه آب زیرزمینی و سهم جریان برگشتی آبیاری به سیستم آب زیرزمینی تجزیه و تحلیل گردید (Tulip و همکاران، ۲۰۲۲). ۵۰-۲۰٪ از کل آب آبیاری به عنوان جریان برگشتی مشاهده شد (۳۳٪ به طور متوسط). حدود ۹۸ درصد از تغذیه آب زیرزمینی از جریان برگشتی آبیاری در طول فصل خشک رخ داد. جریان برگشتی بر مبنای توزیع مکانی از ۳۰۵ تا ۴۰۱ میلی‌متر در سال متغیر بود و به طور قابل توجهی، در طول فصل خشک، به تغذیه آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه کمک کرد. متوسط جریان برگشتی ۳۵۳ میلی‌متر در سال بود. بیشترین در ژانویه (۴۶ درصد) و کمترین آن در نوامبر (۲۳ درصد) بود (شکل ۴).

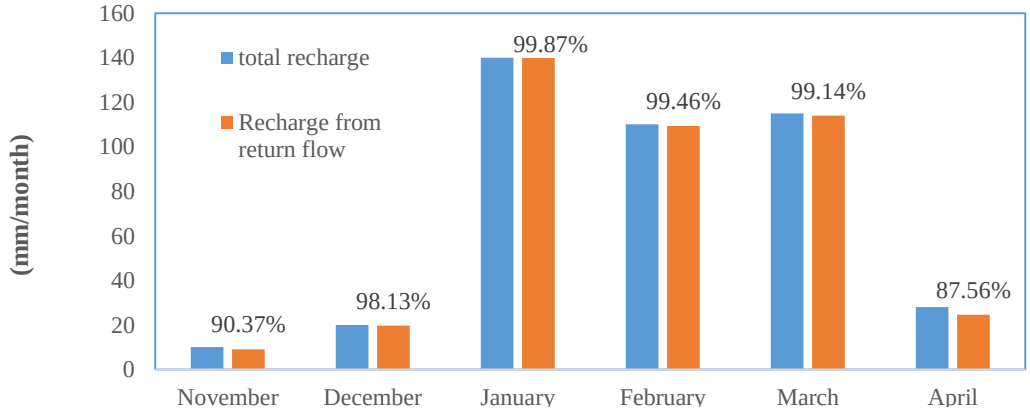


شکل ٤- عمق آب به کار رفته برای آبیاری (آبی) و سهم آن در میزان آب برگشتی به آب‌های زیرزمینی (به درصد) (قرمز) (Tulip و همکاران، ۲۰۲۲)

یک مطالعه در مونتانا مسیرهای جریان را به هم مرتبط کرد و نشان داد که ۵۰ درصد آب آبیاری به نفوذ عمیق و تغذیه آب زیرزمینی تبدیل می‌شود و این تغذیه به نوبه خود به جریان برگشتی آب زیرزمینی تبدیل می‌شود که جریان رودخانه را افزایش می‌دهد (Kendy و Bredehoeft، ۲۰۰۶). Kimو همکاران (۲۰۱۰) مقدار جریان برگشتی از مزارع برنج را با بکارگیری مدلی که بر مبنای سنجش رطوبت خاک توسعه یافته بود، ۲۵/۷ درصد آب مورد نیاز سالانه پیش‌بینی کردند که از این مقدار ۱۴/۱ درصد به صورت جریان سریع و ۱۱/۶ درصد به صورت جریان کند وارد زهکش‌ها می‌شود. Jiménez-Martínezو همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از مدل HYDRUS-1D، مقدار جریان برگشت آبیاری برای سیستم تناوب زراعی خربزه تابستانی و کاهو پاییزی را ۶۸- ۲۲ درصد برآورد کردند. به طور مشابه، Poch-Massegú و همکاران (۲۰۱۴) از HYDRUS-1D برای تخمین جریان برگشتی آبیاری در سیستم تحت تناوب زراعی کاهو- خربزه استفاده و مقدار آن را ۳۷ درصد کل آب مصرفی برآورد کردند. مطالعه Tulip و همکاران (۲۰۲۲) نشان داده است سهم عمده جریان برگشتی ناشی از آبیاری است و بارندگی سهم اندکی در تغذیه آب‌های زیرزمینی ایفا می‌کند. طی بررسی انجام گرفته توسط Tulip و همکاران (۲۰۲۲)، سهم آبیاری در جریان برگشتی در ماه‌های مختلف از ۸۷/۵۶ تا ۹۹/۸۷ درصد متغیر بود که کمترین آن در نوامبر و بیشترین آن در ژانویه اتفاق می‌افتد (شکل ۵).

Uribe و همکاران (۲۰۱۵) با بکارگیری ترکیبی مشخصات ایزوتروپی اجزای مختلف چرخه آب و مدل بارش رواناب، مقدار تغذیه متوسط طولانی‌مدت در یک حوضه آبریز بسته[۲۴] در شیلی را معادل ۱۵ درصد بارش سالانه برآورد کردند. این حوضه عمدتاً دارای رژیم بارانی و بدون ذوب یخچال‌های طبیعی است. بیش از ۸۰ درصد بارندگی در حوضه بین دسامبر و مارس رخ می‌دهد. سه سفره آب زیرزمینی در سیستم هیدروژئولوژیکی حوضه تعریف شده است. عمق سفره آب زیرزمینی بالایی از ۲۰ تا ۷۰ متر متغیر است و از رسوبات رودخانه‌ای و آبرفتی تشکیل شده

است. سفره آب میانی، که سفره اصلی است، از رسوبات دوران سوم زمین‌شناسی کاملاً نفوذپذیر ساخته شده است که علیرغم وجود رس، نفوذپذیری بالایی دارد. سفره آب زیرین، از گدازه‌های میوسن و پلیوسن تشکیل شده است و امکان ذخیره و جریان آب را فراهم می‌کند.



شکل ۵- متوسط ماهانه میزان آب برگشتی آب زیرزمینی کل (آبی) و آب برگشتی از آبیاری (قرمز) (Tulip و همکاران، ۲۰۲۲)

Ebrahimi و همکاران (۲۰۱۶) در دشت موسیان در ایلام، با استفاده از رویکرد مدل‌سازی معکوس و فناوری سنجش از دور (RS) برای کمّی‌سازی تغذیه آب‌های زیرزمینی، مقدار جریان برگشت ناشی از بارش را ۱۰/۸ درصد برآورد نمودند. منطقه مورد مطالعه از مخروط‌افکنه‌ها (رسوبات کواترنری) با سنگ بستر در ارتفاعی از ۵۵- متر تا ۱۴۱ متر بالاتر از سطح دریا تشکیل شده است. قسمت شمال شرقی دشت موسیان توسط لایه‌ای از مارن کنگلومرایی و کنگلومرای ماسه‌ای که سازند بختیاری را تشکیل می‌دهند و در دوره پلیوسن بالایی ایجاد شده‌اند، محدود شده است. این منطقه دارای آب و هوای خشک با تابستان‌های گرم و زمستان‌های معتدل و دارای میانگین بارندگی سالانه ۲۶۱ میلی‌متر و میانگین تبخیر بالقوه سالانه حدود ۳۵۶۰ میلی‌متر است. بخش عمده بارندگی در منطقه مورد مطالعه در دوره پاییز-زمستان رخ داده است. در این مطالعه، عمق سطح ایستابی در بیشتر مناطق آبیاری شده سه تا ۸۲ متر بود.

Guo و همکاران (۲۰۱۹) با بکارگیری روش‌های ایزوتوپی، آب برگشتی ناشی از آبیاری[۲۵] و جریان آب زیرزمینی جانبی[۲۶] از کوه‌های کیلیان را که به عنوان دو منبع اصلی آب‌های زیرزمینی کم عمق محسوب می‌شوند به ترتیب ۳۵ و ۶۵ درصد از کل تغذیه تخمین زدند. منطقه مورد مطالعه (واحه دان‌هوانگ) در شمال غربی چین واقع شده و با آب و هوای خشک قاره‌ای با تغییرات گسترده در دما و بارندگی مشخص می‌شود. میانگین بارندگی سالانه تقریباً ۴۰ میلی‌متر است. بارندگی پراکنده و بسیار متغیر است و از ۱۳ میلی‌متر در سال‌های خشکسالی تا بیش از ۱۳۰ میلی‌متر در سال‌های مرطوب متغیر است. اکثر بارندگی در واحه دان‌هوانگ در ماه‌های تابستان از ماه مه تا سپتامبر رخ می‌دهد که تقریباً ۷۰٪ از بارندگی سالانه را تشکیل می‌دهد. تبخیر سالانه بیش از ۱۸۰۰ میلی‌متر است که به طور قابل توجهی بیشتر از بارندگی محلی است. سفره‌های آب زیرزمینی در واحه دان‌هوانگ عمدتاً از قلوه‌سنگ، شن و ماسه بسیار نفوذپذیر و آبخوان از رس تشکیل شده است. رسوبات کواترنری که در قسمت جنوبی رسوب کرده‌اند، به ضخامت صدها متر و در لبه حوضه به ضخامت ده‌ها متر می‌رسند. این رسوبات سیستم‌های سفره آب زیرزمینی آزاد و محدود را تشکیل می‌دهند که منابع قابل توجهی از تأمین آب هستند.

تاثیر بکارگیری روش‌های صرفه‌جویی در مصرف آب (روش‌های نوین آبیاری و پوشش کانال) بر مقدار آب برگشتی

اتخاذ شیوه‌های صرفه‌جویی در مصرف آب منجر به پایین آمدن سطح آب زیرزمینی و کنترل اثرات شوری مربوط به آبیاری بیش از حد می‌شود. طرح آبیاری جیفانگژا در ناحیه آبیاری تائو به عنوان مطالعه موردی برای تجزیه و تحلیل دینامیک زمانی و مکانی سطح ایستابی آب زیرزمینی توسط Xu و همکاران (۲۰۱۰) به کار گرفته شد. با این هدف و برای ارزیابی اثرات شیوه‌های مختلف صرفه‌جویی در مصرف آب، یک مدل بیلان آب زیرزمینی توسعه داده شد. این مدل با مجموعه داده‌های ماهانه نسبت به دوره‌های غیرمنجمد سال‌های ۱۹۹۹-۱۹۹۷ کالیبره شد و با مجموعه داده‌های بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ اعتبارسنجی[۲۷] شد. تخلیه آب زیرزمینی با تبخیر مستقیم و جذب ریشه گیاه ۸۲ درصد از کل تخلیه سالانه آب زیرزمینی را تشکیل می‌دهد. پس از اعتبارسنجی، این مدل برای ارزیابی اثرات روش‌های مختلف آبیاری کانال و مزرعه برای صرفه‌جویی در مصرف آب استفاده شد. مشاهده شد که پوشش کانال، ارتقاء ساختارهای تنظیم و کنترل هیدرولیک در کانال (به میزان ۸۰-۴۰ درصد)، ممکن است سطح ایستابی آب زیرزمینی را ۰/۴۸-۰/۲۸ متر پایین‌تر ببرد (Xu و همکاران، ۲۰۱۰). پایین‌تر رفتن سطح ایستابی، به کاهش صعود

موئینگی و در نتیجه کاهش تبخیر و جذب آب زیرزمینی توسط ریشه‌های گیاه (تا ۱۲۸ میلی‌متر، بسته به روش صرفه‌جویی در مصرف آب) و نهایت کاهش مشکلات شوری منجر می‌شود (جدول ۳) (Xu و همکاران، ۲۰۱۰). بر مبنای یافته Xu و همکاران (۲۰۱۰) استفاده بیشتر از شیوه‌های صرفه‌جویی در آب ممکن است منجر به صرفه‌جویی کل آب تا ۳۶۳ میلی‌متر در رابطه با وضعیت فعلی شود، اما باعث کاهش بیش از حد GWL تا ۷۱سانتی‌متر گردد. در منطقه مورد مطالعه، عمق آبخوان به طور متوسط ۱/۴۵-۱ متر در طول فصل زراعی گزارش شد (جدول ۴).

جدول ٤- تغییرات سطح آب زیرزمینی و مصرف آب آبیاری مربوط به روش‌های مختلف صرفه‌جویی در مصرف آب برای دوره بدون یخبندان در سال هیدرولوژیکی عادی (Xu و همکاران، ۲۰۱۰)

ردیف	روش‌های بکار گرفته شده برای صرفه‌جویی در مصرف آب	کاهش سطح آب زیرزمینی (cm)	کاهش تبخیر از سطح آب زیرزمینی (mm)	کاهش کل آب منحرف شده برای آبیاری (mm)	عمق سفره آب زیرزمینی از جون تا آگوست (m)
۱	فناوری‌های پوشش کانال و آبیاری در شرایط فعلی	-	-	-	۱/۴۵-۱
۲	پوشش کانال و ارتقاء سازه‌های هیدرولیکی (۴۰٪)	۲۸	۶۶	۱۶۸	۱/۶۸-۱/۳۲
۳	پوشش کانال و ارتقاء سازه‌های هیدرولیکی (۶۰٪)	۳۹	۸۶	۲۳۷	۱/۷۸-۱/۴۵
۴	پوشش کانال و ارتقاء سازه‌های هیدرولیکی (۸۰٪)	۴۸	۱۰۰	۲۹۴	۱/۸۴-۱/۵۶
۵	فناوری آبیاری ارتقا یافته در ۲۵٪ از منطقه	۱۳	۳۴	۹۲	۱/۵۶-۱/۱۴
۶	فناوری آبیاری ارتقا یافته در ۵۰٪ از منطقه	۲۳	۵۷	۱۳۰	۱/۶۲-۱/۲۶
۷	ترکیب ۲ و ۵	۳۲	۷۵	۲۱۹	۱/۷۲-۱/۳۷
۸	ترکیب ۳ و ۵	۴۳	۹۳	۲۸۳	۱/۸۱-۱/۴۹
۹	ترکیب ۴ و ۵	۵۳	۱۰۷	۳۳۶	۱/۸۹-۱/۶۱
۱۰	ترکیب ۲ و ۶	۴۸	۹۹	۲۵۱	۱/۸۶-۱/۵۴
۱۱	ترکیب ۳ و ۶	۵۹	۱۱۵	۳۱۲	۱/۹۶-۱/۶۷
۱۲	ترکیب ۴ و ۶	۷۱	۱۲۸	۳۶۳	۲/۰۷-۱/۸۱

نکته قابل توجه اینکه بالابردن راندمان آب در بخش کشاورزی با سرعتی بیش از کاهش برداشت‌ها، برای بیلان منابع آب مضر است. یعني اجرای پروژه‌های افزایش راندمان آبیاری قبل از تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی، منجر به تشدید افت آبخوان می‌گردد؛ زیرا افزایش راندمان باعث کاهش جریان آب بازگشتی و افزایش مصرف می‌شود.

در حوضه آبخیز هنریس‌فورک، یک منطقه کشاورزی نیمه خشک در ایالات متحده، افزایش راندمان آبیاری، جریان برگشتی آب زیرزمینی حجمی را از ۳۲۲ مگامترمکعب (Mm^3) در سال‌های ۱۹۷۸ تا ۲۰۰۰ به ۲۳/۱ مگامترمکعب (Mm^3) در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ کاهش داد (Morrisett و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین یافته‌های García-Garizábal و Causapé (۲۰۱۰) نشان داد زهکشی آب آبیاری در سال ۲۰۰۷ در مقایسه با سال ۲۰۰۰، ۸۸ درصد کمتر بود که در نتیجه‌ی کاهش نیاز آبی (۵۹۴ میلی‌متر در سال ۲۰۰۷ در مقابل ۷۵۲ میلی‌متر در سال ۲۰۰۰) و افزایش راندمان آبیاری از ۶۷ درصد در سال ۲۰۰۰ به ۹۳ درصد در سال ۲۰۰۷ بود که باعث شد رودخانه ریگل در مقایسه با سال ۲۰۰۰، ۱۳ درصد جریان کمتری داشته باشد (García-Garizábal و Causapé، ۲۰۱۰).

در یک پژوهش در هند (Sakib، ۲۰۲۴) مقدار تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی از منابع مختلف شامل بارندگی، آبیاری اراضی کشاورزی و نشت از کانال به روش کمیته تخمین منابع آب زیرزمینی (GEC[28]-2015) برای یک دهه (۲۰۲۲-۲۰۱۲) برآورد شد. نتایج نشان داد مقدار تغذیه از ۴۳۸۱۳۶ مترمکعب در سال ۲۰۱۶ تا ۱۶۷۷۷۳۰ مترمکعب در سال ۲۰۱۴ متغیر بود که ۱۳/۵-۳/۶ درصد از کل تغذیه را آب آبیاری دربرگرفت و نشت از کانال بالاترین منبع کمک‌کننده به تغذیه آب‌های زیرزمینی در بین سایر منابع گزارش شد که ۲۲ درصد کل تغذیه را به خود اختصاص داد (Sakib، ۲۰۲۴).

Jaber و همکاران (۲۰۰۶) همبستگی بین تغییرات سطح ایستابی با بارندگی، آبیاری نشتی، آبیاری قطره‌ای و زهکشی

را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. همبستگی با بارندگی، آبیاری نشتی، و زهکشی بالا بود (R^2 در محدوده ۰/۴۶ تا ۰/۹۷). همبستگی‌های بالا نشان می‌دهد که اثر معکوس ویرینگرمیر[۲۹] در پاسخ به بارندگی به راحتی قابل پیش‌بینی است و در شرایط سطح ایستابی کم‌عمق این رابطه خطی است. این، همچنین برای رویدادهای آبیاری نشتی و زهکشی صادق است. این روابط می‌توانند ابزارهای ارزشمندی را در اختیار مدیران آب قرار دهد تا حجم زهکشی را که باید قبل از طوفان پیش‌بینی شده پمپاژ کنند تا از سیل جلوگیری کنند، تخمین بزنند. همچنین تخمینی از مقدار آبی که در طول رویدادهای آبیاری نشتی اعمال می‌شود تا سطح آب زیرزمینی را به سطح از پیش تعریف شده برساند، ارائه می‌دهد. به طور کلی، این مطالعه نشان می‌دهد که تغییر سطح ایستابی در طول اثر معکوس ویرینگرمیر می‌تواند با بارندگی، آبیاری نشتی و زهکشی با روابط خطی مرتبط باشد و در نهایت می‌تواند برای محاسبه تغذیه استفاده شود. این می‌تواند برای مدیریت بهتر آبیاری نشتی و زهکشی استفاده شود که منجر به صرفه‌جویی در مصرف آب و همچنین کاهش تخلیه مواد مغذی به آب‌های زیرزمینی و سطحی می‌شود. اثر ویرینگرمیر زمانی رخ می‌دهد که حاشیه موئینگی تا سطح خاک گسترش یابد. در این حالت مقدار کمی باران یا آبیاری برای نزدیک کردن سطح آب به سطح خاک کافی است. آبیاری قطره‌ای و سطح ایستابی همبستگی پایینی داشتند (R^2 بین ۰/۲۶ تا ۰/۴۴ بود). از آنجایی که آبیاری قطره‌ای با سرعت کم انجام می‌شود، احتمال رسیدن آب به سطح ایستابی به میزان تبخیر و تعرق (ET^{30}) در زمان استفاده بستگی دارد. هنگامی که ET کم است، بیشتر آب به آب‌های زیرزمینی می‌رسد و سطح ایستابی بالاتر دیده می‌شود. هنگامی که ET بالا باشد، هیچ تغییری در سطح ایستابی وجود ندارد. علاوه بر این، لایسیمترهای نشتی نسبت به لایسیمترهای قطره‌ای بین تغییر سطح ایستابی و بارندگی، آبیاری نشتی و زهکشی همبستگی کمتری نشان دادند. این امر به دلیل تفاوت در تعداد منافذ محبوس شده با هوا، به دلیل میزان بالای مصرف آب است و در نتیجه باعث ایجاد رطوبت متفاوت در خاک در طول فرایند خیس شدن و خشک شدن خاک می‌شود (Jaber و همکاران، ۲۰۰۶). اکثر محصولات در فلوریدا در خاک‌های شنی و آهکی با هدایت هیدرولیکی بالا، با سطح ایستابی بالا (۱/۲۵ تا ۲ متر) رشد می‌کنند و این شرایط منجر به تبادل گسترده آب خاک و آب زیرزمینی می‌شود. این مبادله با استفاده گسترده از روش آبیاری نشتی برای محصولات ردیفی افزایش می‌یابد. تغذیه مجدد آب زیرزمینی تقریباً ۴۲ درصد از مجموع آب آبیاری و بارندگی را دربرمی‌گیرد (Jaber و همکاران، ۲۰۰۶). Xu و همکاران (۲۰۱۰) مشاهده کردند در Hetao، عمق مناسب سطح ایستابی برای رشد محصول در طول دوره رشد ۲-۱/۵ متر است. اعماق بیشتر از ۲ متر ممکن است به دلیل کاهش صعود موئینگی، باعث تنش آبی روی پوشش گیاهی شود و اعماق کمتر از ۱/۵ متر ممکن است باعث مشکلات شوری شود (Xu و همکاران، ۲۰۱۰). Wang و همکاران (۱۹۹۳) و Ruan و همکاران (۲۰۰۸) به این نتیجه رسیدند که کاهش بیش از حد سطح ایستابی آب زیرزمینی، عمدتاً زمانی که این عمق از ۳ متر بیشتر شود، به دلیل کاهش صعود موئینگی، بر بهره‌وری محصول و محیطزیست (عمدتاً پوشش گیاهی طبیعی) ، تأثیر منفی می‌گذارد. همچنین بر مبنای گزارش Xu و همکاران (۲۰۱۰) نشت کانال و نفوذ مزرعه به ترتیب ۵۱ و ۴۶ درصد از کل تغذیه آب زیرزمینی را در دوره غیر یخزده و ۴۸ درصد و ۴۴ درصد از کل تغذیه سالانه آب زیرزمینی و تبخیر آب زیرزمینی ۸۲ درصد از کل تخلیه سالانه را تشکیل می‌دهد.

تاثیر پوشش کانال بر تغییرات سطح ایستابی

Fernald و همکاران (۲۰۱۰) در امتداد رودخانه ریوگراند در شمال نیومکزیکو، یک دره آبی به طول ۲۰ کیلومتر را برای اندازه‌گیری اجزای تعادل آب از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ استفاده کردند. گزارش‌ها نشان داد از آب رودخانه‌ای که به سیستم کانال آبیاری خاکی منحرف می‌شود، مقداری از آن توسط تبخیر و تعرق محصول مصرف می‌شود (۷/۴٪). بقیه به عنوان جریان برگشتی سطحی (۳/۵۹٪) به رودخانه باز می‌گردد و جریان برگشتی آب زیرزمینی کم‌عمق از تراوش از کانال‌های سنتی بدون پوشش (۱۲/۱٪) و مزارع (۲۱/۲٪) نشأت می‌گیرد. نرخ نشت آب از کانال‌ها بسیار متغیر است و به عوامل زیادی از جمله بافت و ساختار خاک، اختلالات بستر و کرانه، آب‌بندی رسوب، گل و لای، عمق آب در کانال، طول و شکل محیط مرطوب کانال و سایر عوامل بستگی دارد (Alam و Bhutta، ۲۰۰۴). Fernald و همکاران (۲۰۱۰) تلفات کانال را ۱۶ درصد جریان ورودی کانال، Singh و همکاران (۲۰۰۶) ۴۳-۳۴ درصد و Schoups و همکاران (۲۰۰۵) ۲۰-۱۵ درصد گزارش کردند. همچنین مطالعات نشان داده شده است که نشت از کانال‌های آبیاری منبع مهمی برای تغذیه آب‌های زیرزمینی کم‌عمق است. تخمین‌ها از ۵۰/۸ میلی‌متر در سال در آیداهو (Garabedian، ۱۹۹۲) تا ۱۳۳ میلی‌متر در سال در جنوب شرقی استرالیا (Chiew و McMahon، ۱۹۹۱) به ۳۵۰ میلی‌متر در سال (Willis و همکاران، ۱۹۹۷) و ۵۲۴ میلی‌متر در سال نیز در جنوب شرقی استرالیا (Willis و Black، ۱۹۹۶) تا ۶۴۰ میلی‌متر در سال در نوادا (Scanlon و همکاران، ۲۰۰۵) متغیر است. یک مطالعه در دره رودخانه Methow در واشنگتن نشان داد که تغذیه کانال و نفوذ آب مازاد آبیاری مزرعه به آب‌های زیرزمینی کم‌عمق و جریان برگشتی بعدی تا ۲۰٪ از کل جریان رودخانه سپتامبر را فراهم می‌کند. تمامی کانال‌های مورد بحث، کانال‌های سنتی بدون پوشش بودند. نشت آبیاری برای اتصال بین دشت

سیلابی و رودخانه‌های Methow و Twisp مهم است. Konrad و همکاران (۲۰۰۳) گزارش کردند در وایومینگ، نشت آبیاری ۶۵ درصد از ورودی تالاب‌ها را تشکیل می‌دهد.

اثرات حذف یا کاهش جریان برگشتی

تاثیر بکارگیری روش‌های نوین آبیاری بر حوضه‌های پایین‌دست

جریان برگشتی از آبیاری رودخانه‌ای می‌تواند تعادل آب سفره‌های زیرزمینی را به طور قابل توجهی تغییر دهد (Lonsdale و همکاران، ۲۰۲۰) و منجر به افزایش بلندمدت ارتفاع آب زیرزمینی شود (Gates و همکاران، ۲۰۱۲؛ Scanlon و همکاران، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵). بخشی از بحث‌های اخیر در مورد اینکه آیا تلاش‌های مناسب در چند دهه گذشته برای کاهش مصرف خالص آب آبیاری با تغییر از آبیاری غرقابی با راندمان پایین‌تر به روش‌های بارانی یا قطره‌ای با راندمان بالاتر، اثرات منفی ناخواسته‌ای داشته است یا خیر، متمرکز شده‌اند (Ward و Pulido-Velazquez، ۲۰۰۸؛ Grafton و همکاران، ۲۰۱۸؛ Lonsdale و همکاران، ۲۰۲۰). یک اثر ناخواسته بالقوه منفی افزایش راندمان آبیاری این است که صرفه‌جویی در مصرف آب با روش‌های نوین آبیاری منجر به کاهش تغذیه آبخوان و به تبع آن کاهش جریان برگشتی و جریان‌های تکمیلی اواخر فصل می‌شود (kirk و همکاران، ۲۰۲۰؛ Hu و همکاران، ۲۰۱۷). بدتر از آن، غلظت نمک جریان برگشتی آبیاری با صرفه‌جویی در مصرف آب و احیای زمین‌های کشاورزی افزایش می‌یابد؛ بنابراین جریان‌های بازگشتی لزوماً کاملاً سودمند نیستند و یک نقطه منفی بالقوه، افزایش بارگیری مواد مغذی و نمک در رودخانه‌ها است (Isidoro و همکاران، ۲۰۰۳؛ Gates و همکاران، ۲۰۱۸)، بنابراین، فواید جریان برگشتی باید در مقابل اثرات مضر آن برای سلامت آبزیان ارزیابی شود (Guo و همکاران، ۲۰۱۹).

تغییر راندمان آبیاری در دره‌های آبرفتی پیامدهایی فراتر از صرفاً کاهش انحراف جریان آب دارد. تا زمانی که تولید محصول کاهش نیابد، بهبود بهره‌وری آبیاری باعث کاهش تغذیه آب زیرزمینی و تخلیه مربوط به نهرها می‌شود. در مناطقی که جریان کم را در طول تابستان و اوایل پاییز تجربه می‌کنند، جریان‌های برگشتی می‌توانند منبع مهمی برای جریان تکمیلی باشند. بنابراین، جریان‌های بازگشتی یک جزء مهم اما اغلب نادیده گرفته شده از تبادل هیدرولوژیکی و بیلان آب کلی در مناطق کشاورزی را نشان می‌دهد و عدم تامین آب سطحی از بالادست و کاهش جریان برگشت آبیاری می‌تواند باعث کمبود شدیدتر آب در منطقه پایین‌دست شود و کاربران پایین‌دستی را از منابع آب در اواخر فصل و ظرفیت تولید برق آبی محروم کند و دوره‌های آبی تالاب را کوتاه کند (Kendy و Bredhoeft، ۲۰۰۶؛ Kirk و همکاران، ۲۰۲۰؛ Medellín-Azuara و همکاران، ۲۰۲۴؛ Hu و همکاران، ۲۰۱۷). جریان‌های برگشتی در دسترس بودن آب در اواخر فصل را نه تنها برای کشاورزان، بلکه استفاده‌کنندگان شهری و صنعتی نیز افزایش می‌دهند و به حفظ جریان‌های زیست‌محیطی لازم برای سلامت اکولوژیکی رودخانه کمک می‌کنند (Kendy و Bredhoeft، ۲۰۰۶؛ Linstead، ۲۰۱۸؛ Kang و همکاران، ۲۰۲۴). بنابراین، برای مدیریت پایدار کل حوضه، لازم است اتلاف آب و کاهش کیفیت آب در حوضه پایین‌دست به دلیل استفاده از فناوری‌های صرفه‌جویی در مصرف آب در نظر گرفته شود (Kendy و Bredhoeft، ۲۰۰۶؛ Hu و همکاران، ۲۰۱۷). این اثرات ممکن است با در نظر گرفتن کل بیلان آب و نه صرفاً انحراف جریان، هنگام بررسی سرمایه‌گذاری‌های آینده در پروژه‌های بهره‌وری آبیاری مدنظر قرار گیرد. در برخی موارد، ممکن است حفظ سیستم‌های ناکارآمد عاقلانه‌تر باشد تا تأثیر نامطلوب بر کاربران پایین‌دستی از طریق بهبود راندمان آبیاری بالادست. از طرف دیگر، جریان‌های برگشتی که روی یک حوضه بزرگ ادغام می‌شوند، می‌توانند مقادیر قابل‌توجهی از جریان پایه اضافی را فراهم کنند (Ferencz و Tidwell، ۲۰۲۲). به عنوان مثال، در زیرحوضه کلرادو که آبیاری غرقابی روش اصلی آبیاری است، میانگین جریان بازگشت سالانه تقریباً ۰/۱-۱ کیلومترمکعب تخمین زده می‌شود (Colorado Department of Water Resources، ۲۰۱۶). در یک مطالعه در مونتانا که در آن آبیاری غرقابی نیز رایج است، Lonsdale و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند از ۱۲/۹۵ کیلومترمکعب که به طور متوسط سالانه برای آبیاری منحرف می‌شود، تقریباً ۹/۸۶ کیلومترمکعب (۷۶%) مصرف نمی‌شود و احتمالاً به تغذیه آب‌های زیرزمینی کمک می‌کند. Essaid و Caldwell (۲۰۱۷) نیز دریافتند که جریان‌های برگشتی ۶۰ تا ۷۰ درصد جریان اواخر تابستان را در رودخانه اسمیت مونتانای ایالات متحده تشکیل می‌دهند. ارزش جریان برگشتی در کمک به حفظ جریان اواخر فصل می‌تواند تحت تغییرات آب و هوایی افزایش یابد، زیرا پیش‌بینی می‌شود زمان ذوب برف بهاری در آب و هوای گرم زودتر رخ دهد و دوره تابستان و پاییز کم‌جریان را طولانی‌تر کند (Ficklin و همکاران، ۲۰۱۳). طبق گزارش Morrisett و همکاران (۲۰۲۴) تغذیه آبخوان مدیریت شده کشاورزی (Ag-MAR[۳۱])، که در آن تغذیه مصنوعی از طریق کانال‌های آبیاری و مزارع کشاورزی انجام شد، مقدار جریان اوج فصل بهار در خروجی حوضه را ۱۴-۱۰ درصد کاهش داد اما جریان تابستان را ۱۴-۶ درصد و جریان زمستان را ۱۴- ۹ درصد افزایش داد. بنابراین، Ag-MAR می‌تواند به طور موثر جریان‌های برگشتی آب زیرزمینی را در منطقه بازیابی کند.

تاثیر بکارگیری آبیاری قطره‌ای بر مقدار جریان برگشتی

اگر چه جریان برگشتی آبیاری برای منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه‌های پایین‌دست حیاتی است، با این

حال، مطالعاتی که به اندازه کافی دینامیک فرآیندهای هیدرولوژیکی را در رابطه با جریان برگشتی آبیاری روشن می‌کند، کمیاب است. Hu و همکاران (۲۰۱۷) برای برآورد میزان جریان برگشتی در حوضه رودخانه آکسو، یکی از شاخه‌های اصلی رودخانه تاریم، از مدلHYDRUS-2D/3D استفاده نموده و تأثیر صرفه‌جویی در آب کشاورزی را بر جریان برگشتی آبیاری بررسی کردند. نتایج نشان داد که برای دهه ۱۹۹۰، مقدار جریان برگشت آبیاری برای آبیاری غرقابی ۵۰ درصد بود. این مقدار نشان می‌دهد که ۵۰ درصد از آب مورد استفاده در آبیاری به عنوان تخلیه در پایین‌دست بازگشت. با افزایش کم‌آبی، میزان آبیاری کاهش یافت و آبیاری قطره‌ای با مالچ پلاستیکی تشدید شد (Hu و همکاران، ۲۰۱۷)، بر این اساس، مقدار جریان برگشت آبیاری از ۴۴ درصد در دهه ۲۰۰۰ به ۳۴ درصد در دهه ۲۰۱۰ تحت آبیاری غرقابی و از ۴۲ درصد به ۲۳ درصد در آبیاری قطره‌ای کاهش یافت. با کاهش شدید، آبیاری دیگر برای تثبیت شوری خاک در منطقه کافی نبود. صرفه‌جویی برنامه‌ریزی شده در آینده در آب، با هدف کاهش بیشتر سهمیه آبیاری، می‌تواند مقدار جریان برگشت آبیاری را به ۱۶-۱۳ درصد کاهش دهد که برای تثبیت شوری خاک در درازمدت کافی نیست. بر اساس اثرات طرح آبیاری بر تجمع نمک در خاک، یک سناریوی بهینه نشان داد که مقدار جریان برگشت آبیاری برای پایداری بلندمدت در منطقه مورد مطالعه باید ۲۵۰ درصد و زهکشی ۱۸۶/۳۷ میلی‌متر باشد. این مطالعه همچنین نشان داد که شوری در سیستم‌های آبی پایین‌دست به دلیل جریان برگشتی آبیاری از احیای زمین و صرفه‌جویی در مصرف آب در حال افزایش است. این یک تهدید بالقوه برای اکوسیستم‌های ساحلی شکننده در منطقه مورد مطالعه بود. بنابراین، برای مدیریت پایدار کل حوضه، لازم است اتلاف آب و کاهش کیفیت آب در حوضه پایین‌دست به دلیل استفاده از فناوری‌های صرفه‌جویی در مصرف آب در نظر گرفته شود.

تاثیر روش آبیاری بر شوری خاک و کیفیت آب‌های زیرزمینی

شوری خاک یک مسئله اصلی در مناطق خشک زیرکشت محصولات کشاورزی است و انتقال نمک ارتباط نزدیکی با جریان آب دارد. محتوای نمک در سطح خاک با نفوذ آب آبیاری یا بارندگی به داخل نیمرخ خاک کاهش می‌یابد. اما تحت تبخیر شدید، نمک در سطح خاک جمع می‌شود. در بسیاری از مناطق آبی، حدود ۷۵ تا ۸۵ درصد از آب مصرفی در اثر تبخیر و تعرق مصرف می‌شود و در محصولات باقی می‌ماند. باقیمانده آب یا از طریق منطقه خاک برای شارژ مجدد آب زیرزمینی نفوذ می‌کند یا از طریق سیستم زهکشی به یک آب سطحی محلی باز می‌گردد. مقدار آب آبیاری که آب‌های زیرزمینی را شارژ می‌کند معمولاً نسبت به بارندگی زیاد است؛ زیرا سیستم‌های آبیاری وسیع معمولاً در مناطق کم بارش وجود دارند. آب از دست رفته در اثر تبخیر و تعرق نسبتاً خالص است. بنابراین، مواد شیمیایی باقیمانده به صورت نمک رسوب کرده و در ناحیه خاک تجمع می‌یابند. این افزایش با ادامه آبیاری ادامه می‌یابد و در نتیجه غلظت مواد جامد محلول در جریان برگشتی آبیاری در برخی مناطق به طور قابل‌توجهی بیشتر از آب آبیاری اولیه است. برای جلوگیری از تجمع بیش از حد املاح در خاک، آب آبیاری بیش از نیاز محصولات کشاورزی مورد نیاز است تا نمک‌ها را حل کرده و خارج کرده و به سیستم آب زیرزمینی منتقل کند. کاربرد اضافی آب، این نمک‌ها را حل می‌کند و آنها را در سیستم هیدرولوژیکی به سمت پایین‌تر حرکت می‌دهد و منجر به کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی و نهایتاً آب‌های سطحی می‌گردد. علاوه بر این، استفاده از کودها و آفت‌کش‌ها در زمین‌های زراعی نیز می‌تواند منجر به جریان برگشتی با کیفیت پایین به آب‌های زیرزمینی و سطحی شود. انتقال و سرنوشت آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و تخلیه‌های شهری و صنعتی نگرانی گسترده‌ای است که اگر آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی به‌عنوان یک منبع واحد مدیریت شوند، می‌توانند به بهترین نحو برطرف شوند. دانشمندان و مدیران آب نیاز به طراحی برنامه‌های جمع‌آوری داده‌هایی دارند که اثرات فرآیندهای بیوژئوشیمیایی را بر کیفیت آب در سطح مشترک بین آب‌های سطحی و رسوبات نزدیک به سطح بررسی کند. این فرآیندها می‌توانند تأثیر عمیقی بر شیمی آب‌های زیرزمینی برای شارژ مجدد آب‌های سطحی و شیمی آب‌های سطحی برای شارژ مجدد آب‌های زیرزمینی داشته باشند. تبادل مکرر آب بین آب‌های سطحی و رسوبات نزدیک سطح می‌تواند اهمیت این فرآیندها را بیشتر کند. تحقیقات در مورد سطح مشترک بین آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی در سال‌های اخیر افزایش یافته است، اما تنها چند محیط رودخانه مورد مطالعه قرار گرفته است و ارزش انتقال نتایج تحقیقات محدود و نامشخص است (Hu و همکاران، ۲۰۱۷).

تاثیر روش آبیاری بر آلودگی آب‌های زیرزمینی از طریق آب برگشتی

تمایل آلاینده‌های شیمیایی به جابجایی بین آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی یکی از نکات کلیدی در مدیریت منابع آب است (Hu و همکاران، ۲۰۱۷). در طی چندین دهه گذشته، شیوه‌های کشاورزی فشرده با افزایش استفاده از کودهای نیتروژنی به منظور افزایش بهره‌وری محصول همراه بوده است (Schepers و همکاران، ۱۹۹۱). بنابراین کشاورزی منبع اصلی آلودگی غیرنقطه‌ای (مانند نیترات) است که در آن منابع آب و به ویژه سفره‌های آب زیرزمینی، تحت تأثیر قرار می‌گیرند. شیوه‌های کشاورزی فشرده در مناطقی با شرایط آب و هوایی مناسب انجام می‌شود که معمولاً از نظر منابع آب کمبود دارند. حفظ منابع آب در این نوع مناطق به ارزیابی کارایی شیوه‌های کشاورزی برای محصولات و شرایط خاص بستگی دارد. یکی از دلایل اصلی آلودگی

آب‌های زیرزمینی توسط نیترات جریان برگشتی بالای آبیاری ناشی از بکارگیری مقادیر بالای کود نیتراتی اعمال شده و همچنین وجود نیترات‌های باقیمانده در خاک است. این مشکل باعث شده است که نهادهای دولتی، از جمله اتحادیه اروپا، بهترین شیوه‌های مدیریتی را در مناطقی که خطر بالای آلودگی آب‌های زیرزمینی توسط نیترات وجود دارد، اجرا کنند.Poch-Massegú و همکاران (۲۰۱۴) نفوذ و آبشویی نیتروژن از اراضی تحت کشت محصولات مختلف (ذرت، سیب‌زمینی و تناوب کاهو و خربزه) تحت روش‌های مختلف آبیاری (سطحی، بارانی و قطره‌ای) را از طریق کرت‌های آزمایشی ارزیابی کردند. نتایج به‌دست‌آمده مقادیر نفوذ بالایی را نشان داد (به ترتیب ۳۴، ۵۸ و ۳۷ درصد از کل آب کاربردی برای ذرت، سیب‌زمینی و تناوب کاهو و خربزه). آبشویی نیتروژن از محصول ذرت به سفره آب زیرزمینی در طول دوره آیش و در بهار رخ داد. آبیاری محصولات کشاورزی با روش جوی و پشته، که معمولاً با راندمان پایین آبیاری همراه است، در واقع منجر به نفوذ زیاد یا آبشویی نیتروژن نشد (Poch-Massegú و همکاران، ۲۰۱۴) به طور مشابه، مطالعات متعددی که بر روی آبشویی نیترات متمرکز شده‌اند، نشان می‌دهند که آبیاری بیش از حد و آبیاری سنتی (روش غرقابی) می‌تواند علت آن باشد (Jalali، ۲۰۰۵؛ Wallis و همکاران، ۲۰۱۱). مطالعات مختلف مزایای آبیاری قطره‌ای را در مقایسه با آبیاری بارانی یا غرقابی در این خصوص گزارش داده‌اند (Darwish و همکاران، ۲۰۰۳؛ Mack و همکاران، ۲۰۰۵). کم‌آبیاری به عنوان جایگزینی برای کاهش آبشویی نیترات پیشنهاد شده است، اما در این مورد، مقدار کود نیتروژن باید متناسب با مقدار آب موجود خاک برای جذب آب توسط گیاه کاهش یابد (Gheysari و همکاران، ۲۰۰۹). Gheysari و همکاران (۲۰۰۹) برای بررسی تأثیر کم‌آبیاری بر مقدار جریان برگشتی و آبشویی نیترات در یک مزرعه تحت کشت ذرت علوفه‌ای، چهار سطح آبیاری (۰/۷، ۰/۸۵، ۱ و ۱/۱۳ برابر تخلیه رطوبت خاک[۳۲]) و سه سطح کوددهی نیتروژن (۰، ۱۴۲ و ۱۸۹ کیلوگرم نیتروژن در هکتار) با سه تکرار به کار بردند و مشاهده کردند آبشویی نیترات به عمق آبیاری اعمال شده و نیتروژن اعمال شده بستگی داشت و با افزایش نیتروژن و یا آب اعمال شده افزایش یافت. بنابراین برای مدیریت منابع محدود آب در مناطق نیمه‌خشک و خشک، باید مدیریت آب و مواد مغذی را در محصولات آبی و دیم بهبود بخشید تا جریان برگشتی آبیاری و آبشویی کودها کاهش یابد (Poch-Massegúو همکاران، ۲۰۱۴). همچنین، به منظور کاهش آبشویی بالای نیتروژن پس از دوره آیش، که ناشی از معدنی شدن مواد آلی خاک است، تغییر در شیوه‌های کشاورزی، مانند تناوب زراعی یا حذف محصول پس از برداشت، می‌تواند به طور قابل توجهی آبشویی و در نتیجه اثرات آن بر آب‌های زیرزمینی را کاهش دهد (Poch-Massegúو همکاران، ۲۰۱۴).

Darwish همکاران (۲۰۰۳) با افزایش نشانه‌های نابودی کیفیت آب‌های زیرزمینی در لبنان، آبشویی نیترات را در دو رژیم آبیاری قطره‌ای و بارانی در زمین تحت کشت سیب‌زمینی (محصول اصلی در لبنان) بررسی نموده و مشاهده کردند آبشویی نیترات با روش بارانی و به تبع آن آلودگی آب‌های زیرزمینی به طور قابل توجهی افزایش یافت. اما نیتروژن با آبیاری قطره‌ای در محدوده ریشه باقی ماند. در آبیاری قطره‌ای، کودها به صورت کوددهی در زمان کاشت به خاک اضافه می‌شدند یا به طور مداوم با آب آبیاری (کودآبیاری) اضافه می‌شدند.

Mack و همکاران (۲۰۰۵) طی یک سری آزمایش‌های میدانی در یک دوره ۳ ساله در یک سیستم کشت دوگانه گندم-ذرت زمستانی در چین، تأثیر سه تیمار مختلف آبیاری (بارانی «نیمه بهینه» و «بهینه» و آبیاری غرقابی مرسوم) و کوددهی نیتروژن را از نظر تأثیر بر بیلان آب خاک و آبشویی نیترات مطالعه نمودند. نتایج آنها نیز نشان داد در آبیاری بارانی، آبشویی نیترات در مقایسه با آبیاری غرقابی، که در آن جریان ترجیحی (با شدت جریان ۱۰ میلی‌متر در روز) رخ می‌داد، کمتر بود.

میزان آب برگشتی در ایران

قرار گرفتن ایران در فاصله عرض‌های جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و متوسط بارندگی سالیانه ۲۵۰ میلی‌متر ما را در ردیف کشورهای خشک و نیمه خشک قرار می‌دهد. در ایران با جمعیت ۸۵ میلیون نفری سالانه بیش از ۱۰۰ میلیارد مترمکعب آب مصرف می‌شود. ۵۵ درصد این مقدار از سفره‌های آب زیرزمینی و مابقی از آب‌های سطحی برداشت می‌شود. با کاهش تدریجی متوسط بارش سالانه در ایران که در یک الگوی ۵۰ ساله حدود ۲۰ درصد ارزیابی شده است، حجم رواناب‌های کشور بیش از ۵۰ درصد کاهش یافته و به حدود ۴۵ میلیارد مترمکعب رسیده است. کمتر از ۴۰ میلیارد مترمکعب نیز حجم آب‌هایی است که سالانه به آبخوان‌ها و سفره‌های آب زیرزمینی نفوذ می‌کند. به موازات کاهش متوسط بارش نزولات جوّی، افزایش متوسط دما باعث افزایش تبخیر و تعرق (حدود ۷۵ درصد کل بارش های کشور) گردیده و وضعیت ذخایر آب تجدیدپذیر[۳۳] را با چالش بیشتری روبرو نموده است. در واقع از حدود ۲۶۰ میلیارد مترمکعب بارش سالانه در ۶ حوضهٔ آبریز عمده در ایران، فقط حدود ۸۵ میلیارد مترمکعب از آن قابل استفاده است (سخنگوی صنعت آب کشور، عصر ایران، ۱۴۰۴). طبق گزارش ابراهیم‌پور و هاشم‌نیا (۱۳۹۴) بر مبنای شاخص فالکن مارک، کشور ایران در آستانه قرار گرفتن در بحران آبی است. با توجه به اینکه در دهه‌های ۸۰ و ۹۰ خورشیدی حدود ۶۹ درصد آب تجدیدپذیر سالیانه استفاده شده است، بر اساس شاخص سازمان ملل و موسسه بین‌المللی مدیریت آب، ایران در وضعیت بحران شدید آبی قرار دارد. بر اساس شاخص‌های

مذکور برای حفظ وضع موجود، ایران باید تا سال ۲۰۲۵، ۱۱۲درصد به منابع آبی قابل استحصال اضافه بکند (ابراهیم‌پور و هاشم‌نیا، ۱۳۹۴). بر مبنای گزارش محققین اخیر وضعیت مصرف آب کشور در بخش کشاورزی از ۸۶/۸ میلیارد مترمکعب در سال ۱۳۷۵ به ۹۳/۱ میلیارد مترمکعب در سال ۱۳۸۰ افزایش یافته این مقدار برای سال ۱۴۰۰، ۱۱۳/۲ میلیارد مترمکعب پیش‌بینی شده بود. در آخرین گزارش ارائه شده توسط وزارت جهاد کشاورزی در آذر ۱۴۰۴، وزارت نیرو برای نیمه دوم سال زراعی در سال ۱۴۰۳- که ۷۸ درصد مصرف آب کشاورزی در آن دوره اتفاق می‌افتد - ۲۴ میلیارد متر مکعب آب تخصیص داد که محدودیتی کم‌سابقه بود. مصرف آب کشاورزی در سال زراعی گذشته حدود ۴۵ میلیارد متر مکعب بوده و این در حالی است که آب تجدیدپذیر کشور در همان دوره به حدود ۷۰ میلیارد متر مکعب رسیده است. وزارت نیرو برای سال زراعی ۱۴۰۴-۱۴۰۵ نیز طی نامه‌ای، آب قابل تخصیص به بخش کشاورزی را ۵۱ میلیارد متر مکعب اعلام کرده است. این میزان نسبت به سال‌های قبل، کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد و عملاً مصرف آب کشاورزی نسبت به دو سال پیش حدود ۲۰ میلیارد متر مکعب کمتر شده است (نیازی شهرکی، ۱۴۰۴). با توجه به پایین‌بودن ریزش‌های جوی و نامناسب‌بودن پراکنش زمانی و مکانی آن و قرارگیری ایران در در زمره کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان، در چنین وضعیتی منابع آب، گلوگاه توسعه خواهد بود. شرط پایداری کمی منابع آب، عدم تجاوز مصارف سالانه از مقدار آب تجدیدپذیر است. بنابراین برنامه‌ریزی برای توسعه پایدار نیازمند برآورد صحیح (و حتی محافظه‌کارانه) منابع آب تجدیدپذیر است. منابع آب یك حوضه به دو بخش آب تجدیدپذیر و آب غیرقابل‌تجدید تقسیم می‌شوند. منابع آب غیرقابل‌تجدید[۳۴] قسمت‌هایی از آب زیرزمینی است که سرعت تغذیه در آن در مقیاس زمانی انسانی ناچیز می‌باشد. آب تجدیدپذیر نیز مقدار آبی است که حوضه طی چرخه آبی سالیانه توانایی بازیابی آن را دارد (ابراهیم‌پور و هاشم‌نیا، ۱۳۹۴).

بیش از ۹۲% منابع آبی کشورمان به بخش کشاورزی اختصاص داده می‌شود. بنابراین در یک حوضه آبریز نیاز کشاورزی سهم مهمی در بیلان آب آن حوضه دارد و دانستن بهترین مقدار پارامترهای مرتبط با آن برای مدل‌سازی و برنامه‌ریزی منابع آب آن حوضه نیز اهمیت بسزایی دارد. در زمینه تخمین ضرایب جریان برگشتی از مصارف اصلی (شرب، صنعت و کشاورزی) در سطح حوضه آبریز تحقیقات اندکی صورت گرفته است (ابراهیم‌پور و هاشم‌نیا، ۱۳۹۴).

رجا و همکاران (۱۴۰۲) با واسنجی مدل SWAT، برخی مولفه‌های بیلان آب شامل نفوذ عمقی، نشت جانبی، جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه را در دشت مهاباد واقع در شمال غربی ایران و جنوب غربی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه که حدود ۹/۲ درصد از مساحت کل حوضه آبخیز دریاچه ارومیه را در بر می‌گیرد، تخمین زدند. اقلیم منطقه بر اساس روش‌های دومارتن و آمبرژه، نیمه‌خشک تعیین شد و متوسط بارندگی سالانه بر اساس آمار بارندگی ایستگاه سینوپتیك مهاباد در طول دوره آماری ۱۳۶۸-۱۳۹۸، ۴۰۲ میلی‌متر گزارش شده است. مقادیر بارش در طی فصل‌های پاییز، زمستان، بهار و تابستان مطابق با آمار درازمدت برابر با ۳۰/۰۱، ۳۷/۱، ۳۱/۲ و ۱/۶ درصد است. متوسط بیشینه و کمینه ماهانه دما با میزان ۳۳/۷ و ۲/۲- درجه سانتی‌گراد به ترتیب در ماه‌های مرداد و بهمن اتفاق افتاده است. میزان نفوذ عمقی به‌طور متوسط ۱۷/۱ درصد و میزان متوسط جریان برگشتی از آبخوان به رودخانه ۱۴/۱ درصد برآورد شد.

نبی‌زاده‌چمازکتی و جعفری (۱۴۰۰) با استفاده از مدل MODFLOW در نرم‌افزار FREEWAT میزان آب برگشتی به آبخوان آبرفتی سرخس را که تنها منبع تأمین‌کننده مصارف شرب، صنعت و کشاورزی در دشت سرخس، شمال شرق ایران، مجاور مرز ترکمنستان است، برآورد نمودند. در این منطقه عمده تغذیه ناشی از آب برگشتی کشاورزی مربوط به نیمه اول سال آبی (ماه‌های آبان تا فروردین) است که بر اساس مصرف آبیاری بیش از نیاز محصولات زراعی است. در این دوره از سال به دلیل کاهش دمای هوا و کم بودن عمق ریشه محصولات زراعی، نیاز آبی (میزان تبخیر و تعرق) کم بوده و کشاورزان به صورت سنتی آبیاری مازاد بر نیاز گیاه انجام می‌دهند؛ بنابراین مازاد آب مصرفی در قالب آب برگشتی به آبخوان برمی‌گردد. نتایج نشان داد میزان تغذیه سطحی سالانه به آبخوان سرخس ۸۰ میلیون مترمکعب بوده که از دو منبع بارش (۳۲ میلیون مترمکعب در سال) و آب برگشتی کشاورزی (۴۸ میلیون مترمکعب در سال) صورت می‌گیرد. بر مبنای نتایج، مقدار بازگشتی ناشی از بارش حدود ۲۰ درصد بارش سالیانه و جریان برگشتی ناشی از آبیاری برابر ۱۵ درصد تخلیه سالانه چاه‌های بهره‌برداری برآورد شد. ضرایب تغذیه در محاسبات بیلان آب و در راستای مدیریت بهینه آبخوان سرخس و آبخوان‌های مشابه در ایران قابل استفاده است.

رجبی و همکاران (۱۳۹۹) در یک پژوهش میزان آب برگشتی ناشی از آبیاری به آبخوان دشت بردسیر را ارزیابی نمودند. در این پژوهش گیاه یونجه به عنوان کشت زراعی عمده منطقه انتخاب شد. برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق از لایسیمتر و برای پایش رطوبت در چند عمق از دستگاه TDR[۳۵] استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان آب برگشتی آبیاری در این منطقه حدود ۱۳/۷ درصد می‌باشد.

Ebrahimi و همکاران (۲۰۱۶) مشاهده کردند که ۱۵/۲ درصد از کل آب آبیاری به عنوان جریان برگشتی در غرب ایران به سفره آب زیرزمینی باز می‌گردد. ضرایب جریان بازگشتی پارامترهایی با مقدار نامعلوم و غیرقابل اندازه‌گیری می‌باشند و برای هر حوضه آبریز با توجه به

ساختار نیازهـــا و الگـــوی مصرف، نوع آب و هوا و شرایط جغرافیـایـی مقـادیر متفـاوتـی دارند. واسنجـی مدل‌هایـی مانند MODSIM که در شـبیه‌سـازی یـک حوضه آبریز این ضرایب را در نظر می‌گیرند، راه مناسبی برای بدسـت آوردن بهترین تخمین از این ضرایب است (Ebrahimi و همکاران، ۲۰۱۶). سـبززاده و علیمحمـدی (۱۳۹۱) مقدار ضریب جریان بازگشـتی از نیاز کشـاورزی و سهم جریان ورودی به منابع سطحی و زیرزمینی از این جریان بازگشتی در حوضه آبریز گـاوشان در غرب ایران را مطالعـه کردنـد. این امر با استفاده از واسنجی خودکار مدل برنامـه‌ریزی منابع آب (MODSIM) و تلفیق آن با الگـــوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات، صورت گرفـت. تابع هدف واسنجـی شامل عبارت جریان سطحـی و تراز آبخوان بود. واسنجی مدل‌هـای برنامـه‌ریـزی منـابع آب یکـــی از روش‌های مناسب برای تخمین ضرایب جریان برگشـــتی در سطح حوضه آبریز مـــی‌باشد. این تحقیقات بیشتر بر روي میزان نفوذ به آب زیرزمینـی متمرکـز بوده و عمدتاً با استفاده از مدل‌های آب زیرزمینی انجام شده‌اند. همچنـین این تحقیقات با استفاده از داده‌های مشـاهداتی برای یک بازه زمانی محدود، اکثراً کمتر از یک سال، انجام شده و تعمـیم آن‌هـا بـرای یک بازه بلندمدت، با توجه به دستورالعمل‌های موجود در کشور برای پروژه‌های برنامه‌ریزی منـابع آب، منطقـی نیسـت. سـخت بـودن و در مـواردی ناممکـن بودن واسـنجی مدل‌های مدیریت حوضـه آبریـز از علـل نبـود یک تحقیـق در زمینـه تخمـین ضـرایب جریـان برگشـتی از طریـق واسـنجی این مدل‌ها مـی‌باشد. ضریب بازگشـتی نیاز کشـاورزی حوضه گـاوشان، به عنوان مطالعه موردی، ۳۳/۷% بدست آمد. همچنـــین نتایج نشان داد سهم آب زیرزمینی و جریان سطحی از این مقدار بازگشتی به ترتیب برابر ۱۴/۵ و ۸۵/۵ درصد اسـت. یعنـی ۲۸/۸ درصد جریان بازگشتی به آب‌های سطحی و ۴/۹ درصد به آب‌های زیرزمینی تعلق دارد. سـهم جریان برگشـتی به آب سطحی بیشتر از جریان برگشتی به آب زیرزمینی می‌باشد. بـا توجـه بـه کـوهستانی بودن‌حوضه آبریز گـاوشان نتیجه حاصـل شـده قابـل توجیـه بـوده و ضریب برگشـتی حـدود ۳۴%، یک مقدار نسبتاً منطقی است.

صـدرالدینی و عظیمـی (۱۳۹۵) میـزان آب برگشـتی از آبیـاری بـه آبخـوان در دشـت عجب‌شـیر در قسـمت شـرقی دریاچـه ارومیـه را بررسـی نمـوده و نتیجـه گرفتنـد مقـادیر ۲۰ تـا ۳۰ درصدی از آبیاری که در معادله بیلان آبی در ایران به عنوان تغذیه در نظر گرفته می‌شـود، وجود خارجی نـدارد و میـزان تغذیـه آب زیرزمینـی از طریـق آبیـاری در ایـن منطقـه صـفر است.

سامانـی و همکـاران (۱۳۸۹) میزان نفوذ آب باران به آبخوان اوان واقع در شمال غـرب اسـتان خوزسـتان را از روش‌های بیلان کـلیماتولوژی تورنت وایت و بیلان شیمیایی کلرید در آب زیرزمینـــی و در خاك را به صورت حجمـــی محاســـبه کردنـد. نتیجـه این تحقیق نشان‌دهنده این موضوع بود کـه بیشـترین تغذیـه آبخـوان دشت اوان از آب‌های برگشـتی از کشاورزی صورت می‌گیرد.

کریمـی و اردکـانیـان (۱۳۸۵) در تحقیـق خـود بـرای توسعه مدل شبیه‌ساز FEWREM در حوضه آبریز، ضریب بازگشتی نیـاز کشـاورزی را ۰/۲۵ و ضریب بازگشـتی نیـاز شـرب و صنعت را ۰/۵در نظر گرفته‌اند.

طـالبی‌حسین‌آباد و همکـاران (۱۳۹۰) در بررســی تأثیر آب برگشـتی در بـرآورد آب تجدیدپـذیر اسـتان خراسـان رضـوی جریان بازگشتی کشاورزی را بین ۲۰ تا ۳۰ و جریان بازگشتی شـرب را بین ۶۹ تا ۸۰ درصد فرض کـرده‌انـد. توجه گـردد که بالابردن راندمان آب در بخش کشاورزی با سرعتـی بیش از کاهش برداشت‌ها مضر به حال بیلان منابع آب است. یعنـی اجرای پـروژه‌های افزایش راندمان آبیاری قبل از تعادل بخشـی منابع آب زیرزمینـی منجـر بـه تشدید افت آبخوان مـی‌گـردد؛ زیرا افزایش راندمان باعث کـاهش جریـان آب بازگشـتی و افـزایش مصـرف مـی‌شود (طـالبی‌حسین‌آباد و همکـــاران، ۱۳۹۰). ایـــن محققـــین آب را مهمترین و محدودکننده‌ترین عامل اصلی توسعه استان خراسان رضوی گـزارش کردنـد. از طرفـی وقوع خشکسالـی‌ها و توسعه کشاورزی نامتناسب با وضعیت آبـــی در منطقه، موجب بهره‌برداری شدید از منابع آب غیرقابـل‌تجدید شده است. در استان خراسان رضوی سالانه به طور متوسط ۵۰۷۹ میلیون‌مترمکعب آب تجدیدپـذیر وجود دارد. از این مقدار آب حدود ۲۹۱۴ میلیون‌مترمکعب آن صرف تغذیه آبخوان‌های زیرزمینـی استان می‌شـود (۵۷%/۴) و ۲۱۶۵ میلیون‌مترمکعب آن به صورت جریان‌های سطحـــی در حوضه جاری مـی‌شود (۴۲%/۶). با توجه به برداشت ۷۵۷۴ میلیون‌مترمکعب آب از منابع آب زیرزمینـی ملاحظه مـی‌گـــردد حدود ۴۶۶۰ میلیون‌مترمکعب بیش از مقدار حجم آب‌تجدیدپـــذیر زیرزمینـــی برداشت از این منابع انجام مـی‌شود (۵۶/۱ درصد). این امر با توجه به ضریب بازگشت ۰/۲۸ درصـــد در نهایت سبب کسری ۱۰۶۸ میلیون مترمکعب در سال در مخازن آب‌های زیرزمینی استان شده است.

وروانی و همکاران (۱۳۹۱) یک مدل رگرسیون درختی را به منظور برآورد میزان جریان برگشتی روزانه حوضه سلیمه شبکه آبیاری دز (خوزستان) با بکارگیری ۵ متغیر شدت جریان ورودی روزانه، بارش موثر، نیاز آبی، نفوذ عمقی و تبخیر از سطح کانال توسعه دادند. نتایج نشان داد این مدل دقت مطلوبی در برآورد میزان جریان برگشتی دارد (R^2= 0.73-0.84) برای آموزش[۳۶] و 0.51-0.99 برای صحت‌سنجی[۳۷]) (جدول ۵) و کاربرد آن را توصیه نمودند. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد شدت جریان ورودی روزانه بیشترین و تبخیر کمترین تاثیر را در برآورد میزان جریان برگشتی داشت.

جدول ۵- نتایج ارزیابی مدل رگرسیون درختی شماره یک (وروانی و همکاران، ۱۳۹۱)

سال	مرحله	RMSE	R^2	Bias	SI
۱۳۸۶	آموزش	۰/۸۵۱	۰/۸۳۶	۰/۰	۰/۲۴
	صحت سنجی	۰/۷۰۵	۰/۹۹۵	-۰/۰۲۲	۰/۱۹۱
	آزمون	۱/۴۸۱	۰/۵۰۷	-۰/۰۵۷	۰/۳۹۱
۱۳۸۶	آموزش	۰/۳۶۲	۰/۸۳۲	۰/۰	۰/۲۵۷
	صحت سنجی	۰/۶۳۴	۰/۵۶۱	-۰/۱۰۱	۰/۴۱۸
	آزمون	۰/۴۶۴	۰/۷۲۵	-۰/۰۶۲	۱/۰۵۰

Zegait و همکاران (۲۰۲۴) و Rautela و همکاران (۲۰۲۲) نرم‌افزار سنجش از دور (RS) را برای پیش‌بینی مقدار RF به کار گرفته‌اند ولی در ایران هیچ پژوهش شاخصی میزان آب برگشتی را در سطح یک منطقه وسیع با این نرم‌افزار برآورد نکرده است و همین مسأله لزوم انجام پژوهش در این خصوص، به‌ویژه در شرایط فعلی بحرانی کم‌آبی در سراسر کشور را نشان می‌دهد.

جمع‌بندی

در این مقاله، پژوهش‌های به انجام رسیده در زمینه تعیین میزان آب برگشتی، روش‌های اندازه‌گیری و برآورد مقدار آن در روش‌های مختلف آبیاری (سنتی و مدرن)، مزایا و معایب وجود یا حذف جریان برگشتی بررسی شدند. در ایران ۸۶ تا ۹۵ درصد آب آبیاری در اراضی فاریاب به آبخوان‌های زیرزمینی برنمی‌گردد (رجبی و همکاران، ۱۳۹۹؛ سبززاده و علیمحمدی، ۱۳۹۱).

با استناد به منابع خارجی مورد مطالعه در این پژوهش با فرض بیش از ۷۰ درصد آب برگشتی در مناطق مرطوب در اراضی شیب‌دار با ساختمان خاک با نفوذپذیری مناسب و حداقل تبخیر و تعرق، این جریان به عنوان منبع آلودگی غیرنقطه‌ای با آلودگی احتمالی شوری و نیترات، عمل می‌کند. در واقع تغذیه آب زیرزمینی نیروی محرکه انتقال آلاینده‌ها مانند مواد مغذی و آفت‌کش‌ها به آب زیرزمینی است. متعادل‌سازی مقدار آن با انواع روش‌های بهینه مصرف آب از قبیل آبیاری قطره‌ای، کم‌آبیاری و پوشش کانال، منجر به کاهش شوری و آلودگی آب‌های زیرزمینی و خطرات زیست‌محیطی می‌گردد. آبیاری قطره‌ای در مقایسه با آبیاری بارانی و غرقابی، مقدار آبشویی نیترات و آلاینده‌ها را بیشتر کاهش می‌دهد. برای استفاده بهینه از منابع محدود آب به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و خشک، باید مدیریت مصرف آب و مواد مغذی مانند نیترات در محصولات کشاورزی ارتقاء یابد تا جریان برگشتی آبیاری و آبشویی منابع آلاینده کاهش یابد. رعایت سیستم‌های تناوب زراعی، شامل کشت محصولات زمستانه برای استفاده از آب باقی‌مانده در پروفیل خاک پس از فصل آبیاری و بارندگی زمستان، ممکن است به عنوان گزینه‌ای برای کاهش نفوذ عمیق و میزان آب برگشتی در نظر گرفته شود. ضمن اینکه با در نظر گرفتن ریسک‌های آلودگی آب بازگشتی آبیاری و نیز ریسک‌های عدم تغذیه آب زیرزمینی، بهتر است سیاست‌های حفاظت از منابع آبی در ایران در موضوعات مرتبط با آب برگشتی، بیشتر متمرکز بر کاهش برداشت آب باشد تا افزایش سهم آب برگشتی آبیاری.

به منظور درک بهتر و کامل‌تر مسأله آب برگشتی آبیاری، پیشنهاد می‌شود اولاً در مقیاس وسیع (دشت، حوضه آبریز) با تنوع نوع خاک، شرایط آب و هوایی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و روش‌های مختلف آبیاری، موضوع آب برگشتی آبیاری با تمرکز بر مدل‌سازی و فناوری سنجش از دور، مورد بررسی و ارزیابی جامعی قرار گیرد، ثانیاً با توجه به اینکه موضوع آلودگی بیشتر در مناطق با سطح آب زیرزمینی بالا مطرح است و علاوه بر آن برای حفظ کیفیت خاک نیاز آبشویی خاک نیز باید در نظر گرفته شود و در ایران در خصوص تاثیر میزان آب برگشتی بر میزان آلودگی آب‌های زیرزمینی مطالعه خاصی صورت نگرفته است و از طرفی در ایران بحث کاهش آب بازگشتی با توجه به افزایش مصرف می‌تواند اثر منفی بر بیلان و افزایش افت سطح آب داشته باشد، این موضوع نیز در مطالعات بعدی مد نظر قرار گیرد.

منابع

ابراهیم‌پور، بشیر، و هاشم‌نیا، شهرام. (۱۳۹۴). آب، آبیاری و بهره‌وری. کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران. دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. https://sid.ir/paper/870353/fa

حسینی، مجید، غفوری، محمد، مکاریان، زینب، و طباطبایی، محمودرضا. (۱۳۹۵). برآورد بیلان آبی در حوضه‌های منتهی به خلیج‌فارس با استفاده از مدل نیمه‌توزیعی SWAT. علوم آب و خاک، ۲۰(۷۸)، ۱۸۳-۱۹۴. http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.20.78.183

سخنگوی صنعت آب کشور، عصر ایران. (۱۴۰۴). ایران در سوگ آب/ افول شتابندهٔ منابع آب ایران. درگاه الکترونیکی جامعه تحلیلی خبری الف. https://www.alef.ir/news/4040426059.html

نیازی شهرکی، صفدر. معاون آب و خاک وزارت جهاد کشاورزی. (۱۴۰۴). سرویس اقتصادی، وزیر جهاد کشاورزی: ۴۵ میلیارد مترمکعب سهم بخش کشاورزی

درگاه الکترونیکی خبرگزاری دانشجویان ایران، ایسنا. ۱ آذر ۱۴۰۴. https://www.isna.ir/news/1404090100336

رجا، امید، پارسی نژاد، مسعود، و تجریشی، مسعود. (۱۴۰۲). برآورد و ارزیابی مولفه‌های بیلان آب با واسنجی مدل SWAT، مطالعه موردی: دشت مهاباد. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۵(۱)، ۱۲۹-۱۰۹. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.357631.1957

رجبی، مرتضی، جلال کمالی، نوید، و نقی‌زاده، مهدی. (۱۳۹۹). ارزیابی میزان آب برگشتی ناشی از آبیاری غرقابی به آبخوان (مطالعه موردی دشت بردسیر). مجله ترویجی حفظ و بهره‌وری آب، ۱(۱)، ۷-۱۱.

سامانی، سعیده، کلانتری، نصراله، و رحیمی، محمدحسین. (۱۳۸۹). محاسبه نفوذ از آب بارندگی و آب برگشتی کشاورزی به آبخوان دشت اوان. اولین کنفرانس پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران. دانشگاه صنعتي کرمانشاه، کرمانشاه، ایران. https://civilica.com/doc/112969

سبززاده، ایمان، و علیمحمدی سعید. (۱۳۹۱). برآورد ضریب جریان بازگشتی به کمک الگوریتم بهینه سازی ذرات. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۶(۴)، ۲۹۷-۳۰۵.

صدرالدینی، علی اشرف، و عظیمی، وحید. (۱۳۹۵). ارزیابی میزان آب برگشتی از آبیاری به آبخوان (مطالعه موردی: دشت عجب شیر). اولین کنفرانس بین المللی آب، محیط‌زیست و توسعه پایدار. ۶ مهر ۱۳۹۵، دانشگاه محقق اردبیلي، اردبیل، ایران. https://civilica.com/doc/596018

طالبی حسین‌آباد، فاطمه، ولایتی، سعدالله، داوری، کامران، ثنائی‌نژاد، سید حسین، و حسینی، سید علی. (۱۳۹۰). تأثیر آب برگشتی در برآورد آب تجدیدپذیر مطالعه موردی: استان خراسان. چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. ۱۳ و ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۰، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

کریمی اکبر. و اردکانیان، رضا، (۱۳۸۵). کاربرد مفهوم اجزای محدود در مدیریت منابع آب مدل و نرم-افزار FEWREM. تحقیقات منابع آب ایران، ۲(۲)، ۱-۱۴. https://civilica.com/doc/1606678

نبی‌زاده چمازکتی، نرگس، و جعفری، هادی. (۱۴۰۰). تخمین تغذیه به آبخوان مرزی سرخس یا استفاده از مدل عددی. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۵(۵۷)، ۲۷-۱۵. https://dorl.net/dor/20.1001.1.17357128.1400.15.57.7.9

وروانی، هادی، منتظر، علی‌اصغر، و رحیمی خوب، علی. (۱۳۹۱). توسعه و کاربرد مدل رگرسیون درختی برای پیش‌بینی جریان برگشتی روزانه شبکه‌های آبیاری (مطالعه موردی: منطقه سلیمه شبکه آبیاری دز). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۶(۱)، ۴۵-۳۱.

Alam, M. M., & Bhutta, M. N. (2004). Comparative evaluation of canal seepage investigation techniques. *Agricultural Water Management*, *66*(1), 65-76. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2003.08.002

Alcalá, F. J., & Custodio, E. (2014). Spatial average aquifer recharge through atmospheric chloride mass balance and its uncertainty in continental Spain. *Hydrological Processes*, *28*(2), 218-236. https://refhub.elsevier.com/S0883-2927(17)30302-5/sref2

Anand, B., Karunanidhi, D., Subramani, T., Srinivasamoorthy, K., & Suresh, M. (2020). Long-term trend detection and spatiotemporal analysis of groundwater levels using GIS techniques in Lower Bhavani River basin, Tamil Nadu, India. *Environment, Development and Sustainability*, *22*(4), 2779-2800. https://doi.org/10.1007/s10668-019-00318-3

Asare, D. K., Sitze, D. O., Monger, C. H., & Sammis, T. W. (2000). Impact of irrigation scheduling practices on pesticide leaching at a regional level. *Agricultural Water Management*, *43*(3), 311-325. https://doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00064-5

Batelaan, O., & De Smedt, F. (2007). GIS-based recharge estimation by coupling surface–subsurface water balances. *Journal of hydrology*, *337*(3-4), 337-355. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.001

Ben-Asher, J., & Ayars, J. E. (1990). Deep seepage under nonuniform sprinkler irrigation. II: Field data. *Journal of irrigation and drainage engineering*, *116*(3), 363-373. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:3(354)

Berbel, J., Cuadrado-Alarcón, B., Martínez-Dalmau, J., & Delgado-Ramos, F. (2024). Hydro-economic basin impacts of extensive adoption of deficit irrigation by farmers: Are we overestimating water resources? *Journal of Hydrology*, *634*, 131075. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131075

Bethune, M., Austin, N., & Maher, S. (2001). Quantifying the water budget of irrigated rice in the Shepparton Irrigation Region, Australia. *Irrigation Science*, *20*(3), 99-105. https://doi.org/10.1007/s002710100035

Burek, P., Satoh, Y., Kahil, T., Tang, T., Greve, P., Smilovic, M. & Wada, Y. (2019). Development of the Community Water Model (CWatM v1. 04) A high-resolution hydrological model for global and regional assessment of integrated water resources management. *Geoscientific Model Development Discussions*, *2019*, 1-49. https://doi.org/10.5194/gmd-13-3267-2020

Causapé, J., Quílez, D., & Aragüés, R. (2004). Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level: II. Salt and nitrate loads in irrigation return flows. *Agricultural Water Management*, *70*(3), 211-228. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.06.005

CHG. (2023). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (2022- 2027). In:

Fernald, A. G., Cevik, S. Y., Ochoa, C. G., Tidwell, V. C., King, J. P., & Guldan, S. J. (2010). River hydrograph retransmission functions of irrigated valley surface water–groundwater interactions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *136*(12), 823-835. https://doi.org/10.1061/ASCE1IR.1943-4774.0000265

Ficklin, D. L., Stewart, I. T., & Maurer, E. P. (2013). Climate change impacts on streamflow and subbasin-scale hydrology in the Upper Colorado River Basin. *PloS one*, *8*(8), e71297. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071297

Garabedian, S. P. (1992). *Hydrology and digital simulation of the regional aquifer system, Eastern Snake River Plain, Idaho* (No. 1408-F). US Government Printing Office. https://doi.org/10.3133/pp1408F

García-Garizábal, I., & Causapé, J. (2010). Influence of irrigation water management on the quantity and quality of irrigation return flows. *Journal of Hydrology*, *385*(1-4), 36-43. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.02.002

Gates, T. K., Cox, J. T., & Morse, K. H. (2018). Uncertainty in mass-balance estimates of regional irrigation-induced return flows and pollutant loads to a river. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *19*, 193-210. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.09.004

Gates, T. K., Garcia, L. A., Hemphill, R. A., Morway, E. D., & Elhaddad, A. (2012). Irrigation Practices, Water Consumption, & Return Flows in Colorado's Lower Arkansas River Valley. *Color. Water Inst. Tech. Comp. Rep*, *221*, 115. http://www.cwi.colostate.edu

Gee, G. W., Fayer, M. J., Rockhold, M. L., & Campbell, M. D. (1992). Variations in recharge at the Hanford Site. *Northwest science*, *66*(4), 237-250.

Gheysari, M., Mirlatifi, S. M., Homaee, M., Asadi, M. E., & Hoogenboom, G. (2009). Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates. *Agricultural water management*, *96*(6), 946-954. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.01.005

Grafton, R. Q., Williams, J., Perry, C. J., Molle, F., Ringler, C., Steduto, P. & Allen, R. G. (2018). The paradox of irrigation efficiency. *Science*, *361*(6404), 748-750. https://doi.org/10.1126/science.aat9314

Guo, X., Feng, Q., Si, J., Wei, Y., Bao, T., Xi, H., & Li, Z. (2019). Identifying the origin of groundwater for water resources sustainable management in an arid oasis, China. *Hydrological Sciences Journal*, *64*(10), 1253-1264. https://doi.org/10.1080/02626667.2019.161908

Guo, X., Feng, Q., Liu, W., Li, Z., Wen, X., Si, J. & Jia, B. (2015). Stable isotopic and geochemical identification of groundwater evolution and recharge sources in the arid Shule River Basin of Northwestern China. *Hydrological processes*, *29*(22), 4703-4718. https://doi.org/10.1002/hyp.10495

Guadalquivir, C.H.d.G. (Ed.), R.D. 35/2023, (BOE 10-02-2023).

Chiew, F. H. S., & McMahon, T. A. (1991). Groundwater recharge from rainfall and irrigation in the Campaspe River Basin. *Soil Research*, *29*(5), 651-670. https://doi.org/10.1071/SR9910651

Colorado Department of Water Resources. (2016). Upper Colorado River Basin Water Resources Planning Model User Manual. Available online at: https://cdss.colorado.gov/resources/modeling-dataset-documentation.

Cook, P. G., & Böhlke, J. K. (2000). Determining timescales for groundwater flow and solute transport. In *Environmental tracers in subsurface hydrology* (pp. 1-30). Boston, MA: Springer US. https ://doi.org/10.1007/978-1-4615-4557-6_1

Crovella, T., Paiano, A., & Lagioia, G. (2022). A meso-level water use assessment in the Mediterranean agriculture. Multiple applications of water footprint for some traditional crops. *Journal of Cleaner Production*, *330*, 129886. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129886

Dewandel, B., Gandolfi, J. M., De Condappa, D., & Ahmed, S. (2008). An efficient methodology for estimating irrigation return flow coefficients of irrigated crops at watershed and seasonal scale. *Hydrological Processes: An International Journal*, *22*(11), 1700-1712. https://doi.org/10.1002/hyp.6738

Darwish, T., Atallah, T., Hajhasan, S., & Chranek, A. (2003). Management of nitrogen by fertigation of potato in Lebanon. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*,*67*(1), 1-11. https://doi.org/10.1023/A:1025107202143

Dowling, A. J., Thorburn, P. J., Ross, P. J., & Elliot, P. J. (1991). Estimation of infiltration and deep drainage in a furrow-irrigated sodic duplex soil. *Soil Research*, *29*(3), 363-375. https://doi.org/10.1071/SR9910363

Ebrahimi, H., Ghazavi, R., & Karimi, H. (2016). Estimation of groundwater recharge from the rainfall and irrigation in an arid environment using inverse modeling approach and RS. *Water resources management*, *30*(6), 1939-1951. https://doi.org/10.1007/s11269-016-1261-6

Eriksson, E., & Khunakasem, V. (1969). Chloride concentration in groundwater, recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel Coastal Plain. *Journal of Hydrology*, *7*(2), 178-197. https://doi.org/10.1016/0022-1694(69)90055-9

Essaid, H. I., & Caldwell, R. R. (2017). Evaluating the impact of irrigation on surface water–groundwater interaction and stream temperature in an agricultural watershed. *Science of the total environment*, *599*, 581-596. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.205

Ferencz, S. B., & Tidwell, V. C. (2022). Physical controls on irrigation return flow contributions to stream flow in irrigated alluvial valleys. *Frontiers in Water*, *4*, 828099. https://doi.org/10.3389/frwa.2022.828099

Jalali, M. (2005). Nitrates leaching from agricultural land in Hamadan, western Iran. *Agriculture, ecosystems & environment*, *110*(3-4), 210-218. https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.04.011

Jalota, S. K., & Arora, V. K. (2002). Model-based assessment of water balance components under different cropping systems in north-west India. *Agricultural water management*, *57*(1), 75-87. https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00049-5

Jiménez-Martínez, J., Skaggs, T. H., Van Genuchten, M. T., & Candela, L. (2009). A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. *Journal of Hydrology*, *367*(1-2), 138-149. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.002

Johnston, C. D. (1987). Preferred water flow and localised recharge in a variable regolith. *Journal of Hydrology*, *94*(1-2), 129-142. https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90036-9

Kang, T., Shin, Y., Shin, M., Lee, D., Lim, K. J., & Kim, J. (2024). Evaluation of the Effect of Agricultural Return Flow on Water Quality, Water Quantity and Aquatic Ecology in Downstream Rivers. *Water*, *16*(11), 1604. https://doi.org/10.3390/w16111604

Kendy, E., & Bredehoeft, J. D. (2006). Transient effects of groundwater pumping and surface-water-irrigation returns on streamflow. *Water resources research*, *42*(8). https://doi.org/10.1029/2005WR004792

Kahil, T., Parkinson, S., Satoh, Y., Greve, P., Burek, P., Veldkamp, T. I., & Wada, Y. (2018). A continental-scale hydroeconomic model for integrating water-energy-land nexus solutions. *Water resources research*, *54*(10), 7511-7533.

Kitching, R., & Shearer, T. R. (1982). Construction and operation of a large undisturbed lysimeter to measure recharge to the chalk aquifer, England. *Journal of Hydrology*, *58*(3-4), 267-277. https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90039-7

Kitching, R., Shearer, T. R., & Shedlock, S. L. (1977). Recharge to Bunter Sandstone determined from lysimeters.*Journal of hydrology*, *33*(3-4), 217-232. https://doi.org/10.1016/0022-1694(77)90036-1

Kim, T. C., Lee, H. C., & Moon, J. P. (2010). Estimation of return flow rate of irrigation water in Daepyeong pumping district. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, *52*(1), 41-49. https://doi.org/10.5389/KSAE.2010.52.1.041

Konrad, C. P., Drost, B. W., & Wagner, R. J. (2003). *Hydrogeology of the unconsolidated sediments, water quality, and ground-water/surface-water exchanges in the Methow River Basin, Okanogan County, Washington* (No. 3). US Department of the Interior, US Geological Survey.

Leaney, F. W., & Herczeg, A. L. (1995). Regional recharge to a karst aquifer estimated from chemical and isotopic composition of diffuse and localized recharge, South Australia. *Journal of Hydrology*, *164*(1-4), 363-387. https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02488-W

Hanasaki, N., Yoshikawa, S., Pokhrel, Y., & Kanae, S. (2018). A global hydrological simulation to specify the sources of water used by humans. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(1), 789-817. https://doi.org/10.5194/hess-22-789-2018

Hanson, B. R., Šimůnek, J., & Hopmans, J. W. (2006). Evaluation of urea–ammonium–nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. *Agricultural water management*, *86*(1-2), 102-113. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.06.013

Healy, R. W. (2010). *Estimating groundwater recharge*. Cambridge university press, UK. www.Cambridge.org/9780521863964

Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology journal*, *10*(1), 91-109. https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0

Hu, Q., Yang, Y., Han, S., Yang, Y., Ai, Z., Wang, J., & Ma, F. (2017). Identifying changes in irrigation return flow with gradually intensified water-saving technology using HYDRUS for regional water resources management. *Agricultural Water Management*, *194*, 33-47. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.023

Huang, T., Pang, Z., & Edmunds, W. M. (2013). Soil profile evolution following land-use change: Implications for groundwater quantity and quality. *Hydrological Processes*, *27*(8), 1238-1252. https://doi.org/10.1002/hyp.9302

Isidoro, D., Quílez, D., & Aragüés, R. (2003). Sampling strategies for the estimation of salt and nitrate loads in irrigation return flows: La Violada Gully (Spain) as a case study. *Journal of Hydrology*, *271*(1-4), 39-51. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02) 00324-4

Islam, R., Kamaruddin, R., Ahmad, S.A., Jan, S. & Anuar, A.R. (2016). A review on mechanism of flood disaster management in Asia. *International Review of Management and Marketing*, *6*(1),29-52.

Jaber, F. H., Shukla, S., & Srivastava, S. (2006). Recharge, upflux and water table response for shallow water table conditions in southwest Florida. *Hydrological Processes: An International Journal*, *20*(9), 1895-1907. https://doi.org/10.1002/hyp.5951

Jafari, H., Sudegi, A., & Bagheri, R. (2019). Contribution of rainfall and agricultural returns to groundwater recharge in arid areas. *Journal of Hydrology*, *575*, 1230-1238. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.029

Jafari, H., Raeisi, E., Zare, M., & Haghighi, A. A. K. (2012). Time series analysis of irrigation return flow in a semi-arid agricultural region, Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *58*(6), 673-689. https://doi.org/10.1080/03650340.2010.535204

Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J. D., & Ross, A. (2016). *Integrated groundwater management* (p. 762). Springer Nature. Berlin, Germany. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9

Under Prior Appropriation in a Warming Climate? *Water Resources Research*, *60*(8), e2023WR036648. https://doi.org/10.1029/2023WR036648

Naranjo, G., Cruz-Fuentes, T., Cabrera, M. D. C., & Custodio, E. (2015). Estimating natural recharge by means of chloride mass balance in a volcanic aquifer: northeastern Gran Canaria (Canary Islands, Spain). *Water*, *7*(6), 2555-2574. https://doi.org/10.3390/7062555

Ochoa, C. G., Fernald, A. G., Guldan, S. J., & Shukla, M. K. (2009). Water movement through a shallow vadose zone: A field irrigation experiment. *Vadose Zone Journal*, *8*(2), 414-425. https://doi.org/10.2136/vzj2008.0059

Ochoa, C. G., Fernald, A. G., Guldan, S. J., & Shukla, M. K. (2007). Deep percolation and its effects on shallow groundwater level rise following flood irrigation. *Transactions of the ASABE*, *50*(1), 73-81. https://doi.org/10.13031/2013.22413

Poch-Massegú, R., Jiménez-Martínez, J., Wallis, K. J., de Cartagena, F. R., & Candela, L. (2014). Irrigation return flow and nitrate leaching under different crops and irrigation methods in Western Mediterranean weather conditions. *Agricultural Water Management*, *134*, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.11.017

Rab, M. A., & Willatt, S. T. (1987). Water use by irrigated potatoes on a duplex soil. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, *27*(1), 165-172. https://doi.org/10.1071/EA9870165

Rautela, K. S., Kumar, M., Sofi, M. S., Kuniyal, J. C., & Bhat, S. U. (2022). Modelling of streamflow and water balance in the Kuttiyadi River Basin using SWAT and remote sensing/GIS tools. *International Journal of Environmental Research* *16*(4), 37. https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102839

Richards, L. A., Magnone, D., Boyce, A. J., Casanueva-Marenco, M. J., van Dongen, B. E., Ballentine, C. J., & Polya, D. A. (2018). Delineating sources of groundwater recharge in an arsenic-affected Holocene aquifer in Cambodia using stable isotope-based mixing models. *Journal of Hydrology*, *557*, 321-334. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.012

Ruan, B. Q., Han, Y. P., & Jiang, R. F. (2008). Study on ecological water use in the Yellow River Irrigation District. *In: Ruan, B.Q., Zhang, R.D., Li, H.A. (Eds.),Research on water balance and water consumption in Hetao Irrigation District. Science Press, Beijing*, 99-123.

Rushton, K. R., Asaduz Zaman, M., & Hasan, M. (2020). Monitoring groundwater heads and estimating recharge in multi-aquifer systems illustrated by an irrigated area in north-west Bangladesh. *Sustainable Water Resources Management*, *6*(2), 22. https://doi.org/10.1007/s40899-020-00382-y

Sakib, S. N. (2024). Estimation of Ground Water Recharge in the Command Area of Krishna

Liu, C. W., Huang, H. C., Chen, S. K., & Kuo, Y. M. (2004). Subsurface return flow and ground water recharge of terrace fields in northern Taiwan 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *40*(3), 603-614. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb04446.x

Linstead, C. (2018). The contribution of improvements in irrigation efficiency to environmental flows. *Frontiers in Environmental Science*, *6*, 48. https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00048

Lonsdale, W. R., Cross, W. F., Dalby, C. E., Meloy, S. E., & Schwend, A. C. (2020). Evaluating irrigation efficiency: toward a sustainable water future for Montana. *Montana University System Water Center, Montana State University*, *42*. https://doi.org/10.15788/mwc202011

Loveday, J., Watson, C. L., & McIntyre, D. S. (1978). Aspects of the hydrology of Riverine Plain soils.

Ma, Y., Li, Y., Huang, G., Liu, Y., & Zhang, Y. (2024). Collaborative management of water-energy-food-ecosystems nexus in Central Asia under uncertainty. *Water Resources Research*, *60*(3), e2023WR035166. https://doi.org/10.1029/2023WR035166

Mack, U. D., Feger, K. H., Gong, Y., & Stahr, K. (2005). Soil water balance and nitrate leaching in winter wheat–summer maize double-cropping systems with different irrigation and N fertilization in the North China Plain. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *168*(4), 454-460. https://doi.org/10.1002/jpln.200520519

Mainuddin, M., Alam, M. M., Maniruzzaman, M., Islam, M. T., Kabir, M. J., Hasan, M., & Schmidt, E. (2019). Irrigated agriculture in the northwest region of Bangladesh. *CSIRO, Australia*. https://dsi4mtf.unisq.edu.au/wp-content/uploads/2019/07/Irrigated-Agriculture-in-northwest-region-of-Bangladesh.pdf

Maneta, M. P., Cobourn, K., Kimball, J. S., He, M., Silverman, N. L., Chaffin, B. C. & Maxwell, B. (2020). A satellite-driven hydro-economic model to support agricultural water resources management. *Environmental Modelling & Software*, *134*, 104836. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104836

Mankin, K. R., & Koelliker, J. K. (2000). A hydrologic balance approach to saline seep remediation design. *Applied Engineering in Agriculture*, *16*(2), 129-133. https://doi.org/10.13031/2013.5072

Medellín-Azuara, J., Escriva-Bou, A., Gaudin, A. C., Schwabe, K. A., & Sumner, D. A. (2024). Cultivating climate resilience in California agriculture: Adaptations to an increasingly volatile water future. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *121*(32), e2310079121. https://doi.org/10.1073/pnas.2310079121

Morrisett, C. N., Van Kirk, R. W., & Null, S. E. (2024). Can Agricultural Managed Aquifer Recharge (Ag-MAR) Recover Return Flows

irrigation system in Sirsa district, India: I. Current water management and its productivity. *Journal of Hydrology*, *329*(3-4), 692-713. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.037

Siyal, A. A., van Genuchten, M. T., & Skaggs, T. H. (2009). Performance of pitcher irrigation system. *Soil science*, *174*(6), 312-320. https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181a97532

Skaggs, T. H., Trout, T. J., Šimůnek, J., & Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of irrigation and drainage engineering*, *130*(4), 304-310. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(304)

Slavich, P. G. (1992). Irrigation using groundwater for watertable control: a model of water and salt balance limitations. *Australian Journal of Agricultural Research*, *43*(1), 225-239. https://doi.org/10.1071/AR9920225

Song, J. H., Song, I., Kim, J. T., & Kang, M. S. (2015). Characteristics of irrigation return flow in a reservoir irrigated district. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, *57*(1), 69-78. http://dx.doi.org/10.5389/KSAE.2015.57.1.069

Stigter, T. Y., Van Ooijen, S. P. J., Post, V. E. A., Appelo, C. A. J., & Dill, A. C. (1998). A hydrogeological and hydrochemical explanation of the groundwater composition under irrigated land in a Mediterranean environment, Algarve, Portugal. *Journal of Hydrology*, *208*(3-4), 262-279. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00168-1

Tiwari, A. K., Singh, P. K., Chandra, S., & Ghosh, A. (2016). Assessment of groundwater level fluctuation by using remote sensing and GIS in West Bokaro coalfield, Jharkhand, India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, *22*(1), 59-67. https://doi.org/10.1080/09715010.2015.1067575

Tulip, S. S., Siddik, M. S., Islam, M. N., Rahman, A., Haghighi, A. T., & Mustafa, S. M. T. (2022). The impact of irrigation return flow on seasonal groundwater recharge in northwestern Bangladesh. *Agricultural Water Management*, *266*, 107593. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107593

Uribe, J., Muñoz, J.F., Gironás, J., Oyarzún, R., Aguirre, E, & Aravena, R. (2015). Assessing groundwater recharge in an Andean closed basin using isotopic characterization and a rainfall-runoff model: Salar del Huasco basin, Chile. *Hydrogeology Journal*, *23*, 1535–1551. https://doi.org/10.1007/s10040-015-1300-z

Usman, M., Liedl, R., & Kavousi, A. (2015). Estimation of distributed seasonal net recharge by modern satellite data in irrigated agricultural regions of Pakistan. *Environmental Earth Sciences*, *74*(2), 1463-1486. https://doi.org/10.1007/s12665-015-4139-7

Vallet-Coulomb, C., Séraphin, P., Gonçalvès, J., Radakovitch, O., Cognard-Plancq, A. L., Crespy, A. & Charron, F. (2017). Irrigation return flows in a mediterranean aquifer inferred from Central Delta.. Cambridge University Press. https://doi.org/10.33774/coe-2024-w32nb

Sami, K., & Hughes, D. A. (1996). A comparison of recharge estimates to a fractured sedimentary aquifer in South Africa from a chloride mass balance and an integrated surface-subsurface model. *Journal of Hydrology*, *179*(1-4), 111-136. https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02843-9

Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Stonestrom, D. A., Prudic, D. E., & Dennehy, K. F. (2005). Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US. *Global Change Biology*, *11*(10), 1577-1593. https://doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.01026.x

Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology journal*, *10*(1), 18-39. https://doi.org/10.1007/s10040-0010176-2

Schepers, J. S., Moravek, M. G., Alberts, E. E., & Frank, K. D. (1991). Maize production impacts on groundwater quality. *Journal of Environmental Quality*, *20*(1), 12-16. https://doi.org/10.2134/jeq1991.00472425002000010004x

Schoups, G., Lee Addams, C., & Gorelick, S. M. (2005). Multi-objective calibration of a surface water-groundwater flow model in an irrigated agricultural region: Yaqui Valley, Sonora, Mexico. *Hydrology and Earth System Sciences*, *9*(5), 549-568. https://doi.org/10.5194/hess-9-549-2005

Séraphin, P., Vallet-Coulomb, C., & Gonçalvès, J. (2016). Partitioning groundwater recharge between rainfall infiltration and irrigation return flow using stable isotopes: The Crau aquifer. *Journal of Hydrology*, *542*, 241-253. https://doi.org/10.1016/j. jhydrol.2016.09.005

Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation–a global inventory. *Hydrology and earth system sciences*, *14*(10), 1863-1880. https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010

Silliman, S. E., Berkowitz, B., Simunek, J., & Van Genuchten, M. T. (2002). Fluid flow and solute migration within the capillary fringe. *Groundwater*, *40*(1), 76-84. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2002.tb02493.x

Šimunek, J., Van Genuchten, M. T., & Šejna, M. (2012). HYDRUS: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, *55*(4), 1263-1274. https://doi.org/10.13031/2013.42239

Singh, O. S., & Kasana, A. K. (2017). GIS-based spatial and temporal investigation of groundwater level fluctuations under rice-wheat ecosystem over Haryana. Journal of Geological Society of India, 89(5), 554–562. https://doi.org/10.1007/s12594-017-0644-5

Singh, R., Kroes, J. G., Van Dam, J. C., & Feddes, R. A. (2006). Distributed ecohydrological modelling to evaluate the performance of

Comprehensive model for sustainable water resource management in Southern Algeria: integrating remote sensing and WEAP model. *Modeling Earth Systems and Environment*, *10*(1), 1027-1042. https://doi.org/10.1007/s40808-023-01826-y

پی‌نوشت‌ها

1. Return Flow
2. Chloride mass balance (WMB)
3. Darcy's law
4. Water mass balance (WMB)
5. stable isotope techniques
6. Mixing processes
7. Water table fluctuation (WTF)
8. Water balance method (WBM)
9. Geographic information system
10. Geostatistical mapping
11. GWL: ground water level
12. Water and energy transfer between Soil, Plants, and Atmosphere under quasi-steady State (WetSpass)
13. The Water Agency
14. Remote Sensing
15. Water Evaluation and Planning (WEAP)
16. Acre
17. New South Wales
18. Leaching fraction
19. Water balance
20. Darcian flux calculations
21. quick return flow from irrigation canal
22. quick return flow from drainage canal
23. Delayed return flow
24. The Salar del Huasco basin
25. Irrigated return water
26. Lateral groundwater flow
27. Validation
28. roundwater Resource Estimation Committee
29. Wieringermeer
30. evapotranspiration
31. Agricultural managed aquifer recharge
32. Soil Moisture Depletion (SMD)
33. Renewable water
34. Non-renewable water
35. Time domain refrectometer
36. training
37. validation

combined chloride and stable isotopes mass balances. *Applied Geochemistry*, *86*, 92-104. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.10.001

Kirk, R. W. V., Contor, B. A., Morrisett, C. N., Null, S. E., & Loibman, A. S. (2020). Potential for managed aquifer recharge to enhance fish habitat in a regulated river. *Water*, *12*(3), 673. https://doi.org/10.3390/w12030673

Wang, L. P., Chen, Y. X., & Zeng, G. F. (1993). Irrigation, drainage and salinization control in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia. *Water Resources and Hydraulic Power Publisher, Beijing*, *250*.

Wallis, K. J., Candela, L., Mateos, R. M., & Tamoh, K. (2011). Simulation of nitrate leaching under potato crops in a Mediterranean area. Influence of frost prevention irrigation on nitrogen transport. *Agricultural Water Management*, *98*(10), 1629-1640. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.06.001

Ward, F. A., & Pulido-Velazquez, M. (2008). Water conservation in irrigation can increase water use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *105*(47), 18215-18220. https://doi.org/10.1073/pnas.0805554105

Willis, T. M., Black, A. S., & Meyer, W. S. (1997). Estimates of deep percolation beneath cotton in the Macquarie Valley. *Irrigation Science*,*17*(4), 141-150. https://doi.org/10.1007/s002710050032

Willis, T. M., & Black, A. S. (1996). Irrigation increases groundwater recharge in the Macquarie Valley. *Soil Research*, *34*(6), 837-847. https://doi.org/10.1071/SR9960837

Wood, W. W., & Sanford, W. E. (1995). Chemical and isotopic methods for quantifying ground-water recharge in a regional, semiarid environment. *Groundwater*, *33*(3), 458-468. https://doi.org/10.1111/j.17456584.1995.tb00302.x

Xu, X., Huang, G., Qu, Z., & Pereira, L. S. (2010). Assessing the groundwater dynamics and impacts of water saving in the Hetao Irrigation District, Yellow River basin. *Agricultural water management*, *98*(2), 301-313. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.025

Yang, Y., Wu, Q., Yun, H., Jin, H., & Zhang, Z. (2016). Evaluation of the hydrological contributions of permafrost to the thermokarst lakes on the Qinghai–Tibet Plateau using stable isotopes. *Global and planetary change*, *140*, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.03.006

Young, C. A., & Wallender, W. W. (2002). Spatially distributed irrigation hydrology: Water balance. *Transactions of the ASAE*, *45*(3), 609. https://doi.org/10.13031/2013.8823

Zegait, R., Bouznad, I. E., Remini, B., Bengusmia, D., Ajia, F., Guastaldi, E. , & Petrone, D. (2024).

Journal of Water and Sustainable Development. December 2025
Volume 12. Lssue 3 (Serial No. 37). pages 105 to 120

نشریه آب و توسعه پایدار. آذر ماه ۱۴۰۴
سال دوازدهم. شماره سوم (پیاپی ۳۷). صفحات ۱۰۵ تا ۱۲۰

Document Type: Applied Article

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

Identification of Social and psychological Factors Influencing Household Water Consumption in Tehran

شناسایی عوامل اجتماعی و روان‌شناختی موثر بر مصرف آب خانگی شهر تهران

Majid Ramshini[1], Bahman Hajipour*[2]

1- Ph.D. Candidate in Business Management, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2- Associate Prof., Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

*** Corresponding, Author Email:** b-hajipour@sbu.ac.ir

Received ▶ 13-05-2025
Revised ▶ 09-08-2025
Accepted ▶ 11-08-2025
Available online ▶ 16-12-2025

مجید رامشینی[1]، بهمن حاجی‌پور[2]*

۱- دانشجوی دکترای مدیریت بازرگانی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۲- دانشیار و عضو هیات علمی گروه مدیریت بازرگانی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

***رایانامه نویسنده مسئول:** b-hajipour@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت ◀ ۱۴۰۴/۰۲/۲۳
تاریخ بازنگری ◀ ۱۴۰۴/۰۵/۱۸
تاریخ پذیرش ◀ ۱۴۰۴/۰۵/۲۰
تاریخ انتشار ◀ ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

Abstract

Water scarcity in Tehran, within Iran's arid and semi-arid climate, has become a lasting crisis, with domestic water consumption trends indicating a potential annual deficit. Traditional solutions like dam construction and new water source extraction are increasingly inadequate. Consequently, researchers focus on altering consumer behavior through innovative strategies such as social marketing. This study employs the SHIFT theory, a modern behavioral change model for sustainability, to create a tool that identifies factors influencing household water consumption. The core dimensions of the SHIFT theory provide a framework for understanding sustainable behavior determinants. In the initial phase, a questionnaire was developed based on SHIFT theory variables, and content validity was evaluated by 14 experts from the water sector and academia. The second phase involved pre-testing and refining the questionnaire using responses from 135 domestic water consumers. After adjustments, the final questionnaire was distributed online, collecting 1,019 responses, 924 from Tehran residents. Partial Least Squares (PLS) analysis was performed using SmartPLS3 software. Results showed that emotions and descriptive norms significantly influence household water consumption behaviors. In particular, negative emotions associated with high water usage and the observed consumption behaviors of others were strong determinants of individual water use.

Keywords: SHIFT Model, Sustainable Behavior, Consumer Behavior, Household Water Use, Policy Making.

چکیده

مسئله کمبود آب در کلان‌شهر تهران به یک بحران پایدار تبدیل شده است و ادامه روند فعلی مصرف، به‌ویژه در حوزه خانگی، می‌تواند منجر به کسری جدی در تأمین آب شود. راهکارهایی مانند سدسازی و استحصال منابع جدید دیگر پاسخ‌گوی این بحران نیستند و در مقابل، تغییر رفتار مصرف‌کننده از طریق رویکردهایی مانند بازاریابی اجتماعی، به‌عنوان یک راهکار اثربخش و کم‌هزینه، مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، با تکیه بر نظریه «شیفت» به‌عنوان یکی از مدل‌های نوین تغییر رفتار پایدار، ابزاری بومی‌سازی‌شده طراحی شد تا عوامل موثر بر مصرف آب خانگی شناسایی شوند. نظریه شیفت با پنج بُعد اصلی شامل تأثیر اجتماعی، عادت، فردیت، احساسات و شناخت، و ملموس‌بودن، چارچوبی دقیق برای شناسایی این عوامل فراهم می‌آورد. در فاز نخست، پرسش‌نامه‌ای مبتنی بر متغیرهای نظریه شیفت طراحی و از طریق امتیازدهی شاخص روایی محتوایی توسط پنل ۱۴ نفره از خبرگان صنعت آب و دانشگاه‌ها تأیید شد. در فاز دوم، ۱۳۵ نفر از مصرف‌کنندگان به سوالات پاسخ دادند و پس از تعدیل سوالات، در فاز سوم، پرسش‌نامه نهایی به صورت آنلاین منتشر شد. ۱۰۱۹ نفر پاسخ دادند که ۹۲۴ پاسخ متعلق به شهروندان تهران تحلیل شد. تحلیل مدل اندازه‌گیری و ساختاری با روش حداقل مربعات جزیی توسط نرم افزار SmartPLS3 انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد که احساسات و هنجارهای توصیفی بیشترین تأثیر را بر رفتارهای مصرف آب خانگی دارند. بدین معنا که احساسات منفی نسبت به مصرف بالا و طریقه مصرف اطرافیان تأثیر زیادی بر رفتار فردی دارد.

واژه‌های کلیدی: مدل شیفت، رفتار پایدار، رفتار مصرف‌کننده، مصرف آب خانگی، سیاست‌گذاری

How to cite this article:
Ramshini, M., & Hajipour, B. (2025). Identification of Social and Psychological Factors Influencing Household Water Consumption in Tehran. Journal of Water and Sustainable Development, 12(3), 105-120. https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i3.2505-1424

مقدمه

بشریت با مصرف ناعادلانه منابع و شکست در سیاست‌های زیست‌محیطی و جمعیتی، آینده خود را تهدید کرده و این رفتار نه‌تنها منابع نسل‌های آینده را پیش‌دستانه مصرف می‌کند، بلکه سیستم‌های حیاتی زمین را نیز در معرض خطرهای جبران‌ناپذیری قرار می‌دهد (Ripple و همکاران، ۲۰۱۷). در این میان، بحران مصرف ناپایدار آب – با پیامدهای گسترده‌ای مانند تشدید خشکسالی و محدودیت‌های آبی – به چالشی حیاتی تبدیل شده که بسیاری از کشورها را وادار به اتخاذ سیاست‌های مدیریت پایدار آب به‌عنوان اولویتی ملی کرده است (Lowe و همکاران، ۲۰۱۵). منابع آبی در سطح جهان بسیار محدود بوده و روند افزایش مصرف خانگی آب علاوه بر ایجاد فشار بر این منابع محدود، موجب اثرات منفی اقتصادی و زیست محیطی شده است که این امر دولت‌ها و شرکت‌های ارائه دهنده خدمات آب را بر آن داشته است تا با فاصله گرفتن از روش‌های سنتی افزایش عرضه آب (ساخت و سازهای بیشتر برای افزایش استحصال آب)، به دنبال راه‌حل‌های پایدارتری باشند (Strengers، ۲۰۱۱).

کشور ایران با متوسط بارش حدود ۲۵۰ میلی‌متر یعنی تقریباً یک سوم متوسط جهانی، دارای اقلیمی خشک و نیمه‌خشک است. این میزان بارش نیز از نظر توزیع مکانی و زمانی، از شرایط مطلوبی جهت تقویت منابع آبی و دسترسی مناسب به منابع آبی در سطح کشور برخوردار نیست، به طوری که میزان بارش در استان‌های شمالی به بیش از ۱۴۰۰ میلی‌متر می‌رسد و در مناطق کویری حدود ۴۶ میلی‌متر در سال است (درگاه الکترونیکی شرکت مدیریت‌منابع‌آب‌ایران، ۱۴۰۱). در سال‌های اخیر ایران شاهد کاهش شدید بارش باران و خشک شدن سدها و پایین رفتن سطح آب چاه‌های مفید بوده است (درگاه الکترونیکی شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، ۱۴۰۴) و مطابق با گزارش بانک جهانی با ادامه روند کنونی، آب در این کشور در سال ۲۰۵۰ تقریباً به اتمام می‌رسد (World bank، ۲۰۱۸). تهران نیز با افزایش جمعیت و گسترش شهرسازی روبه‌رو است که این امر، کمیت و کیفیت آب در این کلان‌شهر را به شدت تحت تأثیر قرار داده (Bidhendi و همکاران، ۲۰۰۸) و منجر به استخراج بیش از حد آب از منابع زیرزمینی شده است (Mazyaki و همکاران، ۲۰۲۲؛ Savari و همکاران، ۲۰۲۱).

در تهران بیشترین حالت بارندگی هم که رخ بدهد، سدهای تهران گنجایش بیش از یک میلیارد مترمکعب را ندارند. مطابق آمار رسمی، مصرف آب در تهران نزدیک به ۸۰۰ میلیون متر مکعب است که بنابر این در یک سال پر باران هم منابع آبی قادر به ذخیره بیشتر از ۲۰۰ میلیون متر مکعب نخواهند بود (درگاه الکترونیکی شرکت آب و فاضلاب استان تهران، ۱۴۰۰). به طور کلی، میزان ذخایر آب سدهای تهران در مقایسه با سال‌های گذشته و میانگین درازمدت، کاهش چشمگیری داشته و به حدود ۲۱ درصد ظرفیت مخازن رسیده است. همچنین افت سطح آب‌های سطحی و زیرزمینی در سطح این استان نیز به عنوان یکی از نشانه‌های تداوم خشکسالی‌های سال‌های اخیر مطرح شده است (درگاه الکترونیکی شرکت آب منطقه‌ای تهران، ۱۴۰۴ب).

استان تهران با جمعیتی بالغ بر ۱۴/۵ میلیون نفر (درگاه الکترونیکی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان تهران، ۱۴۰۴) در اثر گرمای زودهنگام و بالارفتن دمای هوا نسبت به گذشته و در نتیجه استفاده حداکثر از آب شرب با توجه به کاهش میزان ورودی سدها در تأمین آب شرب با مشکلات اساسی مواجه شده است (درگاه الکترونیکی شرکت آب منطقه‌ای تهران، ۱۴۰۴ب). این در حالی است که بنابه گفته مدیرعامل شرکت آب و فاضلاب استان تهران، سرانه مصرف آب در شهر تهران ۲۵۰ لیتر در روز به ازای هر نفر برآورد شده است (درگاه الکترونیکی شرکت آب و فاضلاب استان تهران، ۱۴۰۴) که با الگوی ۱۳۰ لیتر در روز فاصله معناداری دارد. برخلاف بسیاری از مناطق کشور که کشاورزی سهم غالب مصرف آب را دارد، کل منابع آبی در استان تهران چهار میلیارد متر مکعب است که از این میزان ۴۲ درصد در بخش شرب، ۴۸ درصد حوزه کشاورزی، ۴ درصد خدمات و ۶ درصد هم در بخش فضای سبز استفاده می‌شود که نشان‌دهنده سهم تقریباً برابر این دو بخش است (درگاه الکترونیکی شرکت آب منطقه‌ای تهران، ۱۴۰۴الف). بنابراین کاهش مصرف آب شرب در تهران، تأثیر قابل توجهی بر منابع آبی این استان خواهد گذاشت (سجادی‌فر و همکاران، ۱۴۰۳).

تأمین آب از طریق سدسازی‌ها و حفرچاه‌های متعدد برای پاسخگویی به نیازهای روزافزون کلان شهرها، چالش‌های محیط زیستی بسیاری را با خود به همراه دارد. از طرفی، کاهش منابع آبی، همراه با به رسمیت شناختن دسترسی به آب سالم به‌عنوان یک حق اساسی بشر (Phipps و Brace-Govan، ۲۰۱۱)، لزوم حمایت از جامعه، تأمین بهداشت عمومی و رعایت عدالت اجتماعی، کاهش مصرف آب را دشوار ساخته و مستلزم تحقیقات گسترده‌ای برای یافتن راهکارهای مؤثر است. با این حال، پژوهش‌های اندکی به بررسی روش‌های کاهش داوطلبانه مصرف آب خانگی پرداخته‌اند (Hodges و همکاران، ۲۰۲۰). در این زمینه، Madias و Szymkowiak (۲۰۲۲) با یک مطالعه مرور نظام‌مند بر مقالات مرتبط با مدیریت پایدار آب، این خلا تحقیقاتی را مورد تأیید قرار داده‌اند. آن‌ها دریافتند که پژوهش‌های کافی برای درک رفتار جامعه و بررسی تأثیر ویژگی‌های مصرف‌کنندگان بر میزان مصرف آب انجام نشده است (Madias و Szymkowiak، ۲۰۲۲).

یکی از رویکردهای موثر که برای تغییر رفتار داوطلبانه مصرف‌کنندگان، استراتژی‌ها و سیاست‌های موثری در اختیار سیاست‌گذاران و مدیران قرار داده است، رویکرد «بازاریابی اجتماعی[1]» است که نخستین‌بار توسط Kotler و Zaltman در سال ۱۹۷۱ مفهوم‌سازی شد و در سال‌های بعد در حوزه بهداشت، درمان و سلامت بسیار مورد استفاده قرار گرفت

(Kotler و Zaltman، ۱۹۷۱). این مفهوم که بر پایه اصول و تکنیک‌های بازاریابی تجاری و با هدف ترویج و دستیابی به رفتارهای مطلوب اجتماعی شکل گرفته است، در سال‌های اخیر در حوزه حفاظت از محیط‌زیست مانند صرفه‌جویی در مصرف آب، به شدت مورد توجه قرار گرفته است (Sharma و همکاران، ۲۰۱۹). اهمیت بازاریابی اجتماعی و نقش اساسی آن را در تغییر رفتار، به‌طور قابل‌توجهی از سوی دولت‌های کشورهای توسعه‌یافته مورد پذیرش و استقبال قرار گرفته است (Rundle-Thiele و همکاران، ۲۰۱۵). این رویکرد بر درک عمیق رفتار مصرف‌کننده تأکید دارد و با طراحی اقدامات مشتری‌محور، تلاش می‌کند موانع رفتاری را کاهش داده و تغییرات مطلوب را تسهیل کند (Andreasen، ۲۰۰۲).

French و Blair در سال ۲۰۰۶ بهره‌گیری از «نظریه‌های رفتاری» برای تقویت اثربخشی مداخلات اجتماعی را به عنوان یکی از اصول بازاریابی اجتماعی وارد ادبیات این حوزه نمودند. «نظریه» در شناسایی عوامل موثر بر رفتار می‌تواند به عنوان یک چارچوب علمی، نقش یک راهنمای کاربردی را ایفا کند (French و Blair-Stevens، ۲۰۰۶). Sutton و Staw (۱۹۹۵) معتقدند که یک چارچوب نظری قوی، نه‌تنها تأثیر علمی یک پژوهش را افزایش می‌دهد، بلکه درک عمیق‌تری از موضوع را برای خوانندگان فراهم می‌کند.

به‌عنوان نمونه، Boivin و همکاران (۲۰۱۷) برای ترغیب مردم به کمپوست‌سازی در Quebec، و Schuster و همکاران (۲۰۱۵) برای تغییر رفتار فعالیت بدنی کودکان در Victoria از نظریه رفتار برنامه‌ریزی‌شده بهره بردند. همچنین، Ibrahim و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از نظریه رفتار بین‌فردی، رفتار مصرف آب را در میان دانشجویان و کارکنان دانشگاه Sharjah در امارات مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها معتقدند که محققان می‌توانند با استفاده از نظریه‌های رفتاری و شناسایی عوامل مؤثر بر مصرف آب در گروه‌های مختلف جمعیتی، اثربخشی بازاریابی اجتماعی را بهبود بخشند.

با وجود تأثیرگذاری بالای مداخلات مبتنی بر نظریه در تغییر رفتارهای اجتماعی، بسیاری از متخصصان بازاریابی اجتماعی از چارچوب‌های نظری در استراتژی‌های خود استفاده نمی‌کنند (Boivin و همکاران، ۲۰۱۷). به طور کلی استفاده از نظریه در عمل به درستی اجرا نمی‌شود(Kitunen و همکاران، ۲۰۲۳) که این امر معمولاً به دلیل عدم اولویت‌بخشی بازاریابان یا سازمان‌های پشتیبان به این مهم است (Boivin و همکاران، ۲۰۱۷؛ Ibrahim و همکاران، ۲۰۱۸). نظریه‌های رفتاری می‌توانند به پژوهشگران کمک کنند تا اصول کلیدی بازاریابی اجتماعی که توسط صاحبنظران سرآمد این رشته یعنی Andreasen (۲۰۰۲)، و French و Blair-Stevens (۲۰۰۶) پیشنهاد شده‌اند، را به طور کارآمدتر و اثربخش‌تری به کار گیرند. مطالعات نشان داده‌اند که مداخلات برآمده از رویکرد بازاریابی اجتماعی، نقش موثری در کاهش مصرف آب خانگی داشته‌اند. (Beal و همکاران، ۲۰۱۳؛ Carney، ۲۰۱۵؛ Dilotsotlhe و Duh، ۲۰۲۱؛ Fries و همکاران، ۲۰۲۰؛ Monaghan و همکاران، ۲۰۱۳؛ Warner، ۲۰۱۹؛ Warner و همکاران، ۲۰۲۲؛ Wells و همکاران، ۲۰۱۶).

تا کنون نظریه‌های مختلفی در علوم متنوعی مانند روان‌شناسی اجتماعی، اقتصاد رفتاری و سایر رشته‌های علوم رفتاری برای تغییر رفتار در افراد و جامعه مطرح شده‌اند که هر کدام از آن‌ها مورد استقبال و انتقاد بسیاری از صاحبنظران قرار گرفته‌اند. در این پژوهش ما به سراغ یکی از جدیدترین نظریه‌های رفتاری که نمونه توسعه یافته‌ای از نظریه‌های پیشین است رفته‌ایم و سعی داریم تا ابزاری را طراحی نماییم تا به وسیله آن سایر محققان بتوانند این نظریه را در حوزه رفتار مصرفی آب خانگی و در عمل به کار گیرند.

نظریه شیفت (SHIFT)

نظریه شیفت بر پایه بررسی جامعی از مطالعات پیش‌رو در بازاریابی و رفتار مصرف‌کننده شکل گرفت. White و همکاران (۲۰۱۹) با تحلیل مجلات معتبر بازاریابی شامل «نشریه بازاریابی[۲]»، «نشریه تحقیقات بازاریابی[۳]»، «نشریه روان‌شناسی مصرف‌کننده[۴]»، و «نشریه تحقیقات مصرف‌کننده[۵]»، به شناسایی راهکارهای مؤثر بر تغییر پایدار رفتار مصرف‌کنندگان پرداختند.

این پژوهشگران تمامی پژوهش‌های معطوف به رفتار پایدار را بررسی و تحلیل نموده و با هدف کاهش شکاف میان نگرش و رفتار، عوامل موثر بر رفتار پایدار را که از مفاهیم کلیدی چندین نظریه رفتاری مشتق شده‌اند، شناسایی نمودند (White و همکاران، ۲۰۱۹). نظریه‌هایی که در مقالات ذکر شده به کار رفته‌اند و چارچوب کلی شیفت را شکل داده‌اند، از این قرارند:

- نظریه رفتار برنامه‌ریزی‌شده[۶]: نقش نگرش، هنجارهای اجتماعی و کنترل رفتاری در شکل‌گیری نیت و رفتار.
- نظریه رفتارهای محیطی مهم[۷]: بررسی عوامل تعیین‌کننده رفتارهای زیست‌محیطی.
- نظریه تغییر رفتاری[۸]: چگونگی تحول رفتار در طول زمان.
- نظریه شناختی-تجربی شخصیت[۹]: تأثیر احساسات و شناخت بر تصمیم‌گیری.
- نظریه طرحواره[۱۰]: نحوه سازمان‌دهی اطلاعات در ذهن و تأثیر آن بر رفتار.

چارچوب شیفت تلاش می‌کند تا برای شکاف رایج میان نگرش و رفتار که در بسیاری از مسائل مربوط به پایداری مشاهده می‌شود، راه حل ارائه دهد. در تهران نیز شکاف میان نگرش و رفتار، مسأله‌ای چالش‌برانگیز است، جایی که ۶۸ درصد از افراد به بحران کمبود آب باور دارند، اما همچنان به مصرف بیش از حد آن ادامه می‌دهند (Feizi و Khatabiroudi، ۲۰۲۳). برای نمونه، مداخلات مبتنی بر مدل شیفت توانسته‌اند مصرف انرژی را از طریق تغییر عادت‌ها کاهش دهند (Tiefenbeck و همکاران، ۲۰۱۸) و بازیافت را از

طریق هنجارهای اجتماعی بهبود بخشند (White و Simpson، ۲۰۱۳). یکی از ویژگی‌های کلیدی شیفت، تأکید بر ملموس‌سازی نتایج است که به کمک آن می‌توان به طور موثری ادراک انتزاعی از کمبود آب در تهران را در نظر گرفت و مداخلاتی را ممکن ساخت که پیامدها را به‌طور خاص و بومی‌سازی شده به نمایش گذارد (مانند ملموس‌سازی کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در محله‌های خاص).

مطابق با نظریه شیفت، رفتار پایدار را می‌توان با عواملی چون تأثیر اجتماعی، عادت، فردیت، احساس و شناخت، و ملموس بودن، مورد تحلیل قرار داد. این مدل که بر پایه بررسی گسترده‌ای از مطالعات علوم رفتاری و بازاریابی شکل گرفته است، چارچوب جامعی را برای تغییر رفتار مصرف‌کنندگان به سمت رفتارهای پایدار، معرفی می‌کند. این عوامل عبارتند از:

۱. تأثیر اجتماعی[۱۱] (S): تأثیرات اجتماعی یکی از قوی‌ترین عوامل شکل‌دهنده رفتار است. این مفهوم شامل موارد زیر است:

- هنجارهای اجتماعی[۱۲]: باورهای جامعه درباره رفتارهای پذیرفته‌شده و مورد تأیید.
- هویت اجتماعی[۱۳]: تعلق به گروه‌هایی که رفتارهای پایدار را ترویج می‌کنند.
- مطلوبیت اجتماعی[۱۴]: تمایل به انجام رفتارهای پایدار برای بهبود تصویر اجتماعی.

۲. شکل‌گیری عادت[۱۵] (H): رفتارهای پایدار زمانی تثبیت می‌شوند که به عادت‌های روزمره تبدیل شوند. عادت‌ها از طریق تکرار رفتارها تقویت می‌شوند و با گذشت زمان به رفتارهای خودکار تبدیل می‌گردند. به‌عنوان مثال، دوش گرفتن طولانی‌مدت در ابتدا یک انتخاب آگاهانه است، اما با تکرار، به یک عادت روزمره تبدیل می‌شود. در چارچوب شیفت، راهکارهایی برای تغییر عادات نامطلوب و جایگزینی آن‌ها با رفتارهای پایدار پیشنهاد شده است. این پیشنهادها عبارتند از:

- حذف موانع و تغییر محیط برای کاهش رفتارهای نامطلوب (مثلاً افزایش هزینه آب برای مصرف بالا).
- ترویج رفتارهای جدید از طریق پاداش و بازخورد (مثلاً پیام‌هایی که کاهش مصرف انرژی را نشان می‌دهند).

۳. فردیت[۱۶] (I): افراد تمایل دارند رفتارهایی انجام دهند که با ارزش‌ها و هویت آنان هم‌خوانی داشته باشد. این مفهوم، دربرگیرنده مفاهیم زیر است:

- خودپنداره[۱۷]: افراد تمایل دارند رفتارهایشان با تصویری که از خود دارند، هماهنگ باشد.
- خودکارآمدی[۱۸]: باور به اینکه اقدامات فردی می‌تواند اثرگذار باشد.
- منافع شخصی[۱۹]: تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر منافع فردی و تأثیر آن بر پایداری رفتارها.
- ثبات شخصی[۲۰]: تلاش برای حفظ سازگاری بین باورها و رفتارها.
- تفاوت‌های فردی[۲۱]: نقش ویژگی‌های شخصیتی در نوع واکنش به پیام‌های پایداری.

۴. احساسات و شناخت[۲۲] (F&c): مصرف‌کنندگان در تصمیم‌گیری‌های رفتاری از دو مسیر احساسی و یا شناختی تأثیر می‌پذیرند. این دو مسیر نشان‌دهنده اهمیت احساسات و شناخت در پذیرش رفتارهای دوستدار محیط‌زیست هستند. احساسات شامل عواطفی مانند غم، خشم، ترس، شادی و افتخار است که می‌توانند انگیزه افراد را برای رفتارهای پایدار افزایش دهند. شناخت نیز به آگاهی از پیامدها و دلایل انجام یک رفتار مطلوب اشاره دارد که به درونی‌سازی و تداوم رفتارهای پایدار کمک می‌کند. تقویت آگاهی و باورهای مثبت درباره اثرات رفتارهای پایدار می‌تواند استراتژی‌های کارآمدی برای تغییر رفتارهای مرتبط با صرفه‌جویی در مصرف آب ارائه دهد (Addo و همکاران، ۲۰۱۸). با این حال، افزایش آگاهی به‌تنهایی برای تغییر رفتار، کافی نیست. تأثیرگذاری کمپین‌های آگاهی‌بخشی زمانی بیشتر خواهد بود که اقدامات و سیاست‌های عملی نیز برای اصلاح رفتارها اجرا شوند (Andreasen، ۲۰۰۲). از طرفی موفقیت در مدیریت مصرف آب خانگی به درک عمیق‌تری از باورها و فرآیندهای شناختی افراد درباره آب و نحوه استفاده از آن بستگی دارد (Jorgensen و همکاران، ۲۰۰۹).

۵. ملموس‌بودن[۲۳] (T): ملموس‌بودن، به‌عنوان آخرین عنصر این نظریه، به وضوح و شفافیت اقدامات پایدار اشاره دارد. اگر نتایج رفتارهای پایدار نامشخص و مبهم باشند، انگیزه برای ادامه رفتار پایدار کاهش می‌یابد. از آنجا که بسیاری از پیامدهای زیست‌محیطی، انتزاعی و بلندمدت هستند، لازم است آن‌ها را ملموس و قابل درک ساخت (White و همکاران، ۲۰۱۹).

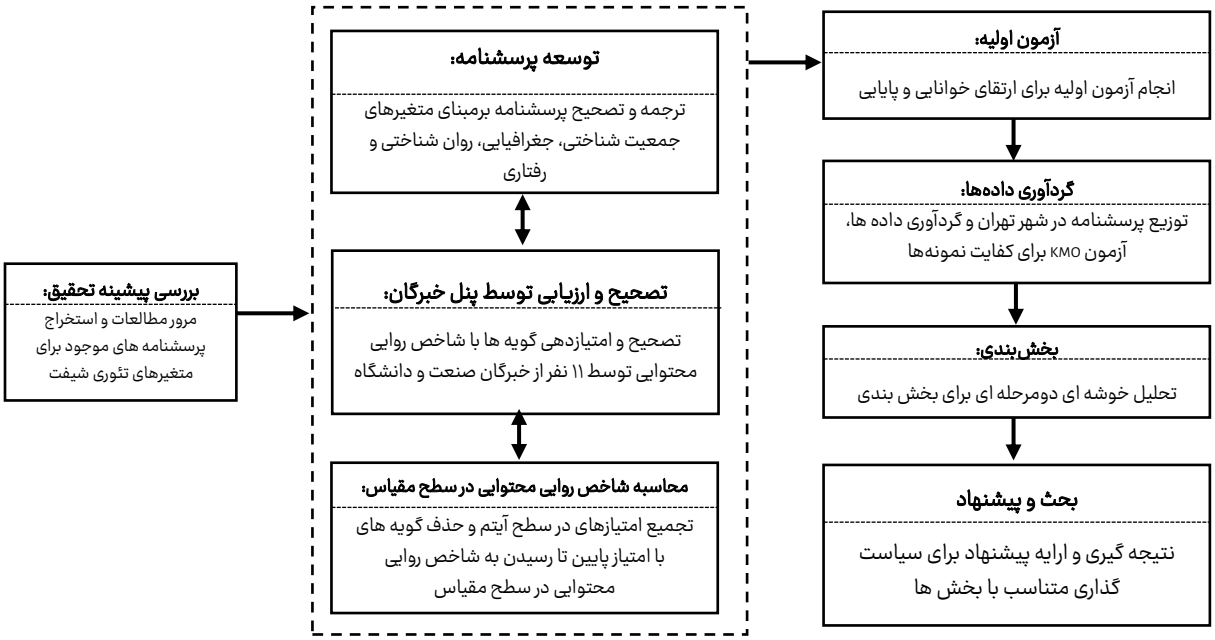
از آن جایی که این نظریه، رویکردی جامع و کاربردی برای درک و تغییر رفتار مصرف‌کنندگان ارائه می‌دهد و می‌تواند به مدیریت بهینه منابع آب کمک کند، این پژوهش قصد دارد با استفاده از این نظریه در فرآیند بخش‌بندی بازار، به گسترش دانش در حوزه رفتار مصرف آب خانگی بپردازد. هدف اصلی این تحقیق، ساخت ابزاری مناسب از متغیرهای نظریه شیفت و پاسخ به سوال‌های زیر است:

- هنجارهای توصیفی چه تأثیری بر عادات مصرف آب دارند؟
- هنجارهای تأییدی چه تأثیری بر عادات مصرف آب دارند؟
- فردیت چه تأثیری بر عادات مصرف آب دارد؟
- احساسات چه تأثیری بر عادات مصرف آب دارند؟
- شناخت چه تأثیری بر عادات مصرف آب دارد؟
- ملموس‌سازی عواقب محیط زیستی چه تأثیری بر عادات مصرف آب دارد؟

روش‌شناسی پژوهش

طراحی و توسعه پرسش‌نامه مبتنی بر ابعاد چارچوب شیفت در چند مرحله انجام شد. ابتدا با بررسی جامع پیشینه تحقیق، سوال‌های مرتبط با متغیرهای شیفت گردآوری شدند. در گام بعد، یک پنل خبرگان متشکل از ۱۴ متخصص شامل

۳ استاد دانشگاه و ۱۱ متخصص حوزه مدیریت مصرف آب در تهران با حداقل ۵ سال سابقه کاری در این زمینه به منظور بومی‌سازی سوال‌ها انتخاب شدند. این خبرگان به ارزیابی، حذف، اصلاح و اضافه کردن سوال‌ها پرداختند و به سوال‌های ویرایش شده نهایی امتیاز دادند. فرآیند بازبینی سوال‌ها با برخی از خبرگان تا ۳ مرحله تکرار شد تا به کیفیت و اعتبار محتوایی مطلوب دست یابیم. دربخش میدانی تحقیق، پرسش‌نامه در دو مرحله، ابتدا به صورت پایلوت سپس به صورت گسترده‌تر توزیع و نتایج حاصل از آن تجزیه و تحلیل شد. به طور کلی مراحل طراحی پرسش‌نامه و اجرای آن در شکل (۱) قابل مشاهده است. این رویکرد نظام‌مند، نه‌تنها به طراحی پرسش‌نامه‌ای علمی و بومی‌شده انجامید، بلکه اطمینان از روایی و پایایی ابزار اندازه‌گیری را نیز فراهم ساخت. مراحل مرتبط با روایی سازه و اجرای آن نیز دربخش‌های بعدی به‌تفصیل توضیح داده می‌شود.



شکل ۱- مراحل انجام تحقیق

شاخص روایی محتوایی

شاخص روایی محتوایی شاخصی است برای سنجش اعتبار گویه‌های پرسش‌نامه بر اساس نظر خبرگان. Polit و Beck (۲۰۰۶) با بررسی نتایج صاحبنظرانی چون Waltz و Bausell (۱۹۸۱)، Davis (۱۹۹۲) و Lynn (۱۹۸۶) عنوان داشتند که شاخص روایی محتوایی در دو سطح آیتم (I-CVI) و مقیاس (S-CVI) می‌بایست مورد ارزیابی قرار گیرد (Davis، ۱۹۹۲؛ Lynn، ۱۹۸۶؛ Polit و Beck، ۲۰۰۶؛ Waltz و Bausell، ۱۹۸۱). ارزیابی این شاخص‌ها مطابق با نظر Polit و Beck (۲۰۰۶) بدین ترتیب انجام شد:

شاخص روایی محتوایی در سطح آیتم[۲۴] (I-CVI):

شاخص روایی محتوایی در سطح آیتم با انتخاب یکی از چهار گزینه توسط خبرگان بدین شرح سنجیده شد: ۱. «مربوط نیست»، ۲. «نسبتاً مربوط است»، ۳. «مربوط است»، و ۴. «کاملاً مربوط است». تعداد خبرگانی که گزینه ۳ یا ۴ را برای یک گویه انتخاب کرده‌اند، بر تعداد کل خبرگان تقسیم می‌شوند. Polit و Beck (۲۰۰۶) پیشنهادهایی مشابه معیارهای Lynn (۱۹۸۶) ارائه می‌کنند که در آن چنانچه تعداد خبرگان بین ۳ تا ۵ نفر باشد، I-CVI = 1 قابل قبول است و در صورت استفاده ۶ تا ۱۰ نفر از خبرگان I-CVI > 0.78 قابل قبول است. در این مطالعه ۱۱ نفر از خبرگان صنعت آب در حوزه مدیریت مصرف به علاوه ۳ نفر از خبرگان دانشگاه در حوزه رفتار مصرف‌کننده، شرکت کردند. در مرحله ابتدایی به کمک سه نفر از خبرگان صنعت آب، تعدادی از سوال‌ها ویرایش و حذف و تعدادی سوال به پرسش‌نامه اضافه شد. پس از امتیازدهی سوال‌ها توسط این سه نفر، نظرات و پیشنهادهای دو نفر از خبرگان دانشگاه نیز گرفته شده و سوال‌هایی اضافه و حذف شدند. در مرحله بعدی سوال‌های نهایی توسط تمامی ۱۴ خبره امتیازدهی شدند. گویه‌هایی که I-CVI آن‌ها کمتر از ۰/۸ بود حذف شده و نتایج گویه‌های باقی مانده در جدول (۱) قابل مشاهده است.

شاخص روایی محتوایی در سطح مقیاس[۲۵] (S-CVI):

شاخص روایی محتوایی در سطح مقیاس به دو صورت قابل محاسبه است: «توافق همگانی[۲۶]» و «میانگین[۲۷]». در محاسبه شاخص توافق همگانی تعداد آیتم‌هایی که نمره‌های ۳ یا ۴ گرفته‌اند بر تعداد تمامی آیتم‌ها تقسیم می‌شوند. Davis (۱۹۹۲) عدد ۰/۸ به بالا را قابل قبول می‌داند. در مورد S-CVI به روش محاسبه میانگین که روش لیبرال‌تری به نظر می‌رسد، مجموع اعداد به دست آمده برای I-CVIها بر تعداد گویه‌ها

تقسیم می‌شود. Waltz و همکاران (۲۰۰۵) عدد ۰/۹ به بالا را قابل قبول می‌دانند. Polit و Beck (۲۰۰۶) معتقدند که رسیدن به این عدد دشوار نیست، چرا که می‌توان گویه‌هایی که I-CVI غیرقابل قبولی کسب کرده‌اند را مورد بازبینی و ارزیابی مجدد قرار داد. در این پژوهش پس از حذف سوال‌های با ICV-I کمتر از ۰/۸، مقدار ICV-I بالاتر از ۰/۹ برای هر مقیاس به دست آمد.

پیش‌آزمون

ابتدا پرسش‌نامه در سایت پرس‌لاین طراحی و پس از توزیع، ۱۳۵ نفر آن را تکمیل نمودند. به منظور استخراج داده‌های واقعی‌تر و عدم تأثیر سوال‌های متغیرهایی چون شناخت و احساس بر روی متغیر عادت، با نظر خبرگان ابتدا سوال‌های مربوط به عادت در پرسش‌نامه آورده شد. پس از تحلیل پرسش‌نامه و دریافت بازخوردهای لازم، برخی از سوال‌ها از نظر خوانایی تصحیح شد و به منظور بالا بردن پایایی پرسش‌نامه، سه سوال که بار عاملی پایینی داشتند (کمتر از ۰/۴)، حذف شدند. گویه‌های حذف شده شامل یک گویه از سازه شناخت (ملاحظه و توجه به میزان مصرف آب، خیلی اهمیت ندارد) و دو گویه از سازه ملموس‌بودن (۱. تا چه حد کمبود آب بر بهداشت و سلامت خود و خانواده شما تأثیرگذار بوده است؟ ۲. کاهش منابع آب را تهدیدی برای خود و خانواده‌ام نمی‌دانم) می‌باشد.

گردآوری و تحلیل داده‌ها

جامعه آماری این مطالعه را شهروندان شهر تهران تشکیل می‌دهند. به منظور گردآوری داده‌های تحقیق، پرسش‌نامه توسعه یافته، در سایت پرس‌لاین طراحی و لینک آن در شبکه‌های اجتماعی مانند واتس‌اپ و تلگرام به اشتراک گذاشته شد. هرچند از روش نمونه‌گیری دردسترس استفاده شد، با این حال، نتایج نشان داد که توزیع داده‌ها در شمال (مناطق ۱ تا ۵)، مرکز (مناطق ۶ تا ۱۴ و ۲۲) و جنوب شهر (مناطق ۱۵ تا ۲۱) دارای توزیع نسبتاً یکنواخت و متعادلی است. ۲۱۱۱ نفر از پرسش‌نامه بازدید کردند که ۱۰۱۹ نفر از آنان اقدام به تکمیل سوالات نمودند. از این تعداد، ۹۵ نفر به دلیل سکونت در خارج از تهران، کنار گذاشته شدند و در نهایت ۹۲۴ پاسخ برای تجزیه و تحلیل داده‌ها انتخاب شدند. کفایت نمونه‌گیری نیز با استفاده از آزمون KMO مورد سنجش قرار گرفت و عدد ۰/۹۲۵ به دست آمد که نشان می‌دهد تعداد نمونه‌ها در حد مطلوب است. تحلیل داده‌های توصیفی توسط نرم افزار SPSS27 و تحلیل عاملی تأییدی و مدل تحقیق، توسط نرم افزار SmartPLS3 به روش حداقل مربعات جزئی انجام شد.

نتایج

نتایج توصیفی داده‌ها نشان می‌دهد که ۶۰ درصد از مجموع شرکت‌کنندگان را مردان و ۴۰ درصد دیگر را زنان تشکیل می‌دهند. حدود نیمی از افراد بین سنین ۳۱ تا ۵۰ سال، ۲۱ درصد ۵۱ تا ۶۰ سال و مابقی افراد، بالای ۶۱ سال هستند. ۳۲ درصد آنان دارای مدرک لیسانس و ۳۳ درصد فوق لیسانس دارند. تقریباً نیمی از شرکت‌کنندگان دارای شغل تمام‌وقت هستند و درآمد ماهیانه ۵۰ درصد شرکت‌کنندگان بین ۱۱ تا ۳۰ میلیون تومان است. ۷۴ درصد از افراد، مالک محل سکونت خود هستند و ۵۷ درصد نیز در آپارتمان‌های ۲ تا ۱۰ واحدی زندگی می‌کنند.

تحلیل مدل اندازه‌گیری

در ارزیابی پایایی مدل، Hulland (۱۹۹۹) بارهای عاملی بالای ۰/۴ را مناسب می‌داند، در حالی که Rivard و Huff (۱۹۸۸) بارهای عاملی بالاتر از ۰/۵ را پیشنهاد می‌دهند (Hulland، ۱۹۹۹؛ Rivard و Huff، ۱۹۸۸). بنابراین گویه‌های حاوی بارعاملی پایین‌تر از ۰/۵، برای حفظ پایایی مدل حذف شدند. گویه‌های حذف شده عبارتند از: گویه ۸ از سازه عادات درون منزل، گویه ۱۰ از سازه عادات بیرون از منزل، گویه ۳۴ از سازه شناخت، گویه ۴۴ از سازه ملموس‌بودن، و گویه‌های ۲۰ و ۲۱ از سازه فردیت. یکی از مواردی که برای سنجش پایایی در روش مدل‌سازی معادلات ساختاری به کار می‌رود، پایداری درونی (سازگاری درونی) مدل‌های اندازه‌گیری است. پایداری درونی، نشان‌گر میزان همبستگی بین یک سازه و شاخص‌های مربوط به آن است.

جدول ۱- پرسش‌نامه مبتنی بر نظریه شیفت و شاخص‌های روایی محتوا در سطح آیتم و مقیاس

متغیر	سوال	منبع	I-ICV	S-ICV	گزینه‌ها
عادت: بهداشت فردی، عادات درون خانه، عادات بیرون از خانه	H1. موقع مسواک‌زدن، شیرآب را باز می‌گذارم.	(Aitken و همکاران، ۱۹۹۴؛ Gregory و Leo، ۲۰۰۳؛ Ibrahim و همکاران، ۲۰۱۸)	۱	۰/۹۵۷	۰) این سوال به من مربوط نمی‌شود ۱) هیچ وقت ۲) گاهی وقت‌ها ۳) نصف مواقع ۴) بیشتر وقت‌ها ۵) همیشه
	H2. عادت دارم زمان زیادی را برای دوش گرفتن صرف کنم. (دوش گرفتن‌هایم طولانی‌ست اگرچه کوتاه‌تر هم کافی‌ست.)	(Gregory و Leo، ۲۰۰۳)	۱		
	H3. قبل از دوش گرفتن، شیر آب را باز می‌گذارم تا محیط حمام گرم شود.	محقق ساخته	۱		
	H4. هنگامی که در حمام هستم به هر دلیلی شیر آب از ابتدا تا انتها باز است (گرم کردن محیط، احساس آرامش و...)	محقق ساخته	۰/۸۵۷		
	H6. زمانی ماشین لباسشویی را روشن می‌کنم که ظرفیت آن پُر شده باشد. (معکوس)	(Aitken و همکاران، ۱۹۹۴؛ Gregory و Leo، ۲۰۰۳؛ Ibrahim و همکاران، ۲۰۱۸)	۰/۹۲۹		
	H7. زمانی از ماشین ظرفشویی استفاده می‌کنم که ظرفیت آن تکمیل شده باشد. (معکوس)	محقق ساخته	۰/۹۲۹		
	H8. هنگام شست و شوی ظروف کثیف، آن‌ها را در سینک پر از آب (و مواد پاک‌کننده) غوطه‌ور می‌کنم.	محقق ساخته	۰/۹۲۹		
	H9. موقع شست و شوی ظروف/ وسایل/ میوه/ سبزیجات و ... شیر آب به صورت ممتد باز است.	محقق ساخته	۰/۹۲۹		
	H10. برای آبیاری فضای سبز یا باغچه، از آب لوله‌کشی (آشامیدنی) استفاده می‌کنم.	محقق ساخته	۱		
	H11. فضای سبز را در ساعات اولیه صبح و یا عصر (شب) آبیاری می‌کنم. (معکوس)	ویرایش شده (Aitken و همکاران، ۱۹۹۴؛ Gregory و Leo، ۲۰۰۳؛ Ibrahim و همکاران، ۲۰۱۸)	۰/۹۲۹		
	H12. خودرو را خودم تمیز می‌کنم و برای این کار از شیلنگ آب شرب استفاده می‌کنم.	ویرایش شده (Aitken و همکاران، ۱۹۹۴؛ Gregory و Leo، ۲۰۰۳؛ Ibrahim و همکاران، ۲۰۱۸)	۱		
	H13. حیاط، مشاعات یا پارکینگ منزل را با شیلنگ آب تمیز می‌کنم.	محقق ساخته	۱		
	H14. وقتی منزل را ترک می‌کنم، کولر آبی را روشن می‌گذارم تا پس از بازگشت به منزل، محیط خانه خنک باشد.	محقق ساخته	۱		
	H15. هنگام خرید وسایل، کالاها، شیرآلات و تجهیزات به میزان اثرگذاری آن‌ها در مقدار مصرف آب توجه می‌کنم و برایم مهم است. (معکوس)	محقق ساخته	۰/۸۵۷		
فردیت	I1. من خودم را دوستدار محیط‌زیست می‌دانم.	(Whitmarsh و O'Neill، ۲۰۱۰)	۱	۰/۹۷۶	کاملاً مخالفم ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ کاملاً موافقم
	I2. من شخصاً نسبت به مسائل و موضوعات آب حساس هستم.	ویرایش شده (Whitmarsh و O'Neill، ۲۰۱۰)	۱		
	I3. من باور دارم که می‌توانم مصرف آب را کاهش دهم.	ویرایش‌شده (Thøgersen و Grønhøj، ۲۰۱۰؛ Yazdanpanah و همکاران، ۲۰۱۵)	۰/۹۲۹		
	I4. این وظیفه اخلاقی من است تا سهم خود را در کاهش مصرف آب ایفا کنم.	ویرایش‌شده (Corbett، ۲۰۰۵)	۱		
	I5. برای من، راحتی و آسایش، خیلی بیشتر از صرفه‌جویی در مصرف آب اهمیت دارد. (معکوس)	(Gregory و Leo، ۲۰۰۳؛ Ibrahim و همکاران، ۲۰۱۸)	۱		
	I6. اگر مجبور شوم پول بیشتری پرداخت کنم، مصرف آب را کاهش می‌دهم.	(Aitken و همکاران، ۱۹۹۴؛ Ibrahim و همکاران، ۲۰۱۸)	۰/۹۲۹		
احساسات	F1. وقتی می‌بینم فردی آب را هدر می‌دهد (دوش گرفتن‌های طولانی، شستن خودرو یا پیاده‌رو با شیلنگ آب و ...) احساس بدی پیدا می‌کنم.	ویرایش شده (de Miranda Coelho و همکاران، ۲۰۱۶)	۱	۰/۹۴۱	کاملاً مخالفم ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ کاملاً موافقم
	F2. آگاهی پایین و بی‌توجهی بعضی از مردم در مورد صرفه‌جویی در مصرف آب، مرا خشمگین می‌کند.	(de Miranda Coelho و همکاران، ۲۰۱۶)	۰/۸۵۷		
	F3. وقتی می‌بینم در خیابانی نشتی آب وجود دارد و همین طور هدر می‌رود احساس بدی پیدا می‌کنم.	(de Miranda Coelho و همکاران، ۲۰۱۶)	۱		
	F4. وقتی فراموش می‌کنم شیر آب را ببندم از دست خودم عصبانی می‌شوم.	(de Miranda Coelho و همکاران، ۲۰۱۶)	۰/۹۲۹		
	F5. وقتی فردی را می‌بینم که آب را به درستی مصرف می‌کند و از هدررفتن آن جلوگیری می‌کند، خوشحال می‌شوم. (معکوس)	(de Miranda Coelho و همکاران، ۲۰۱۶)	۱		
	F6. وقتی شیر آب را همین طور باز می‌گذارم احساس گناه می‌کنم.	(de Miranda Coelho و همکاران، ۲۰۱۶)	۰/۸۵۷		

شناخت	C1. با ادامه روند موجود در مصرف آب، تهران با مشکلات جدی‌تر و حادتری در تأمین آب مواجه خواهد شد.	محقق ساخته	۱	۰/۹۷۴	کاملاً مخالفم ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ کاملاً موافقم
	C2. در تهران نیاز جدی به صرفه‌جویی در مصرف آب وجود دارد.	(Gregory و Leo، ۲۰۰۳)	۱		
	C3. مردم نیاز دارند تا برای صرفه‌جویی در مصرف آب تشویق شوند.	(Gregory و Leo، ۲۰۰۳)	۱		
	C4. من آب را منبع کمیاب و ارزشمندی می‌دانم که باید با دقت مصرف شود.	(Gregory و Leo، ۲۰۰۳)	۱		
	C5. آب، فراهم‌کننده زیستگاه گیاهان و جانوران است. حفظ آن نیاز به تلاش جدی دارد.	(Gregory و Leo، ۲۰۰۳)	۱		
	C6. من نسبت به مصرف بی‌رویه آب در تهران و وضعیت منابع آب در آینده دغدغه دارم.	(Gregory و Leo، ۲۰۰۳)	۰/۸۵۷		
	C7. قبل از این‌که در تأمین آب، مشکل جدی به وجود آید، طبیعت خودش راهی برای این مشکلات پیدا می‌کند. (معکوس)	(Gregory و Leo، ۲۰۰۳)	۰/۹۲۹		
	C8. صرفه‌جویی در مصرف آب برای حفظ منابع طبیعی و محیط زیست لازم است.	(Gregory و Leo، ۲۰۰۳)	۱		
	C9. تقاضا برای آب در تهران بسیار بیشتر از منابع آبی موجود است.	(Gregory و Leo، ۲۰۰۳)	۱		
	C10. کمبود آب، مسأله بسیار مهمی برای تهران است.	(Gregory و Leo، ۲۰۰۳)	۰/۹۲۹		
	C11. اگر شیوه‌های مصرف آب در تمام‌بخش‌ها (شرب، صنعت، کشاورزی) تغییر نکنند، منابع آب پاسخگوی نیازهای تهران نخواهد بود.	ویرایش شده (Gregory و Leo، ۲۰۰۳)	۱		
ملموس‌بودن	T1. من تصویر واضح و شفافی از وضعیت منابع آب تهران در ذهنم دارم.	ویرایش شده (McDougall و Snetsinger، ۱۹۹۰)	۰/۹۲۹	۰/۹۵۹	خیلی شفاف ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ خیلی مبهم
	T2. وقتی صحبت از صرفه‌جویی می‌شود، راه‌های صرفه‌جویی، به وضوح به ذهنم می‌آید.	ویرایش شده (McDougall و Snetsinger، ۱۹۹۰)	۰/۹۲۹		
	T3. مشکل کم‌آبی به وضوح قابل لمس است.	ویرایش شده (McDougall و Snetsinger، ۱۹۹۰)	۰/۹۲۹		
	T4. می‌توانم وضعیت منابع آب تهران و اثرات کم‌آبی در آینده را به وضوح در ذهنم تجسم کنم.	ویرایش شده (McDougall و Snetsinger، ۱۹۹۰)	۰/۹۲۹		
	T5. تا چه حد احتمال می‌دهید که با ادامه روند موجود، آب تمام شود و مجبور به تهیه آب به روش‌های دیگر شوید.	محقق ساخته	۱		خیلی کم ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ خیلی زیاد
	T6. تا چه حد طی سال‌های اخیر، قطعی آب را تجربه کرده‌اید.	محقق ساخته	۱		
	T7. تا چه حد متوجه اثرات کمبود آب بر محیط زیست شده‌اید.	محقق ساخته	۱		
تأثیر اجتماعی: هنجارهای توصیفی و تأییدی	S1. بسیاری از اعضای خانواده‌ام آب زیادی مصرف می‌کنند.	(Ibrahim و همکاران، ۲۰۱۸)	۰/۹۲۹	۰/۹۴۱	کاملاً مخالفم ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ کاملاً موافقم
	S2. بسیاری از اطرافیان نزدیک من (دوستان، همکاران، هم‌کلاسی و...) آب زیادی مصرف می‌کنند.	ویرایش شده (Courneya و Rhodes، ۲۰۰۳)	۰/۹۲۹		
	S3. بسیاری از هم‌محلی‌هایم (همسایه‌ها و همشهریان) آب زیادی مصرف می‌کنند.	ویرایش شده (Courneya و Rhodes، ۲۰۰۳)	۰/۹۲۹		
	S4. افرادی که در زندگی برایم خیلی اهمیت دارند معتقدند که باید آب را به دقت مصرف کرد. (معکوس)	(Ibrahim و همکاران، ۲۰۱۸)	۰/۹۲۹		
	S5. افراد مهم زندگی‌ام از من انتظار دارند که در مصرف آب صرفه‌جویی کنم. (معکوس)	(Ibrahim و همکاران، ۲۰۱۸)	۰/۹۲۹		
	S6. اگر با هر روشی در مصرف آب صرفه‌جویی کنم، افرادی که نظرشان برایم مهم است، این کار را تأیید می‌کنند. (معکوس)	ویرایش شده (Ibrahim و همکاران، ۲۰۱۸)	۱		

مقدار بالای واریانس تبیین‌شده بین سازه و شاخص‌هایش در مقابل خطای اندازه‌گیری مربوط به هر شاخص، پایداری درونی بالا را نتیجه می‌دهد. مقدار آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی بالاتر از ۰/۷، نشان‌دهنده پایداری درونی مناسب مدل اندازه‌گیری است. معیار میانگین واریانس استخراج‌شده نیز نشان‌دهندهٔ میانگین واریانس به اشتراک گذاشته‌شده بین هر سازه با شاخص‌های خود است. به بیان ساده‌تر، AVE میزان همبستگی یک سازه با شاخص‌های خود را نشان می‌دهد که هرچه این همبستگی بیشتر باشد، برازش نیز بیشتر است. Fornell و Larcker (۱۹۸۱) معیار AVE را برای سنجش روایی همگرا معرفی کرده و اظهار داشتند که در مورد AVE، مقدار بحرانی، عدد ۰/۵ است. بدین معنی که مقدار AVE بالاتر از ۰/۵، روایی همگرای قابل قبول را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود با حذف گویه‌های ذکر شده، برازش مدل (به جز عادات بیرون از خانه) با آلفای کرونباخ، rho، و CR بالاتر از ۰/۷ و AVE بالاتر از ۰/۵، مطلوب ارزیابی شد.

معیار مهم دیگری که با روایی واگرا مشخص می‌گردد، میزان رابطه یک سازه با شاخص‌هایش در مقایسه رابطه آن سازه با سایر سازه‌ها است. به طوری که روایی واگرای قابل قبول یک مدل حاکی از آن است که یک سازه در مدل، تعامل بیشتری با شاخص‌های خود دارد تا با سازه‌های دیگر. Fornell و Larcker (۱۹۸۱) بیان می‌کنند، روایی واگرا وقتی در سطح قابل قبول است که میزان AVE برای هر سازه بیشتر از واریانس اشتراکی بین آن سازه و سازه‌های دیگر (یعنی مربع مقدار ضرایب همبستگی بین سازه‌ها) در مدل باشد. همان طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود هر سازه با شاخص‌هایش رابطه قوی‌تری در مقایسه با سایر شاخص‌ها دارد.

جدول ۲- برازش مدل اندازه‌گیری

سازه	گویه	بارعاملی	آلفای کرونباخ	rho	پایایی ترکیبی (CR)	AVE
بهداشت فردی	H1	۰/۷۹۴	۰/۸۳۶	۰/۸۳۷	۰/۸۹۱	۰/۶۷۱
	H2	۰/۸۲۳				
	H3	۰/۸۳۲				
	H4	۰/۸۲۷				
عادات درون خانه	H6	۰/۸۲۱	۰/۸۵۹	۰/۸۷۶	۰/۸۹۷	۰/۶۳۶
	H7	۰/۸۰۴				
	H9	۰/۸۱۵				
	H14	۰/۸۲۱				
	H15	۰/۷۲۲				
عادات بیرون از خانه	H11	۰/۶۲۵	۰/۴۳۷	۰/۴۷	۰/۷۲۲	۰/۴۷
	H12	۰/۸۲۴				
	H13	۰/۵۸۴				
فردیت	I1	۰/۹۲۵	۰/۹۳۲	۰/۹۵۹	۰/۹۵۱	۰/۸۲۸
	I2	۰/۹۳۹				
	I3	۰/۸۸				
	I4	۰/۸۹۷				
احساس	F1	۰/۸۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴۲	۰/۹۵۲	۰/۷۶۸
	F2	۰/۸۷۳				
	F3	۰/۸۹۵				
	F4	۰/۸۷				
	F5	۰/۸۵				
	F6	۰/۸۷۵				
شناخت	C1	۰/۷۹۸	۰/۹۴۸	۰/۹۵۳	۰/۹۵۶	۰/۶۸۵
	C2	۰/۸۴۴				
	C3	۰/۷۷۷				
	C4	۰/۸۵۴				
	C5	۰/۸۱۶				
	C6	۰/۹۰۳				
	C8	۰/۸۸۶				
	C9	۰/۸۴				
	C10	۰/۸۹۹				
	C11	۰/۶۲۳				
ملموس‌بودن	T1	۰/۷	۰/۹۱	۰/۹۳۳	۰/۹۳۱	۰/۶۹۳
	T2	۰/۸۵۷				
	T3	۰/۸۸۹				
	T4	۰/۹۱۲				
	T5	۰/۷۹۴				
	T7	۰/۸۲۴				
هنجارهای توصیفی	S1	۰/۸۱۳	۰/۸۱۲	۰/۸۱۵	۰/۸۸۹	۰/۷۲۸
	S2	۰/۹۰۳				
	S3	۰/۸۴				
هنجارهای تأییدی	S4	۰/۹۰۳	۰/۸۶۵	۰/۹۷۱	۰/۹۱۳	۰/۷۷۷
	S5	۰/۸۰۸				
	S6	۰/۹۲۹				

تحلیل مدل ساختاری

R2 معیاری است که برای متصل کردن بخش اندازه‌گیری و بخش ساختاری مدل به کار می‌رود و نشان از تأثیری دارد که یک متغیر برون‌زا بر یک متغیر درون‌زا می‌گذارد. Chin (۱۹۹۸) سه مقدار ۰/۱۹، ۰/۳۳، و ۰/۶۷ را به عنوان مقدار ملاک برای مقادیر ضعیف، متوسط و قوی R2 معرفی می‌کند. این مقدار برای متغیرهای بهداشت فردی، عادات درون خانه و بیرون از خانه به ترتیب برابر ۰/۴۳۴، ۰/۴۰۷ و ۰/۳۳۱ می‌باشد که در حد قابل قبولی هستند. معیار Q2 که توسط Stone (۱۹۷۴) و Geisser (۱۹۷۵) معرفی شد، قدرت پیش‌بینی مدل را مشخص می‌سازد. به اعتقاد آن‌ها مدل‌هایی که دارای

برازش‌بخش ساختاری قابل قبول هستند، باید قابلیت پیش‌بینی شاخص‌های مربوط به سازه‌های درون‌زای مدل را داشته باشند (Geisser، ۱۹۷۵؛ Stone، ۱۹۷۴). Henseler و همکاران (۲۰۰۹) در مورد شدت قدرت پیش‌بینی مدل در مورد سازه‌های درون‌زا، سه مقدار ۰/۰۲، ۰/۱۵ و ۰/۳۵ را تعیین نموده‌اند. به اعتقاد آن‌ها اگر Q2 در مورد یک سازه درون‌زا در محدودهٔ نزدیک به ۰/۰۲ باشد، نشان از آن دارد که مدل قدرت پیش‌بینی ضعیفی در قبال شاخص‌های آن سازه دارد (Henseler و همکاران، ۲۰۰۹). این مقدار برای متغیرهای بهداشت فردی، عادات درون خانه و بیرون از خانه به ترتیب برابر ۰/۲۲۶، ۰/۲۲۴ و۰/۱۲۹ می‌باشد که نشان می‌دهد این شاخص در حد مطلوبی است.

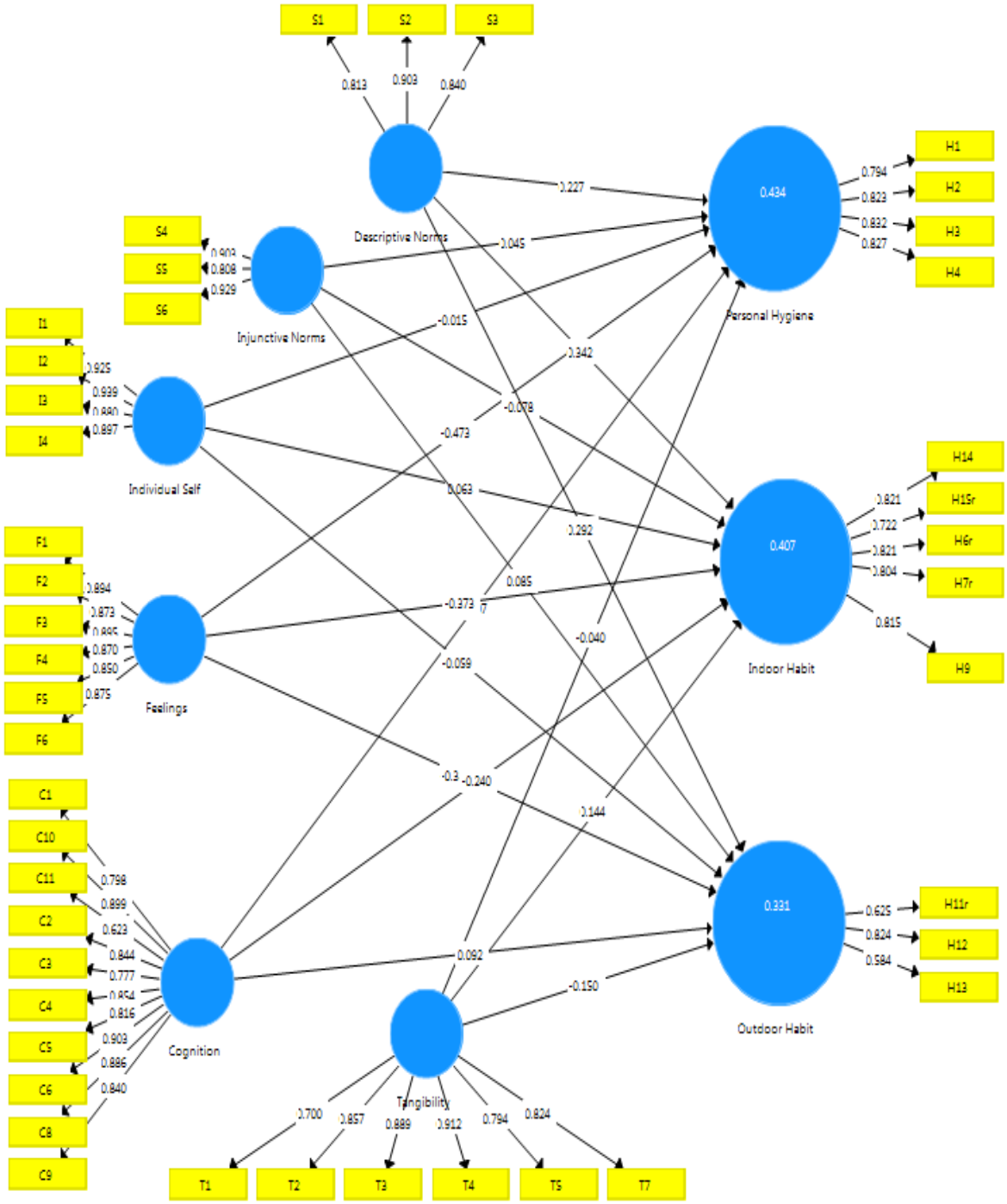
جدول ۳- مربع ضرایب همبستگی بین سازه‌ها (جذرAVE)

	شناخت	هنجارهای توصیفی	احساسات	فردیت	عادات درون خانه	هنجارهای تأییدی	عادات بیرن از خانه	بهداشت فردی	ملموس‌بودن
شناخت	**۰/۸۲۸**								
هنجارهای توصیفی	-۰/۱۱۸	**۰/۸۵۳**							
احساسات	۰/۶۷۶	-۰/۲۵۳	**۰/۸۷۶**						
فردیت	۰/۸۱۷	-۰/۱۸۵	۰/۶۰۳	**۰/۹۱۰**					
عادات درون خانه	-۰/۴۲۱	۰/۴۳۳	-۰/۵۲۶	-۰/۳۵۲	**۰/۷۹۷**				
هنجارهای تأییدی	۰/۵۴۸	-۰/۲۴۷	۰/۴۸۰	۰/۴۵۴	-۰/۳۶۶	**۰/۸۸۲**			
عادات بیرون از خانه	-۰/۳۰۷	۰/۳۹۷	-۰/۴۸۵	-۰/۳۳۷	۰/۶۰۴	-۰/۲۲۷	**۰/۶۸۶**		
بهداشت فردی	- ۰/۴۷۰	۰/۳۵۹	-۰/۶۱۷	-۰/۴۳۸	۰/۵۰۴	-۰/۳۲۶	۰/۴۸۷	**۰/۸۱۹**	
ملموس‌بودن	۰/۷۰۶	-۰/۱۹۷	۰/۶۵۳	۰/۷۲۰	-۰/۳۳۲	۰/۵۴۰	-۰/۳۸۸	-۰/۴۵۶	**۰/۸۳۲**

جدول ٤- متغیرهای تأثیرگذار بر رفتار

متغیرهای تأثیرگذار	متغیرهای درون‌زا	ضریب معنی‌داری	ضریب مسیر
احساس	بهداشت فردی	۳/۶۱	- ۰/۴۷
احساس	عادات درون خانه	۲/۸۶	- ۰/۳۷
احساس	عادات بیرون از خانه	۳/۹۴	- ۰/۳۸
هنجارهای توصیفی	بهداشت فردی	۴/۶۵	۰/۲۳
هنجارهای توصیفی	عادات درون خانه	۳/۵۴	۰/۳۴
هنجارهای توصیفی	عادات بیرون از خانه	۳/۲۸	۰/۲۹

White و همکاران (۲۰۱۹) در شرح چگونگی استفاده از مدل شیفت عنوان می‌دارند، از آن جایی که این مدل یک چارچوب جامع در عوامل اثرگذار بر رفتار پایدار را معرفی می‌کند، در هر فرهنگ، زمینه و رفتار خاص، دو عامل کلیدی به عنوان عامل اول و دوم در شکل‌گیری رفتار نقش دارند. وظیفه محققین است که در زمینه مورد مطالعه خود، آن دو عامل را شناسایی کنند. همان که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، احساسات و هنجارهای توصیفی در زمینه مصرف آب خانگی در تهران به عنوان عوامل اثرگذار شناسایی شدند. در پاسخ به سوالات شش‌گانه تحقیق، می‌توان این گونه توضیح داد که متغیر احساس تأثیر معکوس و مستقیم بر عادات مصرفی آب و متغیر هنجارهای توصیفی، تأثیر هم‌جهت و مستقیم بر عادات مصرفی آب دارد. گویه‌های متغیر احساس، معرف احساس‌های منفی مانند خشم، گناه و ناراحتی نسبت به هدررفت آب است؛ به استثنای گویه پنجم که نشان‌گر احساس خوشحالی در نتیجه مواجهه با رفتار صرفه‌جویانه می‌باشد. ارتباط موثر و خلاف جهت احساسات بر رفتار صرفه‌جویانه، حکایت از آن دارد که چنان‌چه احساسات منفی فردی بر اثر مشاهده رفتار مُصرفانه برانگیخته شود، مصرف آب در حوزه بهداشت فردی، رفتارهای درون منزل و بیرون از خانه به ترتیب به میزان ۰/۴۷، ۰/۳۷ و ۰/۳۸ کاهش می‌یابد. اما در عین حال تأثیر مثبت هنجارهای توصیفی بر متغیرهای سه‌گانه رفتار، نشان می‌دهد که رفتار مصرفی فرد، تحت تأثیر محیط پیرامون خود یعنی رفتار خانواده، دوستان و آشنایان قرار دارد و این تأثیر بر مصرف آب برای بهداشت فردی مانند مسواک زدن و استحمام، عادات درون منزل، مانند شست و شوی ظروف و لباس، و عادات بیرون از منزل، مانند آبیاری فضای سبز و شست و شوی اتومبیل به ترتیب برابر است با ۰/۲۳، ۰/۳۴ و ۰/۲۹. مجموع تأثیر متغیر احساسات و هنجارهای توصیفی، بیان‌گر این مطلب است که برانگیختن احساسات در افراد موجب کاهش مصرف آب شده و تغییر در رفتار جمعی از افراد، موجب تغییر در رفتار اطرافیان آنان نیز می‌گردد. بنابراین سیاست‌های ترویجی مصرف بهینه آب با تمرکز بر این دو عامل، می‌تواند اثربخشی بیشتری داشته باشد.



شکل ۲- مدل ساختاری تحقیق

جمع‌بندی

کمبود آب به‌عنوان یک چالش اساسی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، به‌ویژه در کلان‌شهرهایی همچون تهران، به بحران جدی تبدیل شده است. افزایش جمعیت، گسترش شهرسازی، و الگوهای مصرف ناپایدار، فشار بی‌سابقه‌ای بر منابع محدود آبی وارد کرده‌اند. در تهران، سرانه مصرف آب به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از متوسط جهانی است و ادامه این روند می‌تواند به کسری سالانه در تأمین آب، منجر شود. اگرچه روش‌های سنتی مانند سدسازی و حفر چاه برای تأمین آب همواره در اولویت بوده‌اند، اما این اقدامات، پیامدهای زیست‌محیطی گسترده‌ای را به همراه داشته است. از سوی دیگر، با توجه به اهمیت دسترسی به آب سالم به‌عنوان یک حق اساسی بشر و لزوم رعایت عدالت اجتماعی، کاهش داوطلبانه مصرف آب خانگی، اهمیت ویژه‌ای یافته است. با این حال، تحقیقات کافی درباره رفتار

مصرف‌کنندگان و راهکارهای موثر در مدیریت پایدار آب انجام نشده است. برای مقابله با این چالش، ضرورت دارد که پژوهش‌های بیشتری با رویکردهای نوآورانه‌ای در زمینه تغییر الگوهای مصرف آب و ارائه راهکارهای پایدار انجام شود.

بازاریابی اجتماعی به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین برای تغییر رفتار داوطلبانه مصرف‌کنندگان، بر اساس اصول بازاریابی تجاری و با هدف دستیابی به رفتارهای مطلوب اجتماعی، شکل گرفته است. این رویکرد که ابتدا در حوزه سلامت و بهداشت مورد استفاده قرار گرفت، در سال‌های اخیر به مدیریت منابع محیط‌زیستی از جمله مصرف آب، توجه ویژه‌ای نشان داده است. استفاده از این رویکرد، به‌ویژه در کشورهای توسعه‌یافته، نقش موثری در کاهش مصرف آب خانگی داشته است. یکی از عناصر کلیدی بازاریابی اجتماعی، شناسایی عوامل و موانع موثر بر رفتار است. این رویکرد با بهره‌گیری از چارچوب‌های نظری در علوم رفتاری، می‌تواند موانع و فرصت‌های تغییر رفتار را بهتر شناسایی کرده و با اتخاذ استراتژی‌های مشتری‌محور، تخصیص بهینه منابع را ممکن سازد. با این وجود، در اقدام‌های عملی مبتنی بر بازاریابی اجتماعی، برخلاف بازاریابی تجاری، استفاده از نظریه‌های رفتاری، مغفول مانده است.

هدف این تحقیق، طراحی ابزاری بر مبنای نظریه شیفت، یکی از جدیدترین و توسعه‌یافته‌ترین نظریه‌های رفتاری در زمینه مصرف پایدار است. فرآیند طراحی پرسش‌نامه در چندین مرحله با مشارکت خبرگان صنعت آب و اساتید حوزه رفتار مصرف‌کننده، انجام شد. بازبینی‌های چندگانه و امتیازدهی‌های دقیق، منجر به حذف و اصلاح سوال‌های ضعیف و دستیابی به محتوای معتبر و بومی‌شده گردید. در این میان، شاخص روایی محتوایی به‌عنوان معیاری مهم در ارزیابی اعتبار پرسش‌نامه به کار گرفته شد. محاسبات مربوط به این شاخص در دو سطح آیتم و مقیاس انجام شد و نتایج قابل قبولی برای تمامی گویه‌ها به دست آمد. برای گردآوری داده‌های این تحقیق، پرسش‌نامه‌ای در سایت پرس‌لاین طراحی و پس از انجام پیش‌آزمون و بهینه‌سازی پرسش‌نامه از نظر خوانایی، پرسش‌نامه نهایی در شبکه‌های اجتماعی توزیع شد. از میان ۲۱۱۱ بازدیدکننده پرسش‌نامه، ۱۰۱۹ نفر اقدام به تکمیل آن کردند. پس از حذف پاسخ‌دهندگان خارج از تهران، ۹۲۴ پرسش‌نامه برای تحلیل انتخاب شد.

یافته‌ها حاکی از آن است که احساسات منفی مانند احساس گناه و شرم می‌توانند نقش کلیدی در کاهش رفتارهای پرمصرف مرتبط با بهداشت فردی ایفا کنند. همچنین، هنجارهای توصیفی، به‌ویژه مشاهده رفتارهای صرفه‌جویانه دیگران، می‌تواند در تغییر عادات مصرفی افراد مؤثر باشد.

بر این اساس، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاران و متولیان مدیریت آب، مداخلاتی طراحی کنند که احساسات مردم را فعال کرده، هنجارهای مثبت مصرف را در جامعه تقویت کنند. بهره‌گیری از مدل «شیفت» در طراحی سیاست‌های مدیریت تقاضا، می‌تواند مبنایی علمی و اجرایی برای تغییرات رفتاری پایدار در مصرف آب خانگی تهران فراهم آورد.

پیشنهادات

با توجه به نتایج تحقیق مبنی بر تأیید تأثیر احساسات و هنجارهای توصیفی بر رفتار، می‌توان سیاست‌های لازم را در این راستا اتخاذ کرد. به طور مثال یکی از چالش‌های موجود در بستر پایداری، انتزاعی بودن نتایج حاصل از رفتار پایدار است. به طور دقیق نمی‌توان گفت که کاهش ۵ دقیقه زمان دوش گرفتن یا انتخاب لوازم خانگی کم مصرف موقع خرید به چه میزان بر محیط زیست تأثیرگذار است. برای مقابله با انتزاع، باید تأثیر مثبت اقدامات صرفه‌جویانه در لحظهٔ حال را به‌صورت عددی و داستانی نشان داد تا «احساس غرور» ایجاد شود (Aknin و همکاران، ۲۰۱۳). به‌عنوان مثال، سامانه‌ای طراحی شود که در پایان ماه میزان آب ذخیره‌شده ناشی از کاهش مصرف خانوار را محاسبه و به کاربر گزارش دهد و او را بابت این دستاورد ستایش کند. نمایش تصاویر باشکوه (مثلاً سرچشمه‌های طبیعی آب در کوهستان‌ها یا تالاب‌های در شرف خشکیدن) و روایت داستان‌های تأثیرگذار (Mitra و Sameer، ۲۰۲۲) از انسان‌هایی که در شرایط دشوار و کمبود آب، اقدام مثبتی را انجام می‌دهند، حس «عظمت و شگفتی» را در مخاطب برمی‌انگیزد. این کار ضمن ایجاد همدلی با وضع نابسامان منابع آبی، موجب تکریم اخلاقی و الهام‌بخشی می‌شود و افراد را به پیروی از رفتارهای پایدار دیگران تشویق می‌کند. علاوه بر این، روایت‌های شفاهی و ویدئویی از شهروندانی که با ابتکار خود سهم عمده‌ای در صرفه‌جویی آب داشته‌اند، می‌تواند حس همدلی را در میان مخاطبان تقویت کرده و نیروی محرکه‌ای برای تغییر رفتارهای روزمره در مصرف آب شود.

برای فائق آمدن بر مشکل افق زمانی طولانی رفتار پایدار، لازم است مزایای عاطفی و لذت‌های آنی مصرف بهینه برجسته گردد (White و همکاران، ۲۰۱۹). نصب نمایشگرهای هوشمند در منازل یا اپلیکیشن‌های موبایلی که بلافاصله پس از هر دوش گرفتن یا شست‌وشوی ظروف، مقدار آب صرفه‌جویی‌شده و تأثیر آن بر کاهش قبض را نشان می‌دهند، می‌تواند حس رضایت ایجاد نماید. برای مثال، پس از هر بار کاهش مصرف پنج درصدی در طول هفته، پیام تبریک و آیکون‌هایی مانند نشان‌های افتخاری دیجیتال[۲۸] به کاربر ارائه شود. این بازخورد آنی، هزینه‌های لذت‌جویی فعلیِ کاهش مصرف[۲۹] را جبران کرده و افراد را برای ادامه رفتارهای کم‌مصرف تشویق می‌کند. (Piff و همکاران، ۲۰۱۵).

انتشار تصاویر و آمار لحظه‌ای از هدررفت آب (مثلاً نشت شبکه آبیاری در پارک‌ها یا جریان آب از شیرهای باز مانده) به همراه پیامی که خشم جمعی نسبت به این ضایعه را برمی‌انگیزد، می‌تواند انرژی لازم برای تهییج مردم را فراهم آورد. در مقابل، ارائه چشم‌انداز امیدبخش- برای نمونه نمایش نرخ موفقیت محلاتی که مصرف آب را تا مثلاً ۲۰

درصد کاهش داده‌اند- امکان شکل‌گیری احساس «امید جمعی» را ممکن می‌سازد. برگزاری چالش‌های محله‌ای با هدف مشترک (مثلاً خانواده نمونه هر ماه که بیشترین صرفه‌جویی را انجام داده است) به همراه گزارش دوره‌ای پیشرفت، ضمن ایجاد حس مشارکت و تعلق اجتماعی، هنجارهای اجتماعی را نیز تقویت می‌نماید. نمایش هنجارهای توصیفی به عنوان نمونه در محله‌هایی که امکان مقایسه عملکرد مصرف‌کنندگان وجود دارد، نمایش میزان مصرف متوسط لوازم و تصاویری از خانواده‌های کم‌مصرف به‌صورت تابلوهای محلی یا بنرهای دیجیتال، باعث می‌شود افراد نامطمئن برای تبعیت از هنجار غالب تشویق شوند (White و Simpson، ۲۰۱۳).

استفاده از تکنیک‌های بازی‌وارسازی[۳۰] و نمایش میزان مصرف خانوارها و مقایسه آن با خانوارهای مشابه به صورت نمودارهای ساده و جذاب در قبوض آب و همچنین میزان متوسط مصرف در همان محله و شهر، می‌تواند فرد را برای تبعیت از هنجارهای موجود ترغیب نماید؛ البته اگر متوسط مصرف جامعه محلی مطابق با الگوی مصرف بهینه باشد. همچنین رفتارهای پایدار، زمانی مورد پذیرش قرار می‌گیرند که از زبان افرادی ارائه شود که برای مخاطب احساس نزدیکی ایجاد می‌کنند. استفاده گسترده از پست‌ها و ویدئوها در انواع شبکه‌های اجتماعی و ویدئوهای کوتاه از دوستان و اقوام که تجربیات مثبت خود را از صرفه‌جویی آب به اشتراک می‌گذارند، موجب تقویت احساس جمعی و نمایش هنجارهای موجود می‌شود. در نهایت، می‌توان گفت مجموعه‌ای یکپارچه از مداخلات فوق در قالب ترکیب احساسات فردی و جمعی و هنجارهای اجتماعی، به‌طور هم‌زمان می‌تواند اثربخشی سیاست‌های مدیریت تقاضا را در سطح گسترده‌ای ارتقا بخشد.

منابع

درگاه الکترونیکی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان تهران. (۱۴۰۴). سامانه اطلاعات آماری استان تهران. برگرفته از https://amar.thmporg.ir

سجادی‌فر، سیدحسین، رامشینی، مجید، طلایی، محمد و معتبر، سهیل. (۱۴۰۳). آن‌چه در بحران آبی تهران گذشت، درس‌آموخته‌های شرکت آب و فاضلاب استان تهران در سال آبی ۱۴۰۲-۱۴۰۱. انتشارات آرویج ایرانیان. برگرفته از http://opac.nlai.ir/opac-prod/bibliographic/9689504

درگاه الکترونیکی شرکت آب و فاضلاب استان تهران. (۱۴۰۰). عبور از بحران آب با اجرای سیاست‌های مدیریت تقاضا. کد خبر: ۳۴۳۰۴. برگرفته از https://www.tpww.ir/fa/news/34304

درگاه الکترونیکی شرکت آب و فاضلاب استان تهران. (۱۴۰۴). کم‌بارش‌ترین دوره ۶۰ سال اخیر را تجربه می‌کنیم. کد خبر: ۴۰۵۱۹ برگرفته از https://www.tpww.ir/fa/news/40519

درگاه الکترونیکی شرکت آب منطقه‌ای تهران. (۱۴۰۴ الف). ضرورت استفاده از ظرفیت ائمه جمعه در راستای نهادینه کردن فرهنگ صحیح مصرف آب. کدخبر: ۷۳۲۹. برگرفته از https://thrw.ir/cs/News/118/7329

درگاه الکترونیکی شرکت آب منطقه‌ای تهران. (۱۴۰۴ ب). تکذیب شایعه پرآبی سدها/ واقعیت سدها با آنچه در فضای مجازی می‌شنوید متفاوت است. کد خبر: ۷۳۲۳. برگرفته از https://thrw.ir/cs/News/118/7323

درگاه الکترونیکی شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور. (۱۴۰۴). فرهنگ صرفه‌جویی در مصرف آب علاوه بر وظیفه دینی باید به یك وظیفه ملی تبدیل شود. کد خبر: ۹۸۳۸۷. برگرفته از https://news.nww.ir/archive/ID/98387

درگاه الکترونیکی شرکت مدیریت‌منابع‌آب‌ایران. (۱۴۰۱). گزارش سیمای عمومی منابع آب کشور و ضرورت مدیریت منابع و مصارف. تهران، ایران. برگرفته از https://data.wrm.ir/cs/News/101/49976

Addo, I. B., Thoms, M. C., & Parsons, M. (2018). Household water use and conservation behavior: A meta-analysis. Water resources research, 54(10), 8381-8400. https://doi.org/10.1029/2018WR023306

Aitken, C. K., McMahon, T. A., Wearing, A. J., & Finlayson, B. L. (1994). Residential water use : Predicting and reducing consumption 1. Journal of applied social psychology, 24(2), 136-158. https://doi.org/10.1111/j.1559-1816.1994.tb00562.x

Aknin, L. B., Dunn, E. W., Whillans, A. V., Grant, A. M., & Norton, M. I. (2013). Making a difference matters: Impact unlocks the emotional benefits of prosocial spending. *Journal of* Economic Behavior & Organization, 88, 90-95 .

Andreasen, A. R. (2002). Marketing social marketing in the social change marketplace. *Journal of Public Policy & Marketing*, *21*(1), 3-13. https://doi.org/10.1509/jppm.21.1.3.17602

Beal, C. D., Stewart, R. A., & Fielding, K. (2013). A novel mixed method smart metering approach to reconciling differences between perceived and actual residential end use water consumption. *Journal of Cleaner Production*, *60*, 116-128. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.09.007

Bidhendi, G. N., Nasrabadi, T., Vaghefi, H. R. S., Hoveidi, H., & Jafari, H. R. (2008). Role of water-saving devices in reducing urban water consumption in the mega-city of Tehran, case study: a residential complex. *Journal of environmental health*, *70*(8), 44-47. https://www.jstor.org/stable/26327598

Boivin, M., Gagné, E., & Champagne Saint-Arnaud, V. (2017). Using segmentation and theory to design

Gregory, G. D., & Leo, M. D. (2003). Repeated behavior and environmental psychology: the role of personal involvement and habit formation in explaining water consumption 1. *Journal of applied social psychology*, *33*(6), 1261-1296. https://doi.org/10.1111/j.1559-1816.2003.tb01949.x

Henseler, J., Ringle, C. M., & Sinkovics, R. R. (2009). The use of partial least squares path modeling in international marketing. In R. R. Sinkovics & P. N. Ghauri (Eds.), New challenges to international marketing (Vol. 20, pp. 277–319). Bingley, United Kingdom: Emerald Group Publishing Limited. https://doi.org/10.1108/S1474-7979(2009)0000020014

Hodges, H., Kuehl, C., Anderson, S. E., Ehret, P. J., & Brick, C. (2020). How managers can reduce household water use through communication: A field experiment. *Journal of policy analysis and management*, *39*(4), 1076-1099. https://doi.org/10.1002/pam.22246

Hulland, J. (1999). Use of partial least squares (PLS) in strategic management research: A review of four recent studies. *Strategic management journal*, *20*(2), 195-204. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199902)20:2%3C195::AID-SMJ13%3E3.0.CO;2-7

Ibrahim, A., Knox, K., Rundle-Thiele ,S., & Arli, D. (2018). Segmenting a Water Use Market: Theory of Interpersonal Behavior Insights. *Social Marketing Quarterly*, *24*(1), 3-17. https://doi.org/10.1177/1524500417741277

Jorgensen, B., Graymore, M., & O'Toole, K. (2009). Household water use behavior: An integrated model. *Journal of environmental management*, *91*(1), 227-236. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.08.009

Kitunen, A., Rundle-Thiele, S., Carins, J., & Deshpande, S. (2023). Can Motivation, Opportunity and Ability Theory Informed Segments Be Validated in the Australian Defence Force?. *Social Marketing Quarterly*, *29*(2), 127-144. https://doi.org/10.1177/15245004231173194

Kotler, P., & Zaltman, G. (1971). Social marketing: an approach to planned social change. *Journal of Marketing*, *35*(3), 3-12. https://doi.org/10.1177/002224297103500302

Lowe, B., Lynch, D., & Lowe, J. (2015). Reducing household water consumption: a social marketing approach. *Journal of marketing management*, *31*(3-4), 378-408. https://doi.org/10.1080/0267257X.2014.971044

better promotion and prevention campaigns: A recyc-québec case study. *Segmentation in social marketing: Process, methods and application*, 179-195. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1835-0_12

Carney, J. (2015). Nudging occupant behavior-cultivating positive associations between comfort, health, and bulding efficiency actions with the denver housing authority. *Journal of Green Building*, *10*(1), 68-84. https://doi.org/10.3992/jgb.10.1.68

Chin, W. W. (1998). Commentary: Issues and opinion on structural equation modeling. In (pp. vii-xvi): JSTOR.

Corbett, J. B. (2005). Altruism, self-interest, and the reasonable person model of environmentally responsible behavior. *Science communication*, *26*(4), 368-389 .

Davis, L. L. (1992). Instrument review: Getting the most from a panel of experts. *Applied nursing research*, *5*(4), 194-197. https://doi.org/10.1177/1075547005275425

de Miranda Coelho, J. A. P., Gouveia, V. V ,.de Souza, G. H. S., Milfont, T. L., & Barros, B. N. R. (2016). Emotions toward water consumption: Conservation and wastage. *Revista Latinoamericana de Psicología*, *48*(2), 117-126. https://doi.org/10.1016/j.rlp.2015.09.006

Dilotsotlhe, N., & Duh, H. I. (2021). Drivers of middle-class consumers 'green appliance attitude and purchase behavior: A multi-theory application. *Social Marketing Quarterly*, *27*(2), 150-171. https://doi.org/10.1177/15245004211013737

Feizi, M., & Khatabiroudi, N. (2023). Social and environmental nudges and water usage: Evidence from a field experiment in Iran. *Water Resources and Economics*, *42*, 100223. https://doi.org/10.1016/j.wre.2023.100223

Fornell, C., & Larcker, D. (1981). Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. Journalof Marketing Research, v. 18, n. 1. In. https://doi.org/10.1177/002224378101800104

French, J., & Blair-Stevens, C. (2006). Social marketing national benchmark criteria. *UK: National Social Marketing Centre*.

Fries, S., Cook, J., & Lynes, J. K. (2020). Community-based social marketing in theory and practice: Five case studies of water efficiency programs in Canada. *Social Marketing Quarterly*, *26*(4), 325-344. https://doi.org/10.1177/1524500420971170

Geisser, S. (1975). The predictive sample reuse method with applications. *Journal of the American statistical Association*, *70*(350), 320-328. https://doi.org/10.1080/01621459.1975.10479865

BioScience, *67*(12), 1026-1028. https://doi.org/10.1093/biosci/bix125

Rivard, S., & Huff, S. L. (1988). Factors of success for end-user computing. *Communications of the ACM*, *31*(5), 552-561. https://doi.org/10.1145/42411.42418

Rundle-Thiele, S., Kubacki, K., Tkaczynski, A., & Parkinson, J. (2015). Using two-step cluster analysis to identify homogeneous physical activity groups. *Marketing Intelligence & Planning*, *33*(4), 522-537. https://doi.org/10.1108/MIP-03-2014-0050

Savari, M., Abdeshahi, A., Gharechaee, H., & Nasrollahian, O. (2021). Explaining farmers' response to water crisis through theory of the norm activation model: Evidence from Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *60*, 102284. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102284

Schuster, L., Kubacki, K., & Rundle-Thiele, S. (2015). A theoretical approach to segmenting children's walking behaviour. *Young consumers*, *16*(2), 159-171. https://doi.org/10.1108/YC-07-2014-00461

Sharma, P., Kaur, L., Mittal, R., Kaur, S., & Kaur, S. (2019). Social marketing approach to bring change in water use behaviour of rural people of Punjab, India. *Journal of Water and Climate Change*, *10*(4), 968-976. https://doi.org/10.2166/wcc.2018.150

Stone, M. (1974). Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions. *Journal of the royal statistical society: Series B (Methodological)*, *36*(2), 111-133. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1974.tb00994.x

Strengers, Y. (2011). Negotiating everyday life: The role of energy and water consumption feedback. *Journal of Consumer Culture*, *11*(3), 319-338. https://doi.org/10.1177/1469540511417994

Sutton, R. I., & Staw, B. M. (1995). What theory is not. Administrative Science Quarterly, 40(3), 371–384. https://doi.org/10.2307/2393788

Thøgersen, J., & Grønhøj, A. (2010). Electricity saving in households—A social cognitive approach. *Energy Policy*, *38*(12), 7732-7743. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.08.025

Tiefenbeck, V., Goette, L., Degen, K., Tasic, V., Fleisch, E., Lalive, R., & Staake, T. (2018). Overcoming salience bias: How real-time feedback fosters resource conservation. *Management science*, *64*(3), 1458-1476. https://doi.org/10.1287/mnsc.2016.2646

Waltz, C. F., & Bausell, B. R. (1981). *Nursing research: design statistics and computer analysis*. Philadelphia, PA: F. A. Davis Company.

Waltz, C. F., Strickland, O. L., & Lenz, E. R. (2005). Measurement in nursing and health research (3rd ed.). New York, NY: Springer Publishing Company.

Lynn, M. R. (1986). Determination and quantification of content validity. *Nursing research*, *35*(6), 382-386. https://doi.org/10.1097/00006199-198611000-00017

Madias, K., & Szymkowiak, A. (2022). Residential sustainable water usage and water management: Systematic review and future research. *Water*, *14*(7), 1027. https://doi.org/10.3390/w14071027

Mazyaki, A., Sajadifar, S., & Bagheri, M. (2022). Role of Urban Water Pricing in Groundwater Depletion: Lessons from Covid-19 Outbreak in Tehran. *Available at SSRN 4273345*. https://doi.org/10.2139/ssrn.4273345

McDougall, G. H., & Snetsinger, D. W. (1990). The Intangibility of Services: Measurement and CompetitivePerspectives. *Journal of Services Marketing*, *4*(4), 27-40. https://doi.org/10.1108/EUM0000000002523

Mitra, S., & Sameer, A. (2022). Storytelling for behavior change: Use of folktales for promoting sustainable behaviors. *Problemy Ekorozwoju*, *17*(2), 77–85. https://doi.org/10.35784/pe.2022.2.09

Monaghan, P., Ott, E., Wilber, W., Gouldthorpe, J., & Racevskis, L. (2013). Defining audience segments for extension programming using reported water conservation practices. *The Journal of Extension*, *51*(6), 8. https://doi.org/10.34068/joe.51.06.08

Phipps, M., & Brace-Govan, J. (2011). From right to responsibility: Sustainable change in water consumption. *Journal of Public Policy & Marketing*, *30*(2), 203-219. https://doi.org/10.1509/jppm.30.2.203

Piff, P. K., Dietze, P., Feinberg, M., Stancato, D. M., & Keltner, D. (2015). Awe, the small self, and prosocial behavior. *Journal of personality and social psychology*, *108*(6), 883. https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/pspi0000018

Polit, D. F., & Beck, C. T. (2006). The content validity index: are you sure you know what's being reported? Critique and recommendations. *Research in nursing & health*, *29*(5), 489-497. https://doi.org/10.1002/nur.20147

Rhodes, R. E., & Courneya, K. S. (2003). Investigating multiple components of attitude, subjective norm, and perceived control: An examination of the theory of planned behaviour in the exercise domain .*British journal of social psychology*, *42*(1), 129-146. https://doi.org/10.1348/014466603763276162

Ripple, W. J., Wolf, C., Newsome, T. M., Galetti, M., Alamgir, M., Crist, E., Mahmoud, M. I., Laurance, W. F., & 15, s. s. f. c. (2017). World Scientists' Warning to Humanity: A Second Notice.

Predicting farmers' water conservation goals and behavior in Iran: A test of social cognitive theory. *Land use policy*, *47*, 401-407. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.04.022

پی‌نوشت‌ها

1. Social Marketing
2. Journal of Marketing
3. Journal of Marketing Research
4. Journal of Consumer Psychology
5. Journal of Consumer Research
6. Theory of Planned Behavior
7. Theory of Environmentally Significant Behavior
8. Theory of Behavioral Change
9. Cognitive-Experiential Self-Theory of Personality
10. Schema Theory
11. Social Influence
12. Social Norms
13. Social Identity
14. Social Desirability
15. Habit formation
16. Individual self
17. Self-Concept
18. Self-Efficacy
19. Self-Interest
20. Self-Consistency
21. Individual Differences
22. Feelings and cognition
23. Tangibility
24. Item-Content Validity Index
25. Scale-Content Validity Index
26. Universal Agreement: S-CVI / UA
27. Average: S-CVI / Ave
28. badges
29. hedonic costs
30. Gamification

Warner, L. A. (2019). Using homeowners' association membership to define audience segments for targeted local social marketing interventions: Implications from a statewide study. *Social Marketing Quarterly*, *25*(4), 291-307. https://doi.org/10.1177/1524500419882978

Warner, L. A., Diaz, J. M., & Dukes, M. D. (2022). Selecting high-impact landscape irrigation conservation behaviors: Formative research to inform behavior-change efforts. *Social Marketing Quarterly*, *28*(1), 28-43. https://doi.org/10.1177/15245004211071057

Wells, V. K., Taheri, B., Gregory-Smith, D., & Manika, D.(2016) .The role of generativity and attitudes on employees home and workplace water and energy saving behaviours. *Tourism Management*, *56*, 63-74. https://doi.org/10.1016/j.tourman.2016.03.027

White, K., Habib, R., & Hardisty, D. J. (2019). How to SHIFT consumer behaviors to be more sustainable: A literature review and guiding framework. *Journal of Marketing*, *83*(3), 22-49. https://doi.org/10.1177/0022242919825649

White, K., & Simpson, B. (2013). When do (and don't) normative appeals influence sustainable consumer behaviors? *Journal of Marketing*, *77*(2), 78-95. https://doi.org/10.1509/jm.11.0278

Whitmarsh, L., & O'Neill, S.(2010) .Green identity, green living? The role of pro-environmental self-identity in determining consistency across diverse pro-environmental behaviours. *Journal of environmental psychology*, *30*(3), 305-314. https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2010.01.003

World Bank. (2018). The water-energy-food nexus in the Middle East and North Africa: Scenarios for a sustainable future. Washington, D.C., United States: World Bank Group.

Yazdanpanah, M., Feyzabad, F. R., Forouzani, M ,. Mohammadzadeh, S., & Burton, R. J. (2015).

نشریه آب و توسعه پایدار. آذر ماه ۱۴۰۴
سال دوازدهم. شماره سوم (پیاپی ۳۷). صفحات ۱۲۱ تا ۱۳۸

Journal of Water and Sustainable Development. December 2025
Volume 12. Lssue 3 (Serial No. 37). pages 121 to 138

نوع مقاله: مطالعه موردی

Document Type: Case Stady

بررسی امنیت تأسیسات آب شرب و زیرساخت‌های آن با رویکرد پدافند غیرعامل در یک شهر بصورت پایلوت

علی نصیریان[1*]، ابوالفضل اکبرپور[2]، علی‌اکبر عامری[3]، مهسا مردانی[4]

۱ و ۲ و ۳ و ۴- استادیار، استاد، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

*رایانامه نویسنده مسئول: a.nasirian@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت ◄ ۱۴۰۴/۰۲/۱۵
تاریخ بازنگری ◄ ۱۴۰۴/۰۶/۰۴
تاریخ پذیرش ◄ ۱۴۰۴/۰۶/۰۸
تاریخ انتشار ◄ ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

چکیده

در دهه‌های اخیر، با توجه به افزایش تهدیدات طبیعی و انسانی از جمله خرابکاری، حملات تروریستی و جنگ‌های نوین، توجه به امنیت زیرساخت‌های حیاتی از جمله تأسیسات آبرسانی به یکی از ضرورت‌های راهبردی کشورها تبدیل شده است. پدافند غیرعامل به‌عنوان مجموعه‌ای از اقدامات پیشگیرانه و غیربرخوردی، نقش مهمی در کاهش آسیب‌پذیری این زیرساخت‌ها ایفا می‌کند. پژوهش حاضر با هدف بررسی وضعیت امنیتی تأسیسات آب شرب یک شهر با جمعیت متوسط از منظر پدافند غیرعامل انجام شده است. این مطالعه از نوع توصیفی-تحلیلی بوده و از روش‌های کتابخانه‌ای، میدانی و تحلیل آماری بهره گرفته شده است. داده‌ها از طریق پرسشنامه بین ۳۱ نفر از کارشناسان و متخصصان حوزه آب و فاضلاب گردآوری شده و با نرم‌افزار SPSS تحلیل شد. نتایج نشان داد که برخی مؤلفه‌های کلیدی مانند کنترل از راه دور (پایش)، ایمنی محیطی و محدودیت دسترسی، در سطح نامطلوبی قرار دارند و نیازمند بازنگری جدی هستند. در ادامه، راهکارهایی نظیر استفاده از فضای سبز برای استتار، تقویت تجهیزات نظارتی، ایجاد ساختارهای مقاوم‌سازی شده و آموزش نیروی انسانی متخصص پیشنهاد گردید تا سطح آمادگی زیرساخت‌های آبی در برابر تهدیدات ارتقاء یابد.

واژه‌های کلیدی: پدافند غیرعامل، امنیت آب شهری، زیرساخت‌های حیاتی، تحلیل آسیب‌پذیری

Assessing the Security of Drinking Water Facilities and Their Infrastructure Using Passive Defense Approach a Pilot City

A. Nasirian[1*], A. Akbarpour[2], A.A. Ameri[3], M. Mardani[4]

1, 2, 3, 4- Assistant Professor, Professor, M.Sc. Graduate and Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

*Corresponding Author Email: a.nasirian@birjand.ac.ir

Received ▶ 05-05-2025
Revised ▶ 26-08-2025
Accepted ▶ 30-08-2025
Available online ▶ 16-12-2025

Abstract

In recent decades, due to the growing threats of both natural and man-made origins such as sabotage, terrorism, and modern warfare the security of critical infrastructure, including water supply facilities, has become a strategic priority for many countries. Passive defense, as a set of preventive and non-aggressive measures, plays a significant role in reducing the vulnerability of these infrastructures. This study aims to evaluate the security status of drinking water facilities in a city with a medium population from the perspective of passive defense. The research is descriptive-analytical in nature, utilizing library research, field observations, and statistical analysis. Data were collected through questionnaires distributed 31 experts in the water and wastewater sector, and analyzed using SPSS software. The findings revealed that some key components, such as remote monitoring, environmental safety, and access control, are at an unsatisfactory level and require urgent revision. The study suggests solutions such as employing protective green spaces, enhancing surveillance systems, reinforcing infrastructure, and training specialized personnel to improve the preparedness of water facilities against potential threats.

Keywords: Passive Defense, Urban Water Security, Critical Infrastructure, Vulnerability Analysis.

How to cite this article:
Nasirian, A., Akbarpour, A., Ameri, A.A, & Mardani, M. (2025). Assessing the Security of Drinking Water Facilities and Their Infrastructure Using Passive Defense Approach a pilot city. Journal of Water and Sustainable Development, 12(3), 121-138. https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i3.2505-1423

مقدمه

در دنیای امروز، شهرنشینی به‌عنوان نماد رشد و توسعه کشورها شناخته می‌شود، اما توسعه فیزیکی شهرها بدون توجه به امنیت زیرساخت‌های حیاتی مانند آب، برق و مخابرات، می‌تواند پیامدهای سنگینی در پی داشته باشد (Ghazizadeh و همکاران، ۲۰۰۸). زیرساخت‌های آبرسانی، به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین ارکان رفاه و سلامت جامعه، نقشی کلیدی در پایداری اجتماعی و امنیت ملی ایفا می‌کنند. ازکارافتادگی یا آسیب به این زیرساخت‌ها، به‌ویژه در شرایط بحرانی مانند جنگ، حملات تروریستی یا بلایای طبیعی، می‌تواند منجر به ایجاد اختلال در نظم عمومی و افزایش نارضایتی مردم گردد (Ghazizadeh و همکاران ، ۲۰۰۸؛ نیک‌پیمان و همکاران، ۱۳۹۹).

پیشرفت تکنولوژی و تغییر الگوی جنگ‌های سنتی به سمت جنگ‌های نامتقارن، موجب شده است که دیگر مرزهای جغرافیایی مانع تهدید نباشند و تأسیسات حیاتی کشورها همواره در معرض تهدیدات فیزیکی، سایبری و بیولوژیکی قرار گیرند (زرقانی و همکاران، ۱۳۹۵). تجربه جنگ‌های گذشته در کشورهایی نظیر عراق، سوریه و یمن، اهمیت مقاوم‌سازی و ایمن‌سازی زیرساخت‌ها، به‌ویژه منابع آبی، را به‌وضوح نشان داده است (Gleick، ۲۰۰۶). در این میان، پدافند غیرعامل به‌عنوان مجموعه‌ای از اقدامات پیشگیرانه غیربرخوردی، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری تأسیسات زیربنایی ایفا کند (معصوم‌بیگی و همکاران، ۱۴۰۰).

اهمیت موضوع امنیت تأسیسات آبی شهر هنگامی دوچندان می‌شود که بدانیم هرگونه اختلال در شبکه آبرسانی شهری می‌تواند پیامدهای اجتماعی، بهداشتی و حتی سیاسی گسترده‌ای در پی داشته باشد (Annunziato و همکاران، ۲۰۱۶).

در دهه‌های اخیر، زیرساخت‌های آبی به دلایل مختلف از جمله نقش حیاتی در تأمین سلامت عمومی، توسعه اقتصادی و حفظ امنیت ملی، همواره در معرض تهدیدات گوناگون قرار داشته‌اند. حملات سایبری، خرابکاری‌های فیزیکی، تهدیدات بیولوژیکی و حتی سوءاستفاده از فناوری‌های نوین برای آلوده‌سازی منابع آبی، بخشی از چالش‌های امنیتی این حوزه به شمار می‌آیند (زرقانی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Gleick، ۲۰۰۶). تجربه کشورهای مختلف در سال‌های گذشته نشان داده است که تأسیسات آبی از جمله سدها، مخازن، خطوط انتقال و تصفیه‌خانه‌ها، از اهداف اصلی در حملات نظامی و تروریستی محسوب می‌شوند؛ چرا که هرگونه اختلال در عملکرد این زیرساخت‌ها، مستقیماً بر امنیت روانی و بهداشتی جامعه تأثیرگذار خواهد بود.

در ایران نیز، تهدیداتی مانند تحریم‌های بین‌المللی، ضعف در نوسازی شبکه‌های زیرساختی و فقدان راهکارهای بازدارنده مناسب، آسیب‌پذیری تأسیسات آب‌رسانی را دوچندان کرده است. مناطق مرزی که در نزدیکی کانون‌های پرمخاطره قرار دارند، بیش از سایر نقاط کشور در معرض تهدیدات مستقیم و غیرمستقیم امنیتی هستند. این شرایط، نیاز به طراحی و اجرای برنامه‌هایی جامع برای حفاظت از منابع آبی و زیرساخت‌های مرتبط را بیش از پیش ضروری ساخته است (Rezaie Narimisa و همکاران، ۲۰۱۹).

در این راستا، پدافند غیرعامل به‌عنوان یکی از ارکان اصلی مدیریت بحران و افزایش تاب‌آوری در برابر تهدیدات، نقش کلیدی در صیانت از منابع و تأسیسات آبی ایفا می‌کند. پدافند غیرعامل در حوزه آب، شامل اقداماتی نظیر استتار و پراکندگی منابع، ایمن‌سازی فیزیکی و الکترونیکی، استفاده از تجهیزات هوشمند هشداردهنده، و برنامه‌ریزی اضطراری برای تأمین آب در شرایط بحران است (معصوم‌بیگی و همکاران، ۱۴۰۰). هدف این اقدامات، کاهش آسیب‌پذیری، تداوم خدمات آبرسانی در شرایط اضطراری، و حفظ سلامت و امنیت شهروندان است.

توجه به اصول پدافند غیرعامل در طراحی، احداث و بهره‌برداری از تأسیسات آبی، می‌تواند ضمن ارتقاء ایمنی، از بروز بحران‌های ثانویه جلوگیری کرده و امکان واکنش سریع و مؤثر در برابر تهدیدات را فراهم آورد. این مسئله در شرایط فعلی کشور، به‌ویژه با توجه به حساسیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی مناطق مرزی از اهمیت راهبردی برخوردار است (حسینی‌امینی و موغلی، ۱۳۹۵).

هدف کلی این پژوهش، بررسی میزان امنیت و آسیب‌پذیری تأسیسات آب شرب یک شهر با جمعیت متوسط از منظر اصول پدافند غیرعامل و ارائه راهکارهایی برای ارتقاء ایمنی و تاب‌آوری این زیرساخت‌های حیاتی است. این پژوهش در پی آن است که ضمن شناسایی نقاط ضعف امنیتی موجود در زیرساخت‌های آبی منطقه، به ارزیابی سطح آمادگی تأسیسات در برابر تهدیدات فیزیکی، بیولوژیکی و خرابکارانه پرداخته و توصیه‌هایی کاربردی برای بهبود وضعیت موجود ارائه دهد.

در ادامه این مقاله، مطالب در پنج بخش تنظیم شده است. در بخش دوم، مبانی نظری پژوهش و پیشینه مطالعاتی مرتبط با تهدیدات زیرساخت‌های آبی و پدافند غیرعامل مرور می‌شود. بخش سوم به تشریح روش‌شناسی پژوهش اختصاص دارد که شامل نوع تحقیق، جامعه آماری، ابزار گردآوری داده‌ها و روش‌های آماری تحلیل داده‌هاست. در بخش چهارم، نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل داده‌ها و ارزیابی وضعیت امنیت تأسیسات آبی شهر ارائه و تفسیر می‌گردد. بخش پنجم به جمع‌بندی یافته‌ها و ارائه پیشنهادهایی برای

ارتقاء امنیت و کاهش آسیب‌پذیری زیرساخت‌های آبی با تکیه بر اصول پدافند غیرعامل می‌پردازد.

مبانی نظری و پیشینه تحقیق

پدافند غیرعامل به مجموعه‌ای از اقدامات و تمهیدات غیرمسلحانه اطلاق می‌شود که به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری زیرساخت‌های حیاتی، حفظ جان انسان‌ها، تداوم خدمات‌رسانی و افزایش تاب‌آوری در برابر تهدیدات طراحی می‌گردد. این مفهوم، برخلاف پدافند عامل که مبتنی بر استفاده از نیروهای مسلح و تجهیزات نظامی است، بر پیشگیری، مقاوم‌سازی، پراکندگی، استتار و هوشمندسازی متمرکز است و تلاش می‌کند آثار حملات احتمالی دشمن یا حوادث طبیعی را بدون تقابل مستقیم کاهش دهد (معصوم‌بیگی و همکاران، ۱۴۰۰).

اهمیت پدافند غیرعامل در جهان امروز به‌ویژه در بخش تأسیسات زیربنایی مانند سامانه‌های آبرسانی، برق، گاز، حمل‌ونقل و مخابرات به‌شدت افزایش یافته است. تجربه جنگ‌های اخیر، نظیر حمله به تأسیسات آب عراق، تهدید سد موصل توسط داعش و همچنین اقدامات خرابکارانه در شبکه‌های توزیع آب در برخی کشورها نشان می‌دهد که دشمنان تمایل دارند با هدف قرار دادن زیرساخت‌های حیاتی، نوعی «فلج شهری» ایجاد کنند که بدون درگیری مستقیم، بیشترین خسارت روانی، اجتماعی و اقتصادی را وارد نمایند (توکلی امینیان و امینیان، ۱۳۹۳).

در این میان، تأسیسات آبی به‌عنوان شریان حیاتی زندگی انسان و یکی از مهم‌ترین عوامل تأمین امنیت و سلامت عمومی، جایگاه ویژه‌ای در مباحث پدافند غیرعامل دارند. تأسیساتی چون سدها، چاه‌ها، ایستگاه‌های پمپاژ، خطوط انتقال، تصفیه‌خانه‌ها و مخازن ذخیره آب، در صورت آسیب یا اختلال، نه‌تنها سیستم آبرسانی را مختل می‌کنند، بلکه می‌توانند سلامت جامعه را با بحران جدی مواجه سازند. ازاین‌رو، اصول پدافند غیرعامل باید به‌صورت ویژه در این حوزه به کار گرفته شود (کاظمی و گلستانه ۱۳۹۳؛ حسینی‌امینی و موغلی، ۱۳۹۵). از سوی دیگر، سیاست‌گذاری‌ها و بخشنامه‌های مرتبط با پدافند غیرعامل در صنعت آب و فاضلاب کشور نیز تأکید دارند که تهیه طرح‌های جامع پدافندی برای تأسیسات آبی، نه‌تنها یک ضرورت، بلکه یک الزام مدیریتی و حاکمیتی است (اسکندری، ۱۳۹۰).

رنجبر (۱۳۸۳) به مطالعه و بررسی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در دشت‌های اطراف شهر شیراز پرداخته بود و این نتیجه حاصل شد که کمینه میزان مشخص DRASTIC در دشت‌های حاشیه شهر شیراز برابر ۵۸ و بیشینه آن برابر ۱۷۵ می‌باشد و مقادیر فوق از نظر طبقه‌بندی آسیب‌پذیری آب‌خوان در محدوده بسیار نامناسبی «آسیب‌پذیری زیاد» تا بد «آسیب‌پذیری خیلی زیاد» قرار گرفته است.

Babiker و همکاران (۲۰۰۴) برای تعیین مناطق مستعد در برابر آلودگی ناشی از منابع انسانی در آبخوان کاکامیگاهارا در ژاپن مرکزی، از مدلDRASTIC در محیط GIS استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که بخش غربی آب‌خوان کاکامیگاهارا در رده‌بندی آسیب‌پذیری بالا و بخش شرقی در رده‌بندی آسیب‌پذیری متوسط قرار می‌گیرند.

Gleick در مطالعه خود به بررسی سابقه حملات گذشته به سیستم‌های آب و مهم‌ترین آسیب‌پذیری‌ها و خطرات پیش‌روی سیستم‌های مدرن آب پرداخته، همچنین راه‌هایی برای کاهش این خطرات نیز معرفی کرده است (Gleick، ۲۰۰۶).

نصری و همکاران (۱۳۸۷) به منظور بررسی امکان آلودگی آب رودخانه زاینده‌رود و برخی از چاه‌های فلمن به سم دیازینون، به انجام نمونه‌برداری آب از محل سد زاینده‌رود تا سد نکوآباد در ده مقطع شامل سد زاینده‌رود، پل زمانخان، روستای چم طاق، سد چم آسمان، پل کله، سد نکوآباد، سه مقطع به صورت انتخابی از محل‌های ورود فاضلاب‌ها یا پس‌آب زمین‌های کشاورزی به داخل رودخانه زاینده‌رود و یکی از چاه‌های فلمن پرداخته‌اند. نتایج نشان‌دهنده عدم آلودگی آب رودخانه زاینده‌رود و نیز پس‌آب‌ها به این آفت‌کش بود.

صراف‌پور و فرجزاده (۱۳۸۸) به صورت توصیفی به مطالعه پتانسیل‌های تهدید بیولوژیکی، عوامل بیولوژیک، نقاط آسیب‌پذیر منابع و شبکه‌های آب‌رسانی، راه‌های احتمالی آلوده‌سازی آن‌ها، تشخیص و آشکارسازی عوامل، روش گندزدایی مؤثر و راه‌های پیشگیری و مقابله پرداخته و به این نتیجه رسیدند که برنامه‌های در نظر گرفته شده برای جلوگیری از خرابکاری در شبکه‌های آب شرب ومواد غذایی و یا سایر محصولات مورد مصرف عام، باید بر اساس پیشگیری، آشکارسازی و مقابله باشد.

پیری و بامری (۱۳۹۰) به بررسی ملاحظات پدافند غیرعامل در منابع و تأسیسات آبی سیستان پرداخته و راهکارهایی برای کاهش آسیب‌پذیری ارائه نموده‌اند و به این نتیجه رسیدند که توسعه و برنامه‌ریزی به منظور حفظ منابع آب، به‌ویژه در منطقهٔ خشک و بیابانی سیستان و بلوچستان از واجبات و الزاماتی است که باید توسط مدیران در نظر گرفته شود. همچنین توسعه منابع آب منطقه از طریق احداث سدها، جلوگیری از کاهش تلفات آب به‌خصوص تبخیر و تعرق و برنامه‌ریزی برای حفظ منابع طبیعی استان از مسائلی است که حتماً باید مورد توجه قرار گیرد.

شریفی و همکاران (۱۳۹۱) در مطالعه‌ای به کمک چند دستگاه لرزه‌نگار به بررسی اثر انفجار در نزدیکی سد مخزنی سرابی تویسرکان پرداخت. نتایج این پژوهش و استانداردهای موجود در معادن روباز نشان داد که از دیدگاه لرزه‌ای، آب‌بند در منطقه‌ای کاملاً امن از انفجارهای حاصل در معادن سد سرابی تویسرکان قرار دارد.

رمضانی و موثقی صداقت (۱۳۹۱) ضمن مطالعه و پژوهش در مورد آسیب‌پذیری‌ها و شناسایی تهدیدات بالقوه و بالفعل از نظر شیمیایی و بیولوژیک در منابع و تأسیسات آبی، به ارائه راهکارهایی مقرون به صرفه برای مقابله با این تهدیدات از منظر مهندسی پدافند غیرعامل در مقیاس شهری پرداخته است.

حسین‌زاده (۱۳۹۲) بر روی تأثیر انفجار روی سدهای خاکی، طی مدل‌سازی این سدها در نرم افزار ANSYS Autodyn دریافت که در نقاط نزدیک انفجار، شدت و میزان بزرگی تنش‌ها نسبت به مقاومت آن ماده به حدی زیاد می‌باشد که منجر به تخریب در ناحیه مذکور، آن هم به صورت شدید می‌شود.

حسینی‌نژاد و صمدی (۱۳۹۲) گسترش و کاربرد حسگرهای زیستی در شناسایی و تعیین میزان آلاینده‌های محیطی حاصل از صنایع کشاورزی را موردبررسی قرار دادند و دریافتند که بدون شک حسگرهای زیستی یکی از فناوری‌های مؤثر و کاربردی در تشخیص سریع و کارآمد این آلاینده‌ها در نمونه‌های آب، خاک و منابع غذایی می‌باشد. بدین لحاظ توسعه فناوری این حسگرها می‌تواند فصل مفیدی در شناسایی، پالایش و حذف آلاینده‌های محیطزیستی به‌ویژه انواع ناشی از صنایع کشاورزی فراهم آورد.

توکلی امینیان و امینیان (۱۳۹۳) به بررسی اهمیت پدافند غیرعامل در امنیت آبرسانی در شهر مشهد پرداختند. آن‌ها مطالعاتی با توجه به اصول و مبانی پدافند غیر عامل و وضعیت تأمین آب ساکنین منطقه مورد نظر صورت دادند و راهکارهای توانمندسازی پدافند غیر عامل برای افزایش امنیت آبرسانی به ساکنین را با مطالعه موردی بر روی مخزن ذخیره آب شهری محدوده مورد مطالعه، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در بررسی این‌که آیا اصول پدافند غیر عامل در مخزن واقع در پهنه آبرسانی محدوده مورد مطالعه به طور کامل اجرا شده است یا خیر، به این نتیجه رسیدند که اصول امنیتی به طور کامل و جامع رعایت نگردیده است و با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه معین شد که می‌توان میزان امنیت شبکه آبرسانی را با انجام تمهیدات و راهکارهای اشاره شده در آن پژوهش افزایش داد (توکلی امینیان و امینیان، ۱۳۹۳).

کاظمی و گلستانه (۱۳۹۳) به شناسایی و نمره‌دهی تهدیدات مخازن ذخیره آب در شرایط مختلف پرداختند. همچنین با تقسیم کشور به دو منطقه مرکزی و مرزی و شهرها به دو دستهٔ شهرهای بزرگ و کوچک و پس از تهیه پرسشنامه بر اساس تهدیدات و تکمیل آن توسط کارشناسان و اساتید این حوزه به این نتیجه رسیدند که تمهیدات لازم با این تهدیدات در هر منطقه با مناطق دیگر متفاوت است. به عنوان مثال، در شهرهای مرزی به هیچ عنوان نباید زیرساخت‌های آبرسانی به‌صورت سطحی و قابل مشاهده باشند و در صورت اجرا باید بطور کامل استتار یابند ولی در شهرهای کوچک مرکزی می‌توان از این زیرساخت‌ها استفاده نمود (کاظمی و گلستانه، ۱۳۹۳).

در تحقیق میمندی پاریزی و کاظمی‌نیا (۱۳۹۴) آسیب‌پذیری شهر کرمان از نظر پدافند غیرعامل مورد بررسی قرار داده شد و براساس آن جانمایی‌هایی برای تأسیسات اصلی و کاربری‌های حیاتی (شامل تأسیسات آبی) و سایر بناها مشخص گردید. با توجه به ارزیابی انجام گرفته همه قسمت‌های داخلی و مرکزی شهر کرمان، ظرفیت آسیب‌پذیری و تخریب زیادی دارند و می‌بایست راهکاری برای خروج تأسیسات اصلی و کاربری‌های حیاتی، پیشنهاد و اجرا گردد.

حیدری و غفاری (۱۳۹۴) در یک مطالعه به بررسی آسیب‌پذیری دانشگاه شهرکرد براساس پدافند غیرعامل در مواقع بارش پرداخته و ضمن بررسی خاک دانشگاه و عوامل بازدارنده در جاری شدن روان‌آب در جوی‌ها و مشکلات ناشی از آن مانند خارج شدن آب حاصل از بارش از جوی‌های دانشگاه و ورود آب و رسوبات به داخل دانشکده‌های قرار گرفته در پایین‌دست، به پیشنهادهایی در رابطه با کاشت گیاهان و ایجاد سایر سازه‌های حفاظتی مانند سد در محیط دانشگاه پرداخته‌اند.

شهریاری و حدادی (۱۳۹۴) به تعیین نقاط آسیب‌پذیر تأسیسات آب و فاضلاب و روشهای پیشگیری و مقابله با خطرات احتمالی پرداخته، همچنین راهکارهایی برای انعطاف‌پذیر نمودن مجموعه در مواقع بحران بیان نموده‌اند. برای تحقق این هدف، تأسیسات آبرسانی پایلوت شهر بروجرد موردمطالعه قرارگرفته و نقاط ضعف مجموعه در هنگام بروز خطر و راهکارهای عملی و اجرایی برای پایدارسازی در برابر خطرات احتمالی را موردبررسی قرار دادند.

زرقانی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی میزان آسیب‌پذیری عناصر و بخش‌های مختلف زیر ساخت آب در برابر حملات نظامی و تروریستی می‌پردازد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد، با وجود اهمیت بسیار زیاد آب در تداوم زندگی عادی در شهر و نیاز شدید و روزانه شهروندان و بخش‌های مختلف شهری به آن، مولفه‌های بخش‌های مختلف این زیرساخت شامل تأمین، حمل، ذخیره، پالایش و تصفیه و توزیع در برابر حملات نظامی و تروریستی به شدت آسیب‌پذیر هستند.

نیک‌پیمان و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهش خود سعی نمودند با بررسی سوابق و پیشینه حکمرانان بالارتبه و میان‌رتبه مرتبط با حکمرانی منابع آب در ایران و استان کرمانشاه در بازه زمانی هشت سال جنگ و مقایسه آن با هشت سال پس از جنگ، به بررسی آثار جنگ تحمیلی ایران و عراق بر مدیریت منابع آب در استان کرمانشاه بپردازند . این مطالعه نشان داد که وقوع جنگ علاوه بر داشتن خسارات فوری و مستقیم، پیامدهای غیرمستقیم و بلندمدتی نیز

دارد. از جمله این اثرات می‌توان به اختلال در سازوکار مدیریت و حکمرانی منابع آب و محیط‌زیست اشاره کرد.
معصوم‌بیگی و همکاران (۱۴۰۰) با مطالعه شهر هشتگرد استان البرز به بررسی میزان رعایت اصول پدافندی در سیستم آب شرب شهری پرداخت که نتایج مطالعات نشان داد وضعیت کلی میزان رعایت اصول پدافند غیرعامل در تأسیسات آبی شهر هشتگرد در سطح متوسط بوده است. چاه آب شماره سه با کمترین امتیاز در سطح ضعیف و چاه شماره یک با بیشترین امتیاز در سطح متوسط برآورد شد. در اصول پدافند غیرعامل؛ اصل مکان‌یابی، ایمنی در برابر آتش‌سوزی و اعلام خبر با بیشترین امتیاز در سطح متوسط و اصول پراکندگی و استتار با کمترین امتیاز در سطح ضعیف ارزیابی گردیدند.
پژوهش‌های بین‌المللی متعددی طی سال‌های اخیر به بررسی تهدیدات امنیتی زیرساخت‌های آبی و راهبردهای تاب‌آوری و پدافند غیرعامل پرداخته‌اند. در یک مطالعه موردی مرتبط با منطقه خاورمیانه، Hindiyeh و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی تهدیدات تروریستی در شبکه آب شهری اربد اردن، ارزیابی ریسک عملیاتی انجام داده و پیشنهاد استقرار سیستم‌های سنجش آلاینده در لحظه و مکانیزم‌های توقف اضطراری را ارائه داده‌اند. در نمونه دیگر، محققان با بهره‌گیری از نظریه بازی‌ها، به بهینه‌سازی تخصیص منابع امنیتی در تصفیه‌خانه‌های آب شهری در برابر حملات فیزیکی پرداخته و نشان داده‌اند که مدل‌های راهبردی نسبت به تخصیص مبتنی بر ریسک صرف، عملکرد دفاعی بهتری دارند (Chen و همکاران، ۲۰۲۲).
در همین راستا، Patriarca و همکاران (۲۰۲۲) با شبیه‌سازی دوقلوی دیجیتال برای یک سامانه آب‌شیرین‌کن و شبکه توزیع، نشان داده‌اند که تحلیل سایبری- فیزیکی می‌تواند نقاط ضعف بحرانی را شناسایی و شاخص‌های مقاومت سایبری سامانه را ارائه دهد. این رویکرد به مدیران زیرساختی امکان برنامه‌ریزی برای سخت‌سازی سنسورها و تخصیص منابع حفاظتی را می‌دهد.
در حوزه تحلیل ریسک و ارزیابی ایمنی، محققان از مدل تحلیل ایمنی با در نظر گرفتن تاب‌آوری سیستم استفاده کرده‌اند و بر اساس داده‌های ۱۰ ساله یک شبکه توزیع آب در لهستان، میزان ریسک قابل‌قبول برای زیرساخت را برآورد کرده‌اند (Tchórzewska-Cieślak و همکاران، ۲۰۲۳).
مقالات مروری نیز نقش کلیدی در ترسیم چشم‌انداز تاب‌آوری زیرساخت آب ایفا کرده‌اند. برای مثال، Asghari و همکاران (۲۰۲۳) در مقاله‌ای جامع، راهبردهای مختلف تاب‌آوری مانند زیرساخت سبز، مانیتورینگ دیجیتال و تمرکززدایی را مرور و تأکید می‌کنند که رویکردهای فنی صرف نمی‌توانند به تنهایی تاب‌آوری را تضمین کنند.
از سوی دیگر، در زمینه تهدیدات سایبری، Raza و Moazeni (۲۰۲۴) با استفاده از مدل بهینه‌سازی محدودیتی، آسیب‌پذیری شبکه‌های توزیع هوشمند را در برابر حملات تزریق داده‌های جعلی بررسی کرده‌اند. یافته‌های آنان نشان می‌دهد که برخی گره‌های شبکه به شدت حساس بوده و نیازمند تقویت چندلایه حفاظتی هستند .
همچنین Ancheta و همکاران (۲۰۲۵) با بررسی چارچوب‌های ارزیابی تاب‌آوری، بر تلفیق روش‌های زیرساخت‌محور با شاخص‌های چندبخشی مدیریتی، اجتماعی و زیست‌محیطی تأکید کرده‌اند. این دیدگاه ترکیبی می‌تواند چارچوب مناسبی برای ارزیابی تاب‌آوری تأسیسات آب در کشورهای درحال‌توسعه فراهم کند.
این مطالعات، در مجموع نشان می‌دهند که امنیت تأسیسات آب شهری نه‌تنها وابسته به زیرساخت‌های فیزیکی، بلکه به رویکردهای مدیریتی، راهبردهای سایبری و مدل‌های تحلیلی چندلایه وابسته است که در برنامه‌ریزی پدافند غیرعامل باید به‌صورت یکپارچه در نظر گرفته شوند.
مروری بر ادبیات و پیشینه پژوهش‌های مرتبط با امنیت زیرساخت‌های آبی و پدافند غیرعامل نشان می‌دهد که اکثر مطالعات پیشین عمدتاً به صورت کلی و در سطح کلان به بررسی مفاهیم و تهدیدات عمومی در حوزه آب پرداخته‌اند، بدون آنکه به ارزیابی عمیق و میدانی در سطح تأسیسات شهری خاصی ورود نمایند. همچنین، بسیاری از تحقیقات، یا به بررسی سازوکارهای فنی پدافند غیرعامل در سایر حوزه‌ها (نظیر انرژی، حمل‌ونقل، یا مراکز حیاتی نظامی) پرداخته‌اند یا فاقد رویکرد تحلیلی بر اساس داده‌های میدانی بوده‌اند.
نوآوری اصلی این تحقیق در ترکیب چارچوب نظری پدافند غیرعامل با ارزیابی میدانی تأسیسات آب شرب شهر است. این پژوهش با بهره‌گیری از شاخص‌های امنیتی عینی و تحلیل‌های آماری، به سنجش وضعیت آسیب‌پذیری واقعی تأسیسات آب‌رسانی در یک شهر مرزی پرداخته است. تمرکز بر تهدیدات بیوتروریسم، دسترسی غیرمجاز، ضعف در پایش و ایمنی محیطی و تحلیل آن‌ها در بستر شهری خاص، از دیگر وجوه تمایز این تحقیق نسبت به مطالعات پیشین محسوب می‌شود.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نوع کاربردی و با رویکرد توصیفی-تحلیلی انجام شده است. برای دستیابی به اهداف تحقیق، ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای و بررسی منابع علمی مرتبط با پدافند غیرعامل و امنیت تأسیسات آبی انجام شد. در ادامه، مطالعه میدانی در ایستگاه برداشت و پمپاژ آب صورت گرفت تا وضعیت فیزیکی، موقعیت جغرافیایی، سطح دسترسی و تدابیر امنیتی موجود مورد ارزیابی قرار گیرد.

مورد مطالعه

مورد مطالعه در این پژوهش شهرستان با جمعیت متوسط می‌باشد. شهری که در منطقه کویری و حاشیه کویر

می‌باشد. تأسیسات آب و فاضلاب شهر به شرح ذیل می‌باشد: ایستگاه تصفیه آب، ایستگاه تصفیه فاضلاب، شبکه آبرسانی، ایستگاه‌های برداشت آب. به‌منظور امنیت سیستم آب و فاضلاب و جلوگیری از عملیات خرابکاری، نام شهر در مقاله قید نشده است.

بدیهی است که تمرکز مطالعه میدانی بر تنها یک ایستگاه می‌تواند محدودیت‌هایی در تعمیم کامل یافته‌ها به کل شبکه آبرسانی شهر ایجاد کند. این محدودیت عمدتاً ناشی از ماهیت مطالعه موردی است که بر اساس تئوری تعمیم‌پذیری، یافته‌ها را به شرایط خاص مورد مطالعه (مانند تنظیمات جغرافیایی، زمانی و عملیاتی ایستگاه) محدود می‌کند و امکان حسابداری برای تغییرات در جنبه‌های دیگر مانند ایستگاه‌های متفاوت، شرایط زمانی متنوع یا عوامل محیطی را کاهش می‌دهد. به عنوان مثال، تفاوت‌های احتمالی در دسترسی امنیتی، ساختار فیزیکی یا تهدیدات محلی بین ایستگاه و سایر تأسیسات ممکن است باعث شود یافته‌ها در این ایستگاه خاص معتبر باشند، اما نتوانند به طور مستقیم به کل شبکه تعمیم یابند، که این امر اعتبار خارجی پژوهش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. دلیل تمرکز بر این ایستگاه نیز محدودیت‌های اداری و امنیتی بود، زیرا مجوز بازدید تنها برای این سایت صادر شد و دسترسی به سایر نقاط به دلیل محرمانگی مرتبط با پدافند غیرعامل، ممکن نبود. لذا نتایج حاصل از این مطالعه بیشتر ناظر بر بررسی نمونه‌ای از وضعیت امنیتی تأسیسات آبی در شرایط موجود بوده و نه لزوماً تعمیم کلی به همه نقاط. برای غلبه بر این محدودیت، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با دسترسی به چندین ایستگاه و استفاده از روش‌های چندموردی یا شبیه‌سازی تصمیم‌گیری بر اساس تئوری تعمیم‌پذیری، دامنه تعمیم‌پذیری یافته‌ها را افزایش دهند و واریانس ناشی از جنبه‌های مختلف را بهتر ارزیابی کنند.

چاهک‌های مطالعاتی در این پژوهش که یک چاه در این منطقه مورد بررسی قرار گرفت. سپس حجم آب این چاه به سمت تصفیه‌خانه و منبع اولیه رفته و از آن‌جا به سمت تصفیه‌خانه داخل شهر روانه می‌شود.

جامعه آماری این پژوهش، ۳۱ نفر از متخصصان و اندیشمندان حوزه آب در سازمان آب و فاضلاب می‌باشند. انتخاب این جامعه آماری به دلیل تمرکز پژوهش بر جنبه‌های فنی و عملیاتی تأسیسات آب شرب و زیرساخت‌های آن بوده است، زیرا این کارشناسان دارای دانش تخصصی مستقیم و تجربه عملی در مدیریت و امنیت این تأسیسات هستند. همچنین، با توجه به حساسیت موضوع پدافند غیرعامل و مسائل امنیتی و محرمانگی مرتبط با آن، دسترسی به نظرات سایر ذی‌نفعان مانند نیروهای نظامی یا جامعه محلی محدود بود و امکان جمع‌آوری داده از آن‌ها فراهم نشد. در این پژوهش از روش سرشماری استفاده شده و تمامی ۳۱ نفر به عنوان جامعه آماری، مورد پرسش قرار گرفتند.

ابزار گردآوری اطلاعات

ابزارها و وسایل گردآوری اطلاعات که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته با استفاده از یک پرسشنامه استاندارد تطبیق داده شده که با نیاز پروژه تنظیم گردیده است. پرسش‌نامه به‌صورت محقق‌ساخته تهیه شده است. فرآیند طراحی آن شامل مرور منابع علمی داخلی و خارجی مرتبط با پدافند غیرعامل در حوزه آب‌رسانی، مطالعه اسناد راهبردی ملی، و انجام مصاحبه نیمه‌ساختاریافته با سه نفر از کارشناسان ارشد بوده است. بر پایه این اطلاعات، گویه‌های اولیه تدوین شد و سپس نسخه نهایی پرسش‌نامه با دریافت بازخورد از همان خبرگان اصلاح و نهایی گردید.

این پرسشنامه دارای ۲۱ سوال است و به شرح ذیل می‌باشد:

سه سوال اول مربوط به مشخصات پرسش‌شونده می‌باشد تا سطح علمی و سن و جنسیت پرسش‌شونده مورد مطالعه سنجیده شود. در ادامه سوالاتی در خصوص امنیت حوزه آب تأسیسات آبرسانی آمده که از منظر ۱) پایش ۲) آلوده‌سازی ۳)خرابکاری توسط افراد غیر ۴)پدافند غیر عامل، مورد مطالعه و ارزیابی واقع شده است. در جدول (۱) گویه‌های استفاده شده در پرسش‌نامه پژوهش نشان داده شده است.

بررسی اعتبارسازه‌ای پرسشنامه

مفهوم آسیب‌پذیری تأسیسات زیرساختی آب شرب از منظر بیوتروریسم و عملیات خرابکاری از سه عامل پایش، دسترسی افراد غیر و ایمنی تشکیل شده است:

پایش: این معیار به نظارت مداوم و تشخیص تهدیدات در شبکه‌های زیرساختی آب اشاره دارد، شامل نظارت بر سیستم‌ها برای شناسایی ناهنجاری‌ها، حملات سایبری یا فیزیکی. پایش شامل نظارت بر اجزای سیستم‌های کنترل و خودکارسازی صنعتی برای حفظ امنیت مداوم و همچنین استفاده از ابزارهای تشخیص تهدید مانند حسگرهای محیطی و سیستم‌های هشدار زودهنگام است. شاخص‌های کلیدی شامل پوشش دوربین‌های مداربسته، حسگرهای آلودگی، و نظارت بلادرنگ است.

دسترسی غیرمجاز: این عامل بر جلوگیری از ورود افراد غیرمجاز به تأسیسات تمرکز دارد، شامل موانع فیزیکی و دیجیتال. این معیار شامل اجرای سیاست‌های کنترل دسترسی، رمزنگاری و موانع فیزیکی مانند حصارکشی، دروازه‌ها، نگهبانان و درهای قفل‌دار است. شاخص‌های کلیدی عبارتند از سطح محدودیت دسترسی، سیستم‌های شناسایی نفوذ و ارزیابی ریسک دسترسی غیرمجاز.

ایمنی: این معیار به اقدامات پیشگیرانه و غیرفعال برای کاهش آسیب‌پذیری در برابر تهدیدات فیزیکی، سایبری و

بیولوژیکی اشاره دارد، بدون نیاز به دخالت انسانی مستقیم. ایمنی شامل لایه‌های دفاعی غیرفعال مانند ساختارهای مقاوم، استتار و سیستم‌های پشتیبان است. همچنین، بر موانع فیزیکی مانند نرده‌ها و روشنایی برای بازدارندگی تأکید دارند. شاخص‌های کلیدی شامل تطابق با استانداردهای جهانی، کیفیت اجرا، و ایمنی محیطی در برابر نفوذ دشمن است.

جدول ۱- گویه‌های استفاده شده در پرسش‌نامه پژوهش

شماره	پرسش (گویه)	شماره	پرسش (گویه)
۱	ارزیابی مطلوبیت مخازن و محل‌های نگهداری آب در شهر از منظر پدافند غیر عامل (آلوده‌سازی) در زمینه پایش چگونه است؟	۹	ارزیابی مطلوبیت خطوط انتقال آب تصفیه شده پس از تصفیه‌خانه در شهر از منظر دسترسی در پدافند غیر عامل چگونه است؟
۲	ارزیابی مطلوبیت مخازن و محل‌های نگهداری آب در شهر از منظر پدافند غیر عامل (آلوده‌سازی) در زمینه دسترسی چگونه است؟	۱۰	ارزیابی مطلوبیت خطوط انتقال آب تصفیه شده پس از تصفیه‌خانه در شهر از منظر مدیریت بحران در پدافند غیر عامل چگونه است؟
۳	ارزیابی مطلوبیت چاه‌های برداشت آب در شهر از منظر پدافند غیر عامل از جهت آلوده‌سازی چاه‌ها و دسترسی غیر، چگونه است؟	۱۱	به صورت کلی نحوه دسترسی، نفوذ و تخریب توسط دشمن به تأسیسات آب‌رسانی از منظر پدافند غیر عامل چگونه است؟
۴	ارزیابی مطلوبیت چاه‌های برداشت آب در شهر از منظر پدافند غیر عامل از جهت پایش چگونه است؟	۱۲	ایمنی تأسیسات آبرسانی در شهر تا چه میزان همخوانی با استانداردهای جهانی برای استفاده از سیستم‌های هوشمند کنترل بحران ازقبیل پایش، استفاده از حسگر و دوربین‌های امنیتی، کنترل و مدیریت بحران از طریق هوش مصنوعی و ... دارد؟
۵	ارزیابی مطلوبیت تأسیسات آب‌رسانی و توزیع در شهر از منظر پدافند غیر عامل از جهت پایش چگونه است؟	۱۳	کاربری‌های شهری از قبیل مدارس، خیابان، فضاهای عمومی و ... پیرامون تأسیسات آبی از منظر پدافند غیر عامل (زمینه برای دسترسی افراد غیر به تأسیسات) چگونه است؟
۶	ارزیابی مطلوبیت تأسیسات آب‌رسانی و توزیع در شهر از منظر پدافند غیر عامل از جهت دسترسی چگونه است؟	۱۴	ایمنی و امنیت بافت شهری پیرامون تأسیسات آبی شهر از منظر پدافند غیر عامل چگونه است؟
۷	ارزیابی مطلوبیت ایستگاه‌های پمپاژ آب در شهر از منظر پدافند غیر عامل برای دسترسی غیر و خرابکاری چگونه است؟	۱۵	ایمنی محیط‌های تأسیسات آبی شهر و محوطه آن (از قبیل حصارکشی، دیوار، دیده بانی و ...) از نظر تطابق با استانداردهای بین المللی چگونه است؟
۸	ارزیابی مطلوبیت خطوط انتقال آب تصفیه شده پس از تصفیه‌خانه در شهر از منظر پایش در پدافند غیر عامل چگونه است؟	۱۶	ایمنی محیط‌های تأسیسات آبی شهر و محوطه آن (از قبیل حصارکشی، دیوار، دیده‌بانی و ...) از نظر کیفیت اجرا چگونه است؟

نتایج مندرج در جدول (۲) نشان می‌دهد که بارهای عاملی مربوط به تمام گویه‌ها بیشتر از ۰/۳ بوده و مورد تأیید قرار می‌گیرند. همچنین مقدار ضریب آلفای کرونباخ هر یک از این عوامل زیادتر از ۰/۷ قرار گرفته است که نشان از همسانی درونی مطلوب برای آنها دارد.

قدرت رابطه بین عامل (متغیر پنهان) و متغیر قابل مشاهده، به‌وسیله بار عاملی نشان داده می‌شود. بار عاملی مقداری بین صفر و یک است. اگر بار عاملی کمتر از ۰/۳ باشد، رابطه ضعیف درنظر گرفته شده و از آن صرف‌نظر می‌شود. بارعاملی بین ۰/۳ تا ۰/۶ قابل قبول است و اگر بزرگتر از ۰/۶ باشد، خیلی مطلوب است.

برخی گویه‌ها نظیر گویه ۳ (بار عاملی ۰/۳۴) و گویه ۹ (بار عاملی ۰/۴۳) دارای بار عاملی نسبتاً کمتری نسبت به سایر گویه‌ها بودند. با این حال، از آنجا که بار عاملی زیادتر از ۰/۳، از نظر ادبیات تحلیل عاملی قابل قبول تلقی می‌شود، و همچنین این گویه‌ها از نظر مفهومی (دسترسی غیرمجاز و انتقال آب پس از تصفیه)، نقش مهمی در ارزیابی امنیت تأسیسات آبی دارند، تصمیم بر آن شد که در مدل باقی بمانند. در عین حال، پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی، این گویه‌ها با دقت و بازنگری بیشتری طراحی و آزمون شوند.

در شکل (۱) علاوه بر بارهای عاملی، خطاهای اندازه‌گیری و شاخص‌های RMSEA و p-value آمده است که از جملهٔ شاخص‌های نیکویی برازش مدل هستند. ملاحظه می‌شود که شاخص RMSEA برابر با ۰/۰۳۹ گزارش شده که کمتر از ۰/۱ و مقدار P-value برابر با ۰/۳۴۵۹۳ درج شده که بیشتر از ۰/۰۵ است و این دو شاخص، نیکویی برازش مدل اندازه‌گیری را تأیید می‌کنند.

جدول ۲- بارهای عاملی وآلفای کرونباخ مربوط به مدل اندازه‌گیری آسیب‌پذیری تأسیسات زیرساختی آب شرب از منظر بیوتروریسم

سازه	گویه	بار عاملی	آلفای کرونباخ
پایش	۱	۰/۶۸	۰/۸۳۱
	۵	۰/۸۹	
	۶	۰/۸۷	
	۹	۰/۴۳	
دسترسی افراد غیر	۳	۰/۳۴	۰/۷۱۱
	۴	۰/۶۲	
	۷	۰/۶۶	
	۸	۰/۵۳	
	۱۰	۰/۵۰	
	۱۲	۰/۶۴	
ایمنی	۱۱	۰/۷۶	۰/۸۶۸
	۱۳	۰/۷۸	
	۱۴	۰/۶۹	
	۱۵	۰/۷۰	
	۱۶	۰/۵۵	
	۱۷	۰/۵۳	
	۱۸	۰/۴۹	
	۲۳	۰/۶۶	

سایر شاخص‌های نیکویی برازش مدل اندازه‌گیری مفهوم آسیب‌پذیری تاسیسات زیرساختی آب شرب از منظر بیوتروریسم در جدول (۳) آمده است. مندرجات این جدول نشان می‌دهد که نسبت کای دو به درجه آزادی ۱/۰۴ شده است که کمتر از ۳ بوده و مطلوب ارزیابی می‌شود. لذا در نهایت می‌توان گفت مدل اندازه‌گیری مربوط به مفهوم آسیب‌پذیری تأسیسات زیرساختی آب شرب از منظر بیوتروریسم از برازش مناسب و قابل قبولی برخوردار می‌باشد.

آزمون‌ها و روش تحلیل آماری

در این تحقیق نتایج آماری در دو بخش آمار توصیفی و آمار استنباطی ارائه خواهند شد. در بخش آمار توصیفی از شاخص‌هایی مانند میانگین، میانه، مد، انحراف معیار، چولگی و کشیدگی برای ارائه توصیفی از وضعیت متغیرهای اصلی و فرعی تحقیق استفاده شد و در بخش آمار استنباطی از آزمون‌هایی نظیر آزمون میانگین یک جامعه آماری، آزمون t دو نمونه‌ای مستقل، آزمون تحلیل واریانس و مدل‌یابی معادلات ساختاری بهره برده شد. پس از جمع‌آوری پرسشنامه‌ها و گردآوری نمرات خام، داده‌ها با کمک نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند.

یافته‌ها و بحث

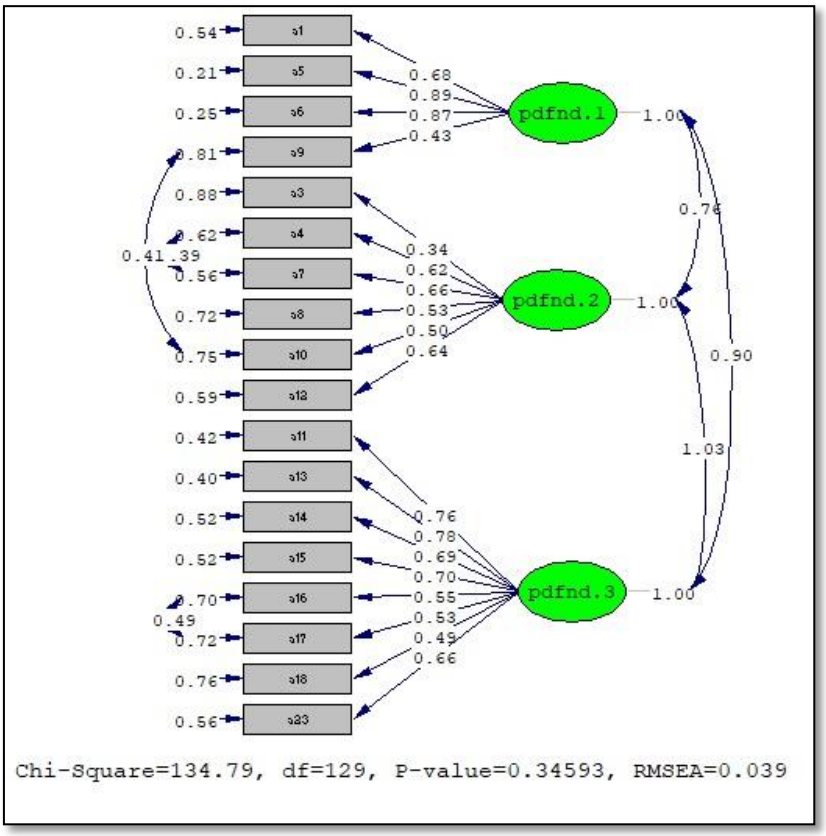
در این بخش ابتدا به بیان یافته‌های بازدید میدانی از پروژه‌های آب پرداخته می‌شود که شامل بررسی وضعیت ایستگاه‌های برداشت و پمپاژ آب از نظر پدافند غیرعامل می‌پردازد. در ادامه نیز مطالعات آماری حول موضوع امنیت تأسیسات آبرسانی ارائه می‌گردد و در انتها تفسیر یافته‌ها و تحلیل نتایج ارائه می‌شود.

پدافند غیرعامل چاه برداشت آب

طی بازدید از این پروژه که با همراهی ناظر سازمان آب منطقه‌ای صورت پذیرفت، مشخص شد که این چاه با عمق بیش از ۱۰۰ متر جزو چاه‌های اصلی برداشت آب شهر می‌باشد. آب این چاه به همراه ۶ چاه دیگر جمع‌آوری و به ایستگاه تصفیه آب منتقل می‌شود.

پدافند غیرعامل در این چاه را می‌توان از چند جهت به شرح ذیل مورد بررسی قرار داد:

راه دسترسی: راه دسترسی این پروژه خاکی بود. دوری آن از مسیر جاده و دور افتاده بودنش از دید می‌تواند یک نقطه ضعف برای این پروژه باشد. البته طی مصاحبه مشخص شد این چاه به همراه ۶ چاه دیگر، یک نگهبان شیفتی دارند که به صورت متوالی از این سازه‌ها سرکشی می‌کند، اما از آن‌جا که عملیات تخریب همیشه با زیرکی صورت می‌گیرد، لذا نبود نگهبان به صورت دائمی در سر پروژه، خود می‌تواند مشکل‌ساز شود. لذا می‌بایست راه دسترسی، یک مسیر استاندارد باشد تا بتوان یک کشیک به صورت دائمی در این مسیرها مستقر کرد.



شکل ۱- مدل اندازه‌گیری مفهوم آسیب‌پذیری تأسیسات زیرساختی آب شرب از منظر بیوتروریسم

جدول ۳- شاخص‌های نیکویی برازش مدل اندازه‌گیری مفهوم آسیب‌پذیری تأسیسات زیرساختی آب شرب از منظر بیوتروریسم

	χ^2/df	GFI	CFI	NFI
الگوی پیشنهادی	۱/۰۴	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۰

نزدیکی به زیرساخت‌های شهری: با بررسی این پروژه مشخص شد این پروژه نزدیک به یک پست برقی می‌باشد که در فاصله چند متری قرار گرفته است. این نزدیکی می‌تواند در گام اول موجبات خطرآفرین بودن و انفجار را در این چاه افزایش دهد و در گام بعد می‌توان گفت این پست برقی به عنوان یک نردبان عمل می‌کند. علت موضوع فوق نیز اجرای تیرهای برق پس از سازه چاه بوده است، لذا پیشنهاد می‌شود برای جلوگیری از مشکلات بعدی، تیرهای برق به فاصله‌ای ایمن منتقل شوند.

حصارکشی: حصارکشی و دیوارکشی در این پروژه نسبت به اهمیت آن، ضعیف می‌باشد.

امنیت لوله‌های اصلی: شریان‌های اصلی و شاه لوله‌ها هیچگونه حفاظ مناسبی ندارد و هر فرد می‌تواند به راحتی به این لوله‌ها آسیب برساند، تخریب کند یا حتی از این طریق مواد بیولوژیکی خطرناک را وارد چرخه تصفیه‌خانه نماید.

کنترل از راه دور (پایش): طی بازدید مشخص شد که هنوز سیستم نظارت و کنترل از راه دور برای این ایستگاه فعال نشده، اما ایستگاه مشغول خدمت‌رسانی می‌باشد که خود می‌تواند جای سوال ایجاد نماید. طی مصاحبه با ناظر مربوطه مشخص شد هنوز تشکیلات پایش در پروژه مستقر نشده و به زودی این کار صورت خواهد گرفت.

امنیت تابلو برق: در مقابل تابلو برق، هیچگونه حصارکشی مناسبی صورت نگرفته بود. در واقع عامل خرابکار پس از عبور از فنس و همچنین بازکردن درب اتاقک سرچاه، به راحتی می‌تواند به تابلو برق و سیستم فرمان و همچنین لوله‌های انتقال آب دسترسی پیدا کند. لذا ضروریست تا با اندیشیدن تمهیدات کافی برای جلوگیری از دسترسی عوامل غیر به سیستم آبرسانی و تابلو برق از قبیل ایجاد یک فنس با قوطی‌های مناسب و همچنین استفاده از قفل‌های کتابی و استفاده از آژیر و اعلان خطر، جلوی این دسترسی‌ها گرفته شود تا احتمال وقوع حادثه تا حد ممکن کاهش یابد.

پدافند غیرعامل ایستگاه پمپاژ

کمی بالاتر از پروژه ایستگاه سرچاه، ایستگاه پمپ‌خانه وجود دارد که به علت مسائل امنیتی امکان بازدید از داخل این پروژه فراهم نشد. لذا مسائل و نقاط ضعف و قوتی که از پیرامون پروژه قابل رویت و استنباط بود به شرح ذیل ارائه می‌گردد:

راه دسترسی: راه دسترسی این پروژه همچون پروژه اتاقک سرچاه خاکی و به دور از جاده و تأسیسات شهری بود. خاکریزهای بلند و تپه‌های اطراف آن مانع از دیدن این پروژه از راه دور می‌شود که در روز حادثه این قاعده خطرساز می‌باشد.

حصارکشی: حصارکشی و دیوارکشی در این پروژه با توجه به میزان اهمیت آن، کم بوده است. ارتفاع کم دیوارها، قابل رویت بودن پشت شبکه حفاظ، دسترسی آسان و ... از معایب این سیستم می‌باشد که می‌بایست نسبت به رفع آن اقدام نمود.

کنترل از راه دور (پایش): پایش در این پروژه به میزان کافی صورت نگرفته است. دوربین‌های مداربسته بر روی دیوار پیرامونی مستقر نشده‌اند. همچنین در فضای داخلی نیز سیستم صاعقه‌گیر، دوربین‌های مداربسته، سیستم اعلان خطر و سیستم‌های اعلان حریق، رویت نشد. همچنین روی لوله‌های ورودی به مخازن آب نیز باز بود که خود می‌تواند در وقت خطر مشکل‌ساز باشد.

آمارتوصیفی

در این بخش ابتدا اطلاعات جمعیت‌شناختی نمونه مانند جنسیت، تحصیلات و غیره گزارش می‌شوند و در ادامه شاخص‌های توصیفی هر یک از متغیرها، مرور خواهند شد. برحسب جنسیت، ۷ نفر (۲۲/۶ درصد) از افراد نمونه زن و ۲۴ نفر (۷۷/۴۰ درصد) از آنها مرد هستند. بر اساس تحصیلات، ۴ نفر (۱۲/۹درصد) از افراد حاضر در نمونه دارای تحصیلات لیسانس، ۱۹ نفر (۶۱/۳ درصد) دارای تحصیلات فوق‌لیسانس و ۸ نفر (۲۵/۸درصد) نیز دارای تحصیلات دکتری هستند. برحسب سن، تعداد افراد دارای سن کمتر از ۳۰ سال، ۸ نفر (۲۵/۸ درصد)، دارای سن ۳۰ تا ۴۰ سال، ۱۳ نفر (۴۱/۹ درصد) و با سن بیشتر از ۴۰ سال، ۱۰ نفر (۳۲/۳ درصد) هستند.

آماراستنباطی

به منظور شناسایی رخنه‌های تأسیسات آبی شهر و بررسی آسیب‌پذیری تأسیسات زیرساختی آب شرب از منظر بیوتروریسم و عملیات خرابکاری و اینکه چگونه می‌توان با در نظر گرفتن پدافند غیر عامل در تقویت زیرساختهای آب عمل نمود و اینکه آیا زیرساخت‌های آب شرب شهر از نظر پدافند غیر عامل در مقابل عملیات خرابکارانه مورد تأیید می‌باشد یا خیر، نظرات کارشناسان در قالب طیف لیکرت مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفت که این نظرات در سه دسته پایش، دسترسی افراد غیر و ایمنی تقسیم‌بندی شدند.

نظرات کارشناسان در خصوص مسئله پایش (که شامل ۴ مورد است) بر اساس طیف لیکرت به شرح جدول (۴) می‌باشد. بر اساس مندرجات این جدول ملاحظه می‌شود که برای سه مورد «مطلوبیت مخازن و محل‌های نگهداری آب (۵۸/۱ درصد)»، «مطلوبیت تأسیسات آب‌رسانی و توزیع(۳۵/۵ درصد)» و «مطلوبیت خطوط انتقال آب تصفیه شده پس از تصفیه‌خانه(۵۱/۶ درصد)» گزینه «مناسب» موفق به کسب اکثریت آراء شده است، اما برای «مطلوبیت چاه‌های برداشت آب(۴۵/۲ درصد)» گزینه «معمولی» توانسته است بیشتر آراء را کسب نماید.

جدول ٤- توزیع فراوانی (درصد) هر یک از گویه‌های پایش

گویه	بسیار نامناسب	نامناسب	معمولی	مناسب	بسیار مناسب
۱	۰	۱ (۳/۲)	۹ (۲۹)	۱۸ (۵۸/۱)	۳ (۹/۷)
۴	۱ (۳/۲)	۲ (۶/۵)	۱۴ (۴۵/۲)	۱۳ (۴۱/۹)	۱ (۳/۲)
۵	۰	۷ (۲۲/۶)	۱۰ (۳۲/۳)	۱۱ (۳۵/۵)	۳ (۹/۷)
۸	۰	۲ (۶/۵)	۹ (۲۹)	۱۶ (۵۱/۶)	۴ (۱۲/۹)

در ادامه شاخص‌های توصیفی از جمله میانگین، انحراف معیار و غیره در جدول (۵) گزارش شده است. ملاحظه می‌شود که کمترین مقدار ضریب تغییرات به ترتیب مربوط به «مطلوبیت مخازن و محل‌های نگهداری آب»(۰/۱۸۲)، «مطلوبیت خطوط انتقال آب تصفیه شده پس از تصفیه‌خانه» (۰/۲۱۱)، «مطلوبیت چاه‌های برداشت آب» (۰/۲۳۸) و «مطلوبیت تأسیسات آب‌رسانی و توزیع» (۰/۲۸۴) می‌باشند. همچنین دو شاخص چولگی و کشیدگی برای همه موارد در محدوده ۲- تا ۲+ قرار دارد که نرمال بودن هر یک از گویه‌ها را تأیید می‌کند.

جدول ۵- شاخص‌های توصیفی هر یک از گویه‌های پایش

گویه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی
۱	۳/۷۴۲	۰/۶۸۱	۰/۱۸۲	-۰/۳۰۱	۰/۳۶۱
۴	۳/۳۵۵	۰/۷۹۸	۰/۲۳۸	-۰/۷۵۲	۱/۴۲۷
۵	۳/۳۲۳	۰/۹۴۵	۰/۲۸۴	۰/۰۴۴	-۰/۸۹۲
۸	۳/۷۱۰	۰/۷۸۲	۰/۲۱۱	-۰/۳۱۴	-۰/۰۱۱

با توجه به نرمال بودن گویه‌های مربوط به پایش در ادامه به کمک آزمون t تک نمونه‌ای به مقایسه میانگین این گویه‌ها با حد متوسط (یعنی عدد ۳ به عنوان حد متوسط ۱ تا ۵) پرداخته می‌شود. همانطور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود برای سه گویه «مطلوبیت مخازن و محل‌های نگهداری آب»، «مطلوبیت چاه‌های برداشت آب» و «مطلوبیت خطوط انتقال آب تصفیه شده پس از تصفیه‌خانه» با بررسی آماره t، سطح معنی‌داری، کمتر از ۰/۰۵ شده است که این امر نشان می‌دهد که بر اساس نظرات کارشناسان مطلوبیت همه این موارد از منظر پدافند غیر عامل از جهت پایش به طور معنی‌داری از حد متوسط (عدد ۳) بیشتر است. اما برای «مطلوبیت تأسیسات آب‌رسانی و توزیع» سطح معنی‌داری بر اساس جدول ۶، ۰/۰۶۷ گزارش شده که بیشتر از ۰/۰۵ است. لذا می‌توان گفت مطلوبیت تأسیسات آب‌رسانی و توزیع در شهر از منظر پدافند غیر عامل از جهت پایش و تشخیص خرابکاری در حد متوسطی قرار دارد.

جدول ٦- آزمون t یک نمونه‌ای برای هر یک از گویه‌های پایش

گویه	میانگین	انحراف معیار	آماره t	درجه آزادی	سطح معنی‌داری
۱	۳/۷۴۲	۰/۶۸۱	۶/۰۶۱	۳۰	۰/۰۰۰
۴	۳/۳۵۵	۰/۷۹۸	۲/۴۷۶	۳۰	۰/۰۱۹
۵	۳/۳۲۳	۰/۹۴۵	۱/۹۰۱	۳۰	۰/۰۶۷
۸	۳/۷۱۰	۰/۷۸۲	۵/۰۴۷	۳۰	۰/۰۰۰

نظرات کارشناسان در خصوص مسئله دسترسی افراد غیر بر اساس طیف لیکرت به شرح جدول (۷) می‌باشد. بر اساس مندرجات این جدول ملاحظه می‌شود که برای گویه‌های «مطلوبیت مخازن و محل‌های نگهداری آب (۵۴/۸ درصد)»، «مطلوبیت چاه‌های برداشت آب(۳۸/۷ درصد)»، «مطلوبیت تأسیسات آب‌رسانی و توزیع(۳۸/۷ درصد)»، «مطلوبیت ایستگاه‌های پمپاژ آب (۴۱/۹) درصد» و «مطلوبیت خطوط انتقال آب تصفیه شده پس از تصفیه‌خانه(۶۱/۳ درصد)» گزینه «مناسب» موفق به کسب اکثریت آراء شده است، اما برای «نحوه دسترسی، نفوذ و تخریب توسط دشمن به صورت کلی(۴۸/۴ درصد)» گزینه «معمولی» توانسته است بیشتر آراء را کسب نماید.

در ادامه شاخص‌های توصیفی از جمله میانگین، انحراف معیار و غیره در جدول ۸ گزارش شده است که نرمال بودن هر یک از گویه‌ها را تأیید می‌کند.

با توجه به نرمال بودن گویه‌های مربوط به دسترسی افراد غیر، در ادامه به کمک آزمون t تک نمونه‌ای به مقایسه میانگین این گویه‌ها با حد متوسط (عدد ۳) پرداخته شد. همانطور که در جدول (۹) مشاهده می‌شود، برای تمام گویه‌های دسترسی افراد غیر آماره t مثبت و سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ شده است که این امر نشان می‌دهد که بر اساس نظرات کارشناسان، مطلوبیت همه این موارد از منظر پدافند غیر عامل از جهت دسترسی افراد غیر به طور معنی‌داری از حد متوسط (عدد ۳) بیشتر است.

نظرات کارشناسان در خصوص مسئله ایمنی بر اساس طیف لیکرت به شرح جدول (۱۰) می‌باشد.

در ادامه شاخص‌های توصیفی از جمله میانگین، انحراف معیار و غیره در جدول (۱۱) گزارش شده است که نرمال بودن هر یک از گویه‌ها را تأیید می‌کند.

با توجه به نرمال بودن گویه‌های مربوط به ایمنی در ادامه به کمک آزمون t تک نمونه‌ای به مقایسه میانگین این گویه‌ها با حد متوسط (عدد ۳) پرداخته شد. همانطور که در جدول (۱۲) مشاهده می‌شود برای گویه‌های «مطلوبیت خطوط انتقال آب تصفیه شده پس از تصفیه‌خانه»، «تطابق ایمنی محیط‌های تأسیسات آبی با استانداردهای بین المللی»، «کیفیت اجرای محیط‌های تأسیسات آبی»، «محیط‌های تأسیسات آبی از جهت نفوذ و دسترسی دشمن» و «ایمنی و امنیت تأسیسات آبی به طور کلی» آماره t مثبت و سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ شده است که این امر نشان می‌دهد که بر اساس نظرات کارشناسان مطلوبیت همه این موارد از منظر پدافند غیر عامل از جهت ایمنی به طور معنی‌داری از حد متوسط (عدد ۳) بیشتر است. اما برای سه مورد «همخوانی تأسیسات آبرسانی در شهر با استانداردهای جهانی از جهت استفاده از سیستم‌های هوشمند کنترل بحران»، «چینش کاربری‌های شهری» و

«ایمنی و امنیت بافت شهری پیرامون تأسیسات آبی» سطح معنی‌داری به ترتیب ۰/۵۷۲، ۰/۵۴۰ و ۰/۸۱۳ شده است که از ۰/۰۵ بیشتر بوده و نشان می‌دهد که بر اساس نظرات کارشناسان مطلوبیت این موارد از منظر پدافند غیر عامل از جهت ایمنی در حد متوسط (عدد ۳) است.

تحلیل تفاوت‌های گروهی براساس ویژگی‌های جمعیت‌شناختی

به‌منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های جمعیت‌شناختی پاسخ‌دهندگان بر نظرات آن‌ها در خصوص مؤلفه‌های امنیتی مورد مطالعه، از آزمون t مستقل برای متغیر جنسیت، و از تحلیل واریانس (ANOVA) برای متغیرهای سطح تحصیلات و سن استفاده شد.

نتایج تحلیل‌ها نشان داد که:

- هیچ‌کدام از مؤلفه‌ها بین مردان و زنان تفاوت معناداری نداشتند.($p > 0.05$)
- سطح تحصیلات بر مؤلفه ایمنی تأثیر معناداری داشت ($p < 0.05$) به‌گونه‌ای که کارشناسان دارای تحصیلات دکتری، نسبت به سایرین، دیدگاه‌های محافظه‌کارانه‌تری در مورد ایمنی زیرساخت‌ها داشتند. سایر مؤلفه‌ها نیز در آستانه معناداری بودند که نیاز به بررسی بیشتر در مطالعات آتی دارد.
- در متغیر سن، هیچ‌کدام از مؤلفه‌ها تفاوت معناداری بین گروه‌های سنی وجود نداشت.

جدول ۷- توزیع فراوانی (درصد) هر یک از گویه‌های دسترسی افراد غیر

گویه	بسیار نامناسب	نامناسب	معمولی	مناسب	بسیار مناسب
۲	۰	۱ (۳/۲)	۹ (۲۹)	۱۷ (۵۴/۸)	۴ (۱۲/۹)
۳	۰	۶ (۱۹/۴)	۹ (۲۹)	۱۲ (۳۸/۷)	۴ (۱۲/۹)
۶	۰	۶ (۱۹/۴)	۱۰ (۳۲/۳)	۱۲ (۳۸/۷)	۳ (۹/۷)
۷	۰	۳ (۹/۷)	۸ (۲۵/۸)	۱۳ (۴۱/۹)	۷ (۲۲/۶)
۹	۰	۲ (۶/۵)	۸ (۲۵/۸)	۱۹ (۶۱/۳)	۲ (۶/۵)
۱۱	۰	۴ (۱۲/۹)	۱۵ (۴۸/۴)	۱۲ (۳۸/۷)	۰

جدول ۸- شاخص‌های توصیفی هر یک از گویه‌های دسترسی افراد غیر

گویه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی
۲	۳/۷۷۴	۰/۷۱۷	۰/۱۹۰	-۰/۲۱۳	۰/۱۰۰
۳	۳/۴۵۲	۰/۹۶۰	۰/۲۷۸	-۰/۰۹۵	-۰/۸۸۱
۶	۳/۳۸۷	۰/۹۱۹	۰/۲۷۱	-۰/۰۵۷	-۰/۷۹۲
۷	۳/۷۷۴	۰/۹۲۰	۰/۲۴۴	-۰/۳۳۹	-۰/۵۷۸
۹	۳/۶۷۷	۰/۷۰۲	۰/۱۹۱	-۰/۶۸۷	۰/۶۷۸
۱۱	۳/۲۵۸	۰/۶۸۱	۰/۲۰۹	-۰/۳۷۴	-۰/۷۳۵

جدول ۹- آزمون t یک نمونه ای برای هر یک از گویه‌های دسترسی افراد غیر

گویه	میانگین	انحراف معیار	آماره t	درجه آزادی	سطح معنی‌داری
۲	۳/۷۷۴	۰/۷۱۷	۶/۰۱۳	۳۰	۰/۰۰۰
۳	۳/۴۵۲	۰/۹۶۰	۲/۶۱۸	۳۰	۰/۰۱۴
۶	۳/۳۸۷	۰/۹۱۹	۲/۳۴۴	۳۰	۰/۰۲۶
۷	۳/۷۷۴	۰/۹۲۰	۴/۶۸۳	۳۰	۰/۰۰۰
۹	۳/۶۷۷	۰/۷۰۲	۵/۳۷۵	۳۰	۰/۰۰۰
۱۱	۳/۲۵۸	۰/۶۸۱	۲/۱۰۸	۳۰	۰/۰۴۳

جدول ۱۰- توزیع فراوانی (درصد) هر یک از گویه‌های ایمنی

گویه	بسیار نامناسب	نامناسب	معمولی	مناسب	بسیار مناسب
۱۰	۰	۶ (۱۹/۴)	۱۰ (۳۲/۳)	۱۵ (۴۸/۴)	۰
۱۲	۱ (۳/۲)	۷ (۲۲/۶)	۱۳ (۴۱/۹)	۸ (۲۵/۵)	۲ (۶/۵)
۱۳	۰	۹ (۲۹)	۱۱ (۳۵/۵)	۱۰ (۳۲/۳)	۱ (۳/۲)
۱۴	۰	۸ (۲۵/۸)	۱۴ (۴۵/۲)	۹ (۲۹)	۰
۱۵	۰	۴ (۱۲/۹)	۱۱ (۳۵/۵)	۱۲ (۳۸/۷)	۴ (۱۲/۹)
۱۶	۰	۴ (۱۲/۹)	۱۴ (۴۵/۲)	۱۳ (۴۱/۹)	۰
۱۷	۰	۳ (۹/۷)	۱۶ (۵۱/۶)	۸ (۲۵/۸)	۴ (۱۲/۹)
۱۸	۰	۲ (۶/۵)	۱۵ (۴۸/۴)	۱۴ (۴۵/۲)	۰

جدول ۱۱- شاخص‌های توصیفی هر یک از گویه‌های ایمنی

گویه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی
۱۰	۳/۲۹۰	۰/۷۸۲	۰/۲۳۸	-۰/۵۷۷	-۱/۱۰۲
۱۲	۳/۰۹۷	۰/۹۴۳	۰/۳۰۵	۰/۰۵۲	-۰/۱۹۰
۱۳	۳/۰۹۷	۰/۸۷۰	۰/۲۸۱	۰/۱۲۹	-۰/۹۹۴
۱۴	۳/۰۳۲	۰/۷۵۲	۰/۲۴۸	-۰/۰۵۴	-۱/۱۶۴
۱۵	۳/۵۱۶	۰/۸۹۰	۰/۲۵۳	-۰/۰۵۲	-۰/۵۹۶
۱۶	۳/۲۹۰	۰/۶۹۲	۰/۲۱۰	-۰/۴۶۰	-۰/۷۶۰
۱۷	۳/۴۱۹	۰/۸۴۷	۰/۲۴۸	۰/۴۴۵	-۰/۲۸۲
۱۸	۳/۳۸۷	۰/۶۱۵	۰/۱۸۲	-۰/۴۵۷	-۰/۵۶۳

جدول ۱۲- آزمون t یک نمونه‌ای برای هر یک از گویه‌های ایمنی

گویه	میانگین	انحراف معیار	آماره t	درجه آزادی	سطح معنی‌داری
۱۰	۳/۲۹۰	۰/۷۸۲	۲/۰۶۵	۳۰	۰/۰۴۸
۱۲	۳/۰۹۷	۰/۹۴۳	۰/۵۷۱	۳۰	۰/۵۷۲
۱۳	۳/۰۹۷	۰/۸۷۰	۰/۶۱۹	۳۰	۰/۵۴۰
۱۴	۳/۰۳۲	۰/۷۵۲	۰/۲۳۹	۳۰	۰/۸۱۳
۱۵	۳/۵۱۶	۰/۸۹۰	۳/۲۳۰	۳۰	۰/۰۰۳
۱۶	۳/۲۹۰	۰/۶۹۲	۲/۳۳۴	۳۰	۰/۰۲۶
۱۷	۳/۴۱۹	۰/۸۴۷	۲/۷۵۵	۳۰	۰/۰۱۰
۱۸	۳/۳۸۷	۰/۶۱۵	۳/۵۰۳	۳۰	۰/۰۰۱

این یافته‌ها نشان می‌دهد که متغیرهای جمعیت‌شناختی می‌توانند تا حدی بر ادراک افراد از تهدیدات و سطح ایمنی تأثیرگذار باشند، اگرچه این تأثیر در همه مؤلفه‌ها یکسان نبوده است.

بحث و بررسی

با توجه به نتایج فوق که برای سه گویه «مطلوبیت مخازن و محل‌های نگهداری آب»، «مطلوبیت چاه‌های برداشت آب» و «مطلوبیت خطوط انتقال آب تصفیه شده پس از تصفیه‌خانه» نمره قابل قبولی را کسب کرده و برای «مطلوبیت تأسیسات آب‌رسانی و توزیع» مطلوبیت ایمنی تأیید نشده، می‌توان گفت با توجه به مطالعات دیگر پژوهشگران همچون توکلی امینیان و امینیان، پوشش و اختفا و همچنین پایش جزو پارامترهای با اهمیت زیاد بوده که در تأسیسات آب‌رسانی شهرهای کشور به آن توجه ویژه‌ای نشده است (توکلی امینیان و امینیان، ۱۳۹۳). برای

مثال سیستم آب‌رسانی شهر از لوله‌های اصلی و چاه‌های برداشت گرفته تا زمانی که به دست مصرف‌کننده می‌رسد، می‌بایست به نحوی باشد که خارج از دسترس قرار گیرد و به صورت مستمر نظارت شود که این پایش توسط دوربین‌های مداربسته و همچنین حسگرهای حساس به آلودگی تأمین می‌شود.

می‌توان گفت یکی از موارد مهم در طراحی پدافند غیرعامل برای یک سازه یا تأسیسات حیاتی، دسترسی افراد مخرب، دشمن، عادی و غیره می‌باشد. چراکه اگر این دسترسی برای هر شخصی باز باشد، امکان آسیب رساندن عمدی یا غیر عمدی به تأسیسات فراهم می‌شود. با توجه به پاسخ‌های کارشناسان در خصوص این دسترسی، می‌توان گفت نمره قبولی برای تأسیسات آب‌رسانی شهر کسب شده است، اما کافی نبوده و نیاز به بررسی و برطرف‌سازی نقاط ضعف دارد. مواردی همچون اختفای مخازن آب و چاه‌های برداشت، از جمله موارد مهمی هستند که به آن توجه کافی نشده است. همچنین دسترسی افراد غیر به مخازن آب، چاه‌های برداشت، لوله‌های اصلی و سیستم توزیع و ... صرفاً توسط یک دیوار مهار شده که مشخصاً کافی نمی‌باشد و نیازمند سیستم‌های پایش و دوربین، نگهبان و گشت‌های دوره‌ای و ... می‌باشد. این نتایج در مقایسه با مطالعات توکلی امینیان و امینیان همخوانی دارد، چرا که در پژوهش وی نیز بیان شد که دوربین‌های مداربسته، روشنایی کافی، ایمن‌سازی مخازن، اعلان و اطفا حریق و ... جزو مواردی می‌باشد که در تأسیسات آب‌رسانی می‌بایست مورد توجه ویژه قرار گیرد (توکلی امینیان و امینیان، ۱۳۹۳).

با توجه به پاسخ‌های ارائه شده به پرسش‌نامه و نتایج حاصل از آن می‌توان نتیجه‌گرفت که پارامترهایی مانند «همخوانی تأسیسات آبرسانی در شهر با استانداردهای جهانی از جهت استفاده از سیستم‌های هوشمند کنترل بحران»، «چینش کاربری‌های شهری» و «ایمنی و امنیت بافت شهری پیرامون تأسیسات آبی» دارای نمره قابل قبولی نیست. علت این امر را می‌توان در نظر کارشناسان جست و جو کرد. چرا که سیستم توزیع آب سطح شاخه‌ای می‌باشد. این سیستم از نظر توجیه اقتصادی مقرون به صرفه است، اما از نظر مسائل پدافند غیر عامل، یک سیستم آسیب‌پذیر می‌باشد و می‌بایست سیستم‌های مناسب‌تر همچون سیستم حلقه‌ای جایگزین شود. هرچند که سیستم حلقه‌ای از منظر اقتصادی نامناسب است، ولی با توجه به مرکزیت استانی شهر و اهمیت پدافندی آن، توجیه‌پذیری اقتصادی آن تأمین می‌شود. همچنین تأسیسات مهم و حیاتی زیرساختی می‌بایست به نقاط امن‌تر و چینش پخش‌تر جاگذاری شوند. برای مثال تصفیه‌خانه آب از منظر مکان‌شناسی، نقطه‌ای آسیب‌پذیر می‌باشد. می‌توان در حاشیه این مراکز، فضای سبز و پارک‌هایی ایجاد کرد تا موقعیت پدافند غیرعامل آن تأمین گردد. پوشش و اختفا دو رکن اصلی پدافند غیر عامل است که می‌بایست در ساخت تأسیسات به آن توجه ویژه نمود. نتایج آماری فوق با نتایج ارائه شده توسط اسماعیلی شاهرخت و تقوایی همخوانی مناسبی دارد، چرا که آن‌ها نیز تصریح نمودند چینش تأسیسات حیاتی زیرساختی نامناسب است (اسماعیلی شاهرخت و تقوایی، ۱۳۹۰). این نتایج در مقایسه با نتایج صمدزاده و همکاران تأیید می‌شود. چرا که آن‌ها در پژوهش خود بیان کردند که عواملی مانند اختفا، پراکندگی، پوشش و فریب و ... دارای «اهمیت خیلی زیاد» هستند، اما توجیه اقتصادی دارای «اهمیت کم» می‌باشد. به همین دلیل هزینه‌های زیاد که به علت ساخت تأسیسات زیربنایی و اختفا و ایمن‌سازی آن ایجاد می‌شود، کاملاً توجیه‌پذیر بوده و ضروری می‌باشد (صمدزاده و همکاران، ۱۴۰۰).

یافته‌های میدانی پژوهش حاضر، از جمله مشاهده ضعف در حصارکشی تأسیسات و نقص در سامانه‌های پایش نظارتی، هم‌راستا با نتایج پرسشنامه است. بسیاری از گویه‌های مرتبط با مؤلفه‌های «دسترسی غیرمجاز» و «ایمنی» وضعیت معمولی تا نامطلوب را نشان دادند که بیانگر ادراک کارشناسان از نقاط ضعف واقعی تأسیسات است. این نتایج با مطالعه انجام‌شده در شهر هشتگرد نیز مطابقت دارد که سطح احترام به اصول پدافند غیرعامل در مؤلفه‌هایی نظیر پراکندگی تجهیزات و استتار حفاظتی را در وضعیت ضعیف ارزیابی کرده بود (معصوم‌بیگی و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین، پژوهشی در ارزیابی پدافند غیرعامل تأسیسات آب در اربد اردن به ضرورت اجرای سیستم‌های کنترل دسترسی فیزیکی، حصارکشی مقاوم، حسگرهای حساس امنیتی و روشنایی محیطی تأکید دارد (Hindiyeh و همکاران، ۲۰۲۱). این مجموعه شواهد نشان می‌دهد که بدون بهبود فیزیکی تجهیزات حفاظتی، آموزش و ارتقای مداوم پایش، امکان توسعه تاب‌آوری و امنیت کامل فراهم نمی‌شود.

یافته‌های مشابه در مطالعات بین‌المللی نیز نشان داده‌اند که فقدان سیستم نظارت محیطی قوی (مانند دوربین، چراغ‌ها و حسگرهای بر خط) باعث کاهش قابلیت آشکارسازی نفوذها و افزایش احتمال حملات فیزیکی و سایبری می‌شود. برای نمونه، مقاله‌ای از Albustami و Taha تأکید دارد که حملات سایبری هوشمند با هدف تغییر داده‌های حسگر در شبکه‌های توزیع آب می‌توانند مدت‌زمان طولانی بدون آشکارسازی ادامه یابند، و نشان‌دهنده ضرورت تقویت لایه‌های امنیتی فیزیکی و نظارتی است (Albustami و Taha، ۲۰۲۵).

همچنین پژوهشی از Homaei و همکاران (۲۰۲۵) معماری هشداردهی مبتنی بر IoT و بلاک‌چین همراه با تشخیص نفوذ به‌وسیله یادگیری ماشین را معرفی کرده است که ضمن پوشش سایبری، نیاز به حسگرهای محیطی (فشار، لرزش، دوربین) را برای تفسیر دقیق رویدادها تأکید می‌کند. این رویکرد دقیقاً نشان می‌دهد که تنها نگرش پرسشنامه‌ای

نمی‌تواند شکاف‌های واقعی در ایمنی فیزیکی را توضیح دهد، بلکه تقویت هم‌زمان تجهیزات فیزیکی و تحلیل دادهٔ به‌روز، ضروری است (Homaei و همکاران، ۲۰۲۵). بررسی نتایج این پژوهش‌ها با یافته‌ها تأیید می‌کند که ادراک پاسخ‌دهندگان درباره ضعف در مؤلفه‌های دسترسی غیرمجاز و ایمنی، منعکس‌کننده واقعیت‌های ساختاری تأسیسات بوده و ضرورت اقدام فوری در تقویت حصارکشی، نصب حسگرهای محیطی و به‌روزرسانی سیستم‌های تشخیص نفوذ را نشان می‌دهد.

بررسی وضعیت نامطلوب برخی مؤلفه‌ها مانند ایمنی، دسترسی افراد غیرمجاز و ضعف پایش در یافته‌های این پژوهش را می‌توان با مجموعه‌ای از چالش‌های ساختاری و مدیریتی منطقه‌ای تحلیل کرد. از جمله مهم‌ترین دلایل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. چالش‌های مالی: بسیاری از شرکت‌های آب در مناطق کمتر برخوردار با محدودیت جدی در تأمین اعتبارات عمرانی و جاری مواجه‌اند. کمبود منابع مالی مانعی جدی برای نوسازی تجهیزات حفاظتی، ارتقاء سامانه‌های پایش و آموزش نیروهای انسانی است. این موضوع در مقایسه با شهرهای برخوردارتر، شکاف زیرساختی بیشتری را به‌وجود آورده است. این چالش‌ها اغلب ریشه در فساد و برنامه‌ریزی ضعیف سیاست‌های آب دارند که بر استان‌های محروم تأثیر بیشتری می‌گذارد.

۲. محدودیت‌های فنی و تکنولوژیکی: در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در استان‌های مرزی، دسترسی به فناوری‌های نوین مانند سیستم‌های هوشمند تشخیص نفوذ، حسگرهای محیطی و شبکه‌های SCADA محدود است. این مسئله علاوه بر وابستگی به تجهیزات وارداتی، به کمبود نیروی فنی متخصص نیز مربوط می‌شود. همچنین، عوامل اقلیمی مانند خشکسالی و توزیع نابرابر آب، آسیب‌پذیری فنی را تشدید می‌کنند.

۳. ساختار مدیریتی پراکنده و گاه ناکارآمد: نبود هماهنگی کافی بین نهادهای متولی آب، مدیریت بحران، و پدافند غیرعامل در سطح استان سبب شده است که تصمیم‌گیری‌ها درباره ارتقاء امنیت زیرساخت‌ها با تأخیر، عدم انسجام یا اولویت کم، همراه باشد. این مسئله با سیاست‌های ضعیف مدیریت آب در ایران همخوانی دارد که منجر به بهره‌برداری بیش از حد منابع و تهدید امنیت غذایی و آبی می‌شود.

۴. اولویت‌بندی‌های منطقه‌ای: تمرکز طرح‌های امنیتی و مقاوم‌سازی اغلب در کلان‌شهرها و مراکز صنعتی بوده و مناطق دیگر، به‌دلیل جمعیت کمتر و حاشیه‌بودن از نظر جغرافیایی، در اولویت طرح‌های ملی قرار نگرفته‌اند. این مسئله در تخصیص منابع ملی نیز منعکس شده و بر توسعه زیرساخت‌های حیاتی از جمله تأسیسات آب تأثیر گذاشته است. علاوه بر این، نابرابری در حقوق آب و بهره‌برداری کنترل‌نشده از آب‌های زیرزمینی در مناطق مرزی، ایمنی محیطی را کاهش داده و زمینه را برای تهدیدات خارجی (مانند مسائل امنیتی با همسایگان) فراهم می‌کند.

بنابراین، وضعیت نامطلوب برخی شاخص‌های امنیتی در این پژوهش نه‌تنها ناشی از ضعف اجرایی در سطح محلی، بلکه حاصل برهم‌کنش پیچیده‌ای از عوامل مالی، فنی و سیاست‌گذاری کلان است. این یافته می‌تواند برای برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران محلی و ملی در جهت تدوین سیاست‌های اصلاحی مؤثر باشد.

مطالعات متعددی در ایران به بررسی آسیب‌پذیری و امنیت تأسیسات آب شرب با رویکرد پدافند غیرعامل پرداخته‌اند. برای مثال در مطالعه یاسوج، با استفاده از GIS و روش‌های AHPو دلفی، کل زنجیره تأمین تا توزیع آب «شدیداً آسیب‌پذیر» تشخیص داده شد (ریاحی‌پور و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین در مطالعه‌ای در شهر هشتگرد، پایبندی به اصول پدافند غیرعامل به‌طور کلی «در سطح متوسط» ارزیابی شد. در این مطالعه بیشترین امتیاز مربوط به اصول مکانیابی مناسب، حفاظت در برابر آتش و سیستم اعلام خبر زودهنگام و کمترین امتیاز مربوط به پراکندگی و استتار گزارش شد (معصوم‌بیگی و همکاران، ۱۴۰۰).

نقاط قوت این مطالعات شامل استفاده از روش‌های محاسباتی مانند GIS و AHP برای پهنه‌بندی آسیب‌پذیری و تمرکز بر مکان‌یابی و اطلاع‌رسانی است. از سوی دیگر، ضعف‌های شناسایی‌شده نیز اغلب شامل آسیب‌پذیری زیاد در برابر حملات تروریستی یا حوادث طبیعی، نبود سازوکار پراکندگی تجهیزات و ضعف در پوشش نظارتی و سیستم‌های اعلام خطر و آموزش نیروی انسانی می‌باشد.

در سطح بین‌المللی، Maiolo و همکاران یک «شاخص آسیب‌پذیری زیرساخت» برای شبکه توزیع آب طراحی کرده‌اند که بر پایه معیارهای وزن‌دار مانند حساسیت فیزیکی شبکه، تمرکز منابع و قابلیت آلودگی عمدی عمل می‌کند. این شاخص می‌تواند اولویت‌بندی امنیتی را برای تصمیم‌گیرندگان تسهیل کند (Maiolo و همکاران، ۲۰۱۸).

از سوی دیگر، در شرایط بحرانی و جنگی مانند یمن، اوکراین و سوریه، گزارش‌ها نشان می‌دهد که حملات هدفمند به تأسیسات آبی افزایش یافته و از سال ۲۰۲۰ تاکنون بیش از ۴۰ درصد حملات به زیرساخت‌های آب جهان ثبت شده است (Burns، ۲۰۲۴).

در مطالعات داخلی، اقدامات حفاظتی شامل جانمایی تأسیسات در مناطق مرتفع و دور از مراکز شلوغ، استقرار دوربین مداربسته و حصارهای فیزیکی، ساخت مخازن مسقف و مقاوم، و افزایش بازدیدهای میدانی و آموزش‌های امنیتی بوده است (معصوم‌بیگی و همکاران، ۱۴۰۲). همچنین در مطالعات بین‌المللی، رویکردهای مشابهی مانند استتار تجهیزات، پشتیبانی چندمنظوره، و تدوین پروتکل‌های سایبری برای حفاظت از سیستم‌های کنترل از راه دور (SCADA) مورد تأکید قرار گرفته‌اند.

مقایسه نتایج این مطالعات با یافته‌های پژوهش حاضر در شهر موردنظر نشان می‌دهد که اشتراکات قابل توجهی میان تهدیدات شناسایی‌شده، راهکارهای پیشنهادی و نقاط آسیب‌پذیر وجود دارد. در همه مطالعات، خرابکاری فیزیکی، حملات عمدی و بلایای طبیعی به‌عنوان تهدیدات اصلی زیرساخت‌های آبی شناخته شده‌اند. از نظر تاب‌آوری زیرساخت، چه در منابع داخلی و چه خارجی، بر پراکندگی منابع تأمین، تعدد مسیرهای توزیع و برنامه‌ریزی جامع مبتنی بر تمامی مخاطرات تأکید شده است. همچنین، مؤلفه‌های پایش، اعلام خطر، آموزش نیروهای عملیاتی و کنترل دسترسی غیرمجاز، به‌عنوان حوزه‌های حیاتی و مشترک امنیتی در کلیه مطالعات مطرح بوده‌اند. بنابراین، می‌توان گفت یافته‌های پژوهش حاضر در شهر موردنظر، همسو با مطالعات ملی و بین‌المللی است و از نظر شناخت تهدیدات، راهکارهای ایمن‌سازی، و لزوم افزایش آموزش و پایش، در یک چهارچوب مشترک قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش با هدف ارزیابی امنیت تأسیسات آب شرب در شهری با جمعیت متوسط بر پایه اصول پدافند غیرعامل انجام شد. یافته‌ها حاصل از بررسی میدانی، تحلیل پرسشنامه‌های تخصصی و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نشان داد که زیرساخت‌های آبی در برابر تهدیداتی مانند خرابکاری، بیوتروریسم و دسترسی غیرمجاز، آسیب‌پذیری قابل توجهی دارند.

با توجه به نقش حیاتی منابع آبی در پایداری شهری، نتایج پژوهش ضرورت بازنگری در ساختار امنیتی این تأسیسات را نشان می‌دهد. شاخص‌هایی همچون کنترل دسترسی، پایش، ایمنی محیطی و تاب‌آوری در وضعیت نامطلوبی قرار داشته و از استانداردهای پدافند غیرعامل فاصله دارند. تحلیل این وضعیت نشان می‌دهد که دلایل احتمالی این شرایط، ناشی از چند عامل عمده است:

- محدودیت‌های مالی، که مانع اجرای کامل طرح‌های پدافند غیرعامل مانند به‌روزرسانی حصارکشی، خرید دوربین‌های مداربسته، یا سامانه‌های هشداردهنده می‌شود.
- کمبود تجهیزات و دانش فنی، که امکان استفاده از سیستم‌های پایش هوشمند یا سیستم‌های یکپارچه امنیتی را کاهش داده است.
- نبود هماهنگی نهادی و ضعف در اولویت‌بندی منطقه‌ای، که باعث شده است مناطق کم‌برخوردار از طرح‌های ملی مقاوم‌سازی کمتر بهره‌مند شوند.

این نتایج نشان می‌دهد که تنها، اقدامات محدود عمرانی یا امنیتی کافی نیست، بلکه باید راهبردی چندبعدی در نظر گرفته شود که شامل: بازنگری در اولویت‌های تخصیص بودجه در استان‌های شرقی کشور، آموزش تخصصی برای نیروهای بهره‌بردار و نگهدار تأسیسات، تدوین نقشه راه جامع پدافند غیرعامل بر اساس الگوهای موفق داخلی و بین‌المللی، و همچنین، ایجاد سامانه‌های هشدار زودهنگام، نظارت بلادرنگ، و ارزیابی ریسک مستمر می‌باشد.

پیشنهاد می‌شود مسئولان محلی و ملی با بهره‌گیری از این تحلیل‌ها، برنامه‌هایی برای تقویت تاب‌آوری تأسیسات آب شهری در برابر تهدیدات مختلف (از جمله خرابکاری انسانی و حوادث طبیعی) طراحی و اجرا نمایند. بر این اساس، پیشنهادهای اجرایی زیر ارائه می‌شود: تقویت سامانه‌های نظارتی و هشداردهنده مانند دوربین‌های مداربسته و حسگرهای هوشمند، ارتقای اقدامات حفاظتی فیزیکی شامل حصارکشی، روشنایی مناسب و کنترل تردد، ایجاد پوشش سبز حفاظتی و استتار تأسیسات، بازنگری در جانمایی برخی تأسیسات و رعایت اصول پراکندگی زیرساخت‌ها، آموزش تخصصی نیروهای عملیاتی و تدوین سناریوهای بحران و راه‌اندازی سامانه GIS و بانک اطلاعات آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها.

در نهایت، تبدیل اصول پدافند غیرعامل از توصیه‌ای به الزام حقوقی، می‌تواند نقشی مؤثر در افزایش تاب‌آوری و امنیت پایدار تأسیسات آب‌رسانی ایفا کند. همچنین لازم به ذکر است که این مطالعه به دلیل محدودیت‌های اداری و امنیتی، صرفاً بر پایه بررسی میدانی ایستگاه صورت گرفته است و تعمیم نتایج آن به کل سیستم آبرسانی شهر باید با احتیاط انجام شود. پژوهش‌های آتی می‌توانند با دسترسی به سایر ایستگاه‌ها و تأسیسات، تحلیل جامع‌تری ارائه دهند. از جمله دیگر محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به حجم نسبتاً کوچک نمونه (۳۱ نفر) اشاره کرد که گرچه تمام جامعه آماری موجود را دربرمی‌گیرد، اما برای تحلیل‌های پیچیده‌ای نظیر تحلیل عاملی تأییدی ممکن است کافی نباشد. لذا نتایج حاصل از مدل‌سازی ساختاری باید با احتیاط تفسیر شوند و در مطالعات آینده با حجم نمونه بیشتر می‌توان پایایی و برازش مدل را با دقت زیادتری مورد ارزیابی قرار داد.

منابع

اسماعیلی شاهرخت، مسلم، و تقوایی، علی اکبر. (۱۳۹۰). ارزیابی آسیب‌پذیری شهر با رویکرد پدافند غیر عامل با استفاده از روش دلفی؛ نمونه موردی: شهر بیرجند. نشریه مدیریت شهری و روستایی، ۹(۲۸)، ۹۳-۱۱۰. https://www.magiran.com/p1053721

اسکندری، حمید. (۱۳۹۰). مباحث پدافند غیرعامل، جلد ۱: آشنایی مقدماتی با پدافند غیرعامل (ویژه مدیران، کارشناسان و دانشجویان). انتشارات بوستان حمید، چاپ دوم، تهران، ایران.

پیری، حلیمه، و بامری، حیدر. (۱۳۹۰). پدافند غیرعامل در منابع و تأسیسات آبی سیستان. پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب وخاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

توکلی امینیان، ثمانه، و امینیان، امیراحمد. (۱۳۹۳). توانمندسازی پدافند غیرعامل در افزایش امنیت آبرسانی به ساکنین منطقه ۹ شهر مشهد. ششمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت جامع بحران، مشهد، ایران.

حسین‌زاده، عیسی. (۱۳۹۲). اثر انفجار بر سد خاکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

حسینی‌امینی، حسن، و موغلی، مرضیه. (۱۳۹۵). پدافند غیر عامل، امنیت ملی و شهر. نشر انتخاب، چاپ اول، تهران، ایران.

حسینی‌نژاد، مرضیه، و صمدی، سعید. (۱۳۹۲). کاربرد حسگرهای زیستی در شناسایی آلاینده‌های محیط‌زیستی ناشی از صنایع کشاورزی. فصلنامه انسان و محیط زیست، ۳(۱)، ۲۳-۳۰. http://he.srbiau.ac.ir/article_3278.html

حیدری، علی، و غفاری، فاطمه. (۱۳۹۴). بررسی سامانه‌های انتقال آب باران با رویکرد پدافند غیرعامل، مطالعه موردی: دانشگاه شهرکرد. نشریه منابع آب و توسعه، ۷(۱)، ۱۱۹-۱۴۴. https://civilica.com/doc/255370

رنجبر، علی. (۱۳۸۳). ارزیابی استعداد بالقوه آب زیرزمینی دشت شیراز با استفاده از مدل *DRASTIC* در محیط *GIS*سیستان و بلوچستان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

رمضانی، مجید، و موثقی صداقت، مسعود. (۱۳۹۱). شناسایی تهدیدات شیمیایی و بیولوژیک در منابع و تأسیسات آبی و بررسی آسیب‌پذیری و ارائه راهکارهای مقابله با آن از منظر مهندسی پدافند غیر عامل. همایش ملی انتقال آب بین حوضه‌ای (چالش‌ها و فرصت‌ها)، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران.

ریاحی‌پور، مجید، کلانتری، محسن، و پرهیز، پریا. (۱۴۰۰). بررسی سیستم تأسیسات آب شرب از دیدگاه پدافند غیرعامل در شهر یاسوج، مجله آمایش جغرافیایی فضا، ۱۱(۳۹)، ۱۸۳-۱۹۸، doi: 10.30488/gps.2020.209510.3139.

زرقانی، سیدهادی، خوارزمی، امیدعلی، و بخشی شادمهری، فاطمه. (۱۳۹۵). جایگاه پدافند غیرعامل در امنیت زیرساختهای شهری با تأکید بر زیرساخت آب. کنفرانس ملی پدافند غیر عامل و توسعه پایدار، وزارت کشور، تهران، ایران.

شریفی، علی‌حسن، سدیدخوی، احمد، و رضایی، فریدون. (۱۳۹۱). بررسی اثرات انفجار بر پرده آب‌بند سد مخزنی سرابی تویسرکان. فصلنامه علمی علوم زمین، ۸۵ (۲۲)، ۱۸۷-۱۹۸. doi: 10.22071/gsj.2012.54041.

شهریاری، مهرداد، و حدادی، حبیب‌اله. (۱۳۹۴). اثرات استقرار سامانه‌های پدافند غیرعامل در تأسیسات آب و فاضلاب با رویکرد اثربخشی در مواقع بحران پایلوت شهر بروجرد. کنفرانس بین‌المللی علوم، مهندسی و فناوری‌های محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

صراف‌پور، رضا، و فرجزاده، داوود. (۱۳۸۸). مروری بر جنگ‌افزارهای بیولوژیک به عنوان تهدیدی برای منابع آب شرب. مجله علمی پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی ارتش جمهوری اسلامی ایران، ۷(۴)، ۲۹۹-۳۰۷. https://sid.ir/paper/468672/fa

صمدزاده، سعید، کرمی‌نژاد، حمیدرضا، و فرخی‌زاده، سعید. (۱۴۰۰). ارزیابی و شناسایی وضعیت پدافند غیر عامل در ساختمان‌های اداری؛ مطالعه موردی ساختمان مجلس شورای اسلامی ایران، دومین همایش سراسری سازه‌های مقاوم در برابر ضربه و انفجار، دانشگاه جامع امام حسین، بناب، ایران.

کاظمی، محمدجواد، و گلستانه، محمد. (۱۳۹۳). مطالعه پدافند غیرعامل در مخازن ذخیره آب و خط انتقال آن. فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل، ۴(۵)، ۴۱-۵۰. https://www.magiran.com/p1372761

معصوم‌بیگی، حسین، سادات رسول، مهدی، و غنی‌زاده، قادر. (۱۴۰۰). ارزیابی امنیت تأسیسات آب شرب شهر هشتگرد با رویکرد پدافند غیرعامل. نشریه طب انتظامی، ۱۰(۳)، ۱۶۷-۱۷۶. doi: 10.30505/10.3.167.

میمندی پاریزی، صدیقه، و کاظمی‌نیا، عبدالرضا. (۱۳۹۴). پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شهر کرمان بر اساس اصول پدافند غیرعامل. مجله علمی آمایش سرزمین، ۷(۱)، ۱۱۹-۱۴۴. doi: 10.22059/jtcp.2015.54784.

نصری، زهره، عابدی‌کوپایی، جهانگیر و طالبی‌جهرمی، خلیل. (۱۳۸۷). بررسی امکان آلودگی آب رودخانه زاینده‌رود و برخی ازچاه‌های فلمن به دیازینون. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

نیک‌پیمان، یاسر، قلی‌زاده خاصوانی، شراره، حاجی‌زاده، میثم، و سعیدی رشک علیا، علی. (۱۳۹۹). اثر جنگ تحمیلی ایران و عراق بر مدیریت و حکمرانی منابع آب در استان کرمانشاه. پژوهشهای دانش زمین، ۱۱(۴)، ۳۷-۴۶. doi: 10.52547/esrj.11.4.37.

Albustami, A. A., and Taha, A. F. (2025). Breaking the flow and the bank: Stealthy cyberattacks on water network hydraulics. *Water Research*, 283(1), 123719. doi:10.1016/j.watres.2025.123719.

Ancheta, M. A., Shrestha, S., Koottatep, T., & Shanmugam, M. (2025). *Resilience assessment of urban water supply and sanitation systems: A critical review*. *AQUA – Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 74(5), 388. doi: 10.2166/aqua.2025.266.

Annunziato, A., Andredakis, I., and Probst, P. (2016). Impact of flood by a possible failure of the Mosul dam. Publications Office of the European Union, Luxembourg. doi:10.2788/689469.

Asghari, F., Piadeh, F., Egyir, D., Yousefi, H., Rizzuto, J. P., Campos, L. C., & Behzadian, K. (2023).

AI and Blockchain-Enhanced Digital Twins. arXiv preprint arXiv:2504.20275.

Maiolo, M., Pantusa, D., Carini, M., Capano, G., Chiaravalloti, F., and Procopio, A. (2018). A New Vulnerability Measure for Water Distribution Network. Water, 10(8), 1005. doi:10.3390/w10081005.

Patriarca, R., Simone, F., and Di Gravio, G. (2022). *Modelling cyber resilience in a water treatment and distribution system. Reliability Engineering & System Safety*, 226(1), 108653. https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108653.

Raza, N., and Moazeni, F. (2024). *Chance-constrained vulnerability assessment of smart water distribution systems against stealthy false data injection attacks*. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 44(1), 100645. doi:10.1016/j.ijcip.2023.100645.

Rezaie Narimisa, M., Ahmad Basri, N. E., Elahi, M., Hasannezhad, M., & Alipanahi, E. (2019). Passive defense: Measuring and evaluating urban vulnerability with resilience approach. Religación. Revista De Ciencias Sociales Y Humanidades, 4(13), 153-162. https://revista.religacion.com/index.php/religacion/article/view/202

Tchórzewska-Cieślak, B., Rak, J., Pietrucha-Urbanik, K., Piegdoń, I., Boryczko, K., Szpak, D., & Żywiec, J. (2023). *Water supply safety assessment considering the water supply system resilience*. *Desalination and Water Treatment*, 288(1), 26–36. doi:10.5004/dwt.2023.29201.

Resilience assessment in urban water infrastructure: A critical review of approaches, strategies and applications. Sustainability, 15(14), 11151. doi:10.3390/su151411151.

Babiker I.S., Mohamed, M. A., Hiyama T., and Kato K. (2005). A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*, 345(1-3), 127-140. doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.11.005.

Burns, C. (2024). Protecting Water Infrastructure During War. https://www.usip.org/publications/2024/12/, 7/23/2025.

Chen, S., Zhao, X., Chen, Z., Hou, B., and Wu, Y. (2022). *A game-theoretic method to optimize allocation of defensive resource to protect urban water treatment plants against physical attacks*. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 36(1), 100494. doi:10.1016/j.ijcip.2021.100494.

Ghazizadeh, A. R., Jalili Ghazizadeh, M. R., and Ghaneh, A. A. (2008). Evaluation of water supply system components from the perspective of passive defense. *The Second National Conference on Water and Wastewater with an operation approach*, Power and Water University of Technology, Tehran, Iran.

Gleick, P. H. (2006). Water and terrorism. *Water policy*, 8(6), 481-503, doi: 10.2166/wp.2006.035.

Hindiyeh, M., Albatayneh, A., Tarawneh, R., Suleiman, S., Juaidi, A., Abdallah, R., Jellali, S., & Jeguirim, M. (2021). Preparedness Plan for the Water Supply Infrastructure during Water Terrorism, A Case Study from Irbid, Jordan. *Water*, 13(20), 2887. doi:10.3390/w13202887.

Homaei, M., Morales, V. G., Gutierrez, O. M., Gomez, R. M., and Caro, A. (2025). Smart Water Security with

Journal of Water and Sustainable Development. December 2025
Volume 12. Issue 3 (Serial No. 37). pages 139 to 155

نشریه اب و توسعه پایدار. آذر ماه ۱۴۰۴
سال دوازدهم. شماره سوم (پیاپی ۳۷). صفحات ۱۳۹ تا ۱۵۵

Document Type: Applied Article

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

Designing a Comprehensive Sensory Environmental Education (SEE) Curriculum with a Focus on Water (Specialized for Lower Secondary Education)

A.A. Boroumand[1], M. J. Amiri[2*]

1. Ph.D. student in Environmental Planning, Department of Environmental Planning, Management, and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Associate Professor, Department of Disasters Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

*** Corresponding Author Email:** mjamiri@ut.ac.ir

Received 04-06-2025
Revised 16-07-2025
Accepted 25-07-2025
Available online 16-12-2025

Abstract

The aim of this study is to develop a comprehensive and innovative environmental education curriculum focused on water issues, grounded in the *augmented-senses* approach and emphasizing the capacities of Iranian Indigenous Knowledge in water resource management and conservation. Designed for lower secondary education levels, the curriculum seeks to enhance students' environmental literacy through sensory-biological experiences, contextual understanding, and active social engagement with national water-related challenges. The study employs a combination of exploratory content analysis, instructional design based on situated cognition theory, and experiential learning principles. The conceptual framework integrates transformative environmental education models, place-based learning, multisensory learning theories, and the epistemological foundations of Iranian Indigenous Knowledge related to water. Historical, ethnographic, and documentary sources on Iran's water culture were analyzed to identify key elements for multisensory, place-based learning situations. A backward design model was then used to align learning objectives, content standards, and assessment mechanisms with students' cognitive, emotional, and social developmental levels. The developed curriculum incorporates augmented-senses technologies and interactive tools to create immersive sensory learning experiences in both formal and informal settings (e.g., school gardens, water heritage sites, and workshops). It integrates regional water management models through curricular projects, local narratives, and research portfolios, ensuring adaptability to Iran's climatic, cultural, and pedagogical diversity. The curriculum bridges traditional knowledge with modern education, fostering interdisciplinary, ecologically adaptive, and transformative learning.

Keywords: Formal Environmental Education, Effective Education, Water Education, Eco-Based Curriculum, Multisensory Learning.

طراحی یک برنامه درسی جامع آموزش حواس افزوده محیط‌زیست با تمرکز بر «آب» (ویژه متوسطه اول)

امیرعلی برومند[۱]، محمدجواد امیری[۲*]

۱. دانشجوی دکتری برنامه‌ریزی محیط‌زیست، گروه برنامه‌ریزی، مدیریت محیط‌زیست و HSE، دانشکدهٔ تحصیلات تکمیلی محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. دانشیار گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیط‌زیست، دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

***رایانامه نویسنده مسئول:** mjamiri@ut.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۳/۱۴
تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۴/۲۵
تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۵/۰۳
تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

چکیده

هدف این پژوهش، تدوین یک برنامه درسی جامع و نوآورانه آموزش محیط‌زیست با تمرکز بر مقوله آب، مبتنی بر رویکرد «حواس افزوده» و با تأکید بر ظرفیت‌های دانش بومی ایرانیان در حوزه مدیریت و حفاظت منابع آب است. این برنامه برای پایه‌های سه‌گانهٔ دورهٔ اول متوسطه طراحی شده و در پی ارتقاء سواد محیط‌زیستی دانش‌آموزان با تکیه بر تجربهٔ حسی-زیستی، درک زمینه‌ای و مشارکت فعال اجتماعی در مسائل آبی کشور می‌باشد. در این راستا، از ترکیبی از روش‌های تحلیل محتوای اکتشافی، طراحی آموزشی مبتنی بر نظریه شناخت موقعیتی و اصول یادگیری تجربی، استفاده شده است. چارچوب مفهومی پژوهش بر مبنای پیوند میان الگوهای آموزش محیط‌زیست تحول‌گرا، یادگیری مبتنی بر مکان، نظریه‌های چندحسی‌سازی یادگیری و اصول معرفت‌شناسی بومی ایرانی در حوزهٔ آب شکل گرفته است. تحلیل منابع تاریخی، مردم‌نگارانه و اسنادی مرتبط با فرهنگ آبی ایران منجر به شناسایی گره‌گاه‌هایی شد که امکان تبدیل آن‌ها به موقعیت‌های یادگیری چندحسی، بوم‌مبنا و درگیرکننده را فراهم می‌سازد. در گام بعد، با بهره‌گیری از الگوی طراحی بازگشتی، اهداف یادگیری، استانداردهای محتوایی و سازوکارهای ارزیابی تکوینی و عملکردی، همسو با سطح رشد شناختی، عاطفی و اجتماعی دانش‌آموزان متوسطه اول، تنظیم شد. ویژگی متمایز این برنامه درسی، بهره‌گیری از فناوری‌های ساده حواس‌افزا و ابزارهای تعاملی برای غنی‌سازی تجربه یادگیری حسی در بسترهای آموزشی رسمی و غیررسمی است؛ به گونه‌ای که فرآیند یادگیری، از ساحت نظری به تجربه محیط‌زیستی و ادراک میان‌حسی در بسترهای واقعی چون باغ مدرسه، میراث آبی محلی یا کارگاه‌های میدانی تعمیم یابد. همچنین، با در نظر گرفتن اقتضائات اقلیمی، فرهنگی و تربیتی مناطق مختلف ایران، الگوهای بومی مدیریت منابع آب در قالب پروژه‌های درسی، داستان‌های محلی و کارپوشه‌های تحقیقاتی، در هسته یادگیری قرار گرفته‌اند. در نتیجه، این برنامه درسی، الگویی بین‌رشته‌ای، بوم‌سازگار و تحولی برای ارتقاء ظرفیت‌های محیط‌زیستی دانش‌آموزان فراهم می‌آورد و پیوندی نوآورانه میان دانش سنتی و دانش آموزشی معاصر با تأکید بر تجارب حسی و ادراکی برقرار می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: آموزش رسمی محیط‌زیست، آموزش اثربخش، آموزش آب، برنامه درسی بوم‌مبنا، یادگیری چندحسی.

How to cite this article:
Boroumand, A.A. & Amiri, M. J. (2025). Designing a Comprehensive Sensory Environmental Education (SEE) Curriculum with a Focus on Water (Specialized for Lower Secondary Education). Journal of Water and Sustainable Development, 12(3), 139-155. https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i3.2506-1429

مقدمه

آموزش محیط‌زیست[1] در پی خلق الگوهای یادگیری مبتنی بر ادراک چندحسی، بوم‌محور و برآمده از تجربه زیسته است (امیری و برومند، ۱۴۰۴الف)؛ به‌ویژه در زمینه چالش‌های محیط‌زیستی نظیر بحران آب، نیاز به طراحی برنامه‌های آموزشی و درسی نوآورانه‌ای است که ظرفیت‌های حسی-ادراکی دانش‌آموزان را فعال سازد. در این راستا، رویکرد حواس افزوده[2]، با تأکید بر پیوند یادگیری با بسترهای ملموس، محسوس و فرهنگی، امکان پیوند عمیق‌تری میان مفاهیم بوم‌شناختی و درک زیسته دانش‌آموزان را فراهم می‌آورد (برومند و امیری، ۱۴۰۳الف). چنین رویکردی در تقابل با برنامه‌های درسی انتزاعی، متنی و غیرمحلی است که اغلب با شکست در ارتقاء سواد محیط‌زیستی[3] و کنشگری محیط‌زیستی مواجه می‌شوند (برومند و امیری، ۱۴۰۳ب؛ برومند و کلاهی، ۱۴۰۰).

با در نظر گرفتن ابعاد بوم‌فرهنگی[4] در آموزش محیط‌زیست، بازخوانی دانش‌های بومی[5] ایرانیان، به‌ویژه نظام پیچیده و تاریخی قنات، می‌تواند به عنوان منبعی زنده، زمینه‌ای برای ایجاد پیوند میان حافظه فرهنگی و مدیریت پایدار منابع آبی باشد. قنات نه‌تنها یک فناوری سنتی برای استخراج و توزیع آب است، بلکه ساختاری اجتماعی-بوم‌شناختی[6] است که بر پایه دانش جمعی، بهره‌برداری مشارکتی و احترام به تعادل‌های طبیعی شکل گرفته است. در عین حال، غفلت از چنین سرمایه دانشی، شکافی عمیق در برنامه‌های آموزشی معاصر ایجاد کرده که مانع تحقق رویکردهای مکان‌مبنا[7] در آموزش محیط‌زیست شده است (امیری و برومند، ۱۴۰۴ج).

ادبیات تخصصی آموزش برای توسعه پایدار[8] بر اهمیت بازاندیشی در الگوهای یاددهی-یادگیری با تمرکز بر دانش‌های بوم‌شناختی محلی[9] تأکید دارد. پژوهشگران بین‌المللی از جمله *Russell* (۱۹۹۹)، *Bögeholz* (۲۰۰۶)، *Jeronen* و همکاران (۲۰۰۹)، *Hill* (۲۰۱۳)، *Frantz* و *Mayer* (۲۰۱۴) و *Mullenbach* و همکاران (۲۰۱۹) تأکید کرده‌اند که انتقال مفاهیم پایداری نه‌فقط باید از طریق ارائه اطلاعات به فراگیران، بلکه از مسیر یادگیری تحول‌گرا[10] صورت گیرد که شامل تجارب حسی، زمینه‌مند، مشارکتی و برانگیزاننده کنش است. در چنین افقی، طراحی برنامه‌های درسی که بر دانش محلی مانند قنات استوار باشد، بستری برای یادگیری مشارکتی[11] و خلق آگاهی محیط‌زیستی[12] ریشه‌دار فراهم می‌کند.

نظام‌های آموزش رسمی ایران به‌رغم تدوین سیاست‌هایی در راستای تلفیق آموزش محیط‌زیست با محتوای درسی، عمدتاً فاقد رویکردی منسجم و پیوسته در زمینه بهره‌گیری از دانش‌های بومی در قالب برنامه درسی‌اند. تحلیل محتوای کتب درسی سه‌گانه متوسطه اول نشان می‌دهد که جایگاه مفاهیم سنتی مدیریت آب از جمله قنات عمدتاً به نحوی کلیشه‌ای و غیرانتقادی مطرح شده است. این در حالی است که مطالعات جهانی در حوزهٔ برنامه درسی بومی‌گرا[13] نشان داده‌اند که استفاده از منابع دانشی محلی می‌تواند بستر مناسبی برای یادگیری عمیق فراگیران و ارتقاء مسئولیت‌پذیری محیط‌زیستی آن‌ها باشد (امیری و برومند، ۱۴۰۴ج).

از منظر آخرین رهیافت‌های اثربخش آموزش محیط‌زیست، به‌ویژه چارچوب برنامه درسی نوپدید[14] و برنامه درسی زمینه‌مند[15]، تجربه‌محوری[16]، زیست‌مکانی بودن[17] و اتکای بر روایت‌های محلی[18] از اصول بنیادین طراحی آموزشی در حوزه محیط‌زیست به شمار می‌روند (Otto و Pensini، ۲۰۱۷). در چنین الگوهایی، قنات نه فقط به‌مثابه یک موضوع محتوا، بلکه به‌عنوان ساختاری برای طراحی یادگیری درک می‌شود؛ به‌ویژه زمانی که با رویکرد حواس افزوده همراه شده و امکان لمس، شنیدن، مشاهده و بازآفرینی سازوکارهای سنتی آن برای دانش‌آموزان فراهم شود.

شکاف دانشی موجود میان برنامه‌های درسی رسمی و تجربه‌های بومی، نه‌تنها مانع بازتولید دانش‌های سنتی در ذهن دانش‌آموزان شده، بلکه نوعی از بیگانگی فرهنگی-بوم‌شناختی را در زیست‌جهان آموزشی آنان پدید آورده است (برومند و همکاران، ۱۴۰۳). فقدان بازنمایی دانش قنات در قالب‌های متنوع، چندحسی و میان‌رشته‌ای، مانع از آن شده که دانش‌آموزان ایرانی توان درک نظام‌های بومی حفاظت از آب و نیز پیوند میان محیط‌زیست و فرهنگ را تجربه کنند (امیری و برومند، ۱۴۰۴ج). از این رو، نیاز به بازاندیشی در اسلوب طراحی برنامه‌های درسی برای جبران این شکاف عمیقاً احساس می‌شود.

هدف پژوهش حاضر طراحی و تدوین یک برنامه درسی جامع آموزش محیط‌زیست با رویکرد حواس افزوده است که مفاهیم و دانش‌های مرتبط با قنات را به‌عنوان یک نظام اجتماعی-بومی مدیریت آب، در بستر آموزش متوسطه اول نهادینه سازد. این برنامه درسی، بر بنیاد اصول یادگیری زمینه‌مند[19]، مشارکتی[20]، تجربی و حسی استوار بوده و با استفاده از روش‌های آموزش فعال[21] می‌کوشد ظرفیت تفکر انتقادی، درک بین‌رشته‌ای و کنشگری محیط‌زیستی دانش‌آموزان را ارتقاء بخشد. محور اصلی این برنامه، خلق تجربه‌های آموزشی ملموس و زیست‌محور در ارتباط با قنات و فرهنگ مدیریت سنتی آب است. در طراحی این برنامه درسی، از چارچوب‌های تلفیقی آموزش محیط‌زیست همچون الگوی چهار بُعدی دانش، ارزش، مهارت و کنش و رویکرد یادگیری بوم‌شناختی[22] بهره گرفته شده است. این چارچوب‌ها به صورت هم‌افزا امکان انتقال مفاهیم نظری، پرورش شایستگی‌های عملی[23] و ایجاد نگرش‌های پایدار را فراهم می‌کنند. با به‌کارگیری فناوری‌های ساده حواس‌گرا، امکان تعامل حسی با عناصر قنات (نظیر آب‌راهه‌ها، صدای جریان آب، بوی خاک مرطوب و...) نیز در قالب تجربه‌های آموزشی

فراهم شده است. در نهایت، پژوهش حاضر تلاش دارد تا با بازبینی جایگاه قنات در آموزش محیط‌زیست، زمینه احیای این دانش بومی را در قالب یک برنامه درسی منسجم[۲۴]، مکان‌مند[۲۵] و تحول‌گرا[۲۶] فراهم آورد. این برنامه نه‌تنها شکاف موجود میان زیست‌جهان آموزشی و زیست‌بوم فرهنگی را پر می‌کند، بلکه با ارتقاء حس تعلق مکان[۲۷]، می‌تواند افق‌های تازه‌ای در آموزش برای توسعه پایدار در ایران بگشاید.

پیشینهٔ پژوهش

قبض و بسط مفهومی آموزش حواس‌افزوده محیط‌زیست

Palmer (۲۰۰۲)، اندیشمند صاحب‌نام در زمینه آموزش محیط‌زیست، در فصل سوم اثر ماندگار خود، «آموزش محیط‌زیست در قرن بیست و یکم»، به شکاف بین آرمان‌های نظری و واقعیت‌های موجود در عرصه آموزش محیط‌زیست اشاره می‌کند و معتقد است باید در سپهر معرفتی آموزش محیط‌زیست، تحولی پارادایمی از گفتمان‌های انتقالیِ دانایی به‌سوی رویکردهای زایش‌گرایانه، سیستمی و پدیدارشناسانه صورت پذیرد و در این تحول، شناخت محیط‌زیست نه به‌مثابه پدیده‌ای بیرونی و ابژه‌محور[۲۸]، بلکه به‌منزله تجربه‌ای زیست‌بدنی، عاطفی و بینافردی[۲۹] تلقی شود.

مفاهیمی چون ادراک بوم‌شناختی و یادگیری موقعیتی همواره در هسته مفهومی آموزش محیط‌زیستی تحول‌گرا مطرح شده‌اند. این چرخش از مدل‌های رفتارگرایانه و شناخت‌محور کلاسیک به‌سوی رهیافت‌های تلفیقی، ضرورت بازیابی جایگاه بدن، حافظه و مکان را در تجربه زیسته محیطی برجسته می‌سازد. بدین‌ترتیب، یادگیری محیط‌زیستی به یک فرایند جسمانی، مکان‌مبنا و تنیده در بافت فرهنگی تبدیل می‌شود که فهم آن نیازمند عبور از پارادایم‌های خطی و مدرنیستی است (امیری و برومند، ۱۴۰۴الف؛ برومند و امیری، ۱۴۰۴ب؛ Ives و همکاران، ۲۰۱۸). بر مبنای این تحول معرفتی، برخی منابع پایه (امیری و برومند، ۱۴۰۴ج) خوانش‌های سنتی از آموزش محیط‌زیست را ناتوان از درک و مدیریت پیچیدگی چندسطحی پدیده‌های محیط‌زیستی ارزیابی کرده و به‌سوی بازتعریف آن بر مبنای رویکردهای فرارشته‌ای[۳۰]، میان‌رشته‌ای[۳۱]، سیستمی[۳۲]، کنش‌محور[۳۳] و انتقادی سوق یافته‌اند. آن‌ها تأکید می‌کنند که توسعه سواد بوم‌شناختی[۳۴] مستلزم عبور از دانش انتزاعی به‌سوی یادگیری تجربه‌زیسته است؛ جایی که بدن، احساس و فرهنگ، درک و شناخت را شکل می‌دهند. رویکردهای مبتنی بر یادگیری مکان‌مبنا، یادگیری حسی و بازنمایی چندوجهی، به‌مثابه شیوه‌های انضمامی تعامل یادگیرندگان با جهان پیچیده و چندصدا، در مرکز توجه قرار گرفته‌اند. چنین نگاهی آموزش محیط‌زیست را به کنشی فرهنگی، سیاسی و درون‌فهمی تبدیل می‌کند که از تقلیل‌گرایی علم‌محور کلاسیک گسست می‌یابد.

در ایران، رویکرد حواس افزوده، که در قلب طراحی این پژوهش قرار دارد، متأثر از انگاره‌های پساپوزیتیویستی[۳۵] نظیر شناخت تجسم‌یافته، زمینه‌مند و حسی است؛ بدین معنا که دانش‌آموز نه تنها از طریق شناخت ذهنی، بلکه از رهگذر حواس چندگانه، بافت بدن‌مند و افق زیست‌عاطفی خود با جهان پیرامون تعامل می‌کند. این رهیافت به‌دنبال گسستن از دوگانه‌انگاری ذهن/بدن و فرد/محیط[۳۶] بوده و بر درهم‌تنیدگی متقابل ادراک، مکان و خاطره در ساحت یادگیری تأکید دارد. حواس به‌مثابه رسانه‌های شناخت، حلقه اتصال امر زیسته و امر مفهومی تلقی می‌شوند و جایگاهی محوری در آموزش محیط‌زیست پیدا می‌کنند (برومند و امیری، ۱۴۰۳الف). در این راستا طباطبایی یزدی و برومند (۱۴۰۱) در فصل پنجم کتاب «رسالت آموزشی موزه‌های تاریخ طبیعی: رویکردهای نوین و کارآمد»، برومند و امیری (۱۴۰۳الف) در مقاله «ارائه طرح‌وارهٔ مفهومی آموزش حواس افزوده محیط‌زیست: رهیافتی به‌سوی پایداری» و امیری و برومند (۱۴۰۴ج) در فصل اول کتاب «مباحث ویژهٔ آموزش محیط‌زیست» به تفصیل درباره آموزش محیط‌زیستی به کمک تجربه طبیعت و لزوم توجه به کانال‌های حسی در فرآیندهای یاددهی-یادگیری محیط‌زیستی بحث کردند. هم‌چنین ملک‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) نشان دادند برای مدیریت و حفاظت اثربخش‌تر تنوع‌زیستی و تغییر دانش، نگرش و رفتار شهروندان نسبت به محیط‌زیست باید امکان دستیابی به فرصت‌های تجربه‌های طبیعت را برای مردم تسهیل کرد تا هویت بوم‌شناختی و گرایش‌های حفاظت‌گرایانه آن‌ها تقویت شود. بعداً Boroumand و همکاران (۲۰۲۶) و برومند و همکاران (۱۴۰۳) با مطالعه احساسات روان‌بوم‌شناختی[۳۷] دانش‌آموزان در فرآیندهای آموزش رسمی ایران، ضرورت تدوین پروتکل جامع آموزش حواس افزوده را تبیین کردند تا امکان تقویت احساسات مثبت و سازنده روان‌بوم‌شناختی و مهار احساسات منفی و مخرب روان‌بوم‌شناختی فراگیران فراهم شود.

تحول‌آفرینی در پداگوژی آب: به سوی رهیافت‌های نوین و تلفیق

پداگوژی آب به‌منزله رویکردی نوین، آب را نه فقط عنصری بیولوژیک یا کالایی اقتصادی، بلکه رخدادی فرهنگی-سیاسی، حافظه‌ای تاریخی و میانجی کنش‌هویتی بازتعریف می‌کند (برومند و کلاهی، ۱۴۰۰). در آثاری نظیر مثالهٔ *Kushmerick* و همکاران (۲۰۰۷)، آب به‌مثابه میدان مبارزه قدرت، سوژه‌ای روایی و بنیانی برای بازاندیشی عدالت محیط‌زیستی تحلیل شده است. چنین رویکردی مستلزم تلفیق خوانش انتقادی از مناسبات قدرت با دریافت حسی از جریان‌ها، صداها و بوهای آبی است. آب، در این معنا، به شبکه‌ای بینافرهنگی از خاطرات، نمادها، باورها و مقاومت‌ها بدل می‌گردد و آموزش مبتنی بر آن نیز باید از سطح محیط‌زیستی صرف به قلمرو اجتماعی-فرهنگی توسعه یابد (*Guevara-Herrero* و همکاران، ۲۰۲۴).

در بستر معرفت‌شناسی انتقادی، دانش‌های بومی به‌عنوان ساختارهای دانایی ریشه‌دار در مکان، حافظه و عمل جمعی، جایگزینی مشروع برای گفتمان‌های علم مسلط معرفی

شده‌اند. پژوهش‌هایی نظیر مطالعه Williams (۲۰۲۳) به ضرورت احیای پارادایم‌های معرفتی غیرغربی در نظام‌های آموزشی و مواجهه با استعمار دانایی[۳۸] پرداخته‌اند. در این رویکرد، دانش بومی نه صرفاً به‌مثابه داده‌ای تاریخی، بلکه به‌عنوان دستگاهی معنابخش، تفسیربرانگیز و اخلاق‌محور درک می‌شود که حامل افق‌های بدیل برای بوم‌شناسی کاربردی و عدالت آموزشی است. آموزش محیط‌زیست با محوریت این نوع دانش، به فرایندی چندرسانه‌ای، تعاملی و مقاومتی تبدیل می‌گردد (da Silva و همکاران، ۲۰۲۴؛ Sandoval-Rivera، ۲۰۲۰).

در ایران، از دو دهه پیش محققانی نظیر پاپلی یزدی شروع به بازخوانی دانش‌های بومی کردند (پاپلی یزدی و وثوقی، ۱۳۹۸). مجموعه آثار پاپلی یزدی[۳۹] نظیر کتاب فرهنگ و تمدن کاریزی (پاپلی یزدی و وثوقی، ۱۴۰۱) نشان داد شناخت دانش‌های آب‌محور به‌ویژه دانش‌های مرتبط با قنات، سازه‌های هیدرولیکی سنتی و سامانه‌های توزیع مشارکتی منابع آبی، نشانگر ظرفیت‌های عظیم آن در تبیین سازوکارهای همزیستی پایدار با محیط خشک‌سالی‌زده است. آثار پژوهشگران دیگر ایرانی نیز همچون صادقی‌زاده بافنده و همکاران (۱۳۹۸) و مجموعه آثار بوزرجمهری[۴۰] نشان می‌دهد که این معرفت‌های زیسته، برخلاف نگاه‌های مهندسی‌گرا، حامل روایت‌هایی از عدالت، انضباط اجتماعی و حکمرانی اشتراکی هستند. در بستر آموزش، بازگرداندن این دانش‌ها به حافظه نسلی و تلفیق آن با فناوری‌های نوین می‌تواند زمینه‌ساز تربیت کنشگران محیط‌زیستی مشارکت‌جو و متعهد گردد.

با این حال، بررسی ساختار برنامه‌درسی موجود در سطوح مختلف آموزش رسمی ایران حاکی از شکاف عمیق میان تجربه‌زیسته دانش‌آموزان با محتوای آموزش محیط‌زیستی است؛ محتوایی که عمدتاً در قالب روایت‌های انتزاعی، آمارمحور و تقلیل‌گرا به آب می‌پردازد. این وضعیت، منجر به تولید بیگانگی شناختی، تعلیق رفتاری و ناتوانی در پیوند عاطفی با مسائل محیط‌زیست شده است. چنین گسستی، بازنمایی آشکار از ناکارآمدی رویکردهای انتقال‌محور و غیربوم‌مدار در پاسخ‌گویی به بحران‌های پیچیده اقلیمی و بوم‌شناختی معاصر است (برومند و کلاهی، ۱۴۰۰).

در مقابل این ناکارآمدی، رویکردهای تلفیقی نظیر پداگوژی تجسم‌یافته-بومی جایگزین‌هایی بنیادین معرفی می‌شوند. این دیدگاه‌ها بر آن‌اند که یادگیری محیط‌زیستی زمانی اصیل و پایدار است که از درون بدن، حافظه فرهنگی و تجربه حسی فرد با شنیدن صدای جاری قنات، لمس رسوبات نمکی یا مشاهده آثار خشک‌سالی به‌مثابه ابزارهای شناختی آغاز شود. در این چارچوب، حواس به ابزارهای معنابخش و تولیدکننده دانش بدل می‌شوند که از سازوکارهای صرف شناختی فراتر رفته و امکان درگیری کامل ذهن، بدن و عاطفه را با موضوع یادگیری فراهم می‌کنند (امیری و برومند، ۱۴۰۴ج).

گسترش پداگوژی روایی-مکانی[41] در آموزش محیط‌زیست، تلاشی برای بازیابی ابزارهای فرهنگی همچون افسانه‌های آبی، ترانه‌های محلی و روایت‌های بین‌نسلی به‌منظور پیوند دادن حافظه و محیط است. روایت، در این راستا، نقش سازوکار هستی‌شناسانه‌ای را ایفا می‌کند که به‌واسطه آن، تجربه‌های پراکنده، در قالب مفهومی و اخلاقی انسجام می‌یابند. این شیوه، ضمن شکستن مرزهای خشک آموزشی، امکان گسترش افق‌های ذهنی دانش‌آموزان نسبت به زیست‌بوم خویش و ایجاد تعهد هویتی به آن را فراهم می‌آورد (برومند و همکاران ۱۴۰۳؛ طباطبایی یزدی و برومند ۱۴۰۱؛ ملک‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱).

در سطح روش‌شناسی طراحی دروس محیط‌زیستی، مطالعات معاصر تأکید دارند که الگوهای ترکیبی مبتنی بر هم‌افزایی بین‌رشته‌ای، مشارکت چندکنشگری و داده‌محوری تطبیقی، می‌توانند بسترهای مناسبی برای برنامه‌ریزی درسی در بافت‌های پیچیده فراهم سازند. طراحی مشارکتی و روش‌های ترکیبی در بستر آموزش محیط‌زیست، نه‌تنها به دقت نظری و کارآمدی تجربی می‌انجامد، بلکه زمینه‌ساز مالکیت اجتماعی، انطباق فرهنگی و پویایی در اجرا خواهد شد. این رهیافت، به‌ویژه در جوامعی با تنوع فرهنگی و اقلیمی بالا مانند ایران، ضرورتی روشی محسوب می‌گردد (امیری و برومند، ۱۴۰۴ب).

با عنایت به فقدان الگوی درسی جامع و زمینه‌مند که به‌صورت هم‌زمان بر ابعاد حسی، بومی، فرهنگی و بوم‌شناختی مسائل آب تمرکز داشته باشد، پژوهش حاضر درصدد است با بهره‌گیری از نظریه‌های پیچیدگی، شناخت تجسم‌یافته و معرفت‌های محلی، الگویی نوآورانه برای آموزش محیط‌زیستی مبتنی بر حواس افزوده و دانش‌های آبی بومی ایرانیان تدوین نماید. این برنامه می‌تواند به‌مثابه چارچوبی تلفیقی و چندساحتی، ظرفیت ایجاد پیوند درونی میان زیست‌جهان دانش‌آموزان و چالش‌های بوم‌شناختی عصر حاضر را فراهم سازد.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با بهره‌گیری از پارادایم تفسیری و جهت‌گیری سازه‌گرایانه، در پی فهم عمیق از چگونگی شکل‌گیری برنامه درسی محیط‌زیست با محوریت آب، حواس افزوده و دانش‌های بومی است. در این راستا، پژوهش حاضر ماهیتی کیفی دارد و با رویکرد طراحی آموزشی مبتنی بر نظریه‌پردازی کاربردی و توسعه‌ای، به تدوین، ارزیابی و بهبود چرخه‌مند یک برنامه درسی نوآورانه می‌پردازد. هدف، تولید دانشی زمینه‌مند و زمینه‌محور در بستر آموزش رسمی، با تأکید بر تعامل زیسته دانش‌آموزان با محیط‌های آبی و میراث بومی ایرانیان است.

راهبرد اصلی مورد استفاده در این پژوهش، طراحی و توسعه[۴۲] است که یکی از شاخه‌های روش‌شناسی پژوهش‌های طراحی آموزشی محسوب می‌شود. این راهبرد اجازه می‌دهد تا فرآیند طراحی برنامه درسی نه‌تنها بر پایه

شواهد تجربی و تحلیل نیازها، بلکه در تعامل مستمر با گروه‌های هدف صورت پذیرد. این پژوهش از نوع طراحی تکرارشونده بوده که در سه مرحله تحلیل، طراحی و ارزیابی اجرا شده و در هر مرحله بازخوردهای استخراج‌شده به بهبود نسخه‌های بعدی طرح کمک نموده است.

جهت گردآوری داده‌های کیفی، از مجموعه‌ای از ابزارهای ترکیبی شامل مصاحبه‌های عمیق نیمه‌ساختاریافته[۴۳] با خبرگان و متخصصان، مشاهده مشارکتی[۴۴] در محیط‌های آموزشی و تحلیل محتوای اسناد بومی در حوزه آب برای اجماع‌سازی استفاده شد. همچنین از گروه‌های متمرکز[۴۵] با حضور معلم‌های پایه‌های سه‌گانهٔ دورهٔ اول متوسطه بهره گرفته شد تا تجربه زیسته و بازخورد آن‌ها نسبت به اجزای برنامه درسی مورد تحلیل قرار گیرد.

جامعه پژوهش در دو سطح تعریف شده است: نخست، خبرگان دانشگاهی، سیاست‌گذاران آموزشی و متخصصان بوم‌شناسی اجتماعی که به‌صورت هدفمند برای مراحل طراحی و اعتباربخشی مشارکت داشته‌اند؛ دوم، معلمان علوم تجربی و جغرافیا. نمونه‌گیری به شیوه گلوله‌برفی در سطح خبرگان و نمونه‌گیری نظری[۴۶] در سطح معلمان انجام شده است.

برای تأمین اعتبار پژوهش، از چهار معیار پیشنهادی لینکلن و گوبا[۴۷] شامل باورپذیری، قابلیت انتقال[۴۸]، اتکاپذیری[۴۹] و تأییدپذیری[۵۰] استفاده شد. به‌منظور افزایش باورپذیری، از مثلث‌سازی در ابزارها و مشارکت مشارکت‌کنندگان در بازنگری یافته‌ها استفاده گردید. همچنین روایی محتوای برنامه درسی طراحی‌شده، با بهره‌گیری از نظرات ۱۲ نفر از متخصصان سنجیده شد.

داده‌های کیفی گردآوری‌شده با بهره‌گیری از روش تحلیل مضمون[۵۱] براساس الگوریتم شش‌مرحله‌ای براون و کلارک[۵۲] تحلیل شدند. در این فرآیند، مضامین پایه و برتر در سه سطح استخراج و سازمان‌دهی گردیدند. به‌منظور ارزیابی هم‌پوشانی مضامین، تحلیل توافق بین ارزیابان مستقل صورت گرفت و نسبت توافق به روش هولستی[۵۳] محاسبه شد.

طراحی برنامه درسی از طریق مدلی ترکیبی (امیری و برومند، ۱۴۰۴ب)، در چهار گام اصلی تعیین نیازها، تدوین اهداف یادگیری، سازماندهی محتوا و تجارب یادگیری و طراحی ارزشیابی انجام شد. در هر گام، تلاش شد تا محورهای حواس افزوده، مسائل محلی آب و دانش‌های بومی در لایه‌های محتوایی و روشی گنجانده شوند. طراحی و آزمایش سناریوهای یادگیری حسی، فعالیت‌های مبتنی بر تجربه مستقیم با منابع آبی و کارگاه‌های درک‌محیطی نیز در چارچوب پیشنهادی گنجانده شدند.

یافته‌های پژوهش

اهمیت آموزش محیط‌زیست در پایه‌های سه‌گانهٔ دوره اول متوسطه (پایه‌های هفتم، هشتم و نهم) از چند جنبه تربیتی، شناختی و تحول‌محور دارای جایگاه ویژه‌ای است. در این دوره سنی (تقریباً ۱۲ تا ۱۵ سالگی)، دانش‌آموزان در مرحله‌ای قرار دارند که از تفکر عینی به سمت تفکر انتزاعی حرکت می‌کنند و توانایی تحلیل مفاهیم پیچیده‌تری همچون پایداری، اکوسیستم، مسئولیت اجتماعی و عدالت محیط‌زیستی را پیدا می‌کنند. همچنین این دوره، زمان شکل‌گیری هویت فردی و اجتماعی و تثبیت ارزش‌هاست؛ از این‌رو آموزش محیط‌زیست می‌تواند نقش مؤثری در درونی‌سازی ارزش‌های زیست‌پایدار، تقویت احساس تعلق به طبیعت و ارتقاء نگرش‌های اخلاقی نسبت به محیط ایفا کند.

از سوی دیگر، برنامه‌های درسی این دوره دارای انعطاف‌پذیری نسبی بیشتری نسبت به دوره ابتدایی و تمرکز کمتری بر امتحانات سرنوشت‌ساز نسبت به دوره دوم متوسطه دارند، که این فضا را برای طراحی فعالیت‌های تعاملی، میدانی و بین‌رشته‌ای در حوزه محیط‌زیست فراهم می‌سازد. پایه‌های هفتم تا نهم بستر مناسبی برای تقویت سواد بوم‌شناختی، پرورش شایستگی‌های مشارکتی و آموزش مهارت‌های حل مسئله در مواجهه با بحران‌های محیط‌زیستی مانند آلودگی، کم‌آبی یا فرسایش منابع طبیعی هستند. آموزش محیط‌زیست در این سه پایه، نه‌تنها به فهم علمی و تجربی دانش‌آموزان عمق می‌بخشد، بلکه آن‌ها را برای ایفای نقش‌های مؤثر به‌عنوان شهروندان آینده‌نگر و مسئول در جامعه، آماده می‌سازد.

تحلیل کیفی محتوای اسناد آموزشی، متون درسی و مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان حوزه آموزش محیط‌زیست نشان داد که درک مفاهیم آب‌محور در بستر برنامه درسی رسمی، به شدت از سطح مفهومی و معرفتی پایین‌تری نسبت به الزامات آموزش پایدار برخوردار است. مؤلفه‌هایی نظیر «پایداری در مصرف منابع آبی» و «زیست‌بوم‌محوری بومی» که در منابع علمی بین‌المللی با بسامد بالا برجسته شده‌اند، در متون آموزشی پایه‌های سه‌گانهٔ دورهٔ اول متوسطه به‌صورت ضمنی، تقلیل‌یافته یا فاقد زمینه‌سازی بین‌رشته‌ای منعکس شده‌اند. همان‌طور که جدول (۱) نشان می‌دهد، مفهوم «پایداری در مصرف منابع آبی» با ۲۷ اشاره در منابع تحلیلی، بیشترین حضور را داشته، اما در برنامه درسی رسمی ایران به صورت نظام‌مند منعکس نشده است.

جدول ۱- تحلیل مفاهیم کلیدی در اسناد آموزشی و برنامه درسی رسمی

مؤلفه	تبیین مولفه	تعداد ارجاع[۵۴]	میزان انعکاس[۵۵]	نکات کلیدی و تحلیل کمی و کیفی
پایداری در مصرف منابع آبی	تاکید بر حفظ منابع آب، مدیریت پایدار مصرف و چالش‌های اقلیمی	۲۷	بسیار محدود	کمبود آموزش‌های میان‌رشته‌ای، نیاز به تقویت آموزش‌های مبتنی بر بوم‌شناسی و آینده‌نگری
پیوندهای فرهنگی با آب	تأثیر باورها، سنت‌ها و آیین‌های بومی بر مدیریت منابع آب	۱۹	بسیار کم	گسست بین دانش بومی و برنامه درسی رسمی، نیاز به بومی‌سازی محتوای آموزشی
تجربه‌گرایی حسی	استفاده از حواس پنج‌گانه برای یادگیری عملی و ملموس محیط آب	۱۶	مغفول	ظرفیت بالا در یادگیری عمیق، لزوم توسعه ابزارهای آموزش عملی و کارگاهی
مسئولیت‌پذیری محیط‌زیستی	تقویت حس اخلاقی و تعهد در حفاظت از منابع آبی	۲۴	محدود	آموزش‌های کلامی غیرکافی، نیاز به فعال‌سازی نقش‌های مشارکتی در مدارس
تفکر سیستمی در درک بحران آب	شناخت و تحلیل شبکه‌ای مشکلات آب و تأثیر متقابل عوامل مختلف	۲۱	تک‌بعدی	ضعف در رویکرد نظام‌مند، ضرورت آموزش مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده آب
تعلیم انتقادی	پرورش تفکر انتقادی و کنشگری اجتماعی درباره مدیریت منابع آبی	۱۱	بسیار کم	کمبود رویکردهای آموزشی مشارکتی و تحلیل ساختاری
داستان‌پردازی بومی	استفاده از روایت‌های سنتی برای انتقال دانش آب و اخلاق محیط‌زیستی	۱۴	بسیار کم	نقش کلیدی در تقویت هویت بومی و یادگیری معناگرا
هم‌آمیزی معرفت‌های محلی و علمی	تلفیق دانش بومی و علمی برای آموزش جامع محیط‌زیست آب	۱۸	فاقد سازوکار رسمی	توسعه رویکردهای چنددانشی و هم‌افزایی معرفت‌ها
عدالت بین‌نسلی در مصرف منابع آبی	توجه به عدالت در توزیع منابع آبی بین نسل‌های فعلی و آینده	۹	سطحی و شعاری	تاکید بر آموزش اخلاقی و سیاست‌گذاری پایدار در برنامه‌های درسی
فناوری‌مندی بوم‌محور	کاربرد فناوری‌های نوین (مانند واقعیت افزوده) برای آموزش بومی‌شده آب	۱۶	غیبت محسوس	نیاز به طراحی فناوری‌های حسی و تعاملی در آموزش محیط‌زیست
حکمرانی مشارکتی آموزشی	مشارکت جوامع محلی در طراحی و اجرای آموزش محیط‌زیستی در مسائل حوزه آب	۱۳	غیبت	ضرورت ایجاد سازوکارهای مشارکتی در نظام آموزش رسمی
ادغام هنر و آموزش بوم‌محور	استفاده از هنرهای محلی برای تثبیت مفاهیم حفاظت آب	۱۷	کم‌رنگ	ابزار قدرتمند در انتقال معنا و تجربه محیط‌زیستی
آموزش تاب‌آوری اقلیمی	آموزش نحوه مواجهه و سازگاری با تغییرات اقلیمی در منابع آبی	۱۵	بسیار محدود	نیاز به توسعه محتوای تخصصی و کاربردی برای دانش‌آموزان
اقتصاد دریاپایه و آب	ارتباط توسعه پایدار اقتصاد دریاپایه با مدیریت منابع آبی	۸	بسیار کم	ضرورت پیوند آموزش محیط‌زیست با سیاست‌های توسعه منطقه‌ای
ارتباط میان‌نسلی و انتقال دانش	انتقال تجربیات زیستی و بومی میان نسل‌ها در حوزه آب	۱۴	کم‌رنگ	ایجاد کانال‌های ارتباطی مؤثر و رسمی
آموزش عدالت محیط‌زیستی	تأکید بر حقوق برابر در بهره‌برداری و حفاظت از منابع آب	۱۱	بسیار محدود	آموزش ضرورت تغییرات ساختاری در مدیریت منابع
علوم داده و مدیریت آب	استفاده از فناوری داده‌کاوی و هوش مصنوعی در آموزش مدیریت آب	۱۰	غیبت کامل	نیاز به گنجاندن مهارت‌های فناورانه و تحلیلی در برنامه درسی
آموزش مشارکت اجتماعی	پرورش فرهنگ همکاری و مسئولیت جمعی در حفاظت از منابع آب	۱۶	کم‌رنگ	افزایش مشارکت مردمی از طریق روش‌های آموزشی فعال
اخلاق محیط‌زیستی	آموزش ارزش‌ها و اصول اخلاقی مرتبط با محیط‌زیست و منابع آب	۲۰	محدود	پایه‌گذاری نگرش‌های پایدار و مسئولیت‌پذیری فردی
مدیریت بحران و آموزش واکنش	آموزش مقابله با بحران‌های آبی و شرایط اضطراری	۱۲	بسیار کم	نیاز به آموزش مهارت‌های عملی و واکنش سریع
آموزش حفاظت از تنوع زیستی آبی	آموزش اهمیت حفاظت از گونه‌ها و اکوسیستم‌های آبی	۱۵	کم‌رنگ	افزایش آگاهی درباره تنوع زیستی و نقش آن در پایداری آب
آموزش سبک زندگی پایدار	ترویج رفتارهای روزمره دوستدار آب و محیط‌زیست	۱۸	کم‌رنگ	آموزش عادات محیط‌زیستی و کاهش مصرف منابع آب
آموزش مشارکت‌های بین‌بخشی	ترویج همکاری بین نهادها و بخش‌های مختلف در مدیریت منابع آب	۱۳	غیبت نسبی	تقویت آموزش سیاست‌گذاری و مدیریت مشارکتی

بر اساس کدگذاری محوری انجام‌شده، مشخص گردید که پیوندهای فرهنگی-اجتماعی با پدیده آب در منابع متنی بیشتر در قالب سنت‌های شفاهی، کنش‌های آیینی و باورهای مردم‌نهاد بازتاب یافته و در ترجمه آموزشی آن‌ها برای دانش‌آموزان، یک گسست معرفتی محسوس دیده می‌شود. مفهوم «پیوندهای فرهنگی با آب» که در جدول (۱) با ۱۹ منبع اشاره‌کننده گزارش شده، بازنمایی‌گر لایه‌های پیچیده‌ای از دانش بومی است که متأسفانه در برنامه درسی، جایگاه رسمی درخوری نیافته‌اند. این مسئله نشان‌دهندهٔ ضرورت بازاندیشی در نسبت برنامه درسی با میراث فرهنگی - طبیعی در چارچوب آموزش محیط‌زیست است.

تحلیل مصاحبه‌های انجام‌شده در این پژوهش نشان داد که یکی از گره‌های کور آموزش آب در سطوح پایه، غیبت تجربه‌زیستهٔ یادگیرندگان از مواجههٔ حسی-زیستی با منابع آبی است. مؤلفهٔ «تجربه‌گرایی حسی» که در جدول (۱) با ۱۶ فراوانی گزارش شده، در عمل به‌عنوان یک ظرفیت یادگیری

تجربی مغفول مانده است. این نوع تجربه‌گرایی، بستری برای ارتقاء فهم فراشناختی و درک پدیدارشناختی دانش‌آموزان از زیست‌بوم‌های آبی فراهم می‌سازد که در قالب‌های سنتی آموزش نظری، قابل تحقق نیست.

داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل کیفی نشان داد که درک مؤلفه‌های اخلاقی و مسئولیت‌پذیرانه در قبال منابع آبی، به‌طور چشم‌گیری وابسته به تجارب زیست‌عاطفی و تعاملات میان‌فردی در بستر اجتماعی دانش‌آموزان است. مفهوم «مسئولیت‌پذیری محیط‌زیستی» با ۲۴ ارجاع در جدول (۱)، منعکس‌کنندهٔ این امر است که آموزش مفاهیم اخلاقی - بوم‌شناختی تنها از طریق انتقال مفاهیم کلامی حاصل نمی‌شود، بلکه نیازمند سازوکارهای ادراکی، احساسی و ارتباطی چندلایه است.

تحلیل انتقادی نشان داد که غیبت ابزارهای دیجیتال در انتقال دانش بومی - آبی، موجب تضعیف جذابیت و ماندگاری پیام‌های آموزشی در اذهان دانش‌آموزان شده است. بسیاری از خبرگان بر تلفیق فناوری‌های غوطه‌ورکننده مانند واقعیت افزوده یا واقعیت ترکیبی برای بازسازی فضاهای آبی تاریخی یا اسطوره‌ای تأکید داشتند. مفهوم «فناوری‌مندی بوم‌محور» با ۱۶ ارجاع در جدول (۱)، نشانگر این شکاف است.

واکاوی گفت‌وگوها حاکی از آن بود که فقدان نهادینه‌سازی برنامه درسی فراگیر با حضور «مردم محلی» و ذی‌نفعان اجتماعی در فرآیند تدوین، اجرا و ارزشیابی، یکی از موانع اصلی تحقق آموزش محیط‌زیستی بومی‌شده است. مؤلفه «حکمرانی مشارکتی آموزشی» که در جدول (۱) با ۱۳ بار اشاره شده، می‌تواند در طراحی الگوی پیشنهادی به‌عنوان زیربنای تعبیه کنش اجتماعی در فرآیند آموزش آب ایفای نقش کند.

از منظر بین‌رشته‌ای، بسیاری از داده‌های جمع‌آوری‌شده بر اهمیت ادغام عناصر ادبیات فارسی، موسیقی محلی و هنرهای تجسمی در آموزش آب تأکید داشتند. این پیوندهای میان‌رشته‌ای، علاوه بر افزایش جذابیت، موجبات تثبیت معانی عمیق‌تر و تأثیرگذاری ماندگارتر را فراهم می‌آورند. مؤلفه «ادغام هنر و آموزش بوم‌محور» در جدول (۱) با ۱۷ اشاره، مؤید این جهت‌گیری نوین در برنامه‌ریزی درسی است.

تحلیل تطبیقی ساختار برنامه درسی آموزش آب با استانداردهای یونسکو در چارچوب «برنامه اقدام جهانی برای آموزش توسعه پایدار» نشان داد که برنامه درسی رسمی در ایران از ادغام ابعاد نظام‌مند «تفکر سیستمی» در تحلیل چالش‌های آب ناتوان است. مفهوم «تفکر سیستمی در درک بحران آب» که در جدول (۱) با ۲۱ اشاره حضور دارد، از دیدگاه خبرگان، کلیدی‌ترین توانش شناختی برای تربیت کنشگر محیط‌زیستی آینده‌محور است، اما در برنامه فعلی صرفاً در قالب ارجاعات تک‌بعدی به منابع یا چرخه‌های آب محدود مانده است.

یکی از یافته‌های کیفی مهم، حضور کم‌رنگ مقوله «تعلیم انتقادی» در مواجهه با ساختارهای قدرت و تصمیم‌گیری در حوزه مدیریت منابع آب بود. بسیاری از مصاحبه‌شوندگان معتقد بودند که فقدان پرورش «شهروندان آب‌مدار انتقادی» موجب تقلیل نقش دانش‌آموزان به مصرف‌کنندگان منفعل در قبال اطلاعات می‌شود. در جدول (۱)، این مؤلفه تنها با ۱۱ فراوانی ثبت شده است، که خود مؤید نادیده‌انگاری آن در لایه‌های تصمیم‌سازی درسی است.

واکاوی مصاحبه‌ها نشان داد که «داستان‌پردازی بومی» به‌عنوان ابزار میان‌رشته‌ای و فرهنگ‌پایه، ظرفیت منحصربه‌فردی برای انتقال معانی آب در بسترهای روایی زیست‌محور دارد. این مؤلفه که در جدول (۱) با ۱۴ اشاره آمده است، از سوی آموزگاران بومی مورد تأکید قرار گرفت؛ زیرا به‌واسطه پیوند با تجربه زیسته و تخیل بومی، امکان انتقال حکمت‌آمیز مفاهیم پیچیده را فراهم می‌سازد، بی‌آنکه به چارچوب‌های فنی خشک و انتزاعی محدود گردد.

در سطح تحلیلی-نظام‌مند، داده‌ها نشان داد که نسبت بین دانش ضمنی بومی و آگاهی علمی رسمی در ذهن دانش‌آموزان رابطه‌ای تفکیک‌ناپذیر و در عین‌حال ناهماهنگ دارد. بسیاری از آموزگاران و متخصصان مصاحبه‌شونده بر این نکته اتفاق نظر داشتند که برنامه درسی فعلی فاقد سازوکارهای تلفیق این دو قطب معرفتی است. مفهوم «هم‌نشینی معرفت‌های محلی و علمی» در جدول (۱) با ۱۸ مورد اشاره، نیازمند طراحی الگویی نوین با خاستگاه بوم‌دانش‌بنیان است.

یکی دیگر از یافته‌های کلیدی، کم‌توجهی ساختاری به مفهوم «عدالت بین‌نسلی در مصرف منابع آبی» بود. این مؤلفه که در ادبیات توسعه پایدار از اهمیت فراوانی برخوردار است، در برنامه درسی تحلیل‌شده، حضوری صوری و سطحی داشته و عمدتاً به عنوان یک شعار محیط‌زیستی مطرح شده است. در جدول (۱)، این مؤلفه تنها با ۹ اشاره ثبت شده است، در حالی‌که در اسناد بین‌المللی نظیر اهداف توسعه پایدار جهانی و گزارش‌های IPBES[56]، جایگاه مرکزی دارد.

از منظر تلفیق رویکرد حواس افزوده در طراحی برنامه درسی آموزش آب، یافته‌ها مؤید آن‌اند که یک الگوی مطلوب می‌بایست به‌گونه‌ای تنظیم شود که سطوح چندحسی (دیداری، شنیداری، لامسه‌ای و حتی بویایی و چشایی) به صورت نظام‌مند به‌کار گرفته شوند. همان‌طور که جدول (۲) نشان می‌دهد، مؤلفهٔ «بهره‌گیری از تجربه‌های حسی چندوجهی» با تأکید ۸۹/۱ درصدی خبرگان، نشان‌دهندهٔ اجماع نظری بر ضرورت چنین ادغامی در آموزش‌های محیط‌زیستی است.

جدول ۲- تحلیل مؤلفه‌های کلیدی رویکرد حواس افزوده در طراحی برنامه درسی آموزش آب

مؤلفه	تبیین مولفه	درصد تأیید خبرگان	نکات کلیدی
بهره‌گیری از تجربه‌های حسی چندوجهی	ادغام دیداری، شنیداری، لامسه‌ای، بویایی و چشایی در آموزش برای تقویت یادگیری	۸۹/۱	پایه تحول آموزشی و تحریک یادگیری فعال
یادگیرنده مشارکت‌جو	نقش فعال دانش‌آموز در فرایند یادگیری و تعامل مستمر با محیط آموزشی	۸۵/۴	افزایش انگیزش و مالکیت یادگیری
یادگیری مبتنی بر مکان	ایجاد ارتباط عاطفی و شناختی با محیط‌زیست محلی برای تقویت حس تعلق	۸۱/۷	کلید یادگیری پایدار و توسعه هویت محیط‌زیستی
یادگیری مسئله‌محور	حل مسائل واقعی و کاربردی برای افزایش درک و مهارت‌های تحلیلی	۸۴/۶	افزایش کاربردی بودن آموزش و مشارکت فعال
زیست‌عاطفه‌های بحرانی	پرورش عواطف مرتبط با بحران‌های محیطی برای ایجاد مسئولیت‌پذیری	۷۸/۲	شکل‌دهی شهروندی فعال و زیست‌اخلاقی
احساس رهایی ذهنی	ایجاد فضای آرامش‌بخش و زیباشناختی برای بهبود سلامت روان و یادگیری	۷۶/۴	افزایش بهره‌وری یادگیری و کاهش اضطراب
ارزشیابی تحول‌محور	استفاده از ارزیابی‌های منعطف، مشارکتی و بازتابی برای رشد دانش‌آموزان	۸۷/۳	تقویت یادگیری عمیق و شخصی‌سازی
یادگیری مشارکتی گروهی	تاکید بر کار گروهی و تعامل مستمر میان دانش‌آموزان برای حل مسئله	۸۳/۲	افزایش مهارت‌های اجتماعی و همکاری
استفاده از فناوری‌های تعاملی	کاربرد فناوری‌های نوین مانند واقعیت افزوده و مجازی در آموزش حسی	۸۰/۵	افزایش جذابیت و قابلیت درک مفاهیم پیچیده
روایت‌پردازی محیط‌زیستی	بهره‌گیری از داستان‌ها و روایت‌های تعاملی برای انتقال مفاهیم آموزشی	۷۵/۴	ایجاد اتصال عاطفی و حافظه بلندمدت
آموزش با هدف تقویت خلاقیت	تشویق به تفکر خلاق و حل مسئله نوآورانه در مواجهه با چالش‌های آبی	۷۷/۸	افزایش انگیزش و توانمندی دانش‌آموزان
آموزش تمرکز حواس و ذهن‌آگاهی	پرورش توانایی توجه و حضور ذهن برای افزایش کیفیت یادگیری	۷۴/۹	کاهش پراکندگی ذهنی و بهبود تمرکز
آموزش مبتنی بر بازی و فعالیت‌های بدنی	استفاده از بازی‌ها و فعالیت‌های حرکتی برای تقویت تجربه‌های حسی	۷۹/۳	افزایش تعامل و لذت یادگیری
یادگیری انعکاسی و خودتنظیمی	تشویق دانش‌آموزان به بازاندیشی درباره تجربیات یادگیری و تنظیم خود	۸۲/۱	افزایش مسئولیت‌پذیری و استقلال یادگیری

داده‌های حاصل از تحلیل مضمون مصاحبه‌ها نشان داد که «حس فقدان»[۵۷] نسبت به کاهش منابع آبی، یکی از کلیدواژه‌های عاطفی-شناختی پرتکرار بود که در بازنمایی‌های ذهنی مصاحبه‌شوندگان حضور داشت. این عنصر که در جدول (۲) با فراوانی ۷۸/۲ رصدی به‌عنوان بخشی از «زیست‌عاطفه‌های بحرانی»[۵۸] گزارش شده، می‌تواند به‌عنوان بستری برای شکل‌دهی به «شهروندی زیست‌اخلاقی» به‌کار گرفته شود، اگر در طراحی برنامه درسی مورد توجه قرار گیرد.

بر اساس تحلیل محتوای کیفی، مشخص شد که مشارکت‌جویی فعال دانش‌آموزان در فرآیند یاددهی-یادگیری در موضوعات آب‌محور، صرفاً در صورتی رخ می‌دهد که آن‌ها خود را جزئی از مسئله و بخشی از راه‌حل بدانند. مفهوم «یادگیرنده مشارکت‌جو»[۵۹] در جدول (۲) با ۸۵/۴ درصد تأیید خبرگان همراه بود و بسیاری از آن‌ها تأکید داشتند که بدون تغییر در سبک‌های آموزشی ـ از معلم‌محور به یادگیرنده‌محور ـ چنین تحولی ممکن نخواهد بود.

در مصاحبه‌ها، بسیاری از معلمان و کارشناسان تأکید داشتند که یادگیری مبتنی بر مکان در آموزش مفاهیم آبی، فرصتی برای بازسازی ارتباط عاطفی - بوم‌شناختی دانش‌آموزان با زیست‌بوم‌های بومی است. این رویکرد که در جدول (۲) با تأیید ۸۱/۷ درصدی همراه است، راهبردی مؤثر برای فعال‌سازی حافظه زیست‌مکانی و کنشگری پایدار در نوجوانان محسوب می‌شود.

از تحلیل داده‌ها چنین برمی‌آید که نبود تراز بین «ارزشیابی شناختی» و «ارزشیابی عاطفی و رفتاری» در نظام سنجش و اندازه‌گیری آموزش محیط‌زیست، موجب فروکاست یادگیری به سطح محفوظات نظری شده است. خبرگان با تأکید بر طراحی ابزارهای سنجش مشارکتی، انعکاسی و عملکردمحور، خواستار اصلاح الگوی ارزشیابی کنونی شده‌اند. مؤلفه «ارزشیابی تحول‌محور» در جدول (۲) با تأیید ۸۷/۳ درصدی همراه بود.

تحلیل تجربه‌های میدانی معلمان در تدریس مفاهیم آب، نشان‌دهندهٔ این است که زمانی که دانش‌آموزان بتوانند با روش‌های حل مسئله مشارکتی در پروژه‌های واقعی مدرسه‌محور دخیل شوند، سطح درک، انگیزش و تعلق آنان به موضوع به‌طرز چشم‌گیری افزایش می‌یابد (پرومند و کلاهی، ۱۴۰۰). این یافته با مؤلفه «یادگیری مسئله‌محور» در

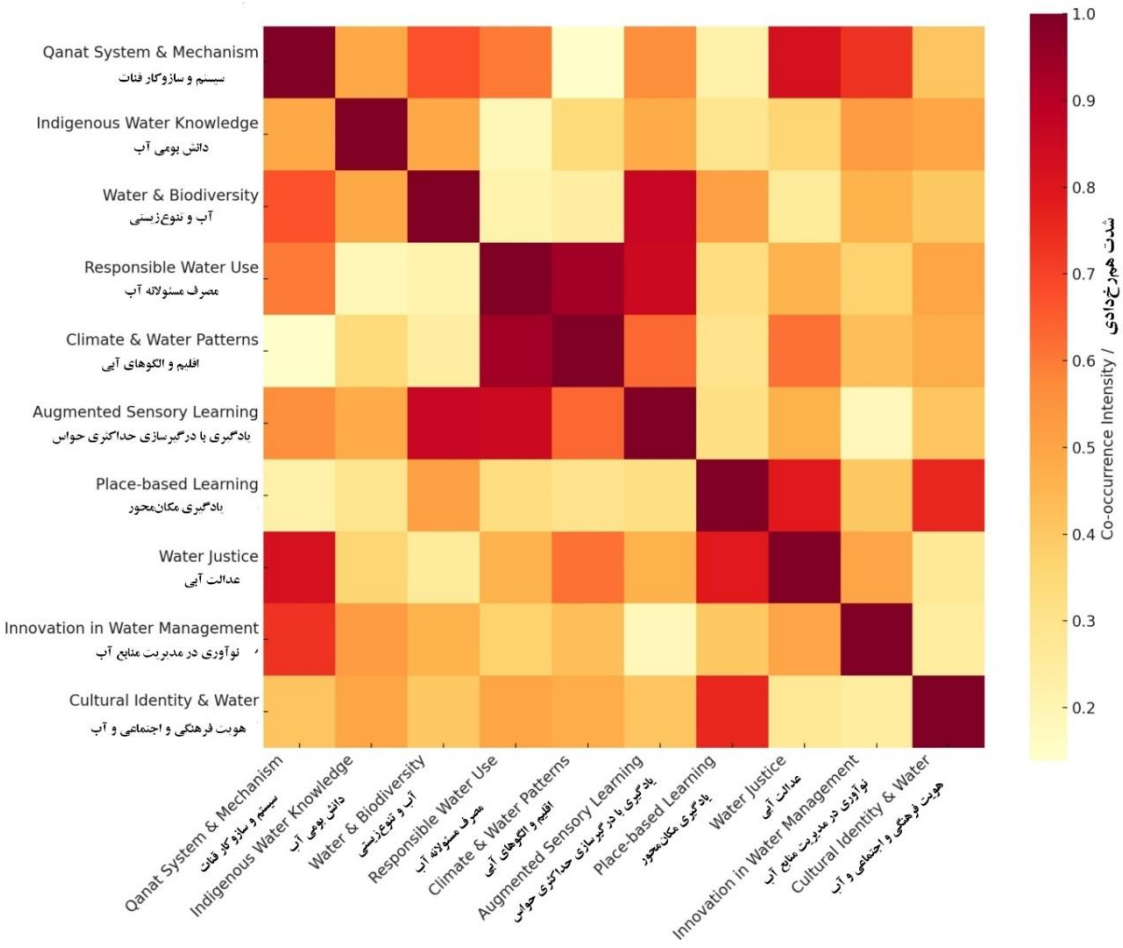
جدول (۲) مرتبط است که با ۸۴/۶ درصد تأیید نظری مواجه شده است.

یکی از یافته‌های متمایز این پژوهش، ظهور «احساس رهایی ذهنی» در تجربه‌های حسی ـ زیباشناختی دانش‌آموزان از فضاهای آبی واقعی بود. این مؤلفه که در جدول (۲) با ۷۶/۴ درصد تأیید گزارش شده، نشان می‌دهد که آموزش‌های محیط‌زیستی اگر با طراحی محیطی و فضاسازی هنرمندانه ترکیب شوند، می‌توانند اثراتی فراتر از اهداف آموزشی صرف بر جای بگذارند و به نوزایی روانی ـ زیستی یادگیرندگان بینجامند.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که مدل مطلوب آموزش محیط‌زیست آب‌محور با تمرکز بر دانش‌های بومی ایرانیان، مستلزم ترکیبی پیچیده از مؤلفه‌های معرفتی، فرهنگی، تجربی، فناوری‌محور و حکمرانی‌مدار است که صرفاً با بازطراحی بنیادین در سطح برنامه درسی، ساختار ارزشیابی، توانمندسازی معلمان و مشارکت فعال جامعه محلی قابل تحقق است. به‌بیان دیگر، دستیابی به «تحول پارادایمی» در آموزش آب، مستلزم تغییر در منطق بنیادین سیاست‌گذاری آموزشی است.

چارچوب کلی برنامه درسی پیشنهادی

بخش مهمی از یافته‌های این مطالعه در قالب نقشه شدت هم‌رخدادی مفاهیم[۶۰] استخراج‌شده از برنامه درسی پیشنهادی نهایی پژوهش در شکل (۱) ارائه شده است. این نقشه نمایانگر پیوندهای مفهومی پررنگ و درهم‌تنیده‌ای است که در لایه‌های مختلف محتوای آموزشی به‌ویژه پیرامون مسائل آب، رویکرد حواس افزوده و دانش‌های بومی مدیریت منابع آبی دیده می‌شود. این نقشه نشان می‌دهد که مفاهیم کلیدی همچون آب به‌مثابه منبع زیستی-فرهنگی، مصرف پایدار آب، عدالت محیط‌زیستی در توزیع آب و دانش بومی قنات‌ها و آب‌انبارها در گره‌های مرکزی شبکه مفهومی جای گرفته‌اند و به‌صورت متناوب با سایر مفاهیم چون یادگیری تجربی چندحسی، فناوری‌های بومی در مدیریت آب، اخلاق محیط‌زیستی و تغییر اقلیم هم‌رخدادی دارند.



شکل ۱- نقشه شدت هم‌رخدادی مفاهیم استخراج و تعبیه شده در برنامهٔ درسی پیشنهادی نهایی پژوهش حاضر

تفسیر نقشه ارائه شده در شکل (۱) نشان می‌دهد که رویکرد حواس افزوده نه‌تنها به غنای ادراکی دانش‌آموزان در شناخت چندوجهی از آب کمک می‌کند، بلکه موجب درهم‌تنیدگی تجربه‌زیسته حسی-فرهنگی با مفاهیم علمی و اخلاقی

پیرامون آب می‌شود. پیوند پررنگ بین مفاهیم دانش بومی و پایداری اجتماعی منابع آبی در نقشه شدت، گویای نوعی بازآفرینی معرفت بومی در بستر آموزش رسمی است که می‌تواند زمینهٔ شکل‌گیری فهم میان‌رشته‌ای، انتقادی و مکان‌مند از محیط‌زیست را فراهم آورد. همچنین، جایگاه ویژه مفاهیمی چون مسئولیت‌پذیری محیط‌زیستی و یادگیری مبتنی بر مسئله در این نقشه، نشان‌دهندهٔ طراحی محتوای آموزشی بر پایه موقعیت‌های واقعی و زمینه‌مند زندگی دانش‌آموزان است که با استفاده از حواس چندگانه و تجارب محلی بسط یافته‌اند (شکل ۱).

پیش از ارائه جدول (۳)، لازم است بر جایگاه محوری آن در ساختار نتایج پژوهش تأکید شود. این جدول درواقع چکیده‌ای نظام‌مند از چارچوب نهایی برنامه درسی پیشنهادی برای آموزش محیط‌زیست با رویکرد حواس افزوده است که به‌صورت هدفمند، محتوای موضوعی، روش‌های آموزش، ابزارهای حسی، فعالیت‌های بومی و فرهنگی، الگوهای ارزشیابی و اهداف رفتاری را در پایه‌های سه‌گانهٔ دورهٔ اول متوسطه به‌تفصیل مشخص می‌کند. اهمیت این چارچوب در آن است که با تلفیق نگاه میان‌رشته‌ای، تجربه‌زیسته حسی و بازنمایی دانش‌های بومی در قالب فعالیت‌های زمینه‌مند، به طراحی یک برنامه درسی منسجم، غنی و زمینه‌محور منجر شده است؛ برنامه‌ای که نه‌فقط به انتقال مفاهیم علمی، بلکه به پرورش حساسیت فرهنگی و مسئولیت‌پذیری اجتماعی در قبال آب به‌مثابه یک منبع زیستی-فرهنگی می‌پردازد.

این چارچوب با بهره‌گیری از اصول برنامه‌ریزی درسی چندحسی و بومی‌محور، تلاش دارد میان یادگیری علمی و تجربه عملی در بسترهای محلی، پیوندی پویا برقرار کند. نوآوری اصلی این برنامه در آن است که نه‌تنها به آموزش مفاهیم کلیدی آب در قالب محتوای نظری و عملی می‌پردازد، بلکه در لایه‌های مختلف، دانش‌آموز را درگیر مواجهه حسی با مسئله آب می‌سازد؛ از شنیدن صدای قنات تا لمس خاک نم‌خورده یا بازسازی ماکت‌های سنتی. جدول (۳) دقیقاً بازتاب همین تلاش است: تلفیق نظام‌مند و هدف‌دار میان مؤلفه‌های دانش بومی، فناوری‌های آموزشی نوین (مانند واقعیت افزوده) و روش‌های فعال یادگیری که در راستای توانمندسازی دانش‌آموز برای مشارکت نقادانه و خلاق در حفاظت از منابع آب، طراحی شده‌اند.

از جدول (۳)، می‌توان دریافت که انسجام بین اجزای مختلف این چارچوب پیشنهادی، ازجمله محتوای موضوعی، ابزارهای آموزش حسی و فعالیت‌های محلی، نه‌تنها یک مسیر یادگیری تدریجی را در سه پایه تحصیلی ترسیم می‌کند، بلکه بستری را برای تقویت تفکر سیستمی، بازاندیشی انتقادی و عمل محیط‌زیستی در مقیاس بومی فراهم می‌آورد. در این میان، پیوستگی منطقی میان اهداف رفتاری هر پایه با روش‌های آموزش حواس افزوده و شیوه‌های ارزشیابی نشان می‌دهد که رویکرد طراحی، مبتنی بر یادگیری تحول‌آفرین و برساخت‌گرایی اجتماعی بوده است؛ رویکردی که دانش‌آموز را به‌عنوان عامل مشارکت‌کننده در تولید معنا از پدیده‌های طبیعی و فرهنگی پیرامون خود می‌بینند. همچنین، حضور هم‌زمان فناوری‌های بومی و نوین در این چارچوب، نشان‌دهنده تلاش آگاهانه برای تقویت هم‌زیستی معرفتی میان سنت و نوآوری است.

با حرکت از پایه هفتم تا نهم، مسیر برنامه به‌سوی ارتقاء توانمندی‌های تحلیلی، حل مسئله و تصمیم‌گیری اخلاقی هدایت می‌شود؛ به‌گونه‌ای که دانش‌آموز در پایان این دوره، نه‌تنها نسبت به آب آگاهی عمیق‌تری پیدا کرده، بلکه می‌تواند به‌طور فعال در حفاظت از آن نقش‌آفرینی کند. بنابراین، جدول (۳) نه‌فقط یک طرح درسی، بلکه تجسمی از یک پارادایم تربیتی بدیل است که به تربیت نسل آینده‌ای حساس، مشارکت‌جو و متعهد به پایداری منابع طبیعی می‌انجامد.

بحث

یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که طراحی برنامه درسی آموزش محیط‌زیست با تکیه بر پارادایم حواس افزوده و ادغام آن با دانش بومی مدیریت منابع آب، منجر به ایجاد تحولی ساختاری در نظام آموزش محیط‌زیست شده است. این رویکرد چندوجهی، نه تنها موجب افزایش انگیزه درونی و مشارکت فعال دانش‌آموزان شده، بلکه از طریق فعال‌سازی مکانیسم‌های شناختی پیشرفته، درک عمیق‌تری از مفاهیم پیچیدهٔ محیط‌زیستی را فراهم نموده است. این یافته‌ها همسو با بسیاری از مطالعات جهانی همتا نظیر (Li و همکاران، ۲۰۲۲؛ Blades، ۲۰۲۱؛ Beery و Jørgensen، ۲۰۱۸) نشان می‌دهد به‌کارگیری روش‌های چندحسی در فرایند یاددهی-یادگیری، امکان یکپارچه‌سازی داده‌های حسی از طریق حواس بینایی، شنوایی، لامسه، بویایی و چشایی را مهیا می‌سازد که این امر، مطابق با یافته‌های علوم اعصاب شناختی، منجر به تقویت یادگیری عمیق و افزایش ماندگاری محتوای آموزشی می‌شود.

جدول ۳- چارچوب کلی پیشنهادی پژوهش حاضر برای برنامه درسی پیشنهادی آموزش محیط‌زیست با رویکرد حواس افزوده با تأکید بر مسائل آب با تمرکز بر دانش‌های بومی مدیریت و حفاظت آب (ویژه پایه‌های سه‌گانهٔ دورهٔ اول متوسطه)

پایه تحصیلی	محتوای موضوعی	منابع و ابزار آموزشی	روش‌های آموزش حواس افزوده و فعالیت‌ها	فعالیت‌های بومی و فرهنگی	شیوه‌های ارزیابی	اهداف رفتاری
پایه ۷	- تعریف و اجزای چرخه آب (تبخیر، تعرق، بارش، نفوذ، رواناب). - منابع آب (رودخانه، چشمه، دریاچه، قنات). - پیامدهای کم‌آبی و خشکسالی. - اهمیت آب برای انسان و اکوسیستم.	- فیلم‌های مستند علمی درباره چرخه آب و قنات. - کتاب‌های تصویری و آموزشی. - نرم‌افزارهای تعاملی چندرسانه‌ای حواس افزوده. - نمونه‌های واقعی خاک و آب.	- مشاهده مستقیم نمونه آب و خاک و گیاهان محلی. - شبیه‌سازی صدای بارش و رودخانه با وسایل صوتی. - فعالیت بویایی با نمونه آب و خاک مناطق مختلف. - لمس و حس کردن بافت‌های مختلف خاک و گیاهان مربوط به محیط آبی.	- بازدید از قنات محلی و مستندسازی مراحل آن. - جمع‌آوری افسانه‌ها، داستان‌ها و ضرب‌المثل‌های مربوط به آب. - ترسیم نقشه منابع آب محلی در قالب گروهی. - ساخت ماکت‌های سنتی قنات با استفاده از مواد طبیعی.	- آزمون کتبی تشریحی و چندگزینه‌ای. - ارزیابی شفاهی در قالب پرسش و پاسخ. - ارائه گزارش مکتوب و شفاهی از بازدید. - ارزشیابی کارگروهی و نقشه ترسیمی.	دانش‌آموز: بتواند چرخه آب را با جزئیات توضیح دهد. توانایی تشخیص منابع آب طبیعی و مصنوعی را داشته باشد. مسئولیت‌پذیری در مصرف آب را نشان دهد. به صورت شفاهی نقش آب در سلامت انسان و طبیعت را بیان کند.
پایه ۸	- فناوری‌های سنتی مدیریت آب (قنات، آب‌بندان، بندهای خاکی). - آلودگی منابع آب: منابع و انواع. - راهکارهای حفاظت و بهبود کیفیت آب. - معرفی نمونه‌های دانش بومی (تجارب اقوام و جوامع محلی).	- منابع صوتی تصویری از فناوری‌های سنتی و بومی. - مقالات و کتاب‌های پژوهشی درباره قنات و آب‌بندان. - کیت (بسته تجهیزات آزمایشی) آزمایش کیفیت آب. - نرم‌افزارهای آموزشی واقعیت افزوده.	- ساخت مدل‌های مینیاتوری (الگوهای شبیه‌سازی‌شده) قنات و بندهای خاکی. - آزمایش‌های حسی آب سالم و آلوده (رنگ، بو، مزه). - فعالیت‌های بازی گونه برای شناخت آلودگی آب. - شنیدن و تحلیل موسیقی و صداهای طبیعی مربوط به آب.	- مصاحبه با افراد بومی پیرامون مدیریت سنتی آب. - اجرای تئاتر تعاملی درباره اثرات آلودگی آب. - ثبت و نگارش تجربه‌های بومی در دفترچه‌های یادداشت محیط‌زیستی. - تهیه گزارش میدانی با رویکرد محلی.	- آزمون عملی ساخت مدل. - ارزیابی گزارش تحقیق میدانی. - ارزیابی عملکرد در بازی‌ها و فعالیت‌های گروهی. - آزمون کتبی تحلیلی با تمرکز بر مفاهیم حفاظت آب.	دانش‌آموز: فناوری‌های سنتی مدیریت آب را نام ببرد و شرح دهد. اثرات آلودگی بر منابع آب را تحلیل کند. توانایی نقد و بررسی روش‌های حفاظت آب با استفاده از دانش بومی را داشته باشد. مهارت‌های حسی و تجربی را در آزمایش نمونه‌های آب نشان دهد.
پایه ۹	- بحران‌های آب منطقه‌ای: کم‌آبی، خشکسالی، تغییر اقلیم. - فناوری‌های نوین تصفیه، جمع‌آوری و بازیافت آب. - نوآوری‌های بومی در مدیریت منابع آب. - عدالت محیط‌زیستی و مسئولیت اجتماعی در مدیریت آب.	- پایگاه داده و گزارش‌های محیط‌زیستی منطقه‌ای. - نرم‌افزارهای تحلیل داده‌های محیطی و واقعیت افزوده. - کتاب‌ها و مقالات تخصصی مدیریت منابع آب. - ویدیوهای مستند و مصاحبه‌های تخصصی.	- استفاده از نرم‌افزارهای واقعیت افزوده جهت بررسی داده‌های آبی منطقه. - تمرینات گروهی در حل مسائل پیچیده محیط‌زیستی. - تحلیل داده‌های چندحسی (تصویر، صدا، حرکت). - جلسات بازتابی و گفتگوی هم‌افزای دانش‌آموزی.	- همکاری با سازمان‌های محیط‌زیستی محلی و نهادهای بومی. - کارگاه‌های آموزشی با حضور کارشناسان محلی و فعالان محیط‌زیست. - طراحی و ارائه راهکارهای عملی مبتنی بر دانش بومی و فناوری نوین. - مستندسازی پروژه‌ها و انتقال دانش.	- ارزیابی پروژه‌های گروهی و فردی با معیارهای علمی و کاربردی. - ارائه شفاهی و گزارش تحلیلی. - بازخورد از متخصصان محیط‌زیست و بومی. - آزمون کتبی ترکیبی (تشریحی و تستی).	دانش‌آموز: بحران‌های منطقه‌ای آب را تحلیل و راهکار ارائه کند. فناوری‌های نوین و دانش بومی را برای مدیریت آب ترکیب و توصیف کند. عدالت محیط‌زیستی و تأثیرات اجتماعی را شرح دهد. پروژه حل مسئله گروهی برای مدیریت پایدار منابع آب ارائه دهد.

در پژوهش حاضر همسو با (امیری و برومند، ۱۴۰۴ج؛ da Silva و همکاران، ۲۰۲۴؛ Williams، ۲۰۲۳؛ Sandoval-Rivera، ۲۰۲۰) مشخص شد، تأکید بر دانش بومی در حوزه مدیریت پایدار آب، به عنوان چارچوب مفهومی برنامه درسی،

موجب شده است تا محتوای آموزشی از حالت انتزاعی خارج شده و در بستر فرهنگی-محیطزیستی معنا یابد. این رویکرد، که مبتنی بر نظریه یادگیری موقعیتی است، از طریق تقویت ارتباط هویتی و معنایی بین دانش‌آموزان و مسائل محیطزیستی، امکان درونی‌سازی ارزش‌های محیطزیستی را فراهم می‌سازد. همچنین، این برنامه درسی با تلفیق دانش رسمی و دانش محلی، در راستای الگوهای یادگیری مشارکتی حرکت کرده و به افزایش اثربخشی آموزشی و پایداری بوم‌شناختی منجر شده است.

تحلیل جزئیات برنامه در سی تو سعه‌یافته برای پایه‌های سه‌گانهٔ دورهٔ اول متو سطه، نشان‌دهندهٔ طراحی نظام‌مند مبتنی بر سطوح سه‌گانهٔ حوزه شناختی، حوزه عاطفی و حوزه روان‌حرکتی است. این برنامه با تعیین اهداف رفتاری دقیق و به‌کارگیری فعالیت‌های تجربی-حسی، چارچوبی پویا ایجاد نموده که علاوه بر ارتقای دانش نظری، به پرورش مهارت‌های شناختی سطح بالا مانند تفکر انتقادی، حل مسئله محیطزیستی و ت صمیم‌گیری مبتنی بر شواهد می‌پردازد. همچنین، استفاده از روش‌های ارزیابی چندبعدی شامل ارزیابی‌های عملکردی، پورتفولیو[۶۱] و خودارزیابی، امکان سنجش جامع یادگیری دانش‌آموزان را فراهم کرده است. این چارچوب می‌تواند از بروز برخی از مهم‌ترین آسیب‌های رایج آموزش ر سمی آب در ایران، که مطالعهٔ برومند و کلاهی (۱۴۰۰) شناسایی کرده بود، پیشگیری کند.

یکی از نوآوری‌های کلیدی این پژوهش، پیشنهاد تلفیق فناوری‌های پیشرفته آموزشی مانند واقعیت افزوده[۶۲] و محیط‌های یادگیری چندرسانه‌ای با نظام‌های دانش بومی است. این ترکیب، که از آن تحت عنوان یادگیری ترکیبی یاد می‌شود، نه تنها جذابیت آموزشی را افزایش داده، بلکه با ایجاد تعامل پویا بین یادگیرنده و محتوا، منجر به افزایش بازدهی شناختی و یادگیری زمینه‌محور شده است. این مدل می‌تواند به عنوان چارچوب مرجع برای طراحی برنامه‌های درسی سایر حوزه‌های علوم محیطزیست مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های این پژوهش با تحلیل‌های چندسطحی نشان داد که چارچوب برنامه درسی طراحی‌شده با رویکرد حواس‌افزوده قابلیت‌های تحول‌آفرین چشمگیری در تبیین مشکلات حوزه آب و ارائه راه‌حل‌هایی برای مسائل این حوزه به کمک دانش‌های بومی ایرانی دارد. این مدل برنامه‌درسی با فعال‌سازی همزمان مکانیسم‌های پردازش چندحسی و یادگیری زمینه‌مند، نه تنها موجب ارتقای شاخص‌های سه‌گانه دانشی، نگرشی و مهارتی در میان یادگیرندگان می‌شود، بلکه از طریق ایجاد حافظه‌های چندوجهی، ماندگاری محتوای آموزشی را در سطوح مختلف حافظه بلندمدت تضمین می‌نماید. لذا رویکرد حواس‌افزوده در تدوین برنامه‌های درسی و آموزشی با تحریک همزمان مسیرهای عصبی مرتبط با حواس پنجگانه، امکان شکل‌گیری شبکه‌های عصبی یکپارچه را فراهم می‌آورد که این امر به نوبه خود موجب تسهیل فرایند انتقال یادگیری به موقعیت‌های واقعی می‌گردد.

در جمع‌بندی یافته‌های این مطالعه می‌توان گفت ادغام نظام‌مند دانش بومی مدیریت آب با ساختار برنامه درسی رسمی، منجر به ایجاد سازوکارهای میانجی‌گری فرهنگی شده که از طریق تقویت همبستگی هویتی و ارتباطات بینافرهنگی، موجبات درونی‌سازی عمیق‌تر مفاهیم محیطزیستی را فراهم نموده است. این یافته‌ها با تئوری یادگیری اجتماعی-فرهنگی[۶۳] در تناسب کامل قرار دارد که بر نقش محوری ابزارهای فرهنگی و جامعه‌پذیری بوم‌شناختی در فرایند یادگیری تأکید می‌ورزد. شایان ذکر است که این برنامه با طراحی فعالیت‌های یادگیری تجربی چندحسی و به‌کارگیری الگوهای ارزیابی تکوینی چندمعیاره، چارچوبی جامع برای تحقق یادگیری عمیق محیطزیستی ارائه نموده است. هم‌چنین در بعد فناورانه، این پژوهش مؤید آن است که ادغام فناوری‌های شناختی-حسی مانند واقعیت افزوده تعاملی و شبیه‌سازهای چندحسی با نظام‌های دانش بومی، منجر به ایجاد محیط‌های یادگیری هیبریدی[۶۴] شده که از قابلیت‌های منحصر به فردی در ایجاد تعاملات انسان-محیطزیست برخوردارند. این رویکرد که از آن تحت عنوان یادگیری تقویت‌شده دیجیتال-فرهنگی یاد می‌شود، نه تنها موجب افزایش سطح درگیری شناختی شده، بلکه از طریق ایجاد تجربیات غنی‌شده حسی، امکان مدل‌سازی ذهنی مفاهیم پیچیده محیطزیستی را برای یادگیرندگان فراهم می‌آورد.

در پایان سه ملاحظه مهم خاطرنشان می‌شود:

۱. با توجه به محدود بودن نظام قنات به برخی مناطق خاص کشور، به طور کلی باید تلاش شود که عقلانیت بوم‌شناختی[۶۵] و خرد بومی سازنده آن برای فراگیران تبیین شود تا با نگاهی کل‌نگرتر، تنوع الگوهای بهره‌برداری پایدار از منابع آب در ایران بازنمایی شود. بدین منظور، باید در برنامه‌های آموزشی و درسی علاوه بر برجسته‌سازی نظام‌های سنتی چون قنات، به چالش‌هایی نظیر نقش چاه‌های عمیق، سدسازی‌های بی‌رویه و مصارف آب‌بر صنعتی و راهکارهای بومزاد مقابله با آن‌ها نیز پرداخت تا غنای مکانی الگوهای یادگیری محیطزیست در زمینه‌های گوناگون حفظ شود. افزون‌براین، مسئله چاه‌های عمیق و تبعات آن به‌عنوان یک موقعیت آموزشی برای نقد رویکردهای ناپایدار مدیریت آب، در قالب فعالیت‌های تحلیلی باید در برنامه درسی لحاظ شود.

۲. با توجه به تفاوت سطح برخورداری مدارس در کشور، لازم است دولت (عمدتاً در وزارت آموزش‌وپرورش با همکاری سازمان حفاظت محیطزیست) تمهداتی را پیش‌بینی نماید تا همه مدارس اعم از مدارس مناطق کم‌برخوردار، مدارس دارای امکانات معمول و مدارس

برخوردار با زیرساخت‌های پیشرفته حسی-تعاملی بتوانند برنامه‌های درسی خلاق نظیر آنچه در این تحقیق مفهوم‌پردازی و چارچوب‌بندی شد را اجرا کنند. در این راستا تلاش شده تا برنامه ارائه شده در این تحقیق، امکان تطبیق‌پذیری با شرایط متنوع مکانی، اقلیمی و زیرساختی کشور را داشته باشد.

۳. در تدوین برنامه‌های درسی و آموزشی محیط‌زیست برای پایه‌های سه‌گانهٔ دوره اول متوسطه، تلفیق هوشمندانه آموزش رسمی و غیررسمی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آموزش رسمی، به‌ویژه از طریق طراحی بسته‌های مکمل برای کتاب‌های درسی علوم، مطالعات اجتماعی و فرهنگ و هنر، فرصت‌هایی نظام‌مند برای ادغام مفاهیم محیط‌زیستی در جریان یاددهی-یادگیری فراهم می‌آورد و به تثبیت محتوای علمی، شناختی و ارزشی در قالب ساختارهای درسی کمک می‌کند. از سوی دیگر، آموزش‌های غیررسمی همچون طرح داناب[۶۶] و اردوهای موضوعی دانش‌آموزی با ایجاد بسترهای تجربه‌محور، مشارکتی و محیط‌محور، زمینه فعال‌سازی یادگیری عاطفی، حسی و زیسته را فراهم کرده و پیوند دانش‌آموز با بوم‌محیط پیرامون خود را تقویت می‌کنند. این رویکرد تلفیقی نه‌تنها به تعمیق یادگیری و ارتقاء انگیزش دانش‌آموزان منجر می‌شود، بلکه به انعطاف‌پذیری برنامه درسی و انطباق آن با شرایط محلی، ظرفیت‌های مدرسه و تفاوت‌های اقلیمی مناطق مختلف کشور نیز کمک می‌کند.

پیشنهادات راهبردی و پژوهشی این مطالعه عبارتند از:

۱. اجرای آزمایشی کنترل‌شده و ارزیابی سیستماتیک: پیشنهاد می‌شود این برنامه درسی در قالب یک آزمایش میدانی تصادفی‌سازی‌شده با گروه‌های آزمایش و کنترل در مدارس منتخب اجرا شود و از طریق روش‌های ترکیبی ارزیابی شامل سنجه‌های عینی عملکرد، پروتکل‌های تفکر بلند و تجزیه و تحلیل داده‌های رفتاری مورد ارزیابی جامع قرار گیرد.

۲. بومی‌سازی پویا و چندسطحی محتوا: ضروری است فرایند سازگاری فرهنگی-بوم‌شناختی محتوای برنامه با استفاده از چارچوب طراحی واکنش‌گرا و با مشارکت هیئت‌های کارشناسی چندرشته‌ای به صورت مستمر انجام پذیرد تا از تناسب محتوا با ویژگی‌های اکوسیستمی-فرهنگی هر منطقه اطمینان حاصل شود.

۳. برنامه تربیت مدرس تخصصی: طراحی و اجرای دوره‌های توانمندسازی حرفه‌ای برای معلمان با تأکید بر سه محور رویکردهای چندحسی، فناوری‌های آموزشی پیشرفته و مبانی انسان‌شناسی محیط‌زیستی از ضروریات اجرای موفق این برنامه محسوب می‌شود.

۴. تعمیم پارادایمی به سایر حوزه‌های محیط‌زیستی: پیشنهاد می‌شود این چارچوب به سایر حوزه‌های حیاتی محیط‌زیست از جمله مدیریت چرخه مواد و پسماند، حفاظت از تنوع زیستی و انرژی‌های پایدار تعمیم داده شود و از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای تنظیم پارامترهای آموزشی در هر حوزه استفاده گردد.

۵. ایجاد شبکه‌های یادگیری جامعه‌محور: تشکیل شبکه‌های دانش جمعی متشکل از ذی‌نفعان محلی، متخصصان آموزش محیط‌زیست و سازمان‌های مردم‌نهاد با استفاده از پلتفرم‌های یادگیری اجتماعی هوشمند می‌تواند به ایجاد حلقه‌های بازخورد تکاملی بین نظام‌های دانش رسمی و غیررسمی منجر گردد.

سپاسگزاری

در این پژوهش با ۷ عضو محترم هیئت علمی (۴ استادیار، ۲ دانشیار و ۱ استاد از دانشگاه تهران، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشگاه فرهنگیان، دانشگاه آزاد اسلامی و دانشگاه پیام نور)، ۳ پژوهشگر و سیاست‌گذار آموزشی (شاغل در آموزش و پرورش)، ۲ متخصص مستقل آموزش محیط‌زیست و علوم اجتماعی و ۶ معلم پایه‌های هفتم تا نهم مصاحبه شد. همچنین روایی محتوای برنامه درسی طراحی‌شده، با بهره‌گیری از نظرات ۱۲ نفر از همین متخصصان سنجیده شد. از تمامی این اندیشمندان گرانقدر که اطلاعات و دیدگاه‌های ارزشمند خود را بدون هیچ چشم‌داشتی ارائه کردند، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

امیری، محمدجواد و برومند، امیرعلی. (۱۴۰۴الف). شالوده آموزش محیط‌زیست. انتشارات دانشگاه تهران، تهران. ایران. https://press.ut.ac.ir/book_4036.html

امیری، محمدجواد و برومند، امیرعلی. (۱۴۰۴ب). مباحث ویژهٔ آموزش محیط‌زیست. انتشارات دانشگاه تهران، تهران. ایران. https://press.ut.ac.ir/book_4031.html

امیری، محمدجواد و برومند، امیرعلی. (۱۴۰۴ج). مهندسی آموزش محیط‌زیست. انتشارات دانشگاه تهران، تهران. ایران. https://press.ut.ac.ir/book_4032.html

برومند، امیرعلی و امیری، محمد جواد. (۱۴۰۳الف). ارائه طرح‌وارهٔ مفهومی آموزش حواس افزوده محیط‌زیست: رهیافتی به‌سوی پایداری. محیط‌شناسی، ۵۰(۲)، ۲۳۷-۲۶۱. https://doi.org/10.22059/jes.2022.340394.1008297

برومند، امیرعلی و امیری، محمد جواد. (۱۴۰۳ب). واکاوی تجارب زیستهٔ والدین مشهدی از تربیت محیط‌زیستی فرزندانشان. جامعه‌شناسی کاربردی، ۳۵(۱)، ۱۰۹-۱۳۸. https://doi.org/10.22108/jas.2024.139823.2449

برومند، امیرعلی و کلاهی، مهدی. (۱۴۰۰). آسیب‌شناسی آموزش آب در درس «انسان و محیط‌زیست» (پایه یازدهم، متوسطه دوم). تدریس پژوهی، ۹(۱)، ۲۳۳-۲۰۵. 20.1001.1.24765686.1400.9.1.10.2

برومند، امیرعلی، امیری، محمد جواد و فریادی، شهرزاد. (۱۴۰۳). پدیدارشناسی «اضطراب محیط‌زیستی» برآمده از تجربیات یادگیری آموزش رسمی محیط‌زیست. پژوهش‌های محیط‌زیست، ۱۵(۲۹)، ۶۵-۹۵. https://doi.org/10.22034/eiap.2024.375618.2475

پاپلی یزدی، محمدحسین و وثوقی، فاطمه. (۱۳۹۸). تحلیل فرهنگی دانش بومی در زنجیره ابزار قنات. دانش‌های بومی ایران، ۶(۱۲)، ۹-۴۰. https://doi.org/10.22054/qjik.2020.12355

پاپلی یزدی، محمدحسین و وثوقی، فاطمه. (۱۴۰۱). فرهنگ و تمدن کاریزی. انتشارات پاپلی. تهران. ایران.

صادقی‌زاده بافنده، شهرزاد، میرهاشمی دهکردی، سیده سیمین و میان‌آبادی، حجت. (۱۳۹۸). واکاوی شاخص‌های حکمرانی خوب در دانش بومی قنات قصبه گناباد. دو فصلنامه دانش‌های بومی ایران، ۶(۱۲)، ۵۰۳-۵۳۳. https://doi.org/10.22054/qjik.2021.55849.1232

طباطبایی یزدی، فاطمه و برومند، امیرعلی. (۱۴۰۱). رسالت آموزشی موزه‌های تاریخ طبیعی: رویکردهای نوین و کارآمد. انتشارات پژوهشکده محیط‌زیست جهاددانشگاهی. رشت. ایران. https://profdoc.um.ac.ir/book-abstract-224686.html

ملک‌زاده، علی، طباطبایی یزدی، فاطمه، برومند، امیرعلی و نوغانی دخت بهمنی، محسن. (۱۴۰۱). نیم‌رخ تنوع زیستی در دانش، نگرش و رفتار (KAP) شهروندان کلان‌شهر مشهد با رویکرد توسعه پایدار. جغرافیا و پایداری محیط، ۱۲(۲)، ۵۷-۳۷. https://doi.org/10.22126/ges.2022.7529.2506

Boroumand, A., Amiri, M. J., & Faryadi, S. (2026). An Analysis of Eco-Emotions Among Iranian Students in Environmental Education. International Journal of Environmental Research, 20(1), 54. https://doi.org/10.1007/s41742-025-01001-4

Jeronen, E., Jeronen, J., & Raustia, H. (2009). Environmental Education in Finland--A Case Study of Environmental Education in Nature Schools. International Journal of Environmental and Science Education, 4(1), 1-23.

Bögeholz, S. (2006). Nature experience and its importance for environmental knowledge, values and action: Recent German empirical contributions. Environmental education research, 12(1), 65-84. https://doi.org/10.1080/13504620500526529

Frantz, C. M., & Mayer, F. S. (2014). The importance of connection to nature in assessing environmental education programs. Studies in educational evaluation, 41, 85-89. https://doi.org/10.1016/j.stueduc.2013.10.001

Hill, A. (2013). The place of experience and the experience of place: Intersections between sustainability education and outdoor learning. Australian Journal of Environmental Education, 29(1), 18-32. https://doi.org/10.1017/aee.2013.13

Russell, C. L. (1999). Problematizing nature experience in environmental education: The interrelationship of experience and story. Journal of Experiential Education, 22(3), 123-137. https://doi.org/10.1177/105382599902200304

Mullenbach, L. E., Andrejewski, R. G., & Mowen, A. J. (2019). Connecting children to nature through residential outdoor environmental education. Environmental Education Research, 25(3), 365-374. https://doi.org/10.1080/13504622.2018.1458215

Otto, S., & Pensini, P. (2017). Nature-based environmental education of children: Environmental knowledge and connectedness to nature, together, are related to ecological behaviour. Global environmental change, 47, 88-94. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.09.009

Ives, C. D., Abson, D. J., Von Wehrden, H., Dorninger, C., Klaniecki, K., & Fischer, J. (2018). Reconnecting with nature for sustainability. Sustainability science, 13, 1389-1397. https://doi.org/10.1007/s11625-018-0542-9

Palmer, J. (2002). Environmental education in the 21st century: Theory, practice, progress and promise. London: Routledge. 300. https://doi.org/10.4324/9780203012659

Kushmerick, A., Young, L., & Stein, S. E. (2007). Environmental justice content in mainstream US, 6–12 environmental education guides. Environmental Education Research, 13(3), 385-408. https://doi.org/10.1080/13504620701430745

Guevara-Herrero, I., Bravo-Torija, B., & Pérez-Martín, J. M. (2024). Educational practice in education for environmental justice: A systematic review of the literature. Sustainability, 16(7), 2805. https://doi.org/10.3390/su16072805

Sandoval-Rivera, J. C. A. (2020). Environmental education and indigenous knowledge: Towards the connection of local wisdom with international agendas in the framework of the Sustainable Development Goals (SDGs). Diaspora, Indigenous, and Minority Education, 14(1), 14-24. https://doi.org/10.1080/15595692.2019.1652588

da Silva, C., Pereira, F., & Amorim, J. P. (2024). The integration of indigenous knowledge in school: a systematic review. Compare: A Journal of Comparative and International Education, 54(7), 1210-1228. https://doi.org/10.1080/03057925.2023.2184200

Beery, T., & Jørgensen, K. A. (2018). Children in nature: sensory engagement and the experience of biodiversity. Environmental Education Research, 24(1), 13-25. https://doi.org/10.1080/13504622.2016.1250149

Blades, G. (2021). Making meanings of walking with/in nature: Embodied encounters in environmental outdoor education. Journal of Outdoor and Environmental Education, 24(3), 293-318. https://doi.org/10.1007/s42322-021-00087-6

Li, D., Zhai, Y., Chang, P. J., Merrill, J., Browning, M. H., & Sullivan, W. C. (2022). Nature deficit and senses: Relationships among childhood nature exposure and adulthood sensory profiles, creativity, and nature relatedness. Landscape and Urban Planning, 226, 104489. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104489

Williams, L. (2023). From Indigenous philosophy in environmental education to Indigenous planetary futures: what would it take?. Australian Journal of Environmental Education, 39(3), 320-335. https://doi.org/10.1017/aee.2023.23

پی‌نوشت‌ها

1- Environmental Education

2- Sensory Approach
3- Environmental Literacy
4- Eco-cultural Dimensions
5- Indigenous Knowledge
6- Socio-ecological Structure
7- Place-Based Approaches
8- Education for Sustainable Development (ESD)
9- Local Ecological Knowledge (LEK)
10- Transformative Learning Pathway
11- Collaborative Learning
12- Environmental Awareness
13- Indigenized / Localized Curriculum
14- Emergent Curriculum Framework
15- Contextualized Curriculum
16- Experiential Learning
17- Place-Embeddedness / Place-Embedded Living
18- Local Narratives / Place-Based Stories
19- Situated Learning

۲۰- Collaborative Learning: رویکردی آموزشی که در آن یادگیری از طریق تعامل فعال، گفت‌وگو، هم‌اندیشی و مسئولیت مشترک میان یادگیرندگان شکل می‌گیرد. در این رویکرد، دانش نه به‌صورت انتقال یک‌سویه، بلکه در فرایندی اجتماعی و مشترک ساخته می‌شود. در زمینه آموزش محیط‌زیست و آب (ویژه متوسطه اول)، یادگیری مشارکتی می‌تواند شامل: کار گروهی برای بررسی مسائل محلی آب (مصرف، آلودگی، کم‌آبی)، گفت‌وگو و تصمیم‌گیری جمعی درباره راه‌حل‌های پایدار، پروژه‌های مشترک میدانی و مدرسه‌محور و تقویت مهارت‌های اجتماعی، مسئولیت‌پذیری و تفکر انتقادی باشد. از منظر نظری، یادگیری مشارکتی ریشه در نظریه یادگیری اجتماعی-فرهنگی (Sociocultural Learning Theory)دارد و بر این اصل تأکید می‌کند که معنا و فهم در بستر تعاملات اجتماعی و فرهنگی شکل می‌گیرند. هم‌چنین در برنامه درسی مکان‌مند و بوم‌گرا، یادگیری مشارکتی زمینه‌ساز خلق حس تعلق، افزایش آگاهی محیط‌زیستی و کنش‌گری مسئولانه نسبت به منابع آب می‌شود.

21- Active Learning Methods
22- Ecological Learning
23- Practical Competencies
24- Coherent
25- Place-Based
26- Transformative
27- Sense of Place Attachment / Place Belonging
28- External / object-oriented phenomenon
29- embodied, emotional, and intersubjective experience
30- Transdisciplinary
31- Interdisciplinary
32- Systems Thinking
33- Action-Oriented
34- Development of Ecological Literacy
35- Post-Positivist Paradigm
36- Mind–Body and Human–Nature Dualism

۳۷- مطالعات ایرانی متمرکز بر احساسات روان‌بوم‌شناختی نقطه عطفی در گذار آموزش محیط‌زیست از رویکردهای صرفاً شناخت‌محور به فهم عمیق تجربه زیسته عاطفی فراگیران محسوب می‌شوند. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد امیرعلی برومند با اتخاذ پارادایم تفسیری و روش پدیدارشناسی توصیفی، برای نخستین‌بار در بستر نظام آموزش‌وپرورش رسمی ایران، احساسات روان‌بوم‌شناختی دانش‌آموزان را نه به‌عنوان پیامدهای جانبی آموزش، بلکه به‌مثابه هسته مرکزی فرایند یاددهی-یادگیری محیط‌زیست مفهوم‌پردازی می‌کند. این مطالعه با اتکا به مصاحبه‌های عمیق با ۶۳ دانش‌آموز، توانست طیفی چندلایه از احساسات منفی، مثبت، خنثی و حتی «ناشناخته» را شناسایی کند و از این طریق نشان دهد که آموزش رسمی محیط‌زیست در ایران واجد بار عاطفی پیچیده‌ای است که بدون فهم آن، هرگونه مداخله آموزشی ناقص خواهد بود. در گام تحلیلی بعدی، نوآوری اصلی آثار برومند در شناسایی و تبیین عوامل ساختاری، شناختی و نهادی شکل‌دهنده این احساسات آشکار می‌شود. تأکید بر «خطاهای شناختی دانش‌آموزان» به‌عنوان عاملی مستقل و تعیین‌کننده در بروز احساسات روان‌بوم‌شناختی، تمایزی مهم میان این پژوهش و همتایان بین‌المللی آن ایجاد می‌کند. هم‌زمان، نقش پایه تحصیلی، فلسفه آموزشی معلمان، سطح تخصص و شیوه مواجهه آن‌ها با دغدغه‌های عاطفی دانش‌آموزان، آموزش محیط‌زیست را به‌مثابه یک میدان تعاملی-عاطفی بازنمایی می‌کند. مقاله «پدیدارشناسی اضطراب محیط‌زیستی» این خط فکری را بسط داده و نشان می‌دهد که آگاهی از بحران‌های محیط‌زیستی، در غیاب سازوکارهای تنظیم هیجانی و کنش‌محور، می‌تواند به اضطراب، انکار، بی‌تفاوتی یا حتی گسست عاطفی دانش‌آموزان از فرایند آموزش منجر شود؛ وضعیتی که به‌روشنی پیامدهای تربیتی و روانی عمیقی دارد. در آثار بین‌المللی اخیر برومند و همکاران، به‌ویژه مقاله منتشرشده در *International Journal of Environmental Research*، این بدنه پژوهشی از سطح توصیف بومی فراتر رفته و به یک چارچوب مفهومی میان‌رشته‌ای ارتقا می‌یابد. در این مرحله، احساسات روان‌بوم‌شناختی به‌عنوان متغیرهای میانجی میان آگاهی محیط‌زیستی، سلامت روان، کنشگری محیط‌زیستی و اثربخشی آموزش بازتعریف می‌شوند. گونه‌شناسی شیوه‌های مواجهه معلمان با احساسات دانش‌آموزان (انکار، پذیرش، سکوت و تردید) و تأکید بر ضرورت سواد عاطفی محیط‌زیستی، نشان می‌دهد که مسئله اصلی نه صرفاً «وجود اضطراب یا امید»، بلکه نحوه مدیریت نهادی و آموزشی این احساسات است. بدین‌ترتیب، این آثار را می‌توان بنیان‌گذار گفتمانی نو در مطالعات ایرانی دانست که آموزش محیط‌زیست را به عرصه‌ای برای پیوند روان‌بوم‌شناسی، سیاست‌گذاری آموزشی و تاب‌آوری روانی نسل جوان در مواجهه با عدم‌قطعیت‌های بوم شناختی تبدیل می‌کند.

38-Epistemic Colonization / Colonization of Knowledge

۳۹- . منظومه آثار محمدحسین پاپلی یزدی در حوزه دانش‌های بومی، به‌ویژه با تمرکز بر قنات و تمدن کاریزی، یک دستگاه فکری منسجم را شکل می‌دهد که دانش بومی را نه به‌عنوان مجموعه‌ای از دانسته‌های پراکنده محلی، بلکه به‌مثابه نظامی عقلانی، نهادی و فضایی برای تنظیم رابطه انسان و محیط بازتعریف می‌کند. در آثار اولیه و میانی او، از «واحد تقسیم آب در نظام‌های آبیاری سنتی (فنجان)» تا پژوهش‌های مربوط به دامداری، مرتع و سکونتگاه‌های روستایی، قنات در پیوند با عرف، مالکیت، مشارکت اجتماعی و اخلاق محیط‌زیستی تحلیل می‌شود. در این خوانش، قنات صرفاً یک فناوری انتقال آب نیست، بلکه هسته‌ای از تمدن کاریزی است که دانش فنی، زبان تخصصی، نظام‌های مشارکتی و حافظه تاریخی جوامع محلی را در خود ادغام کرده و امکان زیست پایدار در سرزمین‌های خشک و نیمه‌خشک ایران را فراهم ساخته است. در گام بعدی، پاپلی یزدی با عبور از توصیف مردم‌نگارانه، به نقد اجتماعی و توسعه‌ای فروپاشی تمدن کاریزی در مواجهه با مدرنیته آبی می‌پردازد. مقالاتی درباره پیامدهای اجتماعی بحران آب، اثرات محیط‌زیستی و اجتماعی چاه‌های عمیق و مطالعه زیست‌جهان جوامع کویری نشان می‌دهد که جایگزینی قنات با نظام‌های متمرکز و تکنوکراتیک استخراج آب، به تضعیف عدالت آبی، ازهم‌گسیختگی شبکه‌های همیاری محلی و زوال اخلاق صرفه‌جویی انجامیده است. در این چارچوب، بحران آب نه صرفاً نتیجه کمبود منابع طبیعی، بلکه پیامد نادیده‌گرفتن دانش بومی و حذف نهادهای محلی مدیریت آب تلقی می‌شود؛ امری که شکاف میان جامعه، محیط و سیاست‌گذاری را تشدید کرده است. در آثار متأخر، این نقد در سطحی کلان‌تر و در قالب مباحث ژئوپلیتیکی و حکمرانی آب بسط می‌یابد و قنات و دانش کاریزی به‌عنوان بدیلی نظری برای مدیریت پایدار منابع آب بازخوانی می‌شوند. پاپلی یزدی با پیوند دادن سیاست فضایی، تمرکزگرایی اداری، تغییرات اقلیمی و تنش‌های هیدروپلیتیکی،

نشـان می‌دهـد کـه احیـای عقلانیـت تمـدن کـاریزی مسـتلزم بازاندیشی در نسبت انسان، تکنیک، مـدیریت و محیط است. بدین‌سان، منظومه آثار او قنات را از سطح یک میراث تاریخی فراتر می‌برد و آن را به الگویی مفهومی برای آینده توسعه پایدار در ایران بدل می‌کند؛ الگویی که بر عدالت اجتماعی، مشارکت محلی و حکمرانی چندسطحی آب استوار است.

۴۰- منظومه آثار خدیجه بوزرجمهری در حوزه «دانش بومی» واجد یک پیوستار نظری-تجربی منسجم است که از اوایل دهه ۱۳۸۰ تاکنون، دانش محلی را نه صرفاً به‌مثابه میراثی فرهنگی، بلکه بـه‌عنوان یـک منبـع کـارکردی بـرای توسـعه پایـدار روسـتایی صورت‌بندی می‌کند. در آثار اولیه او مانند «جایگاه دانش بومی در توسعه روستایی پایدار» و «تحلیل جایگاه دانش بومی در توسـعه روسـتایی»، دانـش بـومی در قالـب یـک نظـام دانـایی زمینه‌منـد، تـاریخی و تجربـه‌محور تبیـین می‌شـود کـه قابلیـت پاسخ‌گویی به مسائل معیشتی، محیط‌زیستی و اجتماعی روستا را دارد. این رویکرد، دانش بومی را در تقابل با دانش رسمی قرار نمی‌دهـد، بلکـه بـر امکـان هم‌افزایـی و ترجمـان آن در سیاسـت‌گذاری و برنامـه‌ریزی تأکیـد می‌کنـد؛ نکتـه‌ای کـه در بسیاری از مطالعات متأخر او به‌صورت ضمنی یا صریح دنبال شده است. در بخش مهمی از آثار بوزرجمهری، دانش بومی با محوریت زنان روستایی و دانش اکولوژیکی آنان برجسته می‌شود. مقالاتی نظیر «شناخت دانش کشاورزی بومی زنان روستایی»، «دانـش کشـاورزی بـومی جنسـیتی»، و «نقـش دانـش بـومی اکولوژیکی زنان روستایی در مدیریت پایدار منابع طبیعی» نشان می‌دهند که چگونه تجربه زیسته، تقسیم کار جنسیتی و حافظه محیطی زنان، به شکل‌گیری الگوهای بومی مدیریت منابع آب، خاک، دام و تنـوع زیسـتی انجامیـده اسـت. در ایـن آثـار، دانـش بومی نه‌تنها یک ابزار بقا، بلکه یک سازوکار قدرت نرم اجتماعی است کـه از طریـق آن، زنـان در فرآینـدهای تصـمیم‌گیری محلـی، تـاب‌آوری اجتمـاعی و حفاظـت محیط‌زیسـت نقـش فعـال ایفـا می‌کنند. این نگاه جنسیتی-اکولوژیک، یکی از وجوه تمایزبخش کارنامه علمی بوزرجمهری در ادبیات دانش بومی ایران به شمار می‌رود. در مرحله تکاملی‌تر این منظومه فکری، دانش بومی در پیونـد بـا مـدیریت مخـاطرات، تـاب‌آوری و توسـعه گردشـگری روسـتایی بـازتعریف می‌شـود. پژوهش‌هـایی دربـاره نقـش دانـش بومی در کاهش آسیب‌پذیری در برابر سیل، خشکسالی و زلزله، یا مطالعات مرتبط با بوم‌گردی، صنایع‌دستی و گردشگری آیینی، نشان می‌دهد که این دانش چگونه می‌تواند به‌عنوان سرمایه‌ای نامرئی در برنامه‌ریزی فضایی و توسعه محلی به کار گرفته شود. حتـی در آثـار جدیـدتر بـا انتشـار بین‌المللـی، ماننـد مقالـه منتشرشده در *Tourism Recreation Research*، ردپای نگاه مبتنـی بـر دانـش محلـی و ادراکـات بـومی (نظیـر ادراک خطـر و امنیت) قابل مشاهده است. در مجموع، منظومه آثار خدیجه بوزرجمهری تصویری از دانش بومی به‌عنوان پیونددهنده جامعه، محیط و اقتصاد محلی ارائه می‌دهد؛ دانشی که از سطح توصیف فراتر رفته و به یک چارچوب تحلیلی و سیاست‌پذیر برای توسعه پایدار روستایی تبدیل شده است.

41- Narrative-Place Pedagogy
42- Design and Development Research
43- In-depth Semi-Structured Interviews
44- Participant Observation
45- Focus Groups
46- Theoretical Sampling
47- Lincoln & Guba
48- Transferability
49- Dependability
50- Confirmability
51- Content Analysis
52- Braun & Clarke's Six-Phase Thematic Analysis
53- Holsti's Method
54- Citation Frequency
55- Degree of Salience / Visibility
56- UN Sustainable Development Goals (SDGs) and IPBES Reports
57- Sense of Loss
58- Critical Eco-Affects
59- Engaged / Participatory Learner
60- Concept Co-Occurrence Intensity Map
61- Learning Portfolio
62- Augmented Reality (AR)
63- Sociocultural Learning Theory
64- Hybrid Learning Environments

۶۵- عقلانیـت بوم‌شـناختی نـوعی چـارچوب اندیشـه و تصـمیم‌گیری است کـه کنـش انسـانی را در پیونـدی درهم‌تنیـده بـا سـامانه‌های طبیعی، محـدودیت‌های محیط‌زیسـتی و پویایی‌هـای بوم‌شـناختی می‌فهمد و از عقلانیت ابزاري صرف فراتر می‌رود. در این رویکرد، کارآمـدی نـه بـر اسـاس بیشـینه‌سـازی منـافع کوتاه‌مـدت، بلکـه بـر مبنـای تـاب‌آوری اکوسیسـتم‌ها، عـدالت بین‌نسـلی، ظرفیت‌هـای بازتولیـد طبیعـت و یـادگیری تطبیقـی تعریـف می‌شـود. عقلانیـت بوم‌شناختی بر شـناخت عـدم‌قطعیت، پیچیـدگی و غیرخطی‌بودن فراینـدهای طبیعـی تأکیـد دارد و تصـمیم‌گیری را بـه فراینـدی زمینه‌منـد، مشـارکتی و حسـاس بـه مقیاس‌هـای مکـانی و زمـانی تبدیل می‌کند. از این منظر، سیاست‌گذاری و حکمرانی مطلوب زمانی محقق می‌شود که دانش علمی، دانش بومی و ارزش‌های اخلاقی محیط‌زیستی در یک فرآیند هم‌افزا ادغام شوند تا کنش انسانی با منطق پایداری و ظرفیت‌های واقعی زیست‌کره هم‌راستا گردد.

۶۶- طرح"داناب" (طرح ملی دانش‌آموزی نجات آب) از پانزده سال پیش برای کمک به حل بحران آب در نظام آموزش رسمی کشور شکل گرفته و در یک مسیر پر فراز و نشیب، با همکاری انبوهی از افراد متعهد و علاقه‌منـد تـا بـه امـروز ادامـه پیـدا کـرده اسـت. داناب بـرای مخاطـب دانش‌آمـوزان مقطـع راهنمـایی سـابق یـا متوسـطه اول فعلـی، تعریـف شـده اسـت؛ نوجوانـانی کـه از یـک طـرف، از دوران ابتـدایی عبـور کـرده و درک بهتـری از موضـوعات انتزاعی مثل آب زیرزمینی دارند و از طرف دیگه هنوز بطور کامل درگیر موضوعاتی مثل کنکور و بازار کار و ... نشده‌اند. قاعدتا این گروه، تنها بخشی از جامعه نیستند که باید با آب و نجات آب آشـنا شـوند، امـا یکـی از بهتـرین و مسـتعدترین افـراد جامعـه هستند و دست انـدرکاران طرح امیدوارنـد کـه از طریـق اسـتمرار اجرای طرح داناب، در آینده‌ی نزدیک به نسلی آگاه، حساس و مسئولیت‌پذیر نسبت به آب، نزدیک شویم. آموزش‌های داناب، به دنبال ایجاد یک تصویر منسجم از مسئله آب و راه‌های کمک به نجات آن در ذهن دانش‌آموزان است. از آنجایی که موضوعات آبـی در نـواحی و اسـتان‌های مختلـف، متفـاوت اسـت، در کنـار مسائل عمـومی، موضـوعات آموزشـی طرح داناب در هر استان، تنظیم و بومی‌سازی می‌شود. موضوعاتی مثل آب‌های زیرزمینی و یا آب مجازی، از مهم‌ترین محورهایی است که تقریبا در تمامی کشور دنبال می‌گردد. از سال ۱۳۹۷ نیز، هرسال، یک موضوع در میـان موضـوعات متنـوع آبـی، بـه‌عنوان موضـوع کلیـدی سـال انتخاب‌شده و در هر نقطه از کشور، متناسب با مثال‌های محلی، مـورد آمـوزش عمیـق‌تر قـرار می‌گیـرد. آموزش‌هـای طـرح داناب، بصورت شـبکه‌ای و بـا مـدلی بـه نـام گلولـه برفـی منتقـل می‌شـود. شرکت مدیریت منابع آب ایران به‌عنوان متولی بخش آب کشور و از زیرمجموعـه‌های وزارت نیـرو در کنـار وزارت آمـوزش‌وپرورش به‌عنوان مسئول و مجری نظام آموزش‌های رسمی، حامی و راهبر ملی طرح داناب هستند به صورتی که شرکت‌های آب منطقه‌ای و ادارات کـل آمـوزش‌وپرورش در اسـتان‌ها، پیشـبرد عملیـاتی آن را دنبال می‌کننـد. ایـده پـرداز و مشـاور ملـی طـرح سـواد آبـی (گـروه مهندسی-اجتماعی آبانگاه) نیز مسئولیت‌های مرتبط با تعریف و پیشبرد ابعاد فنـی و نظارتی طرح را بر عهـده دارد. در تعـدادی از اسـتان‌ها، شـرکت‌های آب منطقـه‌ای، از مشـاوران اسـتانی بـرای کمـک بـه پیشـبرد طـرح، اسـتفاده می‌نماینـد. سـازمان حفاظـت محیط‌زیسـت و نیـز کمیسـیون ملـی یونسـکو در ایـران، از جملـه دستگاه‌هایی بوده‌اند که به رشد و بالندگی هر چه بیشتر طرح، کمـک نموده‌انـد. اولـین بـار طـرح داناب، بـر اسـاس مطالعـات و

پژوهش‌های اجتماعی که نشان می‌داد، مخاطب دانش‌آموز از مناسب‌ترین مخاطبان برای آموزش‌های آبی می‌باشند، در استان خراسان رضوی تعریف شد و پس از موفقیت در فاز اولیه در سال ۱۳۸۹، در ۶ استان، به‌عنوان پایلوت‌های ملی توسعه پیدا کرد. بر اساس ارزیابی‌هایی که اثربخشی و کارایی طرح را نشان می‌داد، این طرح از سال تحصیلی ۹۱-۱۳۹۰ در تقریبا تمامی ۳۱ استان ایران تعریف می‌شود. هرساله با جمع‌بندی بازخوردهای پیشبرد طرح داناب از استان‌های مختلف، تلاش می‌شود تا بهبودهایی در پیشبرد طرح برای ادامه مسیر دیده شود. پس از عبور از غول کرونا و پایان آموزش های مجازی بار دیگر با فراهم شدن شرایط برای آموزش حضوری و با همت مضاعف دست اندرکاران، اجرای هر چه بهتر طرح در مدارس و ذنجیره انتقال آموزش ها به دانش آموزان مجددا آغاز گردیده است (برای اطلاعات تکمیلی مراجعه کنید به: https://www.danab.ir/).

نشریه آب و توسعه پایدار. آذر ماه ۱۴۰۴
سال دوازدهم. شماره سوم (پیاپی ۳۷). صفحات ۱۵۶ تا ۱۶۳

Journal of Water and Sustainable Development. December 2025
Volume 12. Lssue 3 (Serial No. 37). pages 156 to 163

نوع مقاله: مروری

Document Type: Review Article

مروری بر کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت هوشمند آبیاری

زهرا ایاب کوشک گذر[۱]، سید محمدرضا ناقدی فر[۲]، علی‌نقی ضیایی[۳*]

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار و دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

*رایانامه نویسنده مسئول: an.ziaei@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت ◄ ۱۴۰۴/۰۳/۲۶
تاریخ بازنگری ◄ ۱۴۰۴/۰۵/۱۲
تاریخ پذیرش ◄ ۱۴۰۴/۰۵/۲۵
تاریخ انتشار ◄ ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

چکیده

باتوجه‌به چالش‌های فزاینده ناشی از کمبود منابع آب، رشد جمعیت، تغییرات اقلیمی و ضرورت افزایش بهره‌وری در کشاورزی، به‌کارگیری فناوری‌های نوین همچون هوش مصنوعی (AI) در مدیریت آبیاری به عنوان رویکردی تحول‌آفرین در نظر گرفته می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی نقش هوش مصنوعی در بهینه‌سازی آبیاری و مدیریت منابع آب در کشاورزی، به تحلیل ابعاد مختلف از جمله پیشینه آبیاری، روش‌شناسی‌های نوین، گردآوری و تحلیل داده‌ها، الگوریتم‌های تخصیص آب، پایش عملکرد، چالش‌ها، فرصت‌ها و ارائه راهکارهای راهبردی پرداخته است. مطالعه حاضر با بهره‌گیری از بررسی نظام‌مند مقاله علمی معتبر، به بررسی فناوری‌هایی نظیر حسگرهای محیطی، اینترنت اشیاء، یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و سامانه‌های تصمیم‌یار پرداخته و عملکرد آن‌ها را در بهبود کارایی مصرف آب و افزایش بازده محصولات ارزیابی نموده است. نتایج نشان می‌دهد که سامانه‌های هوشمند آبیاری می‌توانند مصرف آب را بین ۲۰ تا ۴۰ درصد کاهش داده و عملکرد محصولات را بهبود دهند. همچنین بررسی‌ها نشان داد موانعی نظیر نبود زیرساخت، هزینه اولیه بالا و کمبود داده‌های دقیق، از جمله چالش‌های کلیدی در استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت هوشمند آبیاری به شمار می‌روند. در نهایت، پیشنهاداتی جهت توسعه بومی این سامانه‌ها با تاکید بر سیاست‌های حمایتی، بومی‌سازی فناوری و توانمندسازی کشاورزان ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: هوش مصنوعی، آبیاری دقیق، کشاورزی هوشمند، یادگیری ماشین، مدیریت منابع آب

A Review of Artificial Intelligence Applications in Smart Irrigation Management

Z. Ayyab Koushk Gozar[1], S.M.R. Naghedifar[2], A.N. Ziaei[3*]

1, 2, 3 – M.Sc. Student, Assistant Professor, and Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*Corresponding Author Email: an.ziaei @birjand.ac.ir

Received ▶ 16-06-2025
Revised ▶ 03-08-2025
Accepted ▶ 16-08-2025
Available online ▶ 16-12-2025

Abstract

In light of the increasing challenges posed by water scarcity, population growth, climate change, and the urgent need to enhance agricultural productivity, the adoption of advanced technologies such as Artificial Intelligence (AI) in irrigation management is regarded as a transformative approach. This study aims to investigate the role of AI in optimizing irrigation and managing water resources in agriculture by analyzing various dimensions, including the background of irrigation, modern methodologies, data collection and analysis, water allocation algorithms, performance monitoring, challenges, opportunities, and the provision of strategic solutions. Through a systematic review of credible scientific articles, the present research examines technologies such as environmental sensors, the Internet of Things (IoT), machine learning, deep learning, and decision support systems, and evaluates their effectiveness in improving water use efficiency and increasing crop yield. The results indicate that intelligent irrigation systems can reduce water consumption by 20 to 40 percent while enhancing crop performance. Furthermore, the findings reveal that key challenges to the application of AI in smart irrigation management include lack of infrastructure, high initial costs, and insufficient accurate data. Finally, the study proposes recommendations for the localized development of these systems, emphasizing supportive policies, technology localization, and farmer empowerment.

Keywords: Artificial Intelligence, Precision Irrigation, Smart Agriculture, Machine Learning, Water Resource Management

How to cite this article:
Ayyab Koushk Gozar, Z., Naghdi Far, S.M.R., & Ziaei, A.N. (2025). A Review of Artificial Intelligence Applications in Smart Irrigation Management. Journal of Water and Sustainable Development, 12(3), 156-163. https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i3.2506-1432

مقدمه

در دهه‌های اخیر، مدیریت منابع آب در کشاورزی به یکی از چالش برانگیزترین مسائل حوزه امنیت غذایی و پایداری محیط‌زیستی تبدیل شده است (Fader و همکاران، ۲۰۱۳). با افزایش جمعیت جهانی، توسعه شهرنشینی و نیاز روزافزون به تولید محصولات کشاورزی، فشار بر منابع آبی جهان، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، به‌شدت افزایش یافته است. در کنار این روند، تغییرات اقلیمی، نوسانات بارش و بروز خشکسالی‌های مکرر، چالش‌های جدیدی را در تأمین پایدار آب برای بخش کشاورزی به وجود آورده‌اند (Jaiswal و همکاران، ۲۰۲۵؛ Oğuztürk، ۲۰۲۵). در چنین شرایطی، استفاده از فناوری‌های هوشمند و ابزارهای دیجیتال، به‌ویژه در حوزه آبیاری، نه تنها یک انتخاب، بلکه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تلقی می‌شود .

یکی از مؤلفه‌های کلیدی در بهینه‌سازی مصرف منابع آب، آبیاری دقیق است که جایگاه ویژه‌ای در راهبردهای نوین مدیریت کشاورزی یافته است. تحول چشمگیری که در این حوزه رخ داده، به‌کارگیری سامانه‌های تحلیل‌گر، پیش‌بینی‌کننده و تصمیم‌یار مبتنی بر داده‌های محیطی است. این سامانه‌ها با قابلیت درک الگوهای پنهان و پردازش داده‌های لحظه‌ای از جمله رطوبت خاک، دمای محیط، مرحله رشد گیاه و تغییرات اقلیمی، می‌توانند نظام تصمیم‌گیری در آبیاری را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشند (Mehedi و همکاران ۲۰۲۴؛ Seyedzadeh و Khazaee، ۲۰۲۲). فناوری‌هایی همچون هوش مصنوعی با تحلیل داده‌های محیطی و اطلاعات زراعی، امکان پیش‌بینی دقیق نیاز آبی هر محصول را بر اساس نوع گیاه، شرایط خاک و اقلیم منطقه فراهم می‌سازند. این بهینه‌سازی علاوه بر صرفه‌جویی قابل توجه در منابع آب، باعث ارتقای عملکرد و کیفیت محصول نیز می‌شود.

در ادبیات علمی نیز بر اهمیت رویکردهای نوین در بهینه‌سازی مصرف آب تأکید شده است. به‌عنوان‌مثال Sui (۲۰۱۷) مطرح می‌کنند که پایش دقیق رطوبت خاک و نیاز آبی گیاه، نقش کلیدی در افزایش کارایی سامانه‌های آبیاری دارد. همچنین، Pereira و همکاران، (۲۰۱۲) با بررسی چالش‌های مناطق خشک، راهکارهایی چون زمان‌بندی مبتنی بر نیاز گیاه و استفاده از ابزارهای تصمیم‌یار را برای مدیریت پایدار منابع آب توصیه کرده‌اند. این دیدگاه‌ها نشان می‌دهند که گذار از روش‌های سنتی به سامانه‌های داده محور و هوشمند، ضرورتی علمی و راهبردی در مواجهه با بحران آب محسوب می‌شود.

درحال‌حاضر، روش‌های سنتی آبیاری نه تنها ناکارآمد هستند، بلکه منجر به هدررفت گسترده آب و کاهش کیفیت محصولات می‌شوند. در مقابل، سامانه‌های هوشمند مبتنی بر حسگرهای بی‌سیم و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، فرآیند تصمیم‌گیری را به‌صورت بلادرنگ و با دقت بالا انجام داده و امکان پایش لحظه‌ای شرایط اقلیمی، خاک و نیاز گیاه را فراهم می‌کنند (Jena و Chakravarty ، ۲۰۲۴). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از این فناوری‌ها می‌تواند با تخصیص بهینه منابع و کاهش هزینه‌های عملیاتی، بهره‌وری آب را به‌طور چشمگیری افزایش دهد (Touil و همکاران، ۲۰۲۲).

در همین راستا، مطالعات میدانی در نقاط مختلف جهان اثربخشی آبیاری هوشمند را به‌طور مستند نشان داده‌اند. به‌عنوان‌نمونه (Anjum و همکاران، ۲۰۲۳) با طراحی سامانه‌ای مبتنی بر یادگیری عمیق توانستند مصرف آب را تا ۲۸ درصد کاهش دهند. Elshaikh و Mabrouki (۲۰۲۴) نیز با ترکیب الگوریتم‌های پیش‌بینی اقلیمی، سامانه‌ای طراحی کردند که راندمان مصرف آب را تا ۳۵ درصد افزایش داده و بیماری‌های ناشی از رطوبت بیش از حد را کاهش داده است. Saikai و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که استفاده از یادگیری تقویتی می‌تواند بهره‌وری آب و عملکرد محصول را به‌طور هم‌زمان بهبود دهد. همچنین، استفاده ترکیبی از یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی و اینترنت اشیاء در مزارع هوشمند، منجر به کاهش مصرف آب تا ۳۰ درصد و افزایش عملکرد محصول تا ۲۰ درصد شده است (Abuzanouneh و همکاران ۲۰۲۲؛ Elshaikh و Mabrouki ۲۰۲۴).

Colizzi و همکاران (۲۰۲۵) در یک بررسی سیستماتیک نشان دادند که ادغام هوش مصنوعی و اینترنت اشیا می‌تواند در مدیریت هوشمند آبیاری، صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف آب ایجاد کرده و کارایی آبیاری را افزایش دهد.

با وجود این پیشرفت‌ها، ایران همچنان با چالش‌هایی نظیر کمبود الگوریتم‌های بومی، ضعف زیرساخت‌های داده محور و نبود آموزش‌های کافی برای کشاورزان روبه‌رو است (Miller و همکاران، ۲۰۲۵). این موانع توسعه فناوری‌های هوشمند آبیاری را با کندی مواجه ساخته و لزوم انجام پژوهش‌های کاربردی، تحلیل چالش‌ها و ارائه راهکارهای بومی را دوچندان کرده است.

در نهایت، حرکت به‌سوی کشاورزی هوشمند و آبیاری دقیق، نه تنها پاسخی راهبردی به بحران‌های آبی و اقلیمی است، بلکه ضامن حفظ امنیت غذایی، بهره‌وری پایدار و صیانت از محیط‌زیست نیز خواهد بود.

مواد و روش‌ها

کشاورزی هوشمند (Smart Agriculture) به‌کارگیری فناوری‌هایی نظیر هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء و تحلیل داده‌ها برای بهبود بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و مدیریت منابع در تولیدات کشاورزی است (Wolfert و همکاران، ۲۰۱۷).

آبیاری دقیق (Precision Irrigation) نیز یکی از زیرشاخه‌های کشاورزی دقیق بوده و به معنای اعمال دقیق میزان و زمان آبیاری بر اساس نیاز واقعی گیاه، شرایط اقلیمی و ویژگی‌های خاک است (Liakos و همکاران، ۲۰۱۸).

به‌عنوان‌نمونه، یک سیستم آبیاری دقیق می‌تواند از حسگرهای رطوبت خاک، ایستگاه هواشناسی محلی، کنترلر مرکزی و شیرهای برقی تشکیل شده باشد. اطلاعات جمع‌آوری شده از حسگرها و داده‌های آب‌وهوایی در یک پلتفرم پردازش شده و سپس برنامه آبیاری متناسب با شرایط واقعی هر قطعه زمین، به‌صورت خودکار اجرا می‌شود. این سامانه‌ها عموماً از الگوریتم‌های پیش‌بینی مانند شبکه‌های عصبی یا درخت تصمیم برای تنظیم حجم و زمان آبیاری استفاده می‌کنند (Mohyuddin و همکاران، ۲۰۲۴).

پیشینه آبیاری و فناوری در کشاورزی ایران و جهان

آبیاری همواره یکی از ارکان بنیادی کشاورزی بوده است. در تمدن‌های کهن مانند بین‌النهرین، مصر و مناطق فلات ایران، سامانه‌های ابتدایی آبیاری شامل شبکه‌های کانال و سیستم‌های مدیریت آب زمینه را برای کشاورزی در نواحی خشک فراهم کردند (Angelakis و همکاران، ۲۰۲۰). در ایران، شبکه‌های سنتی مانند قنوات و آبیاری کرتی، هر چند در تأمین امنیت غذایی نقش داشتند، اما با راندمان پایین و تلفات آب بالا همراه بودند و در برخی مناطق بازدهی کمتر از ۳۰ درصد گزارش شده است (Ghahroodi و همکاران، ۲۰۱۵).

با افزایش جمعیت، تقاضای بیشتر برای محصولات کشاورزی، رقابت بر منابع آب و اثرات تغییرات اقلیمی، نیاز به فناوری‌های نوین آبیاری همچون سیستم‌های تحت فشار، سیستم‌های هوشمند با به‌کارگیری اینترنت اشیا و سنسورها و مدل‌سازی مصرف آب برای بهینه‌سازی مدیریت منابع آب در کشاورزی پدید آمد. با این حال، موانعی مانند هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا، نیاز به آموزش فنی و ضعف زیرساخت‌های اجرایی، مانع از گسترش این فناوری‌ها در بسیاری از مناطق از جمله ایران شده است (Ali و همکاران، ۲۰۲۵).

تحول اساسی با ورود فناوری‌های اطلاعاتی و ارتباطی مانند اینترنت اشیاء، حسگرهای هوشمند و هوش مصنوعی به کشاورزی آغاز شد که امکان گردآوری و تحلیل لحظه ای داده‌های محیطی و زراعی را فراهم کرد (Jaiswal و همکاران، ۲۰۲۵؛ Miller و همکاران، ۲۰۲۵). این فناوری‌ها برنامه‌ریزی آبیاری را از حالت سنتی به داده‌محور و هوشمند تبدیل نمودند.

مطالعات میدانی نشان داده‌اند که به‌کارگیری الگوریتم‌های پیش‌بینی رطوبت خاک و کنترل هوشمند آبیاری می‌تواند مصرف آب را به‌طور قابل توجهی کاهش داده و عملکرد محصول را بهبود بخشد (Togneri و همکاران، ۲۰۲۲). در سطح جهانی، فناوری‌های مشابه در مزارع نیشکر پاکستان و باغات سیب چین، به کاهش قابل توجه مصرف آب و افزایش راندمان کمک کردند (Menezes و همکاران، ۲۰۲۴؛ Tace و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین بر اساس پژوهش Liakos و همکاران (۲۰۱۸) استفاده از مدل‌هایی که آینده را پیش‌بینی می‌کنند (مثل پیش‌بینی بارش، دما یا نیاز آبی گیاه) و همچنین داده‌هایی که از وضعیت هوا به دست می‌آید، کمک بزرگی به تصمیم‌گیری دقیق‌تر در آبیاری و مصرف بهینه آب می‌کند.

این تجربیات نشان می‌دهد به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند در آبیاری، کلید مقابله با بحران جهانی آب و تحقق امنیت غذایی است. رسیدن به آبیاری هوشمند نیازمند سیاست‌گذاری یکپارچه، سرمایه‌گذاری هدفمند، آموزش بهره‌برداران، توسعه زیرساخت‌های فناورانه و بومی‌سازی سامانه‌ها مطابق اقلیم و ویژگی‌های منطقه‌ای است.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با هدف بررسی کاربردهای هوش مصنوعی در آبیاری دقیق، بر مبنای مرور و تحلیل منابع علمی مرتبط انجام شده است. ابتدا مقالات و گزارش‌های معتبر در زمینه هوش مصنوعی و سامانه‌های آبیاری هوشمند از سال‌های اخیر جمع‌آوری شد. جستجوها بر اساس کلیدواژه‌هایی مثل «هوش مصنوعی»، «آبیاری دقیق»، «اینترنت اشیاء» و «یادگیری ماشین» در پایگاه‌های علمی مختلف انجام گرفت (Singh و همکاران، ۲۰۲۵).

پس از جمع‌آوری منابع، روش‌های مختلف هوش مصنوعی مانند الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی بررسی شدند که چگونه می‌توانند مصرف آب را بهینه کرده و آبیاری را دقیق‌تر و هوشمندتر کنند (Jena و Chakravarty ، ۲۰۲۴). همچنین نقش حسگرهای اینترنت اشیاء در جمع‌آوری اطلاعات خاک و شرایط محیطی برای تصمیم‌گیری‌های به موقع در سامانه‌های آبیاری ارزیابی شد (Touil و همکاران، ۲۰۲۲).

با تحلیل این اطلاعات، نقاط قوت و ضعف روش‌های مختلف هوش مصنوعی شناسایی و راهکارهایی برای بهبود عملکرد سامانه‌های آبیاری دقیق ارائه می‌شود. این روش‌شناسی امکان بررسی جامع کاربرد هوش مصنوعی را در بهینه‌سازی مصرف آب و افزایش بازدهی کشاورزی فراهم می‌کند.

مدیریت تأمین داده در سیستم‌های هوشمند آبیاری

یکی از بخش‌های کلیدی در سامانه‌های آبیاری هوشمند، جمع‌آوری و مدیریت دقیق داده‌های مربوط به شرایط محیط، خاک و گیاه است. این داده‌ها پایه تصمیم‌گیری در الگوریتم‌های هوشمند را تشکیل می‌دهند. برای انتقال این

داده‌ها، از شبکه‌های بی‌سیم کم‌مصرف مانند LoRa و NB-IoT استفاده می‌شود که حتی در مناطق دورافتاده و بدون اینترنت نیز کارایی دارند (Mousavi و Khademzadeh، ۲۰۲۲). علاوه بر جمع‌آوری داده، این سیستم‌ها امکان کنترل از راه دور تجهیزات آبیاری را نیز فراهم می‌سازند.

داده‌های ثبت شده در پایگاه‌های اطلاعاتی ذخیره شده و با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، برای پیش‌بینی نیاز آبی و رفتار گیاه و خاک تحلیل می‌شود. این فرایند باعث بهینه‌سازی مصرف آب می‌شود (Miller و همکاران، ۲۰۲۵).

در نهایت، مدیریت داده در سامانه‌های هوشمند آبیاری شامل سه لایه حسگر، ارتباطات و پردازش است که با فناوری‌های نوین و الگوریتم‌های پیشرفته، پایه‌گذار کشاورزی داده‌محور و پایدار خواهد بود.

مدیریت توزیع و تخصیص آب با کمک هوش مصنوعی

مدیریت توزیع و تخصیص آب در کشاورزی نقش کلیدی در تحقق کشاورزی پایدار دارد. فشارهای فزاینده بر منابع آب، استفاده از فناوری‌های نوین به‌ویژه هوش مصنوعی را برای افزایش بهره‌وری آبی ضروری کرده است (Martelli و همکاران، ۲۰۲۵). الگوریتم‌های یادگیری ماشین، با تحلیل داده‌های حسگرها و اطلاعات اقلیمی، قادر به پیش‌بینی دقیق نیاز آبی خاک و بهینه‌سازی زمان و میزان آبیاری هستند، که این رویکرد می‌تواند کارایی سیستم‌های آبیاری هوشمند را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد (Del-Coco و همکاران، ۲۰۲۴).

ترکیب داده‌های هواشناسی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، نقش مهمی در تسهیل مدیریت هوشمند منابع آب ایفا کرده و به کشاورزان در برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت کمک می‌کند. همچنین، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی نظیر الگوریتم ژنتیک[1] و الگوریتم[2] ازدحام ذرات در طراحی شبکه‌های توزیع آب و مدیریت فشار سامانه‌های تحت‌فشار، موجب کاهش تلفات، افزایش کارایی و بهینه‌سازی مصرف آب شده است. بااین‌حال، نتایج مطالعه زارع و همکاران (۱۴۰۰) نشان می‌دهد که بهره‌برداری گسترده و مؤثر از این فناوری‌ها مستلزم فراهم بودن زیرساخت‌های فنی مناسب، دسترسی به داده‌های محلی دقیق، و نیز تعامل و همکاری بین بهره‌برداران، نهادهای دولتی و توسعه‌دهندگان فناوری است. در نهایت، رسیدن به کشاورزی پایدار و تخصیص هوشمند منابع آب تنها با اجرای سیاست‌گذاری‌های هوشمندانه و ارتقای سطح آموزش کشاورزان امکان‌پذیر خواهد بود.

مدیریت بهره‌برداری و پایش عملکرد آبیاری دقیق

الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی به سامانه‌ها امکان تحلیل روند مصرف، شناسایی ناهنجاری‌ها و اصلاح خودکار خطاها را می‌دهند که باعث افزایش پایداری و کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود. این سامانه‌ها با استفاده از حسگرهای خاک و هوا، داده‌هایی مانند رطوبت، دما و تعرق را به‌صورت لحظه‌ای جمع‌آوری و پردازش می‌کنند تا مصرف آب به‌صورت خودکار و دقیق تنظیم شود و از آبیاری بیش‌ازحد یا کم‌آبی جلوگیری شود (Martelli و همکاران، ۲۰۲۵).

Zhao و همکاران (۲۰۲۳) نشان داده‌اند ادغام داده‌های تاریخی و لحظه‌ای با مدل‌های شبیه‌سازی رطوبت خاک و تبخیر و تعرق می‌تواند الگوهای مصرف آب را استخراج کرده و زمان‌بندی بهینه آبیاری را پیشنهاد دهد. این رویکرد ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب، می‌تواند کیفیت و کمیت محصول را ارتقا دهد و در شرایط بحرانی مانند خشکسالی یا بارش ناگهانی، سامانه‌های هوشمند با ارائه بازخورد سریع و تحلیل ریسک به کشاورزان و مدیران در اتخاذ تصمیمات به‌موقع کمک کنند.

در نهایت، استفاده از سامانه‌های هوشمند و داده‌محور آبیاری موجب افزایش رضایت بهره‌برداران، کاهش خطاهای انسانی و ارتقای دانش کشاورزان در بهره‌برداری از فناوری‌های نوین شده و به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کشاورزی هوشمند و حفظ منابع آبی به شمار می‌رود. همچنین، مدیریت بهره‌برداری و پایش مستمر در سامانه‌های آبیاری دقیق از عوامل مهم در افزایش کارایی مصرف آب و بازده محصولات است (Zhao و همکاران، ۲۰۲۳).

چالش‌ها و موانع توسعه آبیاری هوشمند

با وجود ظرفیت بالای فناوری‌های هوشمند آبیاری برای بهینه‌سازی مصرف آب و افزایش بهره‌وری کشاورزی، توسعه و پذیرش گسترده این سامانه‌ها با چالش‌ها و موانع متعددی روبه‌رو است که می‌توان آنها را در ابعاد اقتصادی، فنی، فرهنگی و مدیریتی دسته‌بندی کرد. از مهمترین چالش‌های اقتصادی، هزینه‌های اولیه بالای تجهیزات، نصب و زیرساخت‌های فناوری است که برای بسیاری از کشاورزان به‌ویژه در مناطق روستایی و کم‌درآمد، مانع بزرگی محسوب می‌شود و سرمایه‌گذاری در این حوزه را با ریسک همراه می‌سازد (Martelli و همکاران، ۲۰۲۵). در کنار این، نبود سازوکارهای حمایتی مانند تسهیلات اعتباری و یارانه‌های دولتی، روند توسعه و به‌کارگیری این فناوری‌ها را با کندی مواجه کرده است.

در حوزه فنی، کمبود دانش فنی و مهارت‌های لازم برای نصب، بهره‌برداری و نگهداری سامانه‌ها، یکی از موانع اصلی است. فقدان آموزش تخصصی و مشاوره فنی کافی، کشاورزان را از استفاده بهینه از این فناوری‌ها بازمی‌دارد و عملکرد سیستم‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد و همچنین، کمبود داده‌های دقیق و به‌روز، به ویژه داده‌های اقلیمی و خاک‌شناسی، باعث کاهش دقت مدل‌های هوشمند و

الگوریتم‌های تخصیص آب می‌شود (Giaffreda و همکاران، ۲۰۱۹).

ضعف و ناپایداری زیرساخت‌های ارتباطی و اینترنتی، خصوصاً در مناطق دورافتاده و روستایی، دسترسی به داده‌های لحظه‌ای و کنترل از راه دور سیستم‌های آبیاری را محدود می‌کند و به‌عنوان یکی از موانع فنی مهم شناخته می‌شود. افزون بر این، پیچیدگی‌های فنی الگوریتم‌های هوش مصنوعی و نیاز به سخت‌افزار و نرم‌افزارهای پیشرفته برای پردازش داده‌های حجیم، هزینه و دشواری‌های پیاده‌سازی را افزایش می‌دهد (Bayar و همکاران، ۲۰۲۵).

از لحاظ فرهنگی، مقاومت کشاورزان نسبت به پذیرش فناوری‌های نوین و تمایل به استفاده از روش‌های سنتی آبیاری، روند گسترش و توسعه سیستم‌های هوشمند را با چالش مواجه کرده است. به همین دلیل، آموزش مستمر و فرهنگ‌سازی برای افزایش دانش و پذیرش فناوری‌های نوین، از مهمترین راهکارها برای عبور از این موانع است. در حوزه مدیریت نیز، فقدان سیاست‌های هماهنگ، حمایت‌های دولتی و انسجام میان نهادهای مرتبط، باعث پراکندگی فعالیت‌ها و کاهش اثرگذاری برنامه‌های توسعه فناوری شده است (Kashyap و همکاران، ۲۰۲۱). نبود چارچوب‌های قانونی و استراتژی‌های بلندمدت توسعه نیز از موانع عمده پیش‌رو به شمار می‌آید. در مجموع، رفع این موانع نیازمند همکاری چند جانبه میان دولت، بخش خصوصی، مراکز آموزشی و کشاورزان است. تلاش‌های مستمر در زمینه آموزش، توسعه زیرساخت‌های فناورانه و ارتباطی، سیاست‌گذاری حمایتی و فرهنگ‌سازی می‌تواند زمینه را برای گسترش پایدار و فراگیر آبیاری هوشمند فراهم آورد و به حفظ منابع آب و افزایش امنیت غذایی کمک نماید.

فرصت‌ها و توانمندی‌ها برای توسعه بومی سیستم‌های هوشمند

زارع و همکاران (۱۴۰۰) اشاره دارند به اینکه علاوه بر چالش‌ها، توسعه سیستم‌های هوشمند آبیاری در ایران با فرصت‌ها و ظرفیت‌های قابل توجهی همراه است که می‌تواند زمینه بومی‌سازی و توسعه پایدار این فناوری‌ها را فراهم آورد. یکی از مهمترین این ظرفیت‌ها، رشد سریع زیرساخت‌های دیجیتال و ارتباطی در کشور است. طی سال‌های اخیر، دسترسی به اینترنت حتی در مناطق روستایی افزایش چشمگیری داشته و زیرساخت‌های لازم برای بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیاء فراهم شده است. این توسعه زیرساختی، بستر مناسبی برای پیاده‌سازی سامانه‌های هوشمند آبیاری و جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای و کنترل از راه دور فراهم می‌کند.

از سوی دیگر، افزایش آگاهی عمومی و سیاست‌گذاران نسبت به بحران آب و اهمیت بهره‌برداری هوشمندانه از منابع آبی، زمینه مناسبی برای استقبال از فناوری‌های نوین فراهم آورده است. این رویکرد می‌تواند با سیاست‌های تشویقی، آموزش‌های هدفمند و حمایت‌های مالی به نهادینه شدن سامانه‌های هوشمند کمک کند (Oğuztürk، ۲۰۲۵).

دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی ایران نقش به‌سزایی در توسعه دانش و فناوری‌های بومی در حوزه کشاورزی هوشمند ایفا می‌کنند. در کنار آن‌ها، استارتاپ‌های فعال در زمینه کشاورزی دیجیتال نیز با طراحی اپلیکیشن‌ها و تولید سخت‌افزارهای متناسب با شرایط بومی، ابزارهایی کاربردی و قابل دسترس برای کشاورزان فراهم کرده‌اند. این اقدامات موجب افزایش پذیرش فناوری‌های نوین در میان بهره‌برداران شده و اجرای پروژه‌های متعدد در زمینه آبیاری هوشمند و کاربرد هوش مصنوعی در کشاورزی، به تولید دانش بومی و توسعه راه‌حل‌هایی متناسب با اقلیم‌های متنوع کشور انجامیده است (Bayar همکاران ، ۲۰۲۵).

در همین راستا، زارع و همکاران (۱۴۰۰) نشان دادند توسعه ظرفیت‌های انسانی و افزایش آگاهی کشاورزان از طریق آموزش و ترویج علمی در زمینه‌های هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و سامانه‌های نوین آبیاری نقش مهمی در پذیرش و بهره‌برداری موفق از این فناوری‌ها دارد. افزایش تعداد بهره‌برداران آموزش‌دیده و متخصص، زمینه تربیت نیروی ماهر در تمام مراحل زنجیره ارزش فناوری‌های نوین آبیاری را فراهم می‌کند و تنوع اقلیمی قابل توجه ایران فرصت ارزشمندی برای آزمون، واسنجی (کالیبراسیون) و بهینه‌سازی سامانه‌های هوشمند آبیاری ایجاد می‌کند.

در نهایت، با استفاده هوشمندانه از این ظرفیت‌های زیرساختی، انسانی و پژوهشی و همچنین هدایت سیاست‌گذاری‌ها به سمت حمایت از نوآوری و توسعه فناوری‌های بومی، ایران می‌تواند در مسیر توسعه سامانه‌های هوشمند آبیاری گام‌های موثری برداشته و سهم قابل توجهی در افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی ایفا کند.

نتایج و تحلیل نهایی

آبیاری هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی، تحولی بنیادین در مدیریت منابع آب در کشاورزی به وجود آورده است. مرور گسترده مطالعات نشان می‌دهد که به‌کارگیری الگوریتم‌های پیش‌بینی‌گر، منجر به کاهش چشمگیر مصرف آب، افزایش بهره‌وری محصولات و کاهش هزینه‌های عملیاتی شده است. تحلیل مقایسه‌ای میان روش‌های سنتی و نوین نشان می‌دهد که در سیستم‌های سنتی، تصمیم‌گیری درباره زمان و میزان آبیاری عمدتاً بر اساس تجربه‌های شخصی و بدون داده‌های دقیق صورت می‌گیرد؛ اما در روش‌های هوشمند، تصمیم‌سازی بر پایه تحلیل آنی داده‌های محیطی مانند وضعیت خاک، رطوبت و شرایط آب‌وهوایی انجام می‌شود که این امر دقت و بهینه‌سازی مصرف آب را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (Jena و Chakravarty ، ۲۰۲۴).

در سطح جهانی، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که سامانه‌های هوشمند آبیاری با به‌کارگیری فناوری‌های نوین مانند سنسورها، اینترنت اشیا و تحلیل داده‌ها، می‌توانند مصرف آب را بهینه کرده، بهره‌وری محصولات را افزایش دهند و نقش مؤثری در تقویت امنیت غذایی و مقابله با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی ایفا کنند. این موفقیت‌ها در کشورهای مختلف با حمایت‌های دولتی، آموزش بهره‌برداران و فراهم کردن تسهیلات مالی برای توسعه فناوری‌ها تقویت می‌شود (Vallejo و همکاران، ۲۰۲۳).

در داخل کشور نیز پژوهش‌هایی مانند مطالعه حسینی و مرادی (۱۴۰۰) در منطقه فسا نشان داد بهره‌گیری از سیستم آبیاری قطره‌ای مبتنی بر داده‌های هوشمند، نسبت به روش‌های سنتی، منجر به صرفه‌جویی ۲۵٪ در مصرف آب و افزایش ۱۲٪ در کیفیت محصول شده است و همچنین مطالعات میدانی مانند پژوهش انجام شده توسط Touil و همکاران (۲۰۲۲) بر روی کشت گوجه‌فرنگی نشان داد استفاده از سیستم‌های مبتنی بر یادگیری عمیق توانسته مصرف آب را تا ۳۰٪ کاهش و عملکرد محصول را تا ۱۸٪ افزایش دهد؛ این امر نقش حیاتی الگوریتم‌های هوشمند در زمان‌بندی دقیق و تخصیص بهینه منابع آبی را برجسته می‌سازد. این نتایج نقش کلیدی هوش مصنوعی در بهینه‌سازی عملکرد زراعی و مدیریت بهینه منابع آب را تایید می‌کند.

تحلیل کلی نتایج حاکی از آن است که کارایی مصرف آب، دقت در تصمیم‌گیری و پایداری محیط‌زیستی، از مهمترین مزایای سیستم‌های هوشمند آبیاری محسوب می‌شوند، درحالی‌که سیستم‌های سنتی توانایی واکنش سریع به تغییرات محیطی را ندارند. با این وجود، موفقیت بلندمدت این فناوری‌ها به توسعه زیرساخت‌های فناورانه، آموزش مستمر بهره‌برداران و بومی‌سازی کامل فناوری‌ها وابسته است (Ali و همکاران، ۲۰۲۵).

پیشنهادات راهبردی

برای حفظ منابع آبی و ارتقای بهره‌وری در کشاورزی پایدار، اتخاذ راهبردهای موثر و جامع در توسعه سامانه‌های آبیاری هوشمند ضروری است. بر اساس نتایج مطالعات و تحلیل‌های موجود، راهکارهای زیر می‌تواند مسیر موفقیت در این حوزه را هموار کند:

۱. توسعه زیرساخت‌های داده‌ای و فناوری: ایجاد شبکه‌های گسترده حسگر، پهپادها و ایستگاه‌های هواشناسی هوشمند برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌های محیطی، زیربنای حیاتی موفقیت سامانه‌های آبیاری دقیق است. تجارب کشورهای برزیل و چین نشان‌دهنده نقش کلیدی این زیرساخت‌ها در بهبود عملکرد است (Hammouch و همکاران، ۲۰۲۴).

۲. تدوین سیاست‌های حمایتی و مشوق‌های اقتصادی: ارائه یارانه، کاهش تعرفه‌های واردات و تسهیلات مالی کم بهره، انگیزه لازم برای توسعه فناوری‌های هوشمند را فراهم می‌کند. این اقدامات باید در چارچوب سیاست‌های کلان کشاورزی پایدار طراحی شوند(Giaffreda و همکاران، ۲۰۱۹).

۳. ایجاد همکاری میان دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و بخش خصوصی و بومی‌سازی الگوریتم‌های هوش مصنوعی: سازگاری الگوریتم‌ها با شرایط اقلیمی و زراعی بومی، دقت پیش‌بینی و عملکرد سامانه‌ها را بهبود می‌بخشد و تقویت مراکز رشد و حمایت از استارتاپ‌ها، فضای نوآوری و توسعه فناوری‌های هوشمند را تسهیل می‌کند (Oğuztürk، ۲۰۲۵).

۴. یکپارچه‌سازی آبیاری هوشمند با سایر فناوری‌های کشاورزی: تلفیق سیستم‌های آبیاری با پایش تغذیه گیاه، مدیریت آفات و انرژی، رویکردی جامع برای افزایش بهره‌وری کل مزرعه فراهم می‌کند (Bayar و همکاران ، ۲۰۲۵).

اجرای این راهبردها ضمن افزایش بهره‌وری و صرفه‌جویی در مصرف آب، زمینه‌ساز کشاورزی پایدار و امنیت غذایی خواهد بود.

نتیجه‌گیری

کشاورزی هوشمند و مبتنی بر داده، امروزه به عنوان یکی از مهمترین راهکارهای مقابله با چالش‌های جدی منابع آبی محدود در کشاورزی مطرح است. این رویکرد نوین با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته مانند اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، امکان مدیریت دقیق و بهینه مصرف آب را در سطوح مختلف کشاورزی فراهم می‌کند. اهمیت این فناوری‌ها در کشورهایی مانند ایران که با محدودیت‌های شدید منابع آب و تغییرات اقلیمی مواجه هستند، بسیار برجسته است و می‌تواند راهگشای بسیاری از مشکلات فعلی باشد.

برای موفقیت در به‌کارگیری این فناوری‌ها، نیاز است زیرساخت‌های مناسب، سرمایه‌گذاری در آموزش کشاورزان و همچنین سیاست‌های حمایتی از سوی دولت ایجاد شود. این اقدامات باید به گونه‌ای طراحی شوند که موانع فرهنگی و اقتصادی نیز برطرف شوند، چرا که هزینه‌های اولیه بالا، کمبود دانش فنی و مقاومت در برابر تغییر، از جمله چالش‌هایی است که ممکن است روند توسعه کشاورزی هوشمند را کند نماید. در این راستا، آموزش مستمر کشاورزان و ایجاد انگیزه در آنها برای پذیرش فناوری‌های نوین اهمیت زیادی دارد و می‌تواند نقش کلیدی در موفقیت این طرح‌ها ایفا کند.

همچنین همکاری بین‌بخشی میان نهادهای علمی، فناوری، دولتی و بخش خصوصی ضروری است تا بتوان به توسعه پایدار کشاورزی هوشمند دست یافت. چنین همگرایی و مشارکتی، علاوه بر افزایش راندمان مصرف آب، می‌تواند به ارتقای کیفیت محصولات کشاورزی، کاهش هدررفت منابع و کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی کمک کند.

در نهایت، حرکت به سمت کشاورزی هوشمند، نه تنها به حفظ و بهینه‌سازی منابع آب محدود کمک می‌کند، بلکه با افزایش بهره‌وری و کاهش ضایعات، امنیت غذایی پایدار را برای نسل‌های آینده تضمین خواهد کرد. این مسیر، هم فرصت بزرگی برای توسعه اقتصادی و فناوری کشور فراهم می‌آورد و هم پاسخی موثر به چالش‌های محیط‌زیستی و اجتماعی مرتبط با کشاورزی در جهان امروز است. لذا برنامه‌ریزی دقیق، سیاست‌گذاری هوشمندانه و همراهی همه ذی‌نفعان، کلید موفقیت در انجام این هدف حیاتی خواهد بود.

منابع

زارع، قدسیه، داورپناه، مجتبی، و سالارپور، ماشاالله. (۱۴۰۰). بررسی عوامل مؤثر بر پذیرش فناوری‌های نوین آبیاری در بین کشاورزان منطقهٔ سیستان. مجله اقتصاد کشاورزی ایران، ۸(۴)، ۲۳-۳۲.
https://www.sid.ir/paper/1053406/fa

Abuzanouneh, K. I. M., Al-Wesabi, F. N., Albraikan, A. A. R., Al Duhayyim, M., & Hamza, M. A. (2022). Design of Machine Learning Based Smart Irrigation System for Precision Agriculture. Computers, Materials & Continua, 72(1).
https://doi.org/10.32604/cmc.2022.022648

Ali, A., Hussain, T., & Zahid, A. (2025). Smart irrigation technologies and prospects for enhancing water use efficiency for sustainable agriculture. AgriEngineering, 7(4), 106.
https://www.mdpi.com/2624-7402/7/4/106

Anjum, M. N., Cheema, M. J. M., Hussain, F., & Wu, R. S. (2023). Precision irrigation: Challenges and opportunities. In Precision Agriculture: Evolution, Insights and Emerging Trends (pp. 85–101). Elsevier.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780443189531000076

Angelakis, A. N., Zaccaria, D., Krasilnikoff, J., Salgot, M., Bazza, M., Roccaro, P., ... & Fereres, E. (2020). Irrigation of World Agricultural Lands: Evolution through the Millennia. Water, 12(5), 1285.
https://www.mdpi.com/2073-4441/12/5/1285

Bayar, J., Ali, N., Cao, Z., Ren, Y., & Dong, Y. (2025). Artificial intelligence of things (AIoT) for precision agriculture: Applications in smart irrigation, nutrient and pest management. Smart Agricultural Technology, 5, 100860.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375525008603

Colizzi, L., Dimauro, G., Guerriero, E., & Lomonte, N. (2025). Artificial intelligence and IoT for water saving in agriculture: A systematic review. Smart Agricultural Technology, 11, 101008.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375525002412

Del-Coco, M., Leo, M., & Carcagnì, P. (2024). Machine learning for smart irrigation in agriculture: How far along are we? Information, 15(6), 306.
https://www.mdpi.com/2078-2489/15/6/306

Elshaikh, A., Elsiddig Elsheikh, & Mabrouki, J. (2024). Applications of Artificial Intelligence in Precision Irrigation. Journal of Environmental & Earth Sciences, 6(2), 176–186.
https://nchr.elsevierpure.com/en/publications/applications-of-artificial-intelligence-in-precision-irrigation/

Fader, M., Gerten, D., Krause, M., Lucht, W., & Cramer, W. (2013). Spatial decoupling of agricultural production and consumption: Quantifying dependences of countries on food imports due to domestic land and water constraints. Environmental Research Letters, 8(1), 014046.
https://iopscience.iop.org/1748-9326/8/1/014046/pdf/1748-9326_8_1_014046.pdf

Ghahroodi, E. M., Noory, H., & Liaghat, A. M. (2015). Performance evaluation study and hydrologic and productive analysis of irrigation systems at the Qazvin irrigation network (Iran). Agricultural Water Management, 148, 189–195.
https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.003

Giaffreda, R., Antonelli, F., & Spada, P. (2019). Promoting sustainable agricultural practices through incentives. In 2019 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor), 1–6. IEEE.
https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8909281/

Hammouch, H., El-Yacoubi, M., Qin, H., & Berbia, H. (2024). A systematic review and meta-analysis of intelligent irrigation systems. IEEE Access, 12, 10577970.
https://ieeexplore.ieee.org/iel8/6287639/10380310/10577970.pdf

Jaiswal, N., Kumar, T. V., & Shukla, C. (2025). Smart drip irrigation systems using IoT: a review of architectures, machine learning models, and emerging trends. Discover Agriculture, 3, 253.
https://link.springer.com/article/10.1007/s44279-025-00430-1

Jena, S. P., & Chakravarty, S. (2024). Internet of things-based remote monitoring and classification of Spinacia oleracea leaf disease using deep learning approach. International Journal of Web and Grid Services, 20(2), 138597.
https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJWGS.2024.138597

Kashyap, P. K., Kumar, S., Jaiswal, A., Prasad, M., & Gandomi, A. H. (2021). Towards precision agriculture: IoT-enabled intelligent irrigation systems using deep learning neural network. IEEE Sensors Journal, 21(16), 17479–17491.
https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9388691/

Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Tsouros, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. Sensors, 18(8), 2674.
https://www.mdpi.com/1424-8220/18/8/2674

Martelli, A., Rapinesi, D., Verdi, L., Donati, I. I. M., Dalla Marta, A., & Altobelli, F. (2025). Smart irrigation for management of processing tomato: a machine learning approach. Irrigation Science, 43(11), 1407–1424.
https://link.springer.com/article/10.1007/s00271-024-00993-9

Mehedi, I. M., Hanif, M. S., Bilal, M., & Vellingiri, M. T. (2024). Remote sensing and decision support system applications in precision agriculture: Challenges and possibilities. IEEE Access, 12, 10477982.
https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10477982/

Menezes, S. M., da Silva, G. F., & da Silva, M. M. (2024). Pulse drip irrigation improves yield, physiological responses, and water-use efficiency of sugarcane. Environmental and Sustainability Conservation Science.
https://link.springer.com/article/10.1007/s41101-024-00258-8

Miller, T., Mikiciuk, G., Durlik, I., Mikiciuk, M., Łobodzińska, A., & Śnieg, M. (2025). The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now—A Systematic

Sui, R. (2017). Irrigation scheduling using soil moisture sensors. Journal of Agricultural Science, 10(1), 1–11. U.S. Department of Agriculture. https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60663500/Publications/Sui/2018/Sui_2018_JAS_10-1-1-11.pdf

Tace, Y., Elfilali, S., Tabaa, M., & Leghris, C. (2023). Implementation of smart irrigation using IoT and artificial intelligence. Mathematical Modeling and Computing, 10(2), 575–589. https://doi.org/10.23939/mmc2023.02.575

Togneri, R., Dos Santos, D. F., Camponogara, G., Nagano, H., Custodio, G., Prati, R., & Fernandes, S. (2022). Soil moisture forecast for smart irrigation: The primetime for machine learning. Expert Systems with Applications, 208, 118229.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417422009563

Touil, S., Richa, A., & Fizir, M. (2022). A review on smart irrigation management strategies and their effect on water savings and crop yield. Irrigation and Drainage, 71(4), 1234–1250. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ird.2735

Vallejo-Gómez, D., Osorio, M., & Hincapié, C. A. (2023). Smart irrigation systems in agriculture: A systematic review. Agronomy, 13(2), 342.
https://www.mdpi.com/2073-4395/13/2/342

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. Agricultural Systems, 153, 69–80.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X16303754

Zhao, H., Di, L., Guo, L., Zhang, C., & Lin, L. (2023). An automated data-driven irrigation scheduling approach using model simulated soil moisture and evapotranspiration. Sustainability, 15(17), 12908. https://www.mdpi.com/2071-1050/15/17/12908

پی‌نوشت‌ها

1- Genetic Algorithm (GA)

2- Particle Swarm Optimization (PSO)

Review of Smart Sensing Technologies. Sensors, 25(12). http://www.turjaf.com/index.php/TURSTEP/article/view/551

Mohyuddin, G., Khan, M. A., Haseeb, A., & Mahpara, S. (2024). Evaluation of machine learning approaches for precision farming in smart agriculture system: a comprehensive review. IEEE Access, 12, 10504121.
https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10504121/

Mousavi, S. M., & Khademzadeh, A. (2022). The role of low-power wide-area network technologies in Internet of Things: A systematic and comprehensive review. Digital Communications and Networks, 8(4), 503–522.
https://doi.org/10.1002/dac.5036

Oğuztürk, G. E. (2025). AI-driven irrigation systems for sustainable water management: A systematic review and meta-analytical insights. Smart Agricultural Technology, 11, 100982. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375525002151

Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2012). Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. Agricultural Water Management, 108, 39–51. https://ideas.repec.org/a/eee/agiwat/v108y2012icp39-51.html

Saikai, Y., Peake, A., & Chenu, K. (2023). Deep reinforcement learning for irrigation scheduling using high-dimensional sensor feedback. PLOS Water, 2(9), e0000169. https://journals.plos.org/water/article?id=10.1371/journal.pwat.0000169

Seyedzadeh, A., & Khazaee, P. (2022). Irrigation management evaluation of multiple irrigation methods using performance indicators. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 28(4), 345–356. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09715010.2021.1891470

Singh, A., Kumar, R., & Sharma, P. (2025). A comprehensive review of recent advances in intelligent controller development for smart irrigation systems. Discover Computing, 28, Article 239. https://link.springer.com/article/10.1007/s10791-025-09762-4

Journal of Water and Sustainable Development. December 2025
Volume 12. Issue 3 (Serial No. 37). pages 164 to 180

نشریه آب و توسعه پایدار. آذر ماه ۱۴۰۴
سال دوازدهم. شماره سوم (پیاپی ۳۷). صفحات ۱۶۴ تا ۱۸۰

Document Type: Applied Article

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

Investigating the Impact of Climate Differences on Seasonal and Annual Precipitation Changes and Fluctuations in Iran

بررسی تاثیر تفاوت‌های اقلیمی بر تغییرات و نوسانات فصلی و سالانه بارش در کشور

A.H. Karimi Khalilabad[1], A. Mosaedi[2*], S. M. R. Naghedifar[3]

1, 2, 3- M.Sc., Professor and Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

*** Corresponding Author Email:** mosaedi@um.ac.ir

امیرحسین کریمی خلیل‌آباد[1]، ابوالفضل مساعدی[2*]، سیدمحمدرضا ناقدی‌فر[3]

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی‌ارشد، استاد و استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

***رایانامه نویسنده مسئول:** mosaedi@um.ac.ir

Received ▶ 19-06-2025
Revised ▶ 22-07-2025
Accepted ▶ 26-07-2025
Available online ▶ 16-12-2025

تاریخ دریافت ◀ ۱۴۰۴/۰۳/۲۹
تاریخ بازنگری ◀ ۱۴۰۴/۰۴/۳۱
تاریخ پذیرش ◀ ۱۴۰۴/۰۵/۰۴
تاریخ انتشار ◀ ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

Abstract

In this study, changes and fluctuations in annual and seasonal precipitation in Iran over a 60-year period (1961 to 2020) were investigated with the aim of investigating the impact of climate differences on the trend of annual and seasonal precipitation changes. Precipitation data from 33 synoptic stations in the country, representing diverse climates, were analyzed in two 30-year and one 60-year periods, at both annual and seasonal scales. The nonparametric Mann-Kendall test and the Sen's-slope method were used to assess the trend of changes and the intensity of changes. The results showed that annual and seasonal precipitation in most climates lacked a significant long-term trend. In the first period, the largest number of stations (9stations) with a significant decreasing trend at the 95 % level was observed in the spring (with an average of -1.320 mm/year). While in the second period, the largest number of stations (7stations) with a significant decreasing trend was observed in the winter season (with an average of -1.054 mm/year). While in the summer and autumn seasons in the second period, no significant trend was observed in any station. The average annual rainfall during the 60-year statistical period of the studied stations is decreasing by about -0.65 mm/year. While the trend of annual rainfall decrease is statistically significant only at the level of 5 stations. Considering the fluctuations or heterogeneous changes in rainfall in different seasons and climates, the necessity of paying attention to local, seasonal and climatic characteristics of rainfall in water resources and agricultural planning is emphasized.

Keywords: Precipitation Reduction, Precipitation, Mann-Kendall Test, Sen's Slope, Iran.

چکیده

تغییرات و نوسانات بارش سالانه و فصلی ایران در بازه زمانی ۶۰ ساله (۱۹۶۱ تا ۲۰۲۰) با هدف بررسی تاثیر تفاوت‌های اقلیمی بر وضعیت روند تغییرات بارش سالانه و فصلی در این پژوهش بررسی شد. داده‌های مقادیر بارش از ۳۳ ایستگاه سینوپتیک کشور که نماینده اقلیم‌های متنوع بودند، در دو دوره ۳۰ ساله و یک دوره ۶۰ ساله، در مقیاس‌های سالانه و فصلی تحلیل شدند. از آزمون ناپارامتریک من-کندال و همچنین از روش شیب سن به منظور ارزیابی روند تغییرات و شدت تغییرات استفاده شد. نتایج نشان داد بارش‌های سالانه و فصلی در اغلب اقلیم‌ها فاقد روند معنی‌دار بلندمدت هستند. در دوره اول بیشترین تعداد ایستگاه (۹ ایستگاه) با روند کاهشی معنی‌دار (در سطح ۹۵٪) در فصل بهار مشاهده شد (با متوسط ۱/۳۲۰- میلی‌متر در سال). درحالی‌که در دوره دوم بیشترین تعداد ایستگاه (۷ ایستگاه) با روند کاهشی معنی‌دار در فصل زمستان مشاهده شد (متوسط ۱/۰۵۴- میلی‌متر در سال). لازم به ذکر است در فصل‌های تابستان و پاییز در دوره دوم در هیچ ایستگاهی روند معنی‌داری مشاهده نشده است. متوسط بارندگی سالیانه در طول دوره آماری ۶۰ ساله ایستگاه‌های مورد مطالعه با حدود ۰/۶۵- میلی‌متر در سال در حال کاهش است. درحالی‌که از نظر آماری روند کاهش بارندگی سالانه فقط در سطح پنج ایستگاه معنی‌دار است. باتوجه‌به نوسانات و یا تغییرات ناهمگون بارندگی در فصل‌ها و اقلیم‌های مختلف، بر ضرورت توجه به ویژگی‌های محلی، فصلی و اقلیمی بارش در برنامه‌ریزی‌های منابع آب و کشاورزی تاکید می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کاهش بارندگی، بارش، آزمون من-کندال، شیب سن، ایران.

How to cite this article:
Karimi Khalilabad, A.H., Mosaedi, A., and Naghedifar, S. M. R. (2025). Investigating the Impact of Climate Differences on Seasonal and Annual Precipitation Changes and Fluctuations in Iran. Journal of Water and Sustainable Development, 12(3), 164-180. https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i3.2506-1434

مقدمه

در دهه‌های اخیر، تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از جدی‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی جهان مطرح شده است. این پدیده که عمدتا به افزایش میانگین دمای جهانی مرتبط است، آثار گسترده‌ای بر نظام‌های اکولوژیکی و منابع طبیعی برجای گذاشته است (Vaghefi و همکاران، ۲۰۱۷؛ Ahmed و همکاران، ۲۰۱۸؛ Nilawar و Waikar، ۲۰۱۹؛ Fawzy و همکاران، ۲۰۲۰). بررسی‌های علمی نشان می‌دهد روند گرمایش زمین بیش از هر عامل دیگری تحت تاثیر فعالیت‌های انسانی مانند استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی، تغییر در پوشش کاربری اراضی و توسعه شهری ناپایدار قرار دارد (Ahmed و همکاران، ۲۰۱۸؛ Nilawar و Waikar، ۲۰۱۹؛ Fawzy و همکاران، ۲۰۲۰؛ Mohammadi و همکاران، ۲۰۲۴). این فعالیت‌ها باعث افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای شده‌اند که به نوبه خود روند افزایش دمای کره زمین را تسریع می‌کنند. بر اساس گزارش‌های معتبر جهانی از جمله گزارش ششم IPCC[1]، میانگین دمای زمین از زمان آغاز انقلاب صنعتی تاکنون به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است و اگر اقدامات مؤثری برای کاهش انتشار این گازها صورت نگیرد، پیش‌بینی می‌شود این روند به‌طور فزاینده‌ای تشدید شود (Oliveira و همکاران، ۲۰۱۹؛ IPCC، ۲۰۲۱).

افزایش دمای کره زمین باعث شده الگوهای اقلیمی در نقاط مختلف جهان به شکل چشمگیری تغییر کنند. این تغییرات نه تنها دمای مناطق مختلف را دگرگون کرده‌اند، بلکه الگوهای بارش و رطوبت هوا را نیز تحت تأثیر قرار داده‌اند (Huber و Knutti، ۲۰۱۲). به دنبال این دگرگونی‌ها، منابع آب سطحی و زیرزمینی دچار ناپایداری شده و اکوسیستم‌های وابسته به این منابع با تهدیدات جدی مواجه شده‌اند (Azari و همکاران، ۲۰۱۶؛ Mohamed و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه‌براین پدیده‌های اقلیمی حدی مانند خشکسالی‌های طولانی مدت و سیلاب‌های ناگهانی به مراتب افزایش یافته‌اند که این وضعیت مدیریت منابع طبیعی را بسیار پیچیده‌تر و چالش‌برانگیزتر کرده است (Ongoma و همکاران، ۲۰۱۸؛ Tabari، ۲۰۲۰؛ Li و همکاران، ۲۰۲۴). در کنار این موضوع، روند ذوب برف‌ها و یخچال‌های طبیعی نیز تغییر یافته و نوسانات رواناب در مناطق کوهستانی افزایش یافته است که مشکلاتی مضاعف در وقوع پدیده‌های هیدرولوژیکی ایجاد کرده است (Fang و همکاران، ۲۰۲۳).

کشورهایی مانند ایران، که در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارند، به‌دلیل محدودیت ذاتی منابع آبی، بیش از سایر مناطق در برابر پیامدهای تغییر اقلیم آسیب‌پذیر هستند (IPCC، ۲۰۱۴؛ میان‌آبادی و داوری، ۱۴۰۲). داده‌های تاریخی و مطالعات متعدد نشان داده‌اند که ایران در چند دهه گذشته با کاهش تدریجی بارش و افزایش قابل توجه دما روبه‌رو بوده است؛ روندی که به‌طور مستقیم بر ذخایر آب سطحی و زیرزمینی تاثیر گذاشته و شرایط محیط‌زیستی کشور را به‌طور قابل توجهی تحت فشار قرار داده است (Ansari Mahabadi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Sharafati و همکاران، ۲۰۲۰؛ WMO، ۲۰۲۰؛ زرین و همکاران، ۱۴۰۰). این روندها نه تنها موجب کاهش منابع آبی شده‌اند، بلکه کیفیت زندگی و پایداری اکوسیستم‌ها را نیز به چالش کشیده‌اند. همچنین، بر اساس برخی از گزارش‌ها از جمله گزارش پنجم IPCC، پیش‌بینی شده‌است که این تغییرات اقلیمی در صورت عدم اقدام مؤثر، می‌تواند تا پایان قرن جاری منجر به افزایش میانگین دمای جهانی تا حدود ۴/۸ درجه سانتی‌گراد شود (IPCC، ۲۰۱۳)، آماری که نگرانی‌ها را در سطح جهانی افزایش داده‌است. در چنین شرایطی، توجه به مولفه‌های اقلیمی مانند بارش اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. بارش به عنوان یکی از عوامل کلیدی تعیین کننده وضعیت منابع آبی هر منطقه، نقش حیاتی در پایداری محیط‌زیستی ایفا می‌کند. نوسانات بارش می‌تواند پیامدهای دوگانه‌ای داشته باشد؛ از یک‌سو افزایش ناگهانی بارندگی‌ها ممکن است منجر به سیلاب‌های گسترده و تخریب زیرساخت‌ها شود و از سوی دیگر کاهش مقدار بارندگی، خطر خشکسالی و کم‌آبی را افزایش می‌دهد (Tabari، ۲۰۲۰؛ Azadi و همکاران، ۲۰۲۱؛ Halwani و Halwani، ۲۰۲۲). بنابراین کشورهایی مانند ایران که به منابع آب محدود و شکننده‌ای وابسته‌اند، در برابر این تغییرات به شدت آسیب‌پذیر هستند و نیازمند تحلیل دقیق و مدیریت هوشمندانه منابع آبی هستند (میان‌آبادی و داوری، ۱۴۰۲).

به همین دلیل، تحلیل دقیق رفتار زمانی و مکانی بارش طی دهه‌های اخیر به یکی از ارکان اساسی مدیریت منابع آب تبدیل شده است (Caloiero و همکاران، ۲۰۲۰؛ Mohamed و همکاران، ۲۰۲۲). این تحلیل‌ها به‌ویژه در شرایطی اهمیت دارند که بسیاری از تغییرات مشاهده شده در دما و بارش، تحت تاثیر مستقیم فعالیت‌های انسانی همچون تغییرات کاربری زمین و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای شکل گرفته‌اند (Fawzy و همکاران، ۲۰۲۰؛ Mohammadi و همکاران، ۲۰۲۴). در این زمینه، استفاده از روش‌های آماری نوین و پیشرفته، از جمله تحلیل روند با مدل‌های پارامتریک و ناپارامتریک، به عنوان ابزاری حیاتی در شناسایی الگوهای تغییر اقلیمی و پیش‌بینی آینده مطرح شده است (مساعدی و همکاران، ۱۳۹۰؛ Araghi و همکاران، ۲۰۱۸).

از سوی دیگر، بهره‌گیری از داده‌های بلندمدت ثبت شده در ایستگاه‌های سینوپتیک، به‌ویژه در کشورهایی مانند ایران که به شدت به منابع آب‌سطحی و زیرزمینی وابسته هستند، بستری علمی و مستند برای بررسی تغییرات اقلیمی فراهم می‌کند (میان‌آبادی و داوری، ۱۴۰۲). این داده‌ها نه تنها به تبیین وضعیت گذشته اقلیمی کمک می‌کنند، بلکه چشم‌اندازی دقیق و قابل اتکا برای تصمیم‌گیری‌های آینده ارائه می‌دهند. در نتیجه، استفاده از این داده‌ها و تحلیل‌های مرتبط، نقش کلیدی در توسعه راهکارهای مدیریت بحران‌های

آبی آینده و تضمین برنامه‌ریزی صحیح به منظور پایداری منابع آب در برابر تغییرات اقلیمی ایفا خواهد کرد.
پژوهش حاضر در همین راستا، به تحلیل تفاوت‌های اقلیمی بر تغییرات و نوسانات فصلی و سالانه بارش در کشور طی یک دوره آماری ۶۰ ساله (۲۰۲۰-۱۹۶۱) و دو دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۰-۱۹۶۱ و ۲۰۲۰-۱۹۹۱) در محدوده ۳۳ ایستگاه سینوپتیک منتخب کشور که در شرایط آب و هوایی مختلفی قرار دارند، پرداخته است.

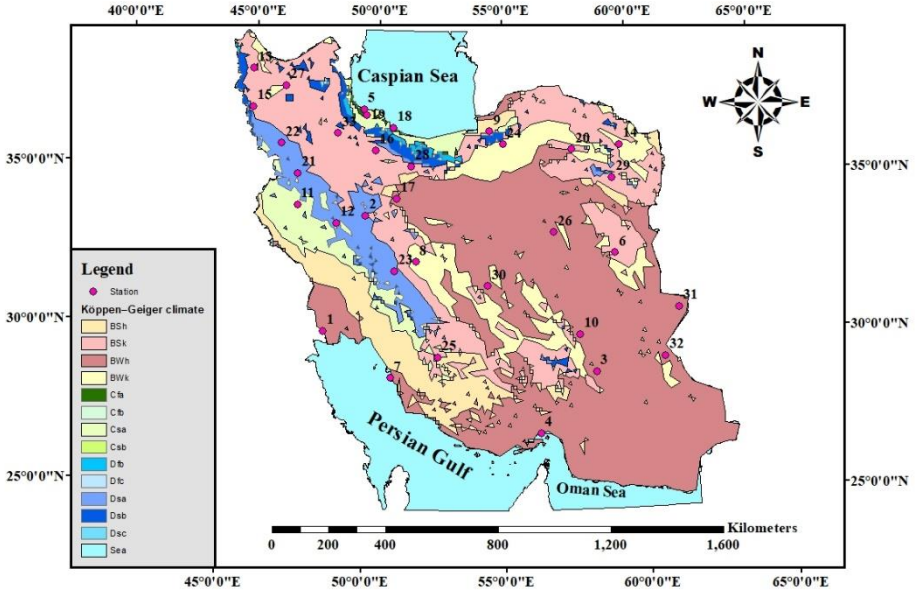
مواد و روش‌ها:

منطقه مورد مطالعه:

کشور ایران با مساحتی بالغ بر ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع، یکی از پهناورترین کشورهای منطقه محسوب می‌شود و در سطح جهانی نیز در جایگاه هجدهم از نظر وسعت قرار دارد (Dinpashoh و همکاران، ۲۰۱۱). این کشور در جنوب‌غربی قاره آسیا واقع شده و محدوده جغرافیایی آن از عرض‌های ۲۵ درجه و ۳ دقیقه شمالی تا ۳۹ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی و از طول‌های ۴۴ درجه و ۱۴ دقیقه شرقی تا ۶۳ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی امتداد می‌یابد. موقعیت جغرافیایی گسترده ایران، در ترکیب با ویژگی‌های توپوگرافی متنوع آن، بستری برای شکل‌گیری اقلیم‌های گوناگون در سراسر این کشور را فراهم آورده است. میانگین بارش سالانه این کشور حدود ۲۵۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه نیز نزدیک به ۱۷/۴ درجه سانتی‌گراد است که این تنوع اقلیمی گسترده باعث شده است که شرایط آب‌وهوایی در نقاط مختلف کشور تفاوت‌های چشمگیری داشته باشد، به گونه‌ای که از مناطق سردسیر و کوهستانی گرفته تا نواحی گرم و خشک مرکزی و جنوب شرقی، هر منطقه ویژگی‌های اقلیمی خاص خود را دارد (Eini و همکاران، ۲۰۲۱).

داده‌های مورد استفاده:

مقادیر متوسط بارش سالانه و فصلی ۳۳ ایستگاه سینوپتیک کشور در بازه زمانی ۶۰ ساله (۲۰۲۰-۱۹۶۱) و همچنین دو دوره ۳۰ ساله، شامل دوره اول (۱۹۹۰-۱۹۶۱) و دوره دوم (۲۰۲۰-۱۹۹۱)، در این پژوهش استفاده شد. باتوجه‌به طول دوره آماری در دسترس در ایستگاه‌های بیان شده، شرایط لازم برای بررسی تغییرات بارش، به‌طور مطلوبی فراهم شده است.
نام، مشخصات آب‌وهوایی و وضعیت اقلیمی و جمعیت شهرهای محدوده ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول‌های (۱) و (۲) و موقعیت آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. همچنین در جدول (۳) طبقه‌بندی اقلیم ایران بر اساس روش کوپن-گایگر ارائه شده است (رضیئی و میری، ۱۴۰۱). برمبنای این طبقه‌بندی، بیش از نیمی (۵۵٪) از ایستگاه‌ها مورد استفاده در این پژوهش در اقلیم‌های نیمه‌خشک سرد (BSk) و بیابانی گرم (BWh) قرار دارند. علاوه‌براین، ۱۵٪ از ایستگاه‌ها در اقلیم مدیترانه‌ای با تابستان‌های بسیار گرم و زمستان‌های سرد (Dsa)، ۱۲٪ در اقلیم مدیترانه‌ای با تابستان‌های گرم (Csa)، ۱۲٪ در اقلیم بیابانی سرد (BWk) و ۶٪ در اقلیم نیمه‌خشک گرم (BSh) واقع شده‌اند. این توزیع اقلیمی گویای تنوع قابل توجه شرایط آب‌وهوایی در سطح کشور می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت مکانی ایستگاه‌های مورد مطالعه و وضعیت اقلیمی آنها (طبقه‌بندی اقلیمی بر اساس روش کوپن-کایگر)

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی و وضعیت اقلیمی هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه

ردیف	نام ایستگاه	متوسط بارش (mm)	طول جغرافیایی (E)	عرض جغرافیایی (N)	ارتفاع (m)	نوع اقلیم	ردیف	نام ایستگاه	متوسط بارش (mm)	طول جغرافیایی (E)	عرض جغرافیایی (N)	ارتفاع (m)	نوع اقلیم
۱	آبادان	۱۵۲	۴۸ °۱۸′	۳۰ °۲۰′	۳	BWh	۱۸	رامسر	۱۲۳۸	۵۰ °۴۰′	۳۶ °۵۳′	۲۱	Csa
۲	اراک	۳۳۱	۴۹ °۴۲′	۳۴ °۴′	۱۷۱۸	Dsa	۱۹	رشت	۱۳۳۵	۴۹ °۳۶′	۳۷ °۱۶′	۷	Csa
۳	بم	۵۸	۵۸ °۲۰′	۲۹ °۶′	۱۰۶۱	BWh	۲۰	سبزوار	۱۸۷	۵۷ °۴۰′	۳۶ °۱۲′	۹۷۸	BSk
۴	بندر عباس	۱۷۱	۵۶ °۱۶′	۲۷ °۱۱′	۹	BWh	۲۱	سنندج	۴۳۸	۴۶ °۵۹′	۳۵ °۱۹′	۱۵۳۸	Dsa
۵	بندر انزلی	۱۷۶۷	۴۹ °۲۸′	۳۷ °۲۸′	-۲۶	Csa	۲۲	سقز	۴۸۰	۴۶ °۱۶′	۳۶ °۱۴′	۱۴۷۶	Dsa
۶	بیرجند	۱۶۰	۵۹ °۱۳′	۳۲ °۵۲′	۱۴۹۱	BWk	۲۳	شهرکرد	۳۲۵	۵۰ °۵۱′	۳۲ °۱۹′	۲۰۷۰	Dsa
۷	بوشهر	۲۳۹	۵۰ °۵۰′	۲۸ °۵۵′	۱۸	BSh	۲۴	شاهرود	۱۵۸	۵۵ °۱′	۳۶ °۲۵′	۱۳۴۵	BWk
۸	اصفهان	۱۲۳	۵۱ °۴۰′	۳۲ °۳۸′	۱۵۷۵	BWk	۲۵	شیراز	۳۱۵	۵۲ °۳۲′	۲۹ °۳۷′	۱۵۰۰	BSk
۹	گرگان	۵۶۵	۵۴ °۲۸′	۳۶ °۴۹′	۱۵۵	BSh	۲۶	طبس	۸۴	۵۶ °۵۵′	۳۳ °۳۵′	۶۹۰	BWh
۱۰	کرمان	۱۳۶	۵۷ °۴۷′	۳۰ °۱۷′	۱۷۵۶	BWh	۲۷	تبریز	۲۸۴	۴۶ °۱۸′	۳۸ °۴′	۱۳۵۱	BSk
۱۱	کرمانشاه	۴۴۳	۴۷ °۳′	۳۴ °۱۸′	۱۳۵۰	Csa	۲۸	تهران	۲۳۵	۵۱ °۲۳′	۳۵ °۴۱′	۹۰۰	BSk
۱۲	خرم‌آباد	۵۰۲	۴۸ °۳۵′	۳۳ °۴۸′	۱۱۴۷	Dsa	۲۹	تربت حیدریه	۲۵۶	۵۹ °۱۳′	۳۵ °۱۶′	۱۴۵۰	BSk
۱۳	خوی	۲۹۲	۴۴ °۵۶′	۳۸ °۳۳′	۱۱۴۹	BSk	۳۰	یزد	۵۶	۵۴ °۲۲′	۳۱ °۵۳′	۱۲۱۶	BWh
۱۴	مشهد	۲۵۱	۵۹ °۳۴′	۳۶ °۱۸′	۹۹۵	BWk	۳۱	زابل	۵۴	۶۱ °۲۹′	۳۱ °۱′	۴۸۰	BWh
۱۵	ارومیه	۳۳۳	۴۵ °۲′	۳۷ °۱۹′	۱۳۳۲	BSk	۳۲	زاهدان	۸۰	۶۰ °۵۱′	۲۹ °۳۰′	۱۳۵۲	BWh
۱۶	قزوین	۳۱۸	۵۰ °۰′	۳۶ °۹′	۱۲۷۸	BSk	۳۳	زنجان	۳۰۶	۴۸ °۲۹′	۳۶ °۳۹′	۱۶۳۸	BSk
۱۷	قم	۱۴۹	۵۰ °۵۲′	۳۴ °۳۸′	۹۳۶	BWh							

جدول ۲- وضعیت تغییرات و رشد جمعیت در محدوده هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه

ردیف	نام ایستگاه	جمعیت سال ۱۹۶۶	جمعیت سال ۲۰۱۶	متوسط نرخ رشد جمعیت (%)	ردیف	نام ایستگاه	جمعیت سال ۱۹۶۶	جمعیت سال ۲۰۱۶	متوسط نرخ رشد جمعیت (%)
۱	آبادان	۲۷۲۹۶۲	۲۹۸۰۹۰	۰/۱۸	۱۸	رامسر	۱۴۵۸۹	۷۴۱۷۹	۳/۳۱
۲	اراک	۷۱۹۲۵	۵۹۱۷۵۶	۴/۳۱	۱۹	رشت	۱۴۳۵۵۷	۹۵۶۹۷۱	۳/۸۷
۳	بم	۲۱۷۶۱	۲۲۸۲۴۱	۴/۸۱	۲۰	سبزوار	۴۲۴۱۵	۳۰۶۳۱۰	۴/۰۳
۴	بندرعباس	۳۴۶۲۷	۶۸۰۳۶۶	۶/۱۴	۲۱	سنندج	۵۴۵۷۸	۵۰۱۴۰۲	۴/۵۴
۵	بندر انزلی	۴۱۷۸۵	۱۳۹۰۱۶	۲/۴۳	۲۲	سقز	۱۷۸۳۴	۲۲۶۴۵۱	۵/۲۱
۶	بیرجند	۲۵۸۵۴	۲۶۱۳۲۴	۴/۷۴	۲۳	شهرکرد	۲۳۷۵۷	۳۱۵۹۸۰	۵/۳۱
۷	بوشهر	۲۳۵۴۷	۲۹۸۵۹۴	۵/۲۱	۲۴	شاهرود	۳۰۷۶۷	۲۱۸۶۲۸	۴/۰۰
۸	اصفهان	۴۲۴۰۴۵	۲۲۴۳۲۴۹	۳/۳۹	۲۵	شیراز	۲۶۹۸۶۵	۱۸۶۹۰۰۱	۳/۹۵
۹	گرگان	۵۱۱۸۱	۴۸۰۵۴۱	۴/۵۸	۲۶	طبس	۱۱۹۵۶	۷۲۶۱۷	۳/۶۷
۱۰	کرمان	۸۵۴۰۴	۷۳۸۷۲۴	۴/۴۱	۲۷	تبریز	۴۰۳۴۱۳	۱۷۷۳۰۳۳	۳/۰۱
۱۱	کرمانشاه	۱۸۷۹۳۰	۱۰۸۳۸۳۳	۳/۵۷	۲۸	تهران	۲۷۱۹۷۳۰	۸۷۳۷۵۱۰	۲/۳۶
۱۲	خرم‌آباد	۵۹۵۷۸	۵۰۶۴۷۱	۴/۳۷	۲۹	تربت حیدریه	۳۰۱۰۶	۲۲۴۶۲۶	۴/۱۰
۱۳	خوی	۴۷۶۴۸	۳۴۸۶۶۴	۴/۰۶	۳۰	یزد	۹۳۲۴۱	۶۵۶۴۷۴	۳/۹۸
۱۴	مشهد	۴۰۹۶۱۶	۳۳۷۲۶۶۰	۴/۳۱	۳۱	زابل	۱۸۸۰۶	۱۶۵۶۶۶	۴/۴۵
۱۵	ارومیه	۱۱۰۷۴۹	۱۰۴۰۵۶۵	۴/۵۸	۳۲	زاهدان	۳۹۷۳۲	۶۷۲۵۸۹	۵/۸۲
۱۶	قزوین	۸۸۱۰۶	۵۹۶۹۳۲	۳/۹۰	۳۳	زنجان	۵۸۷۱۴	۵۲۱۳۰۲	۴/۴۶
۱۷	قم	۱۳۴۲۹۲	۱۲۹۲۲۸۳	۴/۶۳					

جدول ۳- وسعت هر یک از طبقه‌های اقلیمی ایران بر اساس روش کوپن-کایگر و تعداد ایستگاه‌های مورد بررسی در هر یک از طبقه‌های اقلیمی

ردیف	نوع اقلیم	کد اقلیم	مساحت (km^2)	مساحت (%)	تعداد ایستگاه‌ها
۱	اقلیم بیابانی گرم	BWh	۷۱۶۶۸۱	٪ ۴۴/۱۶	۴
۲	اقلیم بیابانی سرد	BWk	۱۶۳۸۳۸	٪ ۱۰/۰۹	۴
۳	اقلیم نیمه‌خشک گرم	BSh	۱۴۲۳۰۶	٪ ۸/۷۷	۲
۴	اقلیم نیمه‌خشک سرد	BSk	۳۶۶۱۸۲	٪ ۲۲/۵۶	۹
۵	اقلیم مدیترانه‌ای با تابستان گرم	Csa	۸۹۳۰۳	٪ ۵/۵۰	۴
۶	اقلیم مدیترانه‌ای با تابستان خنک	Csb	۱۹۶	٪ ۰/۰۱	۰
۷	اقلیم معتدل مرطوب با تابستان گرم	Cfa	۲۲۵۰	٪ ۰/۱۴	۰
۸	اقلیم اقیانوسی معتدل با تابستان خنک	Cfb	۱۹۷	٪ ۰/۰۱	۰
۹	اقلیم قاره‌ای با تابستان گرم و خشک	Dsa	۱۰۱۸۵۰	٪ ۶/۲۸	۵
۱۰	اقلیم قاره‌ای با تابستان خنک و خشک	Dsb	۳۲۴۵۷	٪ ۲/۰۰	۰
۱۱	اقلیم قاره‌ای با تابستان بسیار خنک و خشک	Dsc	۱۲۳۹	٪ ۰/۰۸	۰
۱۲	اقلیم قاره‌ای مرطوب با تابستان خنک	Dfb	۶۴۶۹	٪ ۰/۴۰	۰
۱۳	اقلیم قاره‌ای سرد	Dfc	۹۸	٪ ۰/۰۱	۰

بررسی روند داده‌ها:

به منظور بررسی روند مقادیر متوسط بارش سالانه و فصلی از دو روش معتبر شامل آزمون من-کندال و تخمینگر شیب سن استفاده شد. در آزمون من-کندال روند تغییر داده‌ها در سطح آماری مورد نظر، مورد آزمون قرار می‌گیرد. درحالی‌که در روش تخمینگر شیب سن، مقدار شیب خط روند تعیین می‌شود. این دو روش، در تحلیل روندهای زمانی، در مطالعات اقلیمی و محیط‌زیستی کاربرد گسترده‌ای دارند و توسط سازمان جهانی هواشناسی به منظور تحلیل روند داده‌های هواشناسی پیشنهاد شده‌اند (WMO، ۲۰۲۰). آزمون من-کندال به‌منظور سنجش وجود یا عدم وجود روند معنادار آماری در داده‌های سری زمانی به‌کار می‌رود. در مقابل، روش تخمین‌گر شیب سن با تمرکز بر اندازه‌گیری میزان تغییر، مقدار شیب خط روند را محاسبه می‌کند. هر یک از این دو روش به شرح زیر هستند.

آزمون من-کندال:

در تحلیل روند سری‌های زمانی اقلیمی، به‌ویژه در شرایطی که داده‌ها دارای مقادیر گمشده یا فاقد توزیع آماری مشخص هستند، استفاده از روش‌های ناپارامتریک به دلیل پایداری و دقت بیشتر نسبت به روش‌های پارامتریک توصیه می‌شود. در این میان، آزمون من-کندال به‌عنوان یکی از معتبرترین و پرکاربردترین آزمون‌های ناپارامتریک شناخته می‌شود.

این آزمون نخستین بار توسط (Mann، ۱۹۴۵) معرفی و سپس توسط (Kendall، ۱۹۴۸) توسعه یافت و به‌عنوان یکی از روش‌های آماری قدرتمند برای شناسایی روند در سری‌های زمانی شناخته می‌شود. این آزمون بدون نیاز به فرض توزیع نرمال داده‌ها، قابلیت استفاده گسترده‌ای در تحلیل روند متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی دارد.

در این آزمون ابتدا داده‌های سری‌های زمانی n سال دوره آماری هر یک از ایستگاه‌ها تهیه و داده‌ها به ترتیبی که در طول زمان جمع آوری شده‌اند، فهرست می‌شوند، که به ترتیب نشان‌دهنده اندازه‌گیری‌های به‌دست آمده در طول زمان و به ترتیب زمان وقوع هستند. سپس، مقدار هر داده با مقادیر دیگر داده‌ها در سری زمانی مقایسه می‌شوند. تعداد کل مقایسه‌ها بر اساس رابطه (۱) قابل مقایسه است.

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \qquad (۱)$$

در این رابطه n نشان‌دهنده تعداد مشاهدات و N بیانگر تعداد مقایسه‌ها است. سپس تابع علامت نیز بر اساس معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$Sgn(X_j - X_i) = \begin{cases} 1; & if\ X_j > X_i \\ 0; & if\ X_j = X_i \\ -1; & if\ X_j < X_i \end{cases} \qquad (۲)$$

در این رابطه، X_j مقدار داده مشاهده‌شده در زمان j (زمان بعد) و X_i مقدار داده مشاهده شده در زمان i (زمان قبل) است. پس از مرحله فوق، مجموع علامت‌های تفاضلات متوالی مشاهدات، تحت عنوان آماره S مطابق معادله (۳) به‌دست می‌آید.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} Sgn(X_j - X_i) \qquad (۳)$$

در این رابطه اگر S عددی مثبت باشد، مشاهداتی که دیرتر به وقوع پیوسته‌اند عموما بزرگتر از مشاهدات قبلی هستند و اگر S عددی منفی باشد، عموما مشاهداتی که دیرتر به وقوع پیوسته‌اند نسبت به مشاهدات قبلی کوچکتر هستند. همچنین من و کندال نشان دادند وقتی $n \geq 10$ باشد، آماره S تقریبا به‌طور نرمال توزیع شده و دارای میانگین صفر و انحراف معیار آن بر اساس معادله (۴) می‌تواند برآورد شود.

$$VAR(S) = \frac{1}{18}\left[n(n-1)*(2n+5) - \sum_{p-1}^{g} t_p(t_p-1)(2t_p+5)\right] \qquad (۴)$$

در این رابطه g تعداد گروه‌های با داده‌های مشابه و t_p تعداد مشاهدات در گروه pام می‌باشد. در نهایت مقدار آماره من-کندال (Z_{MK}) براساس رابطه (۵)محاسبه می‌شود.

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR\,(S)}}; & if\ S > 0 \\ 0; & if\ S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR\,(S)}}; & if\ S < 0 \end{cases} \quad (۵)$$

در این رابطه Z_{MK} مقدار آماره آزمون من-کندال می‌باشد و مقدار مثبت و منفی Z_{MK} نشان می‌دهد داده‌ها تمایل به افزایش یا کاهش در طول زمان دارند و مقدار صفر نشان دهنده این است که داده‌ها در طول زمان فاقد روند می‌باشند (Maghrabi و Alotaibi، ۲۰۱۸). در این پژوهش آزمون من-کندال در سطح اطمینان ۹۵٪ مورد استفاده قرار گرفته است.

بررسی شیب تغییرات با استفاده از روش تخمین گر شیب سن:

این آزمون نخستین بار توسط (Theil، ۱۹۵۰) معرفی و سپس توسط (Sen، ۱۹۶۸) توسعه یافت. اساس این روش بر محاسبه یک شیب میانه برای سری زمانی و سپس ارزیابی نمودن در مورد معنی‌داری شیب به‌دست آمده در سطوح اطمینان مختلف می‌باشد و مقدار آن براساس رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$\beta = Median\left(\frac{X_j - X_i}{j-i}\right) \quad , \forall j > i \quad (۶)$$

در این رابطه β برآوردگر شیب خط روند، X_i و X_j به ترتیب مقادیر سری زمانی iام و jام می‌باشند. مقادیر مثبت β نشان‌دهنده شیب مثبت تغییرات (روند افزایشی در سری داده‌ها) و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده شیب منفی تغییرات (روند کاهشی در سری داده‌ها) است (میرعباسی نجف‌آبادی و دین‌پژوه، ۱۳۸۹).

نتایج و بحث:

تحلیل سالیانه نوسانات بارش:

جدول (۴) نتایج آزمون من-کندال و مقادیر شیب سن را برای متغیر بارش سالانه در ۳۳ ایستگاه منتخب کشور طی سه دوره آماری را نشان می‌دهد. در دوره اول (۱۹۹۰-۱۹۶۱) با وجود نوسانات مقادیر بارش در بسیاری از مناطق، تنها یک ایستگاه (معادل ۳ ٪ از کل ایستگاه‌ها) دارای روند معنادار در سطح ۹۵ درصد بوده است. این نتیجه بیانگر آن است که در این بازه زمانی، هنوز نشانه معناداری از کاهش یا افزایش بارندگی در گستره کشور وجود نداشته و الگوهای بارشی بیشتر تحت تاثیر نوسانات طبیعی و منطقه‌ای قرار داشته‌اند. همچنین، شیب سن در بیشتر اقلیم‌ها منفی و در برخی موارد مثبت گزارش شده، اما باتوجه‌به مقادیر بالای P-value، این تغییرات فاقد معناداری آماری بوده‌اند. برای مثال، در اقلیم‌های BWk و Csa با وجود شیب مثبت بارندگی، به دلیل نوسانات زیاد، بر اساس آزمون من-کندال روند معناداری مشاهده نشده‌است، درحالی‌که در اقلیم‌هایی مانند Dsa، BWh و BSh، با وجود شیب‌های منفی در بارندگی، باز هم بر اساس آزمون من-کندال روند معناداری مشاهده نشده است.

اما در دوره دوم (۲۰۲۰-۱۹۹۱)، شرایط دیگری به وجود آمده است. در این بازه زمانی، ۵ ایستگاه (معادل ۱۵ ٪ از کل ایستگاه‌ها) روند معنادار کاهشی (در سطح ۹۵٪) را تجربه کرده‌اند که نسبت به دوره اول، رشد قابل توجهی در تعداد ایستگاه‌های دارای روند معنادار محسوب می‌شود. این افزایش در روندهای معنادار، همراه با بزرگتر شدن مقدار منفی شیب سن در اکثر اقلیم‌ها، نشان‌دهنده تقویت روند کاهش بارش در سه دهه اخیر است. اقلیم‌های BWh و BSk هر کدام با ۲ ایستگاه دارای روند معنادار (به ترتیب معادل ۵۰٪ و ۲۲٪ از ایستگاه‌های اقلیم خود)، با بیشترین مناطق تحت تأثیر کاهش بارندگی قرار دارند. اقلیم BWk نیز در این دوره شاهد روند کاهشی معنادار بارندگی در یک ایستگاه از مجموع پنج ایستگاه بوده است. در همین حال، اقلیم‌هایی مانند BSh و Dsa با وجود شیب‌های منفی بالا، همچنان فاقد روند معناداری کاهشی هستند. این نتایج نشان می‌دهند گرچه کاهش بارش در کشور در حال گسترش است، اما الگوی آن همچنان ناپایدار و منطقه محور باقی‌مانده و بیشتر در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک تثبیت شده است.

در تحلیل کلی، یعنی دوره ۶۰ ساله (۱۹۶۱-۲۰۲۰)، تصویر دقیق‌تری از روند بلندمدت بارندگی در کشور نمایان می‌شود. در این بازه زمانی، همانند دوره دوم، ۵ ایستگاه (معادل ۱۵ ٪ از کل ایستگاه‌ها) دارای روند کاهشی معنادار هستند. این ثبات در تعداد ایستگاه‌های معنادار طی دو دوره متوالی، نشانه‌ای از پایداری روند نزولی بارش در برخی از مناطق کشور است. مقدار متوسط شیب سن برای کل ایستگاه‌ها در این دوره ۰/۰۶۵۷- میلی‌متر در سال برآورد شده است. گرچه این مقدار در نگاه اول کوچک به‌نظر می‌رسد، اما در مقیاس ۶۰ ساله، کاهش تجمعی بارش در حدود ۴۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد؛ که برای کشوری مانند ایران با اقلیم‌های عمدتا خشک و نیمه‌خشک، اثری قابل توجه در منابع آب، کشاورزی، تنش‌های اکولوژیک و سیاست‌گذاری‌های محیط‌زیستی دارد. همچنین، در این دوره، اقلیم Csa نیز دارای یک ایستگاه با روند معنادار است که برخلاف دوره‌های قبل، اکنون به جمع اقلیم‌های درگیر در روند نزولی بارش پیوسته است. این موضوع نشان‌دهنده گسترش جغرافیایی روند کاهش بارش از اقلیم‌های بیابانی به مناطق مدیترانه‌ای با وسعت کمتر اما حساسیت بالاتر است.

همچنین، رفتار متفاوت اقلیم‌های کشور در مواجهه با تغییرات بارش، نکته‌ای مهم و تأمل برانگیز است. اقلیم‌های BWh، BSk، Dsa و Csa، با شیب‌های منفی و وجود روندهای معنادار، از جمله نواحی آسیب‌پذیر در برابر کاهش بارش به‌شمار می‌روند. علاوه‌براین بررسی ویژگی‌های جمعیتی ایستگاه‌های دارای روند معنادار نیز نشان می‌دهد بسیاری از این ایستگاه‌ها (از جمله تهران، اصفهان، شیراز و مشهد) در شهرهای بزرگ و پرتراکم واقع شده‌اند که در سال‌های اخیر رشد جمعیت و گسترش سریع شهری را تجربه کرده‌اند. بر اساس اطلاعات جدول (۲) متوسط نرخ رشد جمعیت در این

شـهرها در چنـد دهـه گذشـته قابـل توجـه بـوده اسـت، به‌عنوان‌مثال متوسط نرخ رشد سالانه جمعیت در تهران ۲/۳۶ درصـد و در مشـهد ۴/۳۱ درصـد گـزارش شـده اسـت. توسعه فیزیکی شهر، افزایش سطوح نفوذناپذیر مانند آسفالت و بتن، کاهش پوشش گیاهی افزایش مصرف انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای، زمینه‌ساز تشدید پدیده جزیره حرارتی شهری (UHI[۲]) در این مناطق شده‌اند. این پدیده با افزایش دمای سطح زمین و ایجاد اختلال در فرآیندهای همرفتی جو، می‌تواند به کاهش تشکیل ابر و در نتیجه کاهش بارش محلی منجر شود. بنابراین باید به این نکته توجه شود که کاهش بارش در مناطق شهری (به‌خصوص شهرهای بزرگ) نمی‌تواند فقط ناشی از تغییرات اقلیمی در مقیاس جهانی باشد، بلکه می‌تواند نتیجه ترکیبی از عوامل مختلف مانند جزیره حرارتی شهری، تغییر کاربری اراضی و آلودگی هوا نیز باشد.

شکل (۲) نیز به خوبی روندهای مشاهده شده در جدول (۴) را تایید می‌کند. به‌ویژه در اقلیم‌های بیابانی (BWh، BWk) و نیمه‌بیابانی (BSk)، کاهش محسوس بارندگی از دوره اول به دوره دوم مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که میانگین بارش در دوره دوم کمتر از دوره اول و حتی کمتر از میانگین کل دوره است. این کاهش در اقلیم‌های مدیترانه‌ای (Csa) نیز قابل ردیابی است و با روند منفی و معنادار ثبت شده در دوره کلی همخوانی دارد. اقلیم‌های BSh و Dsa نیز با وجود تجربه کاهش بارش، همچنان رفتار نوسانی و نامنظمی را از خود نشان داده‌اند.

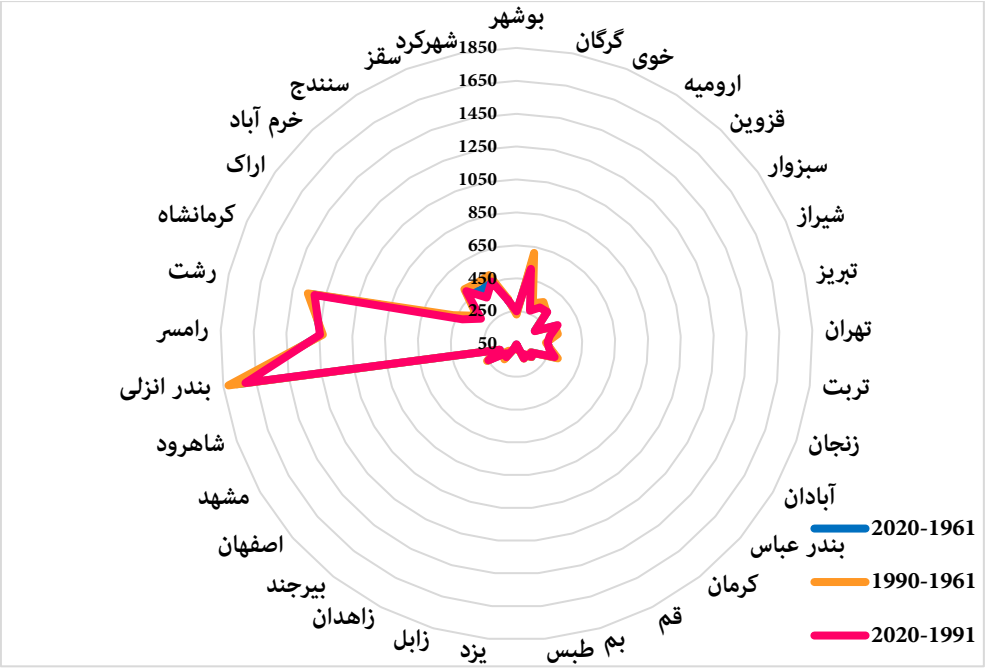
تحلیل نوسانات بارش در فصل زمستان:

بررسی روند بارش در فصل زمستان طی دوره اول و دوره دوم نشان می‌دهد اگرچه در برخی اقلیم‌ها نشانه‌هایی از افزایش بارش در دهه‌های اولیه وجود داشته، اما در دوره اخیر، روندها عمدتا منفی و نزولی شده است (جدول ۵). این تغییر الگو، تصویر نگران‌کننده‌ای از آینده منابع آبی در ایران ارائه می‌دهد. در دوره اول، بیشتر اقلیم‌ها یا فاقد روند معنادار بوده‌اند یا شیب‌های مثبت و خفیفی داشته‌اند. به‌عنوان‌نمونه اقلیم BWk با یک ایستگاه دارای روند معنادار، بیشترین شیب مثبت را با ۱/۱۶۲ میلی‌متر در سال ثبت کرده‌است که نشان‌دهنده بهبود نسبی وضعیت بارش در دهه‌های گذشته است. در اقلیم Csa نیز با وجود فقدان روند معنادار، مقدار متوسط شیب سن به ۰/۹۰۳ میلی‌متر در سال رسیده است که می‌تواند به نوعی نمایانگر شرایط نسبتا پایدار بارش در سواحل شمالی کشور در آن دوره باشد. در مجموع، طی این دوره، روند کلی بارش زمستانی در کل کشور نیز مثبت و برابر با ۰/۴۶۳ میلی‌متر در سال بوده که با وجود تعداد کم ایستگاه‌های دارای روند، به نوعی ثبات نسبی را بازتاب می‌دهد.

اما در دوره دوم، چرخشی محسوس در الگوی بارش زمستانی مشاهده می‌شود. اکثر اقلیم‌ها با روند نزولی همراه بوده‌اند و تعداد ایستگاه‌های دارای روند منفی به شکل چشمگیری افزایش یافته است. به‌ویژه اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک مانند BWh و BSk هرکدام با ۳ و ۱ ایستگاه دارای روند معنادار، به‌ترتیب شیب‌هایی معادل ۱/۰۸۰- و ۱/۰۷۹- میلی‌متر در سال را تجربه کرده‌اند. در اقلیم کوهستانی Dsa، روند منفی و متوسط شیب سن ۲/۰۱۵- میلی‌متر در سال، شدت گرفتن کاهش بارش در مناطق مرتفع غرب کشور را نمایان می‌سازد. این تغییرات منفی باعث شده تا در مجموع، میانگین شیب سن بارش فصل زمستانه در کل کشور در این دوره به ۱/۰۵۴- میلی‌متر در سال برسد که از نظر مدیریت منابع آب هشداردهنده است.

جدول ٤- نتایج آزمون من-کندال و شیب سن بارش سالانه

نوع اقلیم	تعداد ایستگاه‌ها	دوره اول (۱۹۹۰-۱۹۶۱)			دوره دوم (۲۰۲۰-۱۹۹۱)			تمامی دوره (۲۰۲۰-۱۹۶۱)		
		تعداد ایستگاه‌های دارای روند	متوسط مقادیر P-value	متوسط شیب سن	تعداد ایستگاه‌های دارای روند	متوسط مقادیر P-value	متوسط شیب سن	تعداد ایستگاه‌های دارای روند	متوسط مقادیر P-value	متوسط شیب سن
BSk	۹	۱	۰/۳۵۲	-۰/۳۳۴	۲	۰/۴۶۲	-۰/۸۷۰	۱	۰/۴۰۲	-۰/۴۹۱
BWh	۹	۰	۰/۴۹۴	۰/۲۰۷	۲	۰/۲۰۸	-۱/۵۳۰	۱	۰/۴۵۳	-۰/۲۴۱
BWk	۴	۰	۰/۳۴۰	۱/۱۳۲	۱	۰/۵۰۷	-۱/۲۸۵	۰	۰/۴۸۰	-۰/۰۵۳
BSh	۲	۰	۰/۲۲۰	-۱/۳۸۰	۰	۰/۲۲۴	-۳/۱۵۸	۱	۰/۴۳۲	-۱/۷۸۹
Dsa	۵	۰	۰/۴۰۸	-۱/۱۶۷	۰	۰/۴۹۷	-۲/۰۲۴	۱	۰/۱۳۱	-۱/۵۸۲
Csa	۴	۰	۰/۶۳۸	۱/۰۷۵	۰	۰/۵۱۱	۲/۰۵۱	۱	۰/۵۱۸	-۰/۸۴۷
تمامی اقلیم‌ها	۳۳	۱	۰/۴۲۵	-۰/۰۲۷	۵	۰/۳۹۵	-۱/۰۶۰	۵	۰/۴۰۰	-۰/۶۵۷



شکل ۲- مقادیر متوسط بارش سالانه (mm) برای ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره‌های زمانی مورد بررسی

در بررسی روند کلی وضعیت بارش در فصل زمستان در دوره ۱۹۶۱-۲۰۲۰، الگوی غالب کاهشی تثبیت شده است. به جز اقلیم BWk که روندی خنثی (بدون معنی‌داری) با شیب ۰/۰۱۶ میلی‌متر در سال را نشان می‌دهد، سایر اقلیم‌ها عمدتا کاهش بارش را تجربه کرده‌اند. بیشترین کاهش متعلق به اقلیم Dsa با ۰/۹۶۱- میلی‌متر در سال و پس از آن اقلیم BSh با ۰/۶۸۵- میلی‌متر در سال است. حتی در اقلیم Csa که در دوره اول روندی صعودی ثبت شده است، در بلندمدت به شیبی منفی و معادل ۰/۲۹۹- میلی‌متر در سال رسیده است. در مجموع، متوسط شیب سن کل ایستگاه‌ها در فصل زمستان برابر با ۰/۳۷۶- میلی‌متر در سال برآورد شده است که در مقیاس شصت ساله، کاهش بارشی حدود ۲۲/۶ میلی‌متر را به دنبال داشته و این رقم، می‌تواند به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک تاثیرات قابل توجهی بر منابع آب و مدیریت کشاورزی بر جای بگذارد.

به‌طورکلی روندهای مشاهده شده نشان می‌دهند اگرچه در دهه‌های نخست وضعیت بارش زمستانی در برخی مناطق نسبتا مطلوب بوده است، اما در سه دهه اخیر بارش‌ها نه تنها کاهش یافته، بلکه شدت این کاهش در اقلیم‌های خشک و کوهستانی بیشتر بوده است. این یافته‌ها بر لزوم بازنگری جدی در سیاست‌های مدیریت منابع آب و سازگاری با تغییر اقلیم در فصل زمستان تاکید دارند. شکل (۳) نیز تغییر در مقدار بارش‌های فصل زمستان را در مناطق مختلف کشور در دو دوره متوالی ۳۰ ساله نشان می‌دهد. در اقلیم نیمه‌خشک (BSk)، کاهش محسوس بارش زمستانه از دوره اول به دوره دوم در اغلب ایستگاه‌ها مشهود است، به‌گونه‌ای که میانگین بارش در دوره دوم کمتر از دوره اول و حتی پایین‌تر از میانگین کل دوره قرار گرفته است. این کاهش، با روند منفی و معناداری که در دوره دوم برای این اقلیم ثبت شده، همخوانی دارد.

اقلیم بیابانی گرم (BWh) نیز کاهش تدریجی بارندگی را تجربه کرده، به‌ویژه در ایستگاه‌هایی مانند کرمان، یزد و زاهدان که افت قابل توجهی بین دو دوره دیده می‌شود. اگرچه در مجموع تغییرات کمتری نسبت به اقلیم‌های دیگر دارد، اما وجود روند و شیب منفی بر اساس آزمون من-کندال و شیب سن نیز نشان‌دهنده همین کاهش است.

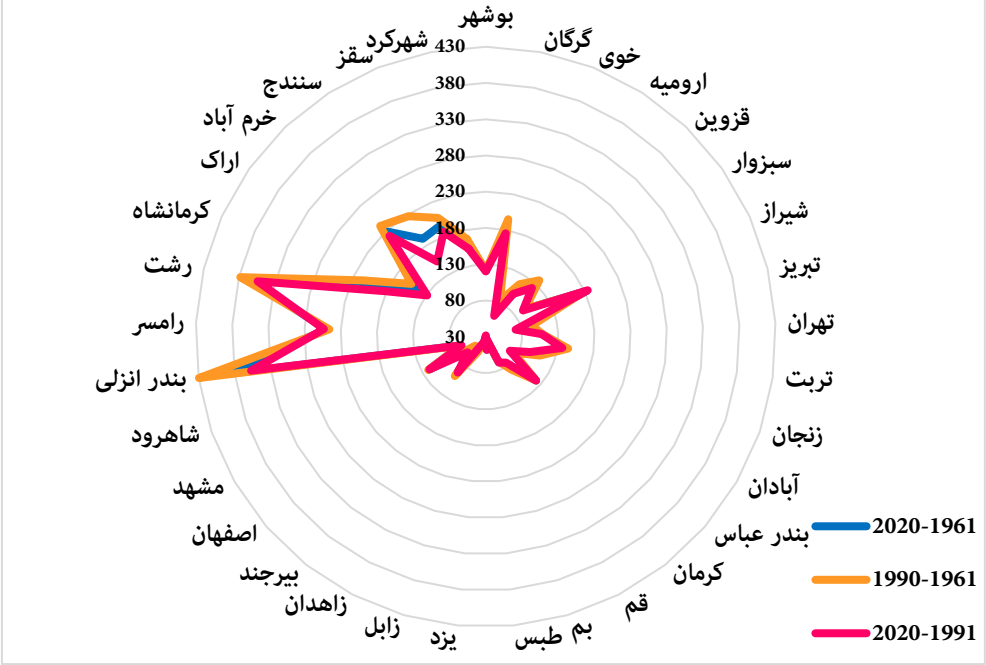
در اقلیم کوهستانی (Dsa)، در ایستگاه‌هایی مانند سنندج، اراک و سقز بارندگی کمتری در دوره دوم نسبت به دوره اول ثبت شده است. این تغییرات، با روند منفی دوره کلی در این اقلیم مطابقت دارد. در اقلیم BSh نیز گرچه کاهش بارندگی فصل زمستان در ایستگاه گرگان قابل توجه است، اما در ایستگاه بوشهر تغییر محسوسی رخ نداده است (شکل ۳).

اقلیم مدیترانه‌ای (Csa) در مجموع روندی نسبتا خنثی (فاقد روند معنی‌دار در سطح ۹۵٪) داشته و برخلاف برخی اقلیم‌ها، افت بارندگی شدید در آن مشاهده نمی‌شود. بااین‌حال ایستگاه‌های انزلی، کرمانشاه و رشت نسبت به دوره اول کاهش را نشان می‌دهند، که می‌تواند نشانه‌ای از تغییرات تدریجی در الگوی بارش زمستانه در این اقلیم باشد. نمودار راداری نیز این الگوهای متفاوت را در قالبی بصری به خوبی نمایش داده و تصویر گسترده‌ای از کاهش بارش زمستانه در سطح کشور ارائه کرده است (شکل ۳). کاهش بارش فصل زمستانه در کل کشور که در دوره دوم به ۱/۰۵۴- میلی‌متر در سال می‌رسد، از نظر مدیریت منابع آب هشداردهنده است. به‌عبارت‌دیگر کاهش حدود ۱ میلی‌متر بارش زمستانه در هر سال در کشور، می‌تواند زنگ خطری برای پایداری منابع آب به‌خصوص در فصل‌های بهار و تابستان باشد. می‌توان انتظار

داشت که بارش زمستانه در بسیاري از مناطق آب و هوایی کشور بیشتر به صورت برف باشد، ولی به دلیل گرمایش جهانی، سهم برف از کل بارش‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه ذخایر منابع آبی (شامل ذخایر برفی و میزان کل نزولات به دلیل کاهش بارندگی) رو به کاهش است.

جدول ۵- نتایج آزمون من-کندال و شیب سن بارش فصل زمستان در دوره‌های مختلف آماری

نوع اقلیم	تعداد ایستگاه‌ها	دوره اول (۱۹۹۰-۱۹۶۱)			دوره دوم (۲۰۲۰-۱۹۹۱)			تمامی دوره (۲۰۲۰-۱۹۶۱)		
		تعداد ایستگاه‌های دارای روند	متوسط مقادیر P-value	متوسط شیب سن	تعداد ایستگاه‌های دارای روند	متوسط مقادیر P-value	متوسط شیب سن	تعداد ایستگاه‌های دارای روند	متوسط مقادیر P-value	متوسط شیب سن
BSk	۹	۲	۰/۲۸۳	۰/۴۲۷	۱	۰/۳۷۶	-۱/۰۷۹	۲	۰/۴۱۱	-۰/۳۲۵
BWh	۹	۰	۰/۴۱۶	۰/۱۹۳	۳	۰/۲۴۶	-۱/۰۸۰	۳	۰/۴۰۴	-۰/۲۴۱
BWk	۴	۱	۰/۲۰۹	۱/۱۶۲	۱	۰/۱۹۹	-۱/۰۸۴	۰	۰/۴۱۳	۰/۰۱۶
BSh	۲	۰	۰/۳۱۷	-۰/۰۴۶	۱	۰/۵۰۹	-۱/۹۷۲	۱	۰/۲۰۳	-۰/۶۸۵
Dsa	۵	۰	۰/۶۵۳	۰/۳۰۷	۱	۰/۲۷۳	-۲/۰۱۵	۱	۰/۱۶۷	-۰/۹۶۱
Csa	۴	۰	۰/۵۱۷	۰/۹۰۳	۰	۰/۴۳۸	۰/۷۵۲	۰	۰/۴۴۹	-۰/۲۹۹
تمامی اقلیم‌ها	۳۳	۳	۰/۳۹۷	۰/۴۶۳	۷	۰/۳۱۹	-۱/۰۵۴	۷	۰/۳۶۴	-۰/۳۷۶



شکل ۳- مقادیر متوسط بارش فصل زمستان (mm) برای ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره‌های مختلف

تحلیل نوسانات بارش در فصل بهار:

بررسی داده‌های دوره اول (۱۹۹۰-۱۹۶۱) نشان می‌دهد بارش بهاری در بیشتر اقلیم‌ها با کاهش نسبی و در مواردی با روند معنادار همراه بوده است (جدول ۶) به‌ویژه در اقلیم‌های کوهستانی و معتدل مانند Dsa و Csa، شیب سن به‌ترتیب به ۲/۳۵۱- و ۲/۶۴۸- میلی‌متر در سال رسیده است که با P-value کمتر از ۰/۱، بیانگر وجود روندهای کاهشی معنادار در چند ایستگاه این مناطق است. همچنین در اقلیم نیمه‌خشک BSk، باوجود نبود روند کلی، دو ایستگاه با روند کاهشی ثبت شده‌اند که میانگین شیب آن‌ها برابر با ۱/۳۵۸- میلی‌متر در سال است. این وضعیت، حکایت از آن دارد که در دهه‌های نخست، کاهش بارندگی بهاری در بسیاری از نقاط کشور، به‌ویژه در مناطق غربی و شمال‌غربی، قابل توجه و معنادار بوده است.

در دوره دوم (۲۰۲۰-۱۹۹۱)، روند بارش در اکثر اقلیم‌ها نسبت به دوره اول (۱۹۶۱-۱۹۹۰) کاهش یافته و تعداد ایستگاه‌های دارای روند معنادار به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. به‌طور خاص، اقلیم‌های خشک مانند BWh و BSk، که در دوره اول شیب منفی داشتند، در این بازه تغییر جهت داده و به‌ترتیب شیب‌های ۰/۰۷۲ و ۰/۰۰۱ میلی‌متر در سال را ثبت کرده‌اند، گرچه روند این تغییرات از نظر آماری معنادار (در سطح ۹۵٪) نیستند. در مقابل، اقلیم BSh همچنان روند

کاهشی خود را حفظ کرده و با شیب ۱/۱۱۵- میلی‌متر در سال در هر دو ایستگاه آن، یک روند معنادار نیز مشاهده می‌شود. به‌طورکلی تنها یک ایستگاه در کل کشور دارای روند معنادار در این دوره بوده است که نسبت به ۹ ایستگاه دوره اول، کاهشی چشمگیر محسوب می‌شود. چنین تفاوتی، می‌تواند نشان‌دهنده تضعیف روند کاهش بارش بهاری در سه دهه اخیر باشد.

در بازه بلند مدت (۲۰۲۰-۱۹۶۱)، روند کلی در سطح کشور به سمت کاهش ملایم بارندگی بهاره متمایل است. در اقلیم‌هایی چون BSh، Dsa و BWk، در هریک، یک یا دو ایستگاه دارای روند معنادار هستند که البته شدت آن‌ها کمتر از دوره اول است. میانگین شیب سن برای کل کشور برابر با ۰/۳۰۳- میلی‌متر در سال بوده و تنها ۴ ایستگاه در تمامی کشور دارای روند معنادار هستند. نکته قابل‌توجه آن است که اقلیم‌های بیابانی نظیر BWh، باوجود شیب منفی، هیچ روند معناداری را در هیچ یک از دوره‌ها نشان نمی‌دهند. این موضوع می‌تواند به پایداری الگوی بارش در این مناطق یا تاثیر کمتر تغییرات اقلیمی بر بارش بهاره در این اقلیم‌ها اشاره داشته باشد.

در مجموع، تحلیل روند بارش فصل بهار حاکی‌ازآن است که شدیدترین کاهش‌ها در دهه‌های نخست مشاهده شده‌است، درحالی‌که در دهه‌های اخیر، گرایش به سمت ثبات و حتی افزایش خفیف به‌ویژه در اقلیم‌های خشک قابل مشاهده است. این نتایج نشان می‌دهد که هنگام تدوین سیاست‌های سازگاری با تغییر اقلیم باید جوانب مختلف به دقت مورد توجه قرار گیرد، بااین‌حال، باید توجه داشت در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در شهرهای بزرگ، تغییر اقلیم در کنار عوامل محلی همچون پدیده جزیره حرارتی شهری، گسترش شهرنشینی، تغییر کاربری اراضی و آلودگی هوا می‌تواند بر میزان و توزیع بارش تاثیرگذار باشد. بنابراین، هرگونه افزایش یا کاهش بارش را نمی‌توان تنها به تغییرات اقلیمی نسبت داد، بلکه لازم است این تغییرات با نگاهی جامع و مبتنی بر تحلیل عوامل مختلف بررسی شود، چرا که واکنش مناطق مختلف به این عوامل، یک دست نبوده و از الگوهای متفاوتی تبعیت می‌کند.

شکل (۴) به‌وضوح نتایج آماری ارائه شده در جدول (۶) را در مورد روند بارش فصل بهار تأیید می‌کند. در اقلیم نیمه‌خشک سرد (BSk)، هرچند میانگین شیب سن برای کل دوره منفی است، الگوی تغییرات بین دو دوره زمانی نوسانات موضعی دارد. به‌عنوان‌نمونه، ایستگاه‌هایی مانند خوی، ارومیه و تبریز کاهش مشخصی در دوره دوم نسبت به دوره اول نشان می‌دهند که هم‌راستا با روندهای منفی و معنادار شناسایی شده در برخی ایستگاه‌های این اقلیم است. بااین‌حال برخی ایستگاه‌ها مانند قزوین و سبزوار، یا روندی افزایشی داشته‌اند یا تغییرات ناچیزی را تجربه کرده‌اند که بر ماهیت غیریکنواخت کاهش بارش در این اقلیم دلالت دارد.

در اقلیم بیابانی گرم (BWh)، کاهش بارش انسجام بیشتری دارد. در اغلب ایستگاه‌ها از جمله بندرعباس، یزد، آبادان و کرمان، افت میانگین بارندگی به‌صورت پیوسته از دوره اول به دوره دوم قابل مشاهده است. این تغییرات، با نتایج آزمون من-کندال و شیب سن مطابقت داشته و بر تثبیت روند کاهشی بارندگی بهاری در این اقلیم دلالت دارد. هرچند در برخی ایستگاه‌ها مانند طبس و قم تغییرات اندک بوده، اما روند کلی کاهشی، نمایان و معنادار است.

اقلیم بیابانی سرد (BWk) نیز کاهش بارندگی را در بیشتر ایستگاه‌ها از جمله بیرجند و مشهد را نشان می‌دهد و روند کلی آن با نتایج تحلیل‌های آماری دوره اول همخوانی دارد. با این حال، ایستگاه‌هایی مانند شاهرود و اصفهان، گرچه از الگوی منفی شدیدی تبعیت نمی‌کنند، اما ثبات نسبی در مقادیر بارندگی آن‌ها، با نتایج آزمون‌های آماری مطابقت دارد.

در اقلیم مدیترانه‌ای (Csa)، باوجود آنکه میانگین شیب سن در دوره دوم نسبت به دوره اول بهبود یافته است، اما نمودارها حاکی از کاهش میانگین بارش در اغلب ایستگاه‌ها هستند. در ایستگاه‌هایی مانند بندر انزلی و کرمانشاه، کاهش معنادار بین دو دوره مشاهده می‌شود، درحالی‌که در رامسر و رشت، نوسانات ملایمی مشاهده می‌شود. این وضعیت، الگوی بارش ناپایدارتر و متاثر از عوامل محلی در این اقلیم را منعکس می‌سازد.

در اقلیم کوهستانی (Dsa)، تغییرات بارش وضوح بیشتری دارد. به‌ویژه در ایستگاه‌هایی مانند سنندج، سقز و خرم‌آباد، کاهش محسوس بارش بهاری از دوره اول به دوره دوم مشاهده می‌شود. این نتایج با تعداد بالای ایستگاه‌های دارای روند معنادار در جدول آماری و شیب‌های منفی قابل توجه در دوره اول مطابقت دارد، که نشان‌دهنده کاهش بارندگی بهاری در این اقلیم است.

تحلیل نوسانات بارش در فصل تابستان:

تحلیل روند بارش تابستان طی دو دوره زمانی نشان می‌دهد برخلاف برخی فصول دیگر، تابستان در بیشتر مناطق ایران فاقد روندهای معنادار آماری بوده و پایداری نسبی در مقادیر بارش دارد.

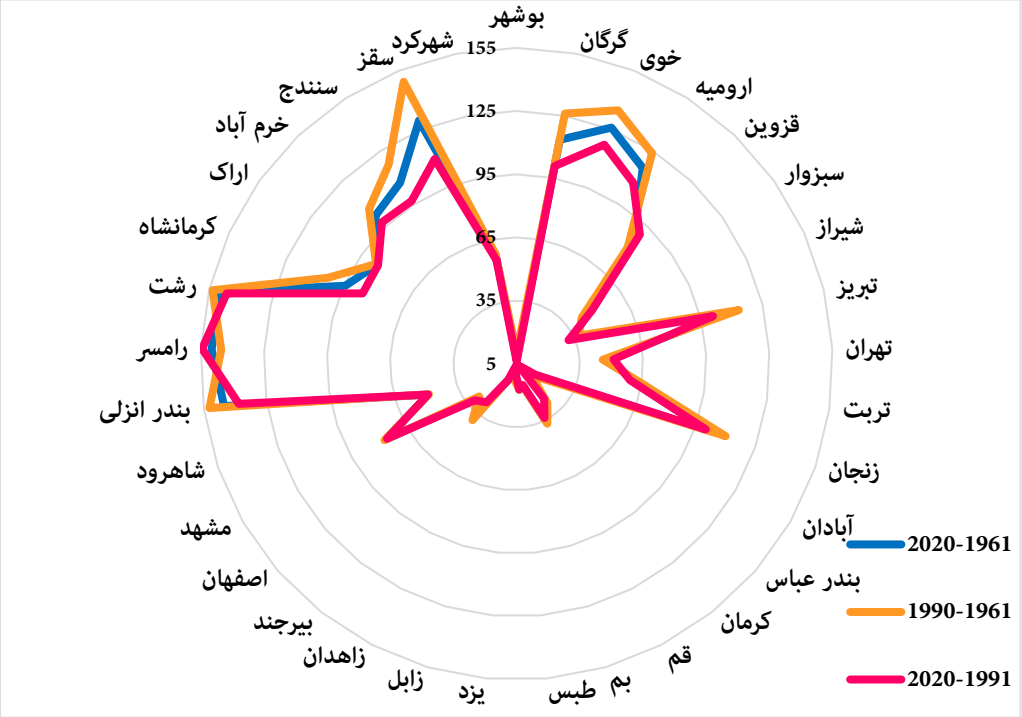
باتوجه‌به نتایج جدول (۷) در دوره اول (۱۹۹۰-۱۹۶۱)، روند تغییرات بارش تابستانی در اکثر اقلیم‌ها ضعیف و غیرمعنادار گزارش شده است. در اقلیم نیمه‌خشک سرد (BSk)، باوجود یک ایستگاه با روند کاهشی غیرمعنادار (با شیب ۰/۱۱۸- میلی‌متر در سال و مقدار P-value برابر ۰/۳۶۸)، میانگین کلی شیب سن منفی و در حد ۰/۱۵۰- میلی‌متر بر سال بوده است. در سایر اقلیم‌ها مانند BWh، BWk، Dsa و BSh نیز تغییرات شیب نزدیک به صفر بوده و هیچ روند معناداری در آن‌ها ثبت نشده است.

بیشترین کاهش متوسط بارش در این دوره به اقلیم مدیترانه‌ای گرم (Csa) مربوط است که میانگین شیب آن برابر با ۱/۰۱۹- میلی‌متر در سال بوده است، اما مقدار P-value برابر

با ۰/۶۷۸ مانع از معناداری آماری آن شده است. در مجموع، این دوره نمایانگر یک بازه زمانی بدون تغییرات بارشی محسوس در فصل تابستان برای کشور بوده است.

جدول ٦- نتایج آزمون من-کندال و شیب سن بارش فصل بهار در دوره‌های مختلف آماری

نوع اقلیم	تعداد ایستگاه‌ها	دوره اول (۱۹۹۰-۱۹۶۱)			دوره دوم (۲۰۲۰-۱۹۹۱)			تمامی دوره (۲۰۲۰-۱۹۶۱)		
		تعداد ایستگاه‌های دارای روند	متوسط مقادیر P-value	متوسط شیب سن	تعداد ایستگاه‌های دارای روند	متوسط مقادیر P-value	متوسط شیب سن	تعداد ایستگاه‌های دارای روند	متوسط مقادیر P-value	متوسط شیب سن
BSk	۹	۲	۰/۲۰۴	-۱/۳۵۸	۰	۰/۷۴۹	۰/۰۰۱	۰	۰/۴۲۵	-۰/۲۸۶
BWh	۹	۰	۰/۲۳۸	-۰/۳۸۶	۰	۰/۶۰۰	۰/۰۷۲	۰	۰/۴۹۸	-۰/۰۶۳
BWk	۴	۱	۰/۲۵۰	-۰/۷۰۳	۰	۰/۵۲۷	۰/۰۸۷	۱	۰/۴۳۷	-۰/۱۱۹
BSh	۲	۱	۰/۰۹۷	-۱/۳۵۱	۱	۰/۱۶۴	-۱/۱۱۵	۱	۰/۰۲۵	-۰/۵۶۵
Dsa	۵	۳	۰/۰۸۳	-۲/۳۵۱	۰	۰/۴۲۶	۰/۰۵۸	۲	۰/۴۶۰	-۰/۵۲۲
Csa	۴	۲	۰/۰۶۶	-۲/۶۴۸	۰	۰/۵۰۴	-۰/۷۶۷	۰	۰/۲۱۵	-۰/۶۶۳
تمامی اقلیم‌ها	۳۳	۹	۰/۱۷۷	-۱/۳۲۰	۱	۰/۵۶۷	-۰/۱۲۱	۴	۰/۴۰۲	-۰/۳۰۳



شکل ٤- مقادیر متوسط بارش فصل بهار (mm) برای ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره‌های مختلف

در دوره دوم (۲۰۲۰-۱۹۹۱)، تغییر چندانی در وضعیت بارش تابستانه مشاهده نمی‌شود. تقریبا در هیچ‌یک از اقلیم‌ها روند معناداری ثبت نشده و مقادیر شیب سن نیز همچنان در محدوده‌ای بسیار کم (و نزدیک به صفر) قرار دارد. در برخی مناطق مانند BSk و BSh، روند کاهشی بارزتری نسبت به دوره اول مشاهده می‌شود که به ترتیب برابر با ۰/۰۱۱- و ۰/۱۹۱- میلی‌متر در سال است، بااین‌حال مقادیر P-value بزرگ (حدود ۰/۶یا بیشتر) نشان می‌دهد که این کاهش‌ها از لحاظ آماری معنادار نیستند. حتی در اقلیم Csa که شیب مثبت اندکی معادل ۰/۵۹ میلی‌متر در سال به‌دست آمده‌است، هیچ ایستگاهی دارای روند معنادار نبوده است. این نتایج حاکی‌ازآن است که تابستان در این دوره نیز فاقد الگوی تغییرات بارشی مشخص می‌باشد.

در بررسی دوره کلی (۲۰۲۰-۱۹۶۱)، برخلاف آنکه تعداد ایستگاه‌های دارای روند معنادار نسبت به دو دوره قبل اندکی بیشتر شده‌اند (۴ ایستگاه از مجموع ۳۳)، اما روند کلی همچنان غیرمعنادار باقی مانده است. در اقلیم BWh، دو ایستگاه دارای روند معنادار شناسایی شده‌اند، اگرچه شیب میانگین برای این اقلیم برابر صفر است. در اقلیم‌های BSk و Dsa نیز تنها یک ایستگاه با روند معنادار دارند. در این میان، بیشترین مقدار شیب مثبت در اقلیم Csa دیده می‌شود که برابر با ۰/۲۶۵ میلی‌متر بر سال است، اما باتوجه‌به مقدار P-value بالا (۰/۷۵۱) این روند معنادار نمی‌باشد. بنابراین، حتی در دوره طولانی‌تر نیز بارش تابستانی در سطح کشور دستخوش روند قابل توجهی نشده است.

در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت برخلاف فصل‌هایی مانند پاییز یا زمستان، مقدار بارش تابستانی در اغلب نقاط ایران فاقد تغییرات معنادار آماری بوده و روندهای مشاهده شده نیز اغلب موضعی، ضعیف و غیرقابل تعمیم مکانی هستند.

همچنین باتوجه‌به شکل (۵) در دوره اول (۱۹۹۰-۱۹۶۱)، مقادیر بارش تابستانی در بیشتر ایستگاه‌ها کم و بسیار ناچیز بوده است. در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک (BWk ،BWh)، اکثر ایستگاه‌ها بارش‌هایی کمتر از ۵ میلی‌متر در فصل تابستان ثبت کرده‌اند. برای نمونه، ایستگاه‌هایی مانند زابل، یزد، طبس و آبادان در اقلیم BWh همگی میانگین بارشی کمتر از ۱ میلی‌متر در این دوره داشته‌اند. در اقلیم BSk نیز ایستگاه‌هایی مانند تربت حیدریه (۰/۶۶۷ میلی‌متر)، شیراز (۱/۱۴۹ میلی‌متر) و سبزوار (۳/۱۴۹ میلی‌متر) بارش بسیار اندکی ثبت کرده‌اند.

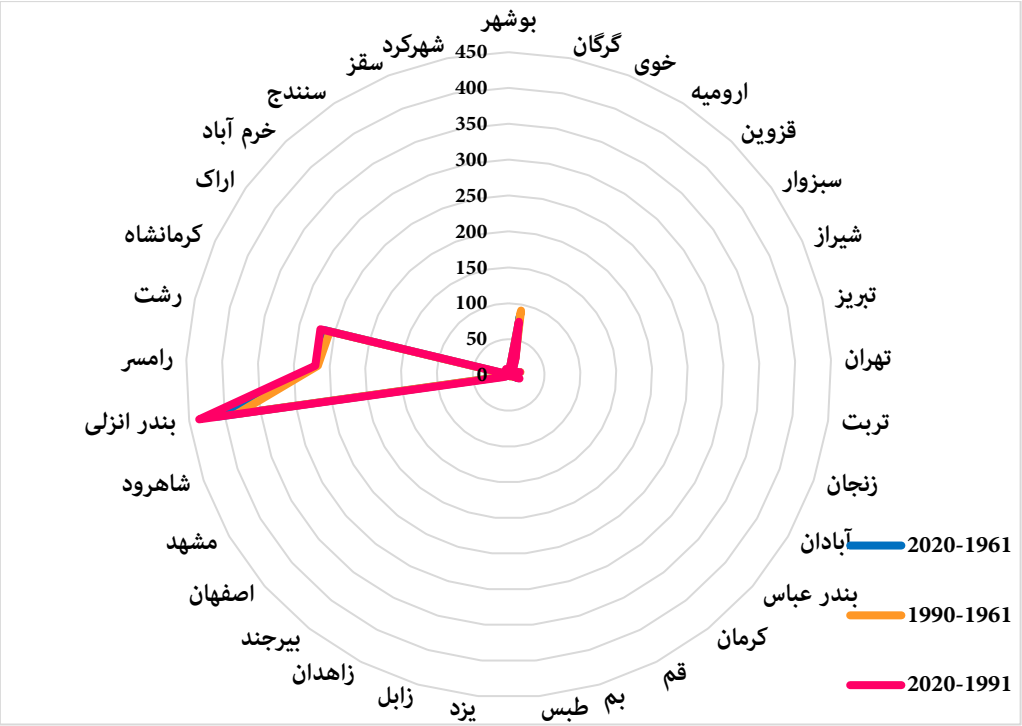
در این میان، تنها اقلیم Csa با ایستگاه‌های خزری مانند بندر انزلی، رامسر و رشت استثنا هستند. این مناطق در دوره اول به ترتیب دارای میانگین‌های بارشی تابستانی ۳۸۳، ۲۶۶ و ۲۵۶ میلی‌متر بوده‌اند که بارزترین مقادیر در کل کشور محسوب می‌شوند و نقش قابل توجهی در شکل‌دهی به میانگین کل کشور دارند. گرگان در اقلیم BSh نیز با مقدار ۹۱/۳۶۴ میلی‌متر، در میان ایستگاه‌های غیرخزری از نظر بارش تابستانی جایگاه بالایی دارد.

در دوره دوم (۲۰۲۰-۱۹۹۱)، برخلاف ثبات نسبی روندها در تحلیل آماری، برخی نوسانات در مقادیر بارش مشاهده می‌شود. در برخی ایستگاه‌ها بارش تابستانی نسبت به دوره اول افزایش یافته است، مانند تربت حیدریه در اقلیم BSk که از ۰/۶۶۷ به ۲/۹۶۷ میلی‌متر رسیده‌است، یا بیرجند در اقلیم BWk که از ۰/۳۵۰ به ۱/۴۷۳ میلی‌متر افزایش داشته است. همچنین در اقلیم Csa نیز رشد مقادیر مشاهده می‌شود، بندر انزلی از ۳۸۳ به ۴۳۵ میلی‌متر و رشت از ۲۵۶ به ۲۷۰ میلی‌متر افزایش داشته‌اند. در مقابل در برخی نقاط بارش کاهش یافته، به‌عنوان‌نمونه، گرگان از ۹۱/۴ به ۷۵/۴ و بندرعباس از ۳/۶ به ۱/۸میلی‌متر کاهش نشان داده‌اند. بااین‌حال، این نوسانات عمدتا محدود و غیرمنسجم بوده‌اند و از نظر آماری در بر اساس آزمون من-کندال روندهای معنادار نشده‌اند، که این مسئله نشان دهنده تاثیرپذیری بالای بارش تابستانی از عوامل محلی، رخدادهای کوتاه‌مدت همدیدی یا نوسانات سالانه است.

در بررسی کل دوره (۲۰۲۰-۱۹۶۱)، بارش تابستانی همچنان در بخش عمده‌ای از کشور در سطحی پایین باقی‌مانده است. مقادیر بارندگی تابستانه در ایستگاه‌های بسیاری در اقلیم‌های خشک مانند زابل (۰/۰۱۱ میلی‌متر)، یزد (۰/۱۲۲) و طبس (۰/۱۵۳) نزدیک به صفر هستند. در مقابل، در سواحل خزری (اقلیم Csa)، بارش تابستانی در سطحی بالا و پایدار باقی‌مانده است، به‌نحوی‌که بندر انزلی با میانگین ۴۰۹ میلی‌متر، رشت با ۲۶۳ و رامسر با ۲۶۸ میلی‌متر همچنان الگوی بارشی متفاوتی را نسبت به سایر نقاط کشور دارد. این الگو با نتایج تحلیل آماری نیز هم‌خوانی دارد؛ جایی که در اقلیم Csa با وجود مقادیر بالای بارش، روند معناداری در تابستان مشاهده نمی‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت اقلیم‌های خزری، علاوه بر برخورداری از بارش تابستانی قابل توجه و نسبتا زیاد، دستخوش تغییرات بلندمدت قابل توجهی نیز در بارش تابستانه خود نبوده‌اند. باتوجه‌به نتایج به‌دست آمده از بررسی وضعیت بارش در فصل تابستان و تغییرات آن، می توان به این نتیجه رسد که جز در ناحیه خزری، در سایر مناطق اقلیمی میزان بارندگی تابستانی اغلب ناچیز و فقط در حد چند میلی‌متر می‌باشد و همین میزان بارندگی فاقد روند معنی‌دار افزایشی و یا کاهشی می‌باشد.

جدول ۷- نتایج آزمون من-کندال و شیب سن بارش فصل تابستان در دوره‌های مختلف آماری

نوع اقلیم	تعداد ایستگاه‌ها	دوره اول (۱۹۹۰-۱۹۶۱)			دوره دوم (۲۰۲۰-۱۹۹۱)			تمامی دوره (۲۰۲۰-۱۹۶۱)		
		تعداد ایستگاه‌های دارای روند	متوسط مقادیر P-value	متوسط شیب سن	تعداد ایستگاه‌های دارای روند	متوسط مقادیر P-value	متوسط شیب سن	تعداد ایستگاه‌های دارای روند	متوسط مقادیر P-value	متوسط شیب سن
BSk	۹	۱	۰/۳۶۸	-۰/۱۱۸	۰	۰/۷۲۳	-۰/۰۱۱	۱	۰/۴۷۱	۰/۰۱۶
BWh	۹	۰	۰/۴۵۰	۰/۰۰۰	۰	۰/۶۱۵	۰/۰۰۰	۲	۰/۳۸۶	۰/۰۰۰
BWk	۴	۰	۰/۶۸۰	۰/۰۰۵	۰	۰/۶۲۱	۰/۰۴۲	۰	۰/۲۷۴	۰/۰۲۱
BSh	۲	۰	۰/۴۹۵	۰/۰۸۹	۰	۰/۶۵۱	-۰/۱۹۱	۰	۰/۳۶۲	-۰/۲۰۴
Dsa	۵	۰	۰/۳۶۴	۰/۰۰۰	۰	۰/۸۹۵	-۰/۰۰۳	۱	۰/۲۲۴	۰/۰۰۵
Csa	۴	۰	۰/۶۷۸	-۱/۰۱۹	۰	۰/۵۷۵	۰/۰۵۹	۰	۰/۷۵۱	۰/۲۶۵
تمامی اقلیم‌ها	۳۳	۱	۰/۴۷۳	-۰/۱۵۰	۰	۰/۶۸۵	-۰/۰۰۳	۴	۰/۴۱۴	۰/۰۲۷



شکل ۵- مقادیر متوسط بارش فصل تابستان (mm) برای ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره‌های مختلف

تحلیل نوسانات بارش در فصل پاییز:

باتوجه‌به نتایج جدول (۸) در دوره نخست، تحلیل روند بارش پاییزه نشان از افزایش میانگین بارش در اغلب اقلیم‌ها دارد، هرچند این روندها عمدتا از نظر آماری معنادار نبوده‌اند. چشمگیرترین افزایش بارش به اقلیم Csa تعلق دارد، جایی که شیب سن به‌طور میانگین برابر با ۳/۶ میلی‌متر در سال برآورد شده است. با وجود عدم معناداری آماری، چنین شیبی بیانگر افزایش نسبی بارش پاییزی در نواحی خزری طی این بازه زمانی است. همچنین در اقلیم Dsa نیز افزایش قابل توجهی با شیب ۱/۳ میلی‌متر در سال مشاهده می‌شود که در یک ایستگاه به آستانه معناداری آماری نیز رسیده است.

در اقلیم‌های خشک‌تر مانند BWh و BWk، با وجود ثبت شیب‌های مثبت (به‌ترتیب ۰/۴۲۶ و ۰/۵۷۸ میلی‌متر در سال)، روندها غالبا غیرمعنادار (در سطح ۹۵٪) باقی مانده‌اند و تنها در یک ایستگاه از BWk روندی معنادار شناسایی شده است. از سوی دیگر، اقلیم BSh در این دوره برخلاف سایر نواحی با شیب منفی مواجه بوده است (۰/۳۴۷- میلی‌متر در سال) که اگرچه معنادار نبوده، اما می‌تواند نشانگر کاهش نسبی بارش‌های پاییزی در مناطق نیمه‌خشک جنوبی کشور در این بازه باشد.

دوره دوم با افت محسوس در شدت روندهای بارشی نسبت به دوره اول همراه بوده است. به جز اقلیم Csa که همچنان بیشترین شیب مثبت (۲ میلی‌متر در سال) را نشان می‌دهد، سایر اقلیم‌ها عمدتا با روندهایی ضعیف‌تر و پراکنده مواجه بوده‌اند. در این دوره، نه تنها هیچ ایستگاهی دارای روند معنادار نبوده است، بلکه در برخی اقلیم‌ها مانند BWh و BSh حتی شیب‌های منفی ثبت شده‌اند (به‌ترتیب ۰/۰۸۵- و ۰/۱۲۷- میلی‌متر در سال). این افت در شدت روند به خصوص در اقلیم‌های معتدل تا خشک قابل توجه است، به‌گونه‌ای که در اقلیم‌های BSk و Dsa، شیب سن نسبت به دوره اول تقریبا به نصف کاهش یافته است. چنین تغییراتی می‌تواند حاکی از کاهش نوسانات بارشی پاییزه یا ثبات نسبی بارش پائیزه طی دهه‌های اخیر باشد.

نتایج حاصل از کل دوره بررسی شده نیز تاییدی بر فقدان روندهای معنادار در بارش پاییزی ایران است. با وجود میانگین شیب مثبت در اغلب اقلیم‌ها، تنها یک ایستگاه در اقلیم BSh با روند کاهشی معنادار شناسایی شده است (۰/۲۵۷- میلی‌متر در سال). به‌طورکلی مقدار شیب سن برای کل ایستگاه‌ها برابر با ۰/۱۱۵ میلی‌متر در سال و متوسط مقدار P-value برابر با ۰/۵۸۴بوده که نشان‌دهنده نبود روند بارشی معنادار در این فصل است.

از نکات قابل تامل، کاهش محسوس شیب روند در اقلیم‌هایی است که در دوره اول مقادیر بالاتری داشتند؛ برای نمونه در Csa، باوجود شیب‌های بالا در دو دوره گذشته، در کل دوره، میانگین شیب به حدود ۰/۱۲۴ میلی‌متر محدود شده است. این کاهش در کنار مقادیر بالای P-value، بار دیگر تأکید می‌کند نوسانات بارشی پاییزی در ایران بیش از آنکه نشانگر یک روند بلندمدت باشند، بازتابی از نوسانات کوتاه‌مدت و ناپایدار هستند.

باتوجه‌به شکل (۶) بررسی تغییرات بارش فصل پاییز طی سه بازه زمانی نشان می‌دهد تغییرات بارش در بسیاری از ایستگاه‌ها ناچیز است، هرچند در برخی مناطق تغییرات

نسبی قابل توجهی مشاهده می‌شود (جدول ۸ و شکل ۶). در اقلیم نیمه‌خشک گرم (BSh)، داده‌های ایستگاهی نشان می‌دهد ایستگاه بوشهر طی دوره دوم روند افزایشی داشته است، به‌طوری‌که بارش از ۹۷/۷ میلی‌متر در دوره اول به ۱۲۱/۹میلی‌متر در دوره دوم افزایش یافته است. در مقابل، ایستگاه گرگان با کاهش بارش از ۲۰۱/۶ میلی‌متر به ۱۶۳/۹ میلی‌متر روبه‌رو شده است. این تغییرات متضاد باعث شده که با وجود میانگین شیب منفی در دوره اول و مثبت در دوره دوم، در کل دوره فقط یک ایستگاه دارای روند معنادار (در سطح ۹۵٪) تشخیص داده شود. درنتیجه، رفتار بارشی این اقلیم از نظر آماری به‌عنوان روندی ناپایدار و محلی ارزیابی می‌شود.

در اقلیم نیمه‌خشک سرد (BSk)، تغییرات بارش در طول سه دوره تقریبا نوسانی اما محدود بوده است. به‌طورمثال، بارش در خوی از ۷۴ میلی‌متر در دوره اول به ۶۴ میلی‌متر در دوره دوم کاهش یافته است درحالی‌که مقدار میانگین در کل دوره ۶۹ میلی‌متر است. در زنجان نیز میانگین بارش تقریبا در هر دو دوره ثابت باقی‌مانده است (۸۴/۱ میلی‌متر در دوره اول و ۸۵/۳ میلی‌متر در دوره دوم). با وجود شیب مثبت متوسط در دوره دوم، آزمون آماری تنها در دوره اول یک ایستگاه با روند معنادار را مشخص کرده و در دو دوره دیگر روندی معنادار یافت نشده است. این مسئله بیانگر نبود جهت‌گیری مشخص در روند بارش پاییزی در این اقلیم در بازه بلندمدت است. در اقلیم بیابانی گرم (BWh)، به‌طور معمول مقادیر بارش پاییزی کم می‌باشد. در برخی ایستگاه‌ها مانند بندرعباس و زاهدان افزایش نسبی در مقادیر بارش پاییزه در دوره دوم در مقایسه با دوره اول مشاهده می‌شود، اما در ایستگاه‌هایی مانند طبس و زابل، این مقادیر کاهش داده‌اند. تحلیل آماری، اگرچه میانگین شیب را در دوره اول مثبت و در دوره دوم اندکی منفی نشان می‌دهد، اما هیچ روند معناداری شناسایی نشده است، نتیجه‌ای که به‌خوبی با رفتار نوسانی بارش دراین ایستگاه‌ها مطابقت دارد.

در اقلیم بیابانی سرد (BWk)، نیز رفتار مشابهی مشاهده می‌شود. داده‌های ایستگاهی مانند مشهد و بیرجند نوساناتی از دوره اول به دوم نشان می‌دهند. به‌عنوان‌مثال در ایستگاه مشهد مقدار بارندگی پاییزه از ۵۴ میلی‌متر در دوره اول به ۴۵/۵ میلی‌متر در دوره دوم کاهش یافته است درحالی‌که میانگین کل دوره ۵۰ میلی‌متر بوده است. بااین‌حال حتی در مواردی مانند شاهرود که افزایش بارش دیده می‌شود، هیچ‌کدام از آزمون‌ها روند معناداری را در هیچ‌یک از سه دوره تایید نکرده‌اند. این وضعیت گویای آن است که اگرچه در این اقلیم تغییرات نسبی وجود دارد، اما جهت‌گیری مشخصی از نظر آماری قابل شناسایی نیست.

در اقلیم کوهستانی سرد (Dsa)، بیشتر ایستگاه‌ها مانند سقز و خرم‌آباد افزایش در بارش پاییزی را در دوره دوم نسبت به دوره اول تجربه کرده‌اند. به‌عنوان‌مثال بارش پاییزه سقز از ۱۴۰ به ۱۵۵میلی‌متر افزایش داشته درحالی‌که میانگین ۶۰ ساله آن ۱۴۷ میلی‌متر است. با وجود چنین افزایشی، آزمون من-کندال در هیچ‌یک از دوره‌ها به‌جز دوره اول، روند معناداری شناسایی نکرده و کل دوره نیز بدون روند آماری معنادار ارزیابی شده است.

در اقلیم مدیترانه‌ای (Csa)، بیشترین مقادیر بارش پاییزی در سراسر کشور ثبت شده است. در ایستگاه‌هایی مانند بندر انزلی، رشت و رامسر، بارش در هر سه دوره در سطح بسیار بالایی باقی‌مانده است به‌عنوان مثال در ایستگاه بندرانزلی بارش از ۷۸۳/۵ در دوره اول به ۸۵۴ میلی‌متر در دوره دوم رسیده و میانگین کل دوره نیز برابر با ۸۱۹ میلی‌متر می‌باشد. هرچند در برخی ایستگاه‌ها کاهش نسبی از دوره اول به دوم مشاهده شده است، اما شیب مثبت ضعیف در دوره دوم و منفی در دوره اول، به‌همراه نوسانات بالا، باعث شده است که هیچ روند معناداری در سطح اقلیم شناسایی نشود.در مجموع، تحلیل سه دوره‌ای بارش پاییزی در اقلیم‌های مختلف ایران نشان می‌دهد که باوجود برخی تغییرات در ایستگاه‌ها، اغلب اقلیم‌ها فاقد روند معنادار آماری بارش در کل دوره بوده‌اند.

جدول ۸- نتایج آزمون من-کندال و شیب سن بارش فصل پاییز در دوره‌های مختلف آماری

نوع اقلیم	تعداد ایستگاه‌ها	دوره اول (۱۹۹۰-۱۹۶۱)			دوره دوم (۲۰۲۰-۱۹۹۱)			تمامی دوره (۲۰۲۰-۱۹۶۱)		
		تعداد ایستگاه‌های دارای روند	متوسط مقادیر P-value	متوسط شیب سن	تعداد ایستگاه‌های دارای روند	متوسط مقادیر P-value	متوسط شیب سن	تعداد ایستگاه‌های دارای روند	متوسط مقادیر P-value	متوسط شیب سن
BSk	۹	۱	۰/۳۷۶	۰/۷۸۹	۰	۰/۵۰۶	۰/۴۰۶	۰	۰/۶۱۱	۰/۱۷۵
BWh	۹	۰	۰/۲۸۲	۰/۴۲۶	۰	۰/۵۳۳	-۰/۰۸۵	۰	۰/۵۰۶	۰/۰۷۶
BWk	۴	۱	۰/۲۵۰	۰/۵۷۸	۰	۰/۵۷۹	۰/۰۳۰	۰	۰/۶۳۲	-۰/۰۰۴
BSh	۲	۰	۰/۲۳۹	-۰/۳۴۷	۰	۰/۵۳۴	-۰/۱۲۷	۱	۰/۰۷۲	-۰/۲۵۷
Dsa	۵	۱	۰/۳۷۳	۱/۳۰۶	۰	۰/۶۶۲	۰/۷۰۹	۰	۰/۵۷۵	۰/۳۱۳
Csa	۴	۰	۰/۴۰۸	۳/۶۱۸	۰	۰/۶۸۱	۲/۰۰۴	۰	۰/۹۱۶	۰/۱۲۴
تمامی اقلیم‌ها	۳۳	۳	۰/۳۳۰	۱/۰۱۷	۰	۰/۵۶۹	۰/۴۳۴	۱	۰/۵۸۴	۰/۱۱۵

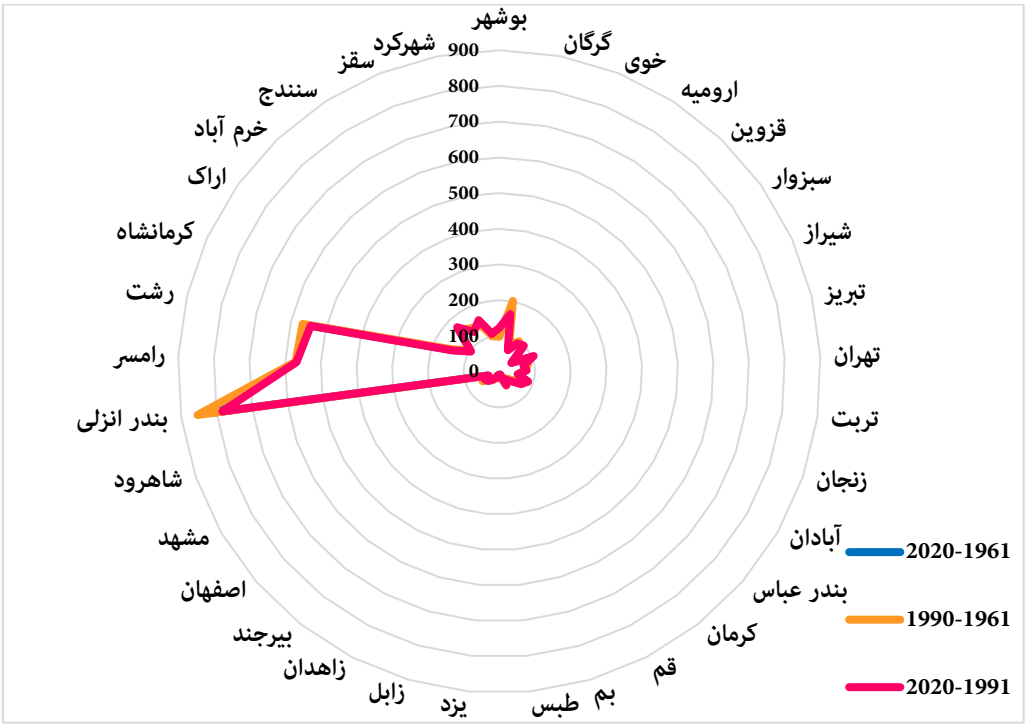
نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی تغییرات سالانه و فصلی بارش در مناطق مختلف اقلیمی کشور انجام شد، نتایج آن نشان می‌دهد روند تغییرات بارش سالانه و فصلی در ایران طی بازه ۶۰ ساله (۱۹۶۱ تا ۲۰۲۰) فاقد تغییرات بلندمدت و معنادار است و عمدتا تحت تاثیر نوسانات کوتاه‌مدت و منطقه‌ای قرار دارد. بررسی داده‌های ایستگاهی و تحلیل آماری در دو دوره ۳۰ ساله و کل دوره، گویای تنوع و پراکندگی روندهای بارشی در اقلیم‌ها و فصول مختلف است، به‌گونه‌ای که هیچ روند پایداری در بارش‌ها برای فصل خاص یا اقلیم خاص شناسایی نشد.

در فصل‌های زمستان و بهار، روندهایی از کاهش بارش در برخی از مناطق مشاهده می‌شود اما به‌طورکلی بارش‌ها به‌ویژه در اقلیم‌های معتدل و کوهستانی سرد نسبتا پایدارتر بوده‌اند. در فصل تابستان نیز با بارش‌های اندک و پراکنده، نوسانات شدیدتری از نظر مقدار بارندگی مشاهده می‌شود اما در اکثر ایستگاه‌ها بارندگی این فصل فاقد روند معنادار می‌باشد. بارش فصل پاییز نیز در دوره نخست روندهای افزایشی قابل توجهی به ویژه در اقلیم‌های مدیترانه‌ای و کوهستانی سرد داشته است، اما این روندها در دوره دوم کاهش چشم‌گیری داشتند و در کل دوره فاقد روند آماری معنادار هستند. درعین‌حال روندهای مشاهده شده نشان می‌دهند اگرچه در دهه‌های نخست وضعیت بارش زمستانی در برخی مناطق نسبتا مطلوب بوده است، اما در سه دهه اخیر، بارش‌ها نه تنها کاهش یافته، بلکه شدت این کاهش در اقلیم‌های خشک و کوهستانی بیشتر بوده است.

تحلیل روند بارش فصل بهار حاکی‌ازآن است که شدیدترین کاهش‌ها در دهه‌های نخست مشاهده شده، درحالی‌که در دهه‌های اخیر، گرایش به سمت ثبات و حتی افزایش خفیف به‌ویژه در اقلیم‌های خشک قابل مشاهده است. برخلاف فصل‌هایی مانند پاییز یا زمستان، بارش تابستانی در اغلب نقاط ایران فاقد تغییرات معنادار آماری بوده و روندهای مشاهده شده نیز اغلب موضعی، ضعیف و غیرقابل تعمیم مکانی‌اند. تحلیل مقادیر بارش پاییزی در اقلیم‌های مختلف کشور، نشان می‌دهد که باوجود برخی تغییرات در ایستگاه‌ها، اغلب اقلیم‌ها فاقد روند معنادار آماری در کل دوره بوده‌اند.

باتوجه‌به یافته‌های این پژوهش (نوسانات و یا تغییرات ناهمگون بارندگی در فصل‌های مختلف و در اقلیم‌های مختلف)، بر ضرورت توجه به کاهش منابع آبی ناشی از بارش‌های زمستانه در اغلب مناطق کشور و تدوین برنامه‌های جامع، پویا و انعطاف‌پذیر در مدیریت منابع آب و سازگاری با تغییر اقلیم تأکید می‌شود. به‌بیان‌دیگر، مدیران و برنامه‌ریزان، باید مدیریت انعطاف‌پذیر منابع آب و کشاورزی را با توجه به نوسانات و تغییرات نا همگون بارندگی در اقلیم‌هاي متفاوت و در فصول مختلف در برنامه کاري خود داشته باشند. باتوجه‌به نتایج این پژوهش، بر ضرورت توجه به ویژگی‌های محلی، فصلی و اقلیمی بارش در برنامه‌ریزی‌های منابع آب و کشاورزی تاکید می‌شود. این رویکرد می‌تواند به پایداری بهتر اکوسیستم‌ها و کاهش آسیب‌پذیری مناطق مختلف کشور در برابر تغییرات اقلیمی کمک کند.



شکل ٦- مقادیر متوسط بارش فصل پاییز (mm) برای ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره‌های مختلف

منابع

زرین، آذر، داداشی رودباری، عباسعلی، و صالح‌آبادی، نرگس. (۱۴۰۰). بررسی بی‌هنجاری و روند دمای ایران در پهنه‌های مختلف اقلیمی با استفاده از مدل‌های جفت شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم (CMIP6). مجله ژئوفیزیک ایـــــــــــــــــــــــــــــــران، ۱۵(۱)، ۳۵-۵۴. https://doi.org/10.30499/ijg.2020.249997.1292

رضیئی، طیب، و میری، مرتضی. (۱۴۰۱). طبقه‌بندی اقلیمی ایران به روش کوپن-گایگر. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. شماره ثبت: ۶۱۷۴۳.

میرعباسی نجف‌آبادی، رسول، و دین‌پژوه، یعقوب. (۱۳۸۹). تحلیل روند تغییرات آبدهی رودخانه‌های شمال غرب ایران در سه دهه اخیر. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۴(۴)، ۷۵۷-۷۶۸.

میان‌آبادی، آمنه، و داوری، کامران. (۱۴۰۲). بررسی تغییرات مقدار و توزیع بارش و دما در ایران و اثرات آن‌ها بر رخدادهای حدی. نشریه آب و توسعه پایدار، ۱۰(۲)، ۱۳-۲۶. https://doi.org/10.22067/jwsd.v10i2.2301-1203

مساعدی، ابوالفضل، کواکبی، غزاله، و عبدالله‌زاده، زهرا. (۱۳۹۰). آشکارسازی تغییرات اقلیمی براساس آزمون آماری من ویتنی در شهر مشهد. کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب کشاورزی. پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

Ahmed, K., Shahid, S., & Nawaz, N. (2018). Impacts of climate variability and change on seasonal drought characteristics of Pakistan. Atmospheric Research, 214, 364-374. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.08.020

Ansari Mahabadi, S., Massah Bavani, A. R., & Bagheri, A. (2018). Improving adaptive capacity of social-ecological system of Tashk-Bakhtegan Lake basin to climate change effects - A methodology based on Post-Modern Portfolio Theory. Ecohydrology & Hydrobiology, 18(4), 365-378. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.11.002

Araghi, A., Martinez, C. J., Adamowski, J., & Olesen, J. E. (2018). Spatiotemporal variations of aridity in Iran using high-resolution gridded data. International Journal of Climatology, 38(6), 2701-2717. https://doi.org/10.1002/joc.5454

Vaghefi, S. A., Abbaspour, N., Kamali, B., & Abbaspour, K. C. (2017). A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions – Case study: California-Baja California Peninsula. Environmental Modelling & Software, 96, 181-198. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.033

Azadi, F., Ashofteh, P.-S., Shokri, A., & Loáiciga, H. A. (2021). Simulation-optimization of reservoir water quality under climate change. Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE), 147(9), 04021068. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001436

Azari, M., Moradi, H. R., Saghafian, B., & Faramarzi, M. (2016). Climate change impacts on streamflow and sediment yield in the North of Iran. Hydrological Sciences Journal, 61(1), 123–133. http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2014.967695

Caloiero, T., Caroletti, G. N., & Coscarelli, R. (2020). TRMM-based rainfall temporal analysis over Italy. SN Applied Sciences, 2, 1270. https://doi.org/10.1007/s42452-020-3075-7

Dinpashoh, Y., Jhajharia, D., Fakheri-Fard, A., Singh, V. P., & Kahya, E. (2011). Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. Journal of Hydrology, 399(3–4), 422–433. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.021

Eini, M. R., Olyaei, M. A., Kamyab, T., Teymoori, J., Brocca, L., & Piniewski, M. (2021). Evaluating three non-gauge-corrected satellite precipitation estimates by a regional gauge interpolated dataset over Iran. Journal of Hydrology: Regional Studies, 38, 100942. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100942

Fang, G., Li, Z., Chen, Y., Liang, W., Zhang, X., & Zhang, Q. (2023). Projecting the impact of climate change on runoff in the Tarim River simulated by the Soil and Water Assessment Tool Glacier model. Remote Sensing, 15(16), 3922. https://doi.org/10.3390/rs15163922

Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., & Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: A review. Environmental Chemistry Letters, 18(6), 2069-2094. https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w

Halwani, J., & Halwani, B. (2022). Climate change in Lebanon and the impact to water resources. In A. Negm, M. El-Alfy, & M. Clüsener-Godt (Eds.), Climate change impacts on water resources in the Arab region (pp. 395–413). Springer International Publishing. Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78566-6_19

Huber, M., & Knutti, R. (2012). Anthropogenic and natural warming inferred from changes in Earth's energy balance. Nature Geoscience, 5(1), 31-36. https://doi.org/10.1038/ngeo1327

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley, Eds.). Cambridge University Press. Cambridge. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Asia (Chapter 24). In Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part B: Regional Aspects (Working Group II contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change) (pp. 1327–1370). Cambridge University Press. Cambridge. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415386.004

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou, Eds.). Cambridge University Press. Cambridge. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Kendall, M.G. (1948). Rank Correlation Methods, 4th edn. Griffin: London.

Li, Q., Ye, A., Wada, Y., Zhang, Y., & Zhou, J. (2024). Climate change leads to an expansion of global drought-sensitive area. Journal of Hydrology, 632, 130874. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130874

Africa based on CMIP5 models. International Journal of Climatology, 38(3), 1375-1392. https://doi.org/10.1002/joc.5252
Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 63(324), 1379–1389. https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934
Sharafati, A., Nabaei, S., & Shahid, S. (2020). Spatial assessment of meteorological drought features over different climate regions in Iran. International Journal of Climatology, 40(3), 1864-1884. https://doi.org/10.1002/joc.6307
Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. Scientific Reports, 10(1), 13768. https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2
Theil, H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis I, II, and III. Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Sciences, 53, 386–392, 521–525, 1397–1412.
World Meteorological Organization. (2020). WMO statement on the state of the global climate in 2019 (WMO-No. 1248). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13705.19046

پی‌نوشت‌ها

1- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

2- UHI: Urban Heat Island

Maghrabi, A. H., & Alotaibi, R. N. (2018). Long-term variations of AOD from an AERONET station in the central Arabian Peninsula. Theoretical and Applied Climatology, 134(3), 1015-1026. https://doi.org/10.1007/s00704-017-2328-x
Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica, 13(3), 245–259.
Mohamed, M. A., El Afandi, G. S., & El-Mahdy, M. E.-S. (2022). Impact of climate change on rainfall variability in the Blue Nile basin. Alexandria Engineering Journal, 61(4), 3265–3275. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.08.056
Mohammadi, A., Javadi, S., Yousefi, H., Pouraram, H., & Randhir, T. O. (2024). A Framework for Assessing Food Baskets Based on Water and Carbon Footprints. Water, 16(9), 1196. https://doi.org/10.3390/w16091196
Nilawar, A. P., & Waikar, M. L. (2019). Impacts of climate change on streamflow and sediment concentration under RCP 4.5 and 8.5: A case study in Purna river basin, India. Science of the Total Environment, 650, 2685-2696. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.334
Oliveira, V. A., de Mello, C. R., Beskow, S., Viola, M. R., & Srinivasan, R. (2019). Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. Ecological Engineering, 133, 20–31. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021
Ongoma, V., Chen, H., & Gao, C. (2018). Projected changes in mean rainfall and temperature over East

Journal of Water and Sustainable Development. December 2025
Volume 12. Lssue 3 (Serial No. 37). pages 181 to 205

نشریه آب و توسعه پایدار. آذر ماه ۱۴۰۴
سال دوازدهم. شماره سوم (پیاپی ۳۷). صفحات ۱۸۱ تا ۲۰۵

Document Type: Review Article

نوع مقاله: مروری

Polysaccharide-Based Hydrogels in Water Treatment: Mechanisms, Applications, and Future Perspectives (A Review)

A.R. Radkhah[1*], S. Eagderi[2], S. Atash Afrazah[3]

1, 2- Ph.D. Graduate and Associate Professor, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. 3- Environmental Expert, Faculty of Natural Resources, Birjand University, Birjand, Iran.

*** Corresponding Author Email:** Alirezaradkhah@ut.ac.ir

Received ▶ 16-07-2025
Revised ▶ 11-12-2025
Accepted ▶ 13-12-2025
Available online ▶ 16-12-2025

Abstract

This review study was conducted to investigate the structure, properties, and diverse applications of hydrogels derived from natural polysaccharides—such as cellulose, chitosan, alginate, starch, and pectin—in water purification. The research discusses the primary pollutant removal mechanisms employed by these hydrogels, including adsorption, ion exchange, filtration, and catalytic degradation, which effectively eliminate a wide range of contaminants such as heavy metal ions and dyes. Analysis of various studies indicates that chitosan, due to its amino groups and inherent cationic charge, is an ideal candidate for adsorbing heavy metals and anionic dyes. On the other hand, alginate-based hydrogels are suitable for the encapsulation and selective absorption of certain pollutants, owing to their ease of gel formation with calcium ions and porous structure. Cellulose and its derivatives also show significant potential for developing cost-effective hydrogels, thanks to their abundance, low cost, and presence of active hydroxyl groups. However, the low solubility and limited reactivity of raw cellulose necessitate complex chemical modifications to enhance its performance. Additionally, pectin, as an anionic polysaccharide capable of gelling in the presence of calcium ions, is suitable for absorbing cationic heavy metals. From an economic perspective, starch and cellulose are suitable options for large-scale applications due to their low cost and abundance, whereas chitosan and alginate, despite their better performance, come with higher production costs. According to the findings, among the various types of hydrogels used globally, those based on cellulose, starch, chitosan, and alginate are far more prevalent in scientific research. Given the potential of these hydrogels—including cost-effectiveness, ease of use, facile modifiability, and biodegradability—they can be utilized to remove various pollutants, especially heavy metals and dyes, from aquatic systems.

Keywords: Chitosan-Based Hydrogels, Emerging Contaminants, Adsorption, Heavy Metals, Sustainable Water Treatment.

هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید در تصفیه آب: مکانیسم‌ها، کاربردها و چشم‌اندازهای آینده (یک مطالعه مروری)

علیرضا رادخواه[۱*]، سهیل ایگدری[۲]، صدیقه آتش‌افرازه[۳]

۱ و ۲- به‌ترتیب دانش‌آموخته دکتری و دانشیار، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ۳- کارشناس محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

***رایانامه نویسنده مسئول:** Alirezaradkhah@ut.ac.ir

تاریخ دریافت ◀ ۱۴۰۴/۰۴/۲۵
تاریخ بازنگری ◀ ۱۴۰۴/۰۹/۲۰
تاریخ پذیرش ◀ ۱۴۰۴/۰۹/۲۲
تاریخ انتشار ◀ ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

چکیده

این مطالعه مروری، به‌منظور بررسی ساختار، خواص و کاربردهای متنوع هیدروژل‌های مشتق شده از پلی‌ساکاریدهای طبیعی مانند سلولز، کیتوزان، آلژینات، نشاسته و پکتین در تصفیه آب به‌اجرا درآمد. در این تحقیق، مکانیسم‌های اصلی حذف آلاینده‌ها، از جمله جذب سطحی، تبادل یونی، فیلتراسیون و تخریب کاتالیزوری که توسط این هیدروژل‌ها برای حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها شامل یون‌های فلزات سنگین، رنگ‌ها و غیره انجام می‌شود، مورد بحث قرار گرفت. بررسی تحقیقات مختلف نشان داد که کیتوزان به دلیل دارا بودن گروه‌های آمینو و بار کاتیونی ذاتی، گزینه‌ای ایده‌آل برای جذب فلزات سنگین و رنگ‌های آنیونی محسوب می‌شود. از سوی دیگر، هیدروژل‌های مبتنی بر آلژینات به‌دلیل سهولت تشکیل ژل با یون‌های کلسیم و ساختار متخلخل، برای انکپسوله‌سازی و جذب انتخابی برخی آلاینده‌ها مناسب هستند. سلولز و مشتقات آن نیز به دلیل فراوانی، هزینه پایین و وجود گروه‌های هیدروکسیل فعال، پتانسیل بالایی در توسعه هیدروژل‌های مقرون به صرفه دارند. با این وجود، حلالیت پایین و واکنش‌پذیری محدود سلولز خام، نیازمند انجام اصلاحات شیمیایی پیچیده برای بهبود عملکرد است. همچنین، پکتین به عنوان یک پلی‌ساکارید آنیونی با قابلیت تشکیل ژل در حضور یون‌های کلسیم، برای جذب فلزات سنگین کاتیونی مناسب است. از دیدگاه اقتصادی، نشاسته و سلولز به دلیل هزینه پایین و فراوانی، گزینه‌های مناسبی برای کاربرد در مقیاس بزرگ هستند، در حالی که کیتوزان و آلژینات با وجود عملکرد بهتر، هزینه تولید بالاتری دارند. بر طبق نتایج، در بین انواع هیدروژل‌های مورد استفاده در سطح جهان، کاربرد هیدروژل‌های مبتنی بر سلولز، نشاسته، کیتوزان و آلژینات در تحقیقات علمی به‌مراتب بیشتر است. با توجه به پتانسیل‌های بالقوه این نوع از هیدروژل‌ها که شامل مقرون به صرفه بودن، کاربرد ساده، قابلیت اصلاح‌پذیری آسان و زیست‌تخریب‌پذیر بودن می‌باشد، می‌توان از این مواد برای حذف آلاینده‌های مختلف به‌ویژه فلزات سنگین و مواد رنگی از سیستم‌های آبی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: هیدروژل‌های مبتنی بر کیتوزان، آلاینده‌های نوظهور، جذب سطحی، فلزات سنگین، تصفیه پایدار آب.

How to cite this article:
Radkhah, A.R, Eagderi, S., & Atash Afrazah, S. (2025). Polysaccharide-Based Hydrogels in Water Treatment: Mechanisms, Applications, and Future Perspectives (A Review). Journal of Water and Sustainable Development, 12(3), 181- 205. https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i3.2507-1441

مقدمه

ایران، به عنوان کشوری در منطقه خشک و نیمه‌خشک، همواره با چالش کمبود آب مواجه بوده است. آلودگی آب ناشی از تخلیه پساب‌های صنعتی حاوی فلزات سنگین سمی، رنگ‌های پایدار و تجزیه‌ناپذیر، ترکیبات آلی فرار و نیمه‌فرار، مواد دارویی فعال و محصولات مراقبت شخصی و میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، نه تنها اکوسیستم‌های آبی ارزشمند کشور را به شدت تخریب می‌کند، بلکه به طور مستقیم سلامت عمومی را نیز به خطر می‌اندازد (Nikpey و همکاران، ۲۰۲۵). این وضعیت، لزوم توسعه و پیاده‌سازی فناوری‌های نوین تصفیه آب را که هم کارآمد، هم اقتصادی، هم پایدار و هم بومی‌سازی شده باشند، بیش از پیش برجسته می‌سازد (Omotoso و Omotayo، ۲۰۲۴). این امر نه تنها بر دسترسی به آب آشامیدنی سالم تأثیر گذاشته، بلکه امنیت غذایی و سلامت زیست‌بوم‌های آبی کشور را نیز تهدید می‌کند. روش‌های سنتی تصفیه آب، اگرچه تا حدودی کارآمد بوده‌اند، اما اغلب با محدودیت‌هایی نظیر هزینه‌های عملیاتی بالا، مصرف انرژی زیاد، تولید حجم زیادی از لجن سمی و عدم توانایی در حذف مؤثر طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های نوظهور و مقاوم همراه هستند که برای شرایط خاص ایران، چالش‌برانگیزتر می‌شوند (رادخواه و همکاران، ۱۴۰۱). به عنوان مثال، در مناطقی با منابع آب محدود، نیاز به فناوری‌هایی هست که آب را با بالاترین کیفیت ممکن برای استفاده مجدد آماده کنند (Cagno و همکاران، ۲۰۲۲). در مواجهه با این چالش‌ها، تحقیقات گسترده‌ای در سطح جهانی و ملی در زمینه مواد و فرآیندهای پیشرفته برای غلبه بر این محدودیت‌ها در حال انجام است. در میان رویکردهای نوین، استفاده از مواد جاذب[1] به دلیل سادگی عملکرد، انعطاف‌پذیری، کارایی بالا در غلظت‌های پایین آلاینده (رادخواه و همکاران، ۱۴۰۳) و مهم‌تر از همه، امکان بازیابی و استفاده مجدد از مواد جاذب، توجه زیادی را به خود جلب کرده است (Ahmadian و همکاران، ۲۰۲۳). به طور خاص، مواد مبتنی بر پلیمرهای طبیعی در سال‌های اخیر به عنوان جایگزین‌های زیست‌دوست و پایدار برای جاذب‌های رایج شیمیایی و سنتتیک مطرح شده‌اند. از جمله این مواد که از منابع تجدیدپذیر و اغلب بومی به دست می‌آیند، می‌توان به پلی‌ساکاریدها اشاره کرد که خواص منحصربه‌فردی نظیر زیست‌سازگاری، زیست‌تخریب‌پذیری و عدم سمیت دارند. پلی‌ساکاریدها، به‌عنوان بیوپلیمرهای کربوهیدراتی متشکل از واحدهای مونوساکاریدی متصل به هم، فراوان‌ترین پلیمرهای طبیعی روی زمین هستند. ایران دارای منابع غنی از بیومس‌ها و پسماندهای کشاورزی است که می‌توانند به عنوان منابع ارزان و فراوان برای استخراج پلی‌ساکاریدها به کار روند (Bilal و همکاران، ۲۰۲۱). امروزه، انواع مختلفی از پلی‌ساکاریدها از قبیل سلولز، کیتوزان، آلژینات، نشاسته و پکتین برای کاربردهای محیط زیستی، به ویژه تصفیه آب، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. با توجه به این موضوع، برای کشوری مانند ایران که به دنبال راه حل‌های پایدار و کاهش وابستگی به مواد شیمیایی وارداتی است، توسعه این مواد تجدیدپذیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Dowbysz و همکاران، ۲۰۲۲).

هیدروژل‌ها، به عنوان شبکه‌های سه بعدی پلیمری و آبدوست که قادر به جذب مقادیر زیادی آب در ساختار خود بدون از دست دادن یکپارچگی ساختاری هستند، جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. ویژگی کلیدی هیدروژل‌ها، وجود گروه‌های عاملی آبدوست (مانند هیدروکسیل، کربوکسیل، آمین، آمید) در ساختار آن‌هاست که امکان برهم‌کنش قوی با مولکول‌های آب و همچنین آلاینده‌های یونی یا قطبی را فراهم می‌آورد (Thang و همکاران، ۲۰۲۳). هنگامی که این هیدروژل‌ها از پلی‌ساکاریدهای طبیعی ساخته می‌شوند، مزایای ذاتی پلیمرهای طبیعی (مانند فراوانی، ارزانی، تجدیدپذیری و دوستدار محیط زیست بودن) با خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد هیدروژل‌ها (مانند ظرفیت جذب بالا، سطح ویژه قابل دسترس، تخلخل کنترل شده و انعطاف‌پذیری مکانیکی) ترکیب شده و موادی با پتانسیل بالا برای کاربردهای تصفیه آب ایجاد می‌کنند (Thang و همکاران، ۲۰۲۳).

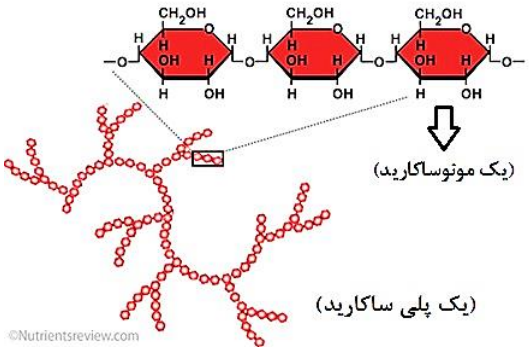
با توجه به پتانسیل بالقوه ایران در برخورداری از منابع غنی پلی‌ساکاریدها از جمله بیومس‌ها و پسماندهای کشاورزی، صنایع چوب و غیره، مطالعه مروری حاضر با هدف ارائه یک دیدگاه کامل و به‌روز از آخرین پیشرفت‌ها در زمینه کاربرد هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید در تصفیه آب تدوین شده است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی انواع مختلف پلی‌ساکاریدهای مورد استفاده (با تأکید بر پتانسیل بومی‌سازی)، روش‌های سنتز و اصلاح هیدروژل‌های مشتق شده از آن‌ها و مکانیزم‌های اصلی درگیر در حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین، رنگ‌ها، ترکیبات آلی نوظهور و میکروارگانیسم‌ها است (Berradi و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، این مطالعه مروری به چالش‌های موجود و چشم‌اندازهای آینده در توسعه و تجاری‌سازی این مواد دوستدار محیط زیست، می‌پردازد و بر اهمیت تحقیقات هدفمند و کاربردی برای بومی‌سازی فناوری و پاسخ به نیازهای خاص کشور ایران در زمینه مدیریت منابع آب و محیط زیست تأکید خواهد کرد.

۱. پلی‌ساکاریدها: ساختار، خواص و منابع بنیادین هیدروژل‌های تصفیه آب

پلی‌ساکاریدها [کلمه یونانی پُلی به معنی زیاد؛ ساکار به معنی قند] کربوهیدرات‌های پیچیده‌ای هستند که از ۱۰ تا چند هزار مونوساکارید که به صورت زنجیره‌ای مرتب شده‌اند، تشکیل شده‌اند (شکل ۱). پلی‌ساکاریدها، به عنوان

ستون فقرات بیومولکولی طبیعت، جایگاه ویژه‌ای در میان بیوماکرومولکول‌ها دارند و از فراوان‌ترین پلیمرهای طبیعی روی کره زمین محسوب می‌شوند. این ترکیبات پیچیده کربوهیدراتی از زنجیره‌های طولانی واحدهای مونوساکارید (قندهای ساده) تشکیل شده‌اند که از طریق پیوندهای کووالانسی به نام پیوندهای گلیکوزیدی به یکدیگر متصل شده‌اند (Sarraf و همکاران، ۲۰۲۱). تنوع بی‌نظیری در ساختار پلی‌ساکاریدها وجود دارد که از عوامل متعددی نظیر نوع مونوساکاریدهای سازنده، پیکربندی فضایی این واحدها (آلفا یا بتا)، محل و نوع پیوندهای گلیکوزیدی (به عنوان مثال، پیوندهای (۱→۴) یا (۱→۶)) و الگوی زنجیره‌های پلیمری نشأت می‌گیرد. این تنوع ساختاری، به پلی‌ساکاریدها خواص فیزیکوشیمیایی بسیار متفاوتی می‌بخشد که آن‌ها را برای کاربردهای گسترده‌ای از جمله در پزشکی، صنایع غذایی و به خصوص، فناوری‌های تصفیه آب، ایده‌آل می‌سازد (Seeberger، ۲۰۲۲؛ Murphy و همکاران، ۲۰۲۳).

به‌طور کلی، پلی‌ساکاریدها را می‌توان بر اساس ترکیب مونوساکاریدی به دو دسته اصلی تقسیم کرد: هموپلی‌ساکاریدها که تنها از یک نوع واحد مونوساکاریدی تکراری ساخته شده‌اند (مانند سلولز و نشاسته که هر دو از واحدهای گلوکز تشکیل شده‌اند اما با پیوندهای گلیکوزیدی متفاوت) و هتروپلی‌ساکاریدها که از دو یا چند نوع مختلف مونوساکارید (نظیر پکتین و آلژینات) تشکیل شده‌اند (Murphy و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، منشأ استخراج نیز می‌تواند مبنای دیگری برای طبقه‌بندی باشد، شامل پلی‌ساکاریدهای گیاهی، حیوانی، میکروبی و جلبکی. فارغ از منشأ و طبقه‌بندی دقیق، ویژگی بارز و مشترک بسیاری از پلی‌ساکاریدهای طبیعی، حضور تعداد زیادی گروه هیدروکسیل (OH-) در ساختار هر واحد مونوساکاریدی است (Carpena و همکاران، ۲۰۲۲). این گروه‌های هیدروکسیل نه تنها قابلیت تشکیل پیوندهای هیدروژنی قوی با مولکول‌های آب را دارند، بلکه منجر به خاصیت آبدوستی برجسته و ظرفیت تورم بالای هیدروژل‌های مشتق شده از آن‌ها نیز می‌شوند. علاوه بر این، لازم به ذکر است که گروه‌های هیدروکسیل به‌عنوان نقاط واکنش‌پذیرِ ایده‌آل برای اصلاح شیمیایی پلی‌ساکاریدها عمل می‌کنند (Zheng و همکاران، ۲۰۱۷). این اصلاحات امکان معرفی گروه‌های عاملی جدید و هدفمند را فراهم آورده و خواص جذبی و سایر ویژگی‌های عملکردی را به طرز چشمگیری بهبود می‌بخشند. لازم به ذکر است که برخی پلی‌ساکاریدها به طور طبیعی حاوی گروه‌های کربوکسیل (COOH-) (مانند آلژینات و پکتین) یا گروه‌های آمین (NH_2^-) (مانند کیتوزان) هستند که به ترتیب بار منفی یا مثبت به ساختار پلیمر می‌بخشند و آن‌ها را به موادی عالی برای تبادل یونی و جذب الکترواستاتیکی آلاینده‌های باردار تبدیل می‌کنند (Bosacka و همکاران، ۲۰۲۲).



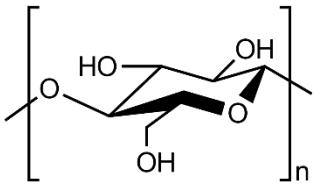
شکل ۱- ساختار پلی‌ساکاریدها (Balducci و همکاران، ۲۰۲۳)

در ادامه به بررسی دقیق‌تر مهم‌ترین پلی‌ساکاریدهایی پرداخته می‌شود که به طور گسترده در سنتز هیدروژل‌ها برای کاربردهای تصفیه آب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱-۱. پلی‌ساکاریدهای محوری در تصفیه آب با تمرکز بر پتانسیل ملی

سلولز به عنوان فراوان‌ترین پلیمر طبیعی روی کره زمین و جزء اصلی دیواره سلولی گیاهان، از واحدهای تکرارشونده بتا-D-گلوکوپیرانوز تشکیل شده که توسط پیوندهای گلیکوزیدی (۱→۴)β به یکدیگر متصل شده‌اند. ساختار خطی و آرایش زنجیره‌های پلیمری سلولز از طریق پیوندهای هیدروژنی درون و بین مولکولی قوی، منجر به تشکیل نواحی بلوری (کریستالی) و بی‌نظم (آمورف) می‌شود (شکل ۲). این ساختار نیمه‌کریستالی، به سلولز استحکام مکانیکی بالا و عدم حلالیت در آب و اکثر حلال‌های آلی می‌بخشد که آن را به ماده‌ای مقاوم و پایدار تبدیل می‌کند (McNamara و همکاران، ۲۰۱۵). پتانسیل ایران در بهره‌برداری از سلولز بسیار بالاست؛ پسماندهای کشاورزی وسیعی نظیر کاه گندم و برنج، ساقه ذرت و نیشکر، بقایای پنبه و انواع ضایعات لیگنوسلولزی از صنایع چوب و کاغذسازی، منابع ارزان و تجدیدپذیری از سلولز را فراهم می‌آورند (Ojo، ۲۰۲۳). این منابع عظیم می‌توانند به عنوان ماده اولیه برای تولید هیدروژل‌های سلولزی، به ویژه در قالب

نانوسلولزها «نانوفیبریل‌های سلولزی و نانوبلورهای سلولزی» که به دلیل نسبت سطح به حجم فوق‌العاده بالا، مدول الاستیک عالی و گروه‌های هیدروکسیل فعال‌تر، کارایی بی‌نظیری در تصفیه آب دارند، مورد استفاده قرار گیرند (Magalhães و همکاران، ۲۰۲۳). قابلیت اصلاح شیمیایی گسترده گروه‌های هیدروکسیل سلولز، امکان معرفی گروه‌های عاملی متنوعی نظیر آمین، کربوکسیل و سولفونیک را فراهم می‌آورد که ظرفیت جذب فلزات سنگین، رنگ‌ها و آلاینده‌های آلی را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد (Zhang و همکاران، ۲۰۲۲).



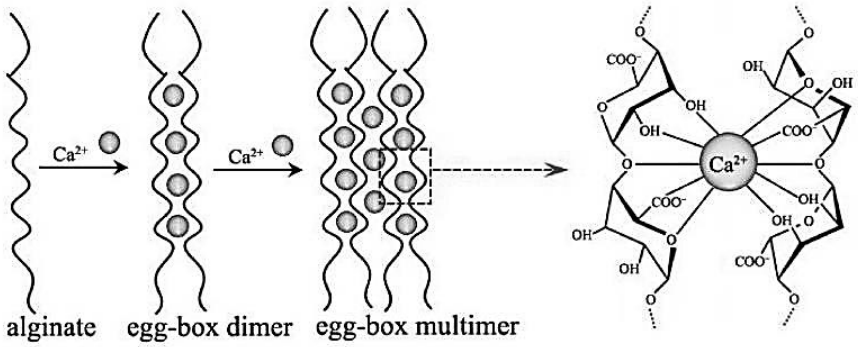
شکل ۲- ساختار شیمیایی سلولز

کیتوزان، که پس از سلولز دومین پلیمر طبیعی فراوان است، از طریق فرآیند دزستیلاسیون کیتین (پلیمر اصلی اسکلت بیرونی سخت‌پوستان، حشرات و دیواره سلولی قارچ‌ها) به دست می‌آید. این پلی‌ساکارید خطی از واحدهای تکرارشونده D-گلوکز آمین (و درصدی کمتر از N-استیل-D-گلوکز آمین) که توسط پیوندهای گلیکوزیدی β(۱→۴) به هم متصل شده‌اند، تشکیل شده است. آنچه کیتوزان را در میان سایر پلی‌ساکاریدها منحصر به فرد می‌سازد، وجود گروه‌های آمین (NH_2^-) آزاد در ساختار آن است (Aranaz و همکاران، ۲۰۲۱). این گروه‌های آمین در محیط‌های اسیدی پروتونه شده و بار مثبت پیدا می‌کنند، که به کیتوزان خاصیت کاتیونی می‌بخشد و آن را برای جذب مؤثر آلاینده‌های با بار منفی، نظیر رنگ‌های آنیونی، آنیون‌های فلزی و کمپلکس‌سازی با یون‌های فلزات سنگین، بی‌نظیر می‌سازد (Pérez-Pacheco و همکاران، ۲۰۲۵). ایران با داشتن سواحل طولانی در خلیج فارس و دریای خزر و صنایع شیلات فعال، دارای منابع عظیمی از پوست میگو و خرچنگ است که به عنوان پسماند تولید می‌شوند. بهره‌برداری از این پسماندها برای تولید کیتوزان، نه تنها یک رویکرد دوستدار محیط زیست و پایدار است، بلکه می‌تواند ارزش افزوده قابل توجهی برای صنایع شیلات کشور ایجاد کند. علاوه بر ظرفیت جذب بالا، خواص ضد میکروبی ذاتی کیتوزان نیز آن را برای حذف میکروارگانیسم‌ها و ضدعفونی آب مناسب می‌سازد (Pak و Farajzadeh، ۲۰۰۷).

آلژینات یک پلی‌ساکارید خطی و آنیونی است که از دیواره سلولی جلبک‌های قهوه‌ای و برخی گونه‌های باکتریایی استخراج می‌شود (شکل ۴). این پلیمر از واحدهای مونوساکاریدی اسیدی بتا-D-مانورونیک اسید (M) و آلفا-L-گولورونیک اسید (G) تشکیل شده که به صورت بلوک‌های هموپلیمری (مثلاً بلوک‌های GGG یا MMM) یا هتروپلیمری (بلوک‌های MG) به هم متصل شده‌اند (Abka-khajouei و همکاران، ۲۰۲۲). برجسته‌ترین ویژگی آلژینات، توانایی آن در تشکیل ژل‌های پایدار در حضور یون‌های فلزات دوظرفیتی یا چندظرفیتی مانند کلسیم (Ca^{2+})، استرانسیم (Sr^{2+}) و باریم (Ba^{2+}) است. این فرآیند شبکه‌ای شدن یونی از طریق مکانیسم "جعبه تخم‌مرغی" رخ می‌دهد (شکل ۳) که در آن یون‌های فلزی بین زنجیره‌های پلیمری بلوک‌های G قرار گرفته و یک ساختار سه بعدی پایدار ایجاد می‌کنند (Abka-khajouei و همکاران، ۲۰۲۲).

سواحل گسترده ایران در خلیج فارس و دریای عمان، بستر مناسبی برای رشد جلبک‌های قهوه‌ای فراهم می‌آورند. توسعه مزارع پرورش جلبک و فرآوری آن‌ها برای استخراج آلژینات، می‌تواند منبع مهمی برای تولید این پلیمر ارزشمند در کشور باشد. وجود گروه‌های کربوکسیل (-COOH) فراوان در آلژینات، به آن بار منفی می‌بخشد و آن را به جاذبی عالی برای یون‌های فلزات سنگین کاتیونی و رنگ‌های کاتیونی از طریق تبادل یونی و کمپلکس‌سازی تبدیل می‌کند. سهولت تشکیل ژل در شرایط ملایم و پایداری مکانیکی مناسب، آلژینات را برای تولید هیدروژل‌های تصفیه آب بسیار کاربردی می‌سازد (Saji و همکاران، ۲۰۲۲).

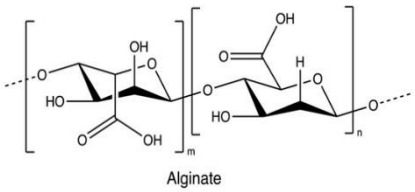
نشاسته نیز یک هموپلی‌ساکارید ارزان و فراوان است که از گیاهان (به ویژه غلات مانند گندم و ذرت و محصولات ریشه‌ای مانند سیب‌زمینی) به دست می‌آید. این پلیمر از واحدهای تکرارشونده آلفا-D-گلوکوپیرانوز تشکیل شده و دو جزء اصلی این ماده، آمیلوز (بخش خطی) و آمیلوپکتین (بخش شاخه‌دار)، هستند (شکل ۴). نسبت این دو جزء بسته به منبع گیاهی متفاوت است (Benalaya و همکاران، ۲۰۲۴). نشاسته اگرچه به دلیل گروه‌های هیدروکسیل آبدوست است، اما حلالیت محدودی در آب سرد دارد و با حرارت دادن می‌تواند به ژل تبدیل شود. ایران با تولید انبوه غلاتی نظیر گندم و ذرت و همچنین سیب‌زمینی، دارای منابع فراوانی از نشاسته است که می‌تواند به عنوان ماده اولیه ارزان‌قیمت برای سنتز هیدروژل‌ها استفاده شود. قابلیت ژلاتینه شدن، گروه‌های هیدروکسیل واکنش‌پذیر و امکان ایجاد ساختارهای متخلخل با استفاده از نشاسته، آن را به گزینه‌ای اقتصادی و دوستدار محیط زیست برای کاربردهای جذب سطحی تبدیل کرده است (Yazid و همکاران، ۲۰۱۸).

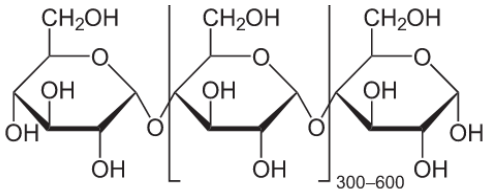


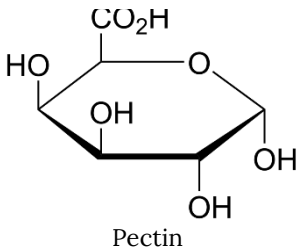
شکل ۳- نمایش شماتیکی از مدل جعبه تخم‌مرغی (Zhang و همکاران، ۲۰۲۲).

در نهایت، پکتین، یک هتروپلی‌ساکارید پیچیده و آنیونی است که به وفور در دیواره سلولی گیاهان عالی، به ویژه در میوه‌ها (نظیر مرکبات و سیب) یافت می‌شود. ساختار اصلی آن از یک ستون فقرات پلی‌گالاکتورونیک اسید تشکیل شده که شامل واحدهای آلفا-۱,۴-D-گالاکتورونیک اسید است و بخش قابل توجهی از گروه‌های کربوکسیل آن، ممکن است متیله شده باشند (Lara-Espinoza و همکاران، ۲۰۱۸). وجود گروه‌های کربوکسیل آزاد به پکتین بار منفی می‌دهد و آن را برای جذب مؤثر فلزات سنگین و رنگ‌های کاتیونی مناسب می‌سازد. همانند آلژینات، پکتین نیز می‌تواند در حضور یون‌های فلزات دوظرفیتی ژل تشکیل دهد (Gorgieva و Ojstršek، ۲۰۲۴). کشور ایران به عنوان یکی از بزرگترین تولیدکنندگان میوه‌ها و مرکبات در جهان، دارای پسماندهای عظیم کشاورزی از صنایع آب‌میوه‌سازی، کنسانتره و کمپوت‌سازی (پوست و تفاله میوه‌ها) است. این پسماندها در حال حاضر اغلب به عنوان ضایعات دور ریخته می‌شوند، در حالی که می‌توانند به عنوان منابع غنی و ارزان قیمتی برای استخراج پکتین مورد بهره‌برداری قرار گیرند و به توسعه هیدروژل‌های پکتینی بومی کمک شایانی کنند (Kamali و همکاران، ۲۰۱۶).

به‌طور خلاصه، استفاده از پلی‌ساکاریدها به عنوان بلوک‌های سازنده هیدروژل‌ها برای تصفیه آب، مزایای چندجانبه‌ای را ارائه می‌دهد. این مزایا شامل پایداری زیست‌محیطی (تجدیدپذیری، زیست‌تخریب‌پذیری کامل و کاهش ردپای کربن)، صرفه‌جویی اقتصادی (بهره‌برداری از پسماندها و کاهش وابستگی به مواد سنتتیک گران‌قیمت وارداتی)، ایمنی و زیست‌سازگاری (ذاتاً غیرسمی بودن) و به ویژه قابلیت اصلاح‌پذیری بالا و انعطاف‌پذیری طراحی است (Sandu و همکاران، ۲۰۲۵). این انعطاف‌پذیری به محققان اجازه می‌دهد تا با مهندسی سطح مولکولی و طراحی ساختارهای متخلخل، هیدروژل‌هایی با کارایی بهینه برای حذف انواع خاصی از آلاینده‌ها و در شرایط مختلف محیطی، تولید کنند (Pellá و همکاران، ۲۰۱۸). با در نظر گرفتن این ویژگی‌های منحصربه‌فرد و پتانسیل‌های عظیم بومی‌سازی در ایران، پلی‌ساکاریدها بستر مناسبی را برای توسعه نسل جدیدی از جاذب‌ها و فیلترهای پایدار و بومی برای مقابله با چالش‌های آلودگی آب کشور فراهم می‌آورند. بخش‌های آتی این مطالعه به تفصیل به چگونگی سنتز این هیدروژل‌ها و مکانیسم‌های دقیق عمل آن‌ها در حذف آلاینده‌های مختلف خواهد پرداخت.







شکل ۴- ساختار شیمیایی آلژینات، نشاسته و پکتین (Lin و همکاران، ۲۰۲۲)

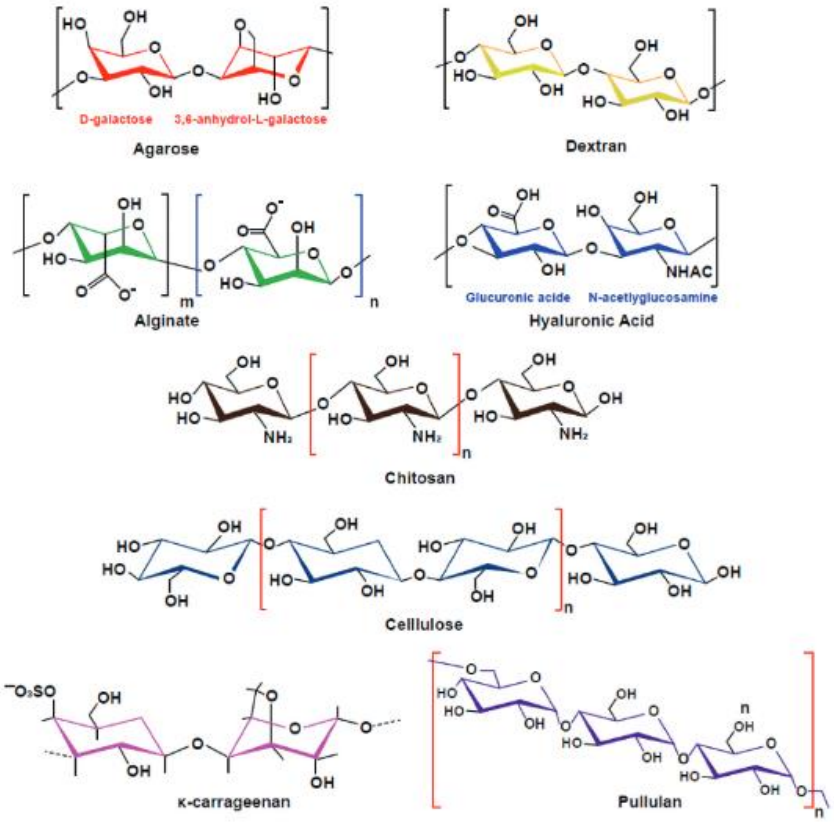
۲. هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید: سنتز، خصوصیات و مکانیسم‌های جذب آلاینده

هیدروژل‌ها به عنوان شاهکار مهندسی مواد، شبکه‌های پلیمری سه‌بعدی و آبدوستی هستند که قابلیت بی‌نظیری در جذب مقادیر قابل توجهی از آب یا سیالات بیولوژیکی در ساختار خود دارند (شکل ۵)، بدون اینکه انسجام و یکپارچگی ساختاری خود را از دست بدهند (El-Sherbiny و Yacoub، ۲۰۱۳). این توانایی شگفت‌انگیز به دلیل وجود پرشمار گروه‌های آبدوست (نظیر هیدروکسیل، کربوکسیل، آمین و آمید) در زنجیره‌های پلیمری آن‌ها است که امکان تشکیل پیوندهای هیدروژنی قوی با مولکول‌های آب را فراهم می‌آورد (Ho و همکاران، ۲۰۲۲). هنگامی که این شبکه‌های ژلی از پلی‌ساکاریدهای طبیعی استخراج و سنتز می‌شوند، محصول نهایی نه تنها خواص برجسته هیدروژل‌ها را به ارث می‌برد، بلکه مزایای ذاتی و اکولوژیکی پلیمرهای طبیعی نظیر زیست‌سازگاری، زیست‌تخریب‌پذیری کامل و منشأ تجدیدپذیر را نیز به همراه دارد (Peera و Byun، ۲۰۲۵). در جدول (۱) طبقه‌بندی و ویژگی‌های اصلی هیدروژل‌ها بر اساس پارامترهای مختلف نشان داده شده است که از نظر علمی بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

این بخش به طور جامع به بررسی روش‌های مختلف سنتز این هیدروژل‌ها، خصوصیات فیزیکوشیمیایی حیاتی آن‌ها که بر عملکردشان تأثیر می‌گذارد و مهم‌تر از همه، مکانیسم‌های پیچیده و چندگانه درگیر در حذف مؤثر آلاینده‌ها از محیط‌های آبی می‌پردازد.

۲-۱. روش‌های سنتز هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید: مهندسی یک شبکه هوشمند

تولید هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی عمدتاً بر پایه ایجاد اتصالات متقابل پایدار بین زنجیره‌های پلیمری انجام می‌شود تا یک شبکه سه‌بعدی متراکم و در عین حال قابل تورم شکل گیرد. این اتصالات می‌توانند از طریق رویکردهای فیزیکی یا شیمیایی برقرار شوند و انتخاب روش به نوع خاص پلی‌ساکارید مورد استفاده، ویژگی‌های مطلوب هیدروژل نهایی و ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی بستگی دارد (Berradi و همکاران، ۲۰۲۳).



شکل ۵- ساختار شیمیایی هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید. آگاروز از-(3pc6) (4-1)-β-دهیدراته-L-گالاکتوز (چپ) و-D-(3-1)-α-گالاکتوز (راست) تشکیل شده است. اسید هیالورونیک (HA) از بقایای متناوب (3-1)-D-β اسید گلوکورونیک (چپ) و-N-(4-1)-D-β استیل گلوکزامین (راست) تشکیل شده است. آلژینات از یک کوپلیمر خطی از واحدهای اسید-l گولورونیک متصل به (4-1)-β و بقایای اسید-L-α گولورونیک تشکیل شده است (Huang و همکاران، ۲۰۲۳).

جدول ۱- طبقه‌بندی و ویژگی‌های اصلی هیدروژل‌ها بر اساس پارامترهای مختلف (Dattilo و همکاران، ۲۰۲۳)

ویژگی‌ها	طبقه‌بندی	معیارها
پیوند عرضی	شیمیایی	پلیمرها به صورت کووالانسی توسط اتصالات دائمی پیوند عرضی می‌شوند. این کار می‌تواند با افزودن مولکول‌های پیوند عرضی، اتصال پلیمر-پلیمر یا آغازگرهای نوری انجام شود.
	پلیمرهای فیزیکی	به واسطه پیوندهای زنجیره‌ای و یا پیوندهای هیدروژنی یا برهمکنش‌های آبگریز یا یونی در کنار هم نگه داشته می‌شوند.
ترکیب پلیمری	هموپلیمر	هیدروژل مشتق شده از یک گونه مونومر.
	کوپلیمر	هیدروژل از دو یا چند مونومر مختلف با حداقل یک جزء آبدوست تشکیل شده است.
	شبکه نیمه‌درهم‌تنیده	هیدروژل از یک مونومر شبکه‌ای‌شده و یک جزء غیرشبکه‌ای‌شده تشکیل شده است.
	شبکه درهم تنیده	هیدروژل‌ها از دو زنجیره پلیمری مستقل با اتصالات عرضی ساخته شده‌اند که به شکل شبکه‌ای قرار گرفته‌اند.
منبع	طبیعی	پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها نمونه‌هایی از پلیمرهای هیدروژل‌های طبیعی هستند. آن‌ها زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر هستند.
	مصنوعی	هیدروژل‌های مصنوعی استحکام بالاتری دارند و می‌توانند طوری طراحی شوند که خواص مکانیکی و شیمیایی خاصی داشته باشند.
	هیبرید	هیدروژل‌ها ترکیبی از پلیمرهای مصنوعی و طبیعی هستند.
ساختار فیزیکی	آمورف	آنها حاوی زنجیره‌های ماکرومولکولی هستند که به صورت تصادفی چیده شده‌اند.
	کریستالی	آنها دارای نواحی متراکم از زنجیره‌های ماکرومولکولی منظم هستند.
	نیمه بلوری	مخلوطی از فازهای آمورف و بلوری.
بار الکتریکی شبکه‌ای	غیریونی	آنها هیچ گروه باری ندارند و اتصالات فوق‌العاده بادوام و دائمی دارند.
	یونی	آنها می‌توانند مثبت یا منفی باشند و بسته به pH رفتارهای متفاوتی دارند.
	آمفوتریک	هیدروژل‌ها حاوی هر دو گروه اسیدی و بازی هستند.
	زویتریونیک (Zwitterionic) - بارهای منفی و مثبت هم توان	آنها مقدار مساوی بار مثبت و منفی را نشان می‌دهند.

روش‌های شبکه‌ای شدن شیمیایی از طریق تشکیل پیوندهای کووالانسی دائمی بین زنجیره‌های پلیمر صورت می‌پذیرد که معمولاً با استفاده از عوامل شبکه‌ای کننده[۲] انجام می‌شود. این عوامل، مولکول‌های دو یا چندعاملی هستند که با گروه‌های عاملی فعال موجود در پلی‌ساکاریدها (نظیر گروه‌های هیدروکسیل در سلولز و نشاسته، یا گروه‌های آمین در کیتوزان) واکنش می‌دهند (Campiglio و همکاران، ۲۰۱۹؛ Fancy و Kodadek، ۱۹۹۹). برای مثال، گلوتارآلدهید به دلیل قیمت مناسب و واکنش‌پذیری بالا، به طور سنتی برای شبکه‌ای کردن کیتوزان و سایر پلی‌ساکاریدها استفاده می‌شد، اما نگرانی‌ها در مورد سمیت آن، پژوهشگران را به سمت جایگزین‌های ایمن‌تر سوق داده است (Campiglio و همکاران، ۲۰۱۹). در این راستا، اسیدهای چندکربوکسیلیک مانند سیتریک اسید و ادهیدروکسی‌پروپان تری‌کربوکسیلیک اسید (BTCA)، به عنوان عوامل شبکه‌ای کننده زیست‌سازگار و غیرسمی برای پلی‌ساکاریدهایی نظیر سلولز و نشاسته، اهمیت فزاینده‌ای یافته‌اند (NCBI، ۲۰۲۵). این اسیدها از طریق تشکیل پیوندهای استری با گروه‌های هیدروکسیل پلی‌ساکاریدها، شبکه‌های کووالانسی قوی و پایدار ایجاد می‌کنند که برای کاربردهای زیست‌محیطی ارجحیت دارند. علاوه بر این، در مورد پلی‌ساکاریدهای حاوی گروه‌های کربوکسیل نظیر آلژینات و پکتین، استفاده از یون‌های فلزی دوظرفیتی یا چندظرفیتی مانند کلسیم (Ca^{2+})، باریم (Ba^{2+}) یا آهن (Fe^{3+}) یک روش بسیار متداول و مؤثر برای شبکه‌ای شدن است (Maiz-Fernández و همکاران، ۲۰۲۰). در این فرآیند، این یون‌ها با گروه‌های کربوکسیل پلی‌ساکاریدها کمپلکس تشکیل داده و از طریق برهم‌کنش‌های یونی، یک ساختار سه‌بعدی شبیه «جعبه تخم‌مرغی[۳]» را ایجاد می‌کنند که منجر به ژل‌شدن سریع و آسان می‌شود. این رویکرد به دلیل سادگی، سرعت و عدم نیاز به مواد شیمیایی سمی، برای تولید هیدروژل‌های زیست‌سازگار بسیار جذاب است (Makarova و همکاران، ۲۰۲۳).

در مقابل، روش‌های شبکه‌ای شدن فیزیکی بر اساس تشکیل پیوندهای برگشت‌پذیر و غیرکووالانسی بین زنجیره‌های پلیمری استوار هستند. این پیوندها شامل

پیوندهای هیدروژنی، برهم‌کنش‌های یونی (بدون تشکیل کووالانسی)، نیروهای واندروالسی یا درهم‌تنیدگی فیزیکی زنجیره‌ها می‌شوند (Yammine و همکاران، ۲۰۲۵). تکنیک‌هایی مانند چرخه‌های انجماد-ذوب[۴] به‌طور گسترده‌ای برای سنتز هیدروژل‌های سلولز و نشاسته به کار می‌روند. در این فرآیند، با انجماد آب، زنجیره‌های پلیمری به هم نزدیک‌تر شده و پیوندهای هیدروژنی قوی‌تری بین آن‌ها تشکیل می‌شود؛ سپس با ذوب شدن مجدد، یک شبکه ژلی پایدار با تخلخل بالا شکل می‌گیرد (Ribeiro و همکاران، ۲۰۲۵). برهم‌کنش‌های یونی نیز می‌توانند منجر به شبکه‌ای شدن فیزیکی شوند، نظیر ژل‌شدن آلژینات در حضور یون‌های کلسیم، یا تشکیل ذرات ژلی از کیتوزان در حضور پلی‌آنیون‌هایی نظیر تری‌پلی‌فسفات[۵] که از طریق برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی عمل می‌کنند. این روش‌ها اغلب برای تولید هیدروژل‌هایی با خواص خودترمیم‌شونده یا پاسخگو به محرک‌ها مناسب‌ترند، هرچند ممکن است پایداری مکانیکی کمتری نسبت به هیدروژل‌های شبکه‌ای شده شیمیایی داشته باشند (Wang و همکاران، ۲۰۲۵).

۲-۲. خصوصیات فیزیکوشیمیایی هیدروژل‌ها؛ عوامل کلیدی در عملکرد تصفیه آب

برای طراحی و بهینه‌سازی هیدروژل‌ها برای کاربردهای تصفیه آب، درک و کنترل دقیق خصوصیات فیزیکوشیمیایی آن‌ها ضروری است. یکی از مهم‌ترین پارامترها، درجه تورم[۶] است که نشان‌دهنده ظرفیت هیدروژل برای جذب آب و متورم شدن است (Alsaka و همکاران، ۲۰۲۵). هیدروژل‌های با درجه تورم بالا، معمولاً فضای بیشتری برای نفوذ آلاینده‌ها و برهم‌کنش با آن‌ها فراهم می‌کنند که می‌تواند منجر به ظرفیت جذب بالاتری شود. این خاصیت به شدت تحت تأثیر ترکیب شیمیایی پلیمر، چگالی شبکه‌ای شدن (هرچه چگالی بیشتر باشد، تورم کمتر است) و شرایط محیطی نظیر pH و دما قرار دارد (Quazi و Park، ۲۰۲۲).

پایداری مکانیکی[۷] از اهمیت حیاتی برای کاربردهای عملیاتی، به ویژه در سیستم‌های جریانی یا ستون‌های جذب، برخوردار است (Rajiman و همکاران، ۲۰۲۲). هیدروژل باید بتواند نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از جریان آب را بدون فروپاشی، شکستگی یا تخریب ساختاری تحمل کند. اصلاحات شیمیایی، افزایش چگالی شبکه‌ای شدن و به خصوص، کامپوزیت کردن با نانومواد تقویت‌کننده نظیر نانوسلولز (که به دلیل استحکام کششی فوق‌العاده بالا و نسبت ابعاد بزرگ عمل می‌کند) یا نانومواد کربنی (مانند اکسید گرافن و نانولوله‌های کربنی)، می‌توانند به طور قابل توجهی پایداری مکانیکی هیدروژل‌ها را بهبود بخشند (Lavrentev و همکاران، ۲۰۲۳).

تخلخل و ساختار حفره‌ای نیز نقش محوری ایفا می‌کند. هیدروژل‌ها ذاتاً دارای شبکه‌ای از حفره‌ها و کانال‌ها هستند که نفوذپذیری آلاینده‌ها به درون ماتریس پلیمری را تسهیل کرده و سطح ویژه قابل دسترس برای جذب را افزایش می‌دهند. اندازه و توزیع حفره‌ها بر سرعت نفوذ آلاینده‌ها و در نتیجه بر سینتیک جذب[۸] تأثیر می‌گذارد. تکنیک‌های سنتز (مانند استفاده از پورژن‌ها یا تکنیک‌های انجماد-خشک کردن) می‌توانند برای کنترل دقیق ساختار متخلخل و بهینه‌سازی آن برای انواع خاصی از آلاینده‌ها به کار روند (Annabi و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین، فعالیت سطحی و حضور گروه‌های عاملی[۹] خاص در سطح و درون ساختار هیدروژل، عامل اصلی برهم‌کنش با آلاینده‌ها است (Alsaka و همکاران، ۲۰۲۵). گروه‌های هیدروکسیل، کربوکسیل و آمین، نقاط فعال برای پیوندهای هیدروژنی، تبادل یونی و کمپلکس‌سازی با مولکول‌ها و یون‌های آلاینده هستند. در نهایت، پایداری شیمیایی و حرارتی هیدروژل در برابر تغییرات pH، دما و حضور مواد شیمیایی مختلف در محیط آبی، برای حفظ عملکرد طولانی‌مدت آن بسیار مهم است. پایداری خوب تضمین می‌کند که هیدروژل در شرایط واقعی تصفیه‌خانه یا محیط طبیعی تجزیه نشده یا خواص خود را از دست ندهد (Yang و همکاران، ۲۰۲۴).

۲-۳. مکانیسم‌های حذف آلاینده‌ها

کارایی بالای هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی در حذف آلاینده‌ها از آب، به فعال بودن چندین مکانیسم همزمان یا متوالی بستگی دارد که به طور هماهنگ عمل می‌کنند. این مکانیسم‌ها که در شکل (۶) نیز نشان داده شده‌اند، عبارت‌اند از:

الف) جذب سطحی: این مکانیسم بنیادی‌ترین و پرکاربردترین روش حذف آلاینده‌ها توسط هیدروژل‌ها است. در این فرآیند، مولکول‌های آلاینده از فاز مایع به سطح جامد جاذب منتقل شده و در آنجا از طریق برهم‌کنش‌های فیزیکی یا شیمیایی تثبیت می‌شوند (Ahmadian و همکاران، ۲۰۲۳).

پیوندهای هیدروژنی: گروه‌های هیدروکسیل فراوان در ساختار پلی‌ساکاریدها (سلولز، نشاسته، پکتین، آلژینات و کیتوزان) می‌توانند پیوندهای هیدروژنی قوی با گروه‌های قطبی موجود در مولکول‌های آلاینده (مانند گروه‌های آمین، کربوکسیل، سولفونیک در رنگ‌ها یا ترکیبات دارویی) تشکیل دهند. این پیوندها نیروی محرکه اصلی برای جذب بسیاری از آلاینده‌های آلی قطبی هستند (Dohendou و همکاران، ۲۰۲۱).

برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی: این نوع جذب به ویژه برای هیدروژل‌های دارای گروه‌های عاملی یونی، مانند گروه‌های آمین پروتونه شده (NH_3^+) در کیتوزان (که در pH پایین بار مثبت دارند) یا گروه‌های کربوکسیل (COO^-) در آلژینات و پکتین (که در pH بالاتر بار منفی دارند)، بسیار حیاتی است

(Araque و همکـــاران، ۲۰۲۴). ایـــن گروه‌هـــا می‌تواننـــد آلاینده‌های با بار مخالف را از طریق نیروهای جاذبه کولمبی (الکترواستاتیکی) بـه شـدت جـذب کننـد. بـه عنـوان مثـال، کیتوزان به دلیل بار مثبت خود، در جذب رنگ‌های آنیونی (مانند قرمز کنگو) و آنیون‌های فلزی (مانند کرومات) بسیار مؤثر است، در حالی که آلژینات و پکتین به دلیل بار منفی، کاتیون‌های فلزات سنگین (مانند سرب، کادمیوم، مس) و رنگ‌هـای کـاتیونی (ماننـد متـیلن بلـو) را جـذب می‌کننـد (Alsaka و همکاران، ۲۰۲۵).

کمپلکس‌سازی و کیلاته شدن[۱۰]: گروه‌های عاملی موجود در زنجیره‌هـای پلی‌سـاکاریدی (بـه ویـژه گروه‌هـای آمـین، هیدروکســیل و کربوکســیل) دارای جفــت الکترون‌هــای غیرمشـترک هسـتند کـه می‌تواننـد بـه عنـوان لیگانـدهای لوئیس عمل کرده و با یون‌های فلزات سنگین (مانند Pb^{2+}، Cd^{2+}، Cu^{2+} و Cr^{3+}) کمپلکس‌هـای پایـدار یـا سـاختارهای کیلیت تشکیل دهند. این مکانیسم منجر به حذف بسیار مؤثر و گزینشی فلزات سنگین می‌شود (Gulcin و Alwasel ، ۲۰۲۲).

نیروهای واندروالسی و برهم‌کنش‌های هیدروفوبیک: برای آلاینده‌های آلی غیرقطبی یا با قطبیت کم (مانند برخی ترکیبات فنولی یا داروها)، نیروهای واندروالسی (شامل نیروهای پراکندگی لاندن، نیروهای دوقطبی-دوقطبی) و برهم‌کنش‌های هیدروفوبیک می‌توانند نقش مهمی ایفا کنند، به ویژه اگر هیدروژل با بخش‌های آب‌گریز اصلاح شده باشد. این برهم‌کنش‌ها به چسبیدن مولکول‌های آلاینده به سطح هیدروژل کمک می‌کنند (Otálora و همکاران، ۲۰۲۱).

ب) تبادل یونی[۱۱]: این مکانیسم، نوع خاصی از جذب است که در آن یون‌های موجود در ساختار هیدروژل با یون‌های آلاینده هم‌بار در محلول مبادله می‌شوند. همانطور که پیش‌تر ذکر شد، هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی با گروه‌های عاملی یونی (نظیر کیتوزان با گروه‌های آمین پروتونه شده و آلژینات/پکتین با گروه‌های کربوکسیل) از طریق این مکانیسم عمل می‌کنند (Dharmapriya و همکاران، ۲۰۲۲). برای مثال، گروه‌های آمین پروتونه شده کیتوزان (NH_3^+) می‌توانند با آنیون‌های فلزی (مانند دی‌کرومات و آرسنات[۱۲]) یا رنگ‌های آنیونی (مانند قرمز کنگو) در محلول مبادله شوند. به طور مشابه، گروه‌های کربوکسیل آلژینات می‌توانند یون‌های فلزات سنگین کاتیونی (مانند Cd^{2+} یا Ni^{2+}) را با یون‌های کاتیونی موجود در ساختار (مانند Na^+ یا H^+) مبادله کنند (Darban و همکاران، ۲۰۲۲).

ج) فیلتراسیون فیزیکی[۱۳]: ساختار متخلخل و شبکه‌ای هیدروژل‌ها به آن‌ها امکان می‌دهد تا ذرات بزرگتر از اندازه منافذ خود را به صورت مکانیکی به دام اندازند. این مکانیسم در حذف ذرات معلق، کلوئیدها، قطرات روغن، میکروپلاستیک‌ها و حتی میکروارگانیسم‌ها (نظیر باکتری‌ها و ویروس‌ها) از آب مؤثر است. آلاینده‌ها به سادگی در منافذ شبکه هیدروژل به‌دام افتاده افتاده و از جریان آب جدا می‌شوند. این مکانیسم اغلب با جذب سطحی ترکیب می‌شود و به خصوص در مراحل اولیه تصفیه یا برای حذف آلاینده‌های جامد کاربرد دارد (Vasil'kov و همکاران، ۲۰۲۱).

د) تخریب کاتالیزوری[۱۴]: در هیدروژل‌های پیشرفته که با نانوذرات کاتالیزوری، مانند نانوذرات اکسید تیتانیوم (TiO_2)، اکسید روی (ZnO)، نانوذرات فلزی نظیر نقره (رادخواه و ایگدری، ۱۴۰۲) یا کامپوزیت‌های گرافن، عامل‌دار شده‌اند، آلاینده‌های آلی (مانند رنگ‌ها، ترکیبات دارویی یا فنل‌ها) می‌توانند از طریق واکنش‌های ردوکس (کاهش-اکسیداسیون) یا فتوشیمیایی (در حضور نور) به ترکیبات کمتر سمی یا کاملاً بی‌ضرر (نظیر CO_2 و H_2O) تجزیه شوند. در این حالت، هیدروژل نه تنها به عنوان یک جاذب برای متمرکز کردن آلاینده‌ها در نزدیکی سایت‌های کاتالیزوری عمل می‌کند، بلکه به عنوان یک بستر پایدار برای نانوکاتالیست‌ها نیز ایفای نقش می‌نماید و فرآیند تجزیه را تسهیل و تسریع می‌بخشد (AlMohamadi و همکاران، ۲۰۲۴).

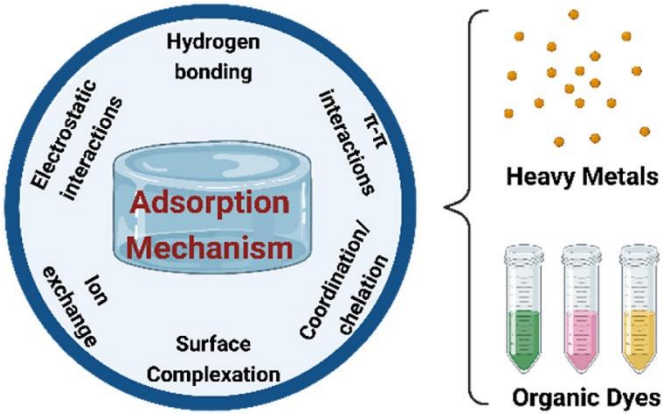
ه) خواص ضدمیکروبی[۱۵]: برخی پلی‌ساکاریدها مانند کیتوزان، به دلیل ماهیت کاتیونی خود، دارای خواص ضد میکروبی ذاتی هستند. گروه‌های آمین پروتونه شده کیتوزان **(NH_3^+)** می‌توانند با غشای سلولی میکروب‌ها (که دارای بار منفی هستند) برهم‌کنش کرده، یکپارچگی آن‌ها را بر هم زده، نفوذپذیری غشا را افزایش داده و منجر به مرگ سلول شوند (Yan و همکاران، ۲۰۲۱). این ویژگی، هیدروژل‌های مبتنی بر کیتوزان را برای ضدعفونی آب، حذف پاتوژن‌ها و جلوگیری از تشکیل بیوفیلم در سیستم‌های تصفیه بسیار مناسب می‌سازد. علاوه بر این، هیدروژل‌ها را می‌توان با عوامل ضدمیکروبی دیگر مانند نانوذرات نقره یا مس، یا آنتی‌بیوتیک‌ها عامل‌دار کرد تا خاصیت ضد میکروبی آن‌ها تقویت شده و طیف وسیع‌تری از میکروارگانیسم‌ها را هدف قرار دهند (Aranaz و همکاران، ۲۰۲۱).

در مجموع، هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکاریدها به دلیل ترکیب منحصربه‌فرد از ساختار قابل تنظیم، گروه‌های عاملی فعال و توانایی عمل از طریق مکانیسم‌های جذب چندگانه، پتانسیل عظیمی در توسعه راهکارهای نوین و پایدار برای تصفیه آب دارند (Berradi و همکاران، ۲۰۲۳). درک عمیق و دقیق این مکانیسم‌ها، گامی ضروری در طراحی و بهینه‌سازی هیدروژل‌های نسل بعدی با کارایی، گزینش‌پذیری و پایداری بالاتر خواهد بود.

۳. کاربرد هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید در حذف انواع آلاینده‌ها از آب

هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید، به دلیل ترکیب منحصربه‌فردی از خصوصیات فیزیکوشیمیایی ممتاز، شامل فراوانی گروه‌های عاملی فعال، ساختار متخلخل با سطح ویژه بالا و قابلیت سفارشی‌سازی برای برهم‌کنش‌های خاص، خود را به عنوان موادی با پتانسیل بی‌نظیر در حوزه تصفیه آب مطرح کرده‌اند (Berradi و همکاران، ۲۰۲۳؛ Zhou

و همکاران، ۲۰۲۵). این ویژگی‌ها به آن‌ها اجازه می‌دهد تا به طور مؤثری طیف وسیعی از آلاینده‌های زیست‌محیطی را که تهدیدی جدی برای منابع آبی و سلامت عمومی محسوب می‌شوند، از جمله یون‌های فلزات سنگین سمی، رنگ‌های صنعتی پایدار، آلاینده‌های آلی نوظهور[۱۶] و میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، حذف کنند (Manzoor و همکاران، ۲۰۲۲). در این بخش، به بررسی جامع و تحلیلی کاربردهای متنوع این هیدروژل‌ها در مقابله با هر یک از این دسته‌های آلاینده خواهیم پرداخت و مکانیسم‌های پیچیده و چندوجهی درگیر در فرآیندهای حذف را تشریح خواهیم کرد.



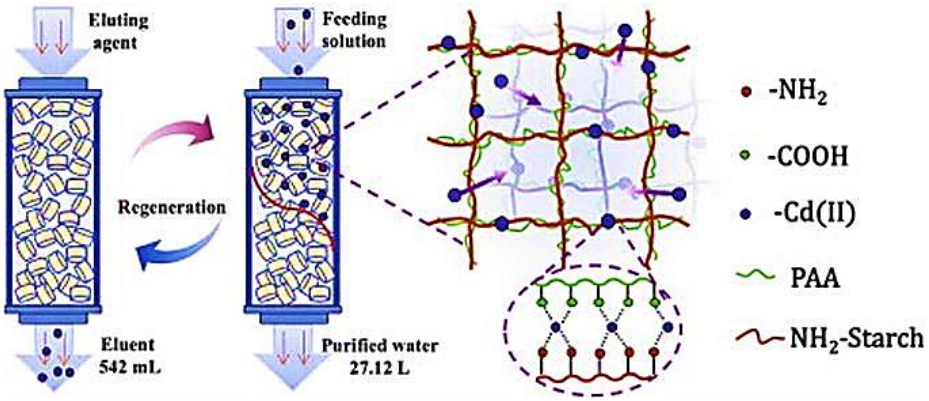
شکل ۶- مکانیسم‌های جذب فلزات سنگین و رنگ‌ها توسط هیدروژل‌ها (Zhu و همکاران، ۲۰۲۳)

۱-۳. حذف فلزات سنگین

فلزات سنگین نظیر سرب (Pb^{2+})، کادمیوم (Cd^{2+})، کروم (Cr^{3+} و Cr^{6+})، جیوه (Hg^{2+})، مس (Cu^{2+})، نیکل (Ni^{2+}) و آرسنیک (As^{3+} و As^{5+}) از جمله خطرناک‌ترین آلاینده‌ها در محیط‌های آبی به شمار می‌روند (Tchounwou و همکاران، ۲۰۱۲). این عناصر، غیرقابل تجزیه زیستی بوده و به دلیل تجمع زیستی[۱۷] در زنجیره غذایی و سمیت مزمن خود، خطرات جبران‌ناپذیری برای سلامت انسان، از جمله آسیب‌های عصبی، کلیوی و سرطان و همچنین تخریب گسترده اکوسیستم‌های آبی ایجاد می‌کنند (Balali-Mood و همکاران، ۲۰۲۱). هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید به دلیل وجود فراوان گروه‌های عاملی غنی از الکترون مانند هیدروکسیل (-OH) و کربوکسیل (-COOH) و یا نیتروژن مانند آمین ($-NH_2$ و -NH)، به عنوان جاذب‌های عالی و گزینشی برای یون‌های فلزات سنگین عمل می‌کنند (Mone و همکاران، ۲۰۲۰).

در ادامه، مکانیسم‌های اصلی حذف فلزات سنگین توسط این هیدروژل‌ها توضیح داده می‌شود. اولاً، کمپلکس‌سازی و کیلاته شدن مهم‌ترین و غالب‌ترین مکانیسم است. گروه‌های هیدروکسیل، کربوکسیل و آمین موجود در زنجیره‌های پلیمری، دارای جفت الکترون‌های ناپیوندی هستند که می‌توانند به عنوان لیگاندهای لوئیس عمل کرده و با یون‌های فلزات سنگین (که به عنوان اسید لوئیس عمل می‌کنند) کمپلکس‌های پایدار تشکیل دهند (Rahman و همکاران، ۲۰۲۰). به عنوان مثال، گروه‌های آمین کیتوزان و گروه‌های هیدروکسیل سلولز قادرند با یون‌های مس (Cu^{2+}) یا کادمیوم (Cd^{2+}) پیوندهای کوئوردیناسیونی قوی برقرار کرده و آن‌ها را از محلول جدا کنند (El-Bourachdi و همکاران، ۲۰۲۵). در مورد پلی‌ساکاریدهای آنیونی مانند آلژینات و پکتین، گروه‌های کربوکسیل با ظرفیت بالا می‌توانند یون‌های فلزی را به شکل کیلیت به خود جذب کنند. ثانیاً، تبادل یونی نیز نقش مهمی ایفا می‌کند، به ویژه برای پلی‌ساکاریدهای با خاصیت یونی ذاتی. کیتوزان، که در pH پایین پروتونه شده و بار کاتیونی پیدا می‌کند، می‌تواند یون‌های H^+ یا دیگر کاتیون‌های ضعیف متصل به گروه‌های آمین خود را با یون‌های فلزات سنگین کاتیونی قوی‌تر (نظیر Pb^{2+} و Cd^{2+}) مبادله کند (iddrisu و همکاران، ۲۰۲۴). به همین ترتیب، آلژینات و پکتین که دارای گروه‌های کربوکسیل با بار منفی هستند، می‌توانند یون‌های فلزات سنگین کاتیونی را با یون‌های سدیم یا کلسیم موجود در ساختار خود تبادل کنند. ثالثاً، جذب سطحی فیزیکی از طریق نیروهای واندروالسی و پیوندهای هیدروژنی نیز ممکن است در فرآیند جذب فلزات سنگین نقش فرعی داشته باشد، اگرچه قدرت و گزینش‌پذیری آن به اندازه کمپلکس‌سازی و تبادل یونی نیست (Upadhyay و همکاران، ۲۰۲۲).

دو فرآیند اصلی دخیل در حذف یون‌های فلزات سنگین از فاضلاب توسط هیدروژل‌ها، انتشار و جاذبه‌های الکترواستاتیکی هستند. فرآیند انتشار باعث نفوذ یون‌ها به داخل شبکه هیدروژل از طریق گرادیان غلظت می‌شود، در حالی‌که گروه‌های یونیزه شونده، همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، یک جاذبه الکترواستاتیکی با یون‌های فلزات سنگین ایجاد می‌کنند و آن‌ها را از محیط آبی با مکانیسم جاذبه حذف می‌کنند (Zhou و همکاران، ۲۰۱۶؛ Rehman و همکاران، ۲۰۲۱).



شکل ۷- مکانیسم جذب، برهمکنش و بازسازی شبکه هیدروژل با یون‌های فلزات سنگین و فرآیند حذف (Zhou و همکاران، ۲۰۱۶؛ Rehman و همکاران، ۲۰۲۱)

تحقیقات اخیر نشان داده است که هیدروژل‌های کیتوزان و مشتقات آن، به دلیل ظرفیت بالای گروه‌های آمین برای کمپلکس‌سازی، برای حذف فلزاتی مانند Cu^{2+}، Ni^{2+}، Pb^{2+} و Cd^{2+} بسیار مؤثر بوده‌اند (Zhang و همکاران، ۲۰۲۱). با اصلاح کیتوزان با گروه‌های عاملی نظیر تیول (-SH) که میل ترکیبی بالایی با فلزات نرم (مانند جیوه و سرب) دارند، یا گروه‌های کربوکسیل، می‌توان گزینش‌پذیری و ظرفیت جذب برای فلزات خاص را به طرز چشمگیری افزایش داد. به طور مشابه، هیدروژل‌های آلژینات و پکتین به دلیل گروه‌های کربوکسیل فراوان، برای جذب کاتیون‌های فلزات سنگین از جمله Pb^{2+}، Cd^{2+}، Sr^{2+} و Co^{2+} کارایی بالایی از خود نشان داده‌اند. به عنوان مثال، آلژینات کلسیم به طور خاص برای حذف یون‌های سرب و کادمیوم از محلول‌های آبی بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است (Grant و همکاران، ۱۹۷۳؛ Martínez-Sabando و همکاران، ۲۰۲۳). حتی هیدروژل‌های مبتنی بر سلولز و نانوسلولز نیز، با عامل‌دار کردن گروه‌های هیدروکسیل فراوان آن‌ها با گروه‌های آمین، کربوکسیل یا سولفونیک، می‌توانند به جاذب‌های قدرتمندی برای فلزات سنگین تبدیل شوند. نانوسلولزها، به دلیل نسبت سطح به حجم بسیار بالا و تعداد بیشتر سایت‌های فعال، ظرفیت جذب بالاتری نسبت به سلولز خام یا میکروکریستالی دارند (Si و همکاران، ۲۰۲۲). ترکیب پلی‌ساکاریدها با نانوذرات مغناطیسی (مانند Fe_3O_4) نیز منجر به تولید هیدروژل‌های کامپوزیتی مغناطیسی می‌شود که پس از جذب فلزات سنگین، به راحتی توسط یک میدان مغناطیسی خارجی از محلول جدا شده و بازیابی می‌شوند، که این امر به شدت کارایی و اقتصاد فرآیند تصفیه را بهبود می‌بخشد (Si و همکاران، ۲۰۲۲). در جدول (۲) مقایسه عملکرد هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی مختلف در جذب فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفته است. بر طبق نتایج حاصل از این جدول، پایداری مکانیکی/شیمیایی کیتوزان و سلولز در حذف فلزاتی مانند کروم، آرسنیک، سرب، جیوه، مس و نیکل، عالی بوده است. از طرف دیگر، پلی‌ساکاریدهای مذکور قابلیت بازیابی بسیار خوب و ظرفیت جذب بسیار بالایی داشته‌اند. این در حالی است که اگرچه آلژینات قابلیت بازیابی خوبی داشته است، اما پایداری مکانیکی/شیمیایی آن در pH پایین، متوسط ارزیابی شده است. با توجه به این شرایط، آلژینات ظرفیت جذب خوبی در حذف فلزاتی مانند مس و کادمیوم داشته است. در مورد نشاسته نیز تقریباً همین موضوع صادق است، به‌طوری‌که پایداری مکانیکی/شیمیایی این پلی‌ساکارید، متوسط ارزیابی شده است، اما ظرفیت جذب خوبی در حذف فلزات سرب و روی نشان داده است. در بین پلی‌ساکاریدهای مورد بررسی، پکتین قابلیت بازیابی ضعیف و پایداری مکانیکی/شیمیایی پایینی در دماهای بالا داشته است و علاوه بر این، ظرفیت جذب آن در حذف مس در مقایسه با سایر پلی‌ساکاریدها پایین بوده است.

در جدول (۳) ظرفیت جذب فلزات سنگین توسط هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی مختلف در شرایط متفاوت مورد مقایسه قرار گرفته است. بررسی نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت آلژینات-سیلیکا با ظرفیت جذب ۳۸۹/۸ میلی‌گرم بر گرم برای سرب بهترین عملکرد را دارد و مدل لانگمویر به عنوان مناسب‌ترین مدل برای تمامی هیدروژل‌ها شناخته شده است.

۳-۲. حذف رنگ‌ها و آلاینده‌های آلی نوظهور

پساب‌های حاوی رنگ‌های صنعتی از صنایع نساجی، چرم‌سازی، کاغذسازی و پلاستیک، به دلیل ساختار پیچیده، مقاومت بالا در برابر تجزیه زیستی و زیبایی‌شناسی ناخوشایند، از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی آب هستند (Al-Tohamy و همکاران، ۲۰۲۲). در شکل (۸) **طبقه‌بندی رنگ‌های مصنوعی بر اساس بار الکتریکی آن‌ها نشان داده شده است که بیانگر ساختار پیچیده آن‌ها می‌باشد.** علاوه بر این، ظهور و شناسایی آلاینده‌های آلی نوظهور نظیر ترکیبات دارویی فعال (مانند آنتی‌بیوتیک‌ها، داروهای ضد التهاب)، محصولات مراقبت شخصی، آفت‌کش‌ها، بیسفنول-A و فنل‌ها، حتی در غلظت‌های پایین، نگرانی‌های جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم‌ها ایجاد کرده است (Masinga و

همکاران، ۲۰۲۴؛ Rauseo و همکاران، ۲۰۲۵). این ترکیبات می‌توانند مختل‌کننده غدد درون‌ریز باشند و اثرات مزمن بر سلامت موجودات زنده داشته باشند. هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی به دلیل داشتن گروه‌های عاملی فعال متنوع، ساختار متخلخل و قابلیت اصلاح‌پذیری، جاذب‌های مؤثری برای این دسته از آلاینده‌ها هستند (Al-Tohamy و همکاران، ۲۰۲۲).

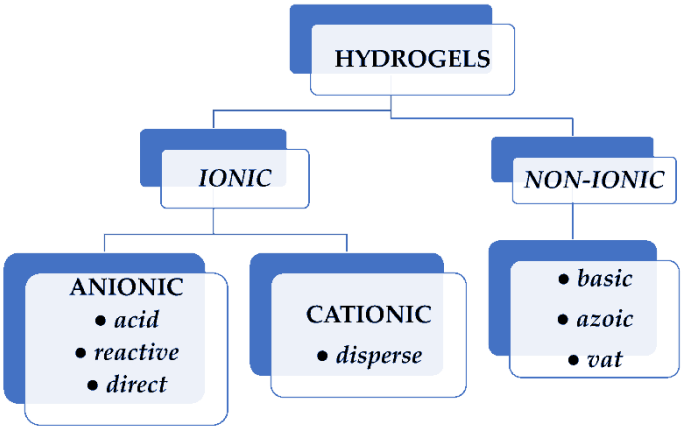
جدول ۲- مقایسه عملکرد هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی مختلف در جذب فلزات سنگین (Ghiorghita و همکاران، ۲۰۲۲؛ Wu و همکاران، ۲۰۲۵)

ملاحظات و کاربردهای کلیدی	قابلیت بازیابی و استفاده مجدد	پایداری مکانیکی/شیمیایی	زمان تعادل (تقریبی)	فلز هدف (ظرفیت جذب تقریبی- mg/g)	ترکیب/مواد اصلاحی	پلی‌ساکارید پایه
جذب مغناطیسی: جداسازی آسان. زیست‌سازگاری بالا.	عالی (با اسید رقیق)	خوب (در pH مختلف)	۹۰-۶۰ دقیقه	سرب (Pb^{2+}) ~۱۲۰	نانوذرات اکسید آهن(Fe_3O_4)	**آگاروز**
ارزان و در دسترس: برای تصفیه آب در مقیاس بزرگ مناسب است.	خوب (با اسید رقیق)، تا ۴ چرخه با کارایی مناسب	متوسط (در pH پایین تجزیه می‌شود)	۶۰-۳۰ دقیقه	مس (Cu^{2+}) ~۱۵۰ کادمیم (Cd^{2+}) ~۱۳۰	کلسیم کلرید (ژلاسیون)، نانوذرات	**آلژینات**
ذاتاً کاتیونی: برای آنیون‌ها (مانند کرومات) عالی است. ضد میکروب.	بسیار خوب (با NaOH رقیق)، تا ۵ چرخه یا بیشتر	عالی (پایداری حرارتی خوب)	۱۲۰-۶۰ دقیقه	کروم (Cr^{6+}) ~۱۸۰ آرسنیک (As^{5+}) ~۱۰۰	بیوپلیمر (کاتیونی)	**کیتوزان**
ظرفیت بسیار بالا: ترکیب با نانومواد، سطح ویژه و مکان‌های فعال را افزایش می‌دهد.	عالی (با اسید رقیق)	بسیار عالی (استحکام مکانیکی بالا)	۸۰-۴۰ دقیقه	سرب(Pb^{2+}) ~۳۵۰ جیوه (Hg^{2+}) ~۳۰۰	گرافن اکساید (GO)	**کیتوزان**
پایدار و ارزان: پایداری عالی در محیط‌های مختلف. زیست‌تخریب‌پذیر.	خوب (با EDTA یا اسید)، اما ممکن است متورم شود	عالی (بسیار پایدار)	۱۵۰-۹۰ دقیقه	مس (Cu^{2+}) ~۸۰ نیکل(Ni^{2+}) ~۷۰	مشتقات (مثلاً کربوکسی متیل سلولز)	**سلولز**
کاملاً زیست‌تخریب‌پذیر: بسیار ارزان. اما پایداری مکانیکی پایین‌تری دارد.	متوسط (با اسید)، ممکن است پس از چند چرخه تخریب شود	متوسط به خوب	۱۰۰-۵۰ دقیقه	سرب(Pb^{2+}) ~۲۰۰ روی (Zn^{2+}) ~ ۱۵۰	آکریل آمید (گرافت کوپلیمر)	**نشاسته**
توانایی تشکیل ژل با یون‌های کلسیم، زیست‌تخریب‌پذیری	ضعیف تا متوسط	ضعیف (در دماهای بالا)	۶۰-۳۰ دقیقه	مس~ (Cu^{2+}) ۸۵	هیدروژل پکتین-پلی(وینیل الکل)	**پکتین**

جدول ۳- مقایسه ظرفیت جذب فلزات سنگین توسط هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی مختلف در شرایط متفاوت (Zhao و همکاران، ۲۰۲۳)

پلی‌ساکارید	نوع هیدروژل/اصلاح‌شده	فلز سنگین هدف	ظرفیت جذب (mg/g)	شرایط بهینه	مدل ایزوترم برتر
کیتوزان	نانوکامپوزیت کیتوزان-مگهمایت	Cr(VI)	۲۵۰	pH=۳	لانگمویر
کیتوزان	هیدروژل کیتوزان-خاکستر بادی	Cr(VI)	۳۵/۲	pH=۲	لانگمویر
کیتوزان	نانوذرات کیتوزان-PMMA	Cd(II)	۹۲/۶	pH=۶	لانگمویر
کیتوزان	میکروسفرهای کیتوزان	Cu(II)	۸۱/۲	-	لانگمویر
آلژینات	هیدروژل آلژینات کلسیم	Cu(II)	۸۸/۹	-	لانگمویر
آلژینات	نانوکامپوزیت آلژینات-سیلیکا	Pb(II)	۳۸۹/۸	-	لانگمویر
آلژینات	نانوذرات آلژینات	Cd(II)	۱۲۷/۵	pH=۶	لانگمویر
سلولز	نانوالیاف سلولز	Pb(II)	۲۸۸/۵	-	لانگمویر
سلولز	نانوبلورهای سلولز	Cu(II)	۸۰/۱	-	لانگمویر
نشاسته	هیدروژل نشاسته-اکریلیک اسید	Pb(II)	۱۵۶/۸	pH=۵	لانگمویر

در مکانیسم‌های اصلی حذف رنگ‌ها و **آلاینده‌های آلی نوظهور**، در درجه اول جذب سطحی الکترواستاتیکی برای رنگ‌های یونی (آنیونی یا کاتیونی) نقش اساسی دارد (Arfi و همکاران، ۲۰۱۷). در جدول‌های (۴)، (۵) و (۶) به‌ترتیب عملکرد هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکاریدهای سلولز، نشاسته و کیتوزان در جذب رنگ‌ها از محلول‌های آبی نشان داده شده است.



شکل ۸- طبقه‌بندی رنگ‌های مصنوعی بر اساس بار الکتریکی آن‌ها (Stanciu و Teacă، ۲۰۲۴)

بر طبق نتایج به‌دست آمده از این جدول‌ها، کیتوزان، با گروه‌های آمین پروتونه شده و بار مثبت خود، به طور استثنایی در جذب رنگ‌های آنیونی (مانند قرمز کنگو، متیل اورنج، اورنج G) کارآمد است (جدول ۶). در مقابل، سلولز و نشاسته جاذب‌های عالی برای رنگ‌های کاتیونی (نظیر متیلن بلو، بنفش کریستالی، رودامین B) به شمار می‌روند (Zhao و Shen، ۲۰۲۳). این در حالی است که در مورد سایر هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکاریدهایی مانند آلژینات و پکتین که دارای گروه‌های کربوکسیل منفی می‌باشند، نیز همین مسئله صادق است. علاوه بر این، پیوندهای هیدروژنی نیز نقش مهمی ایفا می‌کنند، چرا که بسیاری از رنگ‌ها و آلاینده‌های آلی نوظهور دارای گروه‌های عاملی قطبی (SO_3H^-، $COOH^-$، NH_2^-، OH^-) هستند که می‌توانند با گروه‌های هیدروکسیل و آمین در هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی پیوندهای هیدروژنی برقرار کرده و جذب شوند. ثالثاً، برای مولکول‌های آلی بزرگ و آروماتیک (که بسیاری از رنگ‌ها و آلاینده‌های آلی نوظهور جزو این دسته هستند)، نیروهای واندروالسی و برهم‌کنش‌های پی-پی[18] می‌توانند نقش مهمی در جذب ایفا کنند، به خصوص اگر هیدروژل با مواد کربنی (مانند اکسید گرافن، نانولوله‌های کربنی یا کربن فعال) ترکیب شده باشد. در این کامپوزیت‌ها، سطح ویژه بالا و وجود سیستم‌های الکترونی π، جذب آلاینده‌های آروماتیک را به شدت تقویت می‌کند (Ramakrishnan و همکاران، ۲۰۲۱).

علاوه بر جذب، در برخی موارد تخریب کاتالیزوری نیز می‌تواند اتفاق بیفتد. این حالت عمدتاً در هیدروژل‌های کامپوزیتی که با نانوذرات کاتالیزوری (مانند TiO_2، ZnO، نانوذرات فلزی نظیر Ag یا Au، یا کامپوزیت‌های Ag/Fe_3O_4) عامل‌دار شده‌اند، مشاهده می‌شود. این نانوکاتالیست‌ها می‌توانند آلاینده‌های آلی را از طریق فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته یا واکنش‌های فتوکاتالیزوری (در حضور نور) به ترکیبات غیرسمی یا کاملاً معدنی (نظیر CO_2 و H_2O) تجزیه کنند. در این سیستم‌ها، هیدروژل به عنوان یک بستر پایدار عمل می‌کند که نانوکاتالیست‌ها را لنگر انداخته و به متمرکز کردن آلاینده‌ها در نزدیکی سایت‌های فعال کاتالیزوری کمک می‌کند. هیدروژل‌های کامپوزیتی پلی‌ساکارید/اکسید گرافن، به دلیل سطح ویژه بالا و برهم‌کنش‌های قوی، کارایی فوق‌العاده‌ای در حذف **آلاینده‌های آلی نوظهور** نظیر بیسفنول-A، داروهای ضد التهاب و آنتی‌بیوتیک‌ها از خود نشان داده‌اند (Ramírez و همکاران، ۲۰۲۴).

جدول ۴- عملکرد هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید سلولز در جذب رنگ‌ها از محلول‌های آبی (Stanciu و Teaca، ۲۰۲۴)

جاذب	رنگ	توانایی حذف رنگ
cellulose-g-PAM	متیلن بلو (MB)	۷۳۴/۸ میلی‌گرم بر گرم
CMC-g-PAA	متیلن اورنج (MO)	۸۲ درصد
acryloyl cellulose-g-PAA	متیلن بلو (MB)	۳۰۰۳ میلی‌گرم بر گرم
cellulose-g-CDNMA	متیلن اورنج (MO)	۱۲ میلی‌گرم بر گرم
CS/CMC-PEG	قرمز کنگو (CR)	۱۰۵۳/۸ میلی‌گرم بر گرم
CMC/g-C_3H_4/ZnO	بنفش متیل (MV)	۹۶/۴۳ میلی‌گرم بر گرم
HPMC-g-PAM/NaMMT	بنفش کریستالی (CV)	۷۶ درصد
CdS/QDs	رودامین B (RhB)	۱۳۷ میلی‌گرم بر گرم
cellulose/Sep	سبز مالاکیت (MG)	۳۱۴ میلی‌گرم بر گرم
CMC/AM/GO	آبی اسیدی ۱۳۳ (AB 133)	۱۸۵/۵ میلی‌گرم بر گرم
PVA/CMC/GO/BNTN	متیلن بلو (MB)	۱۷۲/۱۴ میلی‌گرم بر گرم
CMC/c-GO	متیلن بلو (MB)	۱۸۰/۳۲ میلی‌گرم بر گرم

جدول ۵- عملکرد هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید نشاسته (ST) در جذب رنگ‌ها از محلول‌های آبی (Stanciu و Teacă، ۲۰۲۴)

جاذب	رنگ	توانایی حذف رنگ
(CMST-g-PVIm/PVA/Fe_3O_4)	بنفش کریستالی (CV)	۹۱/۵۸ میلی‌گرم بر گرم
Fe_3O_4/ST-g-PAA	بنفش متیل (MV)	۳۱/۸۴ میلی‌گرم بر گرم
ST phosphate	بنفش کریستالی (CV)	۹۹ درصد
Succinylated ST	متیل اورنج (MO)	۲۰ درصد
ST@PAA	قرمز کنگو (CR)	۶۴/۷۳ میلی‌گرم بر گرم
ST/HA	متیلن بلو (MB)	۱۱۱/۱۰ میلی‌گرم بر گرم
ST-g-P(AMPS-co-DMAEMA)/benzyl chloride	بنفش پایه ۷ (BV 7)	۶۰۰ میلی‌گرم بر گرم
MST	متیلن بلو (MB)	۷۰ میلی‌گرم بر گرم
VST	متیلن بلو (MB)	۸۱ میلی‌گرم بر گرم
ST-g-PAM/GO/HAp	سبز مالاکیت (MG)	۲۹۷ میلی‌گرم بر گرم
ST-g-P(AA-co-AMPS)/GO	متیلن بلو (MB)	۷۶۹ میلی‌گرم بر گرم
succinylated ST	متیلن بلو (MB)	۸۴ میلی‌گرم بر گرم
GST	متیلن بلو (MB)	۷۵ میلی‌گرم بر گرم
(CMST-g-PVIm/PVA/Fe_3O_4)	قرمز کنگو (CR)	۸۳/۶۶ میلی‌گرم بر گرم

جدول ٦- عملکرد حذف رنگ برخی از هیدروژل‌های مبتنی بر کیتوزان (CS) و کیتین در جذب رنگ‌ها از محلول‌های آبی (Stanciu و Teacă، ۲۰۲۴)

جاذب	رنگ	توانایی حذف رنگ
(AA-co-CS/P (AM	متیل اورنج (MO)	۹۰ درصد کارایی
Fe_3O_4, SiO_2/CS-g-PAMPS	متیلن بلو (MB)	۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر
CS-g-EDA/CS-g-MA	قرمز کنگو (CR)	۱۶۰۷ میلی‌گرم بر گرم
CS-g-P(AM-co-NaMA)	فوکسین (Fuchsin)	۹۷ درصد کارایی
CS/MMT	قرمز واکنشی ۱۳۶ (RR 136)	۴۷۳ میلی‌گرم بر گرم
Fe_3O_4@CS/P(AAM/NVIm)	متیلن بلو (MB)	۸۶۰ میلی‌گرم بر گرم
CS/Ag-HAp	رودامین B (RhB)	۱۲۷ میلی‌گرم بر گرم
CS-gelatin/ZnO	قرمز کنگو (CR)	۹۰/۸ درصد کارایی
CS/PVA/PAA	متیلن بلو (MB)	۵۹۶ میلی‌گرم بر گرم
CS/nano-ZnO	مشکی واکنشی ۵ (RB 5)	۱۸۹/۴۵ میلی‌گرم بر گرم
CS/TETA-GO	آبی واکنشی ۲۲۱ (RB 221)	۵۴/۲ میلی‌گرم بر گرم
chitin-TRGO	قرمز کنگو (CR)	۲۳۰/۵ میلی‌گرم بر گرم
CS/PA/GO	زرد خوراکی ۳ (FY 3)	۲۹۶/۵ میلی‌گرم بر گرم

۳-۳. حذف میکروارگانیسم‌ها و خواص ضدمیکروبی

حضور میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا نظیر باکتری‌ها (مانند جنس سالمونلا[19] و *Escherichia coli*)، ویروس‌ها و پروتوزوآها در آب، یکی از مهم‌ترین و فوری‌ترین نگرانی‌ها برای سلامت عمومی است. هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی، به ویژه آن‌هایی که از کیتوزان مشتق شده‌اند، به دلیل خواص ضد میکروبی ذاتی خود و یا با عامل‌دار کردن با ترکیبات ضد میکروبی، می‌توانند نقش حیاتی در ضدعفونی آب و حذف بیوپاتوژن‌ها ایفا کنند (Cabral، ۲۰۱۰).

در مکانیسم‌های اصلی حذف میکروارگانیسم‌ها، برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی به خصوص برای کیتوزان بسیار مهم است. کیتوزان، با گروه‌های آمین پروتونه شده خود، دارای بار مثبت است که می‌تواند با غشای سلولی میکروب‌ها (که معمولاً دارای بار منفی هستند) برهم‌کنش الکترواستاتیکی ایجاد کند. این برهم‌کنش منجر به اختلال در یکپارچگی غشای سلولی، افزایش نفوذپذیری آن و در نهایت نشت محتویات درون سلولی و مرگ باکتری می‌شود (Ke و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، کیتوزان می‌تواند فرآیندهای متابولیکی درون سلولی را نیز مختل کند. مکانیسم دیگر، چسبندگی و به دام انداختن فیزیکی است. ساختار متخلخل هیدروژل قادر است میکروارگانیسم‌های بزرگتر از اندازه منافذ خود را به صورت مکانیکی به دام اندازد و از جریان آب جدا کند. این مکانیسم مکمل خواص ضد میکروبی شیمیایی است (Desai و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، هیدروژل‌ها می‌توانند به عنوان حامل‌های هوشمند برای آزادسازی کنترل‌شده عوامل ضد میکروبی عمل کنند. نانوذرات فلزی به ویژه نانوذرات نقره و مس، به دلیل خواص ضد میکروبی گسترده و توانایی آسیب رساندن به دیواره سلولی و DNA باکتری‌ها (رادخواه و صادقی‌نژاد ماسوله، ۱۴۰۰)، به طور فزاینده‌ای با هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی ترکیب می‌شوند. این نانوذرات به تدریج در آب آزاد شده و میکروارگانیسم‌ها را از بین می‌برند و به پایداری خواص ضد میکروبی هیدروژل کمک می‌کنند (Ahmad و همکاران، ۲۰۲۴). هیدروژل‌های کامپوزیتی

کیتوزان/نانوذرات نقره، کارایی بسیار بالایی در حذف طیف وسیعی از باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی (مانند *E. coli* و *Staphylococcus aureus*) از خود نشان داده‌اند و پتانسیل کاربرد در فیلترهای آب آشامیدنی را دارند (Akdaşçi و همکاران، ۲۰۲۵). عامل‌دار کردن پلی‌ساکاریدها با گروه‌های آمونیوم چهار ظرفیتی[۲۰] که دارای بار مثبت دائمی هستند، نیز می‌تواند خاصیت ضد میکروبی آن‌ها را حتی در pH خنثی و بالاتر تقویت کند (Ahmad و همکاران، ۲۰۲۴).

۴-۳. حذف سایر آلاینده‌ها و کاربردهای چندگانه

تطبیق‌پذیری هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی فراتر از حذف فلزات سنگین، رنگ‌ها و میکروارگانیسم‌ها است و شامل قابلیت حذف سایر آلاینده‌ها و کاربردهای چندگانه می‌شود. لازم به‌ذکر است که مکانیسم‌های مختلفی برای **حذف آلاینده‌ها توسط هیدروژل‌ها وجود دارد که در شکل (۹) به طور خلاصه نشان داده شده است. از طریق این مکانیسم‌ها، امکان حذف مواد مختلف مانند آنیون‌ها، ذرات معلق، حذف روغن و چربی، جداسازی گازها و غیره امکان‌پذیر است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود:**

الف) حذف آنیون‌ها: آلاینده‌هایی نظیر فسفات، نیترات و فلوئورید، که اغلب از فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی ناشی می‌شوند، می‌توانند منجر به پدیده‌هایی مانند یوتروفیکاسیون[۲۱] و خطرات سلامتی شوند. هیدروژل‌های مبتنی بر کیتوزان یا هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی اصلاح شده با گروه‌های بار مثبت (مانند آمین‌های چهارتایی) می‌توانند این آنیون‌ها را از طریق تبادل یونی یا برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی جذب کنند (Li و همکاران، ۲۰۲۵).

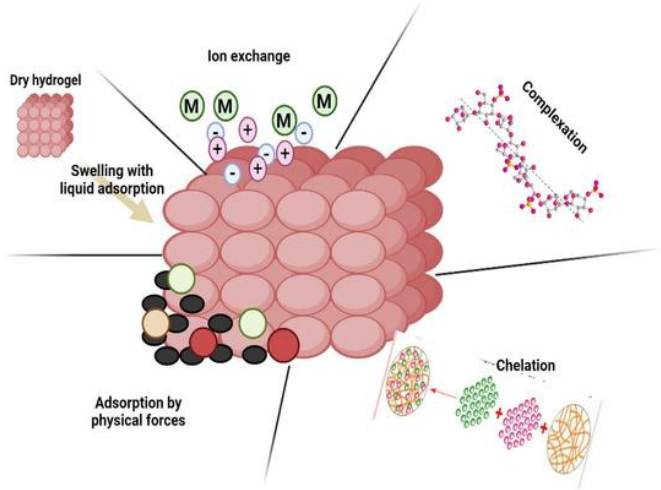
ب) حذف ذرات معلق و کاهش کدورت: ساختار متخلخل هیدروژل‌ها، آن‌ها را به فیلترهای فیزیکی مؤثری تبدیل می‌کند. این هیدروژل‌ها می‌توانند به طور کارآمدی ذرات معلق، کلوئیدها و مواد مولد کدورت را به دام اندازند و شفافیت آب را افزایش دهند. این کاربرد به ویژه در مراحل پیش‌تصفیه آب یا برای تصفیه آب‌های سطحی با بار ذرات بالا مفید است (Maldonado و Ochoa-Amo، ۲۰۲۱).

ج) جذب روغن و چربی: با اصلاح سطح پلی‌ساکاریدها به گونه‌ای که بخش‌های آبگریز[۲۲] به آن‌ها اضافه شود، می‌توان هیدروژل‌هایی تولید کرد که قادر به جذب انتخابی روغن و چربی از پساب‌های صنعتی یا در موارد آلودگی‌های نفتی باشند. این هیدروژل‌ها می‌توانند به عنوان جاذب‌های انتخابی برای تفکیک فاز روغن از آب عمل کنند (Sharma و همکاران، ۲۰۲۴).

د) جداسازی گازها: در برخی موارد خاص، هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی می‌توانند در جداسازی گازهای محلول در آب نیز کاربرد داشته باشند (Nath و همکاران، ۲۰۲۴).

ه) سنجش و تشخیص: برخی هیدروژل‌های هوشمند می‌توانند به عنوان حسگرهای زیستی یا شیمیایی عمل کرده و در حضور آلاینده‌های خاص، تغییرات قابل اندازه‌گیری (نظیر تغییر رنگ، حجم یا خواص الکتریکی) از خود نشان دهند که امکان تشخیص سریع آلاینده‌ها را فراهم می‌کند (Liu و همکاران، ۲۰۲۳).

به طور خلاصه، هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی به دلیل تطبیق‌پذیری بی‌نظیرشان، ناشی از توانایی در سنتز با خواص متنوع، اصلاح‌پذیری شیمیایی گسترده و فعال بودن مکانیسم‌های حذف چندگانه، به عنوان موادی ایده‌آل و پایدار برای کاربردهای چندگانه در تصفیه آب مطرح شده‌اند (Sharma و همکاران، ۲۰۲۴). تحقیقات آتی در این حوزه بر توسعه هیدروژل‌های با گزینش‌پذیری بالاتر برای آلاینده‌های خاص، ظرفیت جذب بیشتر، قابلیت استفاده مجدد آسان‌تر، پایداری درازمدت در شرایط عملیاتی سخت و کاهش هزینه‌های تولید متمرکز خواهد بود تا پتانسیل کامل این مواد زیست‌دوست در مقیاس صنعتی محقق شود.



شکل ۹- مکانیسم‌های دخیل در حذف آلاینده‌ها با هیدروژل‌ها (Alsaka و همکاران، ۲۰۲۵)

۳-۵. تحلیل انتقادی و مقایسه عملکرد پلی‌ساکاریدهای مختلف

در تحلیل انتقادی عملکرد پلی‌ساکاریدهای مختلف در هیدروژل‌های تصفیه آب، باید به بررسی مقایسه‌ای ویژگی‌های کلیدی هر پلی‌ساکارید پرداخت. کیتوزان به دلیل دارا بودن گروه‌های آمینو و بار کاتیونی ذاتی، گزینه‌ای ایده‌آل برای جذب فلزات سنگین و رنگ‌های آنیونی محسوب می‌شود. با این حال، این پلی‌ساکارید در محیط‌های اسیدی مقاومت کمتری داشته و ممکن است دچار تخریب شود. از سوی دیگر، هیدروژل‌های مبتنی بر آلژینات به دلیل سهولت تشکیل ژل با یون‌های کلسیم و ساختار متخلخل، برای انکپسوله‌سازی و جذب انتخابی برخی آلاینده‌ها مناسب هستند، اما استحکام مکانیکی پایین آن‌ها از محدودیت‌های اصلی محسوب می‌شود (Zhang و همکاران، ۲۰۲۰، ۲۰۲۲).

سلولز و مشتقات آن به دلیل فراوانی، هزینه پایین و وجود گروه‌های هیدروکسیل فعال، پتانسیل بالایی در توسعه هیدروژل‌های مقرون به صرفه دارند. با این وجود، حلالیت پایین و واکنش‌پذیری محدود سلولز خام، نیازمند انجام اصلاحات شیمیایی پیچیده برای بهبود عملکرد است. پکتین به عنوان یک پلی‌ساکارید آنیونی با قابلیت تشکیل ژل در حضور یون‌های کلسیم، برای جذب فلزات سنگین کاتیونی مناسب است، اما حساسیت بالا به pH محیط و پایداری کم در شرایط قلیایی از موانع استفاده گسترده از آن می‌باشد (Dohendou و همکاران، ۲۰۲۱).

صمغ زانتان با داشتن گروه‌های کربوکسیل و استال پیروواتِ، می‌تواند کمپلکس‌های پایدار با فلزات سنگین تشکیل دهد، اما ویسکوزیته بالای محلول‌های آن، فرآیند تولید هیدروژل را با چالش مواجه می‌کند. نشاسته نیز به‌عنوان یک پلی‌ساکارید کم‌هزینه و زیست‌تخریب‌پذیر، قابلیت بالایی در اصلاح شیمیایی دارد، اما تورم محدود آن در آب، پایداری فیزیکی هیدروژل‌های نشاسته‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مقایسه عملکرد این پلی‌ساکاریدها می‌توان گفت که کیتوزان و آلژینات به طور معمول بالاترین ظرفیت جذب را برای فلزات سنگین نشان می‌دهند، در حالی‌که سلولز اصلاح‌شده به دلیل سطح ویژه بالا برای جذب رنگ‌ها و ترکیبات آلی مناسب‌تر است. از نظر پایداری فیزیکی و مکانیکی، هیدروژل‌های مبتنی بر سلولز و صمغ زانتان عملکرد بهتری دارند، در حالی که هیدروژل‌های کیتوزان و آلژینات از انعطاف‌پذیری ساختاری بالاتری برخوردار هستند (Huang و همکاران، ۲۰۲۳).

از دیدگاه اقتصادی، نشاسته و سلولز به دلیل هزینه پایین و فراوانی، گزینه‌های مناسبی برای کاربردهای مقیاس بزرگ هستند، در حالی که کیتوزان و آلژینات با وجود عملکرد بهتر، هزینه تولید بالاتری دارند. همچنین از نظر سهولت فرآیند تولید، آلژینات و کیتوزان به دلیل حلالیت بهتر در آب، فرآیند تولید ساده‌تری دارند، در حالی که سلولز و نشاسته معمولاً نیازمند مراحل اصلاح شیمیایی پیچیده‌تری هستند (Zhao و همکاران، ۲۰۲۳).

در نهایت، انتخاب بهینه پلی‌ساکارید برای کاربردهای تصفیه آب باید بر اساس نوع آلاینده هدف، شرایط عملیاتی و ملاحظات اقتصادی صورت پذیرد. توسعه هیدروژل‌های کامپوزیتی با ترکیب چند پلی‌ساکارید مختلف، می‌تواند راهکاری برای غلبه بر محدودیت‌های هر ماده و دستیابی به عملکرد برتر باشد. چنین رویکردی می‌تواند مزایای هر پلی‌ساکارید را ترکیب کرده و هیدروژل‌هایی با خواص بهبودیافته تولید نماید.

۴. جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی توسعه هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی

توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های نوین در هر حوزه‌ای، از جمله تصفیه آب، تنها زمانی به یک راه‌حل جامع و پایدار تبدیل می‌شود که علاوه‌بر نوآوری‌های فنی و پیشرفت‌های علمی، جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی آن نیز به دقت مورد ارزیابی و تأیید قرار گیرد. یک راهکار پایدار، باید هم از منظر اقتصادی توجیه‌پذیر بوده و مزایایی ملموس برای ذی‌نفعان داشته باشد و هم از دیدگاه زیست‌محیطی، برتری‌های فاحشی نسبت به روش‌های موجود از خود نشان دهد (Ramakrishnan و همکاران، ۲۰۲۱). برای کشوری مانند ایران، که همواره با چالش‌های مضاعف کم‌آبی، خشکسالی‌های پیاپی و آلودگی فزاینده منابع آبی دست و پنجه نرم می‌کند، تحلیل دقیق و همه‌جانبه این ابعاد، نقش کلیدی در هموار ساختن مسیر برای سرمایه‌گذاری‌های آتی، تدوین سیاست‌گذاری‌های دولتی مؤثر و پذیرش گسترده صنعتی ایفا می‌کند. این بخش به تفصیل به بررسی این جنبه‌های حیاتی می‌پردازد تا تصویر کاملی از پتانسیل هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید در حرکت به سوی آینده‌ای با آب پاک و فراوان ترسیم شود.

۴-۱. مزایای اقتصادی

یکی از قانع‌کننده‌ترین و مهم‌ترین مزایای اقتصادی توسعه و به‌کارگیری هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی در ایران، کاهش چشمگیر و قابل توجه هزینه‌های تأمین مواد اولیه است (Ali و همکاران، ۲۰۲۴). این پلیمرهای زیستی، برخلاف بسیاری از مواد شیمیایی سنتتیک و جاذب‌های وارداتی که قیمت بالایی دارند، عمدتاً از پسماندهای کشاورزی و صنایع شیلات کشورمان استخراج می‌شوند. تصور کنید: سالانه میلیون‌ها تن پسماند کشاورزی نظیر کاه گندم و برنج، ساقه و برگ ذرت، تفاله میوه‌ها (مانند سیب، پرتقال و خرما) و همچنین ضایعات حجیم صنایع شیلات (به‌ویژه پوست میگو و خرچنگ غنی از کیتین) تولید می‌شود. بخش عمده‌ای از این پسماندها در حال حاضر یا بدون استفاده

رها شده، یا به عنوان زباله دفع می‌شوند که خود هزینه‌های گزافی را برای جمع‌آوری و دفع به سیستم مدیریت پسماند تحمیل می‌کند (Berradi و همکاران، ۲۰۲۳). حتی سوزاندن برخی از این پسماندها نظیر کاه، منجر به آلودگی شدید هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. با به‌کارگیری فناوری‌های نوین، می‌توان این پسماندهای «بی‌ارزش» را به مواد اولیه ارزشمند و فراوان برای تولید پلی‌ساکاریدها و سپس هیدروژل‌ها تبدیل کرد. این رویکرد نه تنها هزینه تأمین ماده اولیه را به حداقل می‌رساند و وابستگی کشور به واردات مواد گران‌قیمت را قطع می‌کند، بلکه می‌تواند یک جریان درآمدی جدید و پایدار برای کشاورزان، دامداران و صنایع شیلات ایجاد کرده و به توسعه اقتصادی مناطق روستایی و ساحلی کمک شایانی نماید. این پتانسیل عظیم بیوپلیمرهای بومی، فرصت‌های بی‌نظیری را برای توسعه صنایع پایین‌دستی بیوپلیمرها و بیومواد در ایران فراهم می‌آورد (Burinskiene و همکاران، ۲۰۲۵).

علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه‌های مواد اولیه، فرآیندهای سنتز بسیاری از هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی اغلب می‌توانند در شرایط عملیاتی ملایم‌تر، مانند دمای اتاق و فشار اتمسفریک و با مصرف انرژی به‌مراتب کمتر نسبت به سنتز پلیمرهای سنتتیک انجام شوند (Sayed، ۲۰۲۳). این کاهش نیاز به انرژی و شرایط سخت عملیاتی دارد و به طور مستقیم به کاهش هزینه‌های عملیاتی تولید و در نتیجه، کاهش قیمت تمام‌شده محصول نهایی منجر می‌شود که رقابت‌پذیری آن را در بازار افزایش می‌دهد. نکته حیاتی دیگر از منظر اقتصادی، قابلیت بازیابی و استفاده مجدد جاذب‌ها است، در حالی که این جنبه هنوز نیازمند تحقیقات و توسعه روش‌های بازسازی کارآمدتر است، اما با افزایش موفقیت‌آمیز چرخه عمر هیدروژل‌ها، می‌توان نیاز به تولید مداوم جاذب جدید را به میزان قابل توجهی کاهش داد که به طور مستقیم بر کاهش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری سیستم‌های تصفیه آب تأثیر می‌گذارد (Pytel و همکاران، ۲۰۲۵). یک هیدروژل که بتواند برای ده‌ها چرخه جذب و بازسازی، کارایی خود را حفظ کند، از لحاظ اقتصادی به مراتب جذاب‌تر خواهد بود. در نهایت، توسعه و بومی‌سازی این فناوری پیشرفته در ایران می‌تواند به کاهش وابستگی کشور به مواد شیمیایی و تجهیزات تصفیه آب وارداتی منجر شود که در شرایط تلاطم اقتصادی و تحریم‌ها، از اهمیت استراتژیک بالایی برخوردار است. این امر همچنین به ایجاد شغل‌های جدید و پایدار در تمام مراحل زنجیره ارزش، از جمع‌آوری پسماند و استخراج پلی‌ساکاریدها تا تولید هیدروژل و به‌کارگیری آن در صنایع مختلف تصفیه آب، کمک شایانی خواهد کرد (Revete و همکارن، ۲۰۲۲).

۲-۴. مزایای محیط زیستی

برتری‌های زیست‌محیطی هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی، وجه تمایز اصلی و دلیل اساسی گرایش فزاینده جهانی به سمت این مواد در مقایسه با بسیاری از مواد تصفیه آب سنتی و پلیمرهای سنتتیک است (Berradi و همکاران، ۲۰۲۳). در رأس این مزایا، منشأ کاملاً تجدیدپذیر و زیست‌تخریب‌پذیری کامل و بی‌خطر آن‌ها قرار دارد. برخلاف بسیاری از پلیمرهای سنتتیک که در حال حاضر در سیستم‌های تصفیه آب استفاده می‌شوند (مانند پلی‌اکریل آمیدها) و سال‌ها در محیط باقی می‌مانند و مشکلات جدی آلودگی میکروپلاستیک ایجاد می‌کنند، هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی پس از پایان عمر مفید خود، به طور کامل و بدون به جا گذاشتن اثرات مخرب، در محیط زیست تجزیه شده و به ترکیبات طبیعی و غیرسمی (نظیر آب، دی‌اکسید کربن و زیست‌توده) باز می‌گردند. این ویژگی، به طور مستقیم به کاهش قابل توجه پسماندهای جامد، جلوگیری از آلودگی ثانویه و حفظ سلامت اکوسیستم‌ها و تنوع زیستی کمک می‌کند (Dallaev و همکاران، ۲۰۲۵).

علاوه بر این، استفاده از پلی‌ساکاریدها به عنوان ماده اولیه، به معنای کاهش مصرف منابع فسیلی محدود و غیرتجدیدپذیر (مانند نفت و گاز) است که برای تولید پلیمرهای سنتتیک مورد نیاز است. این تغییر رویکرد نه تنها به کاهش ردپای کربن و انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با فرآیندهای استخراج و پالایش سوخت‌های فسیلی و تولید پلیمرهای پتروشیمیایی کمک می‌کند، بلکه به کاهش آلاینده‌های هوای ناشی از سوزاندن پسماندهای کشاورزی نیز منجر می‌شود. این امر به ویژه در چارچوب تلاش‌های جهانی برای کاهش تغییرات اقلیمی و دستیابی به اهداف توسعه پایدار و کربن‌زدایی، از اهمیت استراتژیک و حیاتی برخوردار است. خود فرآیند تصفیه نیز با استفاده از این هیدروژل‌ها می‌تواند به‌مراتب «سبزتر» باشد (Dhalsamant و همکاران، ۲۰۲۵). حذف آلاینده‌ها از طریق مکانیسم‌های جذب، تبادل یونی و کمپلکس‌سازی، معمولاً نیاز به فرآیندهای شیمیایی پیچیده، انرژی‌بر و گاهی اوقات تولید محصولات جانبی سمی (نظیر لجن‌های شیمیایی) را کاهش می‌دهد که خود رویکردی پاک‌تر و ایمن‌تر محسوب می‌شود. همچنین، قابلیت استحصال و بازیابی فلزات سنگین جذب شده از هیدروژل، می‌تواند به کاهش دفع پسماندهای خطرناک و حتی بازیافت منابع ارزشمند فلزی کمک کند که منجر به کاهش نیاز به استخراج از معادن و اثرات زیست‌محیطی مخرب آن می‌شود. در مجموع، تمامی این جنبه‌ها، هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی را به یک فناوری پاک، پایدار و دوستدار محیط زیست برای حفاظت از منابع آبی و اکوسیستم‌های طبیعی تبدیل می‌کنند و آن‌ها را در خط مقدم راه‌حل‌های تصفیه آب سبز قرار می‌دهند (Akhtar و همکاران، ۲۰۲۴).

۳-۴. تحلیل چرخه حیات (LCA)[۳۳]: ابزاری برای ارزیابی جامع پایداری

برای ارزیابی جامع‌تر، دقیق‌تر و علمی‌تر مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی یک فناوری در مقایسه با سایر گزینه‌ها، انجام تحلیل چرخه حیات یک ابزار ضروری و استاندارد بین‌المللی است. در واقع، چرخه حیات یک ارزیابی سیستماتیک و داده‌محور است که تأثیرات زیست‌محیطی و منابعی یک محصول، فرآیند یا خدمت را در تمام مراحل چرخه عمر آن، از مرحله «استخراج و تولید مواد اولیه تا مرحله استفاده، بازیافت و دفع نهایی» مورد بررسی قرار می‌دهد (Goel و همکاران، ۲۰۲۴). یک چرخه حیات جامع برای هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی در کاربرد تصفیه آب باید شامل ارزیابی دقیق مراحل زیر باشد:

الف) مرحله استخراج و فرآوری مواد اولیه: این مرحله شامل ارزیابی دقیق انرژی مصرفی (مانند برق، سوخت)، مصرف آب و همچنین تمامی آلایندگی‌های هوا و پساب مرتبط با جمع‌آوری پسماندهای کشاورزی و شیلاتی، فرآیندهای مکانیکی و شیمیایی استخراج و خالص‌سازی پلی‌ساکاریدها از این منابع است. این ارزیابی باید شامل حمل و نقل مواد اولیه به محل تولید نیز باشد.

ب) مرحله سنتز و تولید هیدروژل: در این مرحله، تمامی ورودی‌ها و خروجی‌های مرتبط با فرآیند شبکه‌ای شدن و تشکیل هیدروژل مورد بررسی قرار می‌گیرد. این امر شامل مصرف انرژی برای واکنش‌ها و خشک کردن هیدروژل، مصرف آب و حلال‌های شیمیایی (در صورت استفاده) و تولید هرگونه پسماند یا انتشار آلاینده در طی فرآیند تولید است. انتخاب روش شبکه‌ای شدن (فیزیکی یا شیمیایی) و نوع عوامل شبکه‌ای کننده در این مرحله، تأثیر بسزایی در نتایج چرخه حیات خواهد داشت.

ج) مرحله کاربرد و عملکرد در تصفیه آب: این بخش به ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی و منابعی مرتبط با استفاده عملی از هیدروژل در سیستم‌های تصفیه آب می‌پردازد. این شامل انرژی مورد نیاز برای پمپاژ آب از طریق ستون‌های جاذب حاوی هیدروژل، مصرف مواد و انرژی برای فرآیندهای بازسازی (احیا) هیدروژل در صورت استفاده مجدد و هرگونه انتشار یا آلودگی احتمالی در طول فرآیند تصفیه است (Rashid و همکاران، ۲۰۲۳).

د) مرحله پایان عمر: در این مرحله، سرنوشت نهایی هیدروژل پس از پایان عمر مفید آن (نظیر تجزیه زیستی در محیط طبیعی، دفن در محل دفن زباله، یا امکان بازیافت اجزای آن) و همچنین نحوه مدیریت و دفع ایمن آلاینده‌های جذب شده (مانند فلزات سنگین) یا امکان بازیافت آن‌ها ارزیابی می‌شود.

نتایج حاصل از یک چرخه حیات دقیق و شفاف می‌تواند به طور کمی نقاط قوت و ضعف زیست‌محیطی و اقتصادی هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی را در مقایسه با فناوری‌های تصفیه آب موجود (مانند استفاده از کربن فعال، رزین‌های تبادل یونی سنتتیک، یا فرآیندهای شیمیایی پیچیده) شناسایی کند. این اطلاعات برای محققان، صنعتگران و سیاست‌گذاران بسیار ارزشمند است تا بتوانند فرآیندهای تولید و استفاده از این مواد را برای دستیابی به حداکثر پایداری و حداقل اثرات منفی زیست‌محیطی بهینه‌سازی کنند (Shen و Patel، ۲۰۰۸). با توجه به ماهیت بیوپلیمری این هیدروژل‌ها و منشأ تجدیدپذیر آن‌ها، انتظار می‌رود که آن‌ها در اکثر شاخص‌های زیست‌محیطی (مانند ردپای کربن، مصرف آب شیرین، تولید پسماند خطرناک و غیره) نسبت به جاذب‌های سنتتیک یا فرآیندهای تصفیه انرژی‌بر و شیمیایی، برتری قابل توجهی داشته باشند و به عنوان یک گزینه پایدارتر معرفی شوند (Revete و همکاران، ۲۰۲۲؛ Das و همکاران، ۲۰۲۳).

۵. چالش‌ها و محدودیت‌ها با تمرکز بر مشکلات عملی و صنعتی

با وجود پتانسیل بالای هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی در تصفیه آب، چالش‌های عملی و صنعتی متعددی مانع از تجاری‌سازی گسترده و کاربرد صنعتی آن‌ها در مقیاس بزرگ شده است. در ادامه، اصلی‌ترین موانعی که در این زمینه وجود دارند، ذکر می‌شوند:

الف) محدودیت‌های مکانیکی و ساختاری: هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی عموماً از استحکام مکانیکی پایین و مقاومت کششی محدودی برخوردارند. این ضعف ساختاری باعث می‌شود در برابر نیروهای برشی و فشارهای هیدرودینامیکی در سیستم‌های تصفیه صنعتی (مانند راکتورهای بستر سیال یا سیستم‌های دارای همزن مکانیکی) دچار تخریب فیزیکی شده و کارایی خود را از دست بدهند. این مسئله به ویژه در کاربردهای پیوسته که نیاز به شارژ مجدد مکرر بستر جاذب وجود دارد، به یک چالش جدی تبدیل می‌شود (Zhang و همکاران، ۲۰۲۲).

ب) مشکلات مربوط به ظرفیت و سرعت جذب: اگرچه هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی در شرایط آزمایشگاهی ظرفیت جذب قابل قبولی نشان می‌دهند، اما در مقیاس صنعتی و در مواجهه با پساب‌های واقعی، اغلب با کاهش محسوس ظرفیت جذب مواجه می‌شوند. سرعت کند نفوذ آلاینده‌ها به درون شبکه پلیمری هیدروژل، زمان تماس مورد نیاز را افزایش داده و موجب بزرگ شدن ابعاد تجهیزات و افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌شود (Lin و همکاران، ۲۰۲۲).

ج) چالش انتخاب‌پذیری در محیط‌های پیچیده: در پساب‌های صنعتی واقعی، معمولاً مخلوط پیچیده‌ای از آلاینده‌های مختلف وجود دارد. هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی غالباً فاقد انتخاب‌پذیری کافی برای جداسازی هدفمند آلاینده‌های خاص هستند. حضور یون‌های رقیب، مواد آلی طبیعی و سایر ترکیبات مزاحم می‌تواند به شدت بر کارایی این هیدروژل‌ها تأثیر منفی بگذارد و راندمان فرآیند تصفیه را کاهش دهد (Ghiorghita و همکاران، ۲۰۲۲).

د) مشکلات تولید در مقیاس صنعتی: فرآیند سنتز این هیدروژل‌ها اغلب نیاز به کنترل دقیق پارامترهای مختلفی

مانند دما، pH و زمان دارد که در مقیاس آزمایشگاهی به راحتی قابل مدیریت است، اما در مقیاس صنعتی با چالش‌های فنی و هزینه‌های زیادی همراه می‌باشد. یکنواختی خواص در دسته‌های مختلف تولید نیز از دیگر مشکلات پیش‌روی صنعتی‌سازی این فناوری است (Zhao و همکاران، ۲۰۲۳).

ه) محدودیت‌های پایداری و طول عمر: این هیدروژل‌ها در معرض تخریب میکروبی و شیمیایی در محیط‌های آلی پیچیده قرار دارند. ناپایداری در برابر تغییرات pH و شوری، همراه با حساسیت به اکسیداسیون، از طول عمر عملیاتی آن‌ها می‌کاهد. این مسئله به ویژه در تصفیه پساب‌های صنعتی با شرایط شیمیایی متغیر (مانند پساب صنایع نفت و گاز و معادن) به یک چالش اساسی تبدیل شده است دهد (Ghiorghita و همکاران، ۲۰۲۲).

و) مشکلات بازیافت و مسائل اقتصادی: فرآیند احیاء و بازیافت این هیدروژل‌ها اغلب نیازمند استفاده از محلول‌های شیمیایی خاص و مصرف مقادیر قابل توجهی آب و انرژی است. پس از چندین سیکل استفاده، ظرفیت جذب آن‌ها به طور محسوسی کاهش یافته و در نهایت نیاز به جایگزینی دارند. هزینه‌های مربوط به بازیافت و دفع نهایی هیدروژل‌های مستعمل، توجیه اقتصادی استفاده از آن‌ها را در مقایسه با جاذب‌های متعارف با مشکل مواجه می‌سازد (Huang و همکاران، ۲۰۲۳).

نهایتاً، فقدان استانداردها و پروتکل‌های صنعتی برای به کارگیری این مواد در سیستم‌های تصفیه آب موجود، یک مانع ساختاری مهم است. صنایع برای پذیرش یک فناوری جدید به داده‌های مطمئن و استاندارد در مورد عملکرد، ایمنی و دوام آن در درازمدت نیاز دارند که در حال حاضر برای بسیاری از هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی این داده‌ها به ویژه در شرایط واقعی ایران (مانند پساب‌های صنایع نفت و معادن) محدود است. این عدم قطعیت‌ها در کنار مشکلات فنی و اقتصادی، باعث شده تا صنعت در به کارگیری این فناوری نوظهور، محتاط عمل کند.

نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

در مواجهه با بحران فزاینده جهانی آب و تشدید آلودگی منابع آبی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران، نیاز به توسعه و به‌کارگیری راهکارهای نوآورانه و پایدار برای تصفیه آب به ضرورتی انکارناپذیر تبدیل شده است. در این زمینه، هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید به دلیل مجموعه‌ای از ویژگی‌های برجسته و منحصر به فردشان، از جمله زیست‌سازگاری کامل، زیست‌تخریب‌پذیری طبیعی، فراوانی منابع اولیه و قابلیت اصلاح‌پذیری شیمیایی بالا، به عنوان جایگزین‌های بسیار امیدبخش و کارآمد برای مواد تصفیه آب سنتی و اغلب شیمیایی مطرح شده‌اند. این مواد، با تکیه بر ساختار پلیمری سه‌بعدی و آبدوست خود که از پلی‌ساکاریدهای متداول و در دسترس نظیر سلولز، کیتوزان، آلژینات، نشاسته و پکتین مشتق می‌شوند، توانایی شگفت‌انگیزی در حذف طیف وسیعی از آلاینده‌های خطرناک و پایدار از محیط‌های آبی از خود نشان داده‌اند (Morante-Carballo و همکاران، ۲۰۲۲).

مرور جامع و تحلیلی که در بخش‌های پیشین این مطالعه صورت گرفت، به وضوح نشان داد که پلی‌ساکاریدها، با وجود گروه‌های عاملی فراوان و واکنش‌پذیر (مانند هیدروکسیل، کربوکسیل و آمین)، بستری ایده‌آل و قابل تنظیم برای سنتز هیدروژل‌هایی با قابلیت‌های جذب بالا و گزینش‌پذیری قابل توجه فراهم می‌کنند. این هیدروژل‌ها قادرند از طریق فعال‌سازی مکانیسم‌های پیچیده و چندوجهی نظیر کمپلکس‌سازی و کیلاته شدن مؤثر یون‌های فلزی، تبادل یونی کارآمد، جذب سطحی قوی از طریق برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و تشکیل پیوندهای هیدروژنی مستحکم، طیف وسیعی از آلاینده‌ها شامل فلزات سنگین سمی و خطرناک، رنگ‌های صنعتی مقاوم و تجزیه‌ناپذیر و آلاینده‌های آلی نوظهور (مانند داروها و محصولات مراقبت شخصی) را به طور مؤثری از آب حذف کنند. فراتر از حذف شیمیایی، برخی از این هیدروژل‌ها، به‌ویژه آن‌هایی که از کیتوزان مشتق شده‌اند یا با نانوذرات ضد میکروبی (مانند نانوذرات نقره) عامل‌دار شده‌اند، خواص ضد میکروبی ذاتی و یا القایی از خود نشان می‌دهند که آن‌ها را برای ضدعفونی آب و حذف بیوپاتوژن‌ها (مانند باکتری‌ها و ویروس‌ها) نیز بسیار مناسب می‌سازد. علاوه بر این، قابلیت مهندسی دقیق ساختار هیدروژل‌ها به منظور کنترل اندازه و توزیع منافذ، تنظیم سطح ویژه و معرفی گروه‌های عاملی خاص و هدفمند، امکان بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها را برای حذف گزینشی و کارآمد انواع مختلف آلاینده‌ها فراهم آورده است (Khandwal و همکاران، ۲۰۲۵).

یکی از برجسته‌ترین ابعاد این فناوری برای ایران، پتانسیل‌های عظیم بومی‌سازی در زمینه تولید و کاربرد هیدروژل‌ها است. کشور ما دارای منابع غنی و تجدیدپذیری از بیومس کشاورزی (مانند کاه گندم و برنج، ساقه ذرت، تفاله میوه‌ها و مرکبات) و ضایعات صنایع شیلات (به‌ویژه پوست میگو و خرچنگ) است که در حال حاضر اغلب به عنوان زباله دور ریخته می‌شوند. این پسماندها می‌توانند به عنوان مواد اولیه ارزان، فراوان و بومی برای استخراج و خالص‌سازی پلی‌ساکاریدهایی نظیر سلولز، نشاسته، پکتین و کیتوزان به کار گرفته شوند. این رویکرد نه تنها به کاهش چشمگیر وابستگی کشور به مواد اولیه و فناوری‌های وارداتی کمک می‌کند، بلکه با تبدیل پسماندها به محصولات با ارزش افزوده بالا، به توسعه اقتصاد چرخشی، ایجاد اشتغال و تحقق اهداف توسعه پایدار در کشور یاری شایانی می‌رساند (Hosseini و همکاران، ۲۰۱۳). با این حال، برای تحقق کامل پتانسیل هیدروژل‌های پلی‌ساکارید در مقیاس صنعتی و گسترده، غلبه بر چالش‌های موجود حیاتی است. پایداری مکانیکی ناکافی بسیاری از این مواد در برابر

فشارهای عملیاتی در سیستم‌های جریانی، حساسیت عملکرد آن‌ها به تغییرات pH محیط، سرعت جذب نسبتاً پایین در مقایسه با برخی جاذب‌های رایج و مسائل پیچیده مربوط به بازیابی و بازسازی کارآمد جاذب‌های اشباع‌شده بدون تخریب ساختار آن‌ها، از جمله مهم‌ترین موانعی هستند که نیازمند تحقیقات فشرده و نوآوری‌های فنی هستند (Lu و همکاران، ۲۰۲۴). برای رفع این چالش‌ها، تحقیقات آینده باید به طور استراتژیک بر توسعه هیدروژل‌های هیبریدی و کامپوزیتی پیشرفته (با تلفیق پلی‌ساکاریدها و نانومواد تقویت‌کننده مانند نانوسلولزهای با استحکام بالا یا اکسید گرافن)، سنتز هیدروژل‌های هوشمند و پاسخگو به محرک‌ها (مانند میدان مغناطیسی برای جداسازی آسان و کنترل‌شده، یا تغییرات دما و pH برای بازسازی کارآمد) و مهندسی دقیق گروه‌های عاملی در سطح مولکولی برای افزایش چشمگیر گزینش‌پذیری و ظرفیت جذب در برابر آلاینده‌های خاص متمرکز شود. همچنین، بهبود فرآیندهای بازیابی و بازسازی به منظور افزایش چرخه عمر مفید جاذب و کاهش هزینه‌های عملیاتی و زیست‌محیطی و انتقال موفقیت‌آمیز فناوری از مقیاس آزمایشگاهی به صنعتی از طریق پایلوت‌تست‌ها و ارزیابی‌های جامع زیست‌محیطی-اقتصادی از گام‌های اساسی و ضروری در این مسیر خواهد بود (Choudhary و همکاران، ۲۰۲۴).

با توجه به شرایط خاص ایران و چالش‌های پیش‌روی صنایع اصلی کشور مانند معدن و نفت و گاز، توسعه هدفمند این هیدروژل‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. برای مقابله با آلاینده‌های این صنایع، از جمله پساب‌های حاوی فلزات سنگین در معادن و هیدروکربن‌ها و ترکیبات روغنی در صنایع نفت و گاز، نیاز به طراحی هیدروژل‌های هوشمند و مهندسی‌شده با گزینش‌پذیری و پایداری بالا در شرایط سخت عملیاتی وجود دارد .تحقق این امر مستلزم تمرکز بر پژوهش‌های کاربردی، انجام مطالعات پایلوت نیمه‌صنعتی و تعامل نزدیک بین مراکز آکادمیک و صنایع مرتبط است. چشم‌انداز آینده این فناوری در ایران، بر توسعه هیدروژل‌های هوشمند، تلفیق آن‌ها با دیگر فناوری‌های تصفیه در قالب سیستم‌های هیبریدی و همچنین تمرکز بر بازیافت و چرخه اقتصاد استوار است. نمونه‌های موفق داخلی مانند توسعه هیدروژل‌های شبکه دوتایی با قابلیت خود-ترمیمی، گواهی بر پتانسیل بالای کشور در رسیدن به خودکفایی در این عرصه است. دستیابی به این چشم‌انداز نه تنها گامی بزرگ در حل معضلات زیست‌محیطی خواهد بود، بلکه می‌تواند منجر به ایجاد فناوری‌های بومی و ایجاد ارزش اقتصادی از طریق بازیافت مواد شود.

در جمع‌بندی نهایی، هیدروژل‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید نه تنها یک راه‌حل سبز، پایدار و دوستدار محیط زیست برای چالش‌های فزاینده آلودگی آب در جهان و به‌ویژه در ایران ارائه می‌دهند، بلکه با تکیه بر منابع بومی فراوان و قابل دسترس در کشور، می‌توانند به عنوان یک فناوری استراتژیک و بومی در مدیریت جامع و پایدار منابع آب کشور مطرح شوند. سرمایه‌گذاری هدفمند در تحقیق و توسعه این مواد پیشرفته، تشویق همکاری‌های نزدیک و مؤثر بین صنعت و دانشگاه و حمایت قاطع از شرکت‌های دانش‌بنیان فعال در این حوزه، می‌تواند ایران را در مسیر دستیابی به امنیت آبی پایدار، توسعه اقتصادی سبز و حفاظت بلندمدت از محیط زیست، یاری رساند. امید است که این پژوهش‌ها و کاربردهای نوآورانه، به دسترسی نسل‌های آینده به آب پاک و سالم و حفاظت از اکوسیستم‌های ارزشمند آبی کشورمان کمک شایانی کند و آینده‌ای روشن‌تر برای منابع حیاتی آب ترسیم نماید.

منابع

رادخواه، علیرضا، ایگدری، سهیل، و صادقی‌نژاد ماسوله، اسماعیل. (۱۴۰۱). مروری بر فناوری‌های مورد استفاده جهت پالایش آب در سیستم‌های آبزی‌پروری با تأکید بر الگوی توسعه پایدار در ایران. فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۹(۳)، ۱۴۰-۱۲۷. doi: 10.22067/jwsd.v9i3.2205.1150

رادخواه، علیرضا، و ایگدری، سهیل. (۱۴۰۲). کاربرد نانوذرات نقره (Ag-NPs) در میکروب‌زدایی آب در سیستم‌های پرورش آبزیان و اثرات ناشی از رهایش آن در محیط. فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۱۰(۲)، ۱۲۶-۱۰۹. doi: 10.22067/jwsd.v10i2.2301-1209

رادخواه، علیرضا، ایگدری، سهیل، و آتش افرازه، صدیقه. (۱۴۰۳). کارایی جاذب‌های مختلف در حذف فلزات سنگین از پساب‌های شهری (مطالعه مروری). فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۱۱(۴)، ۸۲-۶۳. doi: 10.22067/jwsd.v11i4.2407-1346

رادخواه، علیرضا، و صادقی‌نژاد ماسوله، اسماعیل. (۱۴۰۰). بررسی تأثیر عوامل فیزیکوشیمیایی آب بر زیست‌فراهمی، میزان سمیت و سطح اثرگذاری نانو ذرات فلزی در اکوسیستم‌های آبزی. فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۸(۲)، ۹۰-۷۱. doi: 10.22067/jwsd.v8i2.1019

Abka-Khajouei, R., Tounsi, L., Shahabi, N., Patel, A.K., Abdelkafi, S., & Michaud, P. (2022). Structures, properties and applications of alginates. *Marine Drugs*, 20(6), 364-378. doi: 10.3390/md20060364

Ahmad, N., Bukhari, S.N.A., Hussain, M.A., Ejaz, H., Munir, M.U., & Amjad, M.W. (2024). Nanoparticles incorporated hydrogels for delivery of antimicrobial agents: Developments and trends. *RSC Advances*, 14(19), 13535–13564. doi: 10.1039/d4ra00631c

Ahmadian, M., Derakhshankhah, H., & Jaymand, M. (2023). Recent advances in adsorption of environmental pollutants using metal-organic frameworks-based hydrogels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 231, 5-23. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123333

Akdaşçi, E., Duman, H., Eker, F., Bechelany, M., & Karav, S. (2025). Chitosan and its nanoparticles: A multifaceted approach to antibacterial applications.

biomaterials. *Polymers*, 15(13), 2908. doi: 10.3390/polym15132908
Bilal, M., Gul, I., Basharat, A., & Qamar, S. A. (2021). Polysaccharides-based bio-nanostructures and their potential food applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 176, 540–557. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.02.107
Bosacka, A., Zienkiewicz-Strzałka, M., Deryło-Marczewska, A., & Chrzanowska, A. (2022). Physicochemical, structural, and adsorption properties of chemically and thermally modified activated carbons. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 647, 10-31. doi: 10.1016/j.colsurfa.2022.129130
Burinskiene, A., Lingaitienė, O., & Byčenkaitė, G. (2025). Dynamics of trade of recycled raw materials and the connection with the circular economy. *Discover Sustainability*, *6*, 680. doi: 10.1007/s43621-025-01502-4
Cabral, J.P. (2010). Water microbiology: Bacterial pathogens and water. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7 (10), 3657–3703. doi: 10.3390/ijerph7103657
Cagno, E., Garrone, P., Negri, M., & Rizzuni, A. (2022). Adoption of water reuse technologies: An assessment under different regulatory and operational scenarios. *Journal of Environmental Management*, 317, 115389. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115389
Campiglio, C.E., Contessi Negrini, N., Farè, S., & Draghi, L. (2019). Cross-linking strategies for electrospun gelatin scaffolds. *Materials*, 12(15), 3-18. doi: 10.3390/ma12152476
Carpena, M., Garcia-Perez, P., Garcia-Oliveira, P., Chamorro, F., Otero, P., Lourenço-Lopes, C., Cao, H., Simal-Gandara, J., & Prieto, M.A. (2022). Biological properties and potential of compounds extracted from red seaweeds. *Phytochemistry Reviews*. Advance online publication. pp. 1509–1540. doi: 10.1007/s11101-022-09826-z
Choudhary, A., Sharma, A., Singh, A., & Han, S.S. (2024). Strategy and advancement in hybrid hydrogel and their applications: Recent progress and trends. *Advanced Engineering Materials*, 26(21), 1–20. doi: 10.1002/adem.202400944
Dallaev, R., Papež, N., Allaham, M.M., & Holcman, V. (2025). Biodegradable polymers: Properties, applications, and environmental impact. *Polymers (Basel)*, *17*(14), 1981. doi: 10.3390/polym17141981
Darban, Z., Shahabuddin, S., Gaur, R., Ahmad, I., & Sridewi, N. (2022). Hydrogel-based adsorbent material for the effective removal of heavy metals from wastewater: A comprehensive review. *Gels*, 8(5), 263. doi: 10.3390/gels8050263
Das, A., Ringu, T., Ghosh, S., & Pramanik, N. (2023). A comprehensive review on recent advances in preparation, physicochemical characterization, and bioengineering applications of biopolymers. *Polymer Bulletin*, *80*, 7247–7312. doi: 10.1007/s00289-022-04443-4
Dattilo, M., Patitucci, F., Prete, S., Parisi, O.I., & Puoci, F. (2023). Polysaccharide-based hydrogels and their application as drug delivery systems in cancer treatment: A review. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(2), 55. doi: 10.3390/jfb14020055
Desai, N., Rana, D., Salave, S., Gupta, R., Patel, P., Karunakaran, B., Sharma, A., Giri, J., Benival, D., & Kommineni, N. (2023). Chitosan: A potential biopolymer in drug delivery and biomedical applications. *Pharmaceutics*, 15(4), 1313. doi: 10.3390/pharmaceutics15041313
Nanomaterials, 15(2), 126-140. doi: 10.3390/nano15020126
Akhtar, M. S., Ali, S., & Zaman, W. (2024). Innovative adsorbents for pollutant removal: Exploring the latest research and applications. *Molecules*, 29(18), 10-32. doi: 10.3390/molecules29184317
Ali, K., Asad, Z., Agbna, G.H.D., Saud, A., Khan, A., & Zaidi, S.J. (2024). Progress and innovations in hydrogels for sustainable agriculture. *Agronomy*, *14*(12), 1-24. doi: 10.3390/agronomy14122815
AlMohamadi, H., Awad, S.A., Sharma, A.K., Fayzullaev, N., Távara-Aponte, A., Chiguala-Contreras, L., Amari, A., Rodriguez-Benites, C., Tahoon, M.A., & Esmaeili, H. (2024). Photocatalytic activity of metal- and non-metal-anchored ZnO and TiO_2 nanocatalysts for advanced photocatalysis: Comparative study. *Catalysts*, 14(7), 420-438. doi: 10.3390/catal14070420
Alsaka, L., Altaee, A., Zaidi, S.J., Zhou, J., & Kazwini, T. (2025). A review of hydrogel application in wastewater purification. *Separations*, 12(2), 51-63. doi: 10.3390/separations12020051
Al-Tohamy, R., Ali, S.S., Li, F., Okasha, K.M., Mahmoud, Y.A., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., & Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. Ecotoxicology and Environmental Safety, 231, 113160. doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.113160
Annabi, N., Nichol, J. W., Zhong, X., Ji, C., Koshy, S., Khademhosseini, A., & Dehghani, F. (2010). Controlling the porosity and microarchitecture of hydrogels for tissue engineering. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, 16(4), 371–383. doi: 10.1089/ten.teb.2009.0639
Arfi, R., Karoui, S., Mougin, K., & Ghorbal, A. (2017). Adsorptive removal of cationic and anionic dyes from aqueous solution by utilizing almond shell as bioadsorbent. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 2, 4-25. doi: 10.1007/s41207-017-0032-y
Aranaz, I., Alcántara, A.R., Civera, M.C., Arias, C., Elorza, B., Heras Caballero, A., & Acosta, N. (2021). Chitosan: An overview of its properties and applications. *Polymers*, 13(19), 2-21. doi: 10.3390/polym13193256
Araque, L.M., Infantes-Molina, A., Rodríguez-Castellón, E., Garro-Linck, Y., Franzoni, B., Pérez, C.J., Copello, G.J., & Lázaro-Martínez, J.M. (2024). Ionic crosslinking of linear polyethyleneimine hydrogels with tripolyphosphate. *Gels*, 10(12), 790-805. doi: 10.3390/gels10120790
Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M.R., & Sadeghi, M. (2021). Toxic mechanisms of five heavy metals: Mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. *Frontiers in Pharmacology*, 12, 3-35. doi: 10.3389/fphar.2021.643972
Balducci, E., Papi, F., Capialbi, D.E., & Del Bino, L. (2023). Polysaccharides' structures and functions in biofilm architecture of antimicrobial-resistant (AMR) pathogens. International Journal of Molecular Sciences, 24(4), 4030. doi: 10.3390/ijms24044030
Benalaya, I., Alves, G., Lopes, J., & Silva, L.R. (2024). A review of natural polysaccharides: sources, characteristics, properties, food, and pharmaceutical applications. International Journal of Molecular Sciences, 25(2), 1322. doi: 10.3390/ijms25021322
Berradi, A., Aziz, F., Achaby, M. E., Ouazzani, N., & Mandi, L (2023). A comprehensive review of polysaccharide-based hydrogels as promising

Polymers, 26(1), 258–272. doi: 10.1080/15685551.2023.2284482
Iddrisu, L., Danso, F., Cheong, K.-L., Fang, Z., & Zhong, S. (2024). Polysaccharides as protective agents against heavy metal toxicity. *Foods*, 13(6), 853. doi: 10.3390/foods13060853
Kamali, A., Farzam, M., Beitollahpoor, M., & Tavakoli, O. (2016). Study on potentials of Iran citrus wastes as a feedstock for biofuel production. In *Proceedings of the Emerging Trends in Energy Conservation (ETEC)*. pp. 1–12.
Ke, C.L., Deng, F.S., Chuang, C.Y., & Lin, C.H. (2021). Antimicrobial actions and applications of chitosan. *Polymers*, 13(6), 904. doi: 10.3390/polym13060904
Khandwal, D., Patel, S., Pandey, A.K., & Mishra, A. (2025). A comprehensive, analytical narrative review of polysaccharides from the red seaweed *Gracilaria*: Pharmaceutical applications and mechanistic insights for human health. *Nutrients*, 17(5), 744. doi: 10.3390/nu17050744
Lara-Espinoza, C., Carvajal-Millán, E., Balandrán-Quintana, R., López-Franco, Y., & Rascón-Chu, A. (2018). Pectin and pectin-based composite materials: Beyond food texture. *Molecules*, 23(4), 942-953. doi: 10.3390/molecules23040942
Lavrentev, F.V., Shilovskikh, V.V., Alabusheva, V.S., Yurova, V.Y., Nikitina, A.A., Ulasevich, S.A., & Skorb, E.V. (2023). Diffusion-limited processes in hydrogels with chosen applications from drug delivery to electronic components. *Molecules*, 28(15), 5931. doi: 10.3390/molecules28155931
Li, Z., Qin, R., Xue, J., Lin, C., & Jiang, L. (2025). Chitosan-Based Hydrogel Beads: Developments, Applications, and Challenges. Polymers, 17(7), 920. doi: 10.3390/polym17070920
Lin, J., Jiao, G., & Kermanshahi-pour, A. (2022). Algal polysaccharides-based hydrogels: Extraction, synthesis, characterization, and applications. *Marine Drugs*, 20(5), 306. doi: 10.3390/md20050306
Liu, H., Hu, Y., Liu, Y., Hu, R., Wu, X., & Li, B. (2023). A review of recent advances in biomedical applications of smart cellulose-based hydrogels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253(Pt6), 127149. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.127149
Lu, P., Ruan, D., Huang, M., Tian, M., Zhu, K., Gan, Z., & Xiao, Z. (2024). Harnessing the potential of hydrogels for advanced therapeutic applications: Current achievements and future directions. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 9(1), 166. doi: 10.1038/s41392-024-01852-x
Magalhães, S., Fernandes, C., Pedrosa, J.F.S., Alves, L., Medronho, B., Ferreira, P.J.T., & Rasteiro, M.G. (2023). Eco-friendly methods for extraction and modification of cellulose: An overview. *Polymers*, 15(14), 3138. doi: 10.3390/polym15143138
Maiz-Fernández, S., Pérez-Álvarez, L., Ruiz-Rubio, L., Vilas-Vilela, J.L., & Lanceros-Mendez, S. (2020). Polysaccharide-based in situ self-healing hydrogels for tissue engineering applications. *Polymers*, 12(10), 2261. doi: 10.3390/polym12102261
Makarova, A.O., Derkach, S.R., Khair, T., Kazantseva, M.A., Zuev, Y.F., & Zueva, O.S. (2023). Ion-induced polysaccharide gelation: Peculiarities of alginate egg-box association with different divalent cations. *Polymers*, 15(5), 1243. doi: 10.3390/polym15051243
Maldonado, N., & Amo-Ochoa, P. (2021). Advances and novel perspectives on colloids, hydrogels, and aerogels based on coordination bonds with biological interest ligands. *Nanomaterials*, 11(7), 1865. doi: 10.3390/nano11071865
Dhalsamant, K., Dalai, A., Pattnaik, F., & Acharya, B. (2025). Biodegradable carbohydrate-based films for packaging agricultural products—A review. *Polymers (Basel)*, *17*(10), 1325. doi: 10.3390/polym17101325
Dharmapriya, T.N., Shih, H.Y., & Huang, P.J. (2022). Facile synthesis of hydrogel-based ion-exchange resins for nitrite/nitrate removal and studies of adsorption behavior. *Polymers*, 14(7), 1442. doi: 10.3390/polym14071442
Dohendou, M., Pakzad, K., Nezafat, Z., Nasrollahzadeh, M., & Dekamin, M.G. (2021). Progresses in chitin, chitosan, starch, cellulose, pectin, alginate, gelatin and gum based (nano)catalysts for the Heck coupling reactions: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 192, 771–819. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.09.162
Dowbysz, A., Samsonowicz, M., & Kukfisz, B. (2022). Recent advances in bio-based additive flame retardants for thermosetting resins. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(8), 4828. doi: 10.3390/ijerph19084828
El-Bourachdi, S., El-Amri, A., Ayub, A.R., Moussaoui, F., & Lahkimi, A. (2025). Development of a novel low-cost adsorbent Chitosan@EDTA@Cellulose composite to effectively remove Methyl Orange dye from wastewater: Experimental and theoretical investigation. International Journal of Biological Macromolecules, 305(1), 141030. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.141030.
El-Sherbiny, I. M., & Yacoub, M.H. (2013). Hydrogel scaffolds for tissue engineering: Progress and challenges. *Global Cardiology Science and Practice*, 2013(3), 316–342. doi: 10.5339/gcsp.2013.38
Fancy, D.A., & Kodadek, T. (1999). Chemistry for the analysis of protein-protein interactions: Rapid and efficient cross-linking triggered by long wavelength light. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(11), 6020–6024. doi: 10.1073/pnas.96.11.6020
Ghiorghita, C.A., Dinu, M.V., Lazar, M.M., & Dragan, E.S. (2022). Polysaccharide-based composite hydrogels as sustainable materials for removal of pollutants from wastewater. *Molecules*, *27*(23), 8574. doi: 10.3390/molecules27238574
Goel, A., Masurkar, S., & Pathade, G.R. (2024). An overview of digital transformation and environmental sustainability: Threats, opportunities, and solutions. *Sustainability*, *16*(24), 11079. doi: 10.3390/su162411079
Grant, G.T., Morris, E.R., Rees, D.A., Smith, P.J., & Thom, D. (1973). Biological interactions between polysaccharides and divalent cations: The egg-box model. *FEBS Letters*, 32(1), 195–198. doi: 10.1016/0014-5793(73)80770-7
Gulcin, İ., & Alwasel, S.H. (2022). Metal ions, metal chelators and metal chelating assay as antioxidant method. *Processes*, 10(1), 132. doi: 10.3390/pr10010132
Ho, T. C., Chang, C. C., Chan, H. P., Chung, T. W., Shu, C. W., Chuang, K. P., Duh, T. H., Yang, M. H., & Tyan, Y. C. (2022). Hydrogels: Properties and applications in biomedicine. *Molecules*, 27 (9), 2902. doi: 10.3390/molecules27092902
Hosseini, E., Andwari, A.M., Wahid, M.A., & Bagheri, G. (2013). A review on green energy potentials in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 533–545. doi: 10.1016/j.rser.2013.07.015
Huang, J., Huang, Z., Xiong, J., Xia, J., Wang, Y., Yang, L., & Liang, Y. (2023). 3D bioprinted scaffolds of polysaccharide hydrogels in osteochondral and cartilage tissue engineering. *Designed Monomers and*

Pak, A., & Farajzadeh, M. (2007). Iran's Integrated Coastal Management plan: Persian Gulf, Oman Sea, and southern Caspian Sea coastlines. *Ocean & Coastal Management*, 50(9–10), 754–773. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2007.03.006

Peera, S.G., & Byun, M. (2025). Engineering gel-based precursors into advanced ORR catalysts for Zn–air batteries and fuel cells: Insights into hydrogels, aerogels, xerogels, metal–organic gels, and metal aerogels. *Gels*, 11(7), 479. doi: 10.3390/gels11070479

Pellá, M.C.G., Lima-Tenório, M.K., Tenório-Neto, E.T., Guilherme, M.R., Muniz, E.C., & Rubira, A.F. (2018). Chitosan-based hydrogels: From preparation to biomedical applications. *Carbohydrate Polymers*, 196, 233–245. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.05.033

Pérez-Pacheco, Y., Tylkowski, B., & García-Valls, R. (2025). Chitosan micro/nanocapsules in action: Linking design, production, and therapeutic application. *Molecules*, 30(2), 252. doi: 10.3390/molecules30020252

Pytel, K., Filipek, R., Kalwar, A., Piaskowska-Silarska, M., Hudy, W., Depešová, J., & Kurdziel, F. (2025). Proactive maintenance and data-driven optimization of mineral lubricating oil in a gas engine cogeneration system extending oil change intervals for cost savings and a reduced environmental footprint. *Energies*, *18*(1), 154. doi: 10.3390/en18010154

Quazi, M.Z., & Park, N. (2022). Nanohydrogels: Advanced polymeric nanomaterials in the era of nanotechnology for robust functionalization and cumulative applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(4), 1943. doi: 10.3390/ijms23041943

Rahman, M.L., Fui, C.J., Ting, T.X., Sarjadi, M.S., Arshad, S.E., & Musta, B. (2020). Polymer Ligands Derived from Jute Fiber for Heavy Metal Removal from Electroplating Wastewater. Polymers, 12(11), 2521. doi: 10.3390/polym12112521

Rajiman, V., Abdul Halim, H.N., Shariff, A.M., Shahid, M.Z., Maulud, A.S., Lau, K.K., & Tan, L.S. (2022). CO_2 absorption from biogas using piperazine-promoted 2-amino-2-methyl-1-propanol: Process performance in a packed column. *Sustainability*, 14(12), 7095. doi: 10.3390/su14127095

Ramakrishnan, R.K., Padil, V.V.T., Wacławek, S., Černík, M., & Varma, R.S. (2021). Eco-friendly and economic, adsorptive removal of cationic and anionic dyes by bio-based karaya gum—Chitosan sponge. *Polymers*, 13(2), 251. doi: 10.3390/polym13020251

Ramírez, O., Lopéz-Frances, A., Baldoví, H. G., Saldías, C., Navalón, S., Leiva, A., & Díaz, D.D. (2024). Hydrogel composites based on chitosan and CuAuTiO2 photocatalysts for hydrogen production under simulated sunlight irradiation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 273(Pt 2), 132898. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.132898

Rashid, S.S., Harun, S.N., Hanafiah, M.M., Razman, K.K., Liu, Y.Q., & Tholibon, D.A. (2023). Life cycle assessment and its application in wastewater treatment: A brief overview. *Processes*, *11*(1), 208. doi: 10.3390/pr11010208

Rauseo, J., Spataro, F., & Patrolecco, L. (2025). Persistent and emerging organic contaminants in natural environments. *Water*, 17(3), 436. doi: 10.3390/w17030436

Rehman, T.U., Shah, A., Khattak, S., Khan, A., Rehman, N., & Alam, S. (2021). Superabsorbent Hydrogels for Heavy Metal Removal. IntechOpen, 1, 1-32. doi: 10.5772/intechopen.89350

Revete, A., Aparicio, A., Cisterna, B. A., Revete, J., Luis, L., Ibarra, E., Segura González, E.A., Molino, J., & Manzoor, A., Dar, A.H., Pandey, V.K., Shams, R., Khan, S., Panesar, P.S., Kennedy, J.F., Fayaz, U., & Khan, S.A. (2022). Recent insights into polysaccharide-based hydrogels and their potential applications in food sector: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 213, 987–1006. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.06.044

Martínez-Sabando, J., Coin, F., Melillo, J. H., Goyanes, S., & Cerveny, S. (2023). A review of pectin-based material for applications in water treatment. *Materials*, 16(6), 2207. doi: 10.3390/ma16062207

Masinga, P., Simbanegavi, T. T., Makuvara, Z., Marumure, J., Chaukura, N., & Gwenzi, W. (2024). Emerging organic contaminants in the soil-plant-receptor continuum: Transport, fate, health risks, and removal mechanisms. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(4), 367. doi: 10.1007/s10661-023-12282-7

McNamara, J.T., Morgan, J.L., & Zimmer, J. (2015). A molecular description of cellulose biosynthesis. *Annual Review of Biochemistry*, 84, 895–921. doi: 10.1146/annurev-biochem-060614-033930

Mone, M., Lambropoulou, D.A., Bikiaris, D.N., & Kyzas, G.Z. (2020). Chitosan grafted with biobased 5-hydroxymethyl-furfural as adsorbent for copper and cadmium ions removal. *Polymers*, 12(5), 1173. doi: 10.3390/polym12051173

Morante-Carballo, F., Montalván-Burbano, N., Quiñonez-Barzola, X., Jaya-Montalvo, M., & Carrión-Mero, P. (2022). What do we know about water scarcity in semi-arid zones? A global analysis and research trends. *Water*, 14(17), 2685. doi: 10.3390/w14172685

Murphy, E.J., Fehrenbach, G. W., Abidin, I.Z., Buckley, C., Montgomery, T., Pogue, R., Murray, P., Major, I., & Rezoagli, E. (2023). Polysaccharides—Naturally occurring immune modulators. *Polymers*, 15(10), 2373. doi: 10.3390/polym15102373

Nath, J., Sharma, K., Sehgal, R., & Kumar, S. (2024). Polysaccharide-based superabsorbent hydrogels. In V. K. Thakur & M. K. Thakur (Eds.), *Polysaccharides-Based Hydrogels*. Elsevier. pp. 265–305. doi: 10.1016/B978-0-323-99341-8.00009-0

NCBI. (2025). National Center for Biotechnology Information. (2025). *PubChem Compound Summary for CID 311, Citric Acid*. Retrieved June 28, 2025, from https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Citric-Acid

Nikpey, S., Rahimibadr, B., Nozari, N., & Rezaei, S. (2025). The effect of water scarcity on Iran's food security. *Brazilian Journal of Biology*, 85, e291705. doi: 10.1590/1519-6984.291705

Ojo, A.O. (2023). An overview of lignocellulose and its biotechnological importance in high-value product production. *Fermentation*, 9(11), 990. doi: 10.3390/fermentation9110990

Ojstršek, A., & Gorgieva, S. (2024). Cellulose nanofibrils-reinforced pectin membranes for the adsorption of cationic dyes from a model solution. *Polymers*, 16(6), 724-734. doi: 10.3390/polym16060724

Omotoso, A.B., & Omotayo, A.O. (2024). The interplay between agriculture, greenhouse gases, and climate change in Sub-Saharan Africa. *Regional Environmental Change*, 24(1), 101592. doi: 10.1007/s10113-023-02159-3

Otálora, A., Lerma, T.A., Arrieta Urango, Y.A., & Palencia, M. (2021). Emerging organic pollutants in aqueous environments: Detection, monitoring, and removal techniques. *Journal of Science with Technological Applications*, 10(68), 92–153. doi: 10.34294/j.jsta.21.10.68

Wu, T., Sawut, A., & Simayi, R. (2025). Preparation and heavy metal adsorption performance of 2-aminopyridine-modified sodium alginate/polyacrylic acid hydrogel. *Gels*, *11*(4), 224. doi: 10.3390/gels11040224

Yan, D., Li, Y., Liu, Y., Li, N., Zhang, X., & Yan, C. (2021). Antimicrobial properties of chitosan and chitosan derivatives in the treatment of enteric infections. *Molecules*, 26 (23), 7136. doi: 10.3390/molecules26237136

Yammine, P., El Safadi, A., Kassab, R., El-Nakat, H., Obeid, P.J., Nasr, Z., Tannous, T., Sari-Chmayssem, N., Mansour, A., & Chmayssem, A. (2025). Types of crosslinkers and their applications in biomaterials and biomembranes. *Chemistry*, 7(2), 61-75. doi: 10.3390/chemistry7020061

Yang, S. Y., Bai, B.C., & Kim, Y.R. (2024). Effective surface structure changes and characteristics of activated carbon with the simple introduction of oxygen functional groups by using radiation energy. *Surfaces*, 7 (1), 12–25. doi: 10.3390/surfaces7010002

Yazid, N.S.M., Abdullah, N., Muhammad, N., & Peralta, H.M.M. (2018). Application of starch and starch-based products in food industry. *Journal of Science and Technology*, 10 (2), 3–22. doi: 10.30880/jst.2018.10.02.023

Zhang, Q., Zhang, L., Wu, W., & Xiao, H. (2020). Methods and applications of nanocellulose loaded with inorganic nanomaterials: A review. *Carbohydrate Polymers*, 229, 115454. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.115454

Zhang, X., Wang, X., Fan, W., Liu, Y., Wang, Q., & Weng, L. (2022). Fabrication, Property and Application of Calcium Alginate Fiber: A Review. Polymers (Basel), 14(15), 15-35. doi: 10.3390/polym14153227

Zhang, Y., Zhao, M., Cheng, Q., Wang, C., Li, H., Han, X., Fan, Z., Su, G., Pan, D., & Li, Z. (2021). Research progress of adsorption and removal of heavy metals by chitosan and its derivatives: A review. *Chemosphere*, 279, 130927. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130927

Zhao, C., Liu, G., Tan, Q., Gao, M., Chen, G., Huang, X., Xu, X., Li, L., Wang, J., Zhang, Y., Xu, D. (2023). Polysaccharide-based biopolymer hydrogels for heavy metal detection and adsorption. Journal of Advanced Research, 44, 53-70. doi: 10.1016/j.jare.2022.04.005

Zhao, D., & Shen, X. (2023). Preparation of chitosan-diatomite/calcium alginate composite hydrogel beads for the adsorption of Congo Red dye. *Water*, 15(12), 5-32. doi: 10.3390/w15122254

Zheng, W., Sun, C., & Bai, B. (2017). Molecular dynamics study on the effect of surface hydroxyl groups on three-phase wettability in oil-water-graphite systems. *Polymers*, 9(8), 370-385. doi: 10.3390/polym9080370

Zhou, G., Liu, C., Chu, L., Tang, Y., & Luo, S. (2016). Rapid and efficient treatment of wastewater with high-concentration heavy metals using a new type of hydrogel-based adsorption process. Bioresource Technology, 219, 451-457. doi: 10.1016/j.biortech.2016.07.038

Zhou, Y., Chen, K., Cheng, H., & Zhang, S. (2025). Recent advances in polysaccharide-based hydrogels for tumor immunotherapy. *Gels*, 11(3), 152-169. doi: 10.3390/gels11030152

Zhu, H., Chen, S., & Luo, Y. (2023). Adsorption mechanisms of hydrogels for heavy metal and organic dyes removal: A short review. Journal of Agriculture and Food Research, 12, 6-25. doi: 10.1016/j.jafr.2023.100552

Reginensi, D. (2022). Advancements in the use of hydrogels for regenerative medicine: Properties and biomedical applications. *International Journal of Biomaterials*, *2022*, 3606765. doi: 10.1155/2022/3606765

Ribeiro, M.M., Simoes, M., Vitorino, C., & Mascarenhas-Melo, F. (2025). Physical crosslinking of hydrogels: The potential of dynamic and reversible bonds in burn care. *Coordination Chemistry Reviews*, 542, 216868. doi: 10.1016/j.ccr.2025.216868

Saji, S., Hebden, A., Goswami, P., & Du, C. (2022). A brief review on the development of alginate extraction process and its sustainability. *Sustainability*, 14(9), 10-33. doi: 10.3390/su14095181

Sandu, T., Chiriac, A.-L., Zaharia, A., Iordache, T.V., & Sarbu, A. (2025). New trends in preparation and use of hydrogels for water treatment. *Gels*, 11(4), 238-247. doi: 10.3390/gels11040238

Sarraf, A., Verton, E., Addoun, N., Boual, Z., Ould El Hadj, M. D., El Alaoui-Talibi, Z., El Modafar, C., Abdelkafi, S., Fendri, I., Delattre, C. (2021). Polysaccharides and derivatives from Africa to address and advance sustainable development and economic growth in the next decade. *Applied Sciences*, 11(11), 3-19. doi: 10.3390/app11115243

Sayed, M.M. (2023). Production of polymer hydrogel composites and their applications. *Journal of Polymers and the Environment*, *31*, 2855–2879. doi: 10.1007/s10924-023-02796-z

Seeberger, P.H. (2022). Monosaccharide diversity. Cold Spring Harbor Laboratory Press, NewYork, USA.

Sharma, G., Verma, A., García-Peñas, A., & Kumar, A. (2024). Polysaccharide-based biopolymeric magnetic hydrogels for remediation of antibiotics from aqueous solution. *International Journal of Biological Macromolecules*, 283, 2-25. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137555

Shen, L., & Patel, M.K. (2008). Life cycle assessment of polysaccharide materials: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, *16*(2), 154–167. doi: 10.1007/s10924-008-0092-9

Si, R., Pu, J., Luo, H., Wu, C., & Duan, G. (2022). Nanocellulose-based adsorbents for heavy metal ion. *Polymers*, 14(24), 3-18. doi: 10.3390/polym14245479

Stanciu, M.C., & Teacă, C.A. (2024). Natural polysaccharide-based hydrogels used for dye removal. *Gels*, 10(4), 243-254. doi: 10.3390/gels10040243

Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K., & Sutton, D.J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *Experientia Supplementum*, 101, 133–164. doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4_6

Thang, N.H., Chien, T.B., & Cuong, D. X. (2023). Polymer-based hydrogels applied in drug delivery: An overview. *Gels*, 9(7), 523-538. doi: 10.3390/gels9070523

Upadhyay, U., Sireesha, S., Gupta, S., & Sreedhar, I. (2022). Freeze v/s air-dried alginate-pectin gel beads modified with sodium dodecyl sulphate for enhanced removal of copper ions. *Carbohydrate Polymers*, 301, 3-26. doi: 10.1016/j.carbpol.2022.120294

Vasil'kov, A., Rubina, M., Naumkin, A., Buzin, M., Dorovatovskii, P., Peters, G., & Zubavichus, Y. (2021). Cellulose-based hydrogels and aerogels embedded with silver nanoparticles: Preparation and characterization. *Gels*, 7(3), 82-93. doi: 10.3390/gels7030082

Wang, Y., Shen, Z., Wang, H., Song, Z., Yu, D., Li, G., Liu, X., & Liu, W. (2025). Progress in research on metal ion crosslinking alginate-based gels. *Gels*, 11(1), 1-16. doi: 10.3390/gels11010016

پی‌نوشت‌ها

1. Adsorbents
2. Cross-linking agents
3. Egg-box model
4. Freeze-Thaw cycles
5. Tripolyphosphate
6. Swelling ratio
7. Mechanical stability
8. Adsorption kinetics
9. Functional groups
10. Complexation and Chelation
11. Ion exchange
12. Arsenate
13. Physical filtration
14. Catalytic degradation
15. Antimicrobial properties
16. Emerging organic contaminants
17. Bioaccumulation
18. π-π interactions
19. *Salmonella*
20. Quaternary Ammonium Groups
21. Eutrophication
22. Hydrophobic
23. Life Cycle Assessment

نشریه آب و توسعه پایدار، آذر ماه ۱۴۰۴
سال دوازدهم. شماره سوم (پیاپی ۳۷). صفحات ۲۰۶ تا ۲۱۵
آب و توسعه پایدار
Journal of Water and Sustainable Development. December 2025
Volume 12. Issue 3 (Serial No. 37). pages 206 to 215

یادداشت تحلیلی

ورشکستگی آبی و ناامنی غذایی: تحلیل چندلایه بحران امنیت آبی-غذایی ایران و راهبردهای گذار

علیرضا رادخواه[1]*، سهیل ایگدری[2]

۱ و ۲- به‌ترتیب دانش‌آموخته دکتری و دانشیار، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
رایانامه نویسنده مسئول: alirezaradkhah@ut.ac.ir

چکیده

بحران هم‌افزای کمبود آب و ناامنی غذایی در ایران به یک چالشی برای امنیت ملی پایدار تبدیل شده است. این یادداشت تحلیلی، با بهره‌گیری از رهیافتی چندلایه و با تلفیق داده‌های ثانویه، تاریخی و تحلیلی، به واکاوی ریشه‌های ساختاری این بحران می‌پردازد. یافته‌های تحلیل حاکی از آن است که بحران کنونی تنها پیامد خشکسالی اقلیمی نبوده، بلکه عمدتاً ریشه در تداوم یک پارادایم مدیریتی ناپایدار دارد. تخصیص بیش از ۹۰ درصد از منابع آب به بخش کشاورزی ناکارآمد، همراه با سیاست خودکفایی غذایی بدون توجه به محدودیت‌های بوم‌شناختی، کشور را به آستانه «ورشکستگی آبی» کشانده و امنیت غذایی آن را شکننده ساخته است. این شرایط، پیامدهای گسترده‌ای در ابعاد اجتماعی (مهاجرت‌های محیط‌زیستی، ناآرامی‌های اجتماعی)، اقتصادی (افزایش وابستگی به واردات غذایی) و ژئوپلیتیک (تنش در حوضه‌های آبی مشترک) به‌همراه داشته است. در نتیجه، عبور از این بُن‌بست مستلزم گذار ساختاری از مدیریت عرضه‌محور و سازه‌ای به سمت حکمرانی یکپارچه‌ی آب و غذا میباشد. در واقع، راهبری مؤثر بحران آب و غذا در ایران نیازمند یک رویکرد هماهنگ و ساختاری است که بر پایه پنج محور اصلی استوار است. این محورها شامل تحول در نظام حکمرانی برای مدیریت یکپارچه، بازتنظیم انگیزه‌های اقتصادی در جهت بهره‌وری بهینه، نوسازی گسترده و فناورانه زیرساخت‌ها، تقویت تاب‌آوری جوامع محلی و پیگیری دیپلماسی فعال آب در سطح فرامرزی می‌باشند. این چارچوب یکپارچه، مسیر عملی برای عبور از چالش‌های کنونی را ترسیم می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: امنیت غذایی، ورشکستگی آبی، پیوند آب و غذا، حکمرانی آب، راهبرد گذار

مقدمه

کشور ایران در برهه‌ای حساس قرار دارد که پایداری بلندمدت آن توسط بحران به‌هم‌پیوسته کمبود آب و ناامنی غذایی تهدید می‌شود. اظهارات مقامات ارشد از جمله ریاست قوه مجریه و وزارت نیرو در مورد جیره‌بندی احتمالی آب در تهران و چالش‌های پیش‌روی تأمین آب پایتخت، شدت حاد وضعیت را برجسته کرده است. این هشدارها نشانه‌هایی از وجود چالش‌های سیستماتیک در معماری امنیت آب ایران با پیامدهای مستقیم بر توانایی این کشور برای تغذیه جمعیت تقریباً ۹۴ میلیون نفری خود هستند (Nikpey و همکاران، ۲۰۲۵). در عصر حاضر، ایران وارد وضعیت کمبود مطلق آب شده است، به‌طوری‌که منابع آب تجدیدپذیر تنها در دو دهه بیش از یک سوم کاهش یافته است (رادخواه و همکاران، ۱۴۰۰). سازمان ملل متحد بحران آب را به عنوان سرانه کمتر از ۱۰۰۰ متر مکعب در سال تعریف می‌کند. انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۵، ایران تقریباً ۸۵۰ متر مکعب آب برای هر نفر داشته باشد که آن را قاطعانه در رده کمبود مطلق آب قرار می‌دهد (Boltuc، ۲۰۲۵). این یکی از سریع‌ترین روندهای کاهشیِ منابع آب در سطح جهان را نشان می‌دهد و بر ماهیت سیستماتیک این چالش تأکید می‌کند، چالشی که فراتر از شرایط خشکسالی موقت است و نشان‌دهنده کاستی‌های ساختاری عمیق‌تر در مدیریت آب است (Salami، ۲۰۲۲). ارتباط اساسی بین امنیت آب و امنیت غذایی، دغدغه اصلی این یادداشت تحلیلی را تشکیل می‌دهد. باتوجه‌به اینکه کشاورزی بیش از ۹۰ درصد از منابع آب ایران را مصرف می‌کند (رادخواه و همکاران، ۱۴۰۱)، عمدتاً از طریق روش‌های ناکارآمد آبیاری سیلابی، بحران آب مستقیماً به آسیب‌پذیری‌های تولید مواد غذایی تبدیل می‌شود (Nouri و همکاران، ۲۰۲۲). این مسئله یک حلقه بازخورد خطرناک ایجاد می‌کند: سیاست‌هایی که خودکفایی غذایی را ترویج می‌کنند، منجر به تحت فشار قرار گرفتن منابع آب می‌شوند (Radkhah و Eagderi، ۲۰۲۰؛ Radkhah و Eagderi، ۲۰۲۶a) که به نوبه خود، پایداری بلندمدت بخش کشاورزی را با چالش مواجه می‌کند و در نتیجه، اهداف

امنیت غذایی را که این سیاست‌ها برای دستیابی به آنها طراحی شده‌اند، تحت تأثیر قرار می‌دهد (Madani و همکاران، ۲۰۱۶؛ Nouri و Homaee، ۲۰۱۸).

این یادداشت به بررسی سیر تکامل تاریخی چالش‌های مدیریت آب در ایران، ارزیابی وضعیت فعلی پیوند امنیت آب و غذا، تجزیه و تحلیل ناکارآمدی‌های نهادی و سیاستی که بحران را تشدید کرده‌اند و بررسی پیامدهای گسترده‌تر اجتماعی-اقتصادی و ژئوپلیتیک[1] می‌پردازد. در نهایت، چارچوبی برای اصلاحات جامع پیشنهاد می‌کند که می‌تواند ایران را به سمت یک سیستم امنیت آب و غذا پایدارتر و مقاوم‌تر هدایت کند. این تحلیل، داده‌های سازمان‌های بین‌المللی، منابع داخلی، تحقیقات دانشگاهی و کارشناسان منطقه‌ای را با هم ترکیب می‌کند تا ارزیابی جامعی از یکی از مهمترین چالش‌های امنیتی پیش روی ایران امروز ارائه دهد.

زمینه تاریخی مدیریت آب ایران

بحران فعلی آب در ایران را نمی‌توان بدون بررسی مسیر تاریخی رویکردهای مدیریت آب آن درک کرد. ایران برای هزاران سال، پیشگام سیستم‌های پیشرفته مدیریت آب معروف به قنات یا کاریز بود - کانال‌های زیرزمینی که آب را از سفره‌های آب زیرزمینی در کوهپایه‌ها به سکونتگاه‌ها در دشت‌های خشک بدون تبخیر بیش از حد منتقل می‌کردند. این سیستم‌ها نشان‌دهنده سازگاری پایدار با آب و هوای عمدتاً خشک و نیمه‌خشک ایران بودند و تعادل بین نیازهای آبی انسان و ظرفیت‌های تغذیه طبیعی را برای قرن‌ها حفظ می‌کردند (Madani، ۲۰۱۴). تغییر اساسی در الگوی مدیریت آب ایران در نیمه دوم قرن بیستم آغاز شد. حرکت نوسازی پس از جنگ جهانی دوم، که در دهه‌های میانی قرن تشدید شد، بر پروژه‌های زیرساختی در مقیاس بزرگ متمرکز شد (Radkhah و Eagderi، ۲۰۲۶b). این روند در دهه‌های پس از انقلاب اسلامی، به ویژه در دوران بازسازی پس از جنگ ایران و عراق، تداوم یافت. در این دوره، اولویت‌های ملی بر بازسازی سریع و گسترش زیرساخت‌های اقتصادی متمرکز بود. در این بستر، اجرای پروژه‌های بزرگ عمرانی شتاب گرفت. روند فزاینده سدسازی، ایران را به یکی از پرکارترین سازندگان سد در جهان تبدیل کرد و از نظر تعداد سدهای ساخته شده در رتبه بالایی قرار گرفت (Saatsaz، ۲۰۲۰). این پروژه‌ها در دورانی اجرا شدند که ارزیابی اثرات محیط‌زیستی اغلب به اندازه ملاحظات فنی و توسعه‌ای مورد توجه نبود. یک نمونه قابل توجه، سد گتوند بر روی رودخانه کارون است که در سال ۱۳۹۰ با وجود بحث‌های کارشناسی در مورد چالش‌های زمین‌شناسی محل، به بهره‌برداری رسید. پس از پُر شدن، مخزن با چالش شوری آب روبه‌رو شد که پیامدهای آن در سال‌های بعد ادامه یافته است. چنین پروژه‌هایی نشان دادند که چگونه اولویت‌های توسعه‌ای گاهی می‌توانند بر ملاحظات پایداری محیط‌زیستی غلبه کنند (شریف و سعید، ۱۴۰۰؛ رادخواه و همکاران، ۱۴۰۱؛ رادخواه و ایگدری، ۱۴۰۲).

در جدول (۱) سیر تکامل پارادایم‌های مدیریت آب در ایران نشان داده شده است. بررسی سیر تکامل پارادایم‌های مدیریت آب در ایران نشان‌دهنده گذاری تدریجی از یک سیستم پایدار و سازگار با محیط‌زیست به سوی الگویی مبتنی بر توسعه فیزیکی و با حساسیت کمتر به محدودیت‌های بوم‌شناختی است. در دوره باستان، سیستم‌های قنات با مدیریت محلی و دانش بومی، تعادل پایدار بین برداشت و تغذیه منابع آب زیرزمینی را حفظ می‌کردند. با شروع دوره مدرنیزاسیون و تشدید آن در دهه‌های پس از انقلاب، تمرکز بر ساخت سازه‌های بزرگ مهندسی مانند سدها و حفر چاه‌های عمیق، بدون توجه کافی به ظرفیت تجدیدپذیری منابع آبی، منجر به تشدید برداشت از ذخایر استراتژیک آب شده است. این روند، کشور را با بحران ورشکستگی آبی[2]، خشکی تالاب‌ها، فرونشست زمین و تهدید امنیت غذایی مواجه ساخته است. خروج از این بحران نیازمند تغییر اساسی در پارادایم حکمرانی آب - از مدیریت سازه‌محور و عرضه‌گرا به سوی مدیریت یکپارچه، مشارکتی و مبتنی بر تقاضا - همراه با اصلاح الگوی کشت و احیای اکوسیستم‌های آبی است.

به موازات کارزار سدسازی، ایران در دهه‌های گذشته سیاست تهاجمی خودکفایی غذایی را دنبال کرد. این سیاست منجر به گسترش کشاورزی آبی در برخی از مناطق خشک ایران شد که با حمایت‌های دولتی همراه بود. همچنین، در سال‌های اخیر، بحران آب‌های زیرزمینی نیز از جمله معضلات مهم در کشور به‌شمار می‌رود که ریشه در عوامل مختلفی دارد. عوامل کلیدی برای پایداری آب‌های زیرزمینی شامل اثرات خشکسالی و تغییرات اقلیمی است (Safdari و همکاران، ۲۰۲۲). این بحران به طور ویژه در ایران به وضعیت حادی رسیده است، تاجایی که پژوهشگرانی از قبیل Salehi و Bijani (۲۰۲۳) اعلام داشتند که ۷۰ درصد از آب‌های زیرزمینی بیش از حد استخراج می‌شود و ۴۰۴ مورد از ۶۰۹ سفره آب زیرزمینی به دلیل تخلیه بحرانی به‌عنوان «ممنوعه» طبقه‌بندی می‌شوند.

وضعیت فعلی کمبود آب

ایران در حال حاضر ششمین سال متوالی خشکسالی خود را تجربه می‌کند، به‌طوری‌که سال آبی گذشته در میان خشک‌ترین سال‌های ثبت شده قرار دارد. سال آبی جاری حتی شدیدتر نیز خواهد بود، به‌طوری‌که ایران تا اواسط آبان ۱۴۰۴ تنها ۲/۳ میلی‌متر بارندگی داشته است که کاهش قابل توجه ۸۱ درصدی در مقایسه با میانگین تاریخی برای مدت مشابه داشته است (امینی، ۱۴۰۴). این دوره خشکسالی طولانی، زیرساخت‌های آبی ایران را تحت فشار شدید قرار داده و عمق آسیب‌پذیری در سیستم امنیت آبی کشور را آشکار کرده است (Chaparinia و همکاران، ۲۰۲۵).

جدول ۱- سیر تکامل پارادایم‌های مدیریت آب در ایران (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۴۰۳)

دوره تاریخی	پارادایم مسلط	ویژگی‌های کلیدی	تأثیر بر پایداری
دوره باستان تا آغاز مدرنیزاسیون	سیستم‌های سنتی مبتنی بر قنات	مدیریت مبتنی بر دانش بومی و مشارکت محلی؛ استفاده از قنات و کاریز؛ سازگاری با ظرفیت محدود منابع آب	تعادل پایدار بین برداشت و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی
دوره پهلوی (به ویژه از دهه ۱۳۲۰ به بعد)	گذار به پارادایم مهندسی و توسعه محور	آغاز برنامه‌ریزی متمرکز ملی؛ ساخت سدهای مدرن؛ حفر چاه‌های عمیق؛ تضعیف نظام‌های محلی میرآبی؛ اولویت توسعه فیزیکی بر پایداری	آغاز تخلیه تدریجی منابع آب؛ بنیان‌گذاری بحران مدرن آب
دهه‌های ۱۳۴۰ و ۱۳۵۰	شتاب در توسعه زیرساخت و بهره‌برداری استخراجی	اجرای پروژه‌های بزرگ سدسازی؛ گسترش چاه‌های عمیق؛ تأثیرپذیری از درآمدهای نفتی و اصلاحات ارضی؛ اولویت مطلق افزایش عرضه آب	تشدید فشار بر منابع آب زیرزمینی و سطحی؛ تثبیت الگوی ناپایدار بهره‌برداری
دوران پس از انقلاب اسلامی	تداوم توسعه زیرساختی و ظهور چالش‌های حاد	رشد چشمگیر سدسازی (از ۱۹ به ۴۲۸ سد)؛ گسترش کشاورزی ناپایدار؛ تشدید برداشت از منابع زیرزمینی و ظهور پدیده ورشکستگی آبی	ورود به مرحله بحران ملی و امنیتی؛ بروز ورشکستگی آبی در بسیاری از حوضه‌ها
دوره معاصر (سال‌های اخیر)	بحران و ورشکستگی آبی	کاهش شدید منابع آب تجدیدپذیر؛ فرونشست زمین در دشت‌های کلیدی؛ خشک شدن دریاچه‌ها و تالاب‌ها؛ بی‌اثر بودن راهکارهای فنی-سازه‌ای صرف	تخلیه سرمایه طبیعی؛ وضعیت بحرانی که نیازمند تغییر پارادایم حکمرانی است

بحران آب‌های سطحی به وضوح در وضعیت زیرساخت‌های سدسازی ایران نشان داده شده است، به‌طوری‌که سدها با چالش جدی مواجه هستند و با کمتر از ۵ درصد ظرفیت خود پُر شده‌اند. بر طبق گزارش زارع (۱۴۰۴) و همچنین، بررسی تصاویرماهواره‌ای توسط Michel و همکاران (۲۰۲۵)، پنج سد اصلی که شهر تهران را تغذیه می‌کنند (شامل سدهای لار، لتیان، کرج، طالقان و ماملو) در سطوح بسیار پایینی قرار دارند و کمتر از ۳۰ تا ۴۰ درصد از ظرفیت خود آب دارند. این کاهش آب‌های سطحی نه تنها برای تأمین آب آشامیدنی، بلکه برای آبیاری کشاورزی و تولید برق آبی نیز پیامدهای قابل توجهی دارد (Michel و همکاران، ۲۰۲۵). وضعیت آب‌های زیرزمینی نیز به اندازه آب‌های سطحی نگران کننده است. ایران تقریباً یک میلیون چاه دارد که نیمی از آنها غیرقانونی هستند و پمپاژ بیش از حد، سفره‌های آب زیرزمینی به ویژه در فلات مرکزی، منطقه تهران، دریاچه نمک و حوضه‌های کویر مرکزی را به شدت تخلیه کرده است (زارع، ۱۴۰۱). تا مرداد ۱۳۹۸، دفتر حفاظت و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی وابسته به شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۴۰۵ دشت ممنوعه در کشور اعلام کردند که به دلیل استخراج بیش از حد آب و حفر چاه‌های جدید در وضعیت ممنوعه قرار گرفته بودند. داده‌های به‌روز شده نشان می‌دهد که تا اواخر سال ۱۴۰۳، ۴۲۲ دشت محدود یا بحرانی وجود دارد که ۳۵۹ مورد از آنها دچار فرونشست زمین یا کاهش شدید آب‌های زیرزمینی هستند. فرونشست زمین در اطراف تهران - که حداقل ۲۵ درصد از جمعیت ایران را در خود جای داده است- می‌تواند ظرف چند سال به یک متر برسد و ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها را تهدید کند و در عین حال ظرفیت سفره‌های آب زیرزمینی را به‌طور دائم کاهش دهد (Safdari و همکاران، ۲۰۲۲؛ Nami و Naderi، ۲۰۲۴).

تحلیل شاخص‌های کلیدی بحران آب در ایران حاکی از وضعیت هشداردهنده‌ای است که امنیت آبی کشور را در معرض تهدید جدی قرار داده است. بر اساس داده‌های موجود (جدول ۲)، منابع آب تجدیدپذیر کشور با کاهش بیش از یک سوم نسبت به دهه‌های گذشته به حدود ۸۰ میلیارد مترمکعب رسیده و سرانه آب در دسترس هر ایرانی به ۸۵۰ مترمکعب کاهش یافته که پایین‌تر از آستانه کمبود مطلق آب تعریف شده توسط سازمان‌های بین‌المللی است. بر اساس شاخص فالکِن مارک[۳]، اگر میزان آب تجدیدپذیر در کشوری کمتر از ۱۷۰۰ متر مکعب به ازای هر نفر در سال باشد، گفته می‌شود که آن کشور دچار تنش آبی است؛ اگر کمتر از ۱۰۰۰ متر مکعب باشد، گفته می‌شود که دچار کمبود آب است و اگر کمتر از ۵۰۰ متر مکعب باشد، کمبود مطلق آب را تجربه می‌کند (Falkenmark و همکاران، ۱۹۸۹). باتوجه‌به این نکات، ایران در وضعیت کمبود آب قرار دارد. البته، لازم به ذکر است بحران کمبود آب در کشور در وضعیت مخازن سدها به وضوح نمایان است، به‌طوری‌که ۱۹ سد بزرگ کشور کمتر از ۵ درصد ظرفیت آب دارند و سدهای تأمین‌کننده آب پایتخت تنها حدود ۱۰ درصد پُر هستند. هم‌زمان، وضعیت آب‌های زیرزمینی که به عنوان ذخایر استراتژیک محسوب می‌شوند نیز بحرانی است، به‌طوری‌که ۴۲۲ دشت کشور در شرایط ممنوعه یا بحرانی

قرار دارند و پدیده فرونشست زمین بسیاری از مناطق را تهدید می‌کند (Noori و همکاران، ۲۰۲۳). این شاخص‌ها در مجموع نشان می‌دهند که ایران نه با یک چرخه خشکسالی موقت، بلکه با یک بحران ساختاری و سیستماتیک در مدیریت آب روبه‌رو است که حل آن نیازمند تغییرات بنیادین در حکمرانی آب، بازنگری در الگوی کشت و سرمایه‌گذاری فوری در زیرساخت‌های مدرن مدیریت آب است.

جدول ۲- شاخص‌های کلیدی بحران آب در ایران (سازمان هواشناسی ایران، ۱۴۰۴؛ شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۴۰۴)

شاخص	وضعیت کنونی	مقایسه با گذشته	اهمیت
منابع آب تجدیدپذیر	حدود ۸۰ میلیارد مترمکعب در سال	کاهش از میانگین ۱۲۸ میلیارد مترمکعب (۱۳۵۶-۱۳۸۰)	کاهش بیش از یک سوم منابع پایدار آب
سرانه آب در دسترس	حدود ۸۵۰ مترمکعب به ازای هر نفر	کاهش از ۴۵۰۰ مترمکعب در سال ۱۳۵۵ و ۲۰۰۰ مترمکعب در سال ۱۳۸۷	پایین‌تر از آستانه کمبود مطلق آب (۱۰۰۰ مترمکعب)
ظرفیت سدها	۱۹ سد با کمتر از ۵ درصد ظرفیت؛ سدهای اصلی تهران حدود ۱۰ درصد پُر	کاهش قابل توجه نسبت به سال‌های گذشته	تهدید جدی برای تأمین آب شُرب و کشاورزی
وضعیت آب‌های زیرزمینی	۴۲۲ دشت ممنوعه یا در شرایط بحرانی	تشدید سریع تخلیه از سال ۱۳۸۱	تهدید امنیت آبی بلندمدت؛ فرونشست زمین

توزیع جغرافیایی بحران آب، نابرابری‌های شدیدی را در مناطق مختلف نشان می‌دهد. در شرایطی که کل کشور با تنش آبی مواجه است، استان‌های حاشیه‌ای به طور نامتناسبی تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. این نابرابری تا حدودی ناشی از الگوهای تخصیص آب است که آب را از برخی مناطق به استان‌های مرکزی ایران برای جبران کسری آب آنها منتقل می‌کند. نابرابری‌های منطقه‌ای ناشی از آن، کمبود آب را از یک چالش فنی به منبعی از درگیری اجتماعی و تنش تبدیل کرده است. از نمونه‌های بارز این نابرابری‌های منطقه‌ای می‌توان به رودخانه زاینده رود در اصفهان اشاره کرد که زمانی منبع حیاتی این منطقه بود ولی در حال حاضر، به گِل‌زارهای فصلی تبدیل شده است (امینی و آذری، ۱۴۰۲).

تأثیر انسانی بحران آب در حال حاضر در سراسر جامعه ایران احساس می‌شود .میلیون‌ها نفر در تابستان ۱۴۰۳ قطع آب اعلام نشده را تجربه کرده‌اند و مقامات وزارت نیرو اعلام کرده‌اند که دولت به زودی جیره‌بندی آب را آغاز خواهد کرد و در صورت لزوم، احتمالاً آن را به طور کامل در شب در سراسر کشور قطع خواهد کرد. مقامات وزارت نیرو و شرکت آب و فاضلاب از شهروندان خواسته‌اند که مخازن ذخیره آب خریداری کنند و بار اقتصادی مدیریت بحران را بر دوش خانوارهایی که از قبل تحت تحریم‌های اقتصادی و تورم بالا دست و پنجه نرم می‌کنند، قرار دهند. این وضعیت نشان‌دهنده «ورشکستگی آب» است که در این حالت، تقاضا بسیار بیشتر از عرضه است و نشان‌دهنده چالش‌های سیستماتیک می‌باشد.

چالش نظام کشاورزی و امنیت غذایی

بخش کشاورزی ایران در نقطه تلاقی حیاتی بحران آب و غذا در کشور قرار دارد و حدود ۹۰ درصد از منابع آب کشور را مصرف می‌کند (Gholami و همکاران، ۲۰۲۵)، درحالی‌که تنها حدود ۱۲ درصد به تولید ناخالص داخلی و ۱۴ درصد به اشتغال کمک می‌کند (Nouri و Homaee، ۲۰۱۸؛ Nouri و همکاران، ۲۰۲۲). این تخصیص نامتناسب آب، الگوهای عمیقاً ناکارآمد استفاده از منابع را منعکس می‌کند که هم امنیت آب و هم پایداری کشاورزی بلندمدت را تضعیف کرده است. شدت مصرف آب در این بخش به طور قابل توجهی بالاتر از میانگین جهانی ۷۰ درصد مصرف آب کشاورزی است که نشان‌دهنده عدم تعادل ساختاری شدید در اولویت‌های تخصیص آب ایران است (Nouri و همکاران، ۲۰۲۳).

الگوهای انتخاب محصول در کشاورزی ایران به طور قابل توجهی کمبود آب را تشدید می‌کند. محصولات پرمصرف آب مانند گندم، یونجه، برنج و هندوانه بر تولیدات کشاورزی غالب هستند و اغلب در مناطق خشک کشت می‌شوند که اساساً برای چنین گیاهان آب‌بری مناسب نیستند. این انتخاب مشکل‌ساز محصول ناشی از سیاست دیرینه خودکفایی غذایی ایران است، با قانونی که الزام می‌کند ۸۵ درصد از غذای داخلی به صورت محلی تولید شود (سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ۱۴۰۴). اگرچه از نظر سیاسی جذاب است، اما باتوجهبه منابع آب و ظرفیت‌های محدود خاک ایران، این سیاست از نظر محیط‌زیستی با چالش و از نظر اقتصادی ناکارآمد بوده است. تقریباً ۳۰ درصد از محصولات کشاورزی به دلیل زیرساخت‌های ناکافی، شیوه‌های آبیاری قدیمی و انتخاب نادرست محصول هدر می‌رود و این امر بازگشت سرمایه در زمینه آب را بیش از پیش کاهش می‌دهد (Karandish، ۲۰۲۱).

کمبود راندمان آبیاری، بُعد مهم دیگری از بحران آب کشاورزی را نشان می‌دهد. کشاورزی ایران عمدتاً به

روش‌های آبیاری غرقابی متکی است که نرخ راندمان آنها تنها ۳۵ تا ۴۰ درصد است، به این معنی که بیشتر آب قبل از رسیدن به محصولات، به دلیل تبخیر یا رواناب از دست می‌رود (بُردبار و همکاران، ۱۳۸۸). شیوه‌های سنتی صرفه‌جویی در آب تا حد زیادی به نفع این روش‌های ناکارآمد کنار گذاشته شده‌اند که با حمایت‌های دولتی تقویت می‌شوند و انگیزه‌های نادرستی را برای استفاده بی‌رویه از آب به جای صرفه‌جویی ایجاد می‌کنند. ترکیب آبیاری ناکارآمد، انتخاب نامناسب محصول و انحرافات اقتصادی، سیستمی را ایجاد کرده است که منابع آب فوق‌العاده‌ای را مصرف می‌کند و در عین حال خروجی‌های کشاورزی غیربهینه ارائه می‌دهد (Firoozi و Firoozi، ۲۰۲۴).

پیامدهای امنیت غذایی این بحران آب در حال حاضر در بخش کشاورزی آشکار شده است. در دوره‌های خشکسالی شدید، مانند دو سال قبل، ایران شاهد کاهش تقریباً یک سومی تولید گندم بود و این کشور را مجبور به استفاده از ذخایر ارزشمند خارجی برای واردات بی‌سابقه محصولات کشاورزی کرد (Naderi و همکاران، ۲۰۲۴). این وابستگی به واردات برای غذاهای اصلی، نشان‌دهنده آسیب‌پذیری استراتژیک برای کشوری است که به استقلال اقتصادی، به‌ویژه تحت تحریم‌های بین‌المللی، اهمیت می‌دهد (Nouri و همکاران، ۲۰۲۳). بحران آب، مستقیماً هدف اساسی سیاست کشاورزی ایران - خودکفایی غذایی - را تضعیف می‌کند و چرخه‌ای معیوب ایجاد می‌کند که در آن، دستیابی به حاکمیت غذایی از طریق کشاورزی پرمصرف آب، در نهایت هم امنیت آب و هم ظرفیت تولید مواد غذایی را به خطر می‌اندازد (Naderi و همکاران، ۲۰۲۴).

تأثیر توزیع اجتماعی-اقتصادی در بخش کشاورزی، ابعاد بیشتری از بحران را آشکار می‌کند. کشاورزان خُرده‌پا، که فاقد منابع اقتصادی هستند، با تشدید کمبود آب با چالش‌های نامتناسبی روبه‌رو می‌شوند. بسیاری شاهد خشک شدن چاه‌های خود بوده‌اند یا شاهد بوده‌اند که حقابه آنها به عملیات کشاورزی و صنعتی اختصاص داده شده است. در نتیجه، موجی از تخلیه جمعیت روستایی به‌وجود آمده است، به‌طوری‌که میلیون‌ها "مهاجر محیط‌زیستی" از مزارع خود به حاشیه شهرها رانده شده‌اند و سکونتگاه‌های غیررسمی گسترده‌ای را در اطراف شهرهای بزرگ تشکیل داده‌اند (پایلی یزدی و همکاران، ۱۳۹۶). این آوارگی داخلی نه تنها یک فاجعه انسانی، بلکه تهدیدی برای ثبات شهری نیز محسوب می‌شود، زیرا شهرها درحالی‌که دچار مدیریت بحران آب هستند، از سوی دیگر، در معرض هجوم جمعیت رانده شده از روستاها به حاشیه شهرها نیز می‌باشند (فال سلیمان و همکاران، ۱۳۹۳).

اقتصاد سیاسی مصرف آب کشاورزی، تلاش‌های اصلاحی را پیچیده‌تر می‌کند. این سیستم به نفع ذی‌نفعان قدرتمند، از جمله نهادهای بزرگ که عملیات کشاورزی در مقیاس بزرگ را کنترل می‌کنند و از تخصیص آب یارانه‌ای بهره‌مند می‌شوند، عمل می‌کند. تلاش‌ها برای اصلاح قیمت‌گذاری آب یا تخصیص مجدد منابع به دور از منافع ممتاز کشاورزی با مقاومت شدیدی روبه‌رو می‌شود و مانعی ساختاری برای مدیریت پایدار آب ایجاد می‌کند. این پویایی نشان می‌دهد که چگونه پیوند آب و غذا در الگوهای گسترده‌تر قدرت و امتیاز اقتصادی در ایران ریشه دوانده است و راه‌حل‌های فنی را بدون اصلاحات نهادی مربوطه ناکافی می‌کند (ملک‌حسینی و همکاران، ۱۴۰۳).

پیامدهای اجتماعی-اقتصادی و ژئوپلیتیک

بحران آب فراتر از نگرانی‌های محیط‌زیستی است و اثرات آبشاری را در سراسر جامعه ایران، اقتصاد و روابط منطقه‌ای ایجاد می‌کند. این تأثیرات چندبُعدی نشان می‌دهد که چگونه کمبود آب به‌عنوان یک عامل تشدیدکننده تهدید عمل می‌کند و موجب ایجاد چالش‌های جدید می‌شود (رادخواه و همکاران، ۱۴۰۴).

۱- پیامدهای اجتماعی-اقتصادی

پیامدهای اقتصادی کمبود آب، عمیق و چندوجهی هستند. کشاورزی که بخش مهمی از تولید ناخالص داخلی و اشتغال کشور را تشکیل می‌دهد، با کاهش دسترسی به آب، با تنش‌های اجتناب‌ناپذیر تولید مواجه است. کاهش عملکرد و آیش اجباری زمین‌های کشاورزی، تورم قیمت مواد غذایی داخلی را افزایش داده و نیازهای وارداتی را افزایش می‌دهد (Leflaive، ۲۰۲۴). بخش انرژی نیز با آسیب‌پذیری‌هایی روبه‌رو است، زیرا سطح پایین‌تر مخازن، خروجی برق آبی را کاهش می‌دهد و بر تأمین آب خنک‌کننده نیروگاه‌های حرارتی تأثیر می‌گذارد و خطرات خاموشی‌های پی در پی و کاهش تولید صنعتی را ایجاد می‌کند. این اختلالات موازی در سیستم‌های کشاورزی و انرژی، تهدیدی برای ایجاد یک بحران پیچیده است که می‌تواند فعالیت اقتصادی را به طور قابل توجهی محدود کند (Mongird و همکاران، ۲۰۲۳).

کمبود آب پیامدهای اجتماعیِ چشمگیری در پی دارد که از آن جمله می‌توان به تشدید نارضایتی‌های اجتماعی و فرسایش اعتماد عمومی اشاره کرد. کمبود آب پیش از این باعث ناآرامی‌های قابل توجهی در مناطقی مانند خوزستان، اصفهان و سیستان و بلوچستان شده است. هنگامی‌که نارسایی‌های خدمات با نارضایتی‌های قومی یا نابرابری‌های منطقه‌ای تلاقی پیدا می‌کند، نارضایتی‌های اجتماعی می‌تواند به سرعت گسترش یافته و تشدید شود (پایلی یزدی و همکاران، ۱۳۹۶). ناتوانی در تضمین خدمات آب قابل اعتماد، به ویژه در پایتخت، ناامیدی عمومی را در بین گروه‌های اجتماعی-اقتصادی افزایش می‌دهد و مشروعیت نهادها را تضعیف می‌کند. این فرسایش اعتماد، همکاری عمومی با اقدامات حفاظتی را کاهش می‌دهد و چرخه

معیوبی ایجاد می‌کند که در آن کاهش ظرفیت، واکنش مؤثر به بحران را بیشتر تضعیف می‌کند.

۲- پیامدهای ژئوپلیتیک

بحران آب در ایران ابعاد پیچیده ژئوپلیتیکی به خود گرفته و به عاملی تعیین‌کننده در روابط با همسایگان تبدیل شده است. این چالش در حوضه‌های آبی مشترک با کشورهای هم‌جوار به وضوح قابل مشاهده است. در مرز شرقی، کاهش جریان آب رودخانه هیرمند از سدهای کجکی و کمال‌خان افغانستان، حیات تالاب‌های هامون در استان سیستان و بلوچستان را با مخاطره جدی مواجه ساخته است. در غرب کشور، پروژه عظیم سدسازی گاپ ترکیه بر روی سیستم دجله و فرات، جریان آب ورودی به استان‌های غربی ایران را به طور محسوسی کاهش داده است. از سوی دیگر، احداث سد بر روی رودخانه‌های کرخه و کارون در ایران، موجب تغییر کیفیت آب در پایین‌دست این رودخانه‌ها در عراق شده است (Amiri، ۲۰۲۴؛ Torabi Haghighi و همکاران، ۲۰۲۳). این وابستگی متقابل منطقه‌ای، مدیریت اختلافات آبی را به مسئله‌ای پیچیده تبدیل کرده است. از یک سو، کمبود آب ممکن است موجب افزایش اصطکاک با کشورهای همسایه شود و از سوی دیگر، زمینه‌ساز تقویت دیپلماسی آب و همکاری فنی شود. بااینحال، اجرای راه‌حل‌های مشارکتی تحت تأثیر عوامل مختلفی با چالش مواجه است. امضای چارچوب‌های جدید مدیریت آب بین ترکیه و عراق بدون مشارکت ایران، نگرانی‌هایی را در مورد به حاشیه رانده شدن از سازوکارهای منطقه‌ای مدیریت آب ایجاد کرده است (Hamidi، ۲۰۲۰؛ Torabi Haghighi و همکاران، ۲۰۲۳).

ابعاد امنیتی بحران آب پیامدهای فرامرزی نیز در پی دارد. جابه‌جایی جمعیت ناشی از کمبود آب در استان‌های مرزی می‌تواند امنیت مرزها را تحت تأثیر قرار دهد، به‌ویژه در مناطقی که گروه‌های قومی مشترک در دو سوی مرز ساکن هستند. این پویایی، نیازمند توسعه رویکردهای هماهنگ دیپلماتیک و بشردوستانه است که در چارچوب روابط منطقه‌ای کنونی، هنوز به اندازه کافی توسعه نیافته است. همگرایی کمبود آب با تنش‌های قومی و شبکه‌های خویشاوندی فرامرزی، چشم‌انداز امنیتی پیچیده‌ای را ایجاد کرده که حل آن مستلزم اتخاذ رویکردهای نوآورانه در حکمرانی منطقه‌ای است (میرشکاران، ۱۳۹۹).

راهبردهای گذار

تحلیل حاضر نشان می‌دهد بحران آب و امنیت غذایی ایران ریشه در ساختارهای نهادی، اقتصادی و الگوهای حکمرانی ناپایدار دارد. بنابراین، راهکارهای خروج از این بحران نمی‌تواند صرفاً فنی یا مقطعی باشد، بلکه نیازمند یک برنامه گذار ساختاری است که همزمان به سطوح حاکمیتی، اقتصادی، اجتماعی و فناورانه می‌پردازد. راهبردهای پیشنهادی زیر، به‌صورت مستقیم از یافته‌های تحلیلی این مطالعه استخراج شده و در قالب پنج محور اصلی ارائه می‌شوند. این محورها که شامل تحول در نظام حکمرانی برای ایجاد مدیریت یکپارچه، بازتنظیم انگیزه‌های اقتصادی به سمت بهره‌وری بهینه، نوسازی گسترده و فناورانه زیرساخت‌ها، تقویت تاب‌آوری اجتماعی جوامع محلی و پیگیری دیپلماسی فعال آب برای همکاری‌های فرامرزی می‌باشند، در ادامه تشریح می‌شوند:

۱- تحول بنیادین در نظام حکمرانی آب و کشاورزی

هدف از این محور، ایجاد یک نظام حکمرانی یکپارچه، مشارکتی و پاسخگو برای آب و کشاورزی است تا با شکستن مدیریت بخشی و انحصاری، تصمیم‌گیری را بر اساس ظرفیت واقعی حوضه‌های آبی و امنیت غذایی پایدار ممکن سازد. برای تحقق این هدف، الزامات زیر ضروری می‌باشد:

الف) ادغام نهادی و ایجاد مرجعیت واحد

- تشکیل «وزارت آب، غذا و محیط‌زیست» یا «شورای عالی امنیت آب و غذا» زیر نظر مستقیم رئیس‌جمهور با اختیارات فرابخشی. این نهاد موظف خواهد بود تمامی سیاست‌های مرتبط با آب، کشاورزی، محیط‌زیست و امنیت غذایی را هماهنگ و یکپارچه کند.
- واگذاری مدیریت حوضه‌های آبی به «نهادهای محلی حوضه‌محور» متشکل از نمایندگان دولت، کشاورزان، دانشگاه‌ها و سازمان‌های مردم‌نهاد. این نهادها بر اساس حجم واقعی آب قابل تجدید در هر حوضه، حقابه‌ها را تعیین و توزیع خواهند کرد.

ب) بازتعریف امنیت غذایی و تغییر چارچوب سیاستی

- بازنگری قانونی در مفهوم «خودکفایی» و جایگزینی آن با «خوداتکایی راهبردی» و «امنیت غذایی پایدار». در این چارچوب جدید، تأمین بخشی از نیازهای اساسی (مانند گندم و علوفه) از طریق واردات هدفمند، با حفظ ذخایر راهبردی و در ازای صادرات محصولات با ارزش افزوده بالا و کم‌آب‌بر (مانند پسته، زعفران، گیاهان دارویی) مجاز شمرده می‌شود.
- تدوین و اجرای اجباری «الگوی کشت ملی مبتنی بر آب‌بها»: این الگو برای هر استان و حوضه آبی، بر اساس حجم آب قابل برنامه‌ریزی سالانه، نوع محصولات مجاز، سطح کشت و نوع سیستم آبیاری را مشخص می‌کند. کشت محصولات پُرمصرفی مانند برنج و هندوانه صرفاً در مناطق دارای حقابه مازاد و رطوبت بالا مجاز خواهد بود.

۲- تحول اقتصادی و ایجاد انگیزه‌های بازاربرای بهره‌وری

هدف محور دوم، تغییر انگیزه‌های اقتصادی از مصرف بیشتر به بهره‌وری بالاتر است تا از طریق اصلاح قیمت‌ها، ایجاد بازار آب و مکانیسم‌های مالی نوآور، رفتارهای بهینه در تخصیص و مصرف آب را در تمام بخش‌ها جاری کند. راهکارهای ضروری به‌منظور تحقق این هدفِ مهم می‌توانند شامل موارد زیر باشند:

الف) اصلاح تدریجی اما قاطع قیمت‌های آب و انرژی

- اجرای «تعرفه‌گذاری پلکانی و تفکیک شده» برای آب کشاورزی، صنعتی و شُرب. برای بخش کشاورزی، تعرفه برای سهمیه پایه (متناسب با الگوی کشت) یارانه‌ای و برای مصرف بالاتر از سهمیه، تصاعدی و واقعی خواهد بود.
- حذف تدریجی یارانه‌های پنهان برق چاه‌های کشاورزی و جایگزینی آن با «یارانه‌های هوشمند». به‌ازای هر کشاورز که سیستم آبیاری خود را به روش‌های با راندمان بالا ارتقا دهد یا به کشت کم‌آب‌بر تغییر دهد، یارانه نقدی یا اعتبار کم‌بهره پرداخت می‌شود.

ب) ایجاد و توسعه بازار آب و مکانیسم‌های مالی نوآورانه

- تدوین چارچوب قانونی برای «حقوق قابل انتقال آب». کشاورزان می‌توانند آب صرفه‌جویی شده ناشی از تغییر الگوی کشت یا ارتقای سیستم آبیاری را در قالب «حقابه» به بخش صنعت یا شُرب در همان حوضه بفروشند. این سازوکار انگیزه مالی قدرتمندی برای صرفه‌جویی ایجاد می‌کند.
- تأسیس «صندوق ملی احیای منابع آب زیرزمینی». منابع این صندوق از طریق مالیات بر صادرات محصولات پرمصرف آب، جریمه برداشت‌های غیرمجاز و جذب سرمایه‌گذاری سبز بین‌المللی تأمین شده و صرف پروژه‌های احیای دشت‌ها (مانند پخش سیلاب، تغذیه مصنوعی) و جبران خسارت به کشاورزان برای تغییر معیشت می‌شود.

۳- نوسازی زیرساخت‌ها و استفاده از فناوری‌های نوین

در محور سوم، هدف اصلی افزایش چشمگیر بهره‌وری فیزیکی آب در مزرعه و شبکه‌های توزیع از طریق نوسازی گسترده زیرساخت‌ها و به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند است. راهبردهای کلان برای رسیدن به این هدف عبارتند از:

الف) اجباری‌سازی و تسریع نوسازی سیستم‌های آبیاری

- اجرای «طرح ملی نوسازی آبیاری» با اولویت حوضه‌های بحرانی (مانند مرکزی، کارون). در این طرح، دولت تا ۷۰ درصد هزینه نصب سیستم‌های آبیاری تحت فشار (قطره‌ای و بارانی) را برای کشاورزان خرده‌پا تقبل می‌کند.
- نصب کنتورهای هوشمند بر روی تمامی چاه‌ها و نقاط برداشت آب و اتصال آن‌ها به یک شبکه ملی پایش آنلاین. هرگونه برداشت بیش از سهمیه، به‌طور خودکار موجب قطع برق یا آب و صدور قبض جریمه می‌شود.

ب) توسعه منابع آب غیرمتعارف

- سرمایه‌گذاری کلان در ایجاد تصفیه‌خانه‌های مدرن و شبکه‌های توزیع جداگانه برای آب خاکستری و بازیافتی. این آب‌ها می‌توانند برای آبیاری فضای سبز، کشت علوفه یا مصارف صنعتی مورد استفاده قرار گیرند (رادخواه و ایگدری، ۱۴۰۲؛ رادخواه و همکاران، ۱۴۰۳).
- تسهیل شرایط برای استفاده از فناوری‌های نمک‌زدایی با انرژی تجدیدپذیر در مناطق ساحلی جنوب، با اولویت تأمین آب شُرب و صنایع حیاتی، نه کشاورزی.

۴- مدیریت اجتماعی بحران و تاب‌آوری جوامع محلی

محور چهارم به‌دنبال کاهش آسیب‌پذیری جوامع محلی در برابر بحران آب و افزایش تاب‌آوری آن‌ها از طریق برنامه‌های حمایت اجتماعی و جلب مشارکت فعال است. راهبردهای کلان برای نیل به این هدف عبارتند از:

الف) برنامه حمایت اجتماعی و اشتغال جایگزین

- طراحی و اجرای «برنامه انتقال معیشت» برای کشاورزان در دشت‌های ممنوعه‌الخروج. این برنامه می‌تواند شامل آموزش برای مشاغل مرتبط با صنایع تبدیلی کشاورزی، اکوتوریسم، یا ارائه وام برای ایجاد واحدهای پرورش دام در محیط‌های کنترل‌شده باشد.
- بیمه فراگیر محصولات کشاورزی در برابر خشکسالی با حق بیمه بسیار پایین برای کشاورزانی که الگوی کشت ابلاغی را رعایت کرده‌اند.

ب) شفافیت اطلاعات و مشارکت عمومی

- ایجاد «سامانه شفافیت آب» که در آن داده‌های مربوط به حجم آب هر حوضه، سهمیه‌ها، میزان برداشت و تخلفات به‌طور عمومی و براساس منطقه قابل مشاهده باشد. این کار اعتماد عمومی را افزایش و فساد را کاهش می‌دهد.
- الزام به انجام «ارزیابی اجتماعی» برای هر پروژه بزرگ آبی (مانند سدها یا انتقال بین‌حوضه‌ای) و جلب رضایت آگاهانه جوامع محلی ذی‌نفع.

۵- دیپلماسی فعال آب و همکاری‌های فرامرزی

در محور پنجم، هدف اصلی تبدیل تهدیدهای ناشی از تنش‌های آبی فرامرزی به فرصت‌هایی برای همکاری‌های پایدار منطقه‌ای است. مهمترین راهبردهای کلان برای دستیابی به این هدف به شرح زیر می‌باشند:

الف) تغییر رویکرد از منازعه به تعامل

- تدوین «سند راهبردی دیپلماسی آب ایران» و انتصاب یک «فرستاده ویژه آب» در وزارت امور خارجه برای پیگیری مذاکرات فنی و حقوقی با همسایگان.

- حرکت به سمت «مدیریت مشترک حوضه‌های آبی مشترک» بر اساس اصل «حاکمیت مشترک، مسئولیت مشترک». پیشنهاد تشکیل «کمیسیون‌های مشترک فنی» با افغانستان (برای هیرمند) و عراق (برای اروند، کرخه) برای تبادل داده و مدیریت توافقی جریان‌های محیط‌زیستی.

ب) ایجاد زمینه‌های همکاری عملی

- پیشنهاد «طرح‌های پژوهشی و پایش مشترک» با کشورهای همسایه برای مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب مشترک، با استفاده از کمک‌های مالی سازمان‌های بین‌المللی بی‌طرف.
- تبدیل چالش آب به محرک صلح: پیشنهاد پروژه‌های مشترک تصفیه آب، مدیریت سیلاب یا توسعه اکوتوریسم در مناطق مرزی برای ایجاد اطمینان و منافع مشترک.

نتیجه‌گیری

بحران آب ایران نشان‌دهنده یک شکست سیستماتیک در مدیریت منابع است که به یک چالش چند بعدی امنیت ملی با پیامدهای شدید برای ثبات داخلی، امنیت غذایی و روابط منطقه‌ای تبدیل شده است. تحلیل ارائه شده در این یادداشت نشان می‌دهد این وضعیت فراتر از شرایط خشکسالی موقت است و منعکس‌کننده کاستی‌های ساختاری عمیق در مدیریت آب، سیاست‌های کشاورزی و نهادهای حاکمیتی است. تلاقی تحریم‌ها، چالش‌های مدیریتی و تنش‌های اقلیمی، وضعیتی اضطراری ایجاد کرده است که هم حاد و هم پایدار است و به جای اصلاحات فنی، نیازمند اصلاحات اساسی است. ارتباط عمیق بین امنیت آب و امنیت غذایی در قلب این چالش نهفته است. باتوجه‌به اینکه کشاورزی بیش از ۹۰ درصد از منابع آب ایران را از طریق روش‌های ناکارآمد مصرف می‌کند، سیستم تولید مواد غذایی این کشور اساساً ناپایدار است. سیاست‌های ترویج خودکفایی غذایی، به طرز شگفت‌انگیزی پایه‌های اکولوژیکی مورد نیاز برای تولید کشاورزی را تضعیف کرده و چرخه معیوبی از کاهش منابع و وابستگی فزاینده به واردات ایجاد کرده است. شکستن این چرخه نیازمند تغییر الگو از گسترش سمت عرضه به مدیریت تقاضا، از بهره‌برداری از آب به مدیریت منابع و از راه‌حل‌های فنی مجزا به اصلاحات سیستماتیک یکپارچه است. بر اساس تحلیل حاضر، به نظر می‌رسد مدیریت اثربخش بحران آب و غذا در ایران مستلزم یکپارچگی و هماهنگی تمامی اجزا در قالب یک طرح جامع است که بر اساس پنج رُکن اساسی طراحی می‌شود. این ارکان شامل تحول در ساختار حکمرانی برای دستیابی به مدیریت یکپارچه (با تأکید بر تغییر الگوی کشت به سمت محصولات مقاوم به خشکی و ترویج فناوری‌های نوین آبیاری)، بازآرایی انگیزه‌های اقتصادی در جهت بهره‌وری بیشتر، نوسازی فناورانه زیرساخت‌ها؛ تقویت تاب‌آوری اجتماعی در جوامع محلی، و پیگیری دیپلماسی آب در سطح بین‌المللی می‌شود. اجرای این رویکرد منسجم، گذار از بحران فعلی را ممکن ساخته و مسیر پیش‌رو را هموار می‌سازد.

منابع

امینی سعیده، آذری، نرگس. (۱۴۰۲). خشکی زاینده‌رود؛ بستر یک کنش جمعی. مجله مسائل اجتماعی ایران، ۱۴ (۲)، ۹-۴۲. doi:10.61186/jspi.14.2.9

امینی، هاشم. (۱۴۰۴). پایداری شبکه‌های آبرسانی در ششمین خشکسالی پیاپی/صنعت آب زیر فشار خشکسالی. گزارش مدیرعامل شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور. https://news.abfaazarbaijan.ir. ۸ آذرماه ۱۴۰۴.

بُردبار، مرضیه، سلوکی، میثم، بُردبار، بیتا. (۱۳۸۸). راهکارها و روش‌های کاربردی برای مصرف بهینه آب در بخش کشاورزی. همایش ملی مدیریت بحران آب. دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، شهر مرودشت، استان فارس، ایران.

پاپلی یزدی، محمد حسین، جمعه پور، محمود، مهدی زاده اردکانی، محمد. (۱۳۹۶). بررسی پیامدهای اجتماعی بحران کمبود منابع آب در مناطق کویری (مطالعه موردی: شهرستان اردکان). فصلنامه علوم اجتماعی، ۲۴(۷۷)، ۹۹-۱۳۶. doi: 10.22054/qjss.2017.7922

رادخواه، علیرضا، ایگدری، سهیل، صادقی‌نژاد ماسوله، اسماعیل. (۱۴۰۰). مروری بر فیلتراسیون غشایی و بررسی کارایی آن در بهبود کیفیت آب در سیستم‌های آبزی‌پروری مداربسته (RAS). فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۸(۳)، ۸۸-۸۱. doi: 10.22067/jwsd.v8i3.2105.1050

رادخواه، علیرضا، ایگدری، سهیل، صادقی‌نژاد ماسوله، اسماعیل. (۱۴۰۱). مروری بر فناوری‌های مورد استفاده جهت پالایش آب در سیستم‌های آبزی‌پروری با تأکید بر الگوی توسعه پایدار در ایران. فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۹(۳)، ۱۲۷-۱۴۰. doi: 10.22067/jwsd.v9i3.2205.1150

رادخواه، علیرضا، ایگدری، سهیل. (۱۴۰۲). کاربرد نانوذرات نقره (Ag-NPs) در میکروب‌زدایی آب در سیستم‌های پرورش آبزیان و اثرات ناشی از رهایش آن در محیط. فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۱۰(۲)، ۱۰۹-۱۲۶. doi: 10.22067/jwsd.v10i2.2301-1209

رادخواه، علیرضا، ایگدری، سهیل، آتش‌افرازه صدیقه. (۱۴۰۳). کارایی جاذب‌های مختلف در حذف فلزات سنگین از پساب‌های شهری (مطالعه مروری). فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۱۱(۴)، ۶۳-۸۲. doi: 10.22067/jwsd.v11i4.2407-1346

رادخـــواه، علیرضـــا، ایگـــدری، ســـهیل، پوربـــاقر، هـــادی، صـــادقی‌نـــژاد ماســـوله، اســـماعیل. (۱۴۰۴). کـــارایی فیلتراسیون شنی به‌عنوان یک رویکرد مبتنی بر طبیعت برای تصفیه آب. فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۱۲(۱)، ۶-۱۳. doi: 10.22067/jwsd.v12i1.2406-1336

زارع، مهدی. (۱۴۰۱). نگاهی به بحران آب‌های زیرزمینی ایران در زمســتان. (۱۴۰۱). شـاخه زمین‌شناسـی فرهنگسـتان علـــوم. فرهنگســـتان علـــوم. آدرس وبســـایت: https://www.ias.ac.ir. ۲۰ آبان‌ماه ۱۴۰۴.

زارع، مهدی. (۱۴۰۴). ۶۰۰ سد، یک سرزمینِ تشنه؛ پروژه‌ای که ایران را بی‌آب کرد/ پرند و پردیس؛ شهرهایی که قبل از ساخته‌شـــدن بـــی‌آب شـــدند. خبـــرآنلاین. https://www.khabaronline.ir. ۳۰ آذرماه ۱۴۰۴.

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. (۱۴۰۴). راهکار کـاهش مصـرف آب و بهبـود بهـره‌وری در هندوانـه. https://azargharbi.areeo.ac.ir. ۴ شهریورماه ۱۴۰۴.

سازمان هواشناسی ایران. (۱۴۰۴). میانگین بارندگی سالانه و پراکندگی اقلیمی. https://irimo.ir. ۱۵ آذر ۱۴۰۴.

شرکت مدیریت منابع آب ایران (۱۴۰۴). وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران. دفتر اطلاعات و داده های آب کشور. https://data.wrm.ir. ۱۴ آذر ۱۴۰۴.

شـریف، مرتضـی، حمـزه، سـعید. (۱۴۰۰). بررسـی تـأثیر سـد گتوند بر تغییرات شوری خاک و پوشش گیاهی اراضی پـایین دسـت سـد بـا اسـتفاده از تصـاویر مـاهواره ای و سنجه‌های طیفی. فصلنامه علوم محیطی، ۱۹(۴)، ۲۲۵-۲۴۸. doi: 10.52547/envs.2021.1014

فال سـلیمان، محمـود، میکـانیکی، جـواد، سـنجری، حسـین. (۱۳۹۳). بررسـی پیامـدهای اجتمـاعی خشکسـالی بـر نـواحی روسـتایی (مطالعـه مـوردی: بخـش شوسـف شهرسـتان نهبنـدان). مطالعـات فرهنگـی اجتمـاعی خراســـــــــان، ۸(۴)، ۱۲۷-۱۱۱. doi: 10.22034/fakh.2015.143789

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی. (۱۴۰۳). بررسی شـکل‌گیـری و عوامـل تشـدید مناقشـات آبـی. شـماره مسلســـــــل: ۲۰۰۷۶. کـــــد موضـــــوعی: ۲۵۰. https://report.mrc.ir/article_10405_76c073d8a82d9dda f993300be03ac70f.pdf. ۷ مهرماه ۱۴۰۳.

ملک‌حسـینی، بتـول، حلی‌سـاز، ارشـک، محمـدی کنگرانـی، حنانـه. (۱۴۰۳). آسیب‌شناسـی رابطـه عمـودی دولـت و ذی‌نفعـان در مـدیریت منـابع آب. مجلـس و راهبـرد، ۳۱(۱۱۹)، ۷۳-۱۰۴. doi: 10.22034/mr.2023.5539.5270

میرشـکاران، یحیـی. (۱۳۹۹). اثـر تغییـرات آب و هـوایی بـر پیامدهای امنیتی-انتظامی بحران منابع آب با تاکید بر هیدروپولیتیک مناطق مرزی. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۱(۲)، ۷۹-۹۸. doi: 10.30488/ccr.2020.111127

Amiri, Z. (2024). A Descriptive Look at the Geopolitical and Geo-Economic Status of the Kamal Khan Dam in Afghanistan. Kardan Journal of Social Sciences and Humanities, 7(2), 67-76. doi: 10.31841/KJSSH-7.1-2024-77

Boltuc, S. (2025). Water Scarcity in Iran: Strategic and Geopolitical Consequences. Special Eurasia. https://www.specialeurasia.com/2025/11/14/iran-water-scarcity-strategy/. 23 December 2025.

Chaparinia, F., Hadei, M., Yaghmaeian, K., Hadi, M., & Naddafi, K. (2025). Evaluation of climate indices related to water resources in Iran over the past 3 decades. Scientific Reports. 15(1), 11846. doi: 10.1038/s41598-025-95370-7

Falkenmark, M., Lundquist, J., & Widstrand C. (1989). Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches. Aspects of vulnerability in semi-arid development. Natural Resources Forum, 13(4), 258-267. doi: 10.1111/j.1477-8947.1989.tb00348.x

Firoozi, A. A., & Firoozi, A. A. (2024). Water erosion processes: Mechanisms, impact, and management strategies. Results in Engineering, 24, 103237. doi: 10.1016/j.rineng.2024.103237

Gholami, M., Heidary, B., Afkhami, M., & Kiani, M.A. (2025). Strategies for Enhancing Water Security in Iran's Agricultural Sector under Climate Change. Journal of Agricultural Science and Technology, 27(6), 1351-1369. doi: 10.48311/jast.2025.16835

Hamidi, M. (2020). The key role of water resources management in the Middle East dust events. Catena, 187, 104337. doi: 10.1016/j.catena.2019.104337

Karandish, F. (2021). Socioeconomic benefits of conserving Iran’s water resources through modifying agricultural practices and water management strategies. Ambio, 50, 1824–1840. doi: 10.1007/s13280-021-01534-w

Leflaive, X. (2024). The economics of water scarcity (Environment Working Paper No. 239). Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/05/the-economics-of-water-scarcity_06943700/81d1bc0a-en.pdf. 18 October 2024.

Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis? Journal of Environmental Studies and Sciences, 4, 315–328. doi: 10.1007/s13412-014-0182-z

Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran’s Socio-economic Drought: Challenges of a Water-Bankrupt Nation. Iranian Studies, 49(6), 997–1016. doi: 10.1080/00210862.2016.1259286

Michel, D., Todman, W., & Jun, J. (2025). Satellite Imagery Shows Tehran’s Accelerating Water Crisis. Center for Strategic and International Studies (CSIS). https://www.csis.org/analysis/satellite-imagery-shows-tehrans-accelerating-water-crisis. 26 November 2025.

Mongird, K., Rice, J. S., Oikonomou, K., & Homer, J. (2023). Energy-water interdependencies across the three major United States electric grids: A multi-sectoral analysis. Utilities Policy, 85, 101673. doi: 10.1016/j.jup.2023.101673

Naderi, L., Karamidehkordi, E., Badsar, M., & Moghadas, M. (2024). Impact of climate change on water crisis and conflicts: Farmers’ perceptions at the ZayandehRud Basin in Iran. Journal of Hydrology: Regional Studies, 54, 101878. doi: 10.1016/j.ejrh.2024.101878

Nami, M.H., Naderi, M. (2024). Assessments of land subsidence in the Tehran metropolitan using satellite radar interferometry technique. Disaster Prevention and Management Knowledge, 14(2), 138-157. doi: 10.32598/DMKP.14.2.866.1

Harms, D. Tecklin (Eds.), Springer International Publishing (2024), 533 p. ISBN: 9783031394072 (ebook). Biological Conservation, 313, 111597. doi: 10.1016/j.biocon.2025.111597

Saatsaz, M. (2020). A historical investigation on water resources management in Iran. Environment, Development and Sustainability, 22, 1749–1785. doi: 10.1007/s10668-018-00307-y

Safdari, Z., Nahavandchi, H., & Joodaki, G. (2022). Estimation of groundwater depletion in Iran's catchments using well data. Water, 14(1), 131-143. doi: 10.3390/w14010131

Salami, M. (2022). The water crisis and decline of legitimacy in Iran. TRENDS Research and Advisory. https://trendsresearch.org/insight/the-water-crisis-and-decline-of-legitimacy-in-iran/?srsltid=AfmBOopLssPg8neF-rlsLwfYCVTMON8lxJS_2ZLewgQF_QymPj-uTxAj. 23 October 2022.

Salehi S., & Bijani, M. (2023). Towards agricultural groundwater sustainability behaviour: Effects of place attachment. Water and Environment Journal, 37(2), 256-265. doi: 10.1111/wej.12833

Torabi Haghighi, A., Akbari, M., Noori, R., Danandeh Mehr, A., Gohari, A., Sönmez, M. E., Abou Zaki, N., Yilmaz, N., & Kløve, B. (2023). The impact of Turkey's water resources development on the flow regime of the Tigris River in Iraq. Journal of Hydrology: Regional Studies, 48, 101454. doi: 10.1016/j.ejrh.2023.101454

پی‌نوشت‌ها

1. Geopolitics
2. Water Bankruptcy
3. Falkenmark indicator

Nikpey, S., Rahimibadr, B., Nozari, N., & Rezaei, S. (2025). The effect of water scarcity on Iran's food security. Brazilian Journal of Biology, 85, e291705. doi: 10.1590/1519-6984.291705

Noori, R., Maghrebi, M., Jessen, S., Bateni, S.M., Heggy, E., Javadi, S., Noury, M., Pistre, S., Abolfathi, S., & AghaKouchak, A. (2023). Decline in Iran's groundwater recharge. Nature Communications. 14(1), 6674. doi: 10.1038/s41467-023-42411-2

Nouri, M., & Homaee, M. (2018). On modeling reference crop evapotranspiration under lack of reliable data over Iran. Journal of Hydrology, 566, 705-718. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.09.037

Nouri, M., Hoogenboom, G., Bannayan, M., & Homaee, M. (2022). CSM-CERES-wheat sensitivity to evapotranspiration modeling frameworks under a range of wind speeds. Water, 14(19), 3023. doi: 10.3390/w14193023

Nouri, M., Homaee, M., Pereira, L. S., & Bybordi, M. (2023). Water management dilemma in the agricultural sector of Iran: A review focusing on water governance. Agricultural Water Management, 288, 108480. doi: 10.1016/j.agwat.2023.108480

Radkhah, A.R., & Eagderi, S. (2020). Coral Reefs: Tourism, Conservation and Management, B. Prideaux, A. Pabel (Eds.), Routledge Publishing, Taylor & Francis Group (2018), (288 p. ISBN: 978-1-315-53732-0 (ebook)). Biological Conservation, 241, 108403. doi: 10.1016/j.biocon.2019.108403

Radkhah, A.R., & Eagderi, S. (2026a). Book Review: M. Acha, O. Iribarne, A. Piola. (Eds.), The Patagonian Shelfbreak Front: Ecology, Fisheries, Wildlife Conservation, Springer International Publishing (2025). 292 pp. ISBN: 978-3-031-71190-9 (Ebook). Biological Conservation, 313, 111523. doi: 10.1016/j.biocon.2025.111523

Radkhah, A.R., & Eagderi, S. (2026b). Book Review: Conservation in Chilean Patagonia: Assessing the State of Knowledge, Opportunities, and Challenges, J.C. Castilla, J.J. Armesto Zamudio, M.J. Martínez-

کنکاشی بر علل و اثرات آلودگی منابع آب و محیط زیست در ایران

شامل: مقدمه، مصاحبه‌های حضوری و مجازی، ارزیابی و جمع‌بندی

پاییز ۱۴۰۴

به سفارش
نشریه آب و توسعه پایدار و شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی
باهمکاری
پژوهشکده آب و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد









گردآورندگان
دکتر کاظم اسماعیلی (استاد گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد)
وحیده مرتضوی امیری (دکتری علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد)
مائده اسکوهی دکتری (دکتری علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد)

پژوهشکده آب و محیط زیست
دانشگاه فردوسی مشهد
شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی

اسامی متخصصین شرکت کننده در مصاحبه

ردیف	متخصص/ فعال محیط‌زیست	وابستگی سازمانی
۱	دکتر مهدی عاشورنیاء	استادیار پژوهشی و عضو هیئت علمی گروه پایش منابع آب- پژوهشکده محیط‌زیست جهاد دانشگاهی گیلان
۲	دکتر علیرضا رحمانی	عضو هیئت علمی گروه مهندسی بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی همدان
۳	دکتر جابر مظفری زاده	مدیر محیط‌زیست و کیفیت منابع آب شرکت آب منطقه‌ای بوشهر
٤	دکتر نوشین بیرجندی	عضو هیئت علمی گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست دانشگاه لرستان
٥	مهندس مرتضی قلی‌زاده	کارشناس آب، محیط‌زیست و کیفیت منابع آب از آذربایجان غربی و فعال محیط‌زیست عضو انجمن سبز آسیا کره جنوبی
٦	دکتر جهانشیر محمدزاده هابیلي	عضو هیئت علمي گروه علوم و مهندسي آب دانشگاه شیراز
۷	علی وطن‌دوست	فعال محیط‌زیست- استان خراسان رضوی
۸	مهندس محمود طباطبایی	فعال محیط‌زیست- استان خراسان رضوی
۹	مهندس بهروز قهرمانی	معاونت آب و خاک وزارت جهاد کشاورزی- استان زنجان
۱۰	دکتر سعید اکبری فرد	عضو هیئت علمی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان- استان کرمان
۱۱	دکتر فرهاد مشهدی خلردی	مدیر مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای مازندران- استان مازندران
۱۲	دکتر میترا چراغی	دانشیار گروه مهندسی طبیعت با تخصص آلودگی‌های محیط‌زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان- استان خوزستان
۱۳	مهندس ناهید غلام‌نژاد	مدیر محیط‌زیست و کیفیت منابع آب شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد
۱٤	دکتر حمیدرضا صفوی	استاد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان- استان اصفهان
۱۵	دکتر مسعود تجریشی	استاد گروه مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف
۱٦	دکتر حمید کاردان مقدم	عضو هیئت علمی موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو
۱۷	دکتر شروین جمشیدی	عضو هیئت علمی دانشگاه اصفهان
۱۸	مهندس محمدحسین نخعی صدقی	مدیر محیط‌زیست و کیفیت منابع آب شرکت آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان

مقدمه
آلودگی منابع آب

کمبود منابع آبی معضل بزرگی است اما آلوده شدن و گسترش استفاده از منابع آبی آلوده خود معضلی دیگر است که به دلیل تحت تاثیر قرار گرفتن مسئله کمبود آب چندان به آن اهمیت داده نمی‌شود. کمبود آب مشکلات بسیار زیادی را برای انسان‌ها و موجودات زنده به وجود می‌آورد؛ اما استفاده از آب آلوده مستقیماً با سلامتی انسان‌ها ارتباط دارد. همبست این دو مشکل سطح ناترازی در منابع آبی و سلامتی را به‌شدت افزایش داده است.

سازمان بهداشت جهانی[1] (WHO) می‌گوید آب آلوده، آبی است که ترکیب آن به حدی تغییر کرده که غیر قابل استفاده شده باشد (Filipenco، ۲۰۲۵).

آلودگی منابع آبی تأثیر منفی بر استفاده از آن‌ها داشته و معمولاً نتیجه فعالیت‌های انسانی است. در عین حال تاثیر عامل زمین زاد در این مسئله را نباید نادیده گرفت.

منابع آبی شامل دریاچه‌ها، رودخانه‌ها، اقیانوس‌ها، سفره‌های آب زیرزمینی، مخازن و آب‌های زیرزمینی و آلودگی آنها زمانی رخ می‌دهد که آلاینده‌ها با این منابع مخلوط شوند (Filipenco، ۲۰۲۵).

دستورالعمل‌های سازمان بهداشت جهانی برای آب چیست؟

دستورالعمل‌های کیفیت آب آشامیدنی[2] (GDWQ)با حمایت از تدوین استانداردها و مقررات محلی مرتبط (اهداف مبتنی بر سلامت)، اتخاذ رویکردهای مدیریت ریسک پیشگیرانه که از حوضه آبریز تا مصرف‌کننده (طرح‌های ایمنی آب) و سازمان‌های مستقل را پوشش می‌دهد، از سلامت عمومی حمایت می‌کند. آلودگی آب به‌عنوان وجود مواد خارجی یا ناخالصی‌ها (آلی، معدنی، بیولوژیکی یا رادیولوژیکی) در آب تعریف می‌شود که در نتیجه کیفیت آن را کاهش داده و آن را برای انسان یا محیط مضر می‌کند.

متخصصین حوزه سلامت ، می‌گویند آلودگی زمانی رخ می‌دهد که مقداری از هر ماده یا هر شکلی از انرژی با سرعتی بیشتر از آنچه که بتوان آن را پراکنده یا به طور ایمن ذخیره کرد، وارد محیط‌زیست شود که به نوبه خود به اکوسیستم‌ها و سلامت انسان آسیب می‌رساند. مواد سمی مختلف و ترکیبات خطرناک از کارخانه‌ها، شهرها و مزارع منجر به آلودگی منابع آب می‌شوند، زیرا آنها بسیار راحت‌تر از هر مایع دیگری روی زمین در آب حل می‌شوند. گاهی اوقات، مادر طبیعت نیز آب را مسموم می‌کند، مانند زمانی که جیوه پس از فیلتر شدن از پوسته زمین، اقیانوس‌ها، رودخانه‌ها و دریاچه‌ها را آلوده می‌کند. بااین‌حال در بیشتر موارد، اثرگذاری فعالیت‌های انسانی نقش پررنگتری داشته‌اند. .تحلیلی که بر اساس ۶۲۵ مطالعه از ۶۳ کشور جمع‌آوری شده نشان می‌دهد، کیفیت آب جهان به دلیل رشد مناطق شهری رو به وخامت گذاشته است و پژوهشگران برای رسیدگی به این موضوع، پوشش جنگلی بیشتری را پیشنهاد می‌کنند. ارتباط نزدیکی بین سلامت عمومی و خلوص آب وجود دارد یکی از دلایل اصلی بیماری‌های مختلف مانند وبا، اسهال خونی و هپاتیت، آب آلوده است. Filipenco (۲۰۲۵) بیان کردند، قرار گرفتن در معرض آلاینده‌هایی مانند میکروپلاستیک‌ها و مواد معدنی و فلزات خاص موجود در آب تصفیه نشده یا تصفیه نشده از سرب و آرسنیک باعث آسیب عصبی می‌شود و می‌تواند احتمال ابتلا به سرطان را افزایش دهد. علاوه‌براین قرار گرفتن در معرض آب بی‌کیفیت می‌تواند بر سلامت روان تأثیر منفی بگذارد و با خطر بیشتر اضطراب و افسردگی همراه باشد. شش منبع اصلی آلودگی آب به شرح زیر می‌باشد:

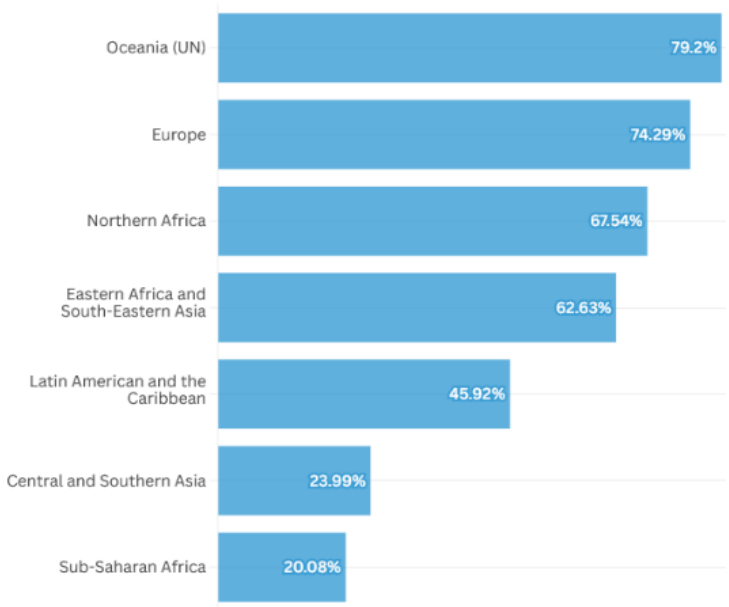
۱- زباله‌های صنعتی: صنایع با آلوده کردن زمین، هوا و آب با فلزات سنگین و عوامل بیماری‌زای قابل انتقال از طریق آب که تکثیر یافته و سموم خطرناکی آزاد می‌کنند و بر سلامت و اکوسیستم تأثیر گذاشته و به طور جدی به محیط‌زیست آسیب می‌رسانند. تأسیسات صنعتی زباله‌هایی را به شکل ترکیبات خطرناک تولید می‌کنند که می‌توانند منجر به مسمومیت، سرکوب سیستم ایمنی و مشکلات باروری شوند بر دمای سیستم‌های آب شیرین تأثیر بگذارند و به حیات دریایی آسیب برسانند و مناطق مرده (مناطقی با اکسیژن کافی برای حمایت از حیات دریایی) در آب ایجاد کنند. آنچه اوضاع را بدتر می‌کند، فقدان زیرساخت‌های دفع زباله است که برخی مناطق کشور ما نیز مانند شهرهای مسافرپذیر در زمان‌های مسافرتی و ورود مسافران در بازه کوتاهی بسیار اهمیت می‌یابد؛ مانند شهر رشت در استان گیلان و یا سایر شهرهای شمالی در دوره فزونی جمعیت.

۲- آلودگی نفتی این اتفاق زمانی می‌افتد که بنزین از پارکینگ‌ها و بزرگراه‌ها و نفت از خطوط لوله و عملیات فرکینگ (یک تکنیک حفاری که به استخراج نفت کمک می‌کند)، از طریق رواناب‌های سطحی وارد آب‌ها شود. نشت نفت از تانکرها و دکل‌های حفاری یا منفجر شدن نفت‌کش‌ها ناشی از عملیات خرابکارنه در وقایع جنگی می‌تواند تا صدها کیلومتر گسترش یابد و سطح دریا، سنگ‌ها، سواحل یا گیاهان را با لایه‌ای نازک از نفت بپوشاند و بسیار مضرتر از نشت نفت در خشکی است. این نشت‌ها تأثیر جدی بر حیات دریایی و حیواناتی که در نزدیکی ساحل زندگی می‌کنند، دارند، زیرا لایه نازک نفتی ممکن است در نهایت از طریق خفگی یا مسمومیت آنها را بکشد.

۳- آلودگی پلاستیک، سالانه گونه‌های متعددی از حیات دریایی پس از مصرف پلاستیک یا گرفتار شدن در آن می‌میرند. علاوه‌براین گزارش UNEP[3] بیان می‌کند هر ساله

دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و دریاها با ۱۹ تا ۲۳ میلیون تن زباله پلاستیکی که به محیط‌های آبی نفوذ می‌کنند، آلوده می‌شوند. پژوهش‌ها نشان می‌دهد پس از ورود پلاستیک به اکوسیستم، تجزیه آن ممکن است از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ سال طول بکشد. علاوه‌براین طبق گزارش سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (OECD)[٤]، انتظار می‌رود میزان پلاستیک تولید و استفاده شده در سراسر جهان از ۴۳۵ میلیون تن در سال ۲۰۲۰ به ۷۳۶ میلیون تن تا سال ۲۰۴۰ افزایش یابد که افزایشی ۷۰ درصدی را نشان می‌دهد همانطور که توسط نشنال جئوگرافیک گزارش داده است، دانشمندان کشف کرده‌اند اگر آلودگی پلاستیک ادامه یابد و بشر هیچ کاری برای حل این مشکل انجام ندهد، تا سال ۲۰۴۰، میزان پلاستیک هدر رفته در آب‌ها هر ساله می‌تواند به ۲۹ میلیون تن برسد.

٤- فاضلاب، بیش از ۸۰٪ فاضلاب به صورت تصفیه نشده یا غیرقابل استفاده به اکوسیستم‌های مختلف باز می‌گردد. آلودگی روزانه رخ می‌دهد، به‌طوری‌که ۱۴ میلیون متر مکعب (۱۴ میلیارد لیتر) فاضلاب حاوی زباله‌های انسانی حاوی باکتری‌ها و عوامل بیماری‌زا که باعث بیماری می‌شوند، هر روز توسط خانوارها در کشورهای کمتر توسعه یافته تولید می‌شود. فقدان زیرساخت‌های تصفیه باعث می‌شود این فاضلاب مستقیماً به محیط‌زیست تخلیه شود و به خاک، هوا و آب‌های زیرزمینی آسیب برساند. در مقیاس جهانی، در سال ۲۰۲۲، حدود ۴۲٪ از فاضلاب خانگی تصفیه می شود. طبق داده‌های ارائه شده توسط سازمان ملل متحد، از بین تمام مناطق جهان، آمریکای شمالی در تصفیه فاضلاب خانگی پیشرو است و پس از آن اقیانوسیه و اروپا قرار دارند. شکل (۱) درصد فاضلاب خانگی تصفیه شده را بر اساس منطقه (سال ۲۰۲۲) نشان می‌دهد (Filipenco، ۲۰۲۵).



شکل ۱- نمودار شکوفایی فعالیت انسانی در تصفیه فاضلاب (Filipenco، ۲۰۲۵)

۵-رواناب آفت‌کش‌ها و کودها، اصطلاحی است که آب ناسالم جاری از زمین‌های کشاورزی را در نتیجه آبیاری، باران یا برف ذوب شده توصیف می‌کند. رواناب کشاورزی ممکن است حاوی آفت‌کش‌ها یا کودهایی باشد که بدون احتیاط یا غیرمسئولانه توسط کشاورزان استفاده می‌شوند. نتایج می‌تواند با آلوده شدن آب‌های زیرزمینی که به انسان‌ها، گیاهان و جانوران آسیب می‌رساند، ویرانگر باشد.

٦-آلودگی رادیواکتیو زباله‌های رادیواکتیو می‌توانند هزاران سال در محیط‌زیست باقی بمانند و پاک‌سازی آنها بسیار چالش برانگیز است. به‌عنوان‌مثال در آوریل ۲۰۲۱، ژاپن آب آلوده به رادیواکتیو را از تأسیسات هسته‌ای آسیب دیده فوکوشیما به اقیانوس ریخت. اگرچه دولت ادعا کرد که به دلیل تصفیه فاضلاب، نگرانی‌های بهداشتی و آسیب‌های احتمالی به حیات دریایی محدود است، اما برای اطمینان از اینکه آلودگی آب هیچ پیامد منفی بر محیط‌زیست ندارد، نظارت دقیق هنوز هم ضروری است. طبق گزارش مجله ساینس در زمینه آلودگی آب، در سال ۲۰۲۰، حدود ٤/٤ درصد از جمعیت جهان در ۱۳۵ کشور با درآمد کم و متوسط به آب آشامیدنی سالم دسترسی نداشتند. طبق گزارش یونیسف، تا سال ۲۰۲۳، تعداد افرادی که هنوز به خدمات آب مدیریت شده ایمن دسترسی نداشتند، ۲/۲ میلیارد نفر بود. علاوه‌براین سازمان بهداشت جهانی (WHO) اعلام می‌کند که حدود ۲ میلیارد نفر در سراسر جهان آب آلوده مصرف می‌کنند. حقایق مربوط به آلودگی آب که توسط این سازمان فاش شده است، چشمگیر است. آب ناسالم که حاوی میکروارگانیسم‌های خطرناک است، می‌تواند اسهال و بیماری‌هایی مانند وبا را گسترش

دهد. هر ساله، آب آشامیدنی آلوده باعث ۴۸۵۰۰۰ مرگ و میر ناشی از اسهال می‌شود. تا سال ۲۰۲۱، بیش از ۲۵۱/٤ میلیون نفر به درمان پیشگیری از شیستوزومیازیس نیاز داشتند. از نظر آب و بهداشت، آب آشامیدنی آلوده در کنار بهداشت ضعیف دست کم منجر به ۱ میلیون مرگ ناشی از اسهال می‌شود. همانطور که بخش آب سازمان ملل گزارش می‌دهد، عدم بهبود کیفیت آب و کنترل منابع آبی می‌تواند جان و سلامت ٤/۸ میلیارد نفر را تا پایان دهه بیست به خطر بیندازد. حدود ۱/۷ میلیارد نفر در سراسر جهان در سال ۲۰۲۲ آبی را مصرف کردند که توسط زباله‌های انسانی آلوده شده بود. حدود ۸۰ درصد از آلودگی دریایی از منابع زمینی، از جمله زباله‌های کارخانه‌ها، زباله‌های پلاستیکی و فاضلاب‌های کشاورزی ناشی می‌شود. یکی از بزرگترین تأثیرات آلودگی آب این است که هر ساله زباله‌های اقیانوس تقریباً یک میلیون پرنده دریایی و موجودات دریایی را می‌کشد. چرا دسترسی به آب آشامیدنی یکی از ۱۷ هدف توسعه پایدار است؟ طبق گزارش یونیسف، در سال ۲۰۲۲ تعداد افرادی که از دسترسی به خدمات آب آشامیدنی تمیز بهره‌مند شده‌اند به ۵/۸۲ میلیارد نفر رسیده است، به این معنی که همه آنها توانسته‌اند در صورت نیاز و بدون خطر آلودگی از خدمات آب آشامیدنی استفاده کنند. بااین‌حال، هنوز حدود ۲/۲ میلیارد نفر به خدمات آب مدیریت شده ایمن دسترسی ندارند. از جمله این موارد ۱/۵ میلیارد نفر می‌توانند با طی یک مسافت رفت و برگشت ۳۰ دقیقه‌ای به یک منبع آب آشامیدنی محافظت شده و امکانات بهداشتی دسترسی یابند. ۲۹۲ میلیون نفر خدمات آب محدودی دارند، یعنی به منابع آب آشامیدنی دسترسی دارند، اما مسافت رفت و برگشت به این منبع بیش از ۳۰ دقیقه طول می‌کشد.۲۹۶ میلیون نفر از منابع بهبود نیافته استفاده می‌کنند (یعنی از یک منبع آب محافظت نشده آب مصرف می‌کنند). ۱۱۵ میلیون نفر آب آشامیدنی خود را مستقیماً از منابع مختلف آب سطحی (یعنی رودخانه‌ها و دریاچه‌ها) تأمین می‌کنند. کسانی که در سکونتگاه‌های فقیر، غیررسمی یا غیرقانونی زندگی می‌کنند، معمولاً به منابع بهبود یافته آب آشامیدنی دسترسی مناسب ندارند و از کیفیت پایین آب آشامیدنی رنج می‌برند. با این‌حال مشکل آب آشامیدنی ناسالم نه تنها در کشورهای در حال توسعه دیده می‌شود که طبق برآوردهای CDC، آلاینده‌های آب آشامیدنی سالانه حداقل ۱/۱ میلیون آمریکایی را بیمار می‌کند. آلودگی آب آشامیدنی با دفع مواد شیمیایی، پلاستیک و داروهای مختلف به منابع آب شیرین و قابل شرب مرتبط است که می‌تواند باعث مشکلات گوارشی و مشکلات جدی‌تر سلامتی مانند سرطان شود. چگونه از آلودگی آب بایدجلوگیری و از منابع آب آشامیدنی محافظت شود. کنترل آلودگی، نیاز به افزایش آگاهی و آموزش عموم مردم در مورد مسائل مربوط به آب و آلودگی منابع دارد سازمان‌های غیرانتفاعی مختلف در سراسر جهان اقدامات متعددی را پیشنهاد کرده‌اند که می‌تواند به بشریت کمک کند تا تأثیر آن بر آب را متوقف یا به حداقل برساند.

در اینجا برخی از راه‌حل‌های پیشنهادی برای کاهش آلودگی آب توسط بنیاد سولار ایمپالس (یک پروژه غیرانتفاعی محیط‌زیستی که با همکاری مؤسسه فناوری فدرال در لوزان سوئیس) ارائه شده است.

تصفیه فاضلاب:

از آنجایی که فاضلاب باعث آلودگی آب می‌شود، افزایش مداوم تعداد خانوارهایی که فاضلاب آنها قبل از بازگشت به مدار طبیعی تصفیه می‌شود، بسیار مهم است (در کشور ما معمولاً خانوارهای پرجمعیت در نواحی کم‌برخوردار هستند که امکانات جمع‌آوری فاضلاب به‌صورت اصولی یا وجود ندارد و یا اگر هست از قابلیت لازم برای انجام این مهم برخوردار نیست). این تصفیه فاضلاب شامل استخراج آلاینده‌ها با استفاده از روش‌های فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی است. راه‌حل‌های متعددی در مقیاس کوچک وجود دارد که می‌توان آنها را اجرا کرد، اما مشکلات اصلی همچنان در بخش صنعت و شهرهای بزرگ باقی می‌مانند.

کشاورزی سازگار با محیط‌زیست:

استفاده از تولید مواد غذایی با صرفه‌جویی در مصرف انرژی و آبیاری مؤثر که نیاز به آب را به حداقل می‌رساند و همچنین استفاده از محصولات سازگار با آب و هوا بسیار مهم است.

مدیریت آب‌های سطحی:

مدیریت آب‌های سطحی تلاشی برای محدود کردن آب باران یا رواناب ناشی از ذوب برف به جاده‌ها، چمنزارها و سایر مناطق است تا از آلودگی آب توسط آلاینده‌ها جلوگیری شود.

جلوگیری از آلودگی هوا:

اقیانوس‌های جهان ۲۵٪ از دی اکسید کربنی را که عمدتاً توسط فعالیت‌های انسانی منتشر می‌شود، جذب می‌کنند. به همین دلیل است که آلودگی آب اقیانوس مستقیماً تحت تأثیر آلودگی هوا قرار می‌گیرد و در نتیجه، اقیانوس‌ها اسیدی‌تر می‌شوند که صخره‌های مرجانی و حیات دریایی را نیز به خطر می‌اندازد.

کاهش ضایعات پلاستیکی:

آب‌های کره زمین حاوی ۸۰٪ از پلاستیکی هستند که از منابع زمینی می‌آید، به‌عنوان‌مثال آلودگی آب رودخانه‌ها از محل‌های دفن زباله غیرمجاز و تخلیه غیرقانونی ناشی می‌شود. کاهش مصرف پلاستیک و بهبود دفع و بازیافت زباله‌های پلاستیکی بسیار حیاتی است.

حفاظت از آب (Filipenco، ۲۰۲۵):

درک این نکته ضروری است که منابع آبی تمیز کمیاب است. لذا در جفاظت از آن و درک اهمیت آن نیازمند مدیریت عاقلانه می باشد

دفع صحیح زباله‌های خطرناک:

یادگیری نحوه صحیح دفع مواد شیمیایی و خطرناک مانند رنگ، مواد شیمیایی چمن و مایعات خودرو در کشور یا منطقه مورد بررسی مهم است.

کاهش مواد شیمیایی:
برای باغبانی کشـــاورزی پایدار کلید کاهش آلودگی آب‌ها از روانابهای آفت‌کش‌ها و کودها اســت. کشـــاورزان و باغداران کوچک می‌توانند با پرورش گیاهان بومی، کاشـــت گیاهان پوشـــشـــی بین ردیف‌ها، اســتفاده از روش‌های بدون شـــخم و شخم کوچک و سایر موارد، با محیط‌زیست سازگارتر شوند.
نگهداری منظم از تأسیسات تصفیه فاضلاب:
فرآیند اقدامات لازم شـامل سـرویس دوره‌ای مخازن سـپتیک برای جلوگیری از خطرات نشـت و آلودگی آب‌های زیرزمینی در بســـیاری از مناطق اهمیت می یابد بعنوان نمونه می توان به آلودگی منابع آب زیر زمینی در شهر رشت ناشی نفوذ فاضلاب اشاره کرد
کلام آخر، هر روز آلاینده‌های متعددی وارد آب‌های ســـیاره زمین می‌شـــوند که از مقادیر انبوه زباله تا ســـطوح بســـیار کم مواد شـــیمیایی خطرناک متغیر هســـتند. علاوه‌براین، آلودگی آب، خشـکسـالی و رشـد سـریع جمعیت، بحران آب شـیرین را تشـدید کرده و رفاه انسـان و ایمنی اکوسـیستم‌های مختلف را به خطر انداخته است.

گفتار متخصصان:

دکتر جابر مظفری‌زاده| مدیر محیط‌زیست و کیفیت منابع آب شرکت آب منطقه‌ای بوشهر

لطفاً در رابطه با آلودگی استان بوشهر توضیح بفرمایید.

بحث آلودگی منابع آب در اسـتان بوشـهر، ابعاد مختلفی دارد. یکی از مهمترین موضـوعات، بُعد حقوقی و قانونی این مسـئله است. درحال‌حاضر، مدیریت و حفاظت از منابع آب کشور در عمـل در اختیـار وزارت نیرو اســـت. امـا در عمـل، قوانین موجود(به‌ویژه در مورد توزیع عادلانه آب ، مواد ۴۶ یا ۴۸ قانون توزیع عادلانه آب)، دسـت وزارت نیرو را بسـته اسـت و این وزارت‌خانه فقط موظف اســـت گزارش آلودگی منابع آب را به سـازمان محیط‌زیسـت ارائه دهد. در نتیجه، سـازمان حفاظت محیط‌زیســـت که وظیفه حفظ کیفیت منابع آب را دارد، در عمل نقش اجرایی و حقوقی در برخورد با آلودگی ندارد و فقط می‌تواند گزارش تهیه کند. این یک چالش اسـاسـی اسـت که نیازمند بازنگری قانونی است. اگر شرایط به همین شکل ادامه پیدا کند و تلفیق میان وزارت نیرو و ســـازمان محیط‌زیســـت صورت نگیرد، این خلأ قانونی همچنان باقی خواهد ماند.
موضـوع آلودگی و کیفیت منابع آب دو جنبه دارد: آلودگی‌های مربوط به شـوری و آلودگی‌های ناشـی از فعالیت‌های انسـانی و صنعتی. متأسفانه در استان بوشهر، به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و استفاده نادرست، حدود ۹۶٪ از منابع آب استان شور شده‌اند. در مناطق کشاورزی، یکی از مشکلات جدی، شور شدن منابع آب زیرزمینی است. این موضوع منجر به کاهش شـــدید کیفیت آب شـــده، به‌گونه‌ای که دیگر برای کشـــاورزی قابل اســـتفاده نیســـت. در واکنش به این بحران، برخی کشـاورزان به اسـتفاده از دسـتگاه‌های آب‌شـیرین‌کن غیرمجاز روی آورده‌اند تا آب شور را به آب نسبتاً قابل‌استفاده تبـدیـل کننـد. بـا-این-حـال، این اقـدام از نظر قـانونی تخلف محسـوب می‌شـود. اما از آنجایی که سـازوکار قانونی و فناوری جایگزین برای تأمین آب شـیرین متناسـب با نیاز معیشـتی مردم فراهم نشده است، این تخلفات به‌صورت گسترده ادامه دارند. نمونه‌های مشخص این پدیده در دشت‌های آبدان، دیر و کنگان مشـــاهده می‌شـــود؛ جایی که میـانگین هـدایت الکتریکی (EC) آب به بالای ۱۰ هزار میکروموس رســـیده و در برخی نقاط تا ۲۰ یا حتی ۲۱ هزار میکروموس نیز گزارش شـده اســـت. آبی با EC بالای ۲۰ هزار میکروموس که در این مناطق پمپاژ و سپس تصفیه می‌شود، شورابه‌ای با EC حدود ۵۰ هزار تولید می‌کند(مقداری که حتی از شـــوری آب خلیج فارس نیز بیشـتر اسـت). این شـورابه‌ها سـپس به طور مسـتقیم وارد زمین‌های کشـاورزی مجاور یا آبراهه‌های اطراف شـده و باعث گســـترش آلودگی در منطقـه می‌شـــونـد. این موضـــوع در بخش‌هایی از استان بوشهر، به‌ویژه در نواحی شمالی، از جمله موارد جدی است. تخلیه فاضـلاب‌ها در نواحی سـاحلی و غیر سـاحلی به‌صـورت مداوم در حال انجام اسـت و این مسـئله به طور طبیعی در حال گسـترش اسـت، چون هر سـال منابع آب زیرزمینی و سطحی استان شورتر می‌شوند.
از طرف دیگر، بحث فاضـلاب‌ها چه فاضـلاب شـهری و چه فاضلاب صنعتی هم مطرح است. در کل استان بوشهر، تنها سـه تصـفیه‌خانه فاضـلاب وجود دارد که مربوط به شـهرهای بوشـهر، دیلم و گناوه اسـت. سـایر شـهرهای اسـتان نه تنها تصـفیه‌خانه ندارند، بلکه حتی شـبکه جمع‌آوری فاضـلاب هم در آن‌ها وجود ندارد. سه شهری که سیستم فاضلاب دارند، در واقع تنها حوضـچه‌های ذخیره فاضـلاب دارند و در عمل تصـفیه‌خانه ندارند. به‌عنوان‌مثال در شـهر بوشـهر، سـالانه حدود ۱۸ میلیون مترمکعب فاضـلاب تولید می‌شـود که میزان کلیفرم مدفوعی چند ده برابر بالاتر از اسـتاندارد جهانی دارد. این فاضـلاب مسـتقیماً وارد طبیعت می‌شـود و در نهایت به خلیج فارس می‌ریزد. درحالی‌که در اطراف خلیج فارس، هم محل گردشگری و شناگاه‌های مردم قرار دارد و هم منابع صید مـاهی و میگو برای مصـــرف مردم اســـت. غیر از این، مجموعه‌هایی هم برای پرورش میگو فعال هستند که دقیقاً در پایین‌دسـت خروجی این تصـفیه‌خانه‌ها قرار گرفته‌اند. هرچند ممکن است برخی این موضوع را کتمان کنند، اما واقعیت این اســـت که یکی از منابع تهدید جدی آینده برای پرورش میگو، فاضلاب‌های شهری است که می‌تواند این صنعت را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد. لازم به ذکر اسـت در بحث فاضـلاب‌های شهری در استان بوشهر، در عمل ۱۰۰٪ فاضلاب‌های شهری در محیط که غالباً دریا است رها می‌شود.

اگرچه ادعا می‌کنند فاضلاب‌های صنعتی هم از جنوب تا شمال، به‌خصوص در منطقه عسلویه، تصفیه می‌شود، ولی واقعیت این است که تصفیه‌ای صورت نگرفته و گاهی شبانه وارد محیط، به‌ویژه دریا، می‌شود. به‌عنوان‌مثال در سال‌هایی که لاشه‌های جانداران دریایی به طول چندین کیلومتر و عرض ۴ تا ۵ متر در ساحل دیده می‌شده، کشتار شدید جانداران دریایی اتفاق افتاده است. این اتفاق ناشی از ورود آلاینده‌های صنعتی و فاضلاب‌های تصفیه نشده بوده است. موارد بیان شده مربوط به فاضلاب‌های صنعتی است.

از شمال تا جنوب استان، خطوط انتقال مواد نفتی وجود دارد. باید در نظر گرفت به‌صورت منطقه‌ای، شکستگی و نشتی در خطوط انتقال نفت در سطح استان وجود دارد. متأسفانه شرکت نفت توجه خاصی به این موضوع نداشته و قانون هم در برابر قدرت شرکت نفت در عمل اقدامی انجام نمی‌دهد. این مسئله رودخانه‌ها و آب‌های سطحی را آلوده کرده است. در نهایت، چون استان بوشهر در انتهای حوضه آبی به دریا متصل است، بر معیشت مردم که شامل صید ماهی و گردشگری است، تأثیر مستقیم می‌گذارد. اثبات انتقال آلودگی‌های مستقیم توسط شرکت‌های نفتی به مخازن آب زیرزمینی، به‌ویژه در برخی موارد که نشانه‌هایی از آلودگی منابع آب زیرزمینی و آلودگی در سطح زمین وجود دارد به راحتی امکان‌پذیر نیست. این آلودگی‌های نفتی توسط شرکت‌های نفت، پالایشگاه و پتروشیمی به‌صورت مخفیانه وارد منابع زیرزمینی می‌شود و در واقع همان حداقل منابع آبی‌ای که در اختیار است هم آلوده می‌شود.

همچنین در استان به دلیل نداشتن سیستم‌های مناسب جمع‌آوری فاضلاب شهری و روستایی، و نبود هیچ‌گونه کنترلی بر میزان مصرف کود و سموم کشاورزی، با مشکلی جدی مواجه هستیم. از طرفی، به دلیل مشکلات مالی کشاورزان، آن‌ها توانایی خرید سموم باکیفیت را ندارند و در نتیجه به استفاده از سموم و کودهای بی‌کیفیت چینی روی می‌آورند. این مواد، به‌مرور وارد منابع آب زیرزمینی شده‌اند. درحال‌حاضر نیز ما با آلودگی منابع آب زیرزمینی ناشی از مصرف کود و سموم کشاورزی روبه‌رو هستیم. به‌عنوان‌مثال، شهر جم و دشت جم که از جمله دشت‌های محدود با قابلیت شرب در استان بوشهر بودند، به دلیل همین نوع آلودگی‌ها به طور کامل خاصیت شرب خود را از دست داده‌اند.

سیمایی که از وضعیت آلودگی منابع آب در بوشهر ترسیم شده بسیار وحشتناک است. با تمام این چالش‌ها، به‌عنوان‌مثال به دلیل برداشت بی‌رویه در دشت‌ها، سطح شوری آب زیرزمینی افزایش پیدا کرده است، نشت مواد نفتی وجود دارد یا مشکلات ناشی از فاضلاب‌ها، سؤال اینجا است که آیا هیچ سازوکار قانونی، نهاد دولتی، یا سازمان مردم‌نهاد وجود ندارد که در برابر این مسائل واکنشی نشان دهد؟

ما اعتراض می‌کنیم. خود من دبیر هیئت اندیشه‌ورز آب، کشاورزی و محیط‌زیست بنیاد نخبگان استان بوشهر هستم. در سه تا چهار سال گذشته، بارها جلساتی با نهادهای مختلف برگزار کرده‌ایم. آخرین جلسه‌ای که من در آن شرکت داشتم، حدود دو تا سه هفته پیش با دادستان استان بوشهر بود. در آن جلسه، موضوع فاضلاب استان بوشهر و مشکلات ناشی از آن مطرح شد. ما همه مسائل را توضیح دادیم و همین امروز هم گزارش آن جلسه را به‌صورت کتبی و رسمی برای ایشان ارسال کردم. اما واقعیت این است که چنین گزارش‌هایی در نهایت به جایی نمی‌رسند، به چند دلیل. دلیل اصلی این است که نهادهای درگیر، هر دو دولتی هستند؛ یک طرف سازمان محیط‌زیست است و طرف دیگر آب و فاضلاب. طبیعتاً دولت خودش را زیر سؤال نمی‌برد. اگر قرار بود عدالت اجرا شود، باید الان وزارت نیرو بابت این وضعیت پاسخ‌گوی مردم و نهادهای قضایی استان بوشهر باشد و جریمه سنگینی برای این موضوع که الان سه دهه هست که ادامه دارد، پرداخت کند.

بحث کشاورزی نیز مربوط به معیشت مردم است و دولت امکان تأمین معیشت مردم در زمینه‌های دیگر را ندارد. به همین دلیل، فشار به بخش کشاورزی وارد می‌شود و چون معیشت جایگزینی وجود ندارد، راهی برای ادامهٔ کشاورزی هم باقی نمانده است. به همین دلیل، نهادهای مختلف به وزارت نیرو فشار وارد می‌کنند که اجازه دهد کشاورز از آب‌شیرین‌کن استفاده کند؛ بنابراین خاک و آب زیر زمینی از بین برود، اما معیشتش حفظ شود. جلسات مرتبط در داخل استان برگزار می‌شود، همایش‌ها وبینارها و سمینارهای مختلفی انجام می‌شود؛ ولی باید گفت که این مسئله در توان داخل استان نیست و نیازمند حمایت و اراده ملی است برای رفع این مشکلات که امیدواریم این اتفاق رخ دهد.

وضعیت تشکل‌های محیط‌زیستی در استان بوشهر، باتوجه‌به اینکه خود شما نیز در این بخش فعالیت دارید و از نزدیک با آن آشنا هستید، به چه صورتی است؟ باتوجه‌به شرایطی که واقعاً عجیب و نگران‌کننده است، مخصوصاً در مواجهه با این حجم بزرگ از آلودگی و مشکلاتی که پیش‌تر به آن‌ها اشاره شد و بسیار جدی نیز هستند، شرایط برای فعالیت دشوار است. اما می‌دانیم که بخش مردمی و گروه‌های مردم‌نهاد می‌توانند قدرت اثرگذاری داشته باشند. البته در سطح کشور نیز، متأسفانه به دلیل مشکلات زیاد، این فعالیت‌ها به‌راحتی پیش نمی‌روند. بااین‌حال قطعاً گروه‌هایی هستند که در این استان فعالیت می‌کنند.

باتوجه‌به تجربه‌ای که دارید، لطفاً بفرمایید آیا در همین شرایط دشوار، اتفاقات مثبتی در زمینه محیط‌زیست در استان بوشهر افتاده است؟ تشکل‌های محیط‌زیستی توانسته‌اند به نحوی بر بخشی از این مشکلات فائق آیند یا بهبودی حاصل کنند؟ یا اساساً گروه‌هایی فعال هستند که در حوزه‌هایی مثل آب سطحی یا آب زیرزمینی (که به آن‌ها اشاره کردید) بتوانند در یکی از این عرصه‌ها، کاری پیش ببرند؟

در بحث سمن‌ها (سازمان‌های مردم‌نهاد)، در عمل در قانون آن‌چنان جایگاهی برای مشارکت مؤثر آن‌ها در نظر گرفته نشده تا بتوانند مطالبه‌گری داشته باشند. از طرف دیگر، در

بسیاری از مواقع، اگر این گروه‌ها بخواهند نقش مؤثری ایفا کنند، همین موضوع ممکن است منجر به زیر سؤال رفتن برخی از نهادها مانند شرکت آب و فاضلاب استان یا شرکت نفت می‌شود؛ مثل همین موضوع آلودگی فاضلاب و نقش صنایع و شرکت‌هایی که در آن منطقه فعال هستند. به‌عنوان‌مثال، در همایش اخیر که در منطقه "عسلویه" برگزار شد و خانم انصاری نیز حضور داشتند، اساساً از سمن‌هایی که مستقل و دغدغه‌مند هستند، حتی دعوتی به عمل نیامده بود. طبیعتاً فرصت برای بیان واقعیت‌ها نیز به آن‌ها داده نمی‌شود. در مقابل، فقط سمن‌هایی اجازه حضور دارند که با دستگاه‌های اجرایی همراه هستند و چالشی ایجاد نمی‌کنند. آن‌ها هم معمولاً مطالبی را مطرح می‌کنند که مطابق با دیدگاه رسمی و مورد تأیید نهادهای مرتبط است و طبیعتاً مسائل اساسی و بحرانی مطرح نمی‌شود. حتی رئیس‌جمهور هم که اخیراً در دیدار با نخبگان حضور داشت، کاملاً به‌صورت انتخابی، افرادی که احتمالاً می‌توانستند حرفی خارج از آن چارچوب مطرح کنند حذف شدند. من سال گذشته نشان ملی دریافت کردم. امسال نیز عنوان انجمن شاخص در حوزه آب را در روز ملی آب کسب کردیم. همچنین خانم دکتر بذرافکن که یکی از افراد فعال در این حوزه بودند و همین مدارج را دریافت کردند، باوجود این‌که درخواست داده بودیم، حتی امکان حضور در آن نشست را نداشتند.

لطفاً بفرمایید شما چه اقدامی انجام دادید که امسال و سال گذشته به‌عنوان انجمن برتر، تقدیر دریافت کردید؟

سایتی وجود دارد به نام «آموزشیار آب»؛ اکنون اگر جست‌وجو کنید، قابل‌دسترسی است. ما این سایت آموزشی در حوزه آب و محیط‌زیست را راه‌اندازی کردیم. به گمانم برای اولین‌بار در کشور چنین سایت اختصاصی‌ای راه‌اندازی شده که ویژه جوانان و دانش‌آموزان در سطح کشور است. در این فضا، ما فعالیت‌های فرهنگی، آموزشی و ترویجی را در میان دانش‌آموزان دنبال می‌کنیم. این یکی از کارهایی است که در حال حاضر مشغول اجرای آن هستیم. همچنین در دو سال گذشته، شش عنوان کتاب در همین حوزه تألیف و منتشر کرده‌ایم؛ چه برای کودکان و چه برای بزرگسالان. اگر هماهنگی‌ها انجام شود، چهار مورد از این کتاب‌ها به‌زودی رونمایی خواهد شد. در این مدت، تعداد زیادی وبینار، سمینار، نشست تخصصی و بازدید علمی برگزار کرده‌ایم. می‌توانم با اطمینان بگویم که تعداد برنامه‌های تخصصی‌ای که ما در حوزه آب و محیط‌زیست برگزار کرده‌ایم، حتی از مجموع برنامه‌های دانشگاه خلیج‌فارس و دانشگاه‌های استان در این حوزه نیز بیشتر بوده است. تمام این فعالیت‌ها بدون دریافت حتی هزار تومان حمایت مالی از هیچ نهادی انجام شده و تماماً با هزینه‌های شخصی اعضای گروه و مشارکت داوطلبانه انجام شده است.

علاوه‌براین فعالیت‌ها، ما در نقاط مختلف استان کارگاه‌ها و نشست‌هایی را با حضور خود مردم و کشاورزان برگزار کرده‌ایم. همچنین گروهی از کشاورزان و نخبگان استان را نیز در قالب یک شبکه گرد هم آورده‌ایم که بسیار فعال هستند و در حوزه‌های فرهنگی و ترویجی فعالیت می‌کنند.

در بحث تغییر الگوی کشت نیز، به‌ویژه در زمینه ترویج کشت محصولات کم‌آب‌بر، در سطح استان پیگیری‌هایی داشته‌ایم. به‌عنوان‌نمونه، در دشت بوشکان موفق شدیم با جلساتی که با کشاورزان و اهالی منطقه برگزار کردیم، چند نوع کشت کم‌آب‌بر را جایگزین کشت‌هایی کنیم که اما در عمل باعث خشک شدن حدود ۴۰٪ از دشت بوشکان شده بودند. اکنون در حال توسعه و گسترش این الگو هستیم. در حوزه مدیریت منابع آب، به‌ویژه استفاده از روش‌های جایگزین به‌جز آب‌شیرین‌کنی (که امروزه زیاد در مورد آن صحبت می‌شود)، در سطح استان اقداماتی انجام داده‌ایم و توانسته‌ایم با همین روش‌ها و حمایت‌های محلی، مشکل تأمین آب برخی مناطق را برطرف کنیم. در حوزه فاضلاب نیز، با سرمایه‌گذاری شخصی و پیگیری داوطلبانه، موفق شدیم یک بسته اقتصادی را آماده کنیم و سرمایه‌گذار جذب کنیم. اما متأسفانه زمانی که کار را پیش بردیم، به دلیل بروکراسی اداری، سرمایه‌گذاران یکی‌یکی منصرف شدند. حتی یکی از این سرمایه‌گذاران که قصد داشت در زمینه تصفیه فاضلاب شهر بوشهر حدود پنج هزار میلیارد تومان سرمایه‌گذاری کند، در نهایت از پروژه صرف‌نظر کرد و به امارات رفت و سرمایه‌گذاری خود را در آنجا انجام داد، درحالی‌که بستر کار در اینجا کاملاً فراهم بود.

منابع آب شرب بوشهر چیست؟

۸۰-۷۰ درصد آب شرب استان بوشهر به‌صورتکلی از خارج از استان تامین می شود. کازرون و کهکلویه و بویر احمد (سد کوثر)، بخش محدودی از چاه‌های داخل استان و ۱۰-۱۵ درصد هم از طریق آب‌شیرین‌کن‌ها که به‌مرور در حال پیوستن به شبکه هستند.

فرمودید تصفیه‌خانه‌ها وجود ندارند و در واقع فاضلاب در مخازن جمع‌آوری شده و رها می‌شود؟

بله دقیقاً. این شرایط هم فقط در سه شهر وجود دارد، سایر شهرها هیچ شبکه‌ای ندارند.

در مورد سازمان‌هایی که به آن‌ها اشاره فرمودید، مانند محیط‌زیست، شرکت آب و فاضلاب و همچنین آب منطقه‌ای اگر بخواهیم بازه‌ای مثل یک دهه اخیر، به‌ویژه چند سال گذشته را در نظر بگیریم، آلودگی‌ای که واقعاً شدید، گسترده و جدی است و مطمئناً توجه متخصصان را هم به خود جلب کرده است. قاعدتاً این سازمان‌ها باید در این زمینه مسئولیتی داشته باشند. شما در این سازمان‌ها، در چند سال اخیر، برنامه‌ای در رابطه با مقابله با آلودگی دیده‌اید؟ حتی در حد ابلاغ یا تهیه طرح اولیه؟ چون در حوزه اجرا، به‌ویژه زمانی که موضوع به اختیارات استانی مربوط می‌شود، ممکن است موانع و مشکلاتی وجود داشته باشد. اما آیا خود این سازمان‌های دولتی برنامه‌هایی برای مقابله با آلودگی‌های موجود در استان بوشهر داشته‌اند؟

بنده مدیر محیط‌زیست و کیفیت منابع آب شرکت آب منطقه‌ای بوشهر هستم و در تمام زمینه‌هایی که اشاره شد،

هم به‌ضرورت، گزارش میدانی تهیه شد و هم از جنبه علمی موضوعات پیگیری شده است. حتی در برخی موارد، بحث‌های اقتصادی برای خروج از این وضعیت نیز بررسی شده‌اند، اما متأسفانه هیچ‌کدام از این اقدامات به نتیجه مشخصی نرسیده‌اند.

برای مثال، در موضوع شورابه‌های کشاورزی، سازمان جهاد کشاورزی و مجموعه اقتصادی استان به‌شدت اصرار داشتند که ما طرح توسعه کشت گل‌خانه‌ها را به‌عنوان یک طرح کشوری گسترش دهیم. بنده شخصاً چند روز وقت گذاشتم و از شمال به جنوب استان گزارشی مفصل تهیه کردم. با حضور مجموعه مدیران استانی این گزارش را ارائه دادم و در آن به‌صراحت توضیح دادم که وضعیت آب‌شیرین‌کن‌ها به چه صورت است و خروجی آن‌ها چگونه و به چه شکلی در حال رهاسازی است. در بحث فاضلاب بوشهر نیز، از سال ۱۳۹۳ تاکنون، در همان منطقه‌ای که به آن اشاره شد، دو پروژه مطالعاتی با دو مشاور مختلف انجام شده است. ما نیز به‌صورت مرتب گزارش‌های متعددی تهیه کرده‌ایم و آن‌ها را در جلسات مختلف ارائه داده‌ایم. مدیرعامل هم کاملاً در جریان قرار دارد، اما تا به امروز، به دلایلی مانند نبود یک سیستم جامع، عدم هماهنگی بین‌سازمانی، و از همه مهمتر، ملاحظات داخلی موجود در سازمان‌ها، این اقدامات به نتیجه نرسیده‌اند. نمونه‌اش همین موضوع چاه‌های غیرمجاز است. آب منطقه‌ای می‌رود و چاه‌های غیرمجاز را شناسایی می‌کند، کار حقوقی انجام می‌دهد و حتی حکم قضایی هم می‌گیرد، اما در نهایت همان چاه‌های غیرمجاز که ده یا بیست سال از فعالیت آن‌ها می‌گذرد، همچنان فعال‌اند و کسی مانع آن‌ها نمی‌شود. دلیلش این است که سایر سازمان‌ها همکاری لازم را ندارند و ورود نمی‌کنند. در نتیجه، آن سازمان به تنهایی نمی‌تواند کاری از پیش ببرد.

عمده فعالیت مردم بوشهر مرتبط با دریا، صید و ماهیگیری است. پس وقتی آب آلوده باشد، یعنی کل اکوسیستم دریایی از بین رفته و در نهایت سلامت انسان‌ها نیز تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد. در این زمینه، شما چه راهکارهایی را پیشنهاد می‌دهید؟ چه اقدامات بازدارنده‌ای می‌توان اتخاذ کرد برای جلوگیری از ورود فاضلاب شهری به دریا؟ در گزارش‌هایی که حتی مرکز پژوهش‌های مجلس هم ارائه داده، مشخص شد که قانون خاص و الزام‌آوری در این حوزه وجود ندارد. آیا شما تجربه‌ای در این زمینه داشته‌اید که به نهادهای مسئول ارائه داده باشید؟

همان‌طور که اشاره کردم، از سال ۱۳۹۳ تا به امروز به‌صورت مداوم روی این موضوع کار کرده‌ایم و گزارش‌های متعددی را نیز ارائه داده‌ایم. حتی خودمان، بدون اینکه به‌صورت رسمی وظیفه‌ای در این زمینه داشته باشیم، اقدام به جذب سرمایه‌گذار کرده‌ایم و سرمایه‌گذاران را نیز به پروژه وارد کرده‌ایم. اما مسئله اصلی همچنان پابرجا است؛ مشکل در نبود هماهنگی بین‌سازمانی، ضعف در پشتیبانی و حمایت مؤثر از سوی مرکز (تهران و مجموعه دولت) و در مجموع، کم‌توجهی دولت به استان بوشهر است. به همین دلیل، علی‌رغم تمام پیگیری‌ها و تلاش‌هایی که انجام شده، این موضوع به نتیجه مشخصی نرسیده است. در رابطه با این موضوع، مثالی برایت شما می‌زنم: کل کسری مخزن در تمام دشت‌های استان بوشهر به ۲۵ میلیون مترمکعب می‌رسد. تنها در محدوده شهر بوشهر، حجم پساب به ۱۸ میلیون مترمکعب می‌رسد. کیفیت این حجم پساب، از نظر شوری، برای اغلب مصارف، به‌ویژه فضای سبز و صنعت، از ۹۶ درصد منابع آبی استان بوشهر بهتر است. اما در همین استان با این‌همه مشکلات فرونشست و شوری و مشکلات دیگر، ۳۰ سال است که وارد دریا می‌شود. طرح‌های مختلفی برای جلوگیری از این وضعیت تهیه شده‌اند، از جمله طرحی که امروز شخصاً پیگیری کردم؛ این طرح به طور کامل تهیه و تدوین شده و به دادستان بوشهر ارسال شده است، اما متأسفانه به نتیجه مشخصی نمی‌رسد. توجه کنید که این آب به همین شکل هدر می‌رود. شهرستان بوشهر در استانی که جزء استان‌های ثروتمند یا ثروتمندترین استان کشور است تنها مرکز استانی است که آب در آن جیره‌بندی است و این آب حداقل می‌تواند برای فضای سبز استفاده شود، اما این کار انجام نمی‌شود.

سیمای کلی از مسئله آلودگی آب‌های زیرزمینی در استان لرستان مطرح بفرمایید؟

بحث آلودگی منابع آب در نقاط مختلف کشور به دلیل تنوع منابع آبی به شکل‌های متفاوتی بروز پیدا کرده است. منطقه‌ای که ما در آن قرار داریم، قطعاً ویژگی‌های خاص خود را دارد. در مناطق شمالی کشور وضعیت به‌گونه‌ای دیگر است و در مناطق صنعتی و شهرهای بزرگ مانند تهران، این موضوع به شکل متفاوتی خود را نشان می‌دهد. می‌توانم به‌عنوان مقدمه‌ای کلی درباره آلودگی منابع آبی در ابتدا بگویم آب یکی از اساسی‌ترین عناصر حیات است و یکی از سه بخش اصلی محیط‌زیست را تشکیل می‌دهد. این عنصر نقش مهمی در پایداری محیط‌زیست، اقتصاد و سلامت جامعه ایفا می‌کند. متأسفانه، منابع آبی در کشور ما به دلایل مختلفی تحت تأثیر آلودگی قرار گرفته‌اند. یکی از دلایل اصلی این آلودگی، رشد جمعیت و توسعه صنایع است. بحث کشاورزی که به‌ویژه در مناطق غربی کشور خیلی نمود دارد، همچنین بحث آلودگی ناشی از فاضلاب‌ها، به‌خصوص در شمال کشور، مشهود است و این موضوع تهدید جدی برای کیفیت منابع آب به شمار می‌رود. کاهش کیفیت آب در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، به‌ویژه در منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، آسیب‌های جدی به محیط‌زیست و اکوسیستم‌های طبیعی وارد کرده و دسترسی به آب سالم برای مصارف انسانی و کشاورزی را با خطرات جدی مواجه کرده است. در سال‌های اخیر، یکی از مشکلات بارز در منابع آبی ما، تخلیه فاضلاب‌ها، اعم از فاضلاب‌های صنعتی و شهری، به طور مستقیم به منابع آبی است. همچنین، رواناب‌های ناشی از کشاورزی که به طور مستقیم به منابع آبی تخلیه می‌شوند، به این معضل دامن می‌زنند.

استفاده بی‌رویه از کودها و سموم در کشاورزی نیز به آلودگی منابع آب می‌افزایند و این آلاینده‌ها نه تنها به منابع آب‌های سطحی راه پیدا می‌کنند، بلکه به سفره‌های آب زیرزمینی نیز نفوذ می‌کنند. در نتیجه، این مسائل به شدت بر کیفیت آب تأثیر گذاشته و نیازمند توجه و اقدام فوری هستند. منابع آب زیرزمینی که جز منابع اصلی کشور محسوب می‌شوند، به‌ویژه در شرایطی که تخلیه مستقیم فاضلاب‌های صنعتی، شهری و کشاورزی و نفوذ آن‌ها به سفره‌های آب زیرزمینی در بسیاری از نقاط کشور، به‌ویژه در مناطق خشک‌تر مانند مناطق مرکزی ایران، وضعیت بحرانی‌تری به خود گرفته‌اند، اهمیت بالایی دارند. به‌طورکلی، باید گفت که مسئله آلودگی منابع آب واقعاً نیازمند درک دقیق پیامدهای محیط‌زیستی و اجتماعی است و این موضوع باید با اتخاذ یک سری راهکارهای علمی برای پیشگیری از آلودگی‌ها و همچنین کنترل آن‌ها در صورت وقوع، مورد توجه قرار گیرد. برای این منظور، استفاده از فناوری‌های نوین و تغییر در الگوی مصرف منابع آبی می‌تواند نقش مهمی در بهبود وضعیت فعلی منابع آب ایفا کند و از بدتر شدن شرایط جلوگیری نماید. اگر بخواهیم در مورد استان لرستان، صحبت کنیم، باید بگوییم که این استان یکی از استان‌های پرباران در کشور است و حدود ۱۲ درصد از آب‌های سطحی کشور در استان لرستان وجود دارد. بااین‌حال، مشکلی که برای استان ما وجود دارد این است که با وجود این منابع آبی فراوان، مدیریت و کنترل مناسبی بر روی آن‌ها صورت نمی‌گیرد. به‌عبارت دیگر، حجم بالای آب ورودی به شکل نامناسبی خارج می‌شود. به دلیل عدم وجود مخازن کافی برای ذخیره‌سازی آب، توزیع بارندگی در استان ما از نظر مکانی و زمانی نامناسب است. در اوقات مختلف، توزیع مکانی بارندگی در استان به شکل مطلوبی انجام نمی‌شود و این موضوع به چالش‌های جدی در مدیریت منابع آبی منجر می‌شود. از نظر زمانی نیز وضعیت به همین شکل است و این موضوع باعث شده که متأسفانه حجم زیادی از آب‌های بارندگی در استان لرستان به شکل نامناسبی هدر برود. با وجود اینکه ما شش سد مهم در استان لرستان داریم، اما حجم آبی که در استان لرستان وجود دارد، در مقایسه با حجم مخازن سدهای کشور، بسیار کم است. به‌طورکلی، سهم استان لرستان از مخازن آب کشور کمتر از نیم درصد است. باتوجه‌به موقعیت جغرافیایی استان و بارندگی‌های موجود، نیاز به مدیریت صحیح این منابع آبی احساس می‌شود تا بتوان از این موهبت طبیعی به نحو مطلوبی بهره‌برداری کرد.

شما فرمودید که بخش زیادی از آب از استان خارج می‌شود، منظور این است که به استان‌های دیگر می‌رود؟ چطور از دسترس خارج می‌شود؟

بله دقیقاً منظور این است که بخش زیادی از آب‌های سطحی استان لرستان به‌صورت طبیعی یا مهندسی شده (از طریق رودخانه‌ها، سدها و طرح‌های انتقال آب) به استان‌های دیگر می‌رود و عملاً از دسترس بهره‌برداری محلی در لرستان خارج می‌شود. متأسفانه، به دلیل هدررفت آب، ممکن است این منابع به استان‌های دیگر منتقل شوند، اما در واقع نمی‌توانند نیازهای آبی استان لرستان را تأمین کنند. استان لرستان به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود، به‌ویژه شهر خرم‌آباد که شکل دره‌ای دارد و این باعث میشود با چالش‌های جدی در تأمین آب مواجه گردد. این وضعیت به دلیل عدم وجود مخازن کافی برای ذخیره‌سازی آب و جریان آب در دره‌های عمیق، باعث می‌شود که آب به‌راحتی از استان خارج شود. با وجود اینکه استان لرستان از نظر منابع آبی غنی است، به دلیل موقعیت جغرافیایی و عدم وجود مخازن مناسب، همواره با مشکل کم‌آبی مواجه است و به‌نوعی استان لرستان خشکسالی‌های مکانی و زمانی را تجربه می‌کند.

باتوجه‌به تخصص شما بفرمایید چه منابع آلوده‌کننده‌ای نقش مهمتر و اثرات مخرب‌تری دارند؟

از منابع دیگر آلاینده در استان لرستان مدیریت ضعیف پسماندهای شهری و صنعتی می‌باشد، از جمله دفن غیراصولی زباله در حاشیه شهرها، نبود تفکیک زباله خشک و تر، نشت شیرابه زباله‌ها به منابع خاک و آب که به‌ویژه سبب آلودگی منابع آب‌های زیرزمینی می‌شود. در مورد منابع آلوده‌کننده، باید گفت که آلودگی منابع آبی معمولاً از سه منشأ اصلی ناشی می‌شود: کشاورزی، صنعتی و خدمات شهری که معمولاً فاضلاب‌ها را شامل می‌شود. استان لرستان به دلیل عدم وجود صنایع بزرگ و محدودیت در تعداد صنایع، کمتر تحت تأثیر آلودگی‌های صنعتی قرار دارد؛ بنابراین، مهمترین منابع آلودگی آب در استان لرستان، بیشتر بخش کشاورزی و فاضلاب‌های شهری و روستایی هستند. متأسفانه، بسیاری از مناطق استان لرستان به سیستم‌های تصفیه فاضلاب مجهز نیستند و به همین دلیل، پساب‌ها و رواناب‌های کشاورزی و فاضلاب‌های شهری و روستایی به‌عنوان مهمترین منابع آلودگی در استان لرستان شناخته می‌شوند. کشاورزی در استان لرستان، به‌ویژه در دشت‌های حاصلخیز مانند خرم‌آباد، رونق زیادی دارد، اما استفاده بی‌رویه از کودها و سموم شیمیایی برای دفع آفات کشاورزی به‌خصوص کودهای نیتروژنی، کودهای فسفاتی، به آلودگی منابع آبی می‌افزاید. متأسفانه، به آب‌های سطحی و سپس به آب‌های زیرزمینی نفوذ می‌کنند و این امر باعث آلودگی منابع آبی در استان لرستان می‌شود. به‌عنوان‌مثال، آب‌های سطحی که به طور خاص و برجسته در استان لرستان وجود دارند، شامل رودخانه خرم‌رود که به طور مستقیم از شهر خرم‌آباد عبور می‌کند و رودخانه کشکان است که به‌عنوان یکی از رودخانه‌های مهم استان لرستان شناخته می‌شود. این رودخانه‌ها متأسفانه تحت تأثیر رواناب‌های کشاورزی و فاضلاب‌های شهری و روستایی قرار دارند. بسیاری از روستاها به دلیل عدم وجود سیستم‌های تصفیه کافی، به طور مستقیم فاضلاب‌های خود را به منابع آبی تخلیه می‌کنند. حتی در مناطقی که سیستم تصفیه وجود دارد، این سیستم‌ها معمولاً ناکافی هستند و این موضوع منجر به آلودگی میکروبی و وجود مواد آلی در رودخانه‌ها می‌شود. در نتیجه، این آلودگی‌ها

به آب‌های شرب و سفره‌های آب زیرزمینی منتقل می‌شوند. علاوه‌براین، صنایع کوچک در استان نیز به دلیل عدم وجود سیستم‌های تصفیه مناسب، می‌توانند منابع آلودگی را به آب‌های سطحی و زیرزمینی وارد کنند. این آلودگی‌ها شامل مواد شیمیایی مانند فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی هستند که به‌شدت بر کیفیت منابع آبی تأثیر می‌گذارند.

در استان لرستان سیستم جمع‌آوری فاضلاب وجود دارد یا خیر؟

استان لرستان در حال حاضر دارای سیستم جمع‌آوری فاضلاب در برخی شهرهای بزرگ است، اما این سیستم‌ها ناکامل، فرسوده یا دارای پوشش محدود هستند. بیشتر مناطق شهری و تقریباً همه مناطق روستایی فاقد شبکه استاندارد فاضلاب هستند که این امر به آلودگی شدید منابع آب و خاک استان منجر شده است. در مورد سیستم جمع‌آوری فاضلاب در شهر خرم‌آباد، باید گفت که در استان لرستان، حدود چهار یا پنج شهر به سیستم تصفیه فاضلاب شهری مجهز هستند، اما روستاها و برخی شهرستان‌های کوچک هنوز به این سیستم‌ها دسترسی ندارند. همچنین، سیستم‌های تصفیه فاضلاب صنایع، اگر وجود دارند، اما معمولاً ناکافی هستند و کامل نیستند و نمی‌توانند به طور مؤثر فاضلاب صنعتی را تصفیه کنند.

در استان‌های دیگر که با متخصصان این حوزه مصاحبه کردیم گفته شده سیستم تصفیه فاضلاب داریم؛ ولی آن ظرفیت لازم را ندارند، در مورد استان لرستان، آیا سیستم تصفیه، فاضلاب شهر را تصفیه می‌کنند و ظرفیت کافی دارند؟

در لرستان، مانند بسیاری از استان‌های دیگر، وجود تصفیه‌خانه به‌تنهایی به معنای تصفیه کامل فاضلاب شهری نیست .تصفیه‌خانه‌ها وجود دارند؛ اما ظرفیت آن‌ها کافی نیست و بخش قابل‌توجهی از فاضلاب استان یا اصلاً تصفیه نمی‌شود یا به‌صورت ناقص تصفیه شده وارد طبیعت می‌شود. برای استان لرستان، به‌طورکلی، شهرها به نسبت جمعیت خود به سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب مجهز هستند. به‌عنوان‌مثال چهار یا پنج شهر اصلی استان به سیستم تصفیه فاضلاب شهری مجهز هستند و ظرفیت کافی برای مدیریت فاضلاب‌های شهری را دارند. ما نیز از سیستم تصفیه فاضلاب شهری خرم‌آباد بازدید داشتیم که در آن تصفیه انجام می‌شود. بااین‌حال، فاضلاب‌های صنعتی معمولاً به سیستم‌های تصفیه مجهز نیستند و تجهیزات آن‌ها کامل نیست. فقط بحث ظرفیت نیست و تجهیزاتشان کامل نیست. در استان لرستان در برخی صنایع، مشکلاتی در زمینه تجهیزات وجود دارد که مانع از تصفیه کامل فاضلاب‌ها می‌شود. در نتیجه، فاضلاب‌ها به‌صورت ناقص یا بدون تصفیه به منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی وارد می‌شوند.

در مورد روش‌های نوین تصفیه در ایران در سطح دانشگاهی، و به لحاظ اجرایی و کاربردی تجهیزات معمولی که نیاز است برای تصفیه بفرمایید و آیا در کشور برای اجرای راهکارهای نوین تصفیه به‌صورت پایلوت انجام شده است؟ یا هنوز به آن مرحله نرسیدیم و به‌صورت روش‌های معمول باید تصفیه انجام گیرد؟

در خصوص فناوری‌های نوین، باید گفت که این فناوری‌ها در کشور ما درحال‌توسعه هستند و در زمینه‌های تحقیقاتی و پژوهشی کارهای خوبی انجام شده است. تصفیه فاضلاب معمولاً شامل سه مرحله است: تصفیه اولیه (فیزیکی)، تصفیه ثانویه (بیولوژیکی) و تصفیه پیشرفته. اکثر سیستم‌های تصفیه فاضلاب در کشور ما مراحل اولیه و ثانویه را به‌خوبی انجام می‌دهند، اما در زمینه تصفیه پیشرفته، وضعیت متفاوت است و استفاده از فناوری‌های نوین در نقاط مختلف کشور متفاوت است. تحقیقات و مطالعات خوبی در زمینه فناوری‌های نوین انجام شده است. به‌عنوان مثال استفاده از روش‌های مختلف مانند بیو راکتورهای غشایی می‌تواند به بهبود کیفیت منابع آب کمک کند. مراحل تصفیه اولیه و ثانویه به‌خوبی انجام می‌شود، در مرحله تصفیه پیشرفته، فرآیند نانو اسمز معکوس، فرآیند کربن فعال جزو فناوری‌های نوین و تصفیه پیشرفته هستند که نقش خیلی خوبی را در بهبود کیفیت منابع آب می‌تواند داشته باشد. در قسمت‌هایی از کشور ما اجرایی شده است. واقعیت این است که در همه جا اجرایی نشده است. بااین‌حال موانع متعددی از جمله مسائل زیرساختی و تأمین بودجه در مسیر اجرایی شدن این فناوری‌ها وجود دارد. در استان لرستان، به‌ویژه در شهر خرم‌آباد، پروژه‌هایی در حال انجام است که توسط شرکت‌های دانش‌بنیان به‌منظور بهبود روش‌های تصفیه فاضلاب در حال بررسی و اجرا هستند که بحث تصفیه پیشرفته و استفاده از بیو راکتورهای غشایی است که ما به‌عنوان ناظر پروژه بررسی کردیم، در مقیاس آزمایشگاهی نتایج خیلی خوبی به‌دست آورند. اما برای اینکه این پروژه‌ها به مرحله اجرایی برسند، نیاز به به‌روزرسانی زیرساخت‌های قدیمی و هماهنگی بین سازمان‌های مختلف مانند محیط‌زیست و شرکت‌های آب منطقه‌ای وجود دارد. اگر این موانع برطرف شوند، فناوری‌های نوین می‌توانند نقش مهمی در سیستم‌های تصفیه فاضلاب و بهبود کیفیت منابع آبی ایفا کنند. یکی از موضوعات دیگری که بحث فناوری‌های نوین در کل کشور مطرح است بحث اقتصاد پساب است، این بحث کمبود آبی که در کشور ما با آن مواجه هستیم و اینکه می‌خواهند به اجرا برسانند. بحث اقتصاد پساب به این ترتیب است که ما بتوانیم از پساب‌های تصفیه شده مجدداً استفاده کنیم. این پساب‌هایی که تصفیه شدند مجدداً در مصارف کشاورزی و صنعت استفاده شوند. چون در مصارف شرب و شهری باید به استانداردهای لازم برسد؛ ولی اگر این تصفیه به‌خوبی انجام گیرد حتی می‌تواند در مصارف شهری استفاده شود. به‌ویژه در این شرایط خشکسالی و کم‌آبی که الان کشور ما با آن درگیر است؛ بنابراین استفاده از بحث اقتصاد پساب بسیار می‌تواند کمک‌کننده باشد به کاهش آلودگی و صرفه‌جویی در مصرف آب، همچنین می‌تواند در بحث اقتصاد که درآمدزایی داشته باشد. شرکت‌های زیادی در این مورد

سرمایه‌گذاری کردند که اگر با استفاده از روش‌های نوین، کیفیت پساب خروجی به‌گونه‌ای برسد ما آن را از شما خریداری می‌کنیم؛ یعنی در واقع می‌تواند درآمدزایی داشته باشد برای سیستم تصفیه‌خانه و این بحث اقتصاد را مطرح نماید. نیاز به آموزش هست؛ یعنی افراد متخصص باید در این زمینه ورود پیدا کنند و با این تکنولوژی‌ها آشنا شوند. بحث دسترسی به تجهیزات است و در واقع بحث سرمایه اولیه و بودجه که اگر اینها تأمین گردد، استفاده از فناوری‌های نوین هم کاملاً می‌تواند اجرایی گردد. در بحث آزمایشگاه و پایلوت و همچنین تحقیقات، فناوری‌های نوین در کشور ما انجام شده است و نتایج خیلی خوبی هم به‌دست آورده است. اما در بحث کاربردی این چالش‌ها و موانع اگر برداشته شود می‌تواند اجرایی شود و در شرایط فعلی در صرفه‌جویی منابع آب و کاهش آلودگی‌ها کمک‌کننده باشد.

منابع آب تأمین‌کننده شرب در استان لرستان آیا فقط منابع آب سطحی است یا از چاه هم استفاده می‌شود؟

از چاه هم استفاده می‌شود اتفاقاً در استان لرستان مرسوم است. همان‌طور که گفته شد یکی از منابع آلودگی آب در استان لرستان، بحث رواناب‌های کشاورزی است. این آلودگی‌ها می‌توانند به منابع آب زیرزمینی هم نفوذ کند که نفوذ پیدا کرده است. نیترات در منابع آب زیرزمینی به دلیل استفاده از کودهای نیتروژنه داریم و در واقع باید تصفیه گردد. در مصرف آب شرب، در بخش تصفیه منابع آب سطحی و زیرزمینی، مراحل تصفیه‌ای در واقع صورت می‌گیرد و بعد به مصرف‌کننده می‌رسد. اما منابع تأمین آب در استان لرستان، منابع آب سطحی و منابع آب زیرزمینی می‌باشد.

مشکلاتی باعث شده که به این وضعیت برسیم؟ آیا بی‌تدبیری در سیستم مدیریتی وجود داشته است؟ آیا برنامه‌ای برای مدیریت منابع آبی و آلودگی‌ها وجود نداشته یا برنامه‌های موجود ناکافی بوده‌اند؟ به‌عنوان‌مثال، آیا مقرراتی برای استفاده از سموم کشاورزی وجود دارد که کشاورزان را ملزم به رعایت آن کند و از استفاده بی‌رویه جلوگیری نماید؟

یکی از دلایل ممکن برای این وضعیت، عدم وجود صنایع بزرگ در استان لرستان است که از یک سو می‌تواند به نفع محیط‌زیست استان شده است، اما از سوی دیگر، به ضرر اقتصاد و اشتغال استان تمام می‌شود. واقعیت این است که عدم وجود صنایع بزرگ در استان لرستان، به‌نوعی می‌تواند به‌عنوان یک مزیت در نظر گرفته شود، زیرا آلودگی‌های ناشی از صنایع کمتر است. اما این وضعیت همچنین به بیکاری و محرومیت‌های اجتماعی و اقتصادی در استان منجر شده است. در مقایسه با شهرهای بزرگ و صنعتی مانند مشهد و تبریز، آلودگی در بخش‌های مختلف آب، خاک و هوا در استان لرستان شاید کمتر باشد، اما این سؤال مطرح می‌شود که چرا به این وضعیت رسیده‌ایم، عوامل مختلفی در این زمینه نقش دارند. یکی از این عوامل، مشکلات مدیریتی و ضعف در اجرای قوانین و مقررات کنترل آلودگی آب و حفاظت از محیط‌زیست است. هرچند که چارچوب‌های قانونی وجود دارد، اما در عمل، اجرای این قوانین ضعیف است، قوانین وجود دارد؛ ولی در اجرا ضعیف می‌باشد. به‌عنوان‌مثال، حد آستانه‌هایی که برای آلاینده‌ها تعریف شده مثل نیترات که در استان لرستان یک آلاینده محسوب می‌شود هم در آب و هم در خاک، ممکن است ناکافی باشد و جریمه‌های تعیین شده برای صنایع آلاینده نیز اغلب کم و ناچیز است؛ بنابراین، لازم است که این مقررات با استانداردهای بین‌المللی تطبیق داده شوند. از سوی دیگر، آموزش و آگاهی به جامعه نیز بسیار مهم است. باید به آموزش محیط‌زیست از سنین پایین توجه شود، به‌طوری‌که این آموزش‌ها از مدارس و حتی مهد کودک‌ها آغاز شود. افزایش آگاهی عمومی می‌تواند تأثیر زیادی بر کاهش آلودگی‌ها داشته باشد. همچنین، تغییرات اقلیمی که امروزه با آن مواجه هستیم، از جمله افزایش دما و کاهش بارندگی، نیز بر منابع آبی تأثیرگذار است و نقش مهمی در این زمینه ایفا می‌کند. در کنار نقش‌های مدیریتی و قوانین، آموزش و نظارت، تغییرات اقلیمی نیز تأثیرات قابل توجهی بر منابع آبی دارند. این تغییرات به دلیل فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه از سوی صنایع و کارخانه‌ها، به وجود آمده‌اند که به‌صورت غیراصولی عمل کرده‌اند. در سطح جهانی، گازهای گلخانه‌ای تولید شده و به اقلیم وارد شده‌اند که این امر موجب گرمایش جهانی شده است. با افزایش دما و کاهش بارندگی‌ها، دو عامل اصلی که بر منابع آبی به‌شدت تأثیر می‌گذارند، به وجود آمده است؛ بنابراین، می‌توان گفت که این عوامل نیز به کمبود منابع آبی و آلودگی‌های ناشی از تغییرات اقلیمی تأثیرگذار بوده‌اند. اگر بخواهیم به‌صورت جامع به این موضوع بپردازیم، می‌توان گفت که مجموعه‌ای از عوامل دست به دست هم داده‌اند تا وضعیت کنونی به وجود آید. برای بهبود این وضعیت، افزایش آگاهی عمومی و اتخاذ راهکارهای سازگاری، راهکارهای کاهش و پیشگیری در بحث تغییرات اقلیمی می‌تواند مؤثر باشد. اما متأسفانه، این اقدامات نیازمند زمان طولانی‌مدت هستند و نتایج آن‌ها به‌سرعت قابل مشاهده نخواهد بود.

در استان لرستان، یکی از چالش‌های پیش‌روی مدیریت منابع آب، ضعف نهادی و سازمانی است. در مورد نقش سازمان‌های مردم‌نهاد در نظارت بر آلودگی آب‌های زیرزمینی به چه صورتی است و اینکه تا چه اندازه مؤثر بوده است؟

به‌ویژه در زمینه نظارت بر آلودگی آب‌های زیرزمینی، نقش سازمان‌های مردم‌نهاد (NGO) در نقاط مختلف کشور می‌تواند بسیار مهم باشد. در استان لرستان، سازمان‌های مردم‌نهاد متعددی وجود دارند که در زمینه نظارت و افزایش آگاهی عمومی فعالیت می‌کنند. به‌عنوان‌مثال خانه‌های محیط‌زیست که در سال‌های اخیر توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست تأسیس شده‌اند، در استان لرستان فعال بوده و به آموزش جوامع محلی کمک کرده‌اند. همچنین به طور خاص در دانشگاه لرستان، خانه فناور محیط‌زیست جهاد دانشگاهی استان و در شهرهای استان لرستان هم به‌صورت پراکنده، مراکز آموزشی و مدارس این خانه‌های محیط‌زیست را در آنجا

احداث شده و فعالیت می‌کنند. مأموریت آن‌ها هم بیشتر در بحث‌های آموزشی بوده است. در استان لرستان، آموزش جوامع محلی توسط اداره حفاظت محیط‌زیست به‌صورت پر رنگ عمل کرده است. در چند سال اخیر بحث آموزش جوامع محلی، عشایر و روستاییان به‌صورت خوبی اقدام گردیده است. بااین‌حال تعداد این سازمان‌ها و فعالیت‌های آن‌ها محدود است و نتوانسته‌اند به طور کامل تأثیرگذار باشند. به‌عنوان‌مثال، کمپینی که برای جلوگیری از تخلیه فاضلاب روستاها در استان لرستان راه‌اندازی شده، موفق به افزایش آگاهی و جلوگیری از آلودگی شده است، اما محدودیت‌های مالی، عدم دسترسی به یکسری از تجهیزات و عدم حمایت قانونی، اثربخشی این فعالیت‌ها را کاهش داده است. یکی از NGOهایی که موفق عمل کرده است در بحث آلودگی آب رودخانه کشکان که یکی از رودخانه‌های مهم در استان لرستان است کاملاً توانسته نقش موفقی را در کاهش آلودگی داشته باشد. اما متأسفانه اثربخشی کمی داشته است؛ ولی من شاهد هستم فعالیت‌هایی شروع شده است اینکه نقش پررنگ‌تری داشته باشد و اثرگذاری بیشتری داشته باشد نیازمند زمان بیشتری می‌باشد و بحث محدودیت‌هایی که بر سر راهشان وجود دارد نکته مهمی است.

در زمینه سیستم‌های پایش کیفی آب در استان لرستان بفرمایید؟

اگرچه سیستم‌هایی برای پایش منابع آبی وجود دارد، اما نبود تجهیزات کافی و عدم یکپارچگی داده‌ها، کارایی این پایش‌ها را تحت‌تأثیر قرار داده است. پایش به‌تنهایی کافی نیست و باید به همراه اقدامات مؤثر برای تصفیه و مدیریت منابع آبی انجام شود. در واقع نبود سیستم‌های کافی برای تصفیه، عملکرد پایش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به دلیل اینکه پایش به‌تنهایی کافی نمی‌باشد. اینکه پایش انجام شود و مشخص گردد منابع آبی دارای چه آلودگی‌هایی می‌باشند و میزان آلودگی‌شان چقدر است اگر مشخص نشود در واقع آن پایش بی‌نتیجه خواهد بود. در استان لرستان، مانع اصلی در این خصوص، عدم وجود تجهیزات پیشرفته است. در دهه‌های قبلی یکی از معضلات نبود نیروی متخصص بوده است. در نهایت، وجود نیروی متخصص و یک سیستم جامع برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها نیز از دیگر نیازهای اساسی در این زمینه است. داده‌های پراکنده و عدم یکپارچگی آن‌ها، تحلیل و ارزیابی وضعیت منابع آبی را دشوار می‌سازد و این خود یکی از چالش‌های بزرگ در مدیریت منابع آب در استان لرستان به شمار می‌آید. با همکاری دانشگاه‌ها و جذب سرمایه‌گذاران، می‌توان تا حد زیادی مشکلات موجود در زمینه پایش و مدیریت منابع آب را کاهش داد. بااین‌حال یکی از مشکلات اصلی این است که داده‌ها پراکنده هستند و یک سیستم یکپارچه برای جمع‌آوری و ارائه این اطلاعات وجود ندارد. همچنین، نبود تجهیزات کافی مانع از انجام پایش مؤثر می‌شود، حتی اگر داده‌ها موجود باشند. در واقع، فرآیند تصفیه و رفع آلودگی باید به طور مؤثری انجام شود.

در مورد اینکه داده‌ها به‌راحتی در اختیار پژوهشگران قرار نمی‌گیرد بفرمایید؟

به نکته مهمی اشاره شده است، این موضوع در استان لرستان نیز وجود دارد و داده‌ها و اطلاعات به‌راحتی در دسترس محققان و دانشجویان قرار نمی‌گیرد. به‌عنوان‌مثال من خودم در یک پروژه تحقیقاتی در زمینه آلودگی خاک ناشی از پتروشیمی در خرم‌آباد با مشکلاتی مواجه شدم. پتروشیمی همکاری لازم را نکرد و اجازه ورود و نمونه‌برداری به ما داده نشد. حتی با وجود نامه‌نگاری‌های متعدد، حتی از طرف سازمان محیط‌زیست نیز اجازه ورود به ما داده نشد و اعلام کردند که آلودگی وجود ندارد. این ترس از انجام تحقیقات و اعلام آلودگی‌ها از طرف آن صنایع، به عدم همکاری آن‌ها منجر شده است. صنایع نگران هستند که اگر تحقیقاتی انجام شود و آلودگی آن‌ها مشخص شود، ممکن است فعالیت‌های آن‌ها تحت تأثیر قرار گیرد یا حتی کارخانه‌ها تعطیل شوند. به همین دلیل، اطلاعات و داده‌ها به‌راحتی در اختیار محققان قرار نمی‌گیرد و این موضوع مانع بزرگی برای انجام تحقیقات علمی است. برای انجام تحقیقات مؤثر، لازم است که صنایع با دانشگاه‌ها همکاری کنند و ارتباط بین صنعت و دانشگاه برقرار شود. این ارتباط می‌تواند به شناسایی آلودگی‌ها و ارائه راهکارهای مؤثر برای کاهش آن‌ها کمک کند. اگر صنایع از این همکاری استقبال کنند، می‌توانند از نتایج تحقیقات بهره‌مند شوند و به بهبود وضعیت محیط‌زیست کمک کنند. متأسفانه، در استان لرستان، این ارتباط به‌خوبی برقرار نیست و علاوه بر پراکندگی داده‌ها، حتی در صورت وجود داده‌ها، همکاری لازم برای نمونه‌برداری و تحقیقات علمی انجام نمی‌شود. این موضوع نه‌تنها به عدم دسترسی به اطلاعات منجر می‌شود، بلکه شکاف‌های داخلی در سازمان‌ها مانعی در کارهای تحقیقاتی ایجاد می‌کند. در زمینه تحقیقات علمی، یکی از موانع اصلی برای ارائه راهکارهای مؤثر، عدم ارتباط و هماهنگی بین دانشگاه‌ها و صنایع آلاینده است. این ارتباط می‌تواند به شناسایی و کاهش آلودگی‌ها کمک شایانی کند، اما متأسفانه این هماهنگی به طور کافی وجود ندارد. برای حل مشکلات کنونی، نیاز به مشارکت بیشتر بین صنایع، سازمان محیط‌زیست و وزارتخانه‌ها وجود دارد.

در مورد داده‌ها و اطلاعات، آیا ما در ایران به اطلس‌های مربوط به آلودگی دسترسی داریم؟

اطلس آلودگی خاک" در ایران در مقیاس محدود و به‌صورت منطقه‌ای یا موردی تهیه شده است، ایران هنوز فاقد اطلس ملی آلودگی خاک است، ولی در برخی استان‌ها و مناطق، اطلس‌های موضوعی یا نقشه‌های موردی وجود دارد که توسط مراکز تحقیقاتی و نهادهای دولتی تهیه شده است. این موضوع یکی از خلأهای مهم در سیاست‌گذاری محیط‌زیستی و سلامت عمومی کشور محسوب می‌شود. در ایران "اطلس‌های جامع و ملی آلودگی" به‌صورت قابل دسترس عمومی وجود ندارد، اما داده‌های پراکنده، گزارش‌های پروژه‌ای و سامانه‌های محدود در اختیار برخی نهادها است .ایجاد یک

اطلس ملی آلودگی (خاک، آب، هوا) با دسترسی آزاد، می‌تواند گام بزرگی در شفافیت محیط زیستی، پژوهش، و تصمیم‌گیری آگاهانه باشد. دلایل نبود اطلس آلودگی عمومی و جامع در ایران: پراکندگی بین نهادها و نداشتن مرجع واحد داده‌های محیط زیستی، نگاه امنیتی یا نیمه محرمانه به برخی داده‌های محیط‌زیستی، نبود استاندارد داده‌سازی و داده‌خوانی بین سازمان‌ها، کمبود اعتبار برای پایش مستمر در سراسر کشور. در زمینه آلودگی خاک، اطلس وجود دارد که سازمان حفاظت از محیط‌زیست آن را ارائه نموده است که به طور رسمی مصوب و تعیین شده است. از نظر مقررات، ما قوانین مشخصی داریم، اما بسیاری از این قوانین به‌روز نیستند و استانداردهای لازم برای اجرا وجود ندارد. در واقع مشکل اصلی در بحث آلودگی محیط‌زیست همین است. در مورد بحث آلودگی هوا، قانون هوای پاک در ایران وجود دارد، در حقیقت قوانین وجود دارد؛ اما به‌درستی اجرایی نمی‌شود. همچنین، در زمینه منابع آبی و شاخص‌های کیفی، قوانین موجود وجود دارند، اما اجرای آن‌ها با چالش‌هایی مواجه است. به‌طورکلی نیاز به به‌روزرسانی استانداردها و مقررات از نظر بین‌المللی وجود دارد تا بتوانند به طور مؤثر در کنترل آلودگی‌ها و حفاظت از محیط‌زیست عمل کنند. برای مثال جریمه‌ها که می‌تواند نقش بازدارنده‌ای در جلوگیری از آلودگی‌ها ایفا کند و به بهبود وضعیت محیط‌زیست کمک نماید. قوانین ما نیاز به به‌روزرسانی دارند، در واقع قوانین وجود دارند؛ اما تا حد زیادی نیازمند به‌روزرسانی هستند. از طرف دیگر بحث اجرایی شدن قوانین می‌باشد. ما در بحث اجرای قوانین در همه شاخه‌های آب، خاک و هوا ضعیف هستیم.

آیا سیمای کلی از وضعیت آلودگی منابع آب در ایران موجود است؟

به‌طورکلی نداریم؛ ولی به‌صورت جزئی و خاص همان‌طور که گفته شد اطلس آلودگی خاک را داریم؛ ولی اطلس آلودگی آب نداریم. یک "سیمای کلی و کلی‌نگر" از وضعیت آلودگی منابع آب (سطحی و زیرزمینی) در ایران وجود دارد، اما این اطلاعات اغلب پراکنده، غیرشفاف، و در اغلب موارد غیرقابل‌دسترسی عمومی هستند. بااین‌حال نهادهای مسئول، گزارش‌هایی درباره وضعیت منابع آب و چالش‌های کیفی آن منتشر کرده‌اند که تصویر نسبتاً روشنی از وضعیت کلی ارائه می‌دهند.

در مورد گیاه پالایی که برای جذب فلزات سنگین و نیترات پیشنهاد شده بفرمایید، شما به‌عنوان متخصص حوزه محیط‌زیست این روش را پیشنهاد می‌فرمایید؟

یکی از راهکارهای بسیار مهم در کاهش آلاینده‌ها، استفاده از روش‌های گیاهی به‌جای روش‌های شیمیایی است. تحقیقات متعددی در این زمینه انجام شده و تمایل محققان به استفاده از این روش‌ها افزایش یافته است. به‌ویژه، استفاده از گیاهان خاص برای جذب فلزات سنگین و نیترات می‌تواند بسیار مؤثر باشد. در استان لرستان، به علت بحث کشاورزی، نیترات در خاک و آب وجود دارد. بحث گیاه پالایی، به‌عنوان‌مثال، گونه‌های گیاهی خاصی می‌توانند این فلزات سنگین و آلاینده‌ها را جذب کنند؛ مانند علف رتیور که به‌عنوان پالاینده است و همچنین گیاه آفتابگردان که توانایی جذب آلاینده‌ها را دارند. در تحقیقات انجام شده در دانشگاه لرستان، تحقیقی انجام شد با گونه ارغوان که به‌عنوان یک گیاه پالاینده قابلیت جذب فلزات سنگین و نیترات را از خاک و آب آلوده دارد. این گونه‌ها ظرفیت جذب بالایی دارند، این گیاهان به‌خوبی با شرایط اقلیمی کشور ما سازگار هستند و می‌توانند در کاهش آلودگی‌ها نقش مؤثری ایفا کنند. به‌عنوان‌نمونه در مطالعه‌ای که در دانشگاه لرستان انجام شده، گونه ارغوان توانست جذب بالای فلز کادمیم و کروم داشته باشد. در اصفهان، علف رتیور جذب بالایی را در نیترات داشته است. در بحث تالاب‌ها، با استفاده از علف رتیور توانستند حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد نیتراتی که به‌صورت مصنوعی در تالاب‌ها تزریق کرده بودند را جذب کنند. در استان لرستان نیز علف رتیور سازگار با اقلیم منطقه است و می‌تواند نیترات را جذب کند. این نشان‌دهنده قابلیت بالای این گیاه در کاهش آلودگی‌ها است. اگر بتوانیم این روش را در استان لرستان عملیاتی کنیم، به‌ویژه در استفاده از پساب‌های کشاورزی، می‌توانیم کاهش قابل توجهی در آلودگی‌ها مشاهده کنیم. باتوجه‌به تحقیقات، تخمین زده شده که این گیاهان می‌توانند تا ۴۰ درصد آلودگی‌ها را کاهش دهند. اما برای گسترش این روش‌ها، نیاز به حمایت‌های مالی و زیرساخت‌های مناسب داریم. همچنین، این گیاه‌پالایی می‌تواند با سیستم‌های تصفیه موجود (تصفیه فیزیکی و تصفیه بیولوژیکی) ترکیب شوند و کارایی این سیستم‌ها را به طرز چشمگیری افزایش دهند. در نهایت، با ادغام این روش‌های طبیعی با سیستم‌های تصفیه، می‌توان به نتایج بسیار خوبی دست یافت و به بهبود کیفیت آب و خاک کمک کرد. این رویکرد نه‌تنها به کاهش آلودگی‌ها کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار در مدیریت منابع آب و محیط‌زیست مورد استفاده قرار گیرد.

در پایان مورد بحث میکروپلاستیک‌ها صحبتی داشته باشم که در مورد آلودگی منابع آبی در استان لرستان دیده شده است، با وجود اینکه در واقع این آلاینده‌ها نوظهور و جدید می‌باشند؛ اما باز هم مشکل قوانین مربوط به منابع آبی در کشور به‌ویژه در زمینه آلودگی‌ها، به طور جدی احساس می‌شود. با وجود آلاینده‌ها، قوانین و مقررات کافی برای این آلاینده‌ها وجود ندارد و استانداردهایی برای آن تنظیم نشده است که در درازمدت این آلاینده‌ها به شکل میکروپلاستیک‌ها در حوزه‌های مختلف به‌خصوص محیط‌زیست می‌تواند اثرات بلندمدتی بر سلامت و محیط‌زیست ایفا کند. ضرورت دارد که مسئولان محیط‌زیست، به‌ویژه سازمان‌های اجرایی، اقدام به تنظیم و به‌روزرسانی قوانین و استانداردهای مرتبط در این زمینه نمایند که بتوان جلوی این آلاینده‌ها را گرفت و آن را کنترل نمود. این موضوع بسیار مهمی است که در استان لرستان نیز نمود پیدا کرده است و مشکلی که وجود دارد

اینکه هنوز قانونی برای آن وجود ندارد و اســتانداردی هم برای آن تنظیم نشده است.

نکته پایانی:

باتوجه‌به اهمیت منابع آبی لرســتان در تأمین آب شــرب، کشــاورزی و زیســتگاه‌های طبیعی، انجام مطالعات جامع برای شناسایی و اندازه‌گیری میزان میکروپلاستیک‌ها در این منابع ضــروری اســت. این تحقیقات می‌توانند به تدوین راهکارهای مؤثر برای کاهش آلودگی و حفاظت از ســلامت انســان و محیط‌زیست کمک کنند.

مهندس بهروز قهرمانی
معاونت آب و خاک وزارت جهاد کشاورزی

از دیدگاه شــما، مهمترین منشــأ آلودگی منابع آب در ایران چیست؟

منابع و منشأ آلودگی منابع آب در کشــور ما متنوع هســتند. یکی از این منابع وجود سازندهای مختلف گچی، نمکی، مارنی و رادیواکتیو (ســازندهای دارای ســرب، اورانیوم و...) و ســایر سازندهای معدنی مانند مس، آلومینیوم، نیکل و سیانامید در بین لایه‌های سنگی و رسوبی است. آب باران و رواناب‌ها پس از تماس با این ســازندها، به تدریج عناصــر، مواد ســمی و آلاینده‌های خطرناک را وارد آبخوان‌های زیرزمینی، رودخانه‌ها، تالاب‌ها و دریاچه‌ها می‌کنند. سومین عامل، کارهای نسنجیده معدنی، به‌ویژه اســتحصــال و فرآوری کانســارهای با ارزش و کمیاب با اســتفاده از روش‌های قدیمی (مانند هیدرولیز با محلول‌های مختلف اسیدی) است که پساب و پسماندهای جامد بدون بازیافت و ایمن‌ســازی در طبیعت رها می‌شــوند (مانند اســتخراج طلا، نقره و ســرب). از دیگر عوامل آلودگی می‌توان به مصــرف بی‌رویه و گســترده ســموم و کودهای شــیمیایی در بخش کشــاورزی اشــاره نمود که مواد ســمی شیمیایی خطرناک را وارد چرخه زیستی و منابع آب می‌نمایند. این روند از دهه ۴۰ به بعد افزایش یافته و همچنان ادامه دارد. همچنین، رهاســازی و تزریق پســاب‌های خام صــنعتی و فاضلاب‌های خانگی و شهری بدون بی‌خطرسازی به منابع آب و خاک نیز از دیگر عوامل آلودگی اســت. نصــب و کارگذاری فیلترهای صــنعتی اســتاندارد روی خروجی دودکش کارخانه‌ها نیز باعث ورود مواد آلاینده ســمی، خطرناک و انواع ریزگردها به اتمســفر شــده که همراه با بارش‌ها مجدد به منابع آب و خاک وارد می‌شــوند. پســماندهای شــهری که بدون تصــفیه و سم‌زدایی به طبیعت رها می‌شوند یا به درون منابع آب ریخته می‌شــوند، نیز از دیگر عوامل آلودگی هســتند. گاهی نیز منبع آلودگی ناشی از فعالیت‌های هسته‌ای در مراکز و آزمایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها و درمانگاه‌ها می‌باشــد. همچنین، به علت خیز و بالازدگی ماگما در اطراف مناطق آتشــفشــانی، انواع گازها و بخارات و کانســارهای ســمی خطرناک به طور مســتقیم وارد آبخوان‌ها و ســازندهای موجود شــده و منابع آبی را آلوده می‌کنند.

چه تغییراتی در وضــعیت کیفی منابع آب ایران در دهه اخیر مشاهده شده است؟

به لحاظ کیفی، ورود انواع مواد آلاینده به جو و منابع آب و خاک در چند ســال اخیر، طبق گزارش‌ها و تحقیقات موردی و محلی توســط مراکز مختلف آموزشــی، پژوهشــی و بهداشــتی، شــوری آب‌ها و وجود ترکیبات بیماری‌زای ازته (نیترات‌ها و نیتریت‌ها)، سیانامیدها، سولفورها و سولفیدها، ترکیبات گچی و نمکی و رادیواکتیویته به‌صورت غیر اســتاندارد در منابع آب، خاک و بســیاری از محصــولات غذایی و گیاهی افزایش یافته و مشــکلاتی در خصــوص ســلامتی منابع طبیعی قابل تجدید (آب، خاک، جنگل و مرتع، اکوســیســتم‌ها و زیســت‌بوم‌های مختلف گیاهی و جانوری) ایجاد کرده اســت. این مشــکلات شــامل افزایش ســرطان‌ها، ناباروری، بیماری‌های پوســتی، حســاســیتی، تنفســی، قلبی و گوارشــی و همچنین نزول بــارش‌هــای اســیــدی بــه‌ویژه در منــاطق نفت‌خیز و دارای فعالیت‌های نفتی و پتروشیمی است.

آیا ارزیابی جامعی از آلودگی منابع آب در ســطح ملی در دسترس است؟ اگر بله آخرین آن مربوط به چه سالی است؟

نه فکر نمی‌کنم. از طرفی به علت حســاســیت خاص، اگر هم تحقیقی محدود در مواردی (مانند کشف رود مشهد یا زنجان رود شهر زنجان و...) انجام شده باشد، آن را امنیتی کرده و از انتشار عمومی آن جلوگیری می‌شود.

آیا آموزش به جوامع محلی برای کاهش مصــرف کود و ســموم شــیمیایی مؤثر بوده اســت؟ نمونه‌های موفق در کشــور کدام هستند؟

البته بی‌تأثیر نبوده، ولی تأثیر عمیق و فراگیری نداشته است. زیرا خاک‌ها فقیر و تنبل شــده و کشــاورزی بدون مصــرف کودهای شــیمیایی قادر به افزایش تولید نیســت. از طرفی، به علت مصــرف بی‌رویه ســموم شــیمیایی، تعادل بیولوژیک در طبیعت به هم خورده و در اغلب موارد جمعیت و فراوانی انواع آفات و بیماری‌ها افزایش یافته و بدون اســتفاده از ســموم، با طغیان آن‌ها نمی‌توان برخورد کرد. این کار مســتلزم ادامه آموزش، اطلاع‌رســانی و پیگیری و ارزیابی عملکردهای مختلف در تمام سطوح است و زمان‌بر می‌باشد.

تغییرات اقلیمی چگونه بر تشــدید آلودگی آب‌های زیرزمینی مثل افزایش شوری یا تمرکز آلاینده‌ها تأثیر گذاشته است؟

با تشــدید شــرایط گرمایشــی که منجر به کاهش بارش‌ها، افزایش دما و تبخیر و مصــرف بیشــتر منابع آبی از ســطح و زیرزمین شــده، حیات انواع گونه‌های مختلف جانوری و گیاهی

با خطر جدی مواجه شـــده و کیفیت منابع آب ســـطحی و زیرزمینی نیز افت قابل‌توجهی کرده اسـت. حتی در مناطقی از پهنه‌های دشـتی کشـور مانند کرمان، جیرفت، فارس، خراسـان، سـمنان، قزوین، تبریز و همدان به علت برداشـت و پمپاژهای بی‌رویه و افراطی، تعادل هیدرولوژیکی در آبخوان‌های زیرزمینی به هم خورده و آب‌های شور تحتانی وارد آب‌های شیرین شده و آن‌ها را آلوده و غیر قابل اسـتفاده کرده اسـت (مانند شـرق دریاچه ارومیه و...).

به‌طورکلی در خصـوص سـایر موارد پرسـشـی، باید بگویم که سازمان محیط‌زیست علی‌رغم داشتن جایگاه و پایگاه محکم و اختیارات وسـیع، متأسـفانه به دلایل مختلف سـیاسـی و ناکارآمدی عملیاتی و مدیریتی، آن‌طور کـه قـانوناً بـایـد بـه وظایفش عمل کند، موفق نبوده است. برای بهسازی سیستم جمع‌آوری و دفع پسـماندهای جامد تر و خشـک شـهری، شـهرداری‌ها و وزارت کشـور لازم اسـت چرخه‌های مختلفی مانند تخمیر و تبدیل آن‌ها به کودهای آلی، جداسـازی و بازیافت بخش‌های مختلف مانند پلاسـتیک، مواد پلیمری، سـلولوزی، فلزی و... یا چرخه تبدیل زباله به سـوخت‌های گیاهی و نیروگاهی را پیگیری کنند.

شرکت‌های آبفا نیز باید به جمع‌آوری، بازیافت و تصفیه کامل پسـاب‌ها از طریق احداث و تکمیل شـبکه کامل جمع‌آوری و تصـفیه‌خانه‌ها بپردازند. عدم موفقیت کامل آن‌ها تا کنون بیشـتر ریشـه در بی‌توجهی به آینده‌نگری و کم‌توجهی به برنامه‌ریزی دقیق زمان‌بندی شـده و عدم تأمین و اختصـاص به‌موقع اعتبارات لازم، فقر دانش و تکنولوژی تولید مواد و مصالح لازم برمی‌گردد.

مدیریت یکپارچه منابع آب خواست آرمانی و قلبی بسیاری از دسـت‌اندرکاران و متخصـصـین منـابع آبی، طبیعی و محیط‌زیسـتی در حوضـه‌های آبی (اعم از آبخیز تا آبریز) می‌باشد که تا کنون به دلایل سیاسی، نه علمی و فنی محقق نشده است. در نهایت، باید بدانیم بدون داشتن محیط‌زیست و منابع آب، خاک، جنگل و مرتع پاک و سـالم، نمی‌توانیم به ادامه حیات در بستر توسعه پایدار ادامه دهیم و از بحران‌های مختلفی که امروزه با آن‌ها روبه‌رو هسـتیم، مانند آلودگی، کـاهش سـطوح جنگلی و مرتعی، افزایش رسـوبـات و فرسـایش‌های خاکی، خیزش ریزگردها، فرونشـسـت‌ها و خشکیدگی رودخانه‌ها و تالاب‌ها و دریاچه‌ها رهایی یابیم.

در مورد سـیسـتم‌های مرکب تصـفیه و بازیافت پسـاب‌های شـهری، در ابتدا، خروجی از محدوده شـهر و قبل از ورود به تصفیه‌خانه در حوضچه‌های ترسیب لجن‌گیری انجام شده و سـپس مواد میکروب‌کش و گندزدا به آن اضـافه می‌شـود. با تاباندنUV ، کاملاً میکروب‌کشی انجام شده و پس از هوادهی، وارد حوضـچه‌های کنترلی جهت تسـت و آزمایش‌های مختلف سلامتی با نمونه‌برداری و انجام آزمایش‌های پیشرفته می‌شود. اما تا این مرحله، عناصـر خطرناک سـمی کاملاً از آن طی فرآیندهای مختلف فیزیکی و شیمیایی قابل زدایش و جدایش نمی‌باشند. برای تکمیل چرخه تصفیه، نیاز به روش بیولوژیکی مانند کاشـت انواع گیاهان گیرنده، جاذب و تثبیت‌کننده عناصـر سـمی و سـنگین خطرناک چون سـرب، کادمیوم و... و عنـاصـر پرتوزا (مـانـنـد آفتـابگردان، انواع نی‌هـا و جگن‌هـا) می‌باشد.

پهن‌دشـت‌های مناطق اطراف و حاشـیه شـهرها و اسـتان‌های صـنعتی، نواحی نفت‌خیز و نواحی که در آن‌ها فعالیت‌های هسـتـه‌ای و فرآوری مواد معـدنی صـورت می‌گیرد (مـانـنـد خوزستان، بوشهر، اصفهان، کرمان، سمنان، تبریز، ساوه، اراک، خراسـان، تهران، البرز و قزوین) بیشـتر در معرض انواع آلودگی‌های مختلف محیط‌زیسـتی هسـتند (خصـوصـاً منابع آب، خاک و هوا) زیرا پسماندها به‌درستی مدیریت، تصفیه و بازیافت نمی‌شوند.

متـأسـفـانـه، هیچ‌کس، اعم از متخصـصـین هوا و اقلیم، هیدرولوژی، سـیاسـت، جمعیت، اقتصـاد، صـنعت، معدن، کشـاورزی و محیط‌زیسـت، در عمل نمی‌پذیرد که کشـور ما با حاکم بودن شرایط اقلیمی گرم و خشک و موقعیت جغرافیایی ویژه‌اش از قدیم از بارش‌های خوبی برخوردار نبوده اسـت. در عوض، جمعیت کشور و کشت و کارهای آبی حداقل سه برابر شـده و صـنعت و معدن نیز به‌موازات توسـعه یافته اسـت و دمای متوسـط حداقل دو و نیم تا سـه درجه افزایش یافته که منجر به افزایش تبخیر شده است.

علت اصـلی مشـکلات آبی در دامن زدن به افزایش جمعیت و به‌تبع آن افزایش مصـارف در تمام بخش‌ها نهفته اسـت. هرچند در سـیاسـت‌گذاری و احداث سـدها نیز در مواردی اشتباهاتی رخ داده است، ولی سدها عامل اصلی در تخریب منـابع طبیعی تجـدیـدشـونـده (جنگـل و مرتع، آب، خـاک، محیط‌زیست) نبوده و نمی‌باشند. مشـکل اصـلی در مصـادره حقابه‌های محیط‌زیسـتی و تخصـیص آن‌ها به سـایر بخش‌ها، عقب‌ماندگی تکنولوژیکی و سـیاسـت‌گذاری‌های اشـتباهی در برنامه‌های توسعه اشتغال و اقتصاد آب محور، به‌ویژه در پهنه بزرگ فلات ایران زمین می‌باشد.

حالا که بازخوردهای منفی آن مانند افزایش فرونشـسـت‌ها، از کار افتادن بیشـتر نیروگاه‌های آبی، خشـکیدگی دریاچه‌ها و تالاب‌ها و تبدیل شدن بسیاری از رودخانه‌های دائمی و فصلی به فصـلـی و خشـک‌رودها، افزایش فرسـایش‌های خاکی و خیزش ریزگردها در سـطح گسـترده فراگیر شـده، بسـیاری از دشـت‌ها دچار بحران در منابع آب زیرزمینی شـده و در آن‌ها بیشتر چشمه‌سارها و قنوات خشکیده، همه در حال فرافکنی هستند و دنبال علت‌تراشی‌های موهومی می‌باشند.

تحمل پذیرش آنچه را که آگاهانه در طول ۸۰ سـال گذشـته کرده‌اند، ندارند. خودکرده را تدبیر نیسـت. کشـور در شـرایط آرمانی تحمل هر جمعیتی پایدار بیش از ۵۵ تا ۶۰ میلیون را نداشته و ندارد و نخواهد داشت (در بستر توسعه پایدار بدون آسیب‌زایی در تمام بخش‌ها).

دکتر مهدی عاشورنیاء| استادیار پژوهشی و عضو هیئت علمی
گروه پایش منابع آب- پژوهشکده محیط‌زیست جهاد دانشگاهی گیلان

از دیدگاه شما، مهمترین منشأ آلودگی منابع آب در استان گیلان و شمال ایران چیست؟

مهمترین منابع آلودگی منابع آب در استان گیلان و شمال ایران عبارت‌اند از:

۱- فاضلاب شهری: در شهرهای بزرگ مانند رشت و انزلی، به دلیل عدم وجود سیستم‌های تصفیه فاضلاب مناسب بخش زیادی از فاضلاب بدون تصفیه کامل وارد منابع آبی می‌شود، ۲- رواناب‌های کشاورزی: گیلان به دلیل کشت گسترده برنج، از کودها و سموم شیمیایی به میزان زیادی استفاده می شود. این مواد از طریق رواناب وارد رودخانه‌ها و سپس تالاب‌ها (مانند تالاب انزلی) و آب‌های زیرزمینی شده و باعث افزایش نیترات، فسفات و سموم شیمیایی می‌گردند. بارندگی‌های فراوان در این منطقه این مشکل را تشدید می‌کند، ۳- پساب‌های صنعتی: مناطق صنعتی در گیلان، به‌ویژه نزدیک شهرهای بزرگ، پساب‌های حاوی فلزات سنگین و مواد شیمیایی را به رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی وارد می‌کنند. نبود تصفیه‌خانه‌ها در شهرک های صنعتی تاثیر بسزایی در این مورد دارد و ٤- شیرابه‌های ناشی از پسماند: نقص سیستم جمع‌آوری و بازیافت زباله ها و پسماند در مناطق شهری و روستایی و وجود تعداد زیادی منطقه دپوی زباله و پسماند شهری و روستایی موجب ورود شیرابه ها به آب‌های سطحی و زیرزمینی و نفوذ آلاینده‌ها می‌شود.

باتوجه‌به شرایط اقلیمی مرطوب و بارندگی‌های زیاد در گیلان، انتقال سریع آلاینده‌ها از طریق رواناب به منابع آبی، این منطقه را به‌ویژه آسیب‌پذیر کرده است.

چه تغییراتی در وضعیت کیفی منابع آب گیلان در دهه اخیر مشاهده شده است؟

در دهه اخیر، کیفیت منابع آب در گیلان به دلایل زیر رو به وخامت گذاشته است:

۱-توسعه شهری و صنعتی: رشد جمعیت و توسعه صنعتی بدون زیرساخت‌های کافی برای تصفیه فاضلاب، ورود فاضلاب‌های تصفیه‌نشده به رودخانه‌ها و تالاب‌ها را افزایش داده است، ۲- افزایش آلودگی کشاورزی: استفاده بیشتر از کودها و سموم شیمیایی در کشاورزی برنج باعث افزایش غلظت سموم شیمیایی و ترکیبات نیترات و فسفات در آب‌های سطحی و زیرزمینی شده است و ۳- تخریب تالاب انزلی: این تالاب که نقش مهمی در تصفیه طبیعی آب داشته است، به دلیل ورود آلاینده‌ها، رسوبات و فاضلاب و پس روی آب دریا دچار کاهش شدید مساحت، اوتریفیکاسیون (رشد بیش از حد جلبک‌ها) و کاهش کیفیت آب شده است.

آیا ارزیابی جامعی از آلودگی منابع آب در سطح ملی و استان گیلان در دسترس است؟ اگر بله آخرین آن مربوط به چه سالی است؟

- سطح ملی: گزارش‌های کلی درباره کیفیت آب در ایران توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست منتشر می‌شود، اما این گزارش‌ها اغلب به‌صورت جامع و استانی تفکیک نشده‌اند. آخرین گزارش جامع ملی ممکن است مربوط به چند سال پیش باشد، اما اطلاعات به‌روز و عمومی در دسترس نیست.
- سطح استانی (گیلان): ارزیابی‌های جامع و متمرکز بر گیلان محدود است. مطالعات محلی درباره تالاب انزلی یا برخی رودخانه‌ها وجود دارد، اما این مطالعات معمولاً منطقه‌ای هستند و کل استان را پوشش نمی‌دهند. پروژه‌هایی مانند مدیریت اکولوژیک تالاب انزلی (با همکاری بین‌المللی) داده‌هایی ارائه کرده‌اند، ولی این داده‌ها به‌روزرسانی نشده‌اند.

به‌طورکلی، نبود یک ارزیابی جامع و به‌روز در سطح استان گیلان مشهود است و نیاز به تحقیقات گسترده‌تر احساس می‌شود.

آیا آموزش به جوامع محلی گیلان برای کاهش مصرف کود و سموم شیمیایی مؤثر بوده است؟ نمونه‌های موفق در کشور کدام هستند؟

آموزش به جوامع محلی می‌تواند در کاهش مصرف کود و سموم شیمیایی مؤثر باشد، اما موفقیت آن به عواملی بستگی دارد که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: مشارکت فعال جامعه :برنامه‌ها باید با همکاری کشاورزان طراحی و اجرا شوند. دسترسی به روش‌های جایگزین: ارائه تکنیک‌های کشاورزی پایدار مانند کشاورزی ارگانیک یا مدیریت تلفیقی آفات.(IPM) مشوق‌های اقتصادی :حمایت مالی یا یارانه برای کشاورزانی که روش‌های کم‌آلاینده را به‌کار می‌برند.

درخصوص موارد موفق در ایران و گیلان هم می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- پروژه‌های مدیریت تلفیقی آفات:(IPM) در برخی مناطق ایران، این پروژه‌ها با کاهش استفاده از سموم شیمیایی موفقیت‌هایی داشته‌اند.
- طرح‌های کشاورزی پایدار :در استان‌های شمالی مانند مازندران و گیلان، تلاش‌هایی برای ترویج کشاورزی ارگانیک آغاز شده است، اما این برنامه‌ها هنوز در مراحل ابتدایی هستند و نتایج گسترده‌ای گزارش نشده است.

درباره اثربخشی این برنامه‌ها در گیلان، اطلاعات مشخص و کافی در دسترس نیست و نیاز به ارزیابی‌های دقیق‌تر وجود دارد.

تغییرات اقلیمی چگونه بر تشدید آلودگی آب‌های زیرزمینی مثل افزایش شوری یا تمرکز آلاینده‌های گیلان تأثیر گذاشته است؟

تغییرات اقلیمی به روش‌های زیر بر آلودگی آب‌های زیرزمینی در گیلان اثر می‌گذارد:
کاهش بارندگی در سرچشمه‌های رودخانه‌های ورودی به دریای خزر: این امر در یک دهه اخیر منجر به کاهش جریان آب ورودی به دریای خزر و پس‌روی آب دریا شده که به خودی خود تأثیرات نامناسبی را بر کیفیت منابع آب نوار ساحلی شمال ایران گذاشته است. تغییر الگوهای بارندگی: بارندگی‌های شدید و ناگهانی، رواناب‌ها را افزایش می‌دهند و آلاینده‌هایی مانند کودها و سموم را به‌سرعت به آب‌های زیرزمینی منتقل می‌کنند. افزایش دما :دماهای بالاتر باعث افزایش تبخیر و تمرکز بیشتر آلاینده‌ها در آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شوند.

در مورد نقش سازمان‌های مردم‌نهاد در نظارت بر آلودگی آب‌های زیرزمینی و اینکه تا چه میزان مؤثر بوده بفرمایید؟

سازمان‌های مردم‌نهاد یا NGOها می‌توانند از طرق زیر نقش مهمی در حفاظت از منابع آب زیرزمینی داشته باشند:

- پایش مستقل: جمع‌آوری داده‌های کیفیت آب و ارائه گزارش‌های مستقل به دور از محدودیت‌های دولتی.
- آگاهی‌رسانی: آموزش جوامع محلی و افزایش آگاهی عمومی درباره حفاظت از منابع آب.
- حمایت از سیاست‌ها: فشار بر نهادهای دولتی برای اجرای قوانین محیط زیستی و بهبود زیرساخت‌ها.

سازمان‌های مردم‌نهاد (سمن‌ها) نقش مهمی در نظارت و حفاظت از منابع آب ایفا می‌کنند. این سازمان‌ها با برگزاری کمپین‌های آموزشی، اطلاع‌رسانی و مشارکت در پروژه‌های محیط‌زیستی، به افزایش آگاهی عمومی و کاهش آلودگی منابع آب کمک کرده‌اند. در استان گیلان، سمن‌ها با همکاری با دستگاه‌های اجرایی و مطالعاتی نظیر پژوهشکده محیط‌زیست و منابع طبیعی، در پروژه‌های پایش کیفیت آب و آموزش جوامع محلی مشارکت داشته‌اند که این اقدامات به بهبود وضعیت منابع آب و کاهش آلودگی‌ها کمک کرده است.

وضعیت تصفیه پساب‌های صنعتی در ایران را چگونه ارزیابی می‌کنید؟

علی‌رغم گذشت چندین دهه از فعالیت شهرک‌های صنعتی در گیلان تصفیه پساب‌های صنعتی همواره با با چالش‌هایی مواجه بوده است، با برجسته شدن سهم صنایع از آلودگی منابع آب در استان اهمیت ایجاد تصفیه‌خانه‌های پساب شهرک‌های صنعتی مورد توجه قرار گرفته است اما زیرساخت‌های موجود کافی نبوده و نیاز به اولویت‌دهی و سرمایه‌گذاری دارند.

نشت نیترات و سموم کشاورزی تا چه اندازه منابع آب زیرزمینی را تهدید می‌کند؟

مطالعات نشان می‌دهد باتوجه‌به بالا بودن سطح آب زیرزمینی در مناطق جلگه‌ای استان میزان نفوذ آلاینده‌ها به منابع آب زیرزمینی در برخی نقاط رخ داده و موجب افزایش سطح نیترات و سموم کشاورزی می‌گردد.

در مورد سیستم جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب شهری، چه چالش‌هایی در شهرهای کوچک و متوسط وجود دارد؟

در شهرهای کوچک و متوسط گیلان، سیستم‌های جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب با زیرساخت‌های ضعیف و عدم بازیافت حدود ۷۰٪ پساب‌ها مواجه هستند که منجر به آلودگی محیط‌زیست می‌شود. بر اساس گزارش‌های منتشره، سالیانه حدود ۹۰ میلیون مترمکعب پساب از منازل تولید می‌شود که ۷۰ میلیون مترمکعب آن بازیافت نمی‌شود و به دریای خزر یا زیرزمین نفوذ می‌کند که نشان‌دهنده عدم کارایی سیستم‌های موجود است. هزینه تخمینی برای ساخت تصفیه‌خانه‌های ضروری حدود ٤٠٠ میلیون دلار گزارش شده، اما دولت با کمبود بودجه مواجه است.

همکاری بین سازمان‌های مختلف (دولت، صنایع، کشاورزی) چگونه می‌تواند به مدیریت بهتر آلودگی آب‌های زیرزمینی کمک کند؟

همکاری بین دولت، صنایع و کشاورزی می‌تواند از طریق وضع قوانین سخت‌گیرانه، پایش کیفیت آب و اجرای پروژه‌های مشترک مانند تصفیه‌خانه‌ها، آلودگی آب‌های زیرزمینی را بهتر مدیریت کند. در نهایت می‌توان گفت مدیریت یکپارچه منابع آب نیازمند همکاری بین ذی‌نفعان مختلف است.

آیا پوشش گیاهی خاصی مانند گیاهان پالاینده برای جذب نیترات و فلزات سنگین پیشنهاد می‌شود؟

در این خصوص در استان گیلان مطالعات زیادی صورت نگرفته است. گیاهانی مانند گونه‌های Nymphaeaceae برای جذب فلزات سنگین در تالاب انزلی پیشنهاد شده‌اند، اما برای جذب نیترات اطلاعات خاصی در دسترس نیست و نیاز به تحقیقات بیشتر است. مطالعات عمومی مانند***PubMed*** نشان می‌دهند که گیاهانی مانند Portulaca oleracea و Salicornia europaeaبرای جذب نیترات مناسب هستند، اما این گیاهان در گیلان به طور خاص بررسی نشده‌اند. تحقیقات بیشتری برای شناسایی گونه‌های مناسب بومی گیلان لازم است.

کدام مناطق گیلان در معرض بیشترین خطر آلودگی منابع آب هستند و چرا؟

تحقیقات نشان می‌دهد که بندر انزلی و تالاب انزلی در استان گیلان در معرض بیشترین خطر آلودگی منابع آب هستند. این مناطق به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص، فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی، و گردشگری، با چالش‌های جدی آلودگی مواجه هستند.
تالاب انزلی که در فهرست کنوانسیون رامسر قرار دارد، به دلیل دریافت فاضلاب شهری و صنعتی بدون تصفیه، دچار آلودگی شدید است. گزارش‌ها نشان می‌دهند که سطح نیترات، فسفر، و فلزات سنگین در آب این تالاب بالاتر از حد مجاز است. کشاورزی در مناطق اطراف تالاب، با استفاده گسترده از کودها و سموم، منجر به نفوذ نیترات و فسفر به آب‌های زیرزمینی و تالاب می‌شود.

گزارش‌ها نشـــان می‌دهند که تالاب انزلی از دهه‌ها پیش به دلیل تخلیه فاضلاب و رسوبات، عمق خود را از ۱۰ متر به کمتر از ۵۰ ســـانتی‌متر کاهش داده اســـت. علاوه‌براین فعالیت‌های گردشـــگری به‌عنوان یکی از صـــنایع اصـــلی با افزایش زباله و فاضلاب، فشار بیشتری بر منابع آبی این منطقه وارد می‌کند. جدول زیر خلاصـــه‌ای از منابع آلودگی در بندر انزلی و تالاب انزلی ارائه می‌دهد:

در شـــمال کشـــور، چه تدابیری برای کنترل آلودگی ناشـــی از گردشگری و فاضلاب اتخاذ شده است؟

در مناطق شـــمالی ایران، از جمله گیلان، تدابیری برای کنترل آلودگی ناشی از گردشگری و فاضلاب اتخاذ شده است، اما چالش‌های زیادی همچنان باقی است.

پروژه‌های زیرساختی: پروژه "آب و فاضلاب شهرهای شمال" که با وام ۲۲٤ میلیون دلاری بانک جهانی حمایت شد، شامل گسترش شبکه‌های فاضلاب در شهرهای رشت و انزلی در گیلان بود. این پروژه با هدف بهبود کارایی عملیاتی و پایداری مالی شرکت‌های آب و فاضلاب استانی تعریف شد که در شرایط نامشخصی به سر می‌برد.

گزارش‌ها نشان می‌دهند که در سال‌های اخیر احداث چندین تصـــفیه‌خانه فاضـــلاب در نیمه برنامه‌ریزی شـــده‌اند، اما زمان‌بندی دقیقی در خصـــوص راه‌اندازی آنها اعلام نگردیده است.

همچنین ایران به کنوانســـیون تهران (۲۰۰۳) برای حفاظت از محیط‌زیست دریای خزر پیوسته است، که شامل تدابیر برای کاهش آلودگی از منابع شهری و صنعتی است. این کنوانسیون شامل همکاری با کشورهای دیگر حاشیه دریای خزر شامل آذربایجان، قزاقســـتان، روســـیه و ترکمنســـتان برای مدیریت آلودگی این دریاچه بزرگ است.

آیا مدیریت آلودگی آب در مناطق خشـــک شـــمالی کشـــور نیازمند رویکرد متفاوتی است؟

مدیریت آلودگی آب در مناطق شـمالی ایران، به‌ویژه در گیلان، به دلیل ویژگی‌های خاص آن نیازمند رویکرد متفاوتی می‌باشد که از جمله آن می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

دریای خزر: به‌عنوان بزرگترین دریاچه جهان، اکوســـیســـتم منحصـــر به فردی دارد که از آلودگی‌های نفتی، فاضـــلاب، و کشاورزی آسیب می‌بیند.

تالاب‌ها و جنگل‌ها: مناطقی مانند تالاب انزلی و جنگل‌های هیرکانی نیاز به حفاظت خاص دارند، زیرا حساسیت بالایی به آلودگی دارند.

فشار گردشگری: شمال ایران، به‌ویژه گیلان، مقصد اصلی گردشگران است که منجر به افزایش زباله و فاضلاب می‌شود این امر در سال‌های اخیر با توسعه صنعت توریسم در نوار ساحلی شمال ایران تشدید گردیده است.

وضعیت آلودگی‌های نفتی منابع آب در شمال کشور چگونه است؟

آلودگی نفتی منابع آب در شـمال ایران، به‌ویژه در دریای خزر، مشـکل جدی اسـت و تأثیرات قابل‌توجهی بر منابع آب دارد. منابع این آلودگی عبارت‌اند از:

فعـالیـت‌هـای اســـتخراج نفـت و گـاز در خزر، از جملـه در بخش‌های آذری و قزاقی که منجر به آلودگی نفتی شده است.

حوادثی مانند نشـــت نفت از کشـــتی‌ها یا پلاتفرم‌ها، مانند گزارش نشت در میدان نفتی کاشاگان قزاقستان، خطر جدی برای ســـواحل ایران ایجاد می‌کند. ضـــمناً گزارش‌ها نشـــان می‌دهند که آلودگی‌های نفتی مســـیرهای مهاجرتی ماهیان خاویاری را تحت تأثیر قرار داده و اکســـیژن آب را کاهش می‌دهد.

این آلودگی‌ها منجر به کاهش تنوع زیســـتی گونه‌هایی مانند فک خزری و ماهی خاویاری شـــده اســـت و همچنین به دلیل تغذیه جمعیت ســـاکن در حاشـــیه این دریا از منابع دریایی تأثیر سوئی بر سلامت انسان‌ها به همراه دارد.

فعالیت‌های صـــنعتی در شـــمال ایران چه تأثیری بر آلودگی منابع آب زیرزمینی گذاشته است؟

تأثیر فعالیت‌های صنعتی در شمال ایران بر آلودگی منابع آب زیرزمینی در ســـال‌های اخیر افزایش قابل‌توجهی یافته اســـت. به‌عنوان مثال، صـــنایع فعال در شـــهرک‌های صـــنعتی اســـتان گیلان، مانند صـــنایع نفتی و پارافینی، فاضـــلاب حاوی هیدروکربن‌ها و فلزات سنگین تولید می‌کنند که ممکن است به آب زیرزمینی نفوذ کند. همچنین استفاده از کودها و سموم شیمیایی در کشاورزی که با فعالیت‌های صنعتی مرتبط است، منجر بـه نفوذ نیترات و فلزات ســـنگین بـه آب زیرزمینی می‌شود.

گزارش‌ها نشـــان می‌دهند که فرایند احداث تصـــفیه‌خانه‌های پساب‌های صنعتی در گیلان فاصله زیادی تا ایده‌آل داشته و فاضلاب صنعتی ممکن است مستقیماً به آب زیرزمینی نفوذ کند. مطالعات دقیق‌تر برای ارزیابی تأثیر فعالیت‌های صـنعتی خاص بر آب زیرزمینی در گیلان ضروری است.

چه بیماری‌هایی مســـتقیماً با آلودگی منابع آب در ایران مرتبط شناخته شده‌اند؟

چنانچه یکی از راه‌های ورود ترکیبات آلاینده به بدن را مصرف آب دارای آلودگی در نظر بگیریم آنگاه می‌توان رشـــد بالای ســـرطان‌های دســـتگاه گوارش در نوار ســـاحلی شـــمال ایران و به‌خصـوص اسـتان گیلان را به ورود فلزات سـنگین و ترکیبات هالومتان و خانواده آنها مرتبط دانســـت. اما مطالعات دقیق در این باره انجام نشده است. تحقیقات نشان می‌دهد که آلودگی آب در گیلان، به‌ویژه در جوامع محلی با حضـــور باکتری‌های ناشـــی از آلودگی به فاضـــلاب انســـانی مانندEscherichia coli مرتبط اســـت که می‌توانند باعث بیماری‌های گوارشـــی شـــوند. همچنین، نیترات بـالا در منـابع آب زیرزمینی و ورود آنهـا و آبیاری محصـولات کشـاورزی با آن ممکن اسـت مسـمومیت ایجاد کند.

آلودگی منابع آب چه اثری بر زیستگاه‌های طبیعی مانند تالاب‌ها گذاشته است؟

تالاب‌های استان گیلان نظیر تالاب انزلی، بوجاق، کیاشهر و استیل آستارا به دلیل مجاورت با سکونتگاه‌های انسانی و ورود فاضلاب انسانی به آنها آسیب‌های فراوانی دیده‌اند. از جمله اوتروفیکاسیون که در آن افزایش مواد مغذی منجر به رشد گیاهانی مانند سرخس آبی شده که اکسیژن محلول را کاهش داده و باعث مرگ ماهی‌ها و آبزیان می‌شود و در نتیجه تنوع زیستی، از جمله پرندگان و گونه‌های در معرض انقراض، را تهدید می‌کند. ضمن اینکه ورود رسوبات فراوان به این تالاب‌ها موجب کاهش شدید عمق آنها و تخریب زیستگاه‌ها گردیده است. علاوه بر آن ورود آلاینده‌های نوظهور مانند میکروپلاستیک‌ها به شکل نامحلول وارد چرخه غذایی و زیستی موجودات زنده و انسان‌های شده و در درازمدت آسیب‌های فراوانی را به همراه خواهد داشت. با ادامه روند کنونی ورود رسوبات و آلاینده‌ها به تالاب انزلی در کنار کاهش عمق آب دریای خزر پیش‌بینی می‌شود ظرف دو دهه آینده این تالاب خشک شده و ظرفیت زیستی خود را از دست بدهد.

اثرات اقتصادی و اجتماعی آلودگی آب بر جوامع روستایی چیست؟

به‌طورکلی کمبود و آلودگی آب در روستاها منجر به کاهش بازدهی کشاورزی، فقر، بیکاری و مهاجرت می‌شود. این الگو قابل‌استنباط برای گیلان نیز است.

در گیلان، مطالعه روی مدیریت منابع آب کشاورزی در روستاها نشان می‌دهد که مشکلات مدیریتی مانند عدم نظارت کیفی و استفاده از آب نامناسب ممکن است به کاهش بازدهی کشاورزی منجر شود. همچنین اثرات اجتماعی ناشی از عدم دسترسی به آب بهداشتی شامل افزایش هزینه‌های درمانی، کاهش سطح زندگی و مهاجرت به شهرها است که به دلیل کاهش منابع آب سالم و آلودگی تشدید می‌شود.

درباره ضرورت پایش و انجام اقدامات قانونی جهت مقابله با آلاینده‌های نوظهور توضیح بفرمایید؟

باوجود قوانین و مقرراتی برای کنترل آلودگی آب، متأسفانه در کشور و به‌خصوص استان گیلان اجرای ضعیف این مقررات و استانداردها منجر به بروز مشکلات عدیده در سایر بخش‌های جامعه می‌شود. به‌خصوص اینکه در خصوص آلاینده‌های نوظهور هنوز استانداردها کاملاً به‌روز نشده‌اند و در پایش‌های مداوم زیستی هم اغلب شناسایی نمی‌شوند؛ لذا نیاز به تدوین مقررات جدید همگام با تدوین استانداردهای جدید و الزام‌آور و پایش مستمر در خصوص این دسته از آلاینده‌ها مانند میکروپلاستیک‌ها و فلزات سنگین وجود دارد.

همچنین اقدامات قانونی باید شامل تدابیری جهت همکاری‌های بین‌المللی برای جلوگیری از ورود آلاینده‌های نوظهور به دریای خزر باشد.

کدام اقدامات دولت در استان گیلان در زمینه کاهش آلودگی آب مؤثرتر بوده‌اند؟ و چرا؟

اطلاعات موجود برای ارزیابی دقیق اثربخشی اقدامات صورت گرفته از سوی دولت در کاهش آلودگی آب در استان گیلان محدود است. با این حال، برخی اقدامات شامل پروژه مدیریت اکولوژیک تالاب انزلی و سامان‌دهی سایت‌های جمع‌آوری زباله‌ها و تصفیه شیرابه‌های حاصل از زباله احتمالاً از سایر اقدامات مؤثرتر بوده‌اند. به‌عنوان‌مثال، پروژه مدیریت تالاب انزلی شامل اقداماتی برای کنترل ورود آلاینده‌ها از رودخانه‌ها است که یک منبع کلیدی آلودگی این اکوسیستم است.

بااین‌وجود اثربخشی کلی این اقدامات محدود بوده است. پیشرفت زیرساخت‌های تصفیه فاضلاب در گیلان تنها ۳۰ درصد است، در حالی که میانگین ملی ۷۰ درصد گزارش شده است (بر اساس اطلاعات شبکه‌های اجتماعی). این نشان می‌دهد که اقدامات انجام‌شده نتوانسته‌اند به طور قابل‌توجهی آلودگی را کاهش دهند. مشکلات مداوم در تالاب انزلی، مانند اوتریفیکاسیون و کاهش اکسیژن محلول، نیز مؤید این نکته است که این تلاش‌ها هنوز کافی نبوده‌اند.

به نظر شما مهمترین مانع اجرایی در حل این معضل چیست؟

مهمترین مانع اجرایی در حل مشکل آلودگی آب در گیلان، کمبود زیرساخت‌های تصفیه فاضلاب است. پیشرفت تنها ۳۰ درصدی در توسعه شبکه تصفیه فاضلاب نشان‌دهنده سرمایه‌گذاری ناکافی و عدم اولویت‌بندی در این حوزه است. بدون ظرفیت مناسب برای تصفیه فاضلاب، جلوگیری از ورود آلاینده‌ها به رودخانه‌ها (مانند زرجوب و گوهر رود در رشت) و تالاب انزلی دشوار است. این مشکل به‌ویژه در مناطق شهری و روستایی که فاضلاب خام برای آبیاری استفاده می‌شود، تشدید می‌شود.

علاوه‌براین فقدان مدیریت یکپارچه و هماهنگی میان نهادها نیز مانع بزرگی است. حل این معضل نیازمند همکاری مؤثر بین سازمان‌های دولتی، بخش خصوصی و جامعه محلی است که به نظر می‌رسد درحال‌حاضر به طور کامل محقق نشده است.

آیا استفاده از فناوری‌های نوین مانند تصفیه پیشرفته یا بازچرخانی آب در ایران قابل توسعه است؟

بله استفاده از فناوری‌های نوین مانند تصفیه پیشرفته (مانند فیلتراسیون غشایی یا اکسیداسیون پیشرفته) و بازچرخانی آب در ایران قابل توسعه است، مشروط بر اینکه سرمایه‌گذاری کافی از بخش خصوصی و حمایت نهادی وجود داشته باشد. ایران از ظرفیت فنی لازم برخوردار بوده و قابلیت به طراحی و بهره‌برداری از این سیستم‌ها وجود دارد. علاوه‌براین وجود پروژه‌های تحقیقاتی مانند مطالعه امکان‌سنجی بازچرخانی آب در استان گیلان نشانه اثبات این امر است.

چه فناوری‌های نوین برای کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی در ایران قابل اجراست؟

فناوری‌های نوین زیر می‌توانند برای کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی در ایران، از جمله در استان گیلان، به کار گرفته شوند:

- فیتورمدیاسیون: استفاده از گیاهان برای جذب یا تجزیه آلاینده‌هایی مانند سموم و نیترات و فلزات سنگین که به‌ویژه در مناطق کشاورزی گیلان کاربرد دارد.
- بیورمدیاسیون: بهره‌گیری از میکروارگانیسم‌ها برای تجزیه آلاینده‌ها در محل، مناسب برای آلودگی‌های آلی.
- سیستم‌های پایش پیشرفته: استفاده از حسگرها و فناوری سنجش از دور برای شناسایی زودهنگام آلودگی.

این فناوری‌ها به دلیل هزینه نسبتاً پایین و قابلیت تطبیق با شرایط محلی، در ایران قابل اجرا هستند. به‌عنوان‌مثال در گیلان که کشاورزی نقش مهمی دارد، فیتورمدیاسیون می‌تواند آلودگی ناشی از کودها را کاهش دهد.

چه موانعی برای توسعه سیستم‌های پایش کیفیت آب زیرزمینی وجود دارد؟

توسعه سیستم‌های پایش کیفیت آب زیرزمینی در ایران با چالش‌های زیر مواجه است:

- محدودیت‌های مالی: نصب چاه‌های پایش، خرید تجهیزات و هزینه‌های آزمایشگاهی نیازمند بودجه قابل‌توجهی است.
- کمبود تخصص فنی: نیاز به پرسنل آموزش‌دیده برای نمونه‌برداری، تحلیل و تفسیر داده‌ها.
- مشکلات زیرساختی: دسترسی دشوار به مناطق دورافتاده و کمبود آزمایشگاه‌های مجهز.
- مدیریت داده: نیاز به سیستم‌های اطلاعاتی قوی برای ذخیره و تحلیل داده‌ها.
- هماهنگی نهادی: فقدان همکاری مؤثر بین سازمان‌های مسئول.

ضمن اینکه در استان گیلان، شرایط خاص مانند سطح بالای آب زیرزمینی و فعالیت‌های کشاورزی گسترده، نیاز به شبکه پایش متراکم و مستمر را افزایش می‌دهد که این چالش‌ها را پیچیده‌تر می‌کند.

آلودگی‌های نوظهور تا چه حد در آب‌های زیرزمینی ایران شناسایی شده‌اند؟

شناسایی آلودگی‌های نوظهور (مانند داروها، محصولات مراقبت شخصی، و میکرو و نانو پلاستیک‌ها) در آب‌های زیرزمینی ایران بسیار محدود است. اطلاعات موجود بیشتر بر آلاینده‌های سنتی مانند نیترات، فلزات سنگین و مواد آلی متمرکز است. این کمبود شناسایی می‌تواند به دلایل زیر باشد:

- عدم اولویت‌بندی: توجه بیشتر به آلودگی‌های شناخته‌شده‌تر.
- محدودیت‌های فنی: نیاز به تجهیزات پیشرفته برای تشخیص این آلاینده‌ها.
- کمبود پژوهش: فقدان مطالعات جامع در این زمینه.

بااین‌حال باتوجه‌به فعالیت‌های صنعتی و شهری در ایران، احتمال حضور این آلاینده‌ها در آب‌های زیرزمینی وجود دارد و تحقیقات بیشتری برای تأیید و مدیریت آن‌ها ضروری است.

تا چه اندازه استان‌های گیلان و مازندران به سمت مدیریت یکپارچه منابع آب و پساب حرکت کرده‌اند؟

استان‌های گیلان و مازندران در زمینه مدیریت یکپارچه منابع آب و پساب پیشرفت‌هایی داشته‌اند، اما این تلاش‌ها هنوز به سطح مطلوب نرسیده است. پروژه‌هایی مانند پروژه مدیریت اکولوژیک تالاب انزلی و طرح‌های مدیریت پسماند در سواحل گیلان نشان‌دهنده گام‌هایی در این راستا هستند. بااین‌حال موانع متعددی وجود دارد:

- چالش‌های زیرساختی :کمبود شبکه‌های تصفیه فاضلاب و زیرساخت‌های مدرن.
- چالش‌های نظارتی :ضعف در هماهنگی بین نهادهای مسئول، مانند سازمان حفاظت محیط‌زیست و وزارت نیرو.

به‌طورکلی این استان‌ها در مسیر مدیریت یکپارچه حرکت کرده‌اند، اما برای دستیابی به یک سیستم کامل و مؤثر، نیاز به سرمایه‌گذاری بیشتر و رفع موانع موجود است.

در سیاست‌های بلندمدت محیط‌زیستی گیلان، آلودگی آب چه جایگاهی دارد؟

آلودگی آب در سیاست‌های محیط زیستی گیلان جایگاه ویژه‌ای دارد، به‌ویژه به دلیل اهمیت اکولوژیکی تالاب انزلی و رودخانه‌های منطقه. سازمان حفاظت محیط‌زیست گیلان اقداماتی مانند پایش کیفیت آب و ارائه آموزش‌های محیط زیستی را در اولویت قرار داده است. بااین‌حال:

- چالش‌های اجرایی: کمبود بودجه و منابع انسانی، اجرای سیاست‌ها را با مشکل مواجه کرده است.
- تمرکز اصلی: حفاظت از منابع آبی سطحی مانند تالاب‌ها و رودخانه‌ها، بیش از آب‌های زیرزمینی مورد توجه بوده است.

این موضوع نشان می‌دهد که آلودگی آب در سیاست‌ها مهم است، اما تحقق اهداف بلندمدت نیازمند تقویت زیرساخت‌ها و منابع است.

چه نقش‌هایی می‌توان برای نهادهای غیردولتی و دانشگاه‌ها در کنترل آلودگی آب گیلان متصور شد؟

نهادهای غیردولتی و دانشگاه‌ها می‌توانند نقش‌های کلیدی در کنترل آلودگی آب ایفا کنند:

- پایش کیفیت آب: انجام مطالعات میدانی و جمع‌آوری داده‌های مستقل.
- آموزش جوامع محلی: افزایش آگاهی عمومی درباره مدیریت پساب و حفاظت از منابع آب.
- تحقیق و توسعه: توسعه فناوری‌های نوین برای تصفیه آب و کاهش آلودگی.
- حمایت از سیاست‌ها: فشار بر نهادهای دولتی برای اجرای قوانین محیط‌زیستی.

به‌عنوان‌مثال پژوهشکده محیط‌زیست جهاد دانشگاهی در گیلان در زمینه‌هایی مانند ارزیابی اثرات محیط‌زیستی و پایش آلاینده‌ها فعالیت می‌کند و می‌تواند الگویی برای این همکاری باشد.

آیا قوانین فعلی در کشـــور برای کنترل آلاینده‌های صـــنعتی و کشاورزی گیلان کافی است؟

خیر، قوانین فعلی برای کنترل آلاینده‌های صنعتی و کشاورزی در گیلان کافی نیســـتند .قانون مدیریت پســـماند (مصـــوب ۱۳۸۳) یکی از قوانین کلیدی اســـت که دســـتگاه‌هایی مانند وزارت کشور، وزارت بهداشت و سازمان حفاظت محیط‌زیست را مسئول کرده، اما عدم هماهنگی بین نهادها و کمبود منابع، اجرای قانون را تضعیف کرده است. همچنین قوانین بیشتر بر پســماندهای جامد متمرکز هســتند و آلاینده‌های مایع (مانند فاضـلاب صـنعتی و کشـاورزی) کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. بـه همین دلیـل، نیـاز بـه بـازنگری و تقویـت قوانین موجود احساس می‌شود.

چه شـــکاف‌های قانونی در زمینه آلودگی منابع آب زیرزمینی وجود دارد؟

شـکاف‌های قانونی در زمینه آلودگی آب زیرزمینی شـامل موارد زیر است:

- عـدم وجود مقررات خـاص: آلاینـده‌هـای نوظهور (مـانند داروها و محصـولات مراقبت شـخصـی) در قوانین فعلی پوشش داده نشده‌اند.
- ضـــعف در اجرا: حتی قوانین موجود بـه دلیـل کمبود نظارت و هماهنگی به طور کامل اجرا نمی‌شوند.
- تمرکز بر آب‌های ســطحی: قوانین بیشــتر به منابع آب ســطحی پرداخته و آب‌های زیرزمینی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.
- نبود هماهنگی بین نهادها: فقدان همکاری مؤثر بین سـازمان‌های مسـئول، اثربخشـی قوانین را کاهش داده است.

این شـــکاف‌ها نیازمند تدوین مقررات جدید و بهبود اجرای قوانین فعلی است.

نقش نهادهای نظارتی مانند سازمان حفاظت از محیط‌زیست و وزارت نیرو در جلوگیری از تخلیه غیرمجاز پســـاب‌ها چگونه ارزیابی می‌شود؟

نهادهای نظارتی مانند سـازمان حفاظت محیط‌زیسـت و وزارت نیرو نقش مهمی در جلوگیری از تخلیه غیرمجاز پســـاب‌ها دارند:

سـازمان حفاظت محیط‌زیسـت مسـئول پایش کیفیت آب و اجرای قوانین محیط زیستی است و وزارت نیرو مدیریت منابع آب و نظارت بر بهره‌برداری از آن را بر عهده دارد. بااین‌حال عملکرد آنها با محدودیت‌هایی مواجه است:

الف) کمبود منابع :منابع مالی و انسانی ناکافی، توان نظارت را کاهش داده است و ب)هماهنگی ضعیف :عدم همکاری مؤثر بین این نهادها، منجر به ناکارآمدی در جلوگیری از تخلفات شده است.

در مجموع، این نهادها پتانســـیل بالایی دارند، اما نیاز به تقویت منابع و هماهنگی دارند.

چـه الگوهـای بین‌المللی در کنترل نیترات در کشـــور و به‌خصوص استان گیلان قابل اجراست؟

الگوهای بین‌المللی مانند مقررات اتحادیه اروپا برای کنترل نیترات می‌توانند در گیلان پیاده‌سازی شوند. این الگوها شامل مراحل زیر می‌باشند:

الف) تعیین مناطق حساس به نیترات: شناسایی مناطقی که در معرض آلودگی نیترات هســـتند، ب) کاهش اســـتفاده از کودهای نیتروژنی :اجرای برنامه‌های مدیریتی برای بهینه‌سازی مصـــرف کود و ج) پایش مســـتمر کیفیت آب :اســـتفاده از سیستم‌های پیشرفته برای نظارت بر سطح نیترات.

بااین‌حال اجرای این الگوها نیازمند تطبیق با شـــرایط محلی و همکاری و هماهنگی بین سازمان‌های دولتی و دانشگاه‌ها برای موفقیت در اجرا می‌باشـــند. این الگوها می‌توانند به کاهش آلودگی نیترات در منابع آبی گیلان کمک کنند.

دکتر علیرضا رحمانی

عضو هیئت علمی گروه مهندسی بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی همدان

باتوجه‌به تجربه شـــما در زمینه آلودگی آب و خاک در مناطق مختلف ایران، به‌ویژه در استان همدان توضیح بفرمایید.

بحث منابع آب درحال‌حاضر بیشتر از جنبه کیفیت، به سمت موضـوع کمیت سـوق پیدا کرده اسـت. در زمینه آلودگی منابع آب به‌عنوان پژوهشـــگر در همدان فعالیت‌هایی انجام داده‌ام، اما نکته مهم این اســـت که باید یک نهاد یا مرکز تحقیقاتی مشخص به‌عنوان متولی دسته‌بندی و تحلیل نتایج شناسایی شـود. چون همان‌طور که می‌دانید، منابع آبی بسـیار متنوع و پیچیده هسـتند و به‌ویژه خشـکسـالی‌های چند دهه اخیر هم به مشـــکلات دامن زده اســـت. باتوجه‌به محدودیت مالی در دانشـگاه‌ها، اگر بتوان از اطلاعات موجود، یک سـیمای کلی و اولیه اسـتخراج کرد و به داده‌های سـازمان‌هایی مانند امور آب، شـرکت آب و فاضـلاب شـهری و روسـتایی یا شـرکت مدیریت منابع آب کشـــور نیز دســـترســـی پیدا نمود، می‌توان خلأهای موجود را شـناسـایی کرد و بر اسـاس آن برنامه‌ریزی انجام داد. مطمئن هســـتم کـه در تمـام نقـاط ایران مطالعـات آب‌هـای زیرزمینی و ســـطحی از نظر کمی و کیفی انجام شـــده اســـت. فرایندِ جمع‌آوری اطلاعات از ابتدا بســـیار هزینه‌بر اســـت و به همین دلیل اجرای آن دشوار می‌شود و امکان‌پذیر نیست.

در اســـتان همدان مشـــکل عمده در زمینه آلودگی منابع آب چیست؟

یکی از مشـــکلات اصـــلی در ایران وجود «کمربند آرســـنیک» است که از نپال و پاکستان و بخشی از بنگلادش آغاز می‌شود و از اســـتان‌های خراســـان، همدان، زنجان و کردســـتان عبور می‌کند. بحث دیگر مربوط به TDS اســـت که بســـته به نوع مصـرف آب اهمیت پیدا می‌کند. در بخش کشـاورزی، شـوری

آب می‌تواند مشکل‌ساز باشد. در آب آشامیدنی، نیترات و نیتریت از اهمیت زیادی برخوردارند و تحقیقات فراوانی روی آن‌ها انجام شده است. نیترات و نیتریت به‌راحتی در آب حل می‌شوند؛ اما حذف آن‌ها بسیار دشوار است. به‌طورکلی می‌توان گفت درصد بالایی از پایان‌نامه‌های مرتبط با آلودگی آب در رشته‌های مرتبط، به موضوع نیترات و نیتریت اختصاص یافته است. در مورد فلزات سنگین و آلاینده‌های نوظهور نیز باید توجه داشت که موادی مانند ازت و فسفر که عمدتاً از بخش کشاورزی وارد آب‌های زیرزمینی می‌شوند، اهمیت بالایی دارند. آرسنیک نیز در بخش زیادی از استان همدان مورد مطالعه قرار گرفته است. به نظر من اولویت‌بندی در بررسی نوع آلاینده‌ها باید بر اساس نوع مصرف صورت گیرد؛ به‌عنوان‌مثال، در بخش کشاورزی می‌توان با روش‌های ساده‌تر این بررسی را انجام داد. اما آلاینده‌های نوظهور به دلیل گستردگی و دشواری شناسایی، کار پیچیده‌تری را می‌طلبند.

باتوجه‌به اینکه کمیت آب می‌تواند بر کیفیت آن تأثیرگذار باشد، به نظر شما در منطقه همدان، مهمترین منابع آلودگی آب کدام‌اند؟ به‌عنوان‌مثال، آیا آلودگی آب ناشی از سموم و کودهای شیمیایی در کشاورزی اهمیت بیشتری دارد یا سایر عوامل؟

پدیده کم‌آبی، تصویری مشترک از وضعیت اقلیمی ایران ارائه می‌دهد؛ چراکه کشور ما در منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است. در سال‌های نخست حضورم در همدان، در قالب طرحی تحقیقاتی به بررسی آب‌های زیرزمینی دشت همدان پرداختم. با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط امور آب، تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه‌های زمانی مختلف ترسیم شد و سپس با بهره‌گیری از مدل‌های آماری، روند آن برای سال ۱۴۰۰ پیش‌بینی گردید. نتایج مطالعات نشان داد که سطح آب زیرزمینی به طور مستمر در حال کاهش است، و این موضوع درحال‌حاضر نیز تأیید شده است.

عواملی نظیر کاهش منابع آبی، افزایش جمعیت، تنوع الگوهای مصرف، و نبود فرهنگ‌سازی مناسب، بستر را برای تشدید تخریب منابع طبیعی فراهم کرده‌اند. در همدان، به دلیل کاهش بارندگی، ناگزیر به استفاده از منابع جدید آب شدیم. این امر ضرورت توجه به امنیت آب و غذا و نیز ارزیابی پارامترهای کیفی آب را افزایش داده است. در اولویت‌بندی مسائل کیفی، یکی از نخستین چالش‌ها، مسئله نیترات است. باتوجه‌به بحران کم‌آبی، امکان حذف منابع نیتراته از چرخه مصرف وجود ندارد؛ بنابراین، راهکار عملی، ترکیب منابع کم‌نیترات با منابع پرنیترات و بهره‌گیری از فرآیند رقیق‌سازی به‌منظور کاهش غلظت آلاینده‌ها است. مسئله دیگر، حضور آرسنیک در منابع آبی منطقه است که مطالعات جدی‌تری را می‌طلبد؛ چراکه اثرات زیان‌بار آن بر سلامت انسان، جدی و گاه جبران‌ناپذیر است. همچنین، مصرف بی‌رویه سموم و عدم کشت محصولات استراتژیک با نیاز آبی کم، از دیگر عوامل مؤثر بر کیفیت آب هستند. تقویت زیرساخت‌های تصفیه‌خانه‌ها و بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته در تصفیه فاضلاب، از جمله اقداماتی است که می‌تواند کیفیت منابع آبی را ارتقا دهد. بسیاری از کشورهای پیشرو در این حوزه، استفاده مجدد از آب را در اولویت برنامه‌ریزی خود قرار داده‌اند. کاهش هزینه‌های تصفیه و بهینه‌سازی مصرف، تأثیر به‌سزایی بر ارتقای کیفیت منابع آبی خواهد داشت. چنانچه بخواهیم نگاه توصیفی داشته باشیم، باید گفت که وضعیت منابع آبی هم از نظر کمیت و هم کیفیت در اکثر نقاط کشور در شرایط بحرانی قرار دارد. باتوجه‌به دشواری دسترسی به داده‌های مطالعات کیفی و همچنین ناکارآمدی روش‌های سنتی، استفاده از فناوری‌های نوین کنترل آلودگی ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. به باور من، باید از مرحله توصیف صرف عبور کنیم و به سوی ارائه راه‌حل‌های عملی در حوزه تصفیه و مدیریت منابع آبی حرکت کنیم.

به نظر شما مشکلات موجود در آلودگی منابع آب ناشی از کمبود قوانین و دستورالعمل‌های لازم برای حفظ محیط‌زیست است یا قوانین موجود هستند؛ اما به‌درستی اجرا نمی‌شوند؟

در کشور ما، حکمرانی آب در اختیار دولت است. قوانینی که داریم شاید کامل نباشند؛ اما به‌طورکلی بی‌فایده هم نیستند. مشکل اینجا است که همین قوانین موجود نیز به‌درستی اجرا نمی‌شوند. مثلاً کشتارگاه‌های مرغ و گوشت از صنایع بسیار آلاینده هستند، یک قطره خون دارای بار آلی آلایندگی بالایی است. سیستم‌های تصفیه معمولاً ساخته می‌شوند ولی بهره‌برداری و نگهداری از آن‌ها بسیار ضعیف است؛ بنابراین، نهادهایی مانند امور آب و محیط‌زیست که به ترتیب متولیان تأمین و امنیت منابع آبی هستند، توان کنترل سیستماتیک آلاینده‌ها را ندارند؛ چون حتی نمی‌توانند برای تعطیلی کارخانه‌های آلاینده اقدام کنند. مثلاً یک شخص کارخانه تولید نشاسته داشت که بسیار آب‌بر بود. کسانی که به این فرد مجوز دادند، باید می‌دانستند این صنعت فوق‌العاده آب‌بر است. البته او هم سرمایه‌گذار و دنبال منفعت خودش است. پس قوانین وجود دارند، اما از همان ابتدا که باید مطالعات محیط‌زیستی دقیق انجام شود، این کار به‌درستی صورت نمی‌گیرد. در مورد کشتارگاه‌ها نیز باید در آغاز کار سناریو نوشته شود، ولی قوانین فقط بخشی از ماجرا را می‌بینند و همان‌ها را هم در اجرا رعایت نمی‌کنند.

بر اساس آمار و اطلاعات موجود در بخش کشاورزی، ۹۰ درصد آب کشور مصرف می‌شود که از این مقدار بخش بالایی و حتی به گفته آگاهان حدود تا ۸۰ درصد آن پرت می‌شود. چرا روی روش‌های نوین کشاورزی کار نمی‌کنیم؟ در بخش کیفی نیز ارتقای سیستم‌های تصفیه فاضلاب از طریق قوانینی که وجود دارد امکان‌پذیر بوده و بایستی به پساب به‌عنوان یک منبع آبی جایگزین اهمیت داده و در خصوص استفاده مجدد از آن برنامه‌ریزی نمود.

آیا سازمان‌های مردم‌نهاد در همدان فعال هستند و همانند تجربیات موفقی که در شهر مشهد مشاهده شده است

می‌توانند در زمینه مسائل محیط‌زیستی و آب نقش مؤثری داشته باشند؟

مسئله آب درحال‌حاضر به موضوعی سیاسی و امنیتی تبدیل شده است. باتوجه‌به تعداد تحقیقاتی که در خصوص منابع آبی همدان انجام شده است؛ اما در مورد وضعیت آرسنیک اطلاعات خاصی در دست نمی‌باشد و نتایج حاصل از مطالعات نیز به‌راحتی اجازه انتشار پیدا نمی‌نماید. همکاری بین گروه‌های آموزشی، مراکز تحقیقاتی و بین‌بخشی می‌تواند کمک مؤثری در شناخت مسئله، وسعت آن، راهکارهای موجود، شناخت تنگناها و نقاط قوت و ضعف می‌دهد.

بهره‌گیری از دانشگاه‌ها و همچنین سازمان‌های مردم‌نهاد می‌تواند به طور مؤثری در این بخش فعال شوند که لازمه آن خرد جمعی و پتانسیل پذیرش آن از سوی سازمان‌های مسئول می‌باشد. درحال‌حاضر مدیریت آب به طور کامل در اختیار سازمان تأمین‌کننده آب است و فعالیت در دانشگاه‌ها صرفاً تحقیقات توصیفی بوده و نتایج حاصل از این مطالعات نیز به‌صورت پیشنهاد ارائه می‌گردد. همکاری سازمان‌های مردم‌نهاد می‌تواند فرهنگ مصرف را در به شکل مؤثری در جامعه اشاعه نماید.

باتوجه‌به آثار آلودگی منابع آب بر سلامت انسان، آیا می‌توان از طریق پژوهش‌ها، ارتباط مستقیمی بین این آلودگی‌ها و بیماری‌های رایج در کشور یافت؟ آیا داده‌های نظام سلامت می‌توانند در این زمینه راهگشا باشند؟

این یک اصل بدیهی است که سازمان جهانی بهداشت هم بارها بر آن تأکید کرده است. تقریباً ۸۰ درصد بیماری‌ها منشأ آبی دارند. نقش کیفیت آب در زندگی روزمره مردم حتی در محصولات کشاورزی بسیار اساسی است. چرا بسیاری از محصولات برگشت داده می‌شوند؟ به دلیل آلودگی ناشی از آب آلوده و باقی‌مانده سموم. آب هم بر سلامت مردم اثر دارد و هم بر توسعه کشور. مثلاً اگر قرار باشد همدان یا اصفهان منطقه گردشگری شوند، بهتر است صنایع آب‌بر به نقاط دیگر منتقل شوند. دانشگاه‌ها در ایران عمدتاً به مطالعات توصیفی محدود هستند و امکان مداخله واقعی ندارند. مثلاً حتی اجازه ورود به تصفیه‌خانه‌ها برای ارائه راهکار داده نمی‌شود. دستگاه‌های تولیدکننده آب مثل شرکت آبفا و نهادهای نظارتی مثل معاونت بهداشت و درمان دانشگاه‌های علوم پزشکی اطلاعات کاملی دارند، اما دسترسی به این اطلاعات و تجمیع آن‌ها برای تولید داده از چالش‌های اساسی می‌باشد.

یکی از موضوعاتی که جای تحقیق دارد، مسئله آب مجازی است. الان در خشکسالی شدید هستیم. شهرهای بزرگ مانند تهران و اصفهان در آستانه بحران آب قرار داشته و اخبار ناخوشایندی از کمبود آب در شهرهای مختلف کشور می‌رسد، آب مجازی یکی از مباحث مهمی است که باید در محافل علمی بیشتر به آن پرداخته شود. متأسفانه بسیاری از سیاست‌مداران بدون توجه به تبعات مصرف بی‌رویه آب، به دنبال تقویت بخش کشاورزی هستند، درحالی‌که خیلی از کشورهای اطراف ما با داشتن منابع غنی‌تر آبی واردکننده آب مجازی هستند. این کشورها غالباً واردکننده محصولات آب‌بری مثل طالبی، هندوانه و کیوی می‌باشند. این الگو می‌تواند با تغییر در مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی و جایگزینی محصولات استراتژیک همراه با آموزش و ترویج روش‌های نوین کشاورزی می‌تواند سهم مؤثری در مدیریت منابع آب از جنبه‌های کمی و کیفی داشته باشد.

علی وطن‌دوست
فعال محیط‌زیست

لطفاً در مورد آلودگی منابع آب زیرزمینی به‌صورت‌کلی و به طور مشخص در خراسان توضیح بفرمایید.

آلودگی یکی از مشکلات اصلی محیط‌زیست است و از آن مهمتر، کمبود آب به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار به شمار می‌آید. به عبارت دیگر، ظرف آبی که هرچه میزان آب آن کمتر باشد، آلودگی بیشتر به چشم می‌آید. یکی از دلایل اصلی آلودگی آب، کمبود آن است که این مشکل را تشدید کرده است. ما نه تنها منابع آب سطحی و زیرسطحی خود را از دست داده‌ایم، بلکه به‌ویژه آب‌های زیرزمینی‌مان نیز به‌شدت کاهش یافته است. افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی به دلیل عدم نظارت کافی و فشار روزافزون بر منابع آبی، به یک چالش جدی تبدیل شده است. به‌عنوان‌مثال، آلودگی‌های ناشی از فاضلاب در شهرک صنعتی چناران، تنها یکی از مواردی است که می‌توان به آن اشاره کرد. این آلودگی‌ها مختص این منطقه نیست و بسیاری از کارخانه‌ها با مشکلات مشابهی مواجه هستند. بااین‌حال این به معنای نبود قوانین و الزامات نیست. اگر به الزامات مربوط به شهرک‌های صنعتی و کارخانه‌ها توجه کنیم، می‌بینیم که تمامی الزامات ایمنی و بهداشتی در نظر گرفته شده است. به‌عنوان مثال هنگام احداث کارخانه‌ها، الزامات محیط‌زیستی به‌عنوان پیش‌نیاز در نظر گرفته می‌شود که شامل تعهداتی برای جلوگیری از آلودگی آب، هوا و خاک است. متأسفانه، این الزامات به طور کامل رعایت نمی‌شوند. مسئله آب به‌ویژه حائز اهمیت است، زیرا آب مایه حیات است. در شهرک صنعتی چناران، علی‌رغم الزامات اولیه برای احداث تصفیه‌خانه، این موضوع به فراموشی سپرده شده است. به‌عنوان‌مثال، در این منطقه، سفره‌های آب زیرزمینی تحت تأثیر آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های صنعتی قرار گرفته‌اند. با وجود اینکه این شهرک صنعتی عمر چندانی ندارد، اما در یک دشت بحرانی و حیاتی واقع شده است که تأمین‌کننده آب شرب برای کلان‌شهر مشهد است. آلودگی‌های صنعتی، به‌ویژه مواد شیمیایی و سمی، می‌توانند تأثیرات مخربی بر سلامت عمومی داشته

باشند. در دو تا سه سال گذشته، با وجود خلأهای قانونی، نظارت‌ها به طور مستمر انجام شده است. بااین‌حال متأسفانه توجه کافی به تذکرات داده شده از سوی نهادهای نظارتی نشده است. پرونده‌های متعددی به دستگاه قضایی ارجاع شده، اما به دلیل حمایت‌های غیرمستقیم از تولید، بسیاری از این مشکلات نادیده گرفته شده است. در طی این چند سال، محیط‌زیست به‌تنهایی نتوانسته به نتایج مؤثری دست یابد و مکاتباتش با شهرک‌های صنعتی و کارخانه‌ها غالباً به جریمه‌های نقدی ختم شده که بازدارنده نبوده است. اخیراً، با رسانه‌ای کردن این موضوع و جلب توجه افکار عمومی، دادگستری استان و شهرستان به این مسئله ورود کرده و دستورات پیگیری صادر شده است. بااین‌حال، ما به‌عنوان فعالان محیط‌زیست هنوز در جلسات مربوطه دعوت نشده‌ایم و از تصمیمات اتخاذ شده مطلع نشده‌ایم. در نهایت، علی رغم اصرار ما دادستانی برای افزایش ظرفیت تصفیه‌خانه شهرک صنعتی ۱۴ ماه مهلت داده و فاضلاب‌های سمی همچنان به طور مستقیم به سفره‌های آب زیرزمینی نفوذ می‌کنند و خاک را آلوده می‌سازند. این وضعیت نه‌تنها سلامت عمومی را تهدید می‌کند، بلکه به‌عنوان یک معضل جدی در تأمین آب شرب برای مردم مشهد به شمار می‌آید.

عدم پاسخگویی مسئولین و بی‌تفاوتی برخی از مردم نسبت به مسائل محیط‌زیستی، به‌ویژه در زمینه آلودگی آب، به یک معضل جدی تبدیل شده است. مسئولین به بهانه‌های مختلفی از جمله کمبود امکانات و منابع مالی، از پاسخگویی طفره می‌روند و این در حالی است که دغدغه‌های اصلی آن‌ها به نظر نمی‌رسد شامل مسائل محیط زیستی باشد. در استان خراسان، ما موفق شدیم حدود هزار امضا برای موضوع آلودگی کشف رود جمع‌آوری کنیم. این در حالی است که جمعیت استان خراسان بسیار زیاد است و جای تعجب دارد که چرا این جمعیت نگران کیفیت آب شرب و محصولات غذایی خود نیستند. واقعیت این است که قوانین و آیین‌نامه‌های لازم برای کنترل آلودگی وجود دارد، اما اجرای آن‌ها به‌درستی صورت نمی‌گیرد. بسیاری از کارخانه‌ها و شرکت‌ها هنگام تأسیس ملزم به رعایت الزامات محیط زیستی هستند، اما این الزامات به طور کامل پیگیری نمی‌شود. به نظر می‌رسد که سیستم نظارتی و تصمیم‌گیری در این زمینه ناکارآمد است. به‌عنوان‌مثال در مواردی که شکایاتی از شهرک‌های صنعتی مطرح شده، پس از مدت‌ها، دادگاه‌ها برگزار می‌شوند و به آن‌ها فرصت‌های طولانی برای اصلاح وضعیت داده می‌شود، بدون اینکه نتیجه‌ای ملموس حاصل شود. این وضعیت نشان‌دهنده عدم حمایت از افرادی است که در تلاش برای نظارت بر فعالیت‌ها و جلوگیری از آلودگی منابع آبی، هوایی و خاکی هستند. در مواردی که تصمیمات اتخاذ می‌شود، عدم اطلاع‌رسانی به ذی‌نفعان و فعالان محیط‌زیست، موجب می‌شود که آن‌ها از روند تصمیم‌گیری مطلع نشوند.

بااین‌حال اگر گروه‌های مردمی و نهادهای غیردولتی بتوانند به طور مؤثری در این زمینه فعالیت کنند و مردم را به مشارکت در مسائل محیط‌زیستی ترغیب کنند، می‌توانند نقش مهمی در پیشبرد این اهداف ایفا نمایند. این گروه‌ها می‌توانند به اطلاع‌رسانی و آگاهی‌بخشی در مورد مشکلات محیط‌زیستی بپردازند و به‌این‌ترتیب، فشار اجتماعی لازم را برای بهبود وضعیت ایجاد کنند.

واقعاً جای تأمل دارد که تعداد زیادی از چاه‌های تأمین آب شرب مشهد از منطقه‌ای خاص تأمین می‌شوند. اگر به طور دقیق بررسی کنیم، متوجه خواهیم شد که کیفیت آب این چاه‌ها به طور منظم مورد ارزیابی قرار نمی‌گیرد. به‌عنوان‌مثال، اگر از مسئولین مربوطه بپرسیم که آیا این چاه‌ها با مشکلات کیفی مواجه هستند یا خیر، معمولاً پاسخی قانع‌کننده دریافت نمی‌کنیم.

این عدم شفافیت و عدم ارائه آمار دقیق در مورد کیفیت آب، به‌ویژه در شرایطی که ممکن است برخی از چاه‌ها از مدار خارج شده باشند، موجب بروز نگرانی‌های جدی می‌شود. شفاف‌سازی اطلاعات و ارائه آمار دقیق می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در حل مشکلات موجود در زمینه کیفیت آب و بهبود وضعیت تأمین آب شرب مورد استفاده قرار گیرد.

چه اقداماتی برای حل مشکلات محیط‌زیستی در نظر گرفته شده است؟ وضعیت تصفیه پساب‌های صنعتی در شهرک‌های صنعتی چگونه است و نظارت بر فعالیت‌های این شهرک‌ها به چه صورت انجام می‌شود؟

همچنین، باتوجه‌به کمبود انرژی و خاموشی‌های مکرر، تولید در کارخانه‌ها تحت تأثیر قرار گرفته است. این وضعیت نشان‌دهنده نارضایتی عمومی از تأمین انرژی است و به نظر می‌رسد که این مشکل به طور جدی بر فعالیت‌های صنعتی و زندگی روزمره مردم تأثیر گذاشته است.

عدم شفافیت در ارائه اطلاعات به مردم، به‌ویژه در زمینه کیفیت آب و وضعیت تأمین انرژی، نگرانی‌های جدی را ایجاد کرده است. مردم باید از وضعیت منابع آبی خود مطلع شوند و حق دارند که به‌عنوان صاحبان اصلی کشور، از اطلاعات مربوط به سلامت و کیفیت آب شرب خودآگاه باشند. اگر امکان‌پذیر باشد، پیشنهاد می‌کنم که با استفاده از فناوری‌های نوین، مانند مانیتورینگ زیرزمینی، اطلاعات مربوط به کیفیت آب به طور شفاف و واضح در اختیار مردم قرار گیرد. این اقدام می‌تواند به افزایش آگاهی عمومی و ایجاد فشار اجتماعی برای بهبود وضعیت منابع آبی کمک کند. همچنین، باید به این نکته توجه کرد که بسیاری از چاه‌های غیرمجاز درحال‌حاضر وجود دارند و نیاز به نظارت و مدیریت دقیق‌تری دارند. در نهایت، از تمامی دانشجویان و فعالان اجتماعی خواهش می‌کنم که صدای خود را به طور مؤثر منتقل کنند و برای بهبود وضعیت محیط‌زیستی و منابع آبی تلاش کنند.

متأسفانه، وضعیت کنونی جامعه ما به‌ویژه در زمینه منابع آبی و محیط‌زیست، نشان‌دهنده بی‌تفاوتی گسترده‌ای است که باید به آن توجه شود. اگرچه ممکن است برخی از ما درختی بکاریم و به آن رسیدگی کنیم، اما واقعیت این است که آلودگی و مشکلات محیط‌زیستی در حال گسترش است و این

موضـــوع نیازمند اطلاع‌رســـانی و آگاهی اســـت. مردم باید از وضـــعیت آلودگی‌هـا و چـالش‌هـای موجود آگـاه شـــونـد و دســـتگاه‌های نظارتی نیز باید به طور فعال‌تری در این زمینه عمل کنند. عدم واکنش مناسب از سوی مسئولین و نهادهای مربوطه به مشکلات محیط‌زیستی، به‌ویژه در حوزه بهداشت و درمان، امنیت غذایی و انرژی، جای نگرانی دارد. واقعیت‌های جامعه نشـان می‌دهد که شـرایط نابسـامانی در این حوزه‌ها وجود دارد و بروکراســی اداری نیز به پیچیدگی این مســائل افزوده اسـت. ضـروری اسـت که جلسـات شـفاف و عمومی در مورد وضـــعیت آب و محیط‌زیســـت برگزار شـــود تا مردم از جزئیات و چالش‌های موجود مطلع شوند. این آگاهی می‌تواند به افزایش مطالبه‌گری عمومی و فشار بر مسئولین برای اتخاذ تصـمیمات مؤثر کمک کند. همچنین، دانشـجویان و جامعه دانشـــگاهی بایـد نقش فعـالی در این زمینـه ایفـا کننـد و بـه مطالبه‌گری در حوزه‌های تخصـــصـــی خود بپردازند. به‌ویژه دانشجویان رشته‌های محیط‌زیست باید وقت بیشتری را به مســـائل محیط زیســـتی اختصـــاص دهند و در راســـتای آگاهی‌بخشی و اطلاع‌رسانی به جامعه تلاش کنند.

در مورد مصـــاحبه‌ای که در مورد جانمایی آرامســـتان گلبهار داشتید لطفاً توضیح بفرمایید.

درحال‌حاضـــر وضـــعیت آرامســـتان‌ها و مدیریت فاضـــلاب در شـــهرک‌های جدید، به‌ویژه در گلبهار، نیازمند توجه و بررســـی جدی است. با وجود گذشت سال‌ها از تأسیس این شهرک، هنوز آرامستان مناسبی برای ساکنان آن ایجاد نشده است. این موضوع به‌ویژه باتوجه‌به فشارهای اجتماعی و مخالفت‌های مختلف از سـوی نهادهای مربوطه، از جمله اداره آب منطقه و شبکه بهداشت و درمان، پیچیده‌تر شده است.

مســـئولین محلی و نهادهای ذی‌ربط به‌جای ارائه راهکارهای عملی، به سکوت و عدم واکنش نسبت به این مشکلات ادامه می‌دهند. در این راستا، استفاده از فضای مجازی و جلب افکار عمومی به‌عنوان ابزاری برای ایجاد فشـار بر مسـئولین، به یک ضـرورت تبدیل شـده اسـت. به‌عنوان‌مثال، اخیراً کارشـناسـان محیط‌زیســـت اعلام کرده‌اند که آرامســـتان باید در مکانی مناســـب احداث شـــود، اما همچنان با مخالفت‌هایی مواجه هستند.

مشـکل دیگری که در این زمینه وجود دارد، عدم شـفافیت در ارائه اطلاعات به مردم اسـت. مسـئولین باید واقعیت‌ها را به طور صـادقانه با شـهروندان در میان بگذارند و به جای ایجاد آرامســـتان در مکان‌های نامناســـب، به دنبال مکان‌های مناسب‌تری باشـند. علاوه‌براین، مدیریت فاضـلاب نیز به طور جدی نیازمند اصـلاحات اسـت. در برخی مناطق، فاضـلاب به‌جای تصفیه، به طبیعت رها می‌شود که این امر می‌تواند به آلودگی منابع آبی و محیط‌زیسـت منجر شـود. این موضـوع نشـان‌دهنده نیاز به نظارت و مدیریت مؤثرتر بر سـیسـتم‌های فاضلاب و بهداشت عمومی است.

درحال‌حاضـــر فعالیت‌هـای محیط زیســـتی در کشـــور بـا چالش‌های جدی مواجه اسـت. وجود قوانین و آیین‌نامه‌های مربوط به حفاظت از محیط‌زیست به‌تنهایی کافی نیست، زیرا سیستم‌های قدرت و نهادهای تصمیم‌گیرنده معمولاً تمایلی به اجرای این قوانین ندارند. این عدم تمایل می‌تواند به دلایل مختلفی نسبت داده شود، از جمله مسائل امنیتی که به‌عنوان توجیهی برای عـدم شـــفـافیـت و پنهـان‌کـاری در نظر گرفتـه می‌شود.

در این راستا، فضای مجازی به‌عنوان ابزاری مؤثر در روشنگری و اطلاع‌رســـانی عمل می‌کند. گفت‌وگوها و تبادل نظرهایی که در این فضا انجام می‌شود، می‌تواند به افزایش آگاهی عمومی و جلب توجه بـه مشـــکلات محیط زیســـتی کمـک کنـد. به‌عنوان‌مثال، در مقایسـه با کشـورهای دیگر، دسـترسـی به اطلاعـات و تصـــاویر ماهواره‌ای در ایران بـا محـدودیت‌هـایی مواجه اســـت و این امر مانع از جمع‌آوری داده‌های لازم برای تحقیقات علمی می‌شود. در زمینه آلودگی‌های محیط‌زیستی، به‌ویژه در مناطق صـــنعتی مانند چناران، مشـــکلات متعددی وجود دارد. برخی افراد ممکن است تصور کنند که مشکلات محیط‌زیســـتی در یک منطقه خاص به آن‌ها ارتباطی ندارد، درحـالی‌کـه واقعیـت این اســـت کـه آلودگی و مســـائـل محیط‌زیستی می‌تواند به طور مستقیم بر سلامت و کیفیت زنـدگی همـه افراد تـأثیر بگـذارد. بـه‌علاوه، مـدیریـت زبـالـه و فاضـــلاب در کشـــور به‌ویژه در مناطق شـــهری و روســـتایی با چالش‌های جدی روبه‌رو اسـت. زباله‌ها به‌عنوان "طلای کثیف" شناخته می‌شوند، اما در ایران به طور مؤثر مدیریت نمی‌شوند. این موضوع نیازمند توجه و اقدامات جدی از سوی مسئولین و نهادهای مربوطه اسـت. درحال‌حاضـر، وضـعیت مدیریت منابع طبیعی و محیط‌زیسـتی در کشـور به‌ویژه در حوزه آب و خاک با چالش‌های جدی روبه‌رو اسـت. متأسـفانه، بسـیاری از ارگان‌ها و نهادهای مســـئول در تأمین و حفاظت از این منابع بـه‌درســـتی عمـل نمی‌کننـد و این امر منجر بـه بهره‌برداری غیرمجاز و سـوءاسـتفاده از ذخایر ملی شـده اسـت. در این زمینه، مافیاهای مختلفی وجود دارند که به طور غیرقانونی به اســـتخراج و بهره‌برداری از منـابع طبیعی می‌پردازنـد. این فعالیت‌ها معمولاً با جریمه‌های نقدی حل و فصـل می‌شـوند که نشان‌دهنده ضعف در نظام نظارتی و قانونی کشور است. به عبارتی، در بسـیاری از موارد، مشـکلات محیط‌زیسـتی و تخلفات با پرداخت جریمه‌های مالی قابل حل هسـتند که این رویکرد بـه‌هیچ‌وجـه پـایـدار نیســـت. علاوه‌براین وضـــعیت زیرسـاخت‌ها و خدمات عمومی در کشـور نیز به‌ویژه در مناطق شـهری، به‌ویژه در مشـهد، به‌شـدت تحت تأثیر این مشـکلات قرار دارد. ترافیک، آلودگی و عدم مدیریت صـحیح منابع آب و خاک، به طور مسـتقیم بر کیفیت زندگی مردم تأثیر می‌گذارد. در این راســـتا، ضـــروری اســـت که قوانین و مقررات به طور جدی‌تری اجرا شـــوند و متخلفان به طور مؤثری مورد پیگرد قانونی قرار گیرند. همچنین، باید توجه داشـت که جریمه‌های مـالی نمی‌تواننـد جـایگزین اقـدامـات مؤثر در حفـاظـت از محیط‌زیســـت و منابع طبیعی شـــوند. برای حفظ ســـلامت و امنیت غذایی ۸۰ میلیون نفر در کشـــور، نیاز به یک رویکرد

جامع و پایدار در مدیریت منابع طبیعی و محیط‌زیستی داریم. این رویکرد باید شامل نظارت دقیق، شفافیت در تصمیم‌گیری‌ها و مشارکت فعال جامعه در حفاظت از محیط‌زیست باشد. تنها از طریق این اقدامات می‌توان به بهبود وضعیت محیط زیستی و منابع طبیعی کشور دست یافت.

درحال‌حاضر پروژه‌های انتقال آب از مناطق جنوبی به مشهد با چالش‌های جدی مواجه است. این پروژه‌ها که به‌منظور تأمین آب برای مناطق کم‌آب طراحی شده‌اند، نیازمند ارزیابی دقیق و برنامه‌ریزی مناسب برای دستیابی به نتایج پایدار هستند. زمان‌بندی اجرای این پروژه‌ها و تأثیرات آن‌ها بر منابع آبی و محیط‌زیست باید به طور جدی مورد توجه قرار گیرد.

متأسفانه، در این زمینه، مافیاهای مختلفی وجود دارند که به طور غیرقانونی در مدیریت منابع آب دخالت می‌کنند. این مافیاها که به‌ویژه در حوزه آب نقش مهمی دارند، می‌توانند بر تصمیم‌گیری‌های کلان تأثیر بگذارند و در برخی موارد، منافع شخصی را به منافع عمومی ترجیح دهند.

در این راستا، سیستم‌های نظارتی موجود در کشور باید به طور مؤثری عمل کنند تا از سوءاستفاده‌های احتمالی جلوگیری شود. به نظر می‌رسد که در برخی موارد، تصمیم‌گیران تحت‌فشار قرار می‌گیرند تا با پروژه‌های انتقال آب از خلیج‌فارس و دریای عمان به فلات ایران موافقت کنند، بدون آنکه به عواقب محیط‌زیستی و اجتماعی این تصمیمات توجه کافی داشته باشند. علاوه‌براین وضعیت آب در برخی مناطق، به‌ویژه در سیستان و بلوچستان، نشان‌دهنده نیاز به تأمین آب سالم و بهداشتی است. در این مناطق، دسترسی به آب لوله‌کشی و سالم به‌عنوان یک حق اساسی باید مورد توجه قرار گیرد.

رودخانه‌ها و جنگل‌ها به‌عنوان منابع ملی، حیات و اکوسیستم‌های محلی را تأمین می‌کنند؛ بنابراین، هر گونه اقدام در جهت بهره‌برداری از این منابع باید با دقت و با رعایت قوانین و مقررات مربوطه انجام شود. متأسفانه، در برخی موارد، مجوزهای لازم برای بهره‌برداری از این منابع به‌راحتی صادر می‌شوند، بدون آنکه به عواقب محیط‌زیستی و اجتماعی آن توجه کافی شود.

مسئولیت‌های مربوط به حفاظت از منابع طبیعی باید به طور جدی مورد توجه قرار گیرد. اگر یک اداره، مانند اداره منابع طبیعی، با اقداماتی مخالفت کند، باید به طور شفاف دلایل این مخالفت‌ها بیان شود و در صورت عدم پاسخگویی از سوی نهادهای مربوطه، باید سازوکارهای قانونی برای پیگیری این مسائل وجود داشته باشد.

علاوه‌براین باید توجه داشت که قوانین مربوط به واگذاری معادن و منابع طبیعی باید به طور دقیق و عادلانه اجرا شوند. در مواردی که مجوزهای بهره‌برداری صادر می‌شود، باید اطمینان حاصل شود که این مجوزها به طور قانونی و با رعایت حقوق جامعه محلی صادر شده‌اند.

در نهایت، برای حفظ و مدیریت پایدار منابع طبیعی، نیاز به همکاری بین نهادهای دولتی، جامعه محلی و فعالان محیط‌زیست وجود دارد. تنها از طریق این همکاری می‌توان به حفاظت از منابع طبیعی و تأمین نیازهای جامعه دست یافت.

درحال‌حاضر پیشرفت در مدیریت منابع آبی و حفاظت از محیط‌زیست در منطقه میانکاله با چالش‌های متعددی مواجه است. انتظار می‌رود که باتوجه‌به تلاش‌های صورت گرفته، سیستم حاکمیتی کشور به طور جدی به این مسائل توجه کند و اجازه دهد که فعالان محیط‌زیست و جامعه مدنی گام‌های مؤثری در راستای آشنایی مردم با وضعیت منابع آبی بردارند.

آگاهی عمومی در مورد وضعیت آب و منابع طبیعی می‌تواند رفتارهای مصرف‌کنندگان را تغییر دهد. اگر مردم بدانند که در سال آینده با کمبود آب مواجه خواهند شد، به طور طبیعی رفتار خود را در مصرف آب تغییر خواهند داد. متأسفانه، عدم شفافیت و تشویش افکار عمومی در این زمینه می‌تواند منجر به بروز مشکلات جدی‌تری شود. در این راستا، پرسش‌هایی در مورد وجود نقشه‌های پراکندگی مکانی و آلودگی آب‌های زیرزمینی مطرح می‌شود. آیا اداره مربوطه اقدام به تهیه چنین نقشه‌هایی کرده است که بتواند به‌عنوان منبعی برای آگاهی‌رسانی به جامعه و مسئولان بالاتر استفاده شود؟ وجود اعداد و ارقام دقیق در این زمینه می‌تواند به مطالبه‌گری مؤثر در حوزه محیط‌زیست کمک کند. به‌عنوان یک شهروند ایرانی، حق داریم که در تمامی حوزه‌هایی که به زندگی و آینده فرزندانمان مربوط می‌شود، مطالبه‌گری کنیم و پرسشگر باشیم. این حق قانونی ماست که به‌عنوان کنشگران اجتماعی، از مسئولان بخواهیم که به اجرای صحیح قوانین و پیگیری مسائل محیط‌زیستی توجه کنند. متأسفانه، درحال‌حاضر دسترسی به داده‌های مربوط به وضعیت آب و آلودگی آن محدود است و بسیاری از این اطلاعات به دلیل مسائل امنیتی محرمانه باقی می‌مانند. بااین‌حال اگر مطالبه‌گری جمعی وجود داشته باشد، می‌توانیم به واقعیت‌ها دست یابیم و در راستای حفظ منابع آبی سالم و بهبود وضعیت محیط‌زیست تلاش کنیم.

دکتر جهانشير محمدزاده هابيلي
عضو هيئت علمي گروه علوم و مهندسي آب دانشگاه شيراز

شـماي كلي از آلودگي منابع آبي در اسـتان فارس كه چه نوع آلودگي‌هايي وجود دارد را بفرماييد؟

من در بحث آلودگي آب‌هاي سطحي و زيرزميني، هم در استان فارس، هم در بوشـهر و هم در اسـتان خوزسـتان، چون عامل آلودگي مشـترک اسـت، يعني وجه مشـترکي دارند، چه براي آب‌هاي سـطحي و چه براي آب‌هاي زيرزميني کار تحقيقاتي انجام داده‌ام. همان‌طور که مي‌دانيم، بخش زيادي از منابع آب سـطحي کشـور در جنوب غرب کشـور، عمدتاً در اسـتان‌هاي فارس، خوزستان و بوشهر قرار دارند. رودخانه‌هاي بزرگي مانند رودخانه‌هاي قره‌آغاج، شـاپور، دالکي، زهره، کارون و... در اين منطقه وجود دارند و همه اين رودخانه‌ها يک وجه آلودگي مشـترک دارند؛ معمولاً سـرچشـمه اين رودخانه‌ها، آب‌هاي شـيرين و با کيفيت بسـيار بالا اسـت، اما در ميانه‌هاي راه، آب اين رودخانـه‌ها از يکسـری منابع آلوده‌کننده طبيعي عبور مي‌کند. از جمله اين منابع، سـازند تبخيري گچسـاران و گنبدهاي نمکي سـازند هرمز مي‌باشـند. معمولاً از اين سازندهاي نمکي، يکسری شورابه‌ها يا چشـمه‌هاي آب شور نشـات مي‌گيرند که پس از ورود به جريان رودخانه‌ها باعث افزايش شديد شوري و آلودگي آنها مي‌شوند. غلظت نمک اين چشـمه‌هاي شـور تا ۲۵۰ گرم بر ليتر و يا حتي بيشـتر نيز مي‌رسد؛ يعني اگر يک ليتر از آب اين چشمه‌ها را بجوشانيم، ۲۵۰ گرم نمک به ما مي‌دهد و اين نشـان‌دهنده آلودگي بالاي اين چشـمه‌ها اسـت. اين مورد مهمترين عامل آلوده‌کننده منابع آب جنوب کشور است که در رودخانه‌هاي کارون، زهره، شـاپور، دالکي، قره‌آغاج و رودخانـه کر وجود دارد. علاوه بر چشـمه‌هاي نمکي يا شـورابه‌ها، انحلال گچ سـازند گچسـاران توسـط جريان‌هاي سـطحي و زيرسـطحي نيز باعث افزايش شوري آب‌هاي سطحي و زيرزميني در اين استان‌ها مي‌شود.

متأسـفانه، اتفاقي ديگري که در جنوب و جنوب غرب کشـور افتاده، اين اسـت که از سـال آبي ۱۳۸٦ با يک خشـکسـالي شـديد هيدرولوژيکي در جريان رودخانه‌ها مواجه شـده‌ايم که دليل اصلي آن ناشـي از کاهش بارندگي مي‌باشد. اين کاهش بارندگي، در استان فارس و براي ايستگاه‌هايي که در ۵۰ تا ٦۰ سال اخير، آمار بلندمدت بارندگي در آن‌ها ثبت شده است، به طور متوسـط در حدود ۲۵ درصـد کاهش بارندگي را نشـان مي‌دهد. اين کاهش بارندگي در کنار افزايش برداشـت بي‌رويه از منابع آب‌هاي زيرزميني از طريق چاه‌ها باعث خشـکيدن يا کاهش آبدهي چشمه‌هايي شده است که قبلاً بخش زيادي از جريان آب رودخانه‌ها را تأمين مي‌کرده‌اند. همچنين پروژه‌هاي سدسازي و انتقال آب بين حوضه‌اي در بالادست رودخانه‌ها باعث کاهش بيشـتر حجم مخازن آب زيرزميني و همچنين کاهش آبدهي رودخانه‌ها شـده اسـت. بنابراين، رودخانه‌ها زماني که به محل گنبدهاي نمکي و سـازندهاي تبخيري مي‌رسـند، دبي‌شـان به‌شـدت کم مي‌شـود. اين کاهش دبي تا حدود ۷۰٪ و يا حتي بيشـتر نيز مي‌رسـد. از طرف ديگر، آب شـوري که از طرف چشـمه‌هاي شـور و شـورابه‌هاي گنبدهاي نمکي وارد جريان رودخانه‌ها مي‌شـود، سـر جاي خودش باقي مانده اسـت. در نتيجه اين رودخانـه‌ها زماني که از رو يا مجاورت اين گنبدهاي نمکي عبور مي‌کنند، کيفيت آب آنها از شيرين به لب‌شور و شور تغيير مي‌کند.

به‌عنوان‌مثال رودخانه فيروزآباد در اسـتان فارس يک رودخانه با سـرچشـمه آب شـيرين مي‌باشـد که EC آن در حد ٤۰۰ ميکروموس بر سـانتي‌متر مي‌باشـد. متأسـفانه سـد مخزني تنگاب با حجم حدود ۱۵۰ ميليون مترمکعب در سال ۱۳۸٦ بر روي آن آبگيري شـده اسـت. از زماني که اين سـد بهره‌برداري شده است، حجم آبي که به طور متوسط وارد مخزن سد شده اسـت، سـالي ۳۰ ميليون مترمکعب بوده اسـت که حتي نتوانسته است حجم مرده مخزن سد را پر کند. آبي که پشت سـد جمع مي‌شـود يا در اثر اقليم گرم و خشـک منطقه به‌صـورت تبخير تلف مي‌شـود و يا اينکه از مخزن سـد فرار مي‌کنـد. از زمـان بهره‌برداری تـاکنون نزديـک بـه ۵۰۰ ميليون مترمکعب آب شـيرين با کيفيت وارد مخزن اين سـد شـده است و تنها يک سال توانسته حجم مرده اين سد را رد کند و ۲ ميليون مترمکعب آب از آن خارج شـده اسـت. اگر اين ۵۰۰ ميليون مترمکعب مي‌توانسـت به سـمت پايين‌دسـت جاري شـود، از شـهر فيروزآباد عبور مي‌کرد و آبخوان آنجا را تغذيه مي‌کرد، اما اکنون اين آب پشـت سـد مي‌ماند يا فرار مي‌کند يا به‌صورت تبخير تلف مي‌شود. متأسفانه، دوباره در پايين‌دست اين رودخانه سدي عظيم‌تر با نام سد مخزني هايقر و با حجم ۲۲۷ ميليون مترمکعب در سال ۱۳۹۹ بهره‌برداری شده است، درحالي‌که آبدهي رودخانه فيروزآباد در محل سـد هايقر در حدود ٤۰ ميليون مترمکعب اسـت که حتي نمي‌تواند حجم مرده سـد را پر کند. اينجا هم به دليل گرم و خشـک بودن اقليم منطقه، بخش زيادي از آب پشـت سـد هايقر تلف مي‌شـود. در پايين‌دست سد هايقر، رودخانه فيروزآباد از روي گنبدهاي نمکي عبور مي‌کند و به دليل ماندن و تلف شدن آب شيرين رودخانه در پشت سدهاي تنگاب و هايقر، شوری آب رودخانه فيروزآباد در پايين‌دسـت (ايسـتگاه دهرم) به بيش از ۲۰۰۰۰ ميکروموس بر سـانتيمتر مي‌رسـد که عملاً شـور و غير قابل اسـتفاده براي مصـارف شـرب، صـنعت و کشـاورزي مي‌باشد. همان‌طور که مي‌دانيد، وقتي که جريان آب شور يک رودخانـه از روي يـک آبخوان عبور مي‌کنـد، بـه دليـل پايين‌تر بودن سـطح آب زيرزميني در داخل آبخوان، بخشـي از اين آب شـور رودخانـه بـه داخـل آبخوان نفوذ مي‌کند و وارد آبخوان مي‌شود و سفره‌هاي آب زيرزميني هم به‌تبع آن شور مي‌شوند. در مجموع در استان فارس از نزديک به ۱۰ سدهاي مخزني که

ساخته شده است، فقط ۲ تا سد درست کار مي‌کنند؛ يکي سد درودزن و ديگري نيز سد سلمان فارسي مي‌باشد که به‌خوبي مکان‌يابي شده‌اند. متأسفانه در بالادست سد درودزن هم سد ملاصدرا هست که آب آنجا به‌صورت تنظيم شده رهاسازي مي‌شود و از زماني که سد زده شده است، ساکنان بالادست هر چقدر که مي‌خواهند آب براي آبياري مزارع برنج برداشت مي‌کنند و سطح زيرکشت را نيز توسعه داده‌اند و اين مسئله باعث شده است که جريان هيدرولوژيکي رودخانه کر در پايين‌دست سد درودزن عملاً قطع و باعث خشک شدن درياچه‌های طشک و بختگان شود. همچنين چون جريان آب رودخانه کر قبلاً آبخوان زير خود را تغذيه مي‌کرده است، خشک شدن رودخانه باعث تسريع در روند افت سطح آب‌های زيرزميني در پايين‌دست سد درودزن شده است. علاوه‌براين، برداشت‌های بي‌رويه از منابع آب زيرزميني نيز يکي ديگر از عوامل خشک‌کننده درياچه‌های طشک و بختگان و افت سطح آب‌های زيرزميني در پايين‌دست سد درودزن و در نتيجه تشديد فرونشست زمين مي‌باشد. بنابراين در پايين‌دست سد درودزن عملاً آبي به مردم نمي‌رسد و فشار به سفره‌هاي آب زيرزميني وارد مي‌شود که در نقش رستم و نزديکي تخت جمشيد، بحث فرونشست و تخريب آثار باستاني را داريم که اين وضعيت به‌تدريج بخش‌هايي از فرهنگ ما را تهديد مي‌کند.

همچنين سد سلمان که در سال ۱۳۸٦ به بهره‌برداري رسيده است، داراي حجمي بالغ بر ۱۲۰۰ ميليون مترمکعب مي‌باشد. از زمان احداث اين سد، متوسط آورد رودخانه در محل سد حدود ۲۰۰ ميليون مترمکعب بوده است. يعني حجم سد شش برابر آبدهي رودخانه است. حجم بالاي مخزن سد سلمان باعث زياد گرفتن حجم مرده آن در حدود ۱٦۰ ميليون مترمکعب شده است. در نتيجه ۲۰۰ ميليون مترمکعب آب ورودي به مخزن سد در سطح بسيار گسترده‌ای در پشت سد پخش مي‌شود و در معرض تبخير قرار مي‌گيرد. در سال‌هاي اخير، حجم تلفات تبخير از اين سد حدود ۷۰ ميليون مترمکعب بوده است؛ يعني يک‌سوم آب ورودي به سد سلمان عملاً در اثر تبخير تلف مي‌رود که علاوه بر کاهش ۳۳ درصدی حجم آب خروجی از سد باعث افزايش شوری آن نيز می‌شود. متأسفانه، مسئولين مربوطه از اين مسائل درس نمي‌گيرند و بر روي رودخانه‌هاي شاپور و دالکي دوباره سد مي‌زنند. در خود شيراز نيز همين‌طور است. رودخانه خشک تنگ سرخ در شيراز که آبدهي آن زماني بالاي ۲۰ ميليون مترمکعب بوده است، در طول دو دهه اخير به کمتر از ۵ ميليون مترمکعب رسيده است. در صورت ساخت سد تنگ سرخ، مخزن آن به يک حوضچه تبخير و تلفات آب تبديل می‌شود. يکي از راه‌هاي حل بحران آب اين است که باتوجه‌به تغيير اقليم و کاهش بارندگي، مسئولين به‌جای ساخت سدهاي جديد، بايد به سمت برداشتن سدهاي موجود بروند تا حداقل آب موجود در رودخانه‌ها بتواند به سمت پايين‌دست رهاسازي شده تا بتواند سفره‌هاي آب زيرزميني را تغذيه و مباحث اکولوژيکي، محيط‌زيستي و فرونشست زمين نيز تا حد ممکن رعايت شود.

يکي ديگر از عوامل آلوده‌کننده (شور کننده) آب‌های زيرزميني در جنوب کشور و سواحل خليج‌فارس، پيشروي آب شور دريا به سمت آبخوان‌های شيرين ساحلي در اثر برداشت بي‌رويه آب زيرزميني از آبخوان‌های ساحلي می‌باشد. در آبخوان‌های ساحلي به ازاء هر متر افت در آبخوان، مرز آب شور و شيرين يا تراز سطح آب شور در زير آبخوان به اندازه ٤۰ متر صعود می‌کند. همين مسئله باعث شور شدن آبخوان‌های ساحلي خليج‌فارس در اثر برداشت بی‌رويه از مخازن آب زيرزمينی ساحلی شده است. به‌عنوان‌مثال در آبخوان ساحلي برازجان در استان بوشهر،EC آب بيشتر چاه‌هايي که از آبخوان ساحلي، آب برداشت می‌کنند بالاي ۵۰۰۰ ميکروموس بر سانتيمتر می‌باشد.

علاوه بر منابع طبيعي آلوده‌کننده مثل شورابه گنبدهاي نمکي و پيشروي آب شور دريا، آلودگي‌هاي ناشي از فعاليت‌های انساني مثل فاضلاب‌های شهري، فاضلاب‌های صنعتي، سموم و کودهاي کشاورزي که کشاورزان براي محصولات زراعي و باغي خود استفاده مي‌کنند، باعث آلودگي سفره‌هاي آب زيرزميني و آب‌هاي سطحي در جنوب کشور می‌شود. به‌عنوان‌مثال کودهاي نيتراته که در کشاورزي استفاده می‌شوند و همچنين نشت فاضلاب شهري تصفيه نشده به داخل سفره‌های آب زيرزميني باعث افزايش آلودگي نيترات در آب زيرزميني می‌شود.

در بحث منابع آلاينده انساني، مهمترين عامل آلودگي فاضلابي است که به دليل فعاليت‌هاي انساني و شهرنشيني توليد می‌شود. در بسياري از جاها تصفيه‌خانه‌هايي ساخته شده است و اگر تصفيه‌خانه بسيار پيشرفته باشد، سيستم لجن فعال دارد و آب خروجي آن و پسابي که از اين تصفيه‌خانه‌ها رهاسازي می‌شود، داراي کيفيت نسبتاً خوبي است. اما در بسياري از جاها تصفيه‌خانه‌اي وجود ندارد و اين فاضلاب‌هاي شهري و انساني به طور مستقيم وارد جريان آب‌هاي سطحي مانند رودخانه‌ها و درياچه‌ها و همچنين ورود به داخل مخازن آب زيرزميني می‌شوند. نمونه‌اش درياچه مهارلو در شهر شيراز است که بخشي از فاضلاب شهر شيراز به‌صورت تصفيه نشده و خام به داخل آن وارد مي‌شود که هم سفره آب زيرزميني شهر شيراز را آلوده مي‌کند و هم خود آب درياچه را به فاضلاب انساني آلوده می‌سازد. همچنين پساب کارخانه‌ها را داريم؛ مثلاً در شهر شيراز، مشکلي که براي رودخانه کر داريم اين است که سد درودزن زده شده و جريان هيدرولوژيکي رودخانه در پايين‌دست سد اکنون قطع است. در پايين‌دست سد، پتروشيمي شيراز وجود دارد که فاضلاب آن به‌صورت خام و يا در حد تصفيه مقدماتی وارد رودخانه می‌شود و اين فاضلاب به بستر رودخانه نفوذ کرده و وارد سفره آب زيرزميني می‌شود و منابع آب زيرزميني را آلوده می‌کند.

اصولاً، فاضلاب کارخانه‌های صنعتي، لبنیات، کارخانه‌های نساجي، پتروشیمي و فولاد باید تصفیه و سپس بازچرخاني شوند تا دوباره از این فاضلاب تصفیه شده استفاده گردد. یعني به‌جاي اینکه از آب‌هاي تجدیدپذیر مانند آب سطحي و آب زیرزميني استفاده کنند، باید فاضلاب خود را تصفیه و از آن استفاده نمایند. اما متأسفانه این اقدام صورت نمي‌گیرد. نکته دیگري که وجود دارد این است که در سال‌های اخیر و به دلیل کمبود آب، بحث شیرین‌سازی و انتقال آب از خلیج‌فارس مطرح و در این زمینه پروژه‌های نیز اجرا و یا در دست اجرا مي‌باشد. درحالي‌که هزینه شیرین‌سازی و انتقال آن و همچنین مباحث و مضرات محیط‌زیستی این پروژه در نظر گرفته نمي‌شود. زیرا هزینه‌هایي که براي هر مترمکعب آب شیرین شده باید صرف شود تا به نقاط مرکزي و شمالي کشور برسد، بسیار سرسام‌آور است و هیچ نوع توجیه اقتصادي ندارد. براي اینکه بتوانیم کمبود آب را جبران و یا با مشکل کمبود آب مواجه نشویم، یکي از راهکارهایي که وجود دارد و دنیا به سمت آن مي‌رود، تصفیه پیشرفته پساب تصفیه‌خانه‌هاي فاضلاب براي مقاصد شرب است. فاضلاب خامي که به تصفیه‌خانه مي‌آید، باید تصفیه اولیه (فیزیکي)، تصفیه شیمیایي و بیولوژیکي روي آن انجام شود و آب آن به استاندارد بالایي برسد. در ادامه بایستي تصفیه پیشرفته‌تري روي آن صورت گیرد و کمبود آب شرب به‌جاي اینکه از منابع آب زیرزميني یا آب سطحي یا از طریق شیرین‌سازي آب دریا تأمین شود، باید از طریق تصفیه پیشرفته پساب تصفیه‌خانه‌هاي فاضلاب انجام گیرد. زیرا در حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد آبي که به شبکه آب شهري وارد مي‌شود، به فاضلاب تبدیل مي‌شود. بنابراین، این پتانسیل وجود دارد که حدود ۸۰ درصد از آب مصرفي شهرهاي ما که اکنون با کمبود آب مواجه هستند، از طریق تصفیه پیشرفته پساب و فاضلاب تأمین گردد. یعني به‌جاي اینکه آب را از خلیج‌فارس و با صرف هزینه‌هاي هنگفت و مصرف برق فراوان تأمین کنیم که به ناترازي بیشتر انرژي برق در کشور دامن مي‌زند، وزارت نیرو باید به‌جاي سرمایه‌گذاري براي سدسازي و انتقال آب بین حوضه‌اي که هر کدام از این‌ها اثرات محیط‌زیستي و اقتصادي مخرب خود را دارند و طرح‌هاي موفقیت‌آمیزي نیستند، به سمت بازچرخاني آب و تصفیه پیشرفته پساب برود تا از این طریق کمبود آب شرب تأمین شود. هزینه این روش هم به‌مراتب کمتر از شیرین‌سازی و انتقال آب از خلیج‌فارس و دریاي عمان است. برخي کارشناسان مي‌گویند که هزینه تصفیه پساب حدود یک‌پنجم شیرین‌سازي و انتقال آب از دریا است. با تصفیه پیشرفته پساب علاوه بر حل مشکل آب شرب، مي‌توانیم فشار بر آب‌هاي زیرزميني و سطحي کشور را کاهش دهیم و هم مسائل محیط‌زیستي را حل کنیم.

به نظر شما، علت اصلي افزایش حجم آلودگي و عدم کاهش آن چیست؟ آیا این علل طبیعي دارد یا علل مدیریتي در آن دخیل است که روزبه‌روز مسائل آبي ما از جنبه آلودگي افزایش پیدا مي‌کند؟ نقش مدیریت و نقش انسان را در این مسائل چگونه مي‌بینید؟

یک دلیل که مي‌توان به آن اشاره کرد، عوامل طبیعي است. بارندگي ما کم شده و وقتي بارندگي کاهش مي‌یابد، به دلیل خشک بودن اقلیم ما، حجم تلفات تبخیر نیز بالا مي‌رود. به‌عنوان‌مثال قبلاً حجم بارندگي زیاد بوده و تلفات تبخیر در حدود ۷۰ درصد بوده است، اما اکنون در بعضي حوضه‌ها که در سال‌هاي اخیر بررسي کردیم، بارندگي حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد کم شده ولي تلفات تبخیر در بعضي از حوضه‌ها به بیش از ۸۵ درصد رسیده است. این به این معني است که ۸۵ درصد از بارندگي‌هاي موجود تبخیر مي‌شود. قاعدتاً این موضوع باعث کاهش جریان‌های آب سطحي و تغذیه آب زیرزميني و در نتیجه افزایش آلودگي شده است و این یک عامل طبیعي است. اما عامل انساني که موضوع را بدتر کرده، بحث برداشت‌هاي بي‌رویه از منابع آب زیرزميني و سطحي است. در واقع برنامه‌ریزي مناسبي وجود نداشته و جلوگیري نکرده‌اند، به‌طوري که مردم چاه‌هاي غیرمجاز زده‌اند و تعداد چاه‌هایي که حفر شده بسیار بالا است. وقتي ما آب زیرزميني را بیش از حد برداشت مي‌کنیم، آبي از مخازن آب زیرزميني وارد رودخانه‌ها نمي‌شود و همین موضوع باعث کاهش بیشتر آبدهي رودخانه‌ها مي‌شود. در نتیجه، حجم آبدهي آب شیرین رودخانه‌ها کم شده ولي حجم شورابه‌ها سر جاي خود باقي مانده است. یعني آب شیرین به دلیل عدم مدیریت و برداشت‌هاي بي‌رویه کاهش یافته است، اما آب‌های شور سر جاي خود باقي مانده است. در نتیجه، نسبت حجم آب شور چشمه‌هاي آب شور به حجم آب شیرین رودخانه‌ها که به محل چشمه‌هاي آب شور مي‌رسند، در حال افزایش است و این موضوع باعث افزایش شدید شوري آب رودخانه‌ها در بخش‌های پایین‌دست آنها شده است. مشکل بعدي که وجود دارد، عوامل انساني مثل احداث سدهاي بي‌ضابطه مي‌باشد که به حوضچه‌های تبخیر و تلفات آب تبدیل شده و باعث شده‌اند که حداقل آب شیریني که در بالادست رودخانه‌ها وجود دارد هدر رفته و یا اینکه مصرف شود. به‌عنوان‌مثال در استان فارس از مجموع حدود ۱۰ سد احداث شده، تنها ۲ سد از آنها نسبتاً مفید مي‌باشد. یکي سد درودزن و دیگري سد سلمان است که آن هم تلفات تبخیر زیادي دارد و یک‌سوم آب ورودي به آن از طریق تبخیر تلف مي‌شود. همه این عوامل، شامل سدسازي‌ها و برداشت‌هاي بي‌رویه از منابع آب زیرزميني، دست به دست هم مي‌دهند و باعث مي‌شوند که آب رودخانه‌ها با حداقل دبي به محل گنبدهاي نمکي برسند و سپس EC آن‌ها به‌صورت سرسام‌آوري افزایش مي‌یابد. به‌عنوان‌مثال رودخانه شاپور قبل از رسیدن به منابع شور، EC آن زیر ۱۲۰۰ است، اما پس از دریافت آب شور رودخانه شکستیان و عبور از گنبد نمکي کمارج، EC آن به‌شدت افزایش مي‌یابد به‌گونه‌ای که پس از خروج از استان فارس و ورود به استان بوشهر، EC آن به ۷۰۰۰ میکروموس بر سانتیمتر مي‌رسد.

نقش آیین‌نامه‌ها و قوانین را در ارتباط با بحث آلودگی و مشکلاتی که به وجود آورده بفرمایید؟

قوانین هم نقش مهمی دارند. در کشور ما، پروژه‌های آبی بایستی پیوست محیط‌زیستی داشته باشند. اکنون تغییرات اقلیمی که در کشورمان اتفاق افتاده است بایستی در ملاحظات محیط‌زیستی پروژه‌های انتقال آب و سدسازی لحاظ شود. زیرا مبنای طراحی و تعیین حجم همه پروژه‌های سدسازی کشورمان بر اساس آبدهی رودخانه‌ها در قبل از خشکسالی و تغییرات اقلیمی دو دهه اخیر می‌باشد که همه آنها پر آب بوده‌اند. متأسفانه قانونی در کشور نداریم که بگوید شرکتی که می‌خواهد یک سد بسازد یا سدی که در مرحله ساخت است یا می‌خواهد به بهره‌برداری برسد، باید تغییرات اقلیمی دو دهه اخیر که عوامل آن کاهش بارندگی کشور و برداشت‌های بی‌رویه از آب‌های سطحی و زیرزمینی است در آن لحاظ شود. این نیاز به قانون دارد و باید قانونی تصویب شود که این شرکت‌ها را ملزم کند که بر مبنای شرایط موجود، پروژه‌های سدسازی و انتقال آب را بازنگری کنند. حتی بر مبنای شرایط موجود لازم است که بسیاری از سدهای موجود هم از روی رودخانه‌ها برداشته شوند و این نیاز به قانون دارد. بحث دیگری که هست، این است که در بسیاری از جاها قانون داریم، ولی متأسفانه به قانون عمل نمی‌شود. در جانمایی پروژه‌ها معمولاً با اثرات آنها بر روی آب‌های زیرزمینی توجهی نمی‌شود. بخش زیادی از آب شرب شهرها و روستاهایمان (در حدود ۷۰ درصدش) از آب زیرزمینی تأمین می‌شود. این سفره‌های آب زیرزمینی باید منبع تغذیه‌شان مشخص و از ساخت و ساز و تغییر کاربری محل تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی جلوگیری شود و این نیاز به قوانین جدید دارد. شرایط فعلی ایجاب می‌کند که به بازنگری در قوانین موجود پرداخته شود. همچنین، در برخی مناطق، با وجود قوانین، متأسفانه به این قوانین توجهی نمی‌شود و پروژه‌های عمرانی به طور غیرقانونی در مناطق حساس اجرا می‌شوند. شناسایی و حفاظت از محل‌های تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی کاملاً ضروری است. به‌عنوان‌مثال، در اطراف شیراز، فعالیت‌های معدنی، صنعتی، شهرسازی و... بدون توجه به تأثیرات منفی آنها بر روی سفره‌های آب زیرزمینی ادامه دارد. باید توجه داشت که در مناطقی که تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی انجام می‌شود، نباید هیچ‌گونه فعالیت صنعتی یا ساخت‌وساز صورت گیرد. این مناطق باید به‌عنوان مناطق ممنوعه شناخته شوند. همچنین، لازم است که شهرداری‌ها و نهادهای مربوطه در زمینه‌های شهرسازی و صنعتی از تخریب محل تغذیه آبخوان‌ها جلوگیری کنند. در زمینه ایجاد فضاهای سبز شهری به‌عنوان مثال در شهر شیراز و با توجه به وجود زیبایی‌های طبیعی و چشم‌اندازهای زیبای موجود مثل کوه، درختچه‌های طبیعی، پوشش گیاهی و... باید تلاش کنیم تا این منابع را حفظ کنیم و از تخریب آن‌ها برای ساخت پارک‌ها و باغ شهری‌ها جلوگیری نماییم. به‌ویژه، درختان و گیاهان بومی که در این مناطق وجود دارند، باید مورد حفاظت قرار گیرند و از کاشت گونه‌های غیربومی و مهاجم مثل درخت اکالیپتوس که مصرف آب بالایی دارند، پرهیز شود.

در خصوص پایش کیفیت و کمیت آب‌های سطحی و زیرزمینی بفرمایید؟

پایش و اندازه‌گیری کیفیت و کمیت آب‌های سطحی و زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خوشبختانه تعداد ایستگاه‌های پایش کیفیت و کمیت آب‌های سطحی و زیرزمینی در سطح استان فارس و جنوب کشور مناسب است و پارامترهای کیفی و کمی متعارف آب به طور منظم در این ایستگاه‌ها اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. داده‌های اندازه‌گیری شده در این ایستگاه‌ها می‌توانند به پایش و کنترل آلودگی و پیشگیری از گسترش آن کمک کنند. باتوجه‌به پیشرفت فناوری و تغییرات در رفتار مصرفی انسان، ترکیبات شیمیایی جدیدی تولید شده‌اند که می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر کیفیت آب داشته باشند. در این راستا، سیستم‌های پایش کیفیت آب باید به‌روز شوند تا بتوانند این تغییرات را به‌خوبی پوشش دهند.

بااین‌حال در زمینه پایش کیفیت آب، به‌ویژه در مورد آلاینده‌های نوظهور و عناصر سنگین، چالش‌هایی وجود دارد. به‌عنوان‌مثال میکروپلاستیک‌ها و ترکیبات شیمیایی جدیدی که به آب‌های سطحی و زیرزمینی وارد می‌شوند، نیازمند توجه بیشتری هستند. متأسفانه، پایش این آلاینده‌ها به طور روتین انجام نمی‌شود و تنها در صورت درخواست ارگان‌های خاص، ممکن است بررسی شوند. علاوه‌براین ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی نیز باید به طور دقیق‌تری مورد ارزیابی قرار گیرد. اطلاعات مربوط به این ترکیبات و آلاینده‌ها باید به طور منظم جمع‌آوری و در اختیار محققان و تصمیم‌گیرندگان قرار گیرد تا بتوانند به طور مؤثری در مدیریت منابع آب اقدام کنند. به نظر می‌رسد که همکاری بین شرکت‌های وابسته و نهادهای تحقیقاتی می‌تواند به بهبود کیفیت داده‌ها و اطلاعات موجود کمک کند و در نتیجه، مدیریت بهتری بر روی منابع آبی کشور صورت گیرد.

در خصوص پتروشیمی شیراز و ورود فاضلاب شهرها به رودخانه‌ها، همچنین وضعیت دریاچه مهارلو، اقدامات محیط‌زیست در این زمینه چگونه است و آیا واقعاً نظارتی از سوی این نهاد وجود ندارد؟ آیا طرح‌های پژوهشی در استان فارس در این زمینه انجام شده و آیا این موضوع جزء اولویت‌های پژوهشی قرار دارد؟ همچنین، آیا وزارت مربوطه در این زمینه اقداماتی انجام می‌دهد و داده‌برداری‌هایی صورت می‌گیرد؟

متأسفانه، مشکل اصلی ما در شیراز، آلودگی‌های ناشی از فاضلاب خام شهر شیراز و ورود آن به دریاچه مهارلو و حتی در بعضی موارد آبیاری محصولات کشاورزی مانند گندم و برنج با این آب‌های آلوده است. محیط‌زیست گاهی اوقات به این موضوعات رسیدگی می‌کند، اما به نظر می‌رسد که اهرم‌های فشار موجود مانع از توقف تولید و کنترل آلاینده‌های

صنعتي مي‌شود. كارشناسان محيط‌زيست به‌خوبی از وجود اين مشكلات آگاه هستند و تذكرات لازم را مي‌دهند، اما فشارهاي سياسي ممكن است مانع از اجراي صحيح وظايف نظارتي آن‌ها شود. در خصوص طرح‌هاي پژوهشي، متأسفانه اين طرح‌ها در بيشتر موارد به‌صورت سفارشي انجام مي‌شوند و برخي از اساتيد خاص در اين زمينه فعال هستند. نتايج اين پروژه‌ها غالباً به كتابخانه‌ها منتقل مي‌شود و تأثير ملموسي بر زندگي مردم ندارد، زيرا سيستم نظارتي مناسبي براي واگذاري پروژه‌ها وجود ندارد. در بسياري از موارد، پروژه‌هاي محيط‌زيستي به افرادي سپرده مي‌شود كه يا تخصص لازم را ندارند يا اگر هم داشته باشند، به دليل فشار كارفرما، نتايج موردنظر كارفرما را ارائه مي‌دهند. اين مشكلات باعث مي‌شود كه پژوهش‌هاي محيط‌زيستي به‌درستی اجرا نشوند و نتايج آن‌ها به بهبود وضعيت آلودگي آب منجر نشود و حتي نتايج خروجي اين پروژه‌ها باعث بدتر شدن شرايط موجود نيز مي‌شود.

نقش سازمان‌هاي مردم‌نهاد (NGO) و گروه‌هاي فعال در زمينه‌هاي محيط‌زيستي در استان فارس و شيراز را چگونه ارزيابي مي‌كنيد؟ آيا شما ارتباطي با اين گروه‌ها داريد؟

اين سازمان‌ها به‌تدريج در حال شكل‌گيري هستند و به آن‌ها توجه بيشتري مي‌شود. اگر مباحث مربوط به آلودگي و مسائل محيط‌زيستي به‌خوبي از سوي دانشگاهيان مطرح و در اختيار اين گروه‌ها قرار گيرد، مي‌توانند به طور مؤثري در جلوگيري از اجراي پروژه‌هاي زيان‌آور كمک كنند. به‌عنوان‌نمونه در مورد سد تنگ سرخ، شيرازي‌ها و سازمان‌های مردم‌نهاد به‌خوبي فعال هستند تا از اجراي اين سد مخرب جلوگيري كنند. همچنين، در بوشهر، گروه‌هاي محيط‌زيستي و مردم‌نهاد موفق شدند تا مانع اجراي پروژه‌اي شوند كه قصد ايجاد معدن سنگ در يک ذخيره‌گاه طبيعي را داشت. اين نشان مي‌دهد كهNGO ها مي‌توانند ايرادات پروژه‌ها را شناسايي و به‌خوبي در اين زمينه عمل كنند. بااين‌حال اين گروه‌ها با مشكلات زيادي مواجه هستند. قوانين موجود گاهي اوقات دست و پاي آن‌ها را مي‌بندد و در بسياري از موارد، فعاليت‌هايشان به نتيجه نمي‌رسد.

در مشهد نيز گروه‌هاي محيط‌زيستي موفق شدند جلوي اجراي طرح كمربند سبز شهرداري را بگيرند كه قرار بود به تخريب تپه‌ها و گياهان منطقه منجر شود. به‌طوركلي مسائل مربوط به آلودگي آب در بسياري از نقاط كشور ما مشابه است. به‌عنوان‌مثال در برخي مناطق، فاضلاب به طور خام به رودخانه‌ها ريخته مي‌شود و كشاورزان از همين آب براي كشت محصولات استفاده مي‌كنند. اين وضعيت نشان‌دهنده مشكلات جدي و مشابهي است كه در سطح كشور وجود دارد و نيازمند توجه است. كنترل و نظارت بر شرايط منابع آب و مديريت آن‌ها به‌منظور بهبود كيفيت و كميت آب، امري ضروري است. همان‌طور كه اشاره كرديد، كاهش بارندگي‌ها يكي از عوامل مؤثر در كاهش كيفيت منابع آب است. اين كاهش بارندگي‌ها نه‌تنها بر كميت آب تأثير مي‌گذارد، بلكه كيفيت آن را نيز تحت‌تأثير قرار مي‌دهد.

به نظر شما چگونه مي‌توانيم با تكرار تغييرات اقليمي و كاهش نزولات جوي، آلودگي‌ها را كنترل و مديريت كنيم؟

يكي از طرح‌هاي مهمي كه در گذشته مطرح شده، طرح احيا و تعادل بخشي سفره‌هاي آب زيرزميني است. اين طرح به‌ويژه بر استفاده از پساب به‌جاي آب زيرزميني تأكيد دارد. همچنين، جلوگيري از حفاري چاه‌هاي غيرمجاز و خريداري چاه‌هاي كم‌بازده مي‌تواند به كاهش برداشت از منابع آب زيرزميني كمک كند. متأسفانه، با وجود اين طرح‌ها، مشكلاتي در اجراي آن‌ها وجود دارد. به‌عنوان‌مثال تا قبل از ابلاغ اين طرح، حفاري چاه‌های آب در دشت‌های استان فارس با سرعت زيادي در حال انجام بود ولي پس از ابلاغ اين طرح، روند حفر چاه‌های جديد به جز براي مقاصد تأمين آب شرب عملاً متوقف شده است. وزارت كشور چند سال پيش گزارشي را منتشر كرده بود كه در آن بحران آب به‌عنوان دومين مسئله كشور بعد از مسئله اقتصاد معرفي شده بود. براي مديريت بحران آب، نياز به متخصصان دلسوز و آگاه در حوزه منابع آب داريم. متأسفانه، در سطوح عالي مديريتي كشور، مسئولين داراي تخصص در زمينه منابع آب عملاً وجود ندارد. تنها وزير نيرويي كه در زمينه منابع آب تخصص داشت، دكتر اردكانيان بود كه با ارائه طرح احيا و تعادل بخشي سفره‌های آب زيرزميني تقريباً توانست كه روند حفر چاه‌های جديد آب را متوقف كند. استفاده از متخصصان در نهادهاي تصميم‌گير مي‌تواند به بهبود وضعيت بحران آب كمک كند. يكي از مشكلات اساسي در مديريت بحران آب، عدم وجود تصميم‌گيري‌هاي مؤثر و مبتني بر علم است. شركت‌هاي مشاوری كه در اين زمينه فعاليت مي‌كنند، گاهي اوقات منافع خود را در نظر مي‌گيرند و اين امر مي‌تواند به اتخاذ تصميمات نادرست منجر شود. به‌طوركلي نياز است كه تصميم‌گيرندگان به‌ويژه در زمينه منابع آب، از تخصص و دانش لازم برخوردار باشند تا بتوانند به طور مؤثري بحران آب را مديريت كنند. به‌عنوان مثال يكي از طرح‌های مخرب، طرح شيرين‌سازی و انتقال آب از خليج‌فارس به مناطق مركزي كشور می‌باشد كه علاوه بر غيراقتصادی بودن و تخريب اكوسيستم خليج‌فارس، می‌تواند باعث تغييرات اقليمي مخربي در كشور نيز بشود. به‌عنوان‌مثال بر اساس گزارشي كه وزارت نيرو منتشر كرده است، توليد هر كيلوگرم فولاد نياز به حدود ۲۵۰ ليتر آب دارد درحالی‌كه هزينه شيرين‌سازي و انتقال هر مترمكعب آب از خليج‌فارس به ۵۰۰ هزار تومان و يا حتی بيشتر نيز می‌رسد. يعني هزينه تأمين آب با اين روش براي توليد هر كيلو فولاد بيش از ۱۰۰ هزار تومان می‌باشد درحالی‌كه قيمت هر كيلو فولاد در بازار كمتر از ۵۰ هزار تومان می‌باشد. بنابراين استفاده از اين آب براي صنايع به هيچ عنوان داراي توجيه اقتصادي نمی‌باشد.

در مورد تصفيه‌خانه‌هاي پيشرفته، آيا استان فارس اقداماتي در اين زمينه انجام داده است؟ آيا تصفيه‌خانه‌هايي در حال

احداث هستند یا این موضوع تنها به‌عنوان یک طرح باقی مانده است؟

در شهرهاي شيراز و صدرا در استان فارس، تصفيه‌خانه‌هاي نسبتاً پيشرفته‌اي وجود دارد كه فاضلاب را با كيفيت نسبتاً خوبي تصفيه مي‌كنند. اما در مبحث تصفيه پيشرفته پساب اين تصفيه‌خانه‌ها براي مقاصد شرب هنوز اقدامي صورت نگرفته و حتي در مورد آن صحبتي از طرف مسئولين مربوطه نمي‌شود.

مهندس محمود طباطبایی
فعال محیط‌زیست

لطفاً سیمای کلی از آلودگی آب‌های زیرزمینی در استان خراسان رضوی و یا به‌طورکلی در ایران بفرمایید.

آلودگی منابع آب در ایران به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود: ۱- فاضلاب‌های خانگی و صنعتی که به هر نحوی وارد منابع آب و خاک می‌شوند و ۲- پساب‌های ناشی از فعالیت‌های صنعتی و معدنی که می‌توانند موجب آلودگی شوند. همچنین، زباله‌های شهری و صنعتی نیز به‌عنوان منابع آلاینده مطرح هستند. در این زمینه، پسماندهای شهری و صنعتی به‌عنوان عوامل مهمی در آلودگی منابع آب شناخته می‌شوند.

علاوه‌براین فروریزه‌های جریانات آب و هوایی نیز می‌توانند آلودگی‌هایی را به همراه داشته باشند. به‌عنوان‌مثال در بعضی مناطق ایران از نظر جهت جریان‌های هوایی طوری است که آلودگی ذرات گردوغبار را همراه بارش وارد منابع آب می‌کند مثل ذرات رادیواکتیو که این موضوع کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

فاضلاب‌های صنعتی و باطله‌های معدنی از جمله منابع اصلی آلودگی آب‌های سطحی و زیر زمینی به شمار می‌روند.

چالش دیگری که در زمینه کیفیت منابع آب وجود دارد، شوری آب است. شوری عمدتاً ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و ورود آب‌های شور به منابع آب شیرین است. این جابه‌جایی‌ها می‌تواند کیفیت آب را تحت‌تأثیر قرار دهد. در مناطق مختلف ایران، به‌ویژه در آبخوان‌های ساحلی، نمونه‌هایی از این مشکلات مشاهده شده است.

از نظر شیمیایی آلاینده‌ها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: آلاینده‌های آلی و معدنی. آلاینده‌های آلی عمدتاً ناشی از مواد آلی موجود در فاضلاب‌های شهری و صنعتی، به‌ویژه صنایع غذایی هستند. این مواد می‌توانند شامل ترکیبات مختلفی باشند که با پارامترهایی مانند BOD و COD اندازه‌گیری می‌شوند. همچنین، فلزات سنگین و ترکیبات شیمیایی دیگر نیز می‌توانند به‌عنوان آلاینده‌های خطرناک شناخته شوند که تأثیرات منفی بر سلامت انسان و محیط‌زیست دارند.

در بخش فاضلاب‌های شهری و صنعتی، حجم فاضلاب تولیدی به طور قابل‌توجهی بالا است. به‌عنوان‌مثال در مشهد، حجم فاضلاب تولیدی به حدود ۳۰۰ میلیون مترمکعب در سال می‌رسد. متأسفانه، به دلیل عدم سرمایه‌گذاری کافی در سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب، بخش عمده‌ای از فاضلاب‌ها به‌صورت غیربهداشتی و بدون تصفیه مناسب به منابع آب و خاک وارد می‌شوند. در سال‌های اخیر، برخی صنایع به سرمایه‌گذاری در سیستم‌های جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب پرداخته‌اند که این اقدام می‌تواند به کاهش آلودگی کمک کند. بااین‌حال در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در شمال کشور که صنایع کمتری وجود دارد، شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب هنوز به طور کامل توسعه نیافته‌اند و این موضوع به آلودگی منابع آب دامن می‌زند.

در نهایت، مشکلات ناشی از پساب‌های صنعتی و عدم وجود سازوکارهای مناسب برای انتخاب مشاوران و پیمانکاران کاربلد و متعهد، موجب بروز چالش‌های جدی در مدیریت منابع آب و فاضلاب شده است.

بهبود شرایط نیازمند توجه به نگهداری و مدیریت صحیح این سیستم‌ها است تا بتوان از آلودگی منابع آب جلوگیری کرد و کیفیت آب را بهبود بخشید. یکی از مشکلات اساسی در مدیریت منابع آب در ایران، نبود دانش و تجربه کافی در زمینه انتخاب مشاوران و پیمانکاران است. بسیاری از این انتخاب‌ها در اصل فقط بر اساس قیمت انجام می‌شود و نه بر مبنای معیارهای علمی و فنی. این موضوع باعث می‌شود که در بهترین حالت، پروژه‌ها به‌درستی اجرا شوند، اما نگهداری و مدیریت آنها به‌درستی انجام نگیرد. در نتیجه، بسیاری از سرمایه‌گذاری‌ها به هدر می‌رود و مشکلات متعددی در این زمینه ایجاد می‌شود.

نگهداری ضعیف از سیستم‌های آب و فاضلاب، به‌ویژه در صنایع معدنی مانند مس و طلا، منجر به بروز آلودگی‌های جدی می‌شود. به‌عنوان مثال، در برخی موارد، آب‌های آلوده ناشی از فرآوری معادن به سدهای باطله منتقل می‌شود. این آب‌ها ممکن است حاوی ترکیبات گوگردی باشند که به اسید تبدیل شده و باعث انحلال فلزات سنگین در آب شوند. فلزات سنگین ناشی از این باطله‌ها می‌توانند به‌شدت آلودگی منابع آب را تشدید کنند. سدهای باطله، به‌ویژه در معادن، معمولاً استانداردهای سخت‌گیرانه‌ای ندارند و این می‌تواند منجر به نشت آلودگی به منابع آب شود.

در ایران، مشکلات زمین‌شناسی نیز بر این چالش‌ها افزوده می‌شود، زیرا بسیاری از مناطق فاقد ساختگاه‌های مناسب برای ساخت سدهای باطله هستند. این موضوع باعث می‌شود که آلودگی‌ها به‌راحتی به منابع آب نفوذ کنند.

آلودگی منابع آب شرب، به آلودگی‌های مختلف به‌ویژه نیترات، یکی از شایع‌ترین مشکلات در این زمینه است. چاه‌های آب شرب در مناطق مسکونی به غلظت‌های مختلفی از نیترات آلوده شده‌اند. به‌عنوان‌مثال در شهر مشهد، غلظت نیترات در برخی چاه‌ها به ۴۵۰ میلی‌گرم در لیتر یا بیشتر رسیده است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که تعداد چاه‌های آلوده و غلظت نیترات در آنها در حال افزایش است. برخی معتقد هستند که این آلودگی‌ها ناشی از مصرف کودهای شیمیایی در کشاورزی است، اما پراکنش نیترات در مشهد نشان می‌دهد که این تنها دلیل نیست. آلودگی‌های بیولوژیکی ناشی از فاضلاب‌های انسانی و شهری نیز نقش مهمی در این زمینه دارند.

از طرف دیگر ترکیبات آلی مصنوعی موجود در فاضلاب‌ها که عملاً در روش‌های متعارف تصفیه از بین نمی‌روند، می‌توانند به سفره‌های آب نفوذ کرده و کیفیت آب را تحت تأثیر قرار دهند. در نهایت، برای مدیریت بهینه منابع آب و کاهش آلودگی‌ها، نیاز به بهبود دانش و تجربه در انتخاب مشاوران و پیمانکاران داریم علاوه‌براین اجرای استانداردهای سخت‌گیرانه‌تر در کنترل آلودگی صنایع و معادن ضروری است. آلودگی منابع آب در ایران به‌ویژه در اطراف شهرها و مناطق کشاورزی به یک معضل جدی تبدیل شده است. در این مناطق، آلودگی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، به‌ویژه وجود عناصر سمی مانند آرسنیک و کروم، به‌شدت موجب تخریب کیفیت آب می‌شود.

برخی از این آلودگی‌ها ممکن است ناشی از نفوذ مواد آلاینده به منابع آب از طریق زمین‌شناسی منطقه باشد. به‌عنوان‌مثال در مناطقی مانند بیرجند، کاشمر و کرمان، آلودگی‌های ناشی از فلزات سنگین به وضوح مشاهده می‌شود.

باتوجه‌به اهمیت کیفیت منابع آب، لازم است که نهادهای متولی در این زمینه اقداماتی را برای کنترل و بهبود کیفیت آب انجام دهند. کیفیت آب به‌عنوان یک ماده حیاتی، ارتباط مستقیم با سلامت جامعه دارد و تمامی افراد جامعه به‌نوعی از آن استفاده می‌کنند. نقش جامعه در کنترل منابع آبی و مدیریت کمبود آب بسیار حیاتی است. در دنیا سازمان‌های بین‌المللی مانند سازمان بهداشت جهانی (WHO) نظارت بر کیفیت آب شرب را بر عهده دارند و در داخل کشور نیز وزارت نیرو و وزارت بهداشت با همکاری یکدیگر، اقداماتی را برای پایش کیفیت آب انجام می‌دهند. این پایش‌ها شامل کلر سنجی و بررسی میکروبی آب در مناطق شهری و خانه‌های بهداشت روستایی است که نتایج آن به مراکز بهداشت شهرستان و استان ارسال می‌شود. شرکت‌های آب و فاضلاب نیز با آنالیز کیفیت آب در مناطق مختلف، اطلاعات لازم را جمع‌آوری و گزارش‌دهی می‌کنند. بااین‌حال یکی از چالش‌های اصلی این است که این اطلاعات به پژوهشگران و جامعه به طور کافی منتقل نمی‌شود. یکی از مشکلات اساسی در مدیریت آلودگی منابع آب، عدم دسترسی به اطلاعات کیفی و دقیق در مورد وضعیت آب‌ها است. اطلاعاتی که در اختیار نهادهای مختلف قرار می‌گیرد، معمولاً به‌صورت محرمانه نگهداری می‌شود و به‌راحتی در دسترس متخصصین و عموم قرار نمی‌گیرد. این موضوع باعث می‌شود که آگاهی عمومی در مورد آلودگی‌ها و تأثیرات آن‌ها کاهش یابد. افزایش آگاهی و آموزش جامعه می‌تواند به خودکنترلی منجر شود. اگر مردم، به‌ویژه کشاورزان و ساکنان مناطق مرزی، اطلاعات کافی در مورد تأثیرات آلودگی بر سلامت و محیط‌زیست داشته باشند، می‌توانند به بهبود وضعیت منابع آب کمک کنند. خودکنترلی معمولاً نتایج بهتری نسبت به کنترل‌های تحمیلی و قهری دارد.

سازمان‌های محیط‌زیست و آب منطقه‌ای مسئولیت حفاظت از کیفیت منابع آب را بر عهده دارند، اما در عمل، این نهادها به دلیل سوءتفاهم در مورد جدیت آلودگی و عدم توانایی در اجرای وظایف خود، نتوانسته‌اند به‌خوبی عمل کنند. به‌عنوان‌مثال در بسیاری از موارد، کارخانه‌ها به‌رغم دریافت اخطارهای متعدد، همچنان به فعالیت‌های آلاینده خود ادامه می‌دهند و مشکلات آلودگی حل نمی‌شود. این وضعیت نشان می‌دهد که نیاز به یک رویکرد جامع و سیستماتیک برای مدیریت آلودگی منابع آب وجود دارد. باید به‌جای برخوردهای قهری و محدودکننده، بر روی آموزش و آگاهی‌سازی جامعه و همچنین تقویت زیرساخت‌های نظارتی و مدیریتی تمرکز شود. سرمایه‌گذاری در فناوری‌های تصفیه آب و پسماند نیز باید به‌عنوان یک اولویت در نظر گرفته شود. این سرمایه‌گذاری‌ها می‌توانند به کاهش آلودگی و بهبود کیفیت منابع آب کمک کنند. در نهایت، ایجاد یک فرهنگ حفاظت از محیط‌زیست و منابع آب در جامعه، نیازمند همکاری و همفکری تمامی ذی‌نفعان است تا بتوان به نتایج مثبت و پایداری دست یافت.

یکی از مشکلات این است که از همان ابتدای ایده ایجاد یک صنعت، باید به صاحبان کسب‌وکارها گفته شود که اگر سرمایه‌گذاری برای تجهیزات و زمین انجام می‌شود، باید به مسائلی مانند تصفیه هوا و پسماند مایع و جامد هم توجه شود. این هزینه‌ها به هیچ وجه کم نیستند. سرمایه‌گذاران باید در سرمایه‌گذاری‌های اولیه دقت کنند و متأسفانه، سازمان‌های نظارتی ما به این مسائل به‌درستی رسیدگی نمی‌کنند. این امر باعث شده که دستگاه‌های نظارتی نتوانند قوانین را به‌درستی اجرا کنند. واقعیت این است که پیشبرد این مسائل به‌تنهایی امکان‌پذیر نیست و اگر فردی واقعاً آگاهی نداشته باشد، نمی‌تواند به‌راحتی با پرداخت هزینه‌ها برای رفع آلودگی کنار بیاید. همه افرادی که در کسب‌وکارها مشغول به کار هستند، باید حساسیت بیشتری نسبت به موضوع حفاظت از محیط‌زیست و کیفیت آب داشته باشند. به نظر می‌رسد که افزایش آگاهی عمومی بالاترین نقش را در این زمینه ایفا می‌کند. مردم باید مطلع باشند که چه رفتارهایی می‌تواند منجر به آلودگی شود و این آلودگی چه تبعات سنگینی برای سلامتی خودشان و دیگران دارد.

من امروز در اینترنت به جستجوی اطلاعاتی درباره آلودگی پرداختم و متوجه شدم که نقشه‌های آلودگی در ایالات متحده به‌راحتی در دسترس است. این نقشه‌ها نشان می‌دهند که در کدام نقاط میزان نیترات و دیگر آلاینده‌ها چقدر است. درحالی‌که در خاورمیانه و ایران، وضعیت آلودگی به‌شدت نگران‌کننده است و اطلاعات مربوط به این داده‌ها به‌راحتی در اختیار پژوهشگران قرار نمی‌گیرد. این موضوع به یک مسئله

امنیتی تبدیل شـــده و به همین دلیل، اطلاعات به عموم ارائه نمی‌شود. در این زمینه بفرمایید.

این عـدم شـــفافیت باعث ایجاد نگرانی در میان مـدیران می‌شود، زیرا وقتی اطلاعات در دسترس قرار نگیرد، نمی‌توانند به‌درســـتی تصـــمیم‌گیری کنند. اطلاعات مربوط به پروژه‌ها معمولاً به‌صـورت محرمانه نگهداری می‌شـود و این امر مانع از پیشـرفت در حل مشـکلات می‌شـود. به‌عنوان‌مثال آمار تراز سـطح آب مخزن سـد شـیرین دره باید در دسـترس باشـد تا بتوانیم وضـعیت آب را بررسـی کنیم و بدانیم که آیا تغییرات مربوط به بارندگی یا برداشـت‌ها اسـت. برای مقابله با آلودگی منابع آب، نیاز به یک رویکرد جامع و مشـــارکتی وجود دارد. بایـد تمـامی ذی‌نفعـان، از جملـه دولـت، جـامعـه و بخش خصـوصـی، به همکاری و تبادل اطلاعات بپردازند. همچنین، ایجاد گروه‌های مردم‌نهاد و تشـــویق به مشـــارکت عمومی می‌تواند به بهبود وضعیت آلودگی منابع آب کمک کند. تجربه خراســـان نشـــان می‌دهد که تلاش‌های گروه‌های مردم‌نهاد می‌تواند در این زمینه مؤثر باشـد و به موفقیت‌های بیشـتری منجر شـود. خوشـبختانه، افراد زیادی به‌صـورت داوطلبانه در زمینه حفاظت محیط‌زیست مشغول به کار هستند. این افراد دارای تخصص‌های زیادی در این حوزه هستند و ما از وزنه‌های علمی قابل توجهی بهره‌مند هسـتیم. همچنین، کارشـناسـان متعددی در جلسـات مربوطه حضـور دارند که با پشـتوانه کارشـناسـی خود، به ما کمک می‌کنند. بااین‌حال در برخی مناطق، کنش‌های محیط‌زیسـتی به حدی محدود یا منحرف شـده که به تأمین غذا برای حیوانات خانگی مانند سـگ‌ها و گربه‌ها می‌رسـد. این در حالی اسـت که بسـیاری از افراد تحت تأثیر بحران‌های بزرگ و گسـترده بهداشـتی و محیط‌زیسـتی؛ مانند کرونا قرار گرفته‌اند و ما باید با یک رویکرد متحد، جلوی کارهای نادرست را بگیریم.

در خراســـان، ما یکی از موفق‌ترین و پرانرژی‌ترین ســـمن‌ها (NGO) را در زمینه مدیریت آب داریم، اما واقعیت این اســـت که در مدیریت‌های اجرایی کشـــور، به‌ویژه در وزارتخانه‌ها، با چالش‌های زیادی مواجه هســـتیم. به‌عنوان‌مثال گاهی اوقات به نظر می‌رسـد که ما در حال بازی در زمین سـیاسـت‌مداران هستیم؛ تغییرات در وزارتخانه‌ها و استانداری‌ها باعث می‌شود که ما مجبور شـویم بارها و بارها، دوباره از ابتدا شـروع کنیم و انرژی زیادی صـــرف کنیم تا به یک نتیجه عملی برســـیم.

دکتر شروین جمشیدی
عضو هیئت علمی دانشگاه اصفهان

لطفاً درباره انتشـــار آلودگی منابع آب در کشـــور و چالش‌های اصلی آن توضیح بفرمایید.

باتوجه‌به سؤال اصلی مطرح شده، دو چالش اصلی برای حوزه کیفیت آب وجود دارد. چالش نخســـت اینکه از نظر فنی و هیـدرودینـامیکی، کیفیـت آب از کمیـت آن تـأثیر می‌پـذیرد. معمولاً زمانی که با مشـــکل کمبود آب مواجه هســـتیم، خود پالایی رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه غلظت آلودگی‌ها افزایش می‌یابد. اما چالش مهمتر به نظر من این اســـت که وقتی با مشـــکل کمبود آب مواجه می‌شـــویم، مســـائـل مربوط بـه کیفیـت آب بـه‌طورکلی از تلاش‌های زیادی برای تشـکیل شـورای عالی و شـورای حوضـه آبریز جهت مدیریت منابع آب انجام شده است، و این شوراها باید در بازار آب حضـــور داشـــته باشـــند، حتی اگر حق رأی نداشته باشـند. این تجربیات، هرچند که با چالش‌هایی همراه بوده، به ما کمک کرده‌اند تا در جلسات متعدد با استانداران و مســـئولان اجرایی، مطالبه‌گر باشـــیم و ثبات را در مدیریت محیط‌زیستی درخواست کنیم.

درحال‌حاضـــر افرادی در حوزه مـدیریت منابع آب در حال فعالیت هســـتند که به چالش کشـــیدن مدیران ادارات و شـــهرداری‌ها را به‌عنوان یک مطالبه جدی در نظر می‌گیرند. رسانه‌ها نیز تا حدی از این تلاش‌ها حمایت می‌کنند و فضایی عمومی برای بیان این مطالبات فراهم می‌آورند. اما با وجود این تلاش‌ها، هنوز نتایج رضایت‌بخش نیست و زمان می‌برد تا تغییرات ملموس ایجاد شود.

تجربیات گذشته نشان می‌دهد که باید به سمت فعالیت‌های مؤثرتر و با شـدت بیشـتری حرکت کنیم. برای این کار، نیاز به آموزش داریم تا بتوانیم با تاکتیک‌های مناسـب، پیام‌های خود را به‌درستی منتقل کنیم و تأثیرگذار باشیم. موانع و مخالفت‌ها در این مسیر وجود دارد و نیاز است که متخصصان و فعالان این حوزه، به بهبود سـازوکارهای خود و نحوه تعامل با یکدیگر بپردازند. آموزش‌های لازم باید به‌صـورت جامع و مؤثر ارائه شـود تا بتوانیم در این زمینه پیشـرفت کنیم. متأسـفانه، درحال‌حاضـر فرآیندهای ثبت و مجوزها برای NGOها بسـیار زمان‌بر و طاقت‌فرسا به‌صورت چند ساله هستند و این منافات جدی با اهداف کشور برای رسیدن به پیشرفت دارد.

در رابطه با مدیریت آلودگی آب‌های زیرزمینی در کلان‌شـــهرها به طور ویژه در شـــهر مشـــهد بفرمایید. همچنین در رابطه با ظرفیت تصـفیه‌خانه‌های مشـهد که در منابع اعلام شـد ۲۳۰ هزار مترمکعب توضیح بفرمایید.

ما یکسـری تصـفیه‌خانه‌هایی داشـتیم که ظرفیت اسـمی‌اش زیاد بوده ولی به دلیل کهنگی و خرابی، همچنین نگهداری نادرسـت و اشـتباهات طراحی، الان ظرفیت‌های کمتری دارند؛ لذا درحال‌حاضـر ظرفیت تصـفیه واقعی ما در تصـفیه‌خانه‌ها حدود ۳۰ درصـد کمتر از ظرفیت اسـمی آن‌ها اسـت. در آینده نزدیک ما نیاز به ســـه برابر شـــدن ظرفیت تصـــفیه‌خانه‌های فاضـــلاب داریم. فاضـــلاب شـــهری منبع بزرگی برای تعادل بخشی و تخفیف بحران آب در دشت مشهد است.

سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری خارج می‌شود و دیگر جزء موضوعات اولویت‌دار به حساب نمی‌آید. خروج از اولویت چالش بسیار مهمتری نسبت به مسائل فنی، تغییر اقلیم، خود پالایی و غیره است؛ لذا نگرانی بیشتر من از نظر مسائل کلی سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری در حوزه کیفیت آب در ایران است، از این بابت که معمولاً در اولویت قرار نمی‌گیرد. چه در سازمان‌های متبوع مثل وزارت نیرو یا حتی سازمان‌های ناظر مانند سازمان حفاظت محیط‌زیست از این بابت سیمای کلی کیفیت آب در ایران به نظر من خیلی مساعد نیست. این موضوع در کل کشور یکسان است، چون اولویت نیست فرقی هم بین شرق، غرب، جنوب و شمال ندارد. اما تنها یک ویژگی منطقه‌ای وجود دارد و آن این است که شکل منابع آلاینده ممکن است متفاوت باشد. به‌عنوان‌مثال در شمال کشور دفن غیربهداشتی زباله موجب نگرانی و ایجاد بحران در کیفیت آب است، اما در جنوب کشور ممکن است آلاینده‌های نفتی و آلودگی‌های دریایی خود را بیشتر نشان دهد یا فصلی بودن رودخانه‌ها، مخصوصاً در جنوب کشور، شرایط را نسبت به شمال متفاوت می‌کند. در غرب کشور، دامداری سنتی و کشاورزی ممکن است نقش بحرانی بازی کند و آلودگی‌هایی که از محل چرای دام و کشاورزی‌های دیم و آبی ممکن است منتقل شود. در مرکز کشور، مانند اصفهان و یزد، آلودگی‌های صنعتی ممکن است غالب‌تر باشد و شکل منابع آلاینده متفاوت شود. در نتیجه این تنوع منابع آلاینده در غلظت آلودگی‌ها می‌تواند اثرگذار باشد. این ویژگی و تنوع از نظر منطقه‌ای است؛ اما از نظر ملی، به نظر من خیلی تفاوت بارزی وجود ندارد، زیرا چه یک آلودگی صنعتی داشته باشیم، یا آلودگی انتشار سموم کشاورزی یا آلودگی نفتی، در هر صورت، خسارت آن چه برای سلامت انسان و چه برای اکوسیستم قابل ملاحظه است.

بحث رها شدن فاضلاب در منابع طبیعی مثل رودخانه‌ها تقریباً غالب است که یکی از مشکلات مهم می‌باشد که مشکلات محیط‌زیستی را به وجود می‌آورد. برخی مناطق هم اصلاً شبکه فاضلاب ندارند. به نظر شما چه دیدگاهی وجود دارد که به دنبال اصلاح یا تکمیل سیستم‌ها نیستند؟

اعتقاد دارم سیستم‌های شبکه جمع‌آوری فاضلاب و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب معجزه نمی‌کند، مخصوصاً آن‌هایی که در کشور در دست بهره‌برداری هستند. اگر همه تصفیه‌خانه‌ها را هم که اجرا کنید، الزامی ندارد که آب‌های سطحی و زیرزمینی از آلودگی پاک شود. احداث و بهره‌برداری شبکه جمع‌آوری و تصفیه‌خانه فاضلاب به‌عنوان شرط لازم برای کنترل انتشار آلودگی و بهبود کیفیت آب است، ولی شرط کافی نیست و لذا الزاماً نمی‌تواند منتج به این شود که وضعیت محیط‌زیست و انتشار آلودگی‌ها بهتر خواهد شد. در نتیجه، اینکه کامل سیاست‌ها را به سمت احداث تصفیه‌خانه ببریم ممکن است کمی ابهام داشته باشد. اما این ویژگی دلیل بر این نمی‌شود که ما تصفیه‌خانه نسازیم، بلکه از طرف دیگر معتقد هستم تصفیه‌خانه‌های فاضلاب جزء اصلی زیرساخت‌های شهری، مثل خطوط آب و برق و تلفن و اینترنت، هستند. سیستم‌های تصفیه فاضلاب یک زیرساخت است و باید در شهرها و روستاها وجود داشته باشند و برای آن باید سرمایه‌گذار جذب کرد، بودجه گرفت و بعد احداث و سپس بهره‌برداری کرد؛ بنابراین در واقع چند مرحله باید مدنظر قرار گیرد: خوب بودجه گرفت، خوب طراحی کرد، خوب بهره‌برداری کرد و نهایتاً خوب نظارت و رسیدگی کرد تا زیرساخت ارتقا یابد. حالا اینکه چرا در بعضی از شهرها و مناطق ممکن است عملکرد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ناقص باشد، مثلاً در برخی مناطق کشور شبکه و تصفیه‌خانه فاضلاب داریم، اما در مواقعی بیشتر آلوده‌کننده محیط می‌شوند. با بروز یک سیلاب شهری، فاضلاب به سطح شهر برمی‌گردد و چالش ایجاد می‌کند. یا رودخانه‌های گیلان و مازندران پذیرنده آلودگی‌های زیادی هستند، نکته‌اش این است که این مراحل باید به طور کامل طی شود و صرف احداث تصفیه‌خانه معجزه‌ای صورت نمی‌گیرد.

در خصوص استانداردهای کیفیت آب در ایران، چالش‌هایی وجود دارد که نیازمند بررسی دقیق‌تر هستند. اگرچه در سال‌های اخیر شاهد بازنگری و به‌روزرسانی برخی از این استانداردها بوده‌ایم، اما همچنان فاصله‌ای معنادار با استانداردهای کشورهای توسعه یافته به‌ویژه در اروپا و آمریکا به چشم می‌خورد. یکی از مهمترین این چالش‌ها، محدودیت در قابلیت پایش برخی از آلاینده‌ها است. فقدان تجهیزات و دانش فنی لازم برای اندازه‌گیری دقیق برخی از شاخص‌های کیفی، سبب می‌شود که این شاخص‌ها در استانداردهای ملی لحاظ نشوند. این امر می‌تواند تبعاتی جدی در پی داشته باشد. به‌عنوان‌مثال وجود آلاینده در آب شرب ناشی از فرآیندهای تصفیه آب می‌تواند به یک چالش جدی تبدیل شود. در شرایطی که استانداردها فاقد شاخص‌های کنترل آلاینده باشند، امکان پایش و مدیریت این آلاینده در تصفیه‌خانه‌ها و ارائه گزارش دقیق در این زمینه وجود نخواهد داشت. این مسئله، به نوبه خود، می‌تواند اعتبار و کارآمدی فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب را زیر سؤال ببرد.

بنابراین، لازم است در راستای ارتقای سطح استانداردهای کیفیت آب در ایران، سرمایه‌گذاری مناسبی در زمینه تجهیزات آزمایشگاهی، آموزش نیروی متخصص و انتقال دانش فنی صورت گیرد. همچنین، ضروری است رویکردی جامع و یکپارچه در تدوین و بازنگری استانداردها اتخاذ شود تا تمامی جنبه‌های مرتبط با کیفیت آب، از جمله قابلیت پایش و امکان اجرای مؤثر استانداردها، مدنظر قرار گیرد.

به نظر می‌رسد استراتژی‌های سازمان‌های نظارتی، به‌ویژه سازمان حفاظت محیط‌زیست، در مواجهه با صنایع بزرگ و آلاینده‌های عمده اثربخشی بیشتری نسبت به برخورد با افراد و کسب‌وکارهای کوچک‌تر مانند کشاورزان و دامداران دارد. این امر ناشی از اهرم‌های اقتصادی و قانونی است که در برخورد با صنایع بزرگ در اختیار سازمان محیط‌زیست قرار دارد، درحالی‌که اعمال این اهرم‌ها در مورد افراد با چالش‌های

بیشـــتری همراه اســـت. به‌عنوان‌مثال برخورد با یک کارخانه آلاینده از طریق جریمه‌های مالی یا حتی اخطار برای تعطیلی آن، به‌مراتب آسان‌تر از برخورد با یک دامپرور یا کشاورز است که به دلیل عدم آگاهی یا محدودیت‌های اقتصـــادی، اقدام به آلوده کردن منابع آب می‌کند.

علاوه‌براین ســـازمان‌های نظارتی، از جمله وزارت بهداشـــت در حوزه آب شرب و سازمان محیط‌زیست در حوزه کیفیت آب با محدودیت‌های اجرایی و کمبود نیروی انسـانی مواجه هسـتند که نظارت مستمر و فراگیر را در سطح کشور دشوار می‌سازد. این محدودیت‌ها، همراه با ضـــعف در اعمال قانون و حمایت ناکافی از سازمان محیط‌زیست در مواجهه با فشارهای سیاسی و اقتصـــادی، منجر به کاهش اثربخشـــی اقدامات نظارتی و اجرایی می‌گردد. در واقع، در مواردی که سازمان محیط‌زیست قصـد اعمال قانون و برخورد جدی با صـنایع آلاینده را دارد، با مقاومت‌ها و موانع متعددی روبه‌رو می‌شـود که ممکن اسـت در نهایت منجر به تساهل و چشم‌پوشی از تخلفات می‌گردد.

علاوه بر چالش‌های نظارتی و اجرایی، ضعف در پایش مستمر و آنلاین آلودگی‌ها، به‌روز نبودن تجهیزات پایش، و فاصـــله اســـتانداردهای ملی با اســـتانداردهای بین‌المللی (چه از نظر پارامترها و چه از نظر رویکردهای نظارتی)، نیز از جمله عواملی هسـتند که بر اثربخشـی اقدامات سـازمان محیط‌زیسـت تأثیر منفی می‌گذارنـد. بـه نظر می‌رســـد کـه در شـــرایط کنونی، ملاحظات اقتصـادی و سـیاسـی، اولویت بیشـتری نسـبت به ملاحظات محیط زیستی و بهداشتی دارند.

باتوجه‌به این مســـائل، ضـــروری اســـت که جایگاه و نقش دانشـگاه‌ها و مراکز پژوهشـی در حل چالش‌های محیط‌زیسـتی مورد توجه قرار گیرد. سـؤال اصـلی این اسـت که دانشـگاه‌ها و مراکز پژوهشـی تا چه اندازه در این زمینه فعال هسـتند و آیا شـرایط مناسـب برای فعالیت و پژوهش دانشـگاهیان در حوزه محیط‌زیست فراهم است؟ در صورت وجود موانع، شناسایی و رفع این موانع می‌تواند نقش مهمی در ارتقای سـطح دانش و آگـاهی عمومی، ارائـه راهکـارهـای نوآورانـه و حمـایـت از سـیاسـت‌گذاری‌های مبتنی بر شـواهد در حوزه محیط‌زیسـت ایفا کند.

ورود دانشـــگاه‌هـا بـه حوزه آلودگی آب، نیـازمنـد تعریف و پیاده‌سـازی یک چارچوب مشـخص و هدفمند اسـت. در یک شـــرایط ایده‌آل، دانشـــگاه‌ها باید با شـــناســـایی ســـؤالات و چالش‌های خاص موجود در هر منطقه اعم از آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی، به ارائه راهکارهای علمی و عملی برای رفع این چالش‌ها بپردازند. این امر مســـتلزم انجام مطالعات پایلوت، آزمایشـگاهی و بلندمدت است. به‌عنوان‌مثال می‌توان با در نظر گرفتن یک دورنمای ده سـاله برای بهبود کیفیت آب در یـک منطقـه خـاص، مـانـنـد همـدان بـا مشـــکـل آلودگی آرســـنیک، راهکارهای کوتاه‌مدت مانند روش‌های تصـــفیه مناســـب و راهکارهای بلندمدت مانند کنترل منابع آلاینده در بالادسـت را به‌صورت علمی و مبتنی بر مدل‌سازی جهت اجرا و کنترل نتایج ارائه نمود.

اگرچه شـکاف بین دانشـگاه و صـنعت در ایران وجود دارد، اما در حوزه کیفیت آب، دانشـگاه‌ها می‌توانند با انتقال دیدگاه‌ها و رویکردهای جدید به مدیران و کارشناسان مرتبط، نقش مؤثری در بهبود اولویت کیفیت آب برای تصـمیم‌گیری و ارزش‌آفرینی در این حوزه ایفا کنند. حل مشـــکل آلودگی آب یک فرآیند تدریجی اسـت که نیازمند سـرمایه‌گذاری بلندمدت و صـبر و حوصـله اسـت. در این راسـتا، جا انداختن این دیدگاه و ایجاد یک پس‌زمینه ذهنی مناسـب، می‌تواند به توسـعهٔ فناوری‌های نوین توسـط شـرکت‌های دانش‌بنیان و دانشـگاهی به‌ویژه در حوزه پـایش آلودگی کمـک نمـایـد. درحـال‌حـاضـــر کمبود فناوری‌های پایش آلودگی یکی از مشـــکلات اســـاســـی در ســـازمان‌های متولی مانند وزارت نیرو و ســـازمان حفاظت محیط‌زیســـت اســـت. توســـعه و بومی‌ســـازی این فناوری‌ها می‌تواند گام مهمی در جهت پایش دقیق و مستمر کیفیت آب در کشور باشد.

همچنین، لازم است به این نکته توجه شود که استانداردهای کیفیت آب باید متناســـب با شـــرایط و ویژگی‌های هر منطقه تدوین شوند. هر منطقه دارای شرایط منحصربه‌فردی از جمله ظرفیت خود پالایی متفاوت اســـت و نیازمند یک چارچوب مدیریت کیفیت آب خاص خود می‌باشد. به‌عنوان‌مثال شرایط رودخانه‌ای که آب آن از سـد تأمین می‌شـود، با رودخانه‌ای که از سفره آب زیرزمینی سرچشمه می‌گیرد، بسیار متفاوت است و اســـتانداردهای کیفیت آب برای این دو نوع رودخانه باید متفاوت باشد.

مثال دیگر مربوط به بازار کیفیت آب است. این موضـوع یک نمونه مشـــابه در بحث تجارت کربن دارد. مقدمات تجارت کربن شـامل اقتصـاد آزاد اسـت و به سـیاسـت‌های حکمرانی و اقتصـاد سـیاسـی برمی‌گردد. این موضـوع مسـتلزم ایجاد یک بـازار و تعیین تضـــمین‌هـایی برای اجرای آن اســـت. این‌ها ســـؤالاتی هســـتند که در ســـطح بین‌الملل روی آن‌ها مطالعه می‌شـــود و نمونه‌های موفق تجارت کربن وجود دارد. نمونه مشـــابـه این موضـــوع در حوزه آب نیز وجود دارد، امـا بـا محدودیت‌های مختلفی روبه‌رو اسـت که می‌تواند موردمطالعه برای اجرا قرار گیرد.

نمونه دیگر اینکه در صـحبت با برخی کارشـناسـان، چنین نتیجه می‌شـود که ذهنیت آن‌ها هنوز مبتنی بر اسـتفاده از مواد شیمیایی برای تصفیه درجا و کاهش آلودگی آب در محل انـدازه‌گیری اســـت. بـه نظر من، این‌گونـه راهکـارهـا یکی از نادرســـت‌ترین روش‌ها برای کنترل آلودگی اســـت، زیرا به‌جای بررســـی و حذف منشـأ آلودگی، صـرفاً به دنبال رفع ظاهری یا موقت آن هسـتیم. به‌عنوان‌مثال دیده شـده در برخی مناطق تمایل به اســـتفاده از نانوجاذب‌ها در مخازن آب وجود دارد، بدون آنکه پیامدهای احتمالی آن مورد بررســـی قرار گیرد. این ذهنیت محلی در حل معضـــل کیفیت آب همچنان بســـیار غـالـب اســـت، درحـالی‌کـه مـدیریـت کیفیـت آب نیـازمنـد جامع‌نگری اسـت؛ لذا این روش‌های آزمایشـگاهی، مادامی‌که منشأ انتشار آلودگی برطرف نشود به‌هیچ‌وجه توصیه نمی‌شود

و نیاز است این ذهنیت‌ها برای ارتباط بهتر صنعت و دانشگاه مورد بازنگری اساسی قرار گیرد.

بحران افت شدید سطح آب زیرزمینی در استان اصفهان، ناشی از برداشت‌های بی‌رویه از سفره‌های زیرزمینی به‌ویژه برای مصارف صنعتی و کشاورزی و پدیده فرونشست زمین، از جمله چالش‌های جدی این استان است در این زمینه بفرمایید؟

بارگذاری بیش از حد بر زاینده‌رود و حوضه آبریز آن، در کنار تغییرات اقلیمی و کاهش تدریجی ورودی آب از بالادست، منجر به بروز این بحران شده است. منظور از بارگذاری، صرفاً طرح‌های انتقال آب نیست، بلکه شامل توسعه کشاورزی چه در بالادست و چه در خود استان اصفهان و توسعه صنعتی این استان نیز می‌شود. این عوامل باعث شده‌اند که برداشت آب توسط تمامی استان‌های ذی‌مدخل، از جمله خود اصفهان، فراتر از توان محیط‌زیستی منطقه باشد. نتیجه این روند، افت سطح آب زیرزمینی و کاهش نگهداشت آب تجدیدپذیر است. این وضعیت، تأثیر قابل توجهی بر کیفیت آب نیز دارد. به‌عنوان‌مثال، کاهش سطح آب زیرزمینی می‌تواند منجر به شور شدن آب شیرین در مجاورت خاک شور شود. علاوه‌براین مصرف آب در یک منطقه، منجر به تولید فاضلاب می‌شود که حاوی آلاینده‌هایی متنوع است که به طور مستقیم یا غیرمستقیم، به محیط‌زیست بازمی‌گردد. به‌عبارت‌دیگر، چرخه آب در یک منطقه، هم از نظر کمیت و هم از نظر کیفیت، تحت تأثیر برداشت‌های بی‌رویه قرار می‌گیرد. با کاهش توان اکوسیستم و افزایش آلودگی، ظرفیت توسعه به‌صورت غیرخطی کاهش می‌یابد. به‌عبارت‌دیگر، اگر منبع آب نصف شود، ظرفیت توسعه، لزوماً نصف نمی‌شود، بلکه به دلیل تشدید کمبود آب ناشی از آلودگی، ممکن است کمتر از نصف شود. از نظر تفکر سیستمی، برای این منظور، باید چرخه‌های بازخوردی مثبت را تقویت کرد و شرایط را برای بهبود کارایی مصرف آب فراهم نمود. در این راستا، در مناطق مرکزی کشور، بازیافت و بازچرخانی پساب، مهمترین و بهترین راهکار است. به نظر می‌رسد که سیاست‌گذاری برای تخصیص آب باید به این سمت حرکت کند و به‌جای برداشت آب بیشتر، از پساب برای حفظ فعالیت‌های فعلی استفاده شود. این امر به رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی فرصت احیا می‌دهد؛ لذا مادامی که ظرفیت تصفیه و بازچرخانی پساب منطبق با نیاز محلی (برای کاربرد در صنعت، کشاورزی، احیای زیست‌بوم یا سفره آب زیرزمینی) وجود دارد، با هرگونه سیاست انتقال آب و شیرین‌سازی آب دریا موافق نیستم، زیرا این راهکارها می‌توانند منجر به گسترش آلودگی، تخریب اکوسیستم و شیوع ناملایمات اجتماعی در مقیاس بزرگ‌تر شوند.

به نظر می‌رسد که بخشی از مشکلات محیط‌زیستی ناشی از آگاهی پایین مردم در مورد مسائل آلودگی است؛ بنابراین، افزایش آگاهی‌رسانی و اطلاع‌رسانی به مردم می‌تواند نقش مهمی در کاهش آلودگی ایفا کند. گروه‌های مردم‌نهاد (NGO) و جمعیت‌های فعال در حوزه محیط‌زیست می‌توانند در کنترل مشکلاتی که سازمان‌های دولتی ایجاد می‌کنند، نقش پررنگی داشته باشند. بااین‌حال، در کشور ما به این گروه‌ها بها داده نمی‌شود. در این زمینه بفرمایید؟

به‌طورکلی، مشارکت مردمی در کشور، بیشتر جنبه شعاری دارد و در عمل، با چالش‌های متعددی روبه‌رو است. تقویت مشارکت مردمی در تمامی حوزه‌ها از جمله حوزه کنترل انتشار آلودگی یکی از خلأهای اصلی کشور است. دلایل عدم مشارکت فعال مردم در مسائل آلودگی آب را می‌توان به دو دسته بیرونی و درونی تقسیم کرد. دلایل بیرونی، شامل عوامل کلان و ساختاری هستند که نیازمند بررسی مفصل و جداگانه هستند. اما در مورد دلایل درونی، چند نکته حائز اهمیت است: متأسفانه، حتی سازمان‌های متولی و مسئول در حوزه آب نیز از نظر آگاهی در سطح مطلوبی قرار ندارند. این مسئله، همانند معلمی است که خود دانش کافی نداشته باشد و در نتیجه، نتواند به‌درستی به شاگردان خود آموزش دهد. به‌عنوان‌مثال، در دانشگاه‌ها، گرایش به مسائل کیفیت آب، به نسبت مسائل کمی در این حوزه کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد. در رشته کشاورزی، تمرکز بیشتر بر کمیت آب، افزایش تولید و بهره‌وری است. در رشته مهندسی عمران نیز، گرایش‌ها بیشتر به سمت سازه‌های آبی و مدیریت کمی - هیدرولوژیکی است. در نتیجه، نیروی متخصص کافی برای مدیریت کیفیت منابع آب تربیت نمی‌شود. دروس مرتبط با مدیریت کیفیت منابع آب، در بسیاری از رشته‌ها و دانشگاه‌ها ممکن است ارائه نشوند و دانشجویان فرصت کسب دانش و مهارت لازم در این زمینه را نداشته باشند. به دلیل عدم شفافیت اطلاعات موجود و پیچیدگی مسائل مرتبط با آلودگی آب، ورود به این حوزه چه در مطالعه و اجرا و چه در انجام پژوهش با ریسک بالایی همراه است. به نظر می‌رسد افرادی هم که قصد شفاف‌سازی این مسائل را دارند، یا می‌خواهند به سازمان‌های مردم‌نهاد کمک کنند تا آگاهی اولیه برای فعالیت در این زمینه را کسب کنند، با تردید و ترس روبه‌رو می‌شوند. این ترس ناشی از ورود به یک حوزه تاریک و پر از ابهام است، جایی که احتمال اشتباه، قضاوت نادرست، یا بزرگ‌نمایی غیرضروری یک موضوع وجود دارد. به‌عنوان‌مثال، ممکن است آلودگی نیترات در واقعیت به اندازه تصور عموم، مهم نباشد، در حالی که سایر آلودگی‌های ناشناخته بسیار مهمتر از آن چیزی باشد که تصور می‌شود.

به‌عنوان‌مثال، در مورد آلودگی‌های صنعتی، بسته به نوع صنعت، درک ما از میزان آلایندگی می‌تواند نادرست باشد. گاهی اوقات تصور می‌کنیم یک صنعت بسیار آلاینده است، درحالی‌که در واقعیت این‌گونه نیست و برعکس، صنعتی که به نظر خوب می‌رسد، ممکن است بسیار آلاینده باشد. به همین دلیل، پذیرش ریسک بحث در مورد موضوع کیفیت آب و شفاف‌سازی آن توسط سازمان‌های مردم‌نهاد بدون همراهی دانشگاه، دشوار است. حتی در مورد رودخانه زاینده‌رود، به‌سادگی می‌توان گفت که رودخانه خشک شده

است، اما نمی‌توان هیچ اظهارنظری در خصوص کیفیت آن در بالادست ارائه نمود. هر چقدر هم نتایج آزمایشگاهی ارائه شود که وضعیت در ماه‌های خاصی از سال خوب بوده است، باز هم نمی‌توان به آن‌ها اطمینان کرد مگر اینکه مشارکت فعال و دائمی سازمان‌های مردم‌نهاد و دانشگاه در حوزه نظارت کیفی برقرار شود. در نتیجه، اظهارنظر سازمان‌های مردم‌نهاد، بدون پشتوانه علمی و اطلاعاتی در این حوزه، مانند راه رفتن بر لبه تیغ بوده و با ریسک زیادی همراه است؛ لذا این ریسک باعث می‌شود سازمان‌های مردم‌نهاد معمولاً علاقه‌ای به ورود به این حوزه نداشته باشند. متأسفانه اطلاعات پایه در این زمینه در دسترس عموم نیست درحالی‌که یک حکمرانی خوب بر این اصل شفافیت تأکید دارد. از طرفی، اطلاعات موجود در بحث کیفیت آب در فضای مجازی نیز اغلب نادرست و گمراه کننده هستند. به نظر می‌رسد تنها کاری که درحال‌حاضر در میان‌مدت و بلندمدت می‌توان از سازمان‌های مردم‌نهاد انتظار داشت، این است که به‌عنوان بازوی سازمان‌های نظارتی مانند حفاظت محیط‌زیست و نه به‌صورت کاملاً مستقل و غیردولتی، به این سازمان کمک کنند تا به‌صورت محلی، کنترل کیفی آب‌های سطحی و زیرزمینی را در دست بگیرد. در شرایط فعلی، استقلال سازمان‌های مردم‌نهاد (حسب نامشان) در این حوزه، می‌تواند با ریسک زیادی همراه باشد.

به‌منظور کاهش آلودگی، داشتن اطلاعات درست و شناخت دقیق از وضعیت ایران ضروری است. این شناخت، به سیستم‌های پایش کیفیت آب در کشور و سازوکاری که داده‌ها تولید می‌شوند و در اختیار متخصصان قرار می‌گیرند، بازمی‌گردد. از این نظر، ساختار پایش کیفی در کشور چگونه کار می‌کند؟ فرآیند انتقال مسائل از سوی متخصصین در این زمینه، به چه صورت است؟ ضعف‌های بزرگ در چه مواردی است؟

ضعف در سیستم پایش کیفیت آب کشور، در چند بخش قابل بررسی است. در مورد آب‌های زیرزمینی، پایش بر اساس چند پارامتر محدود انجام می‌شود که غالباً پارامترهای کلیدی و شاخص‌های آلودگی نیستند. به‌عبارت‌دیگر، پارامترهایی مانند سدیم و کلسیم که صرفاً برای تحلیل‌های کشاورزی ساده مورد استفاده قرار می‌گیرند، به‌صورت دوره‌ای پایش می‌شوند، درحالی‌که این پارامترها، نمایانگر واقعی کیفیت آب در یک منطقه نیستند. درحالی‌که پارامترهای مهمتر و شاخص‌های آلودگی که باید پایش شوند، به دلیل کمبود تجهیزات اندازه‌گیری در آزمایشگاه‌ها، یا عدم وجود استاندارد مشخص برای اندازه‌گیری آن‌ها، مغفول می‌مانند. در مورد آب‌های سطحی، وضعیت نسبتاً بهتر است و پارامترهایی مانند اکسیژن محلول و BOD پایش می‌شوند که تا حدی شاخص‌های معرف آلایندگی هستند. بااین‌حال باز هم پارامترهای کلیدی مانند فسفر که هم در رسوب، هم در آب و هم در اکوسیستم نقش مهمی دارد مغفول می‌مانند. عدم پایش این پارامترهای کلیدی، اثربخشی فرآیند پایش را به‌شدت کاهش می‌دهد و آن را به یک کار صوری و بی‌حاصل تبدیل می‌کند. بخش دوم، به تحلیل‌گری داده‌ها مربوط می‌شود. هر چقدر هم داده جمع‌آوری شود، وجود افرادی متخصص که بتوانند این داده‌ها را به‌درستی تحلیل کنند و اطلاعات مفیدی از آن‌ها استخراج کنند، ضروری است. متأسفانه، فعلاً هوش مصنوعی هم نمی‌تواند جایگزین تحلیل‌گر انسانی در این حوزه شود. تحلیل داده‌های کیفیت آب و پساب، نیازمند در نظر گرفتن عوامل متعددی از جمله شرایط منطقه، سابقه منطقه، دانش و تجربه متخصص است. این نوع تحلیل‌گری، در ساختارهای اجرایی کشور وجود ندارد و نیروی انسانی متخصص نیز در دانشگاه‌ها کم است. در نتیجه، مجموعه‌ای از داده‌ها وجود دارد که تصور می‌شود مفید هستند، اما در عمل کارایی ندارند و نمی‌دانیم چگونه از آن‌ها استفاده کنیم. چالش سوم، به فناوری و تجهیزات پایش مربوط می‌شود. در این زمینه، پیشرفت‌هایی حاصل شده است و دستگاه‌های پایش جدیدی با قابلیت اندازه‌گیری پارامترهای بیشتر، در دسترس قرار گرفته است. اما هنوز جای کار زیادی وجود دارد. توسعه و تجاری‌سازی این دستگاه‌ها، نیازمند تأمین بودجه و حمایت از فناوران است. چالش‌های دیگری نیز در زمینه پایش از جمله عدم امکان پایش آنلاین وجود دارد. البته، در صورت وجود تحلیل‌گر متخصص، دریافت اطلاعات آنلاین می‌تواند به بهبود عملکرد کمک کند. بی‌توجهی به ظرفیت مشارکت گروه‌های مردم‌نهاد در پایش نیز از دیگر چالش‌های این بخش است.

مجموع عوامل، منجر به اتخاذ تصمیماتی می‌شود که شاید ناآگاهانه، ما را به سمت یک وضعیت بحرانی سوق می‌دهند. به‌عنوان‌مثال ممکن است شرایط کمبود آب به‌گونه‌ای تنظیم شود آگاهانه یا ناآگاهانه که ما به سمت انتقال آب و استفاده از روش‌های پرهزینه روی بیاوریم. آیا این یک سیاست کلی و ناخودآگاه است که در تمامی مسائل از جمله کمبود آب، آلودگی آب، آلودگی هوا، انرژی و غیره، ما را به سمت بن‌بست سوق می‌دهد و سپس راهکاری ارائه می‌شود که در واقع، منافع عده‌ای خاص را تأمین می‌کند؟

در مورد این بحث، من احساس می‌کنم که اگر بخواهیم از مدیران و تصمیم‌گیران انتقاد کنیم، باید این نکته را در نظر بگیریم که آن‌ها با چالش‌های متعددی روبه‌رو هستند. وقتی به بحث آلودگی آب می‌رسیم، شاید اگر جای آن‌ها بودیم، با مشکلات مشابهی مواجه می‌شدیم. به نظر من، از بین بحران‌های مختلف کشور، آلودگی آب به‌نوعی به چشم نمی‌آید. از دیدگاه مدیران دولتی شاید اینگونه باشد، اما از دیدگاه یک فرد فعال در حوزه محیط‌زیست، چالش‌های محیط‌زیست شامل آلودگی هوا، کمبود آب و پسماند است و در برخی موارد، به نظر می‌رسد که بی‌توجهی به محیط‌زیست جنبه تعمدی پیدا می‌کند. در مقیاس خرد، مانند خانواده و در مقیاس کلان، کل کشور، همه می‌دانیم که محیط‌زیست مهم است و ارزش دارد. اما بااین‌وجود، بسیاری از افراد زباله خود را در طبیعت رها می‌کنند. این نشان می‌دهد که رفتارهای ما، حتی زمانی که آگاهانه عمل می‌کنیم، تحت تأثیر شرایط و

اولویت‌های آن لحظه قرار می‌گیرند. به‌عبارت‌دیگر، اهمیت محیط‌زیست در آن لحظه کم‌رنگ می‌شود و غفلت روی می‌دهد. اما در برخی تصمیمات بزرگ، آگاهانه عمل می‌کنیم و این غفلت را انجام می‌دهیم. به‌عنوان‌مثال، مدیرعامل یک کارخانه آلاینده می‌داند که آلودگی ناشی از کارخانه او، باعث بیماری بلندمدت در روستاییان اطراف می‌شود، اما سود مالی، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. یا می‌دانیم که قطع درختان باعث ایجاد سیل می‌شود، اما به‌منظور ساخت ویلا و به اسم توسعه، اقدام به قطع درختان می‌کنیم و حتی از این کار سود می‌بریم. همین‌طور می‌شود که ارزش محیط‌زیست در برابر سود اقتصادی کم‌رنگ می‌شود و در نتیجه، تصمیمات خرد و کلان به‌گونه‌ای اتخاذ می‌شوند که منافع اقتصادی بر منافع محیط‌زیستی ارجحیت می‌یابد. به نظر من، سهم آگاهی در تصمیمات محیط زیستی بیشتر است، اما در مورد آلودگی آب، اگر از دیدگاه مدیران نگاه کنیم، ممکن است حجم ناآگاهی و غفلت سهوی بیشتر باشد.

در ادامه سؤال قبلی، آیا تا به حال با چالش‌های پایش آلودگی در محیط‌های دانشگاهی مواجه شده‌اید؟

بله، با چالش‌های زیادی روبه‌رو شده‌ایم. در دانشگاه‌ها، دسترسی به تجهیزات پیشرفته پایش محدود است و با چالش‌های استانداردهای آزمایشگاهی مواجه هستیم. به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی و کمبود دستگاه‌های پایش، نمی‌توان به‌درستی به نتایج آزمایش‌ها اطمینان کرد. در نتیجه، نمی‌توان به طور دقیق، میزان آلاینده‌ها را اندازه‌گیری نمود. در مورد طرح‌های پژوهشی که برای وزارت نیرو انجام می‌شوند، هدف اغلب، بررسی میزان آلودگی در یک منطقه خاص است. اما پس از اتمام طرح و مشخص شدن میزان آلودگی، اقدام مؤثری برای رفع آلودگی صورت نمی‌گیرد. حتی اگر راهکاری برای تصفیه و کنترل آلودگی ارائه شود، به دلیل نیاز به اصلاحات فرهنگی و ساختاری در بالادست، این راهکارها اجرا نمی‌شوند. برای اجبار به اجرای این راهکارها، باید آن‌ها را در استانداردها وارد کرد و پایش مستمر را الزامی نمود، اما این کار با مقاومت روبه‌رو می‌شود.

آیا در دانشگاه اصفهان، طرح‌های پژوهشی در زمینه آلودگی آب انجام شده است؟ همچنین، میزان حمایت‌های منطقه‌ای و بودجه‌های تخصیص یافته به این طرح‌ها و اقدامات اجرایی بعدی در این زمینه را توضیح بفرمایید. باتوجه‌به اینکه معمولاً داده‌های محیط زیستی محرمانه تلقی می‌شوند، دسترسی به اطلاعات دقیق در این زمینه حائز اهمیت است.

در دانشگاه اصفهان، طرح‌های پژوهشی در زمینه آلودگی آب انجام شده است. به‌عنوان‌مثال، چند سال پیش در اواسط دهه نود، همکارانی با تعامل با سازمان آب منطقه‌ای و شرکت آب و فاضلاب، اقدام به آنالیز فلزات سنگین در بالادست زاینده‌رود کردند و نتایج را گزارش دادند. بر اساس آن گزارش، از نظر وجود آلاینده‌های خطرناک، وضعیت آب خیلی بد نبود، اما این بدان معنا نیست که در حال حاضر نیز وضعیت مطلوب است. نکته مهم این است که برای پایش مستمر آلودگی، نیاز به تخصیص بودجه سالانه است. متأسفانه، چنین بودجه‌ای در دسترس نیست. مواردی که در حال حاضر در دانشگاه انجام می‌شود، محدود به پایان‌نامه‌های دانشجویی است که در آن‌ها دانشجو چند نمونه موردی از رودخانه یا آب زیرزمینی برمی‌دارد و یک یا چند پارامتر را اندازه‌گیری می‌کند. اما این که به‌صورت سیستماتیک و هدفمند، طرح‌های پژوهشی برای شناسایی آلاینده‌ها، بررسی قابلیت حذف آن‌ها، ارائه راهکار، تحلیل اقتصادی و اجتماعی و در نهایت، ارائه یک راهکار جامع و عملی برای کاهش آلودگی در یک منطقه تعریف شود، معمولاً وجود ندارد.

من تجربه‌ای در این زمینه دارم. در سفری به آلمان، با استادی در یک دانشگاه آشنا شدم که تخصصش فقط در یک پارامتر کیفی خاص بود. وقتی از او در مورد مسائل دیگر سؤال پرسیده شد، پاسخ داد که چون تخصص ندارد، نمی‌تواند اظهارنظر کند. نمی‌دانم این رویکرد خوب است یا بد، اما نشان می‌دهد که در برخی از دانشگاه‌ها، تمرکز بر روی یک موضوع خاص، بسیار زیاد است. از یک سو، با کمبود نیروی متخصص و تربیت نیروی انسانی در این حوزه مواجه هستیم از سوی دیگر، حتی برای تحلیل پارامترهای ابتدایی نیز با مشکل روبه‌رو هستیم. در کشورهای خارجی، متخصصان بر روی چند آلاینده خاص متمرکز می‌شوند. اگر در حال حاضر دانشگاه‌های خارجی را جستجو کنید، متوجه خواهید شد که تخصص‌ها به سمت بررسی و حذف آلاینده‌های خاص گرایش یافته‌اند. به‌عنوان‌مثال، یک فرد چندین سال است که بر روی میکروپلاستیک‌ها کار می‌کند. متأسفانه یا خوشبختانه، در ایران این رویکرد وجود ندارد. اما اساتید در دانشگاه‌ها، بیشتر بر روی جنبه‌های نظری کار می‌کنند و کمتر پیش می‌آید که پژوهش‌ها به مرحله تصفیه و ارائه راهکارهای اجرایی برای یک منطقه خاص برسد.

باتوجه‌به تجربه‌ای که در یک پژوهش داشتیم، دریافت اطلاعات و داده‌های پایش شده، کار آسانی نیست. این مسئله، مانع اصلی کارهای پژوهشی است. حتی برای دریافت ساده‌ترین اطلاعات نیز به بهانه اینکه اطلاعات محرمانه هستند و نباید منتشر شوند، از ارائه آن‌ها خودداری می‌شود. آیا شما هم با این مسئله برخورد کرده‌اید؟

بله، این موضوع بسیار شایع و مبتلابه است و ما هم از نظر کمی و کیفی با آن مواجه بوده‌ایم. این مسئله، ریشه در فرهنگ سازمانی دارد. در سازمان محیط‌زیست، دسترسی به اطلاعات نسبتاً آسان‌تر است، اما در وزارت نیرو، به این صورت نیست. فرآیند مکاتبات و درخواست اطلاعات بسیار دشوار است و در نهایت، همان‌طور که توضیح دادم، اطلاعات مانند میزان سدیم، پتاسیم و کلسیم در اختیار قرار می‌گیرد که هیچ کمکی به حل مشکل نمی‌کند. به نظر من، این مشکل اخیراً فراتر رفته و پیچیده‌تر هم شده است. نوع نگاه و تفکری که در سازمان‌ها وجود دارد، در دسترسی به اطلاعات تأثیرگذار است. وزارت نیرو در دهه‌های گذشته، از جمله وزارتخانه‌هایی بوده که به پژوهش اهمیت می‌داده و دارای دفتر پژوهش و

پروژه‌های تحقیقاتی متعددی بوده است. هرچند ممکن است همه این پروژه‌ها به نتیجه نرسیده باشند، اما اهمیت دادن به پژوهش، قابل تقدیر است. این تفکر، به‌عنوان بخشی از بنیان‌های این وزارتخانه تعریف شده بود و سعی می‌شد که این روند ادامه پیدا کند. نمونه بارز آن، همکاری با مؤسسه تحقیقات آب (وابسته به وزارت نیرو) در طراحی و ساخت مدل‌های فیزیکی و مقیاس بزرگ پروژه‌های سدسازی بود. همین رویکرد، در حوزه کیفیت آب و مؤسسات تحقیقاتی مرتبط با فاضلاب نیز وجود داشت. به‌عنوان‌مثال، قبل از ساخت یک تصفیه‌خانه در یک شهر صنعتی، ابتدا یک فعالیت پژوهشی در این زمینه انجام می‌شد. متأسفانه، با تغییر دولت‌ها، رویکردها نیز تغییر کرده است و تربیت نیروی انسانی که زمانی جزء اولویت‌های وزارت نیرو بود کم‌رنگ شده است. در گذشته، دانشگاه و مؤسسات صنعت آب و برق برای تربیت نیروی بهره‌بردار و آموزش آنها بسیار فعالانه حضور داشتند. این ذهنیت پویا، به مرور زمان جای خود را به ذهنیت بسته و در نتیجه عدم شفافیت و ارائه اطلاعات داده است. به‌عنوان یک مثال دیگر، در زمان دانشجویی کارشناسی ارشد و دکترا، به‌راحتی می‌توانستیم از تصفیه‌خانه‌ها بازدید کنیم و اطلاعات و آگاهی اولیه مورد نیاز را نسبت به این سیستم‌ها کسب کنیم، اما درحال‌حاضر، این امکان وجود ندارد. در گذشته، تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب برنامه‌های بازدید هفتگی داشتند و دانشجویان به راحتی می‌توانستند با هماهنگی دانشگاه، از این تصفیه‌خانه‌ها بازدید کنند. حتی کارشناسانی برای آموزش و راهنمایی بازدیدکنندگان حضور داشتند و از بازدیدها استقبال می‌شد. اما در حال حاضر، امکان بازدید از تصفیه‌خانه‌ها، به‌ویژه تصفیه‌خانه‌های آب، مطابق قبل وجود ندارد. این به دلیل رویکرد نظارتی است که برای تصفیه‌خانه‌ها تعریف شده است. این رویکرد، بیشتر جنبه نظارتی و حراستی دارد و از رویکرد بهره‌برداری و اجرایی پیش‌برنده و تعاملی فاصله گرفته است. در مورد اطلاعات نیز وضعیت مشابهی وجود دارد. مدتی پیش، در وب‌سایت شرکت مدیریت منابع آب، امکان دسترسی به اطلاعات حداقل مورد نیاز مخازن و محدوده‌های مطالعاتی با استفاده از یک حساب کاربری وجود داشت، اما این حساب‌ها بسته شدند و دسترسی‌ها محدود شدند؛ لذا از نظر مشارکت پویا در مدیریت کیفیت آب با این روند بسته شدن اطلاعات به‌شدت مخالف هستم. زمینه‌های حکمرانی خوب زمانی میسر می‌شود که شفافیت وجود داشته باشد. در اصفهان، یکی از چالش‌های اصلی علاوه بر بحث کمی آب، عدم شفافیت در حوزه آب است. مشخص نیست که آب زاینده‌رود به کجا می‌رود. علاوه‌براین، حتی اگر به داده‌ها دسترسی داشته باشیم، نمی‌توانیم مطمئن باشیم که این داده‌ها درست هستند. این داده‌ها ممکن است دارای خطا باشند و یا حتی به ما ارائه نشوند، زیرا این تصور وجود دارد که استفاده از این داده‌ها باعث ایجاد حساسیت می‌شود. درحالی‌که به نظر من، شفافیت می‌تواند به حل مشکلات و گره‌گشایی مسائل آب کمک کند؛ بنابراین معتقد هستم این ساختار فعلی لازم است تغییر کند.

دکتر فرهاد مشهدی خلردی
مدیر مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای مازندران

لطفاً سیمای کلی از آلودگی منابع آب زیرزمینی در استان مازندران ترسیم بفرمایید.

سیمای آلودگی آب‌های زیرزمینی در مازندران نیازمند توجه فوری و اقدامات جدی است. این آلودگی ناشی از عوامل مختلفی از جمله پساب‌های خانگی، لندفیل‌های زباله و کشاورزی غیراصولی می‌باشد که متأسفانه در سال‌های اخیر با کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و آلودگی آب‌های سطحی، آلودگی آب‌های زیرزمینی مشهودتر شده است و برای مقابله با آن، نیاز به همکاری همه ذی‌نفعان و اجرای راهکارهای جامع و پایدار داریم.

منابع اصلی آلودگی: سه منبع اصلی آلودگی عبارت‌اند از:

پساب‌های خانگی: به دلیل عدم وجود شبکه فاضلاب جامع و استفاده از چاه‌های جذبی غیراستاندارد، حجم زیادی از فاضلاب خانگی به طور مستقیم وارد آب‌های زیرزمینی می‌شود.

لندفیل‌های زباله: مدیریت نامناسب لندفیل‌ها و عدم وجود سیستم‌های جمع‌آوری و تصفیه شیرابه، باعث نشت آلودگی به آب‌های زیرزمینی می‌شود.

کشاورزی: استفاده بی‌رویه و غیراصولی از سموم و کودهای شیمیایی، باعث ورود این مواد به آب‌های زیرزمینی از طریق نفوذ و شست‌وشو می‌شود.

لطفاً در مورد سیستم‌های پایش کیفی آب در استان مازندران توضیح بفرمایید.

پایش کیفی آب زیرزمینی در استان به دو بخش پایش چاه‌ها و چشمه‌ها تقسیم می‌شود که پایش چاه‌های انتخابی دو مرحله در سال در فصل بهار و پاییز (ترسالی و خشکسالی) انجام می‌شود. پایش چشمه‌های انتخابی نیز ٤ مرحله در سال به‌صورت فصلی صورت می‌گیرد. آنالیز نمونه‌ها (کاتیون و آنیون‌ها و ترکیبات نیتروژن‌دار) در آزمایشگاه کیفی آب منطقه‌ای صورت می‌گیرد.

در استان مازندران چه تدابیری برای کنترل آلودگی ناشی از فاضلاب اتخاذ شده است؟

برای کنترل آلودگی ناشی از فاضلاب در استان، ٦ تصفیه‌خانه در شهرستان‌های ساری، جویبار، بابلسر، بابل، نوشهر و بخشی از قائمشهر احداث شده است که بخشی از فاضلاب‌های شهرستان‌های موردنظر را تصفیه می‌کند و خروجی

تصفیه‌خانه‌ها وارد آب‌های سطحی شده و جهت کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضمناً در برخی از شهرهای استان از جمله نوشهر، زباله‌سوز فعالیت می‌کند و همچنین سایت زباله‌سوز شهرستان ساری نیز در مراحل پایانی عملیات ساخت می‌باشد.

لطفاً در مورد ورود فاضلاب خام به منابع آب توضیح بفرمایید.

متأسفانه در سطح استان مازندران، فاضلاب خام مانند فاضلاب‌های خانگی و.به‌صورت مستقیم وارد منابع آب سطحی شده و حتی در بعضی نقاط این فاضلاب به‌صورت مراکز دفن زباله با نفوذ شیرابه‌ها در منطقه غیراشباع به منطقه اشباع (سطح ایستابی) رسیده و وارد آب‌های زیرزمینی می‌شود.

آیا بین شرکت آب منطقه‌ای مازندران و سازمان‌های مختلف مربوط برای مدیریت و کنترل آلودگی آب‌های زیرزمینی همکاری وجود دارد؟ توضیح بفرمایید.

کارگروه‌های مشترکی برای کنترل ایمنی آب استان بین آب منطقه‌ای، دانشگاه علوم پزشکی، آب و فاضلاب، سازمان محیط‌زیست و دیگر نهادهای مربوطه برگزار می‌شود و نتایج این کارگروه‌ها در بعضی موارد منجر به مدیریت و کنترل آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود. ضمناً کارگروه پساب با متولی‌گری استانداری نیز با حضور نمایندگان دستگاه‌های اجرایی مانند آب منطقه‌ای نیز وجود دارد.

لطفاً در مورد فلزات سنگین و اینکه تا چه حد در منابع آب زیرزمینی استان مازندران وجود دارد توضیح بفرمایید و اینکه چه اقدامات اجرایی برای کنترل و مدیریت در این زمینه وجود دارد؟

به‌صورت کلی آلودگی فلزات سنگین ناشی از سازندهای زمین‌شناسی و فاضلاب‌های صنعتی می‌باشد. چهار نوع فلز سنگین در آزمایشگاه آب منطقه‌ای مازندران به‌صورت روتین رصد می‌شود. این عناصر شامل کادمیوم، مس، سرب و روی بوده که روی تقریباً در همه منابع آب زیرزمینی استان حد مجاز موجود می‌باشد. کادمیوم و سرب نیز تقریباً در اکثر منابع آبی استان ناچیز می‌باشد و مس در بخشی از منابع موجود حد مجاز موجود می‌باشد.

لطفاً در مورد تصفیه پساب و فاضلاب در استان مازندران توضیح بفرمایید؟

در مازندران ٦ تصفیه‌خانه فاضلاب در شهرستان‌های ساری، جویبار، بابلسر، بابل، نوشهر و بخشی از قائمشهر احداث شده است. که بخشی از فاضلاب‌های شهرستان‌های مورد نظر را تصفیه می‌کند و خروجی تصفیه‌خانه‌ها وارد آب‌های سطحی شده و جهت کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما در سایر نواحی به دلیل عدم وجود لندفیل مهندسی‌ساز، شیرابه ناشی از زباله‌ها وارد منابع آب سطحی و حتی آب زیرزمینی می‌شود.

همچنین به علت عدم وجود شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری در بیشتر نقاط استان، دفع فاضلاب‌های خانگی به صورت چاه جذبی بوده که مستقیما وارد منابع آب زیرزمینی می‌شود.

در استان مازندران، نقش سازمان‌های مردم‌نهاد را در نظارت بر آلودگی آب‌های زیرزمینی چگونه می‌دانید؟ و اینکه تا چه میزان مؤثر بوده است؟

نقش سازمان‌های مردم‌نهاد در نظارت بر آلودگی آب‌های زیرزمینی در استان مازندران بسیار حیاتی و ارزشمند می‌باشد. مطمئناً همکاری سازنده بین دولت و مردم می‌تواند به حفظ و بهبود کیفیت آب‌های زیرزمینی در استان مازندران کمک شایانی کند.

در استان مازندران کدام نوع از آلودگی‌ها بیشترین آثار مخرب را بر منابع زیرزمینی دارند؟

در استان مازندران دو عامل اصلی پساب‌های کشاورزی و خانگی روی آلودگی آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار می‌باشند. در فصل زراعی با ورود مواد نیتروژن و فسفردار از طریق کود و سموم کشاورزی به آب‌های سطحی و زیرزمینی ما شاهد پدیده تغذیه‌گرایی در منابع آبی استان و افزایش ترکیبات نیتروژن‌دار در منابع آب زیرزمینی می‌باشیم که در نهایت موارد ذکر شده موجب افزایش فلزات سنگین و همچنین افزایش BOD و آلودگی‌های میکروبی در منابع آبی می‌شود.

شما به‌عنوان متخصص چه راهکاری برای مدیریت آلودگی آب‌های زیرزمینی در استان مازندران را مؤثر می‌دانید؟

مدیریت آلودگی آب‌های زیرزمینی نیاز به یک عزم راسخ توسط دستگاه‌ها و ارگان‌های مختلف مانند آب منطقه‌ای، جهاد کشاورزی، محیط‌زیست، آب و فاضلاب، شهرداری‌ها و دیگر نهادهای مرتبط دارد. پساب‌های خانگی، لندفیل‌های زباله و استفاده از سموم و کودهای کشاورزی از عوامل اصلی آلودگی آب‌های زیرزمینی در مازندران هستند که هر کدام چالش‌های خاص خود را دارند.

راهکارها:

۱-برای کنترل پساب‌های کشاورزی، نهاد متولی (جهاد کشاورزی) باید بر فروش و توزیع سم و کودها نظارت داشته باشد. در فصول زراعی در هر روستا و دهیاری‌ها یک کارشناس کشاورزی مستقر باشد که باتوجه‌به نیاز محصول کشاورزی مورد نظر و متراژ زمین و آفات و جنس خاک، سم و کود در اختیار کشاورز قرار بگیرد و آموزش‌های لازم به کشاورزان داده شود.

۲-تمامی مراکز صنعتی باید مجهز به سیستم تصفیه پساب و فاضلاب باشند. در غیر اینصورت صدمات جبران ناپذیری به منابع آبی وارد می‌شود. با بازدیدهای دوره‌ای نهاد متولی (محیط‌زیست) از این آسیب‌ها جلوگیری می‌شود.

مهندس ناهید غلام‌نژاد
مدیر محیط‌زیست و کیفیت منابع آب شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد

لطفا سیمای کلی از آلودگی منابع آب زیرزمینی در استان یزد ترسیم بفرمایید.

در استان یزد بخش عمده‌ای از مصارف کشاورزی، صنعت، فضای سبز و شرب از منابع آب زیرزمینی تامین می‌شود. در حال حاضر منابع آب زیرزمینی، در منطقه چرخاب، کیفیت نسبتا مناسبی دارند ولی در سایر مناطق استان سفره‌های آب زیرزمینی در حال شور شدن می‌باشند. در برخی مناطق، به ویژه در مناطقی که تمرکز چاه‌های آب شرب بیشتر است، عمق آب ممکن است به بالای ۱۱۰ متر برسد. در این مناطق، آلودگی‌های میکروبی و نیترات وجود ندارد و خوشبختانه منابع آب زیرزمینی از این نوع آلودگی‌ها مصون هستند، مگر در برخی روستاها که در آنها سطح آب بالا است و راهکارهای لازم جهت جلوگیری از آلودگی آب در آن مناطق اندیشیده شده است. مشکل اصلی استان یزد شور شدن منابع آب زیرزمینی می‌باشد، به ویژه در شهرستان‌هایی مانند میبد، اردکان و بافق که به خاطر بافت خاک و جنس زمین، منابع آب زیرزمینی دارای EC بالا می باشند. آب انتقالی از کوهرنگ به یزد صرفا جهت شیرین‌سازی منابع آب شرب (چاه‌های آب شرب موجود) استفاده می‌شود و در این استان از آب انتقالی در بخش کشاورزی و صنعت استفاده نمی‌شود. در حال حاضر، بخش عمده‌ای از منابع آب زیرزمینی در استان یزد در بخش کشاورزی و ۵ درصد در بخش صنعت مصرف می‌شود. تمام کارخانجات موجود در استان که شامل کارخانجات کاشی، سرامیک، فرآوری مواد معدنی و ... می‌باشند از منابع آب زیرزمینی و یا پساب خروجی تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری استفاده می‌کنند و پساب خروجی در اکثر این کارخانجات تصفیه و بازچرخانی می‌گردد.

آیا اطلاع دارید میزان آب برگشت‌پذیر در استان یزد چقدر هست؟ فرمودید سطح آب در برخی نقاط به ۱۱۰ متر و ۱۲۰ متر نیز می‌رسد. عمق چاه‌ها یا در واقع هیدروگراف دشت در مدت زمان گذشته آیا روند نزولی با شیب زیاد داشته است؟

باتوجه‌به خشکسالی‌های پی در پی و برداشت زیاد از منابع آب زیرزمینی استان و به خاطر نبود منابع آب سطحی در استان، متاسفانه افت سطح آب در سال‌های اخیر، روند صعودی داشته و به همین دلیل اکثر دشت‌های استان ممنوعه بحرانی می‌باشد. به ویژه در دشت یزد-اردکان که مهمترین و اصلی‌ترین دشت استان یزد می‌باشد و تجمع جمعیت استان در محدوده این دشت می‌باشد، میزان افت سطح آب زیرزمینی بالاتر می‌باشد. علاوه بر افت سطح آب زیرزمینی کیفیت آب نیز در حال کاهش می باشد به طوری که در برخی مناطق خروجی دشت در منطقه اردکان میزان EC به بالاتر از ۱۰۰۰۰ میکروموس بر سانتیمتر رسیده است.

سیستم جمع آوری فاضلاب، در استان یزد به چه صورت می‌باشد؟ آیا توسعه یافته یا خیر؟

خوشبختانه در زمینه سیستم جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب، پیشرفت‌های خوبی در استان یزد صورت گرفته است. در حال حاضر ۷ شهرک صنعتی بزرگ در استان وجود دارد که همه آنها دارای سیستم جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب هستند که کل فاضلاب شهرک را جمع آوری، تصفیه و بازچرخانی می‌نمایند. در شهر یزد که مرکز استان می‌باشد شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب شهری وجود دارد. همچنین شهرهای دیگر از جمله تفت، میبد، اردکان، بافق و مهریز نیز همگی شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب دارند و پساب خروجی پس از تصفیه، در بخش‌های مختلف از جمله صنعت و فضای سبز بازچرخانی می‌گردد.

صنایع دیگری که در استان یزد وجود دارند آیا از پساب استفاده می‌کنند یا خیر؟ بفرمایید وضعیت آن‌ها به چه گونه است؟

بازچرخانی پساب در استان یزد به دو صورت می‌باشد: یکی صنایعی که فاضلاب تولیدی خودشان را تصفیه و بازچرخانی می‌کنند، به‌عنوان‌مثال بالای ۹۵ درصد از کارخانه‌های کاشی مستقر در این استان فاضلاب تولیدی در کارخانه خود را تصفیه و بازچرخانی می‌نمایند. این کارخانجات تقریبا کل فاضلاب اعم از فاضلاب صنعتی و انسانی کارخانه را تصفیه و به خط تولید کارخانه برمی‌گردانند. دسته دوم از کارخانجات، از پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری تامین آب شده اند برای مثال تعداد زیادی از کارخانجات فولاد، تعدادی از معادن و برخی از کارخانجات مقوای موجود در استان از پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری تامین آب شده است و تامین آب آنها از منابع آب زیرزمینی صورت نگرفته است و فاضلاب تولیدی در واحد نیز مجدد جمع آوری، تصفیه و بازچرخانی می‌گردد.

شما در مجموع وضعیت منابع آبی استان یزد و سطح آلودگی در منابع آب در این منطقه را به‌طورکلی چطور ارزیابی می‌کنید؟ آیا وضعیت را مناسب ارزیابی می‌کنید یا خیر؟

در حال حاضر واحدهای صنعتی، خدماتی و تولیدی و ارگان‌های مختلف در استان به مسئله کمبود آب آگاه شده اند و موضوع صرفه‌جویی در مصرف آب و بازچرخانی پساب‌های شهری و صنعتی و استقرار صنایع کم آبخواه و پاک جز اولویت‌های استان قرار گرفته است و واحدهای جدید التاسیس استفاده از پساب تصفیه شده را خواهان هستند و این اقدامات علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب، ورود فاضلاب به منابع آب زیرزمینی را نیز محدود کرده است. بحث دوم مربوط به همکاری‌های بین سازمانی از جمله همکاری با ارگان‌های محیط‌زیست و مراکز بهداشت و سایر ارگان‌ها

می‌باشد که در استان یزد هماهنگی فرابخشی لازم وجود داشته و جلسات زیادی به صورت ماهیانه و فصلی در این زمینه، به بهبود وضعیت کمک نموده و تعامل خوبی وجود دارد. اکثر مقامات سیاسی استان یزد روی موضوع آلودگی منابع آب حساس بوده و همکاری لازم را در این زمینه وجود دارد. در خصوص مصرف آب در بخش کشاورزی که بخش عمده‌ای از مصرف آب استان را شامل می‌شود هنوز جای کار بسیار زیادی وجود دارد به‌ویژه در زمینه اصلاح الگوی مصرف کشت، ایجاد سامانه‌های نوین آبیاری، جلوگیری از کشت گونه‌های پرآبخواه و تامین معیشت کشاورزان می‌باید بایست حمایت‌های لازم از سوی دولت انجام گیرد و نگرش‌های کشوری و استانی در این خصوص اصلاح شود.

این وضعیت چه تاثیری بر کیفیت منابع آب زیرزمینی در استان یزد دارد؟

استان یزد فاقد منابع آب سطحی می باشد و تنها منبع برای تامین آب مصارف شرب، صنعت و کشاورزی، منابع آب زیرزمینی شامل چاه، چشمه و قنوات موجود در استان می‌باشند. خشکسالی‌های اخیر در استان یزد باعث کاهش آب و افت سطح آب سفره‌های آب زیرزمینی شده است. بسیاری از چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوات به دلیل کمبود آب، خشک و از دسترس خارج شده‌اند، خیلی از چاه‌ها هم کم آب شدند. از نظر کیفیت و مسائل مربوط به آلودگی باتوجه‌به نظارت‌هایی که وجود داشته و همچنین عمق سطح آب زیرزمینی نگرانی چندانی وجود نداشته و عمده نگرانی در بحث تامین آب و کمیت وجود دارد.

در خبرگزاری‌های مختلف یزد، مدیرعامل آب منطقه‌ای یزد، یکی از نگرانی‌های جدی در استان را اثرگذاری فلزات سنگین بر منابع آب زیرزمینی یزد دانستند و باتوجه‌به اینکه استان یزد، یکی از قطب‌های صنعتی کشور می‌باشند، در این مورد بفرمایید که غلظت فلزات سنگین چه اثری بر منابع آب زیرزمینی استان یزد می‌گذارد توضیح بفرمایید؟

در حال حاضر تمام شهرک‌های صنعتی موجود در استان یزد (که در اکثر آنها تمرکز واحدهای آلاینده‌های صنعتی زیاد است) مجهز به سیستم تصفیه فاضلاب هستند همچنین تعداد زیادی از واحدهای صنعتی که در استان به صورت پراکنده و خارج از نواحی صنعتی قرار دارند نیز مجهز به سیستم تصفیه و بازچرخانی پساب می‌باشند که این موضوع به کاهش و کنترل آلودگی‌ها کمک شایانی نموده است. همچنین، در حال حاضر، منابع تأمین‌کننده آب شرب در استان به صورت دوره‌ای توسط کارشناسان این شرکت و کارشناسان سایر ارگان‌ها از جمله آب و فاضلاب، محیط‌زیست و مراکز بهداشت پایش می‌شوند و تاکنون هیچ گونه فلز سنگینی در آن‌ها مشاهده نشده است.

در مورد خط انتقال آب در یزد توضیح بفرمایید که چند روزی قطع شده بود و شهر یزد را با مشکلاتی روبه‌رو کرد.

اگر خط انتقال آب به استان یزد به هر دلیلی قطع شود چالش‌های زیادی از جمله جیره‌بندی آب و کاهش کیفیت منابع آب شرب به وجود می‌آید و باید جهت مصرف شرب از آب بسته‌بندی استفاده شود. کیفیت آب چاه‌های موجود در استان یزد به تنهایی مناسب شرب نیست و شیرین‌سازی که توسط آب انتقالی اتفاق می‌افتاد باعث می‌شود منابع آب موجود قابلیت شرب پیدا کند و این چالش در همه شهرهایی که از این آب انتقالی استفاده می‌کردند اتفاق افتاد. به هر حال چون منابع آب استانی ما محدود است، صرفه‌جویی در مصرف آب می‌تواند کمک کننده باشد. علاوه‌برآن ضروری است مباحث تصفیه و بازچرخانی پساب‌ها، تعادل بخشی، کم کردن مجوز چاه‌های آب کشاورزی بر اساس ابلاغیه‌های ارسالی از طرف وزارت نیرو پیگیری و به نحو صحیح اجرا گردد.

با توجه به صنعتی بودن استان یزد، چه الزامات ویژه‌ای در خصوص مسائل مدیریتی به دلیل مشکلات آلودگی در این مناطق باید رعایت شود؟ آیا این موارد را کافی می‌دانید و عملکردتان را مفید ارزیابی می‌کنید؟

طبق ماده ۴۶ قانون توزیع عادلانه آب، مسئولیت اصلی در زمینه آلودگی بر عهده سازمان حفاظت محیط‌زیست است. در صورتی که آلودگی محرز شود، پیگیری آن طبق ماده ۶۸۸ قانون مجازات اسلامی به عهده محیط‌زیست و مرکز بهداشت خواهد بود. این شرکت در کنار دو ارگان ذکر شده پیگیر مسائل محیط‌زیستی و جلوگیری از آلودگی منابع آب می باشد به‌عنوان‌مثال گروه‌های گشت و کارشناسان این شرکت نسبت به شناسایی واحدهای آلاینده اقدامات لازم را انجام می‌دهند و در صورت وجود موارد آلودگی، موارد به اداره محیط‌زیست و مراکز بهداشت گزارش می‌شود و در جلساتی که برگزار می شوند اینگونه موضوعات مطرح می‌شود و بعضا بازدیدهای مشترک اتفاق می افتد و هماهنگی خوبی هم بین کارشناسان و مدیران این شرکت و مراکز بهداشت و محیط‌زیست وجود دارد. در نهایت و در صورت بروز تخلفات توسط واحدهای آلاینده و پیگیری موضوع، جریمه‌های سنگینی برای واحدهای صنعتی در نظر گرفته می شود که این امر آن‌ها را به سمت تأسیس تصفیه‌خانه‌های فاضلاب سوق می‌دهد. قوانین مربوط به مدیریت منابع آب در استان به طور کامل در حال اجرا است و امکان استفاده از آن‌ها وجود دارد. در زمینه آلودگی هوا نیز، محیط‌زیست اقدامات لازم را انجام می‌دهد و بازدیدهای شبانه دارد.

آیا نقشه کلی از وضعیت منابع آب زیرزمینی در استان یزد وجود دارد؟

ما پایش‌های مستمری را در زمینه کیفیت منابع آب زیرزمینی انجام می‌دهیم که نتایج آن‌ها در یک بانک اطلاعاتی جمع‌آوری می‌شود. جلسات ماهیانه‌ای برای بررسی کیفیت منابع آب و تبادل اطلاعات بین آب و فاضلاب و مراکز بهداشت برگزار می‌شود. این اطلاعات به منظور بهبود کیفیت منابع آب و مدیریت بهینه آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای کلیه پارامترها، نقشه‌های پهنه‌بندی به تفکیک پارامتر برای کل استان تهیه شده است و این اطلاعات به‌روز خواهد شد. این پایش‌ها به‌عنوان یک ابزار نظارتی عمل می‌کنند. اطلاعات

مربوط به این پارامترها در بانک اطلاعاتی نگهداری می‌شـوند تا طی سالیان تغییرات کیفیت منابع آب مورد رصد و بررسی قرار گیرد.

اگر مراکز پژوهشی دانشگاهی بخواهند طرح‌های پژوهشی در زمینه مسـائل مختلف، به‌ویژه در مورد بحث آلودگی آب، مصرف آب و... ارائه دهند، یکسری از اطلاعات محرمانه است و برخی سازمان‌ها اطلاعات در اختیار قرار نمی‌دهند؟

درصورت انجام کار پژوهشی ابتدا می‌بایست مکاتبات لازم با این شـرکت انجام گیرد و مجوزهای لازم اخذ شـود. در حال حاضـر در مورد تاثیرات فلزات سـنگین، فاضـلاب کارخانجات کاشـی، محل‌های دفن زباله و ... بر کیفیت منابع آب منطقه طرح‌های تحقیقاتی انجام شـده اسـت، آن چیزی که در حال حاضـر مورد نیاز می باشـد، پرداختن به آلاینده های نوظهور می‌باشـد. اخیرا شـرکت مدیریت منابع آب ایران نیز به این موضـوع پرداخته اسـت و اسـتان‌ها مکلف شـده‌اند مطالعات لازم، به ویژه برای دشـت‌های مهم و صـنعتی اسـتان، را انجام دهند که در این زمینه چنانچه دانشـگاه‌ها و یا شـرکت‌های مشـاور تجربه‌ای در این زمینه داشـته باشـند، می‌توانند اعلام آمادگی نمایند.

در خصوص مشکل شوری آب در استان یزد که به آن اشاره کردید باتوجه‌به این مشـکل، بحث شـیرین‌سـازی آب مطرح شـده اسـت. می‌دانیم که هزینه‌های شـیرین‌سازی آب بسـیار بالا است و استفاده از آب شیرین‌کن‌ها نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجهی اسـت. در این راسـتا، طرح پژوهشـی اسـتفاده از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی نیز مطرح شده بود. آیا می‌توانید اطلاعات بیشتری در این زمینه ارائه دهید؟

به‌طور خاص، تاکنون طرحی در زمینه شـیرین‌سـازی آب در مقیاس بزرگ که قابلیت اجرایی داشـته باشـد به این شـرکت ارائه نشـده اسـت ولی این شـرکت آمادگی انجام مطالعات در این زمینه از طریق کمیته تحقیقات شـرکت را دارد و چنانچه طرحی که قابلیت اجرا، البته بدون ایجاد مشـکلات و مسـائل محیط‌زیستی، را داشته باشد به این شرکت ارائه شود آمادگی همکاری وجود دارد.

در خصـوص نقش مدیریت و سـیاسـت‌های حکمرانی کلان منابع آب در استان یزد را چگونه می‌بینید؟

در گذشته بارگذاری در بخش صنعت به ویژه صنایع پرآبخواه در استان یزد زیاد بوده این در حالی‌است که در استان‌های کم آب شـبیه یزد می‌بایسـت صـنایع کم آب خواه و پاک مسـتقر شوند (به‌عنوان‌مثال صنایع بافندگی و گردشگردی که سالیان گذشته نیز در استان یزد وجود داشته است) و نیازی نبود که به سـمت صـنایع پرآبخواه برویم. از نظر اینجانب این گونه صنایع پر آبخواه که در استان یزد وجود دارد باید در کنار دریا یا جاهایی که منابع آب بیشـتری وجود دارد احداث می‌گردید. در حال حاضـر، برخی شـهرسـتان‌ها به دلیل مشـکلات آب، با ممنوعیت‌هایی مواجه شـده‌اند و بارگذاری جدید در برخی استان‌ها باید متوقف شود.

در مورد مرکز ملی تحقیقات شوری در استان یزد که هدف این مرکز بررسی مسائل آب و خاک شور است توضیح بفرمایید که این مرکز تا چه حد توانسته موفق عمل کند؟ آیا همکاری‌هایی با اداره محیط‌زیست استان داشته است؟

تا جایی که من اطلاع دارم، این مرکز در زمینه تحقیق و بررسی گونه‌های کم‌آب (کشـت‌های گونه‌های کم آب) و اسـتقرار کاربری‌های کشـاورزی متناسـب با شـرایط اسـتان یزد فعالیت‌هایی انجام داده اسـت. همچنین، در بحث آمایش سرزمین کارهای تحقیقاتی انجام می دهند. همچنین در زمینه اسـتفاده از تجهیزات نوین برای آبیاری و انجام طرح‌های تحقیقاتی در این زمینه از جمله اقداماتی اسـت که این مرکز در حال انجام آن اسـت. در بحث تغییر اقلیم نیز گزارش‌های خوبی از این مرکز دیده‌ام.

دکتر حمید کاردان مقدم
عضو هیئت علمی مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو

لطفاً در مورد پروژه‌ای که در حوزه پایش رودخانه‌های حفاظت شده کشور انجام دادید، توضیح دهید.

تقریباً دو سـال پیش پروژه‌ای به سـفارش سـازمان حفاظت محیط‌زیسـت انجام شـد با عنوان «تهیه برنامه مدیریت محیط‌زیسـتی و طراحی شـبکه پایش رودخانه‌های حفاظت شده کشور». در این پروژه، شش رودخانه اصلی مورد مطالعه قرار گرفتند که رودخانه کرج، تأمین کننده آب شـرب تهران بود، سپس در استان البرز رودخانه‌های حاجی‌رود در بالادست سـد لتیان، و رودخانه‌های سـردآبرود، چالوس، هراز و تجن در استان مازندران بودند. کار به‌صورت تیمی بیش از یک سال و نیم به طول انجامید. در برخی رودخانه‌ها دو بار و در برخی سه بار نمونه‌برداری انجام دادیم و تحلیل‌هایی بر اساس نتایج کیفی نمونه‌ها و منشـأ آلاینده‌ها انجام شـد. آلاینده‌ها در حوزه‌های مورد مطالعه به دو دسـته نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای تقسیم شدند. آلاینده‌های نقطه‌ای شامل فاضلاب‌های شهری و روستایی، فاضلاب صنایع پرورش ماهی، کشاورزی گلخانه‌ای و دامپروری‌های صنعتی بودند. آلاینده‌های غیرنقطه‌ای شامل اراضـی کشـاورزی، تخلیه زباله و نخاله‌های سـاختمانی، بیمارسـتانی و رسـوبات بودند که در شـبکه پایش مورد توجه قرار گرفتند.

در ادامه، ارزیابی‌های دقیقی از وضـعیت هر یک از رودخانه‌ها انجام شـد که نشـان داد از سرچشمه تا پایین‌دست، تغییرات رفتاری و کیفی متفاوتی دارند. مثلاً در اسـتان‌های تهران و البرز، رودخانـه‌های لتیان، حاجی‌رود و سـرشـاخـه‌ها تا پایین‌دسـت سـد، تغییرات رفتاری چندان چشـمگیر نبودند و جریان آب نسـبتاً پایدار باقی می‌ماند. اما در مازندران، با ورود

آب به جلگه، تغییرات کیفی و کمی بسیار محسوس و عجیب بود. مثلاً رودخانه تجن پس از عبور از شهر ساری کیفیت آب به شدت کاهش می‌یافت، به‌طوری که در برخی نقاط، رودخانه تبدیل به‌نوعی کانال زهکشی شده بود و پارامترهای آلاینده در آن بسیار بالا بود. در رودخانه تجن، در ۹ ایستگاه نمونه‌برداری انجام شد و تحلیل‌ها نشان دادند که هدایت هیدرولیکی تغییرات قابل توجهی دارد. به‌طورمثال، EC(هدایت الکتریکی) در بالادست بین ٦٠٠ تا ٧٠٠ میلی‌موس بر سانتی‌متر بود، اما به جلگه که می‌رسید به حدود ١٠٠٠ می‌رسید و در یک نمونه‌برداری حتی تا ٢٠٠٠ میلی‌موس نیز بالا رفت که نشان‌دهنده چهار برابر افزایش بود. کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی مانند کلسیم، منیزیم، سدیم، کلراید و سولفات نیز به شکل مشابهی افزایش یافتند. مقدار pH آب در ارتفاعات حدود۷/۵ تا ۷/۸ بود، ولی در جلگه به حدود ۸ می‌رسید که نشان‌دهنده تمایل آب به حالت قلیایی بود. نیترات در سرشاخه‌ها کمتر از ۵ میلی‌گرم بر لیتر بود؛ اما پس از عبور از شهر ساری تا حدود ۵۰ میلی‌گرم رسید که تقریباً به حد استاندارد آب شرب نزدیک بود. البته نمونه‌برداری نیترات فقط در یک روز انجام شد و ممکن است در روزهای دیگر تغییر داشته باشد؛ اما به طور میانگین افزایش شدیدی داشت. آلاینده‌های مربوط به فاضلاب‌های مسکونی مانند BODو COD در برخی مناطق به شدت افزایش یافته بودند؛ مثلاً BOD از زیر ۵ به بالای ٤٠ میلی‌گرم بر لیتر و COD تا نزدیک ۸۰-۹۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش داشت. این موضوع چه در خانه‌های روستایی و چه در شهرک‌ها نشان می‌داد که فاضلاب‌ها به طور کامل وارد بستر رودخانه می‌شوند. در خود شهر ساری نیز رودخانه آلوده بود و در مناطقی دبی آب افزایش می‌یافت که نشان‌دهنده ورود فاضلاب بدون تصفیه بود. میزان کدورت آب پس از شهر ساری بیش از ۵۰۰ بود که حتی بالاتر هم می‌رفت و نشان‌دهنده وجود مخلوطی از آلاینده‌ها در آب بود.

آلاینده‌های فلزات سنگین و شیرابه‌های زباله نیز بسیار نگران‌کننده بودند. به دلیل نزدیکی سطح آب زیرزمینی، بسیاری از مناطق عمق آب زیرزمینی کمتر از ۵ متر بود و تعامل کاملی بین آب سطحی و زیرزمینی وجود داشت. شیرابه‌های زباله یکی از بزرگترین چالش‌ها در استان مازندران به شمار می‌روند که تأثیرات منفی بر سلامت و محیط‌زیست دارند. مثالی که می‌توانم بزنم مربوط به بازدیدی در سال ١٤٠٠ از منطقه‌ای در غرب کشور بود که محل دفن زباله بود و شیرابه زباله‌ها به سمت چشمه‌ها جریان داشت و مردم پایین‌دست از این آب برای شرب استفاده می‌کردند. متأسفانه مجموعه‌ای از بیماری‌ها در آن منطقه مشاهده شد.

رودخانه هراز یکی دیگر از رودخانه‌های مطالعه شده بود که نمونه‌برداری آن پس از سد لار انجام شد. جالب بود که آب در سرشاخه‌ها کیفیت بسیار خوبی داشت و آلایندگی چندانی مشاهده نمی‌شد. نیترات کمتر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر بود و کدورت آب مربوط به ذوب برف‌ها بود. اما در پایین‌تر، نزدیک سد هزار، به دلیل وجود رستوران‌ها و فاضلاب‌های کنترل نشده و تجمع روستاها، آلودگی‌ها افزایش یافته بود. بااین‌حال تغییرات کیفیت آب به اندازه رودخانه تجن نبود BOD .در نزدیکی دریا به ٤٠ رسید اما در فاصله ١٠ کیلومتری از دریا به زیر ١٥ کاهش یافت.

رودخانه سوم، رودخانه چالوس بود که از سرشاخه‌های هزاربیشه شروع و تا مرزن‌آباد و سپس وارد شهر چالوس می‌شود و به دریا می‌ریزد. در این رودخانه شش ایستگاه نمونه‌برداری داشتیم. کیفیت آب در سرشاخه‌ها بسیار بالا بود؛ اما با نزدیک شدن به شهرها، به‌ویژه بعد از مرزن‌آباد، غلظت آلاینده‌ها افزایش قابل توجهی داشت. میزان نیترات تا ۸ میلی‌گرم بر لیتر و فسفات تا ۱ میلی‌گرم بر لیتر رسید. کدورت آب به‌خصوص پس از شهر چالوس به ۳۰۰ افزایش یافت که ناشی از فعالیت‌های راه‌سازی بود.

رودخانه چهارم، سرآبرود بود که حدود ٦٠ کیلومتر طول داشت و منطقه ییلاقی کلاردشت را نیز شامل می‌شد.مقدار BODدر آنجا کمتر از ٦ میلی‌گرم بر لیتر و دمای آب کمتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد بود که در رودخانه‌های دیگر دیده نمی‌شود. مقدارCOD نزدیک دریا به ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر و فسفات کمتر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسید. مقدارEC به‌صورت بیشینه ٢٦٠ میلی‌موس بر سانتی‌متر بود که کیفیت آن حتی بهتر از برخی آب‌های معدنی بود.

تفاوت سردآبرود با دیگر رودخانه‌ها این بود که منطقه توسعه شهری کمتری داشت و بیشتر ویلاها در آنجا قرار داشتند. کشاورزی، شبکه آبیاری و سد تنظیمی وجود داشت که جریان آب را کنترل می‌کرد. کیفیت آب خوب بود و یکی از دلایل آن شرایط جغرافیایی با شیب ملایم و عرصه کم و طول زیاد بود که آلاینده‌ها به‌راحتی وارد رودخانه نمی‌شدند.

در برخی از رودخانه‌ها مانند چالوس، کرج و لتیان مدل‌سازی کیفی با مدل QUAL٢K و SWAT انجام شد و در نهایت شبکه پایش بهینه‌ای برای این رودخانه‌ها پیشنهاد شد که باتوجه‌به موقعیت، حوزه آلاینده‌ها، ایستگاه‌های ثابت و داده‌های در دسترس طراحی شده بود. مثلاً در رودخانه چالوس سه ایستگاه ثابت در نظر گرفته شد که با جدولی از پارامترهای کیفی در دوره‌های آماری منظم بتوانند وضعیت را رصد کنند.

پارامترهای کیفی به سه دسته تقسیم شدند: شبکه پایش کیفی، شبکه پایش آلودگی و شبکه پایش پیشرفته. در شبکه کیفی پارامترهای کاتیون، آنیون، سختی، EC TDS سنجیده می‌شدند. در شبکه آلودگی، نیترات و فسفات و در شبکه پیشرفته آلاینده‌های پیچیده‌تر مانند دترجنت‌ها و فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفتند. بازه‌های زمانی متفاوتی هم برای هر دسته تعیین شد تا آلودگی‌های مختلف حوزه‌ها به‌خوبی کنترل شوند.

این پروژه در سال ١٤٠٢ به پایان رسید و پیشنهاد می‌کنیم چنین برنامه‌ای برای رودخانه‌های دیگر کشور نیز اجرا شود. به ویژه در استان مازندران که به دلیل تعامل آب سطحی و

زیرزمینی، آلاینده‌ها و تغییرات کیفی بیشتری دیده می‌شود. اگر تیمی به طور سیستماتیک نمونه‌برداری و نتایج را منتشر کند، نتایج بسیار قابل توجه و شاید شوکه‌کننده خواهد بود.

مدیرعامل آبفای مازندران اشاره کردند که این استان در زمینه کیفیت آب با مشکلات متعددی مواجه است. آیا سازمان حفاظت محیط‌زیست، به‌عنوان مجری این طرح، نتایج حاصل از آن را در اختیار سازمان‌های مسئول قرار می‌دهد تا از آن بهره‌برداری شود؟

بله، فاز دوم این کار دقیقاً به همین موضوع اختصاص داشت. پس از آنکه وضعیت کیفی رودخانه‌ها مشخص شد، این سؤال مطرح شد که چگونه می‌توان از ظرفیت مشارکت‌های اجتماعی برای کنترل آلودگی بهره گرفت؟ به‌عنوانمثال، چگونه می‌توان ذی‌نفعان محلی مانند کشاورزان و رستوران‌داران را وارد فرآیند کنترل آلودگی کرد تا اقدامات مؤثری در منطقه صورت گیرد؟

متأسفانه یکی از ضعف‌هایی که در کشور وجود دارد، این است که ما برنامه‌های پایدار و بلندمدت نداریم. به‌محض تغییر مدیریت یک سازمان، تمام برنامه‌ها نیز متوقف می‌شوند. علاوه‌براین، ارتباط میان سازمان حفاظت محیط‌زیست و وزارت نیرو چندان قوی نیست. در بسیاری از کشورها وزارتخانه‌ای وجود دارد که هم آب و هم محیط‌زیست را در بر می‌گیرد، اما در ایران وزارت نیرو به‌صورت مستقل فعالیت می‌کند و سازمان محیط‌زیست نیز به‌نوعی یک نهاد حاشیه‌ای محسوب می‌شود. در واقع، ایجاد هماهنگی میان این سازمان‌ها کار دشواری است.

برای نمونه، در زمینه مصرف آب در بخش کشاورزی، همواره بین وزارت نیرو و وزارت جهاد کشاورزی اختلاف‌نظر و بحث وجود دارد. درحالیکه بخش بزرگی از آلودگی‌ها ناشی از فعالیت‌های انسانی است، همان‌گونه که پیش‌تر هم توضیح داده شد. پیش از ورود رودخانه به محدوده‌های شهری، قابلیت خودپالایی آن می‌تواند بخش زیادی از آلودگی‌ها را کنترل کند، اما زمانی که وارد شهر می‌شود، سطح بی‌نظمی و آنتروپی به شدت افزایش می‌یابد و رودخانه دیگر توان بازیابی خود را از دست می‌دهد. ک بخش مهم ماجرا را هم باید بپذیریم؛ اینکه در زمینه فرهنگ‌سازی عمومی باید کار جدی‌تری انجام دهیم. با وجود سال‌ها فعالیت فرهنگی، در طرحی که اجرا کردیم مشاهده شد که سواحل هنوز هم پر از زباله هستند، و این زباله‌ها با هر بارندگی وارد رودخانه می‌شوند و باعث آلودگی می‌گردند. ما باید مانند رعایت چراغ قرمز در رانندگی، روی این موضوع نیز حساس باشیم و آن را به یک الزام رفتاری تبدیل کنیم. بسیاری از مردم هنگام رانندگی در اتوبان سیگار می‌کشند و ته‌سیگار را به راحتی روی زمین می‌اندازند. این ته‌سیگارها به کجا می‌روند؟ دوباره به طبیعت، منابع آب و در نهایت به خود ما بازمی‌گردند. پس اگر آموزش صحیح و پیوسته نداشته باشیم، نمی‌توانیم انتظار رفتار درست از مردم داشته باشیم.

هرچقدر داده‌ها و اطلاعات کمتری به مردم داده شود و شرایط برایشان روشن نباشد، همراهی آن‌ها هم کمتر خواهد بود. این مسئله به‌روشنی مشخص نیست که مسئولیت آن دقیقاً با کدام نهاد است: شرکت آب منطقه‌ای؟ آب و فاضلاب؟ سازمان محیط‌زیست؟ یا مدیریت بحران استان‌ها؟ این‌ها چالش‌هایی است که باید برایشان راه‌حل یافت. به نظر من بهترین گزینه برای پاسخ به این مسائل، دانشگاه‌ها هستند. آن‌ها می‌توانند از طریق کارهای پژوهشی به سؤالات و ابهامات پاسخ دهند و راهکار ارائه کنند.

در زمینه فرهنگ‌سازی نیز ما نیاز به کار تعاملی داریم. گروه‌های محیط‌زیستی باید به میدان بیایند و به‌صورت عملی وارد کار شوند؛ به مردم نشان دهند که چگونه می‌توان از محیط‌زیست محافظت کرد. آموزش صرف کافی نیست، رفتار عملی و الگوسازی ضروری است.

در استان مازندران تعداد زیادی چاه غیرمجاز وجود دارد که هیچ‌گونه کنترلی روی آن‌ها صورت نمی‌گیرد. این مسئله می‌تواند نقش مهمی در تشدید آلودگی ایفا کند. به نظر می‌رسد قوانین ما بازدارندگی کافی ندارند، درحالیکه در بسیاری از کشورها جریمه‌های سنگینی برای چنین مواردی در نظر گرفته می‌شود. دیدگاه شما در این خصوص چیست؟

درست است؛ اگرچه ما قوانین داریم، اما رعایت قانون در کشور ما سخت‌گیرانه اجرا نمی‌شود. به همین دلیل، آموزش می‌تواند تا حدی ضعف قانون را جبران کند. چاه‌های غیرمجاز در همه جای کشور و حتی در سایر کشورها هم وجود دارند، اما تفاوت در اجرای قانون است. در بسیاری از کشورها جریمه‌ها آن‌قدر سنگین‌اند که افراد ناگزیر به رعایت می‌شوند. اما در ایران، باتوجهبه قیمت پایین آب و برق، کشاورزی که از چاه غیرمجاز استفاده می‌کند می‌داند در نهایت ممکن است فقط جریمه‌ای محدود بپردازد؛ بنابراین ترسی از تخلف ندارد. این مسئله در مورد محیط‌بان‌ها هم صدق می‌کند. وقتی ما برای منابع طبیعی ارزش قائل نباشیم، طبیعتاً برای حفاظت از آن مجری هم تعیین نمی‌کنیم. قانون بدون ناظر و مجری عملاً بی‌اثر است.

در بحث آلودگی، بخش اعظم آلودگی‌ها مربوط به مناطق شهری و صنعتی است. تا زمانی که نتوانیم ارتباط مؤثر و تعامل سازنده‌ای بین صنایع و متولیان مدیریت کیفی آب برقرار کنیم، مشکل پابرجا خواهد ماند. بسیاری از صنایع فقط به استفاده از سیستم‌های سپتیک ساده بسنده می‌کنند، درحالیکه عملکرد این سیستم‌ها بسیار ضعیف است. ما رودخانه‌ای را بازدید کردیم که اطلاعات کیفی آن به‌صورت آنلاین و با فاصله زمانی ۱۰ دقیقه ثبت می‌شد، اما هیچ استفاده‌ای از این داده‌ها نمی‌شد. این یعنی حتی اگر قانون و تجهیزات مناسب وجود داشته باشند، بدون سیستم اجرایی و بهره‌برداری مؤثر، کار پیش نمی‌رود.

به نظر شما ضعف‌های اصلی سیستم پایش کیفی آب در کشور چیست؟ و یک سیستم پایش کیفی موفق چه ویژگی‌هایی باید داشته باشد؟

اولین نکته در مدیریت پایش کیفی، داشتن درک درست از سیستم است. ما در مؤسسه تحقیقات آب، پایش کیفی چند سد را انجام داده‌ایم. بر اساس تجربه، پیشنهاد دادم که برخی پارامترهای کیفی را که کاربردی ندارند، حذف کنیم. مهم است که بدانیم هدف ما از پایش چیست و بر اساس آن مشخص کنیم که چه پارامترهایی، با چه تواتری، باید پایش شوند.

دومین موضوع شناخت دقیق از منطقه مورد پایش است. باید مدل مفهومی خوبی داشته باشیم تا تبادلات، نوع کاربری، منابع آلاینده و تأثیرات آن‌ها را به درستی درک کنیم.

ابزارهایی که استفاده می‌کنیم باید به‌صورت سالانه کالیبره شوند. در حال حاضر برخی ابزارها بیش از یک دهه است که بدون کالیبراسیون مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین پایش کیفی باید به سمت سیستم‌های آنلاین برود. فرض کنید یک تانکر سوخت وارد رودخانه شود؛ اگر سیستم پایش آنلاین باشد، بلافاصله می‌تواند آلودگی را شناسایی کند و واکنش سریع صورت گیرد. در زمینه نیروی انسانی و تحلیل داده‌ها مشکلی نداریم. زیرساخت فنی اگر تقویت شود، توان علمی و تحلیلی ما کاملاً آماده است. ما با ۲۰ کشور دنیا مقایسه‌ای انجام دادیم؛ از نظر فنی تفاوتی نداشتیم؛ اما در حوزه کیفی، یعنی پارامترها، تواتر نمونه‌برداری و تجهیزات، بسیار متفاوت عمل می‌کردیم. مثلاً برخی پارامترها باید در زمان کوتاهی به آزمایشگاه برسند وگرنه داده بی‌اعتبار می‌شود. در استرالیا ما در سال ۱۹۹۸ برای یک رودخانه خاص پایش انجام دادیم؛ ۲۰۶ پارامتر بررسی می‌شد اما ۶ پارامتر کیفی فقط برای یک شاخه از رودخانه تعریف شده بود و در هیچ بخش دیگری از آن رودخانه بررسی نمی‌شد. در ایران، ما بدون توجه به ویژگی‌های خاص منطقه، پارامترهای ثابتی را در همه‌جا اندازه‌گیری می‌کنیم. آب و فاضلاب به‌دلیل وظیفه تأمین آب شرب، نمونه‌برداری‌های خود را به‌خوبی انجام می‌دهد، اما دسترسی به داده‌های آب منطقه‌ای دشوار است. اگر این دسترسی فراهم شود، مردم با آگاهی بهتر می‌توانند نقش مؤثرتری در کنترل و کاهش آلودگی داشته باشند.

برای اینکه فرهنگ‌سازی در زمینه آلودگی و مدیریت منابع آب اتفاق بیفتد، مردم باید از پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی آلودگی آگاه باشند. آیا متخصصان توانسته‌اند این پیامدها را به‌درستی برای جامعه تبیین کنند؟ اساساً این پیامدها از نظر شما چه مواردی هستند؟

من در سال ۱۴۰۱ پیشنهادی به وزارت نیرو ارائه دادم مبنی بر راه‌اندازی "مدارس فصلی" برای آموزش چرخه آب به کودکان. ایده این بود که بچه‌ها از سرچشمه‌های آب، قنات‌ها، چاه‌ها و رودخانه‌ها تا سد، تصفیه‌خانه آب شرب، زمین‌های کشاورزی، کارخانه‌ها و در نهایت تصفیه‌خانه فاضلاب را به‌صورت میدانی مشاهده کنند. هدف این بود که کودکان چرخه آب را در عمل ببینند و درک آن در زندگی شخصی‌شان تأثیرگذار شود. حتی قرار شد رفتار مصرف آب خانواده‌های این کودکان نیز پایش شود، اما متأسفانه اجرایی نشد.

با این حال، مسئله اصلی این است که بیشتر تمرکز ما در فرهنگ‌سازی روی آب شرب است، درحالیکه آب شرب تنها ۸ تا ۱۰ درصد مصرف آب را شامل می‌شود و حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد آن مجدداً به سفره‌های زیرزمینی بازمی‌گردد. در واقع، تمرکز ما بر صرفه‌جویی در آب شرب نوعی آدرس غلط دادن به مردم است. مسئله اصلی در کشور، مصرف آب در بخش کشاورزی است که متأسفانه بسیار کم به آن پرداخته شده است.

وزارت نیرو وظیفه تأمین آب و برق را دارد، اما از بازدارندگی قانونی برخوردار نیست. حتی در زمینه ارتباطات و فرهنگ‌سازی هم ضعیف عمل کرده است. برای مثال، یکی از بدترین شعارهای ممکن که آب و فاضلاب تهران چاپ کرده بود این بود: "آب بهتر است یا ثروت؟" این شعار دقیقاً همان چیزی است که باید از آن پرهیز کرد. شما اگر جنوب خلیج‌فارس را ببینید، کشورهایی هستند که هم ثروت دارند و هم زندگی خوب. اما در شمال خلیج‌فارس با وجود ثروت، کیفیت زندگی مطلوبی وجود ندارد. انتخاب واژگان در فرهنگ‌سازی بسیار مهم است.

از سوی دیگر، وزارت نیرو عملاً زورش به جهاد کشاورزی نمی‌رسد و نمی‌تواند آن را در زمینه بهره‌وری و الگوی کشت پاسخگو کند. کشاورزان هم اعتماد چندانی به دولت ندارند و حتی اگر دولت تضمین خرید محصول بدهد، حاضر به همکاری نمی‌شوند. پیشنهاد تشکیل یک تیم مشترک بین جهاد کشاورزی، وزارت نیرو و سازمان حفاظت محیط‌زیست برای مدیریت منابع آب مطرح شد، اما وقتی کشاورز می‌بیند همین نهادها با هم هماهنگ نیستند، اعتمادش به سیستم از بین می‌رود.

در برخی اظهارنظرها کمبود منابع آب کشور به تغییر اقلیم نسبت داده می‌شود، اما آیا واقعاً تغییر اقلیم در این بحران بیشترین اثرگذاری را دارد؟

کاملاً درست می‌فرمایید. سال گذشته در دانشگاه صنعتی شریف، یکی از کارشناسان وزارت نیرو عنوان کرد که از حدود ۱۰۰ میلیارد مترمکعب آب تجدیدپذیر سالانه، در بدترین شرایط تنها یک درصد کاهش به دلیل تغییر اقلیم رخ داده است. یعنی حتی اگر شرایط تغییر اقلیم بسیار وخیم شود، نهایتاً ۷ درصد کاهش در منابع آب خواهیم داشت. درحالی‌که کاهش فعلی منابع آب ایران بسیار بیشتر از این میزان است. این یعنی مسئله اصلی به سیاست‌گذاری‌ها و تصمیمات داخلی بازمی‌گردد. به عبارتی، سیاست‌گذاری دانسته یا نادانسته کشور را به سمتی برده است که اکنون در تنگنای شدید قرار گرفته‌ایم. ما را در شرایط کم‌آبی نگه داشتند و حالا راهکار را در انتقال آب از دریا می‌دانند؛ طرح‌هایی که هزینه‌های بسیار بالایی از بیت‌المال دارند و به‌عنوان دستاوردهای بزرگ معرفی می‌شوند، درحالی‌که بسیاری از متخصصان با آن مخالف‌اند.

آیا شما به پاسخی برای این سؤال رسیده‌اید که چرا ما به این نقطه رسیده‌ایم؟

مدل‌های تغییر اقلیم انجام شـــده نشـــان می‌دهند که تغییر اقلیم تنها ۲ تا ۵ درصـــد در کاهش منابع آب تأثیرگذار بوده است. ما با رفتارهای نادرست مدیریتی و برداشت‌های بی‌رویه به این نقطه رسیده‌ایم. در دنیا به طور متوسط ۶۰ تا ۷۰ درصد منابع آب در بخش کشاورزی ۸ تا ۱۰ درصد در بخش شرب و ۲۰ تا ۲۵ درصد در صنعت مصرف می‌شود. اما در ایران سهم صنعت تنها ۳ تا ۴ درصد است.

در مورد طرح‌های انتقال آب، باید بپرســـیم که پس از انتقال چه می‌خواهیم بکنیم؟ چون نه مدیریت مصـــرف داریم و نه بهره‌برداری مؤثر. همه تمرکز ما روی تأمین اسـت، چون تأمین، اقتصادی است. ما حتی می‌توانیم به کشاورز پیشنهاد بدهیم که دولت محصـولش را خریداری خواهد کرد، تا او بر اسـاس برنامه مشـخص عمل کند. ما مشـکل کمبود آب نداریم که بخواهیم میلیاردها تومان صـرف انتقال آب کنیم. فقط اگر بتوانیم ۲۰ درصـد آب کشـاورزی را کاهش دهیم، بسـیاری از طرح‌های انتقال آب عملاً بی‌نیاز می‌شوند. اما به‌جای اینکه به بهره‌وری بپردازیم، هنوز به شیوه سنتی محصولاتی مثل گندم را برداشـت می‌کنیم. من در سـفری که سـال گذشـته به افغانسـتان داشـتم، دیدم که چگونه در مزارشـریف، رودخانه آمودریا را به زمین‌های کشـاورزی هدایت کرده‌اند و در حال آموزش و تجهیز کشاورزان با تکنولوژی پیشرفته هستند تا آن منطقه را به اوکراین خاورمیانه تبدیل کنند. ما حتی یک برنامه منسجم برای وضعیت تأمین آب مشهد تا سال ۱۴۰۵ نداریم!

در مورد آلودگی‌هـای نوظهور، مـانند فلزات سـنگین، در طرح‌هایی که اجرا شده، ارزیابی‌هایی انجام شده است؟

در طرحی که ما کار کردیم، فلزات سـنگین مانند آرسـنیک، کادمیم و کروم بررسـی نشـدند، اما قاعدتاً باید در آن منطقه وجود داشته باشند، چرا که کارشناسان به وجود مقادیر بالای آن اذعان کرده‌اند. در بررسـی دیگری در خروجی تصـفیه‌خانه فاضلاب تهران، ۷۵ نوع دارو شناسایی شد که نشان می‌دهد آلودگی‌های نوظهور در حال افزایش است.

مسـئله این اسـت که آزمایش این مواد هزینه‌بر اسـت و شرکت‌ها یا پروژه‌ها ترجیح می‌دهند با آن برخورد تجاری کنند. از طرفی برخی از داده‌های منتشـر شـده نیز از اعتبار کافی برخوردار نیسـتند و تاکنون اسـتاندارد مشـخصـی برای این آلاینده‌ها در کشـور تعریف نشـده اسـت. این خلأها باعث می‌شـود که ما در مواجهه با آلودگی‌های نوظهور، بسـیار عقب باشیم.



مهندس مرتضی قلی‌زاده

کارشناس آب، محیط‌زیست و کیفیت منابع آب از آذربایجان غربی و فعال محیط‌زیست عضو انجمن سبزآسیا کره جنوبی

آلودگی‌هایی که به شـکل‌های مختلف شـامل عوامل انسـان‌زاد و طبیعی هسـتند، مشـکلات متعددی ایجاد می‌کنند. لطفاً شـمایی از وضـعیت منابع آبی و مسـائل و مشـکلات مربوط به آن‌ها را ترسیم فرمایید.

منابع آب در ایران و به‌ویژه در منطقه شمال غرب کشور تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و پدیده‌هایی مانند ال‌نینو و لانینو قرار دارند. در سـال‌های اخیر، به دلیل دوره خشـکسـالی که دارای دو دسـته اسـت (یکی ناشـی از زاویه گردش زمین و دیگری خشـکسـالی دوره‌ای) خشـکسـالی در حوضـه آبریز دریاچه ارومیه باتوجه‌به تحقیقات اسـاتید حدوداً با دوره تناوب ۳۷ساله رخ می‌دهد. اثر خشکسالی اقلیمی و عوامل انسان‌زاد نخسـتین‌بار هسـت که اثر خود را با خشـکاندن تالاب‌ها و دریاچه ارومیه نشـان داد. دریاچه ارومیه به‌عنوان شـاخصـی برای منابع آب در حوضـه محسـوب می‌شـود که در سـال‌های اخیر بخش عمده‌ای از آن از دسـت رفته اسـت. کیفیت آب تابعی از کمیت آن اسـت؛ بنابراین کاهش کمیت منابع آب منجر به افزایش غلظت آلاینده در آب می‌شود. به همین دلیل پارامترهای کیفی با مقادیر بالاتری ظاهر می‌شـوند. باتوجه‌به توسـعه ناپایدار در چند دهه قبل در کشـور، میزان و کیفیت کودها و سموم شیمیایی استفاده شده در کشاورزی، صنایع و مصارف روزمره، خارج از استاندارد هستند؛ این موضوع باعث تشدید مشکلات محیط‌زیستی و وخامت جریان شده است. امیدواریم نسـل جدید رویکردهای خود را اصـلاح کنند و بخشـی از تخریب‌های واردشـده به آب، هوا، خاک، گیاهان و تنوع زیسـتی را جبران نمایند یا دسـت کم روند تخریب را کاهش دهند. نسبت به محیط‌زیست و منابع طبیعی، دریاچه ارومیه نمادی از وضـعیت منابع آب کشـور اسـت؛ مشـابه وضـعیت رودخانه کارون، هورالعظیم، تالاب‌های پریشـان و انزلی که همه در وضـعیت ناپایداری قرار دارند. هر روز منابع آب کاهش و آلودگی آن‌ها افزایش می‌یابد. این شرایط سال‌ها ادامه داشـته اسـت و اکنون با رشـد جمعیت و پیشـرفت تکنولوژی مصـرف‌گرایی فعلی، لذا ظرفیت طبیعت پاسـخگوی نیازهای امروز بشری نیست. به همین دلیل در سراسر کشور منابع آب در وضعیت قرار ندارد، امیدواریم رسانه‌های عمومی، دیجیتال و فناوری‌هایی مانند هوش مصـنوعی در اصـلاح این شرایط کمک کنند.

جنگل‌های زاگرس که از مرز ترکیه در آذربایجان غربی آغاز و تا اسـتان فارس ادامه دارد، تحت فشـار اسـتفاده بیش از توان، قرار گرفته اسـت. پوشـش جنگل‌های زاگرس در اسـتان‌های آذربایجان غربی، کردسـتان، لرسـتان، چهارمحال و بختیاری و فارس دچار بهره‌برداری بی‌رویه، تنک‌شـدگی و تغییر کاربری شـده‌اند. این تغییرات در فواصل زمانی کوتاه هم قابل رصد و مشـاهده بوده که نگران‌کننده اسـت وباعث کاهش کیفیت منابع طبیعی ما شـده است. هر درخت سالانه حدود ۵۰ لیتر آب را در خاک نگه می‌دارد، به نفوذ آب کمک کرده و در کنترل آلودگی‌ها و تولید اکسـیژن نقش به‌سـزای دارد. در یک دهه

گذشته، مسئله ریزگردها که از کشورهای عراق، سودان و کویت وارد زاگرس می‌شوند، به این مشکلات افزوده است؛ خشکسالی نیز روند تخریب را تشدید کرده است.

وضعیت آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی چگونه است و از نظر قوانین چه مشکلاتی مشاهده می‌شود؟

طبق ماده ٤۶ قانون توزیع عادلانه آب، پیشگیری از آلودگی به سازمان محیط‌زیست محول شده است. بر اساس آیین‌نامه جلوگیری از آلودگی منابع آب، برای سازمان‌های محیط‌زیست، وزارتخانه‌های بهداشت، وزارت نیرو، جهاد کشاورزی، صنایع و معادن در ماده ۳، به عنوان نهادهای همکار معرفی شده‌اند. اما به دلیل گستردگی آلودگی‌ها و هزینه‌های بالای آزمایشات، توان سازمان حفاظت محیط‌زیست محدود است. سازمان محیط‌زیست مکلف است به وظایف خود در بخش پایش کیفیت و جلوگیری از آلودگی آب عمل کند. ولی بودجه لازم واقعا زیاد بود. از دهه ۸۰، شرکت‌های آب منطقه‌ای بخشی از مطالعات پایش کیفی و نمونه‌برداری‌ها از منابع آب را انجام می‌دادند. همچنین، ماده ۲۱ قانون توزیع عادلانه آب وزارت نیرو را موظف به انجام مطالعات شناسایی منابع آب (کمی وکیفی) کرده است. وزارت نیرو در شناسایی منابع آلاینده و پایش کیفیت آب منابع تامین آب شرب فعالیت بیشتری در راستای تامین آب شرب با کیفیت مناسب دارد. استاندارد ۱۰۵۳ نیز بر رعایت کیفیت آب شرب تأکید دارد. هرگاه کیفیت منابع تامین کننده آب شرب مناسب نباشد، هزینه تصفیه افزایش می‌یابد. تصفیه‌خانه‌های کشور عمدتاً بر پایه فرآیندهای فیزیکی هستند. این فرآیند، شامل گندزدای، افزودن منعقد کننده، جداسازی لخته‌های، فیلتراسیون و کلرزنی می‌باشد. در برخی مناطق با آلودگی شدیدتر، فرآیندهای تصفیه بیشتری به کار می‌رود. وزارت نیرو نمونه‌برداری‌هایی از منابع آب انجام می‌دهد و پارامترهای عمومی مانند EC برای پیگیری تغییرات کیفی منابع مورد استفاده قرار می‌گیرد.ممکن است نتواند منبع این پارامتر را شناسایی کند، اما در کل کیفیت آب را نشان می دهد

در آذربایجان غربی سیستم دفع فاضلاب به چه صورتی است؟

در آذربایجان غربی، تمامی شهرهای با جمعیت بیش از ۲۰ هزار نفر دارای تصفیه‌خانه فاضلاب هستند، به جز شهر تکاب که در دست ساخت است. همچنین برخی شهرهای کوچک و روستاها نیز به این امکانات مجهز شده‌اند. بااین‌حال، مشکل در بهره‌برداری از تأسیسات و رعایت استانداردها هست که معمولاً صورت نمی‌گیرد. مثلاً عدم کلرزنی مناسب پساب در خروجی تصفیه‌خانه‌ها که موجب رشد بیولوژیک و کیفیت نامطلوب پساب در منابع آب سطحی می‌شود. در شهرهای کوچک و روستاها هنوز تصفیه‌خانه‌های کافی وجود ندارد و بسیاری از فاضلاب‌ها به‌صورت غیر مناسب از طریق چاه‌های جذبی دفع می‌شوند. در سال‌های گذشته، با تفاهم‌نامه‌ای میان سازمان محیط‌زیست و آب و فاضلاب، تلاش شد فاضلاب روستاهای فاقد تصفیه‌خانه به نزدیک‌ترین منهول شبکه جمع‌آوری فاضلاب هدایت شود که تا حدودی موفق بوده است. همچنین راهکارهایی مانند استفاده از Wetlandهای طبیعی برای تصفیه فاضلاب پیشنهاد می‌شود.

الان منابع آب شرب ارومیه از سد تأمین می‌شود یا ترکیبی از این و منابع دیگر است؟

آب شرب شهر ارومیه بیشتر از ۷۰ درصد از سد شهرچای تأمین می‌شود؛ سدی که حدود ۲۵ کیلومتر بالاتر از شهر واقع شده است. خوشبختانه حوزه آبریز این سد بسته است و فقط یکی دو روستا در ارتفاعات آن قرار دارند که منابع آب آن‌ها بیشتر از برفاب تأمین می‌شود. این ویژگی‌ها باعث شده کیفیت آب شرب ارومیه بسیار بالا باشد و این موضوع مستقیماً به خصوصیات طبیعی حوزه آبریز مربوط می‌شود؛ چرا که اراضی کشاورزی بالادست سد کمتر از ۱۰۰ هکتار هستند. به‌عبارتی، خارج از مدیریت و بهره‌برداری انسانی و به دلیل شیب تند حوضه و وجود یخچال‌های طبیعی، این حوزه تا حدودی باعث کیفیت مطلوب آب شده است.

فرمودید در اوج خشکسالی هستیم و کیفیت آب از کمیت آن تأثیر می‌گیرد. بخشی از مشکلات هم ناشی از تغییر رویکردهای دانشگاهی از مسائل محیط‌زیستی به روش‌های سازه‌ای بوده است. به نظر شما نقش تصمیم‌گیری در سطح کلان در شرایط کنونی چیست که ما را به نقطه‌ای رسانده که مجبوریم تصمیمات آنی و زودبازده بگیریم؟

فعلاً مدیریت سازه محور و پروژه‌محور بر مدیریت نرم‌افزاری حاکمیت دارد. آبخیزداری، آبخوان‌داری، مدیریت آلاینده‌ها مخصوصاً آلاینده‌های مانند نایلون، سموم شیمیایی، هورمون‌ها، داروهای مانند استامینوفن و... فرهنگ‌سازی، آگاهی‌بخشی، کارهای نرم‌افزاری اقدامات مهمی هستند که فعلاً در اولویت نیستند. هم چنانچه می‌دانید، ستاد احیای دریاچه ارومیه در طرح تحقیق و تفحص مورد بررسی‌های زیادی در مجلس قرار گرفت. نتایج قابل ملاحظه هست، اعلام شده است که حدوداً ۶۱۰۰ میلیارد تومان برای آن هزینه شد. بیایید به نحوه هزینه‌کرد آن نگاه کنیم: برای منابع طبیعی و تثبیت، تنها حدود ۶ میلیارد تومان هزینه شد؛ برای مطالعات، حدود ۲۰۰ میلیارد تومان؛ و برای آگاه‌سازی عمومی هم بین ۲ تا ۳ میلیارد تومان. اما برای اقدامات سازه‌ای حدود ۶۰۰۰ میلیارد تومان هزینه شد. بااین‌حال، نتیجه چه بود؟ دریاچه هنوز خشک است در ایران بیشتر رودخانه‌ها و منابع آب، با نگاه سازه‌محور مدیریت می‌شوند. کارهای عمرانی همیشه بودجه و روبان برای افتتاح دارند؛ شرکت‌های مشاور هم به دلیل همین بودجه‌ها، به سمت پروژه‌های عمرانی رفتند. چون منافع مالی در آن‌ها بیشتر بود. ولی در اروپا، مگر در مواردی خیلی ضروری که با اقدامات مدیریتی قابل حل نباشد به سراغ مدیریت سازه‌ای می‌روند. در غیراین‌صورت اصولاً از اقدامات سازه‌ای استفاده نمی‌شود و بیشتر از روش‌های طبیعی و تجهیزات سبک برای تقویت بستر رودخانه بهره می‌برند

رودخانه یک وجود و پدیده زنده است، زمانی می‌تواند وظایف اکولوژیکی خودش مثل تغذیه آبخوان‌ها، خود پالایی و تأمین رطوبت محیط، تصفیه طبیعی محیط و غیره را به‌صورت مطلوب انجام دهد که به‌صورت طبیعی باقی بماند. در کشور ما همه رودخانه‌ها را به کانال‌هایی تبدیل کرده‌ایم که فقط آب را منتقل می‌کنند. در این شرایط، آلودگی‌هایی که در بالادست ایجاد می‌شود، در پایین‌دست انباشته می‌شود. کانال‌ها فقط وظیفه انتقال دارند و دیگر خدمات اکوسیستمی را انجام نمی‌دهند. متأسفانه ما به‌صورت سازه‌ای فکر می‌کنیم؛ چون بودجه، پروژه و پول در احداث سازه‌ها است. در منابع طبیعی سود مالی مستقیم وجود ندارد، پس کسی به اقدامات طبیعت‌محور علاقه ندارد. این مشکل ماست؛ اگر نگاهمان طبیعت‌محور باشد، مشکلات ما هم حل خواهد شد. مشکل ما این است که ما طبیعت را از خودمان نمی‌دانیم چون از کودکی در مدارس و همین‌طور در بزرگسالی در دانشگاه‌ها آموزش ندیدیم که چگونه از طبیعت استفاده و نگهداری کنیم. حلقه گمشده اصلی ما عدم آگاهی واقعی است.

فرایند جمع‌آوری و ثبت داده‌های کیفی منابع آب سطحی و زیرزمینی را با جزئیات بیشتر توضیح دهید؟

برداشت داده‌ها چند بخش دارد. کمیت یا دبی‌سنجی، رسوب سنجی و پارامترهای کیفیت زیستی، مثل pH و Ec که در بلندمدت تغییرات کمی دارند. سالانه چند بار کنترل می‌شوند. اگر در منابعی تغییرات مشهودی دیده شود، تعداد برداشت‌ها نمونه و آزمایش‌ها افزایش پیدا می‌کند، معمولاً در پیزومترها و چاه‌های مشاهده‌ای در دو دوره کم‌آبی و پرآبی. در برخی موارد، صورت می‌گیرد و همچنین پایش کیفی منابع آب حوضه به‌صورت مطالعاتی و پژوهشی در حوزه‌های آبریز رودخانه‌ها انجام می‌شود؛ معمولاً نیاز هست هر ۱۰ سال یک‌بار، مطالعات پایش کیفی تکرار شود، اینجا هدف بررسی عمومی و عناصر سنگین و عناصر خاصی مثل بور، کروم، کبالت یا آرسنیک است. این کارها معمولاً با همکاری دانشگاه‌ها انجام می‌شود؛ به‌صورت قرارداد مطالعاتی یا تحقیقاتی صورت می‌گیرد. در گذشته، داده‌برداری‌های روتین بیشتر انجام می‌شد؛ اما به دلیل افزایش قیمت‌ها، الان این برداشت‌ها به سالانه دو تا چهار بار کاهش یافته‌اند. این داده‌ها در همه شرکت‌های آب منطقه‌ای موجود است و در مطالعات پایه منابع آب کشور، به‌صورت دوره‌ای از رودخانه‌ها، آبخوان‌ها و سدها جمع‌آوری می‌شود. کیفیت آب شرب سدها هم به‌صورت روزانه توسط تصفیه‌خانه‌ها و شرکت‌های آب و آبفا کنترل می‌شود. همچنین جهت مدیریت برداشت، کیفیت‌سنجی عمقی آب سدها، سالانه چند بار با دستگاه‌های مخصوص اندازه‌گیری می‌شود.

مراجعه به مقالات نشان می‌دهد که چاه‌های شمال دریاچه ارومیه به نیترات و رودخانه‌های غرب و جنوب‌غربی به آرسنیک آلوده‌اند. سازمان‌های مربوطه چه اقداماتی انجام داده‌اند؟

درباره آلودگی منابع به آرسنیک، با قطعیت می‌توانم بگویم جز سرشاخه یک رودخانه کوچک که دبی قابل توجهی هم ندارد و در محدوده کارخانه‌های طلاسازی است، در منابع دیگر منابع آب مثل زرینه‌رود، سیمینه‌رود، مهاباد و شهرچای هیچ آرسنیکی یافت نمی‌شود. چون آرسنیک روی سیستم عصبی و هوش کودکان اثر مستقیم دارد، در استانداردهای جدید آمریکا، مقدار مجاز آن تقریباً صفر اعلام شده است؛ بنابراین ما روی این عنصر بسیار حساس هستیم. البته در ته‌نشست‌های میلیون‌ها ساله دریاچه ارومیه، شاید تجمعاتی از فلزات سنگین دیده شده است. در یکی دو چشمه آب گرم در سلماس و تکاب هم آثار فلزات یافت می‌شود؛ چون این چشمه‌ها به مواد مذاب زمین متصل هستند. کانی پیریت جزو آن کانی‌هایی است که اگر در مجاورت آب قرار نگیرد، مشکلی ندارد؛ اما در صورت تماس با آب حل می‌شود و یکی از تولیداتش می‌تواند آرسنیک باشد. اگر مطالعات و ارزیابی‌های محیط‌زیستی به‌درستی انجام شود، می‌توان منابع آرسنیک را شناسایی و محدود کرد.

لذا اگر مطالعات پایش کیفی و ارزیابی محیط‌زیستی واقعی انجام شود، می‌توان این منابع تولید آرسنیک را محدود کرد. الان هزینه آزمایش‌های کیفی بالا است و ردیف بودجه مخصوصی به این موضوع مهم داده نشده است؛ بنابراین به‌خاطر این هزینه‌های بالا ارگان‌های دولتی قادر به پرداخت نیستند. به غیر از هزینه‌های آزمایش‌های، نمونه‌برداری‌ها به‌صورت اصولی هم مهم است؛ بنابراین چگونگی برداشت نمونه، انجام آزمایش‌ها و تجربه تحلیل این نتایج نمونه‌ها مهم هستند.

بزرگ‌ترین چالش پیش روی مدیریت کیفی آب زیرزمینی کشور چیست؟ و همچنین در آذربایجان غربی چه نوع آلودگی‌هایی بیشتر مشاهده می‌شود؟ آیا نقشه‌ای از گستره آلودگی‌های منابع آب وجود دارد؟

امروزه پسماند تمام شهرها و روستاها جمع‌آوری می‌شود. محل دفن این پسماندها بزرگ‌ترین آلاینده‌ها محسوب می‌شوند، حتی در شهرهای بزرگ مانند تهران تبریز مشهد و اصفهان هم ما نتوانستیم از این طلای سیاه را مدیریت و استفاده کنیم. متأسفانه مدیریت پسماند که مهمترین عامل آلودگی است، به‌درستی انجام نمی‌شود. در مرحله بعد، کودها و سموم شیمیایی هستند. اگرچه برای آن‌ها استاندارد وجود دارد، ولی در عمل، بازرسی‌ها کافی نیست. سمومی که به‌صورت غیررسمی به کشاورزان می‌رسد، اغلب غیر استاندارد هستند. بنابراین بعد از پسماند، سموم و کودهای کشاورزی، دومین منبع آلودگی هستند. در رده سوم، پسماندهای دامی هستند که اگرچه طبیعی هستند، اما چون فسفات و نیترات بالایی دارند، منابع آب را تغذیه‌گرا کرده و باعث افزایش دمای آب در مخازن سدها و تالاب‌ها موجب رشد جلبک‌ها شده‌اند. به دلیل تغییرات اقلیمی و شدت و نوع بارش‌ها، خاک‌هایی که قبلاً به‌صورت طبیعی پسماندها را فیلتر می‌کردند، حالا دیگر آن کارایی را ندارند. قانون معادن ایراداتی دارد درسته که مجوز

بـدون این قـانون گرفتن مجوز طولانی می‌شـــود؛ امـا لااقـل کنترل‌های اولیه‌ای انجام می‌شـود و شـما الان می‌بینید که در کنار چشـــمه‌ای که آب شـــرب را تأمین می‌کند معدن احداث شـــده اســـت. ماده ٢٤ قانون معادن می‌گوید ارگان‌ها و" دســـتگاه‌های اجرائی مربوط مکلف‌اند ظرف ســـه ماه پس از ابلاغ این قانون، نســـبت به اعلام وضـــعیت حریم‌های قانونی خود به وزارت صنعت، معدن و تجارت اقدام نمایند." اگر ابلاغ نکردید، بر عهده وزارت معدن نیست. از طرفی قانون این توان مالی را به وزارت نیرو یا محیط‌زیســـت هم نداده که تمامی منابع را شـــناســـایی و تبدیل به اطلس کند و تحویل ســـامانه بدهد. تمامی مناطقی که حتی احتمال آلودگی وجود دارد، شناسایی کردیم و اطلس تهیه کردیم. طی نامه و طبق وظیفه ماده ۵ آیین‌نامه به محیط‌زیســـت اینها را اعلان کردیم، چون تشـــخیص آلایندگی با محیط‌زیســـت هســـت. اگر مناطق مشخص شده مستعد آلایندگی هستند، اعلام کنید. هر ساله این موارد وجود دارد

آیا نقشـه‌ای از مناطق آلوده دارید؟ و قانون ماده ۲۴ معادن چه تأثیری داشته؟

ارگان‌ها بودجه کافی برای شـــناســـایی کامل منابع آب کشـــور نداریم. دولت هم هنوز هم بودجه لازم، برای تعیین حریم و بســـتر رودخانه‌ها، تالاب‌ها، و منابع آب را نداده اســـت. با این حال، به صـــنایع و معادن اجازه داده شـــده که طبق ماده ۲۴ قانون معادن، بدون اســـتعلام از ارگان‌ها پیش بروند. ای کاش این قانون تصویب نمی‌شد. بله، گرفتن مجوز سخت می‌شد، اما لااقل کنترل اولیه وجود داشت. مشاهده می‌شود در کنار چشـمه‌ای که آب شـرب تأمین می‌کند، معدن احداث شـده. ماده ۲۴ می‌گوید اگر به وزارت صمت اطلاع نداده‌اید، مسئول با صـمت نیسـت، و از نظر حقوقی هم درسـت می‌گوید. اما از طرفی، دولت بودجه‌ای به وزارت نیرو یا محیط‌زیســـت نداده تا همه منابع را شناسایی و در اطلس سامانه ملی ثبت کند

موضـــوع مهم دیگری هم هســـت اینکه چند تالاب ادواری در حاشیه دریاچه ارومیه وجود دارد. با وجود خشکسالی شدید، خوشـبختانه NGOها، آب منطقه‌ای و سـازمان‌های مختلف در این زمینه با هم همکاری کردند و با تلاش فعالان محیط‌زیست و وزارت نیرو، شـــرایطی فراهم شـــده کـه پرنـدگـان مهـاجر زمستان‌گذران و تابستان‌گذران همچنان در این منطقه بمانند. آذربایجان غربی، جز اســـتان‌های موفق در احیای تالاب‌ها هسـت. حتی در یکی از تالاب‌ها، یک وت‌لند مصـنوعی محل ورود آب به تالاب با گونه‌های گیاهی بومی درست شـد، تا آبی که از آن عبور می‌کرد وارد تالاب اصـلی می‌شـد و با وجود روند افزایش فســـفات و دیگر آلودگی‌ها، موجب تغذیه گرای تالاب نگردد، با مجموعه این فعالیت‌ها موفق بهبود کیفیت تالاب گردید.

به امید ایرانی بهتر، اکوسیستم بهتر، محیط‌زیست سالم‌تر و منابع آبی پایدارتر.

دکتر اکبری فرد

عضو هیئت علمی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

لطفاً سیمایی از وضعیت منابع آبی و بحث آلودگی در استان کرمان بفرمایید.

استان کرمان به‌عنوان یکی از مناطق با اقلیم خشک می‌باشد که به‌شـدت وابسـته به منابع آب زیرزمینی اسـت. میانگین بارندگی در اســـتان کرمان نزدیک به ۱۳۰ میلی‌متر در ســـال است که نسبت به میانگین بارندگی کشور و همچنین میانگین جهانی، عددی بسیار پایین به شمار می‌آید. همچنین، متوسط تبخیر در این منطقه بیش از ۷۰ درصد بارندگی است. بیش از ۹۷ درصد منابع آبی استان کرمان به آب‌های زیرزمینی وابسته اســـت و ۱۰۰ درصـــد شـــهر کرمان نیز به این منابع و چاه‌های بهره‌برداری حفاری شـده متکی می‌باشـد. در سـال‌های اخیر، وضـــعیت کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی در اســـتان با چالش‌های جدی مواجه شـده اسـت. اسـتان کرمان به‌عنوان بهشـت معادن ایران و خاورمیانه شـناخته می‌شـود، باتوجه‌به داشـــتن نزدیک به ۴۲۰ معدن فعال، به‌ویژه بزرگترین معادنی که در اسـتان داریم معادن مس، آهن، زغال‌سـنگ، تیتانیوم و سـایر فلزات اسـت. این معادن، پسـاب‌هایی تولید می‌کنند و آلودگی‌هـایی را بـه منـابع آبی وارد می‌کننـد. هرچنـد کـه این پســـاب‌ها تصـــفیه می‌شـــوند البته ناکافی اســـت. از جمله مشـکلات عمده در اسـتان کرمان، آلودگی منابع آب زیرزمینی به دلیل وجود فلزات ســـنگین، به‌ویژه آرســـنیک، و همچنین استفاده از مواد شیمیایی در کشاورزی است. کشاورزی در این اســـتان، بـه‌ویژه در شـــمـال و جنوب آن، بـه‌عنوان یکی از زمینه‌های اصـــلی فعالیت حدود ۳۰ تا ۴۰ درصـــد جمعیت اســـتان به شـــمار می‌آید و به‌نوعی معیشـــت بخش زیادی از جمعیت اسـتان به این حوزه وابسـته اسـت. شـمال اسـتان (رفسنجان، انار و سیرجان) در بخش پسته‌کاری فعال هستند و جنوب اســـتان (بم و جیرفت) در بخش مرکبات و خرما به فعالیت کشـاورزی مشـغول می‌باشـند. در بخش کشـاورزی هم که بیشـتر سـموم شـیمیایی به‌صـورت مسـتقیم و غیرمسـتقیم نهایتاً وارد آب‌های زیرزمینی شـــده و باعث آلودگی این منابع آبی ارزشـمند می‌گردد. اسـتان کرمان نزدیک به ۱۰۰ درصـد وابسته به منابع آب زیرزمینی و چاه‌ها است. طبق آمار رسمی که داریم و بر اساس سال ۱۳۹۵ یا قبل از آن می‌باشد نزدیک به ۳۵۰۰۰ حلقه چاه در اســـتان کرمان وجود دارد که حدود ۱۰۰۰۰ الی ۱۲۰۰۰ حلقه چاه غیرمجاز اسـت و پروانه ندارند، آن تعداد حلقه چاه مجاز هم بیش از ۶۰ تا ۷۰ درصـد، بیشـتر از پروانه فعالیت و برداشـت دارند. البته این آمار در سـال‌های اخیر نیز دستخوش تغییرات جزیی بوده است. برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی باعث افت شـدید این منابع

ارزشمند هم از بعد کمی و هم از بعد کیفی شده است. به هر حال غلظت فلزات سنگینی که در منابع آب زیرزمینی وجود دارد با افزایش برداشت و کاهش تراز آب، افزایش پیدا می‌کند. طبق آخرین آمار که مربوط به سال ۱۴۰۰ است، نشان می‌دهد که استان کرمان در صدر جدول برداشت از منابع آب زیرزمینی کشور قرار دارد و میزان برداشت حدود ۵.۷ تا ٦ میلیارد مترمکعب در سال است، درحالی‌که این استان با کسری مخزن مواجه است و این کسری مخزن حدود یک میلیارد مترمکعب در سال می‌باشد. یعنی بیش از حد منابع آب تجدیدپذیر از منابع آب زیرزمینی استفاده می‌کنیم. مورد بعدی اینکه در سطح استان پهناور کرمان، متأسفانه سیستم جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب در بسیاری از شهرها وجود ندارد، حتی در شهرهای بزرگی مانند کرمان، بحث اتصال به سیستم جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب به‌کندی پیش می‌رود و برای مثال سیستم جمع‌آوری فاضلاب در شهر رفسنجان در مرحله طراحی و اجرای اولیه است. در استان کرمان حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد بحث تصفیه فاضلاب را داریم، بقیه فاضلاب‌ها در محدوده شهری، از طریق چاه‌های جذبی و سیستم ثقلی است که وارد زمین می‌شود و در برخی مناطق به آب‌های زیرزمینی می‌رسد. در نهایت می‌توان اذعان نمود که متأسفانه برداشت بی‌رویه، حفر چاه‌های غیرمجاز، افت سطح آب زیرزمینی، و آلودگی ناشی از کود و سموم کشاورزی، فاضلاب‌های خانگی و صنعتی، و فعالیت‌های معدنی باعث شده کرمان به یکی از بحرانی‌ترین استان‌های کشور از نظر کیفیت و کمیت منابع آب تبدیل شده و بسیاری از دشت‌های آن در شمار دشت‌های ممنوعه یا ممنوعه بحرانی قرار گرفته است.

در این شرایط، سؤالی مطرح می‌شود درباره چاه‌های غیرمجاز و میزان برداشت آن‌ها. برخی تحقیقات نشان داده‌اند که آبدهی چاه‌های غیرمجاز نسبت به چاه‌های مجاز کمتر است. آیا شما نیز با چنین اطلاعاتی آشنا هستید؟

کنترل بر چاه‌های غیرمجاز در استان کرمان به طور نامحسوس و چندان شدید نیست، اما به هر حال نظارتی بر این چاه‌ها انجام می‌شود. حفاری این چاه‌ها به‌صورت غیرمجاز صورت می‌گیرد و بهره‌برداری از آن‌ها در خفا انجام می‌شود. برخی تحقیقات نشان داده‌اند که متوسط میزان برداشت آب از چاه‌های غیرمجاز نسبت به چاه‌های مجاز کمتر است، زیرا اغلب در مناطق کم‌آب یا با طراحی غیراصولی حفر می‌شوند. بااین‌حال، به دلیل تعداد بالای آن‌ها، مجموع برداشتشان اثر چشمگیری بر بیلان منفی سفره‌ها دارد؛ بنابراین حتی اگر تک‌تک این چاه‌ها کم‌آبده باشند، در مجموع نقش بزرگی در افت سطح ایستابی دارند و این موضوع به‌عنوان یک معضل در سطح کشور شناخته می‌شود. بر اساس آخرین آمار، در کشور بیش از یک میلیون حلقه چاه وجود دارد که تقریباً ۴۰ درصد آن‌ها غیرمجاز هستند. این اعداد در زمینه تعداد است، در زمینه برداشت به این صورت نیست و درصد آن خیلی پایینتر است نسبت به تعداد. همان چاه‌های مجاز هم متأسفانه، تقریباً ۳۵ درصد بر اساس پروانه برداشت آب دارند، درحالی‌که بیش از ۶۰ درصد از آن‌ها به طور غیرمجاز و بین ۲ تا ۱۰ برابر بیشتر از پروانه مجازشان، از منابع آبی برداشت می‌کنند. همان‌طور که خدمت شما عرض کردم استان کرمان با اقلیم گرم و خشک کویری، نزدیک به ۳۵ هزار حلقه چاه دارد که حدود ۱۰ الی ۱۲ هزار حلقه چاه آن غیرمجاز است و نتیجه این وضعیت در استان کرمان، قرار گرفتن در صدر جدول برداشت از منابع آب زیرزمینی است. یکی دیگر از مشکلات ناشی از برداشت بیش از اندازه از منابع آب زیرزمینی، علاوه بر آلودگی و غلظت منابع آب زیرزمینی، پدیده فرونشست زمین است. نرخ فرونشست در ایران تقریباً ۱۵ برابر حد بحرانی اعلام شده است. در استان کرمان، مناطقی مانند دشت رفسنجان وجود دارند که نرخ فرونشست آن‌ها حتی تا ۷۵ برابر نرخ بحرانی فرونشست می‌رسد. طبق توصیه‌نامه اتحادیه اروپا، نرخ بحرانی فرونشست زمین، ٤ میلی‌متر در سال است. یعنی اگر منطقه‌ای ٤ میلی‌متر در سال فرونشست داشته باشد وارد فاز بحرانی می‌گردد. ما متأسفانه در اکثر مناطق استان کرمان وضعیت فوق‌بحرانی را داریم به‌عنوان‌مثال در دشت رفسنجان سالی ۳۰ سانتی‌متر فرونشست زمین داریم. در دشت کرمان ۲۰ تا ۲۵ سانتی‌متر فرونشست زمین داریم که چالش‌های جدی‌تری در آینده به وجود می‌آورد به‌عنوان‌مثال تخریب زیرساخت‌ها مانند ساختمان‌ها، جاده‌ها و شبکه‌های آب و فاضلاب، از بین رفتن قابلیت آبخوان‌ها و کاهش ظرفیت آن‌ها، نابودی خاک‌های کشاورزی و افزایش خطر سیل و خسارات اقتصادی علاوه بر مباحث کیفی و آلودگی منابع آب زیرزمینی است که دچارش می‌شویم.

فرمودید در شهر کرمان و دیگر شهرهای بزرگ استان، سیستم جمع‌آوری فاضلاب به طور کامل وجود ندارد یا در مرحله طراحی است، مانند شهر رفسنجان که در حال حاضر در حال طراحی سیستم فاضلاب است. در غیاب این سیستم‌ها، از روش‌های قدیمی مانند چاه‌های جذبی استفاده می‌شود؟

بله، در شهرهای بزرگ استان مانند رفسنجان و بم، شبکه فاضلاب هنوز تکمیل نشده است. در غیاب سیستم مدرن، چاه‌های جذبی و سیستم ثقلی رایج‌ترین روش دفع فاضلاب هستند. این روش، هرچند کم‌هزینه است، اما منبع اصلی ورود نیترات، فسفات و بار میکروبی به آبخوان‌ها است و در بلندمدت سلامت آب زیرزمینی را تهدید می‌کند. بسیاری از مناطق استان کرمان که با مشکلات آلودگی مواجه هستند، به‌ویژه در نزدیکی معادن و قسمت‌های انتهایی دشت‌ها که تحت تأثیر فعالیت‌های کشاورزی قرار دارند و محدوده‌های شهری مورد دیگری است که با مشکلات آلودگی مواجه می‌باشند. این آلودگی‌ها عمدتاً به دلیل عدم وجود سیستم جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب مناسب در شهرها است. حتی در مرکز استان کرمان هنوز به طور کامل سیستم‌های فاضلاب وجود ندارد و بخش قابل توجهی از مرکز استان هنوز به شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب متصل نشده است. البته

اقداماتی در حال انجام است؛ ولی همچنان روند خیلی کندی دارد.

منابع آب مورد استفاده در استان کرمان تقریباً به طور کامل به آب‌های زیرزمینی وابسته است. برداشت آب از چاه‌ها تحت تأثیر چاه‌های جذبی قرار دارد؟

درست است که چاه‌های جذبی با نفوذ پساب خانگی و تجمیع آلاینده‌ها، به‌ویژه در مناطق با سطح ایستابی بالا، کیفیت آب را به‌شدت کاهش می‌دهند و در واقع ارتباط غیرمستقیم بین برداشت آب از چاه‌ها و تغذیه آلوده توسط چاه‌های جذبی وجود دارد؛ اما خوشبختانه در استان کرمان چاه‌های جذبی آن‌چنان منابع آب شرب را تحت تأثیر قرار نمی‌دهند و معمولاً چاه‌هایی که برای شرب است، خارج از محدوده‌های شهری قرار دارند، برای مثال برای شرب شهر کرمان، بیش از ۱۰۰ حلقه چاه در دشت‌های اطراف کرمان، دشت غزال، دشت حسین‌آباد و جوپار که به فاصله تقریباً ۲۵ تا ٦٠ کیلومتری از شهر قرار دارند و آب از این چاه‌ها از طریق لوله به کرمان انتقال پیدا می‌کند و در بحث تصفیه هم متأسفانه، تصفیه‌خانه‌های موجود تنها به کلرزنی محدود می‌شوند و توانایی تصفیه کامل آب را ندارند. مشکل عمده‌ای که آب شرب و منابع آب زیرزمینی استان کرمان دارند که البته بخشی از آن طبیعی است، فلزات سنگین و آرسنیک است. بخشی از این آلودگی‌ها که به طور طبیعی و به‌ویژه ناشی از فعالیت‌های زمین گرمایی (ژئوترمال) و ساختار زمین‌شناسی آتشفشانی - ماگمایی بخش‌هایی از استان است و از چشمه‌های آب گرم و سنگ‌های آذرین اطراف به منابع آب سطحی و زیرزمینی نفوذ می‌کند. به‌عنوانمثال، چشمه‌های آب گرم در مناطق لاله‌زار که تقریباً ۱۰۰ کیلومتری مرکز استان هستند، غلظت آرسنیک بیش از ۳۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر؛ یعنی چند هزار برابر حد مجاز است. این اعداد و آمار به طور مستند از گزارش‌ها و مقالات علمی مختلف استخراج شده است. در استان کرمان، فلزات سنگین که داریم فلزاتی مثل سرب، مس، روی، آرسنیک ولی بیشتر آرسنیک مدنظر است. البته منشأ غالب این آلودگی‌ها، اینکه معادن بزرگی در استان داریم و ساختار زمین‌شناسی آتشفشانی استان کرمان، و به‌صورت طبیعی در بحث آلودگی آب‌های زیرزمینی و واکنش‌های شیمیایی که بین آب و سنگ‌های زمین‌شناسی اتفاق میفتد وارد آبخوان‌ها شدند.

از نظر کیفیت، منابع آب شرب در این منطقه کیفیت مناسبی دارند؟

سازمان‌های مربوطه که می‌گویند کیفیت مناسبی دارند؛ ولی طبق آمار، اطلاعات و بررسی‌هایی که از گزارش‌های مختلف به‌دست آمده، البته که ما یک معضلی هم داریم عدم وجود یا حداقل دسترسی به گزارش‌ها، پایش‌ها و ارزیابی‌های دوره‌ای منظم است؛ ولی طبق برآوردهایی که انجام شده، و طبق شواهدی که می‌بینیم و گزارش‌های محرمانه‌ای که وجود دارد، در برخی مناطق خصوصاً مناطق روستایی متأسفانه مشکل داریم. اما در شهر کرمان و مراکز بزرگ، کیفیت آب شرب به طور نسبی کنترل شده است. در بسیاری از روستاها و مناطق کویری، شوری بالا، نیترات بیش از حد مجاز و فلزات سنگین (آرسنیک، کروم، سرب) گزارش شده است. این آلودگی‌ها عمدتاً حاصل فعالیت کشاورزی و معدنی در سطح استان است. در بحث شوری منابع آب زیرزمینی استان کرمان، تقریباً ۲۲ تا ۲۳ درصد منابع آب شیرین است و تقریباً ۷۷ تا ۷۸ درصد منابع آب شوری بسیار بالایی دارند. متأسفانه، در مناطق روستایی و ضعیف‌تر، سیستم جمع‌آوری فاضلاب به طور کامل وجود ندارد و بحث نیترات و کودها و سمومی که در کشاورزی استفاده می‌شود در منابع آب شرب آن‌ها هم مشاهده شده است. بیماری‌ها و عواقب و تبعات بعدی زیادی دارد. آمار بیماری‌ها در استان کرمان از جمله بیماری‌های تنفسی، گوارشی و سرطان که به طور قابل توجهی در حال افزایش هستند. یکی از دلایل عمده این مشکلات، بحث فلزات سنگین و نیترات در منابع آبی که بیشتر در جمعیت روستایی است. هنوز برخی از مناطق استان کرمان حتی سیستم آب شرب خوبی ندارند و از آب چاه‌ها استفاده می‌نند و شبکه آبرسانی هنوز در خیلی از مناطق روستایی وجود ندارد. البته کارهای خوبی در سال‌های اخیر توسط قرارگاه خاتم الانبیاء، و ارگان‌های دیگر انجام شده ولی همچنان خیلی از جمعیت استان حتی دسترسی به آب شرب سالم را ندارند چه برسد به اینکه بخواهند سیستم جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب را داشته باشند.

یعنی هنوز مناطقی از استان کرمان هستند که با تانکر برایشان آب می‌برند؟

بله، هنوز هم در بخش‌هایی از استان (به‌ویژه در شرق استان مثل ریگان، فهرج و نرماشیر) به دلیل خشکی چاه‌ها یا آلودگی منابع محلی، آبرسانی با تانکر انجام می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده فشار شدید بر منابع آب در استان است. باتوجه‌به اینکه استان عمدتاً وابسته به منابع آب زیرزمینی است حتی در مرکز استان در تابستان‌ها، کمبود داریم. نیاز آبی در شهر کرمان در تابستان تقریباً ۳۵۰۰ لیتر بر ثانیه است که ظرفیت تأمین شبکه کمی بیشتر از ۲۰۰۰ لیتر بر ثانیه است. یعنی در گرمای تابستان حدود ۱۵۰۰ لیتر بر ثانیه کمبود داریم که به‌صورت سیار و با تانکر آبرسانی توسط سازمان‌های مربوطه انجام می‌شود.

اثرات تغییرات اقلیمی بر منابع آبی و کیفیت آب، به نظر شما نقش تغییر اقلیم روی کیفیت آب زیاد بوده است یا خیر؟

به اعتقاد بنده تغییرات اقلیم در سطح کشور بر روی منابع آبی تأثیر داشته است و با خشکسالی‌های مکرر، کاهش بارندگی و افزایش دما که باعث کاهش تغذیه آبخوان‌ها و به‌تبع آن افزایش آلایندگی و غلظت آلاینده‌ها مانند شوری، نیترات و فلزات در آبخوان‌ها می‌گردد. طبق آمار تا قبل از سال ۲۰۰۸ سالانه حدود ۸ سانتی متر از منابع آب زیرزمینی به طور میانگین در سطح کشور از دست میرفت که این عدد در سال‌های اخیر با سوء مدیریت و البته پدیده های طبیعی مانند تغییرات اقلیمی شامل کاهش بارندگی، افزایش دما و

تبخیر و همچنین خشک شدن منابع آب سطحی که باعث افزایش فشار بر منابع آب زیرزمینی می‌شود، به متوسط سالی ۲۸ سانتی متر افت تراز آب های زیرزمینی رسیده است که نهایتا افت کیفی و آلودگی منابع آب زیرزمینی را تشدید می‌نماید. همچنین افزایش تبخیر که ناشی از افزایش دما است باعث افزایش شوری می‌شود، همچنین خشک شدن منابع آب سطحی باعث می‌شود به منابع آب زیرزمینی و چاه‌ها روی آورده شود که منجر به افزایش فشار بر منابع آب زیرزمینی و باعث افت کمی و کیفی آب می‌شود. در استان کرمان هم بحث تغییر اقلیم کم نبوده است برای مثال ما در دشت‌های رفسنجان، زرند، کهنوج و جیرفت از این ناحیه آسیب جدی دیدیم که پدیده تغییرات اقلیم و تاثیر آن روی آبخوان‌ها پیامدهایی چون افزایش شوری و نیترات و این قبیل آلاینده‌ها در منابع آب زیرزمینی را به‌دنبال داشته است.

سؤالی که دارم این است که به نظر شما، توسعه صنعتی استان کرمان چه سهمی در وضعیت آلودگی منابع آب داشته است؟ آیا قوانین محیط‌زیستی موجود توانسته‌اند نقش کافی و بازدارنده داشته باشند؟ و نحوه اجرایش در استان کرمان به چه صورت بوده است؟

استان کرمان به‌عنوان قطب معدنی کشور، با داشتن حدود ۴۲۰ معدن فعال که بیش از نیمی از ارزش معادن کشور را در خود جای داده است، به عنوان بهشت معادن ایران و خاورمیانه هم شهرت دارد. درست است که معادن بزرگ در بحث اقتصادی در سطح کشور ارزشمند هستند ولی همین صنایع و معادن ارزشمند، مثل صنایع بزرگ مس در رفسنجان و شهربابک، معادن فلزات مثل سنگ آهن در سیرجان وجود دارد، به هر حال پساب‌های صنعتی تولید می‌کنند. متاسفانه صنایع معدنی سهم بزرگی در ورود فلزات سنگین و پساب‌های صنعتی به منابع آب دارند. پساب‌های صنعتی اغلب حاوی فلزات سنگین مانند مس، سرب، روی، آرسنیک و... هستند و متاسفانه اغلب واحدهای صنعتی کوچک فاقد سیستم تصفیه پساب مناسب هستند، و صنایع بزرگ هم گاها تصفیه آن‌ها خیلی کامل نیست و همواره نگرانی بابت نشت تدریجی آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی وجود دارد. در مطالعاتی که انجام شده است بررسی شد در محدوده معادن و صنایع استان، آلودگی به فلزات سنگین و آلودگی شیمیایی بالایی وجود داشت. البته که موقعیت طبیعی کرمان بر روی کمربند ماگماتیسم-سنوزوئیک، باعث شده که به صورت طبیعی نیز آرسنیک از سنگ‌های آذرین و چشمه‌های آب گرم به منابع آب سطحی و زیرزمینی نفوذ نماید و منشا غالب آلودگی آرسنیک و فلزات سنگین ناشی از فعالیت‌های زمین گرمایی و ساختار زمین‌شناسی منطقه باشد اما نشت پساب‌های صنعتی بدون تصفیه یا با تصفیه ناکافی به محیط‌زیست و منابع آب زیرزمینی در کنار فقدان سیستم پایش و کنترل دقیق پساب صنایع بزرگ نیز بر وخامت اوضاع افزوده است.

در مورد قوانین محیط‌زیستی، اگرچه اخیراً استانداردهایی برای کنترل آلودگی تدوین شده است و قوانین محیط‌زیستی؛ مانند الزام صنایع به احداث تصفیه‌خانه وجود دارد، اما به نظر می‌رسد که این استانداردها به‌خاطر بعد سیاسی به‌خوبی اجرا نمی‌شوند یا اجرای آن‌ها ناقص است و ارزیابی‌های مستمر و نظارت کافی در این زمینه انجام نمی‌گیرد و متأسفانه فشارهای اقتصادی و اشتغال‌زایی مانع اجرای سخت‌گیرانه و اعمال کنترل‌های بازدارنده به صنایع می‌شود. در نتیجه، سهم توسعه صنعتی در آلودگی بالاست و قوانین عملاً بازدارندگی محدودی دارند.

احداث معادن و تأثیرشان روی منابع آب زیرزمینی، مانند معدن آهک ماهان که اخیراً در خبرها مطرح شده، باعث اعتراض فعالان محیط‌زیست شده است. اگر امکانش هست درباره وضعیت احداث این معدن توضیح بفرمایید و به‌طورکلی شرایط فعالان محیط‌زیستی و قدرت آن‌ها در استان کرمان برای مبارزه با این وضعیت آلودگی به چه صورت است؟

باتوجه‌به موقعیت احداث این معدن که در ماهان و در نزدیکی دشت‌های حسین‌آباد و جوپار که منابع اصلی آب شرب مرکز استان را تأمین می‌نمایند، قرار دارد و همچنین به دلیل نزدیکی به زیستگاه‌های طبیعی، بیم اینکه پساب آن آبخوان‌های منطقه و نهایتاً منابع آب شرب شهر کرمان را آلوده کند همواره وجود دارد هرچند معدن آهک جزو معادن کوچک استان است، ما معادن بزرگتر با تولید پسماند و فاضلاب خطرناکتر و بیشتری در سطح استان داریم که الان فعال هستند و حتی برخی هم فاقد سیستم تصفیه و جمع‌آوری فاضلاب و همچنین فاقد سیستم پایش و کنترل دقیق پساب می‌باشند. فعالان محیط‌زیستی هم اقداماتی انجام می‌دهند؛ اما متأسفانه بازوی اجرایی و قدرت سیاسی کافی برای تأثیرگذاری ندارند و اتفاقات خاصی رخ نمی‌دهد. یکی از مشکلات اصلی، عدم هماهنگی بین سازمان‌ها است، در کرمان هنوز همکاری بین‌بخشی ساختاریافته و منسجم وجود ندارد، اما تجربه‌های موفقی در قالب کارگروه‌های منابع آب و محیط‌زیست استانی شکل گرفته است. تقویت این همکاری‌ها نیازمند شفافیت داده‌ها، بودجه مشترک و قوانین الزام‌آور است. به اعتقاد بنده تعامل و هماهنگی بین وزارت نیرو، سازمان حفاظت محیط‌زیست، جهاد کشاورزی، صنایع و جوامع محلی برای تدوین و اجرای سیاست‌های مشترک و پایش مستمر ضروری است. همچنین قدرت اجرایی فعالان در سازمان‌های مختلف در مسائل سیاسی محدود است. NGOها در استان در بحث آلودگی آن‌چنان فعال نیستند و بیشتر در بحث پسماند و فضای سبز فعال می‌باشند. حتی سازمان‌های دولتی که مکلف به اجرای قوانین بازدارنده هستند خیلی موفق نبودند که منجر به این شده این تعداد زیاد چاه غیرمجاز در استان داشته باشیم. به اعتقاد بنده در استان کرمان باتوجه‌به عدم دسترسی به داده‌ها و محدودیت‌های قانونی که برای فعالیت وجود دارد فعالان خیلی در این زمینه تأثیرگذار نبودند.

در گفت‌وگویی که با یکی از متخصصین استان لرستان داشتیم، ایشان اشاره کردند مرکز استان لرستان با وجود اینکه

شهر صنعتی نیست و از این نظر، آلودگی‌های صنعتی محدود و ناچیز اســت. درحالی‌که کرمان با ۴۲۰ معدن فعال، به دلیل شرایط زمین‌شناسی، با آلودگی‌های زیادی مواجه است که به منابع آب زیرزمینی منتقل می‌شود و این موضوع مشکلات جدی برای دسترسی مردم به آب سالم ایجاد می‌کند. سؤالی که دارم این اســت که آیا واقعاً صــنایع باید پروتکل‌های محیط‌زیســتی را هنگام تأســیس معادن رعایت کنند؟ آیا مشکل ما در بروز این آلودگی‌ها به قوانین مربوط می‌شود؟ آیا قوانین موجود کافی نیســتند، یا اینکه به‌درســتی اجرا نمی‌شوند؟ به نظر شما کدام جنبه از این مسائل باعث افزایش روزافزون آلودگی‌ها شده است؟ درحالی‌که در کشورهای شمال آمریکا و اروپا پیشــرفت‌های قابل توجهی در کنترل آلودگی‌ها صورت گرفته است، آیا ما با مشکل قانونی مواجه هستیم یا اینکه مســئله دیگری در کار اســت که ما را به این مرحله رسانده است؟

به‌طورکلی مدیریت آلودگی آب باتوجه‌به منطقه و نوع آلاینده‌ها، نیازمند رویکردی مختص به آن منطقه اســت به‌عنوان‌مثال در مناطق خشکی مثل استان کرمان که منابع آب محدود و ســفره‌های زیرزمینی آســیب‌پذیر هســتند، رویکردی جامع با تأکید بر مدیریت مصــرف آب، اســتفاده از فناوری‌های بازچرخانی آب در صنایع و فضای سبز و آموزش کشاورزان برای کاهش مصرف کود و آب لازم است. باتوجه‌به اینکه استان‌های مرکزی مانند کرمان، یزد و اصفهان به دلیل تمرکز بالای فعالیت‌های صنعتی و معدنی، از آلوده‌ترین مناطق کشــور از نظر کیفیت آب زیرزمینی محســوب می‌شــوند و در مناطقی چون رفسنجان، شهربابک و زرند در استان کرمان، کیفیت آب بســیاری از چاه‌ها از نظر EC، نیترات، فلزات سنگین و سختی کل از حد مجاز عبور کرده و حتی در اطراف صنایع و معادنی مانند مس و فولاد، آلودگی سولفات و TDS بالا گزارش شــده اســت، به نظر من، قوانین موجود حداقل در این مناطق نیازمند به‌روزرســانی اســت. بســیاری از آلاینده‌ها هنوز استانداردهای مشخصی در کشور ندارند. بااین‌حال، به نظر می‌رســد که نظارت و ارزیابی اجرای این قوانین ضــعیف اســت و مشــکل عمده اولویت دادن به توســعه اقتصــادی بر ملاحظات محیط‌زیستی است. در کشورهای پیشرفته، نظارت ســخت‌گیرانه و جریمه‌های ســنگین باعث رعایت پروتکل‌ها می‌شــود، اما در ایران نبود ضــمانت اجرایی و ضــعف نظارت، یکی از عوامل بروز آلودگی‌ها است. نهادهای نظارتی که باید بر اجرای قوانین نظارت داشته باشند، به طور مؤثر عمل نمی‌کنند و این موضوع باعث افزایش آلودگی‌ها می‌شود. مخصوصاً در استان کرمان که بحث فلزات سنگین و بحث صنایع و معادن را داریم و باتوجه‌به بحث اقتصادی و سیاسی که صنایع برای کشــور دارند، از قدرت بیشــتری برخوردارند و ممکن اســت بر روند نظارت تأثیر بگذارند. البته تا حدودی نظارت شــده ولی موفقیت‌آمیز نبوده اســت. به نظر من با برنامه‌ریزی و داشــتن چشــم‌انداز و هدف می‌توان وضــعیت موجود را به نحوی مدیریت کرد که هم ارزش اقتصــادی صــنایع و معادن حفظ گردد و هم آلودگی منابع ارزشــمند آب‌های زیرزمینی را کنترل نمود.

در بحث آلودگی منابع آبی در مشــهد، رودخانه کشــف‌رود که رودخانه فصلی است و با وجود شبکه جمع‌آوری فاضلاب در مشهد، تصفیه‌خانه‌ها به طور کامل نمی‌توانند تصفیه کنند و بخشــی از این فاضــلاب داخل این رودخانه فصــلی ریخته می‌شــود و با وجود این فاضــلاب خام که در رودخانه ریخته می‌شود همچنان از آب این رودخانه برای کشت صیفی‌جات اســتفاده می‌کنند. مردم تقریباً مطلع هســتند که در بحث کشــف رود آلودگی وجود دارد، آیا اطلاعات عمومی مردم در استان کرمان در مورد آلودگی منابع آبی در کرمان کافی است؟ یا نسبت به این مسائل مطلع هستند؟

متأســفانه آگاهی مردم کرمان درباره آلودگی منابع آب پایین اســت. برخلاف مشــهد و کشــف‌رود که مردم به طور نســبی حســاس شــده‌اند، در کرمان آگاهی عمومی اندک اســت و بســیاری از شــهروندان از خطر نیترات بالا یا فلزات ســنگین اطلاعی ندارند. این ناآگاهی باعث کاهش مطالبه‌گری اجتماعی شــده اســت. در اســتان کرمان به این صــورت نیســت که رودخانه‌ای باشــد و پســابی وارد آن گردد که قابل رویت برای افراد باشــد، در شــمال اســتان که معادن بیشــتری وجود دارد رودخانه دائمی نیســت که آلاینده‌ها وارد آن شــود، بیشــتر در محدوده‌ای آلاینده‌ها دفن می‌گردد، به همین دلیل که قابل رویت برای افراد نیســت اطلاعات کافی در خصــوص آلودگی معــادن بعضــاً وجود نــدارنــد؛ ولی در زمینــه آلودگی در محدوده‌های شهری مثل سیستم فاضلاب که مشخص است و همه می‌بینند. در شــهر کرمان در برخی از مناطق فاضــلاب حتی از سطح زمین بالاتر می‌آید. در سطح شهر دیده می‌شود که در موارد زیادی ماشین‌های تخلیه فاضلاب، چاه‌ها را تخلیه می‌کنند. دلیل این است که ظرفیت کافی وجود ندارد. تا زمانی که ســیســتم فاضــلاب برای کل مناطق شــهری اجرا نشــود، حداقل برای مرکز اســتان که مرکز پهناورترین اســتان کشــور می‌باشد و سیستم تصفیه فاضلاب نداریم این چالش‌ها وجود دارد و آلودگی آبخوان‌ها در مناطق شــهری و کشــاورزی و محدوده معادن بزرگ را شاهد خواهیم بود.

آیا نقشه جامع پهنه‌بندی آلودگی در استان کرمان وجود دارد؟ به‌عنوان یک فرد دانشــگاهی، آیا شــما به داده‌های مربوط به آلودگی به‌راحتی دسترسی دارید؟ آیا داده‌های کافی برای انجام پژوهش‌های علمی در اختیار شــما و همکاران شــما قرار می‌گیرد؟

متأسفانه یکی از چالش‌ها و مشکلات اصلی موجود در کشور همین مورد است که عمدتاً سطح فعالیت و ارزیابی‌ها در حوزه آب به بحث کمی محدود اســت و کمتر به مباحث کیفی و آلودگی منــابع آب پرداختــه می‌شــود. همچنین در بحث اطلاعات کیفی منابع آب که به ارگان‌ها مراجعه می‌شــود برای بحث در اختیار گذاشــتن دیتا و اطلاعات، متأســفانه به دلیل محدودیت‌های امنیتی عملاً در اختیار قرار نمی‌گیرد. در زمینه پایش منابع آب و گزارش‌هایی که ســازمان‌های ذی‌ربط مثل

شرکت‌های آب منطقه‌ای و سازمان‌های زیرمجموعه وزارت نیرو که گزارش‌های دوره‌ای مثلاً برای بیلان آب را که دیدم معمولاً این گزارش‌ها هر پنج سال یک‌بار به‌روزرسانی می‌شوند. در استان کرمان نیز طرح پایش منابع آب زیرزمینی توسط شرکت آب منطقه‌ای کرمان انجام می‌شود؛ اما عمدتاً روی بحث شوری و افت سطح آب تمرکز دارد و معمولاً همه آلاینده‌ها و پارامترهای کیفی آب را شامل نمی‌شود. درضمن همان پایش‌ها و ارزیابی‌ها نیز از جنبه جامعیت و به‌روزرسانی محدود است و آخرین ارزیابی‌های نسبتاً کامل مربوط به سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ است، حتی در برخی از دشت‌ها آخرین گزارش‌ها مربوط به سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ است. در واقع هیچ نقشه جامع و گزارش جامع یا حتی مختصری هم در زمینه آلودگی منابع آب وجود ندارد. البته تحقیقات محدود دانشگاهی انجام شده است که باتوجه‌به همان محدودیت‌های سیاسی و امنیتی که عرض کردم خیلی محدود بوده است و اجازه انتشار خیلی از موارد داده نشده است. در سطح کشور و در سطح وزارت نیرو متأسفانه این مشکل وجود دارد که پایش‌ها، گزارش‌ها و برنامه جامعی که دارند بیشتر مباحث کمی مانند بیلان آب، میزان افت و تراز آب زیرزمینی و از این قبیل موارد می‌باشد. کمتر روی بحث آلودگی و آلاینده‌هایی که دچارش هستیم کار شده و گزارش‌ها موجود است. در مواردی هم داده‌ها دارای ایراد است یا دستکاری شده‌اند و سیستم‌های نظارتی مؤثری برای جمع‌آوری اطلاعات وجود ندارد. برای مثال در استان کرمان برای داده‌های مربوط به شوری، چند سالی است که اندازه‌گیری‌های مربوط به آن به‌درستی انجام نشده و در این زمینه نواقصی موجود است. در بحث منابع آب زیرزمینی هم در برخی مناطق داده‌ها با مشکلات جدی مواجه هستند و گاهی دچار خطا بوده و قابل‌استناد نمی‌باشند. این محدودیت‌ها مانعی جدی برای پژوهش علمی در سطح کشور است.

باتوجه‌به پایش مسائل کیفی که اطلاعات در اختیار قرار داده نمی‌شود، برای رسیدن به شرایطی نسبتا مساعد و مناسب، به نظر می‌رسد که فهرست راهکارها می‌تواند شامل چه مواردی باشد؟

به نظر من دانشگاه‌ها، نهادهای غیردولتی و نهادهای علمی باید به قضیه ورود کنند، وقتی فعالیت‌های ما پشتوانه علمی داشته باشند می‌توانیم از آنها دفاع کنیم، مسائلی مثل معضلات محیط‌زیستی، آلودگی‌های آب، ناترازی انرژی که درگیرش هستیم و این مشکلات که اساساً باعث می‌شود ما نیل به توسعه پایدار نداشته باشیم، جز از مسیر علم و با همکاری دانشگاه‌ها حل نمی‌شود. به اعتقاد بنده لازم است که به علم بازگردیم و نظام حکمرانی در سطح کشور و مناطق باید به سمتی حرکت کند که مباحث علمی و محیط‌زیستی در تصمیم‌گیری‌ها لحاظ شوند نه مسائل سیاسی و قدرت. زمانی که ما از ظرفیت‌های علمی استفاده کنیم، برای مثال در استان کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان دانشگاه‌های بزرگی هستند و ظرفیت‌های زیادی دارند، افراد توانمندی دارند که در این زمینه حداقل می‌توانند به‌عنوان مشاور در ارگان‌های مختلف ورود کنند. جمع‌آوری دیتاها، اطلاعات، و در همه ارکان یک استان یا کشور در موارد مختلف اگر قشر علمی و دانشگاهی ورود کند و نقشه راه طراحی کند و نظارت کند بر اجرای آن‌ها ما می‌توانیم موفق‌تر باشیم. می‌توان روش‌های کم‌هزینه‌تر ارائه داد. با بومی‌سازی کردن یکسری تجهیزات می‌توان موفق‌تر باشیم. حداقل در یک افق زمانی ده‌ساله باید تلاش شود تا توسعه پایدار به‌گونه‌ای پیش برود که جنبه‌های محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی به طور هم‌زمان مورد توجه قرار گیرند. در خصوص ارائه راهکارهای مناسب در بحث کیفی منابع آب استان کرمان به اعتقاد بنده می‌توان به‌عنوان‌مثال با تکمیل و توسعه شبکه فاضلاب شهری و روستایی، بستن یا کنترل جدی چاه‌های غیرمجاز، پایش مستمر کیفی منابع آب و انتشار آزاد اطلاعات و داده‌ها، سختگیری بر صنایع و معادن در احداث و بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌های مناسب، تغییر الگوی کشت و افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی و استفاده از فناوری‌های تصفیه آب کوچک‌مقیاس برای روستاها، گام‌های مؤثری در رسیدن به شرایطی نسبتاً مساعد و مناسب برداشت.

در مورد آلودگی، وقتی مردم با عوارض آلودگی آشنا نیستند و نمی‌دانند که آبی که استفاده می‌کنند چه عوارضی ممکن است در آینده برای آن‌ها داشته باشد، این مسئله می‌تواند به مشکلات جدی‌تری منجر شود. عوارض ناشی از آلودگی معمولاً آنی نیستند و ممکن است سال‌ها طول بکشد تا اثرات آن‌ها نمایان شود، مانند بروز بیماری‌هایی نظیر سرطان. به همین دلیل، وقتی اثرات آلودگی به طور فوری مشخص نشود، مردم به‌راحتی نمی‌توانند درک کنند که این مشکلات چه تبعاتی دارند. از این دیدگاه در مورد نقش آگاه‌سازی مردم بفرمایید؟

متأسفانه آلودگی منابع آب در ایران به شیوع طیف گسترده‌ای از بیماری‌های عفونی، انگلی، گوارشی و حتی سرطان‌ها منجر شده است. همچنین از آنجا که آثار آلودگی آب بلندمدت است، مردم به طور مستقیم اثرات را در کوتاه‌مدت احساس نمی‌کنند. این مسئله باعث بی‌توجهی عمومی می‌شود؛ بنابراین باید از طریق آموزش رسانه‌ای، مدارس و کمپین‌های عمومی، مردم را نسبت به اثرات خطرناک آلودگی آگاه کرد. آگاهی اجتماعی می‌تواند فشار مثبتی برای اجرای قوانین و اصلاح رفتار مصرفی ایجاد کند. در برخی از مناطق شهری و روستایی استان کرمان سطوح نیترات در آب شرب تا چندبرابر بالاتر از حد مجاز رسیده و موارد از مشکلات گوارشی گزارش شده‌اند. همچنین انواع سرطان‌های مرتبط با آرسنیک و فلزات سنگین، بیماری‌های گوارشی و انگلی در مناطق فاقد سیستم تصفیه فاضلاب، و بیماری‌های پوستی و تنفسی نیز در سطح استان رو به افزایش است. به اعتقاد بنده، قطعاً تا زمانی که مردم وارد نشوند، آگاه نشوند و نقشه راه به آن‌ها داده نشود، ما به جایی نخواهیم رسید و موفق نخواهیم بود. به‌عنوان‌مثال،

۳۰ تا ۴۰ درصد جمعیت استان کرمان در بخش کشاورزی فعالیت می‌کنند. حدود یک ماه پیش، گزارشی منتشر شد مبنی بر اینکه هزاران تن پیاز در جنوب استان کرمان در دمای بالای ۴۵ درجه رها شده بود. کشاورزان زحمت کشیده بودند و پیازها را برداشت کرده بودند، اما متقاضی وجود نداشت یا از تقاضایی که موجود بود، بسیار بیشتر پیاز کاشته شده بود. این مشکل تا زمانی که ارگان‌ها و ادارات هماهنگ نباشند و نقشه الگوی کشت برای کشاورزان و مردم ارائه نشود و کنار مردم نباشند این مشکلات ادامه خواهد داشت. در بحث کشاورزی که الان مطرح شد، استفاده بیش از اندازه از کودها و سموم کشاورزی، در اخبار هم مشاهده می‌شود که خیلی اوقات محصولات کشاورزی ما برگشت خورده‌اند. دلیل این امر چیست؟ دلیلش این است که کشاورزان، به‌ویژه در شمال استان کرمان که اکثرا پسته می‌کارند، زحمات زیادی می‌کشند، اما درختان پسته بعد از ۲۰ یا ۳۰ سال که به ثمردهی اصلی می‌رسند و برای کشاورز مثل فرزندش است وقتی این زحمات از بین می‌روند و توسط حشرات مختلف و به شیوه‌های مختلف به این درختان آسیب می‌رسد، کشاورز روی می‌آورد به کودها و سموم مختلف، وقتی ارگان‌هایی مانند جهاد کشاورزی که متولیان این کار هستند، از مردم حمایت نمی‌کنند و آن‌ها را راهنمایی نمی‌کنند، مشکلات بیشتری به وجود می‌آید. اکثر کشاورزان افرادی هستند که تحصیلات عالی ندارند و اطلاعات علمی کافی ندارند، بلکه بیشتر به‌صورت تجربی اطلاعات دارند و در مورد بسیاری از مسائل، مانند آلودگی‌ها و اثرات آن‌ها بر محصولات، آگاهی ندارند که این کودها و سمومی که به محصولاتشان می‌دهند این‌ها وارد آبخوان می‌شود و این آلودگی‌ها وارد آب می‌گردد و در محصولات نمایان می‌شود و به همین دلیل محصولات برگشت می‌خورند. وقتی حمایت نمی‌شود و به مردم آگاهی داده نمی‌شود، مشکلاتی مانند ناپایداری در کشاورزی و آلودگی آب‌های زیرزمینی به وجود می‌آید. حمایت‌های مالی و اقتصادی نمی‌شود، باتوجه‌به اینکه حدود ۴۰ درصد جمعیت استان کرمان در حوزه کشاورزی فعال هستند، اگر این افراد حمایت نشوند و آگاهی‌رسانی به آن‌ها انجام نشود، این مشکلات ادامه خواهد داشت و ممکن است در آینده حتی بیشتر از اینها گریبان‌گیر ما شوند. در استان کرمان که به‌عنوان بهشت معادن کشور شناخته می‌شود و نزدیک به ۲۰ درصد کشاورزی کشور را تأمین می‌کند، متأسفانه به این مسائل توجه کافی نشده است. اگر تغییراتی در سیاست‌های کلان کشور ایجاد شود و دانشگاه‌ها و قشر علمی به این مباحث و چالش‌هایی که وجود دارد ورود کنند، می‌توانیم به سمت بهبود وضعیت پیش برویم که حداقل این آلاینده‌ها را بتوان کنترل نمود و به وضعیت ثبات رساند.

دکتر حمیدرضا صفوی

استاد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

آلودگی‌های غالب در اصفهان چیست؟ آیا مربوط به آلودگی‌های صنعتی است یا کشاورزی؟ در صورت امکان پارامترهای آلودگی را به صورت کمی در منابع مهم سطحی و زیرزمینی برشمارید.

از آنجا که استان اصفهان و به طور دقیق‌تر حوضه آبریز زاینده‌رود به‌شدت با کم‌آبی در منابع آب سطحی و زیرزمینی مواجه است، لذا موضوع کیفیت منابع آب موجود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خشکی زاینده‌رود به‌عنوان تنها رودخانه فلات مرکزی ایران در اغلب ماه‌های سال باعث عدم تأمین آب برای نیازهای مختلف و از همه مهمتر نیاز محیط‌زیستی رودخانه و نیز تالاب بین‌المللی گاوخونی شده است؛ لذا موضوع آلودگی منابع آب سطحی در این استان یک مفهوم دیگر به خود گرفته و آن‌هم تولید ریزگردها و آلودگی‌های جوی ناشی از بستر رودخانه زاینده‌رود و تالاب گاوخونی در هنگام وزش باد و به‌ویژه در فصول تابستان و پاییز است. این آلودگی‌های تجمع یافته در بستر خشک رودخانه، عمدتاً از نوع صنعتی و در درجه بعد ناشی از زهکشی‌های کشاورزی بوده و در قسمت‌های بالا دست حوضه نیز ناشی از تخلیه فاضلاب‌های شهرها و روستاهایی است که در گذشته سیستم‌های جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب نداشته‌اند. در زمینه آلودگی منابع آب زیرزمینی نیز به دلیل افت شدید سطح ایستابی به‌ویژه در طی چند دهه اخیر و از طرف دیگر محدودیت‌های منابع آب، عمده آلودگی‌های معدنی که باعث افزایش مجموع مواد محلول می‌شود ناشی از حرکت آب‌های زیرزمینی بر روی لایه‌های سولفاته و کلروره به سمت پایین‌دست حوضه بوده و آلودگی‌های نیترات هم به طور موضعی ناشی از چاه‌های جذبی فاضلاب‌های انسانی و نیز نفوذ عمقی کودهای ازته مصرفی در کشاورزی به‌ویژه در آبخوان‌های بالادست حوضه می‌باشد.

لطفاً در زمینه آلودگی نیترات آب زیرزمینی و فاضلاب‌های صنعتی در استان اصفهان توضیح بفرمایید.

در استان اصفهان به دلیل پوشش حدود ۷۰ درصدی شبکه‌های جمع‌آوری و نیز تصفیه فاضلاب‌های بهداشتی و از طرف دیگر عمق پایین سطح ایستابی، آلودگی نیترات به صورت موضعی و فقط در برخی آبخوان‌ها که نفوذپذیری بالایی دارند مشاهده شده است. این آبخوان‌ها عمدتا در مناطق غربی و جنوبی استان هستند که پوشش کمتری از تاسیسات جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب به‌ویژه در مناطق روستایی دارند و نیز مناطق کشاورزی و صنعتی در آنجا تمرکز بیشتری داشته و جنس لایه‌های آبخوان آنها هم درشت دانه و با نفوذپذیری بالا می‌باشد. لذا به نظر می‌رسد بر اساس آمارهای شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان، آلودگی آب‌های

زیرزمینی به نیترات فراگیر نبوده و به‌صورت پراکنده در برخی از مناطق استان وجود دارد.

آیا به نظر شما قوانینی که در زمینه کنترل و مدیریت آلودگی وجود دارند، کامل هستند یا مشکل از درست اجرا نشدن قوانین است؟

به نظر می‌رسد قوانین موجود در زمینه کنترل کیفی منابع آب به لحاظ شاخص‌ها چه در منابع آب سطحی و زیرزمینی نیاز به بازنگری و به‌روزرسانی و استانداردهای سخت‌گیرانه‌تری دارد. آلاینده‌های نوظهور نظیر باقی‌مانده داروها، میکروپلاستیک‌ها و نانوذرات که امروزه به‌شدت و به طور فزاینده‌ای مورد مصرف قرار می‌گیرند. از طرف دیگر نظارت بر حسن اجرای قوانین هم به دلیل ضعف در ساختارهای نظارتی و نیز عوامل اجتماعی، فرهنگی و اقتصادی دارای اشکالات عمده است که در طی این چند دهه به‌خوبی مشخص شده ولی همتی برای اصلاح و توانمندسازی آنها وجود ندارد. به نظر می‌رسد حکمرانی جزیره‌ای منابع آب بین دستگاه‌های مختلف اعم از وزارت نیرو، جهاد کشاورزی، صنعت، معدن و تجارت، محیط‌زیست و وزارت کشور باعث شده انسجام قوانین و اجرای آنها با مشکلاتی روبه‌رو باشد و متأسفانه علی‌رغم بیان مشکلات واضح در این زمینه همت جمعی برای رفع آنها وجود نداشته و سازمان‌ها فقط در محدوده وظایف خود مشکلات را متوجه سازمان دیگر می‌کنند؛ لذا به نظر می‌رسد علی‌رغم کلیه محدودیت‌های کمی و کیفی منابع آب، فرهنگ مدیریت مشارکتی هم در سازمان‌های اجرایی و هم‌نهادهای نظارتی اعم از دولتی و سازمان‌های مردم‌نهاد به نحو مؤثر و مطلوب ارتقا نیافته و یا حداقل نهادینه نشده است.

نقش آگاه‌سازی مردم در قالب فعالیت‌های گروه‌های مردم‌نهاد را چگونه می‌بینید؟

قطعاً مردم به‌عنوان ذی‌نفعان اصلی محیط‌زیست و از جمله منابع آب می‌توانند نقش بسیار مهمی در قالب رسمی و آن هم گروه‌های مردم‌نهاد داشته باشند. به دلیل عدم توجه به درخواست‌ها و نیز هشدارهای سمن‌ها در دهه‌های قبل نسبت به وضعیت کمی و کیفی منابع آب و از طرف دیگر بارگذاری‌های بیش از توان اکولوژیکی بر مناطق مختلف کشور و به‌ویژه فلات مرکزی ایران، امروز شاهد معضلات محیط‌زیستی در این مناطق هستیم. این هشدارها در دهه ۱۳۷۰ با شروع توسعه بی‌رویه صنایع آلاینده و آب‌بر، مهاجرت و تمرکز جمعیت در شهرهای بزرگ، توسعه کشاورزی‌های نامتناسب، تخلیه شدید آب‌های زیرزمینی توسط چاه‌های غیرمجاز و یا افزون بر پروانه‌های بهره‌برداری، چندپاره کردن نظام مدیریت پایدار منابع آن و تبدیل آن به مدیریت ناکارآمد صرفا دولتی و عدم توجه به نظام‌های بهره‌برداری مردم‌محور، وضع قوانین در جهت بهره‌برداری نظام گسیخته به‌ویژه از آب‌های زیرزمینی و نهایتا عدم توانایی در کنترل برداشت‌های غیرمجاز منتج به وضعیت موجود کمی و کیفی منابع آب سطحی و زیرزمینی شده است. به نظر می‌رسد حکمرانی مردم پایه در زمینه‌های مختلف محیط‌زیستی و از جمله منابع آب با به‌کارگیری تشکل‌های آب‌بران و اصناف مختلف و از طرف دیگر نظارت سمن‌های تخصصی و به‌صورت علمی بتواند در ساماندهی به وضع موجود بسیار موثر باشد.

نقش مراکز پژوهشی و دانشگاه‌ها را در این زمینه چگونه ارزیابی می‌کنید؟ اگر این مراکز مؤثر هستند، چه راه‌کاری وجود دارد که این اثرگذاری بیشتر شود؟

قطعاً بخشی از ناکامی‌های موجود در زمینه منابع آب متوجه دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی است که نقش خود را به‌موقع و به‌خوبی در زمینه آموزش، پژوهش، فناوری و مسئولیت اجتماعی در زمینه آگاهی‌رسانی عمومی به مردم انجام نداده‌اند. عدم آموزش کارآمد و نیاز محور در زمینه شناخت و مدیریت منابع آب در اقلیم‌های مختلف کشور و نیز استفاده از منابع و مراجعی که با شرایط اقلیمی و منابع آب کشور سازگار و همخوان نبوده و القای توهم پرآبی در کشور می‌کند و صرفاً تکیه بر اقدامات سازه‌ای نظیر احداث سدهای بزرگ، تأسیسات آبیاری وسیع، توسعه برداشت از ذخیره استاتیک آب‌های زیرزمینی با حفر چاه‌های عمیق و پمپ‌های عظیم و نیز تبدیل اراضی مرتعی به کشاورزی و..... را نموده از عوامل اصلی تشدید وضعیت ناپایدار موجود منابع آب توسط مراکز آموزشی و پژوهشی کشور است. به نظر می‌رسد بازنگری نسبت به اشتباهات گذشته نه فقط در دستگاه‌های اجرایی و قانون‌گذار کشور، بلکه در نهادهای آموزشی و تحقیقاتی کشور نیز بایستی به سرعت انجام شود، زیرا که کارشناسان و مدیران کشور عمدتاً خروجی‌های همین مراکز دانشگاهی هستند که بایستی به طور صحیحی آموزش دیده باشند. امروزه دیگر هیچ ظرفیت پنهان و مازادی از آب برای تصمیم‌سازی و نیز تصمیم‌گیری‌های اشتباه در زمینه منابع آب وجود نداشته و عوارض شدید محیط‌زیستی آن نظیر انتشار ریزگردها، فرونشست زمین به‌ویژه در مناطق شهری، کاهش کیفیت منابع آب، پیشروی بیابان‌ها به سمت مناطق همجوار، مهاجرت‌های شدید محیط‌زیستی به مناطق شمالی کشور و... باعث شکنندگی و ناپایداری‌های اجتماعی و اقتصادی در کشور شده است؛ لذا بازنگری در مواد آموزشی از یک طرف و نیز ارائه موضوعات واقعی پژوهشی و فناوری در زمینه منابع آب کشور می‌تواند در دستور کار مراکز آموزشی و پژوهشی و نیز شرکت‌های دانش‌بنیان باشد. موضوعات کلیشه‌ای تحقیقاتی که دهه‌ها هست فقط منجر به تولید گزارش‌های بی‌حاصل شده را بایستی از دستور کار خارج و عملاً موضوعات مبتلابه امروز و فردای کشور در زمینه منابع آب پیگیری نمود. پارادایم شیفت جانشینی مدیریت مصرف به‌جای مدیریت عرضه، افزایش بهره‌وری از واحد حجم آب در مصارف مختلف، بازچرخانی و باز استفاده از آب و پساب‌ها، آموزش مؤثر و نهایتاً رویکردهای فناورانه در زمینه‌های مختلف منابع آب از جمله استحصال، استفاده و بازیافت آب از جمله موضوعات آموزشی، پژوهشی و فناورانه‌ای است که باید مورد توجه قرار گیرد. در کنار این موضوعات، مسئولیت اجتماعی آگاهی‌رسانی عمومی به مردم و نیز آگاهی‌رسانی تخصصی به

مدیران تصمیم‌گیر نیز از وظایف اصلی مراکز آموزشی و پژوهشی کشور است.

نقش مدیریت و حکمرانی را در کنترل آلودگی چگونه می‌بینید؟ آیا مسائل اجتماعی در این زمینه می‌توانند نقش داشته باشند؟

همان‌گونه که استحضار دارید مدیریت یکی از بخش‌های اصلی حکمرانی خوب آب در کنار بخش‌های دیگر آن یعنی ساختار، قوانین و عدالت و شفافیت است؛ لذا نمی‌توان این دو واژه را معادل هم دانست و مدیریت زیرمجموعه حکمرانی است. همان‌گونه که در پاسخ به سؤالات قبل مطرح شد، مردمی‌سازی مدیریت منابع آب هم در بخش کمی و هم کیفی می‌تواند منجر به وضعیت بهتری برای منابع آب شود. قبل از قانون ملی شدن آب در تیرماه ۱۳۴۷، این نهادهای مردمی با ساختار میرابی نقش مدیران آب را برای بخش کشاورزی به‌عنوان اصلی‌ترین مصرف کنند آب داشتند و اگر معضلاتی در زمینه بهره‌برداری و توزیع آب پیش می‌آمد، موضوع را پیگیری و خودشان رفع می‌نمودند. الان به دلیل مدیریت ناقص آب در سطح دولتی، نه سازمان‌های دولتی توان قانونی و اجرایی برای حکمرانی خوب آب دارند و نه اجازه فعالیت تشکل‌های مردمی برای مدیریت آب را می‌دهند؛ لذا ذی‌نفعان هم احساس مشارکت خود را از دست داده و دچار تئوری "تراژدی منابع مشترک" شده‌اند که اگر ما برداشت نکنیم دیگران برداشت می‌کنند پس چه بهتر ما بیشتر برداشت کنیم؛ لذا نقش مشارکت‌های اجتماعی در زمینه حکمرانی خوب آب بسیار برجسته است. آب یک کالای عمومی و یک نیاز حیاتی است و بر این اساس نمی‌تواند بدون مشارکت عمومی مدیریت شود و هرچه که نظام‌های دولتی هم بخواهند این مدیریت را به‌تنهایی انجام دهند، همان‌گونه که در طول این شصت سال نشان داده شد، امکان‌پذیر نیست و حتی در مناطق پرآب جهان نظیر بخش‌هایی از اروپا هم به شکست انجامیده است چه برسد در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران که محدودیت‌های جدی در منابع آب سطحی و زیرزمینی دارد؛ لذا هم در عرصه نظری و مهمتر از آن، در عمل بایستی نقش ذی‌نفعان و همچنین سمن‌ها را در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب جدی در نظر گرفت و این از موضوعات اصلی در زمینه بهبود حکمرانی منابع آب کشور است. البته در این زمینه نسخه واحدی برای کل کشور نمی‌توان پیچید و نیاز است باتوجه‌به نوع منابع و مصارف آب، شرایط اقلیمی و اجتماعی و نیز محیط زیستی هر حوضه برنامه‌ریزی کاربردی شود.

باتوجه‌به نکات مطرح شده، به‌طورکلی مشکل اصلی در مدیریت آلودگی کجا هست؟ چه راه‌حل‌هایی برای بهبود شرایط پیشنهاد می‌کنید؟

قطعاً نمی‌توان مدیریت کیفی منابع آب را از مدیریت کمی آن مستقل در نظر گرفت و اصولاً در مدیریت یکپارچه منابع آب، این مؤلفه‌ها در کنار هم مدیریت می‌شوند. کمااینکه نمی‌توان برنامه‌ریزی و مدیریت آب‌های سطحی را از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در حوضه‌هایی که این دو منبع در اندرکنش با هم هستند، نظیر حوضه زاینده‌رود، مجزا از هم در نظر گرفت؛ لذا به نظر می‌رسد تفکیک مسئولیت‌های دستگاه‌های اجرایی در زمینه مدیریت کمی و کیفی منابع آب از یک طرف و عدم مشارکت ذی‌نفعان در این موضوع از دلایل اصلی کاهش کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی باشد. از طرف دیگر عدم نظارت دقیق بر استفاده از انواع کودهای ازته و فسفره، تخلیه آلاینده‌های صنعتی به منابع آب سطحی و زیرزمینی، دفع فاضلاب‌های تصفیه نشده شهری و روستایی به این منابع و نیز نفوذ شیرابه‌های محل دفن زباله‌های بهداشتی و صنعتی به آب‌های زیرزمینی باعث گسترش آلودگی به منابع آب شده است. در مجموع سخت‌گیرانه‌تر نمودن قوانین در زمینه آلودگی منابع آب، یکپارچه‌تر نمودن ساختارهای مدیریتی با تکیه بر مردمی‌سازی، آموزش عمومی و تخصصی، پژوهش‌ها و فناوری‌های مؤثر و هدفمند و نیز تقویت باورهای اجتماعی می‌تواند به‌عنوان راه‌حل‌هایی در جهت بهبود شرایط کمی و کیفی منابع آب مطرح شود.

دکتر مسعود تجریشی
استاد گروه مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

در رابطه با وضعیت کیفی منابع آب ایران توضیح بفرمایید.

زمانی که در سازمان حفاظت محیط‌زیست بودم، آقای دکتر مرید را به عنوان مدیر آب و خاک معرفی کردم. در آن مقطع که ایشان در میانه مسیر مدیریتی بودند، از ایشان درخواست کردم وارد بحث ترسیم وضعیت منابع آب کشور شوند. در سازمان حفاظت محیط‌زیست، ما چهار یوزپلنگ در کشور داشتیم، اما حدود ۲۰ تا ۳۰ متخصص یوزپلنگ در این زمینه فعالیت می‌کردند؛ درحالی‌که دفتر آب و خاک فاقد نیروی متخصص در حوزه آب بود و هیچ‌کدام از همکاران آن دفتر، تحصیلات مرتبط با آب نداشتند. این موضوع موجب ضعف شدید ما در شناسایی چالش‌های منابع آب و در نتیجه، ناتوانی در برنامه‌ریزی مبتنی بر شناخت صحیح مسائل شده بود.

نخستین گام ما تهیه یک بانک اطلاعاتی از وضعیت رودخانه‌های کشور بر اساس داده‌های موجود بود. پس از آن، پهنه‌بندی رودخانه‌ها صورت گرفت. این اطلاعات نشان داد که با وجود قدیمی بودن پایگاه داده و عدم اندازه‌گیری بسیاری از پارامترهای کیفی، تصویر نسبتاً قابل قبولی از وضعیت منابع آب به‌دست آمد. لازم به ذکر است که پایش کیفیت منابع آب کشور از دفتر آبیاری و زهکشی وزارت نیرو آغاز می‌شود و همچنان عمدتاً پارامترهای شیمیایی پایه نظیر سدیم و کلسیم اندازه‌گیری می‌شود. درحالی‌که باید به پارامترهای ثانویه مانند

نیتروژن، فسفات، BOD، سموم، آفت‌کش‌ها و هورمون‌ها نیز توجه شود، اما متأسفانه این موارد در پایش‌ها یا اصلاً وجود نداشتند یا بسیار محدود بودند. با وجود این کمبودها، نتایج نشان داد که کیفیت منابع آب، از سرشاخه‌ها تا مناطق پایین‌دست، به شدت کاهش می‌یابد، حتی در شرایطی که همه پارامترها در دسترس نبودند.

تلاش دیگری نیز در خصوص مخازن سدهایی که تأمین‌کننده منابع آب شرب هستند، انجام گرفت. در این راستا، این مخازن در سطح استان‌ها شناسایی شدند. در جمع‌بندی اطلاعات پایه و نتایج فراخوان، مشخص شد که وضعیت منابع آب شرب نیز مناسب نیست. علت اصلی این وضعیت، پدیده تغذیه‌گرایی بود که حتی در سرشاخه‌ها نیز وجود داشت. دلیل این امر آن بود که فاضلاب روستاهای بالادست، بدون هیچ‌گونه تصفیه، مستقیماً وارد مخازن آب شرب می‌شد. بنابراین، در آن زمان تصویر مشخصی به‌دست آمد که نشان می‌داد پایش‌های محیط‌زیستی منابع آب کشور، هم به دلیل کمبود نیروی انسانی متخصص و هم به دلیل آن‌که وزارت نیرو خود را متولی این موضوع نمی‌دانست، در وضعیت مناسبی قرار نداشتند. البته لازم به ذکر است که حوضه‌های رودخانه‌ای و مخازن سدها، به جز در بحث شرب، مشکل عمده‌ای نداشتند.

ارزیابی دیگری نیز انجام دادیم با محوریت شناسایی دلایلی که صنایع کشور در حوزه آب مشمول جریمه می‌شوند. در این راستا، حدود ۶۴۰۰۰ واحد صنعتی را کدگذاری و با هماهنگی وزارت صمت، اطلاعات آن‌ها را دریافت کردیم. از میان این صنایع، فقط حدود ۵ تا ۱۰ درصد به‌صورت پایش‌شده در پایگاه اطلاعات قرار داشتند. بررسی‌ها نشان داد که براساس مقررات، این صنایع باید هر سه ماه یک‌بار سنجش پارامترهای محیط‌زیستی را انجام دهند و در صورت آلودگی، به‌عنوان صنایع آلاینده شناخته شده و مشمول جریمه شوند. اما ۸۵ درصد این صنایع در حوزه آب، یا فاقد سیستم تصفیه فاضلاب بودند یا سیستم موجود عملکرد مناسبی نداشت. عمدتاً پارامتر BOD در سطحی بالاتر از استاندارد گزارش شد.

در جمع‌بندی می‌توان گفت در سطوح اولیه رصد منابع آب، توجه عمده معطوف به کمیت بوده و موضوع کیفیت نادیده گرفته شده است. ازاین‌رو، انتظار وضعیت مطلوب در زمینه کیفیت چندان واقع‌بینانه نیست. در برنامه چهارم توسعه، قانون‌گذار دستگاه‌های اجرایی را مکلف کرده بود که مطالعات مربوط به رودخانه‌ها را در مقیاس حوضه آبریز انجام دهند؛ کاری که بسیاری از کشورهای غربی دهه‌ها پیش آغاز کرده بودند. هدف این مطالعات، شناسایی منابع آلاینده، تفکیک بازه‌ها، مدل‌سازی و ارائه بسته اقدام به منظور بهبود کیفیت منابع آب برای نهادهای اجرایی بود. در آن زمان، چهار حوضه آبریز فعال شدند، به‌ویژه حوضه‌هایی که شامل مناطق حفاظت شده مانند کرج و لار بودند. همچنین حوضه رودخانه کرخه نیز شناسایی و مطالعات آن به شرکت مهاب قدس واگذار شد. اما در برنامه‌های پنجم، ششم و حتی هفتم توسعه، هیچ پیوستگی یا ادامه‌ای برای این اقدامات دیده نمی‌شود، درحالی‌که مأموریت آب در زمینه‌های شرب، کشاورزی یا حفاظت محیط‌زیست اهمیت به‌سزایی دارد. به‌عنوان‌نمونه، ماهی خال قرمز در منطقه حفاظت شده لار در معرض انقراض قرار دارد. بااین‌حال، در هیچ‌یک از برنامه‌های پنج ساله اخیر، مسئولیت مشخصی برای سازمان حفاظت محیط‌زیست یا قانونی الزام‌آور برای ادامه این اقدامات تعریف نشده است. لذا علی‌رغم اقداماتی که در گذشته آغاز شده بود، به‌دلیل نبود تداوم و غفلت قانون‌گذار، موضوع کیفیت آب به‌صورت جامع و مستمر مورد توجه قرار نگرفته و دستگاه‌های اجرایی نیز انگیزه‌ای برای پیگیری نداشته‌اند.

فعالیت مهم دیگری نیز در برنامه ششم توسعه وجود داشت، اما در برنامه هفتم تبدیل به قانون دائمی نشد. این موضوع مربوط به ارزیابی محیط‌زیستی پروژه‌های بزرگ بود. در گذشته، این ارزیابی‌ها به سازمان حفاظت محیط‌زیست اجازه می‌داد اثرات هر پروژه عمرانی بر منابع آب را بررسی کند. برای مثال، در احداث معدن یا سد یا سد باطله (Tailing Dam)، باید اثرات این سازه‌ها بر منابع آب سطحی و زیرزمینی، محل دفع فاضلاب و شیوه پایش مشخص می‌شد. اما در برنامه هفتم توسعه، قانون‌گذار این اختیار را حذف کرد. در دوره‌ای که در سازمان بودم، حدود ۴۰۰ پروژه بزرگ وجود داشت که بلاتکلیف مانده بودند. با تلاش جمعی و همکاری با دستگاه‌های اجرایی، در مدت چهار ماه توانستیم تکلیف این پروژه‌ها را روشن کنیم تا هیچ پروژه‌ای بدون بررسی اثرات محیط‌زیستی آغاز نشود. اما از سال ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۳، به‌دلیل برگزار نشدن جلسات ارزیابی محیط‌زیستی از سوی سازمان، مجدداً حدود ۳۰۰ پروژه در انتظار بررسی باقی ماندند. بر اساس قانون، اگر سازمان پاسخ ندهد، پروژه می‌تواند بدون بررسی آغاز شود. این رویه بسیار خطرناک است، به‌ویژه در مواردی که پروژه‌های صنعتی و معدنی در آبخوان‌هایی اجرا می‌شوند که منابع آب شرب را تأمین می‌کنند و پساب آن‌ها وارد رودخانه‌های حیاتی می‌شود.

در مجموع، در حوزه کیفیت منابع آب، با فراز و نشیب‌های بسیاری روبه‌رو بودیم. در بسیاری موارد، پیگیری‌ها بیشتر شخصی و وابسته به مدیران دغدغه‌مند بود، درحالی‌که از منظر قانون‌گذاری و عملکرد دستگاه‌های اجرایی، کیفیت آب اولویت جدی محسوب نمی‌شود.

فرمودید در دوره‌ای که در سازمان حفاظت محیط‌زیست تلاش کردید پرونده‌ها بررسی شوند و پرونده‌های جدید نیز باز شده‌اند. به نظر شما می‌توان نتیجه گرفت حل این مسأله قائم به فرد است؟ یا نیاز به اصلاح قانونی است که منجر به این شرایط می‌شود؟(منظور از شرایط این است که الان کیفیت منابع آب که نقش مهمی، هم‌تراز کمیت اما با اثرگذاری بلندمدت دارد، تحت تأثیر کمیت قرار گرفته است).

به نظر من، هر دو عامل نقش دارند. قانون برنامه ششم، به‌گونه‌ای تدوین شده بود که هم سازمان حفاظت محیط‌زیست، هم دستگاه‌های اجرایی و هم سرمایه‌گذاران

بخش خصوصی را در شرایط سختی قرار داده بود. در دوره‌ای که بنده مسئولیت داشتم، ظرف پنج ماه توانستیم به ۴۰۰ پرونده پاسخ دهیم. این پروژه‌ها بالغ بر ۷۰ میلیارد دلار ارزش سرمایه‌گذاری داشتند و می‌توانستند حدود ۱۶۰ هزار شغل ایجاد کنند.

یکی از مشکلات اساسی، کمبود نیروی انسانی متخصص بود؛ همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، حتی متخصص آب در سازمان نداشتیم. فشار دستگاه‌های اجرایی و سرمایه‌گذاران برای اجرای پروژه‌ها بسیار زیاد بود و به جای حل مسائل بنیادین، قانون‌گذار محدودیت زمانی دو ماهه برای پاسخ سازمان تعریف کرده بود؛ به‌این معنا که اگر ظرف دو ماه پاسخی داده نمی‌شد، سرمایه‌گذار می‌توانست پروژه را آغاز کند. نمایندگان مجلس نیز اغلب از سرمایه‌گذاران حمایت می‌کردند. با وجود همه این مشکلات، جلسات مستمری تشکیل می‌دادیم، گاه تا شش ساعت در روز، برای آن‌که هیچ پروژه‌ای بدون ارزیابی باقی نماند.

پس از پایان آن دوره، مجدداً گزارشی در روزنامه قدس به نقل از سازمان بازرسی منتشر شد مبنی بر اینکه پرونده‌های معوق به حدود ۳۰۰ مورد رسیده است. با سازمان تماس گرفتم و تأیید کردند که جلسات برگزار نشده و سازمان پیگیری لازم را انجام نداده است. بنابراین، می‌توان گفت هم قانون‌گذار و هم دستگاه‌های اجرایی هر دو در این وضعیت سهم دارند. سازمان حفاظت محیط‌زیست به‌عنوان متولی صیانت از منابع طبیعی، و نهادهای نظارتی و دولتی نیز به‌عنوان تضمین‌کنندگان اجرای پروژه‌ها با ملاحظات محیط‌زیستی، عملکرد مناسبی نداشته‌اند. به خاطر دارم ماده ۳۸ قانون برنامه ششم سازمان حفاظت محیط‌زیست را مکلف کرده بود که با همکاری سازمان برنامه و بودجه، برنامه راهبردی توسعه با توجه به محیط‌زیست ارائه کند. تدوین دستورالعمل مطالعات راهبردی بیش از یک سال طول کشید. سازمان برنامه و بودجه نیز به‌دلیل فشارهای نمایندگان مجلس برای اجرای پروژه‌هایی نظیر احداث خط آهن، تمایلی به تصویب آن نداشت. آیین‌نامه نهایی پس از رفت‌وبرگشت‌های فراوان تهیه و به دولت ارائه شد، اما دولت مخالفت خود را ابراز کرد. در صورتی که هر توسعه‌ای باید بر پایه چشم‌انداز و برنامه‌ریزی راهبردی باشد. در مثالی مشخص، دو پروژه جاده‌سازی بدون ارزیابی محیط‌زیستی اجرا شدند، چراکه یکی از وزرا متعهد شده بود درآمد حاصل از فروش کارخانه فولاد به احداث این جاده اختصاص یابد. ساخت تونل‌های متعدد در مناطق حفاظت شده و تخصیص بودجه‌های سنگین برای پروژه‌هایی که امکان بهره‌برداری نداشتند، نشان‌دهنده غلبه رویکرد اجرایی بر الزامات محیط‌زیستی است. در نتیجه، دستگاه‌های اجرایی قانون را مانع اجرای پروژه‌ها تلقی می‌کنند و قانون‌گذار نیز عمدتاً در پی تحقق خواسته‌های منطقه‌ای و سیاسی است. محیط‌زیست، در این فرآیند، جایگاه مطلوبی ندارد و مدیران اغلب به‌دلیل فشارهای سیاسی و فقدان توان علمی یا منابع انسانی، قادر به پیگیری وظایف قانونی خود نیستند.

ما در بحث سدسازی متوجه شدیم که بسیاری از سدها ارزیابی محیط‌زیستی ندارند. یک دلیل آن می‌تواند از طرف سازمان محیط‌زیست باشد که پاسخی داده نمی‌شد.

مدیران در جمهوری اسلامی یا وطن‌دوست هستند یا صندلی‌دوست؛ مسائل محیط‌زیستی به‌عنوان چالش‌های مهم مطرح هستند و باید راهکار مناسبی برای حل آنها یافت. خاطرم هست زمانی معاون عمرانی استان گلستان به مدت چهار سال به این ساختمان مراجعه می‌کرد و گلایه داشت که یک بار به او گفته می‌شود میانکاله باید به این شکل مدیریت شود و بار دیگر به شیوه‌ای متفاوت. دستگاه‌های اجرایی به‌نوعی هنر خسته کردن افراد را دارند و با این شیوه، افراد را حذف می‌کنند؛ این روند هنوز ادامه دارد. برخی نیز مردم را چنان خسته می‌کنند که نهایتاً دست از پیگیری می‌کشند.

تعداد زیادی پروژه را به یاد دارم که هرکدام موافقان و مخالفانی داشتند. لازم بود نظرات همه آن‌ها شنیده شده و از منظر علمی و فنی بررسی شود. در بسیاری موارد، این پروژه‌ها پشت سازمان محیط‌زیست و چشم دستگاه‌های دیگر پنهان می‌مانند. مثلاً در پروژه انتقال آب سمنان، تخصیصی وجود داشت که وزارت نیرو به این پروژه داده بود؛ اما پس از آن عنوان می‌شد سازمان حفاظت محیط‌زیست مجوز محیط‌زیستی صادر نمی‌کند، به‌گونه‌ای که سازمان محیط‌زیست به عنوان بهانه‌ای برای جلوگیری از پروژه مورد استفاده قرار می‌گرفت. ما پروژه را بررسی کردیم، مشاور را دعوت کردیم و تأکید داشتیم اگر این پروژه تخصیص آب دارد و آن منطقه واقعاً به آب نیاز دارد و وزارت نیرو که مسئول تأمین آب است این نیاز را اعلام کرده و تخصیص داده است، می‌توان شرایطی تعیین کرد. به‌عنوان‌مثال، حرکت آب تنها در مسیر خط لوله ری-نکا که قبلاً تخریب شده بود، ممکن است؛ هیچ ایستگاه پمپاژی نمی‌توان ایجاد کرد، حتی یک درخت جنگلی نباید آسیب ببیند و مصرف آب نباید باعث آلودگی پساب شود. مقرر شد برداشت از یک نقطه و بازگرداندن آب از نقطه دیگر صورت گیرد. ما هزینه‌ها را لحاظ نکردیم و تمامی الزامات محیط‌زیستی را بررسی کردیم تا مشکلی از این نظر ایجاد نشود. وقتی به وزارت نیرو مراجعه کردیم و به معاون اقتصادی رئیس‌جمهور اطلاع دادیم که مجوز صادر می‌شود- چون تعهدات محیط‌زیستی داده شده بود- سازمان برنامه و بودجه مخالفت کرد؛ دلیل این مخالفت، عدم توانایی تأمین هزینه‌ها توسط متولیان بود و دولت مجبور بود هزینه‌ها را تأمین کند. این موضوع ربطی به مسائل محیط‌زیستی نداشت. وزارت نیرو نیز مخالف پروژه بود و نمی‌خواست آن را اجرایی کند و تصور نمی‌کرد که سازمان محیط‌زیست موافقت کند. ما می‌دانستیم که این پروژه قابل اجرا نیست، زیرا قصد داشتند ۵۰ میلیون متر مکعب آب به سمنان منتقل کنند، درحالی‌که کل نیاز آبی استان اصفهان در آن زمان کمتر از این مقدار بود. در مسیر پروژه، برخی

نمایندگان مجلس به مردم وعده داده بودند که پروژه فعال خواهد شد و از این طریق رأی جمع می‌کردند. این وضعیت در بسیاری از کشورها رخ می‌دهد، اما شدت آن در ایران بیشتر است.

صدور مجوزها تابع سیاست‌های دولت‌های روی کار آمده است. به‌عنوان‌نمونه، ترامپ حاضر نیست مناطق حفاظت شده را به رسمیت بشناسد. ما چنین مشکلاتی نداریم، اما در عمل مشاهده می‌کنیم محیط‌زیست در اولویت اصلی برنامه‌ها قرار ندارد، درحالی‌که اگر محیط‌زیست را به‌صورت علمی و فنی مورد توجه قرار دهیم و به دنبال راهکارهایی باشیم که توسعه و حفاظت محیط‌زیست توأمان تامین شود، موفق خواهیم شد. در حوزه آب نیز آشفتگی در تخصیص منابع وجود دارد. وزارت نیرو به‌جای ایفای نقش صیانت از منابع آبی، درگیر بازی‌های اقتصادی و سیاسی است. به همین دلیل در پروژه انتقال آب سمنان بیشتر بعد سیاسی مطرح بود تا مسائل محیط‌زیستی. این پروژه عملاً غیرقابل اجرا بود، ولی هزینه زیادی برای مردم به همراه داشت. هرچند اجرای پروژه عملی نبود، اما تلاش شد مسئولیت مخالفت با آن را بر دوش سازمان محیط‌زیست بیندازند، درحالی‌که هم وزارت نیرو و هم سازمان برنامه و بودجه مخالف بودند. باتوجه‌به اینکه آقای روحانی و آقای احمدی‌نژاد هر دو از استان سمنان بودند، این دو سازمان مایل نبودند مخالفت خود را اعلام کنند. وقتی ما نظر خود را اعلام کردیم، واقعیت امر آشکار شد.

موضوع سازمان محیط‌زیست و مسائل محیط‌زیستی کشور بسیار اهمیت دارد. من با دولت‌های مختلف همکاری کرده‌ام و دریافتم هیچ‌کدام دولت محیط‌زیستی نبودند. محیط‌زیست یک فرصت است. زمانی‌که در بخش انرژی فعالیت می‌کردم، گزارشی برای مسئولان وقت تهیه کردم که در آن اشاره شده بود نخست‌وزیر انگلستان، آقای بوریس جانسون، هنگام ورود به موضوع صرفه‌جویی انرژی اعلام کرد اگر برنامه اجرا شود، میزان قابل توجهی اشتغال ایجاد شده و درصد تولید ناخالص داخلی افزایش خواهد یافت. نباید محیط‌زیست را صرفاً به چشم یک بخش هزینه‌ای دید؛ بلکه می‌تواند در توسعه تحقیق و توسعه (R&D) و فناوری تأثیرگذار باشد و به بهبود محیط‌زیست و اقتصاد ملی و اشتغال کمک کند. یادم هست در روزهای پایانی حضورم در دولت، با وزارت صنعت، معدن و تجارت توافق کردیم که ایران‌خودرو و سایپا موظف شوند میانگین مصرف سوخت محصولات خود را ظرف پنج سال به ۵.۵ لیتر در هر ۱۰۰ کیلومتر برسانند. سیاست‌گذاری در این حوزه باید توسط سازمان محیط‌زیست انجام شود. در آن زمان بسیاری از کشورها به این دستاورد رسیده بودند. اگر دولت‌های وقت این سیاست‌ها را اجرا می‌کردند، اکنون کیفیت خودروهای تولیدی بهتر بود، مصرف سوخت کمتر شده و تحقیق و توسعه رشد بیشتری می‌کرد، ضمن اینکه مردم نیز از این تغییرات بهره‌مند می‌شدند. محیط-زیست هزینه نیست؛ بلکه سرمایه‌گذاری است.

امروزه می‌شنویم که آلودگی هوا سالانه هزینه‌های میلیارد دلاری بر کشور تحمیل می‌کند که این یک واقعیت است. در تهران، سلامت مردم در خطر است و تعداد مبتلایان به سرطان ریه به‌شدت افزایش یافته است. حدود سه دهه پیش، زمانی که روی نهر فیروزآباد در جنوب تهران کار می‌کردیم، مسئول بیمارستان شهرری اعلام کرد زنان منطقه به بیماری‌هایی مبتلا می‌شوند که هنوز قابل تشخیص نیست. این وضعیت ناشی از ورود فاضلاب شهر تهران به دشت ری بود. ما به تأثیرات این مسائل توجه نمی‌کنیم و هزینه‌های درمان و دارو بر جامعه تحمیل می‌شود. تنها کسانی می‌توانند اهمیت محیط‌زیست را درک کنند که بدانند چقدر در توسعه کشور، سلامت مردم و رشد اقتصادی اثرگذار است؛ چه در ارزیابی‌های محیط‌زیستی و انتخاب منابع، و چه در تدوین دستورالعمل‌ها، استانداردها و شاخص‌ها تا مردم اطمینان یابند محصولاتی که مصرف می‌کنند کیفیت لازم را دارد و یا میزان آلاینده‌های هوا در حد مجاز است.

باتوجه‌به مسئولیت شما در سازمان محیط‌زیست، به نظر می‌رسد داده‌های محیط‌زیستی به طور کامل برداشت نمی‌شود و همچنین اطلاعات به سهولت در اختیار پژوهشگران قرار نمی‌گیرد یا نتایج پژوهش‌ها قابل انتشار نیستند. به نظر شما چگونه می‌توان این مشکل را مرتفع ساخت؟

اعتقاد دارم ساختار سازمان حفاظت محیط‌زیست پاسخگوی نیازهایی که مطرح شد، نیست. همان‌طور که پیش‌تر اشاره کردم، در کشور ما چهار یوزپلنگ وجود دارد و حدود ۳۰ تا ۴۰ متخصص یوزپلنگ فعالیت می‌کنند؛ درحالی‌که مسائل محیط‌زیست انسانی بسیار گسترده شده است؛ مواردی مانند آب، خاک، هوا، پسماند و مسائل متنوعی که با آن‌ها مواجه هستیم و برای مردم نیز چالش‌زا هستند، اما سازمان محیط‌زیست از نیروی انسانی کافی برخوردار نیست. در قبل از دوره مدیریت دکتر کلانتری، حتی متخصص هوا در سازمان محیط‌زیست وجود نداشت. مگر ممکن است بدون حضور متخصص هوا، ارزیابی محیط‌زیستی پتروشیمی انجام شود یا سوخت و خودروها در نظام برنامه‌ریزی راهبردی محیط‌زیستی هوای کلان شهرها بررسی گردند؟

در یک بازه زمانی که ما ده متخصص آلودگی هوا از بهترین دانشگاه‌های کشور داشتیم – که هم‌اکنون فقط دو نفر باقی مانده‌اند و بقیه مهاجرت کرده‌اند – در آن زمان به این جمع‌بندی رسیدم که باید نیروهای جوان، جدید، پرانگیزه، دانشمند و باسواد را جذب کنیم تا بتوانیم سازمان را دگرگون سازیم. اما پس از مدتی دریافتم که این سازمان کارآمدی لازم را ندارد. یادم هست مسئول سازمان هواشناسی استرالیا که مهمان ما بود، بیان می‌کرد نخست‌وزیر آن کشور از جلسات مکرر خسته شده بود که در آن هر کس آمار متفاوتی درباره بارندگی و وضعیت سدها ارائه می‌داد؛ وی خواستار ایجاد سازمانی نوین شد که پیش از مطرح شدن سوالات، پاسخ‌های دقیق در اختیار داشته باشد و به جای چندین نظر متعارض،

یک نظر واحد ارائه شود. ایشان می‌گفت در فرصت شش ماه، بهترین نیروهای کامپیوتری از دانشگاه های معروف کشور را جذب و سازمانی پویا، جوان و مبتنی بر دانش روز ایجاد کردند که ظرف یک سال موفق به صرفه‌جویی پنج میلیون دلار شد. هر بارش در هر نقطه کشور در بانک اطلاعات ثبت و در مدل‌های صد ساله شبیه‌سازی می‌شد و پیش‌بینی‌هایی درباره وضعیت سدها، رطوبت و تخصیص منابع ارائه می‌گردید و گزارش‌های متناسب به مجموعه‌های مربوط ارسال می‌شد.

من معتقدم سازمان محیط‌زیست جدید باید بر اساس نیازهای نوین تأسیس شود، ولی دو نکته اساسی باید مد نظر قرار گیرد: نخست، پایش که وظیفه اصلی است و دوم، آگاهی‌بخشی به مردم؛ به طوری که مردم نسبت به مسائل محیط‌زیستی حساس و آگاه شوند. چند روز پیش از چهارراهی نزدیک منزل عبور می‌کردم که مشاهده کردم حجم زیادی زباله شامل بطری‌های نوشابه و آب از کانال‌های زیرزمینی بیرون آمده بود. با یکی از شهروندان حاضر صحبت کردم و از او خواستم برای کمک در پاک‌سازی، از من عکس بگیرد و آن را به شهرداری ارسال کند. این نوع آگاهی‌بخشی اهمیت فراوانی دارد.

حدود دوازده سال پیش در پروژه سد لتیان و رودخانه جاجرود همکاری داشتم. آقای طرفه، مدیرعامل آب تهران، به کارشناسان خود اطلاعات مشاوران را محرمانه اعلام می‌کرد و نمی‌داد. تصمیم گرفتیم خودمان اندازه‌گیری انجام دهیم. من به آقای طرفه گفتم چرا در منطقه کوهستانی رودبار قصران، لوله‌کشی فاضلاب انجام می‌دهید، درحالی‌که این فرآیند تقریباً غیرممکن است و شما از منشأ مشکل آگاهی ندارید و این تصفیه‌خانه نمی‌تواند مشکل را حل کند؟ پاسخ دادند مشاور این را توصیه کرده است. من نمونه‌برداری انجام دادم و نشان دادم منشأ آلودگی در بیش از نیمی از سال انسانی نیست بلکه حیوانی است. آن‌ها باور نمی‌کردند و اصرار داشتند مشاور نظر دیگری داشته است. پس از بررسی بیشتر، مشخص شد بخشی از مشکل آب شرب تهران در جمع‌آوری دام‌های اطراف است، زیرا فضولات دام‌ها به وسیله باران به رودخانه وارد می‌شود. مشاور چنین موضوعی را در نظر نگرفته بود.

کار پایش وظیفه سازمان حفاظت محیط‌زیست است و باید از بهترین نیروها و تجهیزات برای اندازه‌گیری استفاده کند و داده‌ها را تحلیل نماید. در سال ۹۸ گزارشی مبنی بر اهمیت پایش هوا، سوخت‌ها و رودخانه‌ها به دولت ارائه دادیم، درحالی‌که دولت در شرایط کمبود بودجه قرار داشت. به این نتیجه رسیدیم که پایش مهمترین وظیفه ما هست و برخی وظایف محول شده تنها سرگرمی هستند. به همین منظور، پایگاه‌های اطلاعاتی حدود ۶۴ هزار صنعت شناسایی شدند و کد IC دریافت کردند، میزان مصرف برق، تولید پسماند و مسیر دفع آن ثبت شد. با پژوهشکده مهندسی شیمی همکاری کردیم و متوجه شدیم سالانه ۱/۲ میلیارد دلار کاتالیست‌های پتروشیمی و فولاد وارد کشور می‌شود که طلا و پلاتین آن‌ها در داخل کشور بازیافت می‌شود و بقیه در طبیعت رها می‌گردد. این پسماندها به طور کامل شناسایی و میزان قابلیت بازیافت آن‌ها بررسی شد.

پس از آغاز این اقدامات، درخواست بودجه ۱ همت کردیم و ۱۱۵۰ میلیارد تومان از محل عوارض صنایع آلاینده دریافت شد. پیش از آن، یک سال و نیم بررسی کردیم این مبالغ کجا هزینه می‌شود و قانون مرتبط با آن چیست. هم‌زمان در مجلس نیز بر روی قانون مالیات بر ارزش افزوده کار می‌شد. مرکز پژوهش‌های مجلس به من گفت شما قصد دارید این مبالغ را به مالیات سبز تبدیل کنید ولی نمایندگان مخالف هستند زیرا مالیات به خزانه می‌رود و نحوه مصرف آن مشخص باید باشد. درصورتی‌که الان کاملاً غیرشفاف و برای غیرمحیط‌زیستی هزینه می‌گردد. برای نمونه در توس پتروشیمی آلوده‌ای بود که یک درصد فروش آن به شهرداری توس اختصاص می‌یافت و به خزانه دولت واریز نمی‌شد. مبلغی حدود ۲۰ تا ۳۰ همت از این طریق در آن سال جابه‌جا می‌شد درحالی‌که کل جریمه‌ها بسیار بیشتر بود. این وجوه در شهرستان‌ها و استانداری‌ها هزینه می‌شد که نه محیط‌زیستی بود و نه نحوه مصرف ثبت می‌شد. ما قصد داشتیم بخشی از این مبلغ را به صندوق محیط‌زیست اختصاص دهیم تا سیستم پایش و ارائه راهکارها برای رفع آلودگی با همکاری دانشگاه‌ها فعال شود. دانشگاه‌هایی مانند گروه صنایع غذایی فردوسی مشهد، صنایع معدنی صنعتی اصفهان، نیروگاه‌ها و دانشگاه خواجه نصیر هر کدام یک صنعت آلاینده بزرگ کشور را بر عهده گرفتند تا کنسرسیومی تشکیل دهند و بررسی کنند صنایع ما چه مشکلاتی دارند و دستورالعمل‌ها و فناوری‌های مورد نیاز برای رفع این آلایندگی‌ها چیست.

برای حل این مسائل سه فاز در نظر گرفته شد: فاز اول، شناسایی وضعیت موجود و تدوین آیین‌نامه‌ها و حدهای مجاز؛ فاز دوم، انتخاب برخی صنایع و حمایت برای استفاده از فناوری‌های نوین، از جمله راه‌حل‌های ساده مانند بهبود عملکرد تصفیه‌خانه‌ها؛ فاز سوم، تدوین آیین‌نامه‌های کلی برای اجرا در سراسر کشور. فاز اول انجام شد ولی فاز دوم به پایان دولت قبلی نرسید. صندوق محیط‌زیست تمایلی به صرف این بودجه نداشت و دولت جدید نیز این برنامه را نیمه‌کاره رها کرد. هدف ما فعال‌سازی سیستم پایش در کشور بود، یعنی اندازه‌گیری دقیق و تحلیل داده‌ها مشابه یک پزشک که تنها آزمایشگاه نیست بلکه با اندازه‌گیری به تشخیص و درمان کمک می‌کند. ایستگاه‌هایی برای پایش رودخانه‌ها و تالاب‌ها درنظر گرفته شد، ولی تغییر دولت و مخالفت برخی افراد با هزینه‌کرد این بودجه بزرگ باعث توقف پروژه شد.

بنابراین، برای تشخیص درست باید داده‌برداری و اندازه‌گیری انجام شود و صنعت با همکاری دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و شرکت‌های دانش‌بنیان از دانش و فناوری بهره گیرد تا هم هزینه‌ها و آلودگی کاهش یابد و هم بهره‌وری اقتصادی افزایش

پیدا کند. این دیدگاه من درباره وظایف سازمان محیط‌زیست است.

به نظر شما باتوجه‌به بحرانی که در زمینه کم‌آبی هر روز شدیدتر می‌شود، چگونه می‌توان مسئله آلودگی را در سیاست‌گذاری‌های کلان کشور وارد کرد؟

این سیاست‌گذاری باید در شورای عالی محیط‌زیست کشور انجام شود. اولین بار در سال ۱۳۹۷، زمانی که شورای عالی محیط‌زیست قرار بود برگزار گردد، وقتی موضوع آلودگی هوا مطرح شد، تقریباً کل معاونت‌های سازمان محیط‌زیست کشور مخالفت کردند. یعنی مسئله سازمان بیشتر معطوف به مناطق حفاظت شده است و سابقه نداشته مسائل خارج از این حوزه بررسی شوند. سازمان با این ساختار و نیروی انسانی که دارد، به گونه‌ای است که وظایفی دارد و مردم انتظار دارند این وظایف را انجام دهد؛ اما از نظر بودجه، مدیریت و ساختار، این قابلیت و توانایی را ندارد.همیشه زمانی که یک سازمان طراحی می‌کنیم، ابتدا عملکردهای مورد انتظار (فانکشن‌ها) را مشخص می‌کنیم، سپس فرم و ساختار را تعیین می‌کنیم و بعد فرآیندها را می‌سازیم. وقتی انتظار ما از سازمان محیط‌زیست چیزی غیر از آن چیزی باشد که درحال‌حاضر است، بنابراین وضعیت نیز به همین شکل باقی می‌ماند. من هنوز معتقدم این سازمان حفاظت محیط‌زیست پاسخگوی نیازهای محیط‌زیستی ما نیست. زمانی‌که قانون آلودگی هوا ابلاغ شد تا آیین‌نامه آن را در پاییز و زمستان ۱۳۹۶ تدوین کنیم، متوجه شدیم که ۶۴ حکم قانونی با دخالت ۱۶ دستگاه اجرایی وجود دارد. در سال ۱۳۹۸، سامانه‌ای طراحی شد؛ نامه‌ای به دستگاه‌ها ارسال کردیم و داده‌های مرتبط با این بندهای قانونی را از آن‌ها دریافت و در سامانه ثبت کردیم و برای آقای جهانگیری ارسال نمودیم. تمامی دستگاه‌ها اعتراض کردند و گفتند این سامانه ضعف‌های آنها را نشان می‌دهد و همکاری نکردند. بعد از ۶ ماه که این سامانه فعال بود، آن را به خود دستگاه‌ها تحویل دادیم و گفتیم شما خودتان داده‌هایتان را وارد و عملکردتان را ارزیابی کنید. یک سال بعد، نرم‌افزار را به آقای جهانگیری و سپس به آقای دکتر مخبر ارسال کردیم که وضعیت اجرای قانون هوای پاک و وظایف دستگاه‌های مختلف را مشاهده کنند. تمامی دستگاه‌های نظارتی از این سامانه به عنوان اهرم فشار استفاده کردند، از جمله نمایندگان مجلس که قصد داشتند با این ابزار برای مدیران دولتی پرونده‌سازی کنند. وقتی داده‌ها در دسترس باشد، گاهی اوقات می‌توان از آن برای مدیریت و برنامه‌ریزی استفاده کرد تا به اهداف برسیم، و گاهی به عنوان ابزاری سیاسی و چماق استفاده می‌شود؛ این امر باعث بی‌انگیزگی مدیران می‌شود. به جای آن که مدیران متوجه شوند مشکل ما همین شفاف‌سازی داده‌ها است و با اصلاح آن می‌توان به جلو حرکت کرد، دستگاه‌های اجرایی فکر می‌کنند اگر داده‌ها شفاف شود، عده‌ای از نظر سیاسی سوءاستفاده می‌کنند. در دولت بعد نیز، در جلسات عمومی هوای پاک که هر دی‌ماه برگزار می‌شد، پرسیدم خانمی که ساعت ۸:۳۰ اخبار می‌خواند، چرا در دولت قبل که مازوت هم استفاده نمی‌شد، درباره آلودگی هوا سؤال می‌کردید، ولی اکنون که هم هوا آلوده‌تر است و هم مازوت مصرف می‌شود، چرا این سؤال‌ها مطرح نمی‌شود؟ پاسخ دادند که به آن‌ها دستور داده‌اند در این زمینه سؤال نپرسند.

سازمان محیط‌زیست و صدا و سیما مسئول آگاهی‌بخشی به مردم هستند، اما صدا و سیما به‌صورت جهت‌دار این کار را انجام می‌دهد. به نظر من اگر سازمان محیط‌زیست به سازمانی نوین، مبتنی بر پایش و دانش تبدیل شود، از ظرفیت‌های شرکت‌های دانش‌بنیان استفاده کند و به کارخانه‌ها و صنایع کمک کند، به جای اینکه صرفاً اعلام کند که آلودگی ایجاد شده و جریمه بدهید، می‌توان مشکل آلودگی را حل کرد. درحال‌حاضر صنعت با مشکلاتی مانند تأمین مازوت با گوگرد بالا مواجه است و می‌گوید اگر گوگرد پایین نیست، چرا استفاده کنیم؟ بخشی از عوارض ناشی از آلودگی به خزانه‌هایی می‌رود که شهرداری‌ها اداره می‌کنند و فساد اولیه‌ای در آن وجود دارد، بنابراین این منابع به سمت بهبود محیط‌زیست هدایت نمی‌شود. صنعت این هزینه را به عنوان هزینه اولیه حساب کرده و قیمت تولیدات خود را افزایش می‌دهد و همین باعث گران بودن تولید در کشور می‌شود. نحوه برخورد نهادهای حکومتی هم به شیوه‌هایی مانند ممنوع‌الخروجی و بستن حساب‌های بانکی به تولیدکننده تحمیل می‌شود.

اگر بتوانیم با همان شرایط فعلی، سازمانی جدید داشته باشیم که پایه و اساس کارش پایش، آگاهی‌بخشی و اطلاع‌رسانی باشد و وضعیت صنعت، آب، هوا و فاضلاب‌ها را رصد کند، و از طریق صندوق محیط‌زیست به صنایع وام بدهد تا فرآیندهایشان را بهبود بخشند، شرایط محیط‌زیست کشور بهبود خواهد یافت. نمونه موفق این رویکرد در لهستان دیده شده است؛ کشوری که پیش از این بسیار آلوده بود، اما توانست با کمک صندوق محیط‌زیست، صنایع سنگین را به فناوری‌های پیشرفته و کمتر آلاینده تبدیل کند و کشور خود را نجات دهد. احساس من این است که نیازمند تغییر نگاه هستیم و این تغییر هم به نیروهای قوی، برنامه قوی و اراده جدی نیاز دارد.

در مورد بخش خصوصی، لطفاً توضیح دهید که پروژه‌هایی که به بخش خصوصی واگذار می‌شود چه چالش‌هایی دارد و هماهنگی بین این دو چگونه است؟

بخش خصوصی مثلاً اعلام می‌کند که می‌خواهد نیروگاه بسازد و ما به آن‌ها می‌گوییم باید نیروگاهی با استاندارد کلاس F نصب کنند و آن‌ها واقعاً این کار را انجام می‌دهند. اما وقتی دولت می‌خواهد از آن‌ها برق خریداری کنند، با قیمت پایین این کار را انجام می‌دهند. بنابراین زمانی‌که بخش خصوصی قصد سرمایه‌گذاری در حوزه محیط‌زیست و فناوری‌های کمکی را دارد، بسیار تنهاست.

در کشور ما اکنون مشکل نیترات در آب‌های زیرزمینی وجود دارد. به‌عنوان‌نمونه، مجموعه‌ای به نام «هلدینگ غدیر» که

متعلق به صندوق بازنشستگی نیروهای مسلح است، پتروشیمی‌هایی دارد که تقریباً اوره مورد نیاز بازار داخل را تأمین می‌کنند. امسال دولت نتوانست اوره کافی برای کشاورزان خریداری کند و به همین دلیل میزان تولید گندم نسبت به سال گذشته بیش از چهار میلیون تن کاهش یافته است. این موضوع به معنای نیاز به بیش از ۴ میلیارد دلار ارز برای واردات گندم است.

بنابراین اوره می‌تواند نقش مهمی در حل مشکل آلودگی آب‌های زیرزمینی ایفا کند. خاک‌های کشور ما قلیایی است و وقتی کود اسیدی به خاک اضافه می‌شود، این کود توسط گیاه بهتر جذب شده و مقدار کمتری از آن وارد آب‌های زیرزمینی می‌شود. اگر بخش خصوصی در زمینه تولید کود سرمایه‌گذاری کند، نه اینکه کود را فله‌ای به ترک‌ها بفروشیم تا آن‌ها بسته‌بندی و با ارزش افزوده چند برابر به کشور وارد کنند، بلکه این محصول در داخل کشور تولید شود، می‌توان به کاهش آلودگی آب زیرزمینی کمک کرد.

مثلاً استفاده از پوشش‌های گوگردی که شرکت‌های دانش‌بنیان روی آن کار کرده‌اند، اگر عملیاتی شود و کود بتواند حالت اسیدی داشته باشد، علاوه بر کاهش آلودگی، باعث ایجاد اشتغال و ارزش افزوده برای دانش نیز خواهد شد. به این ترتیب هزینه‌های درمان کاهش یافته، تولیدات کشاورزی افزایش می‌یابد و وابستگی به واردات گندم کاهش می‌یابد. مسائل محیط‌زیستی می‌توانند در چرخه‌ای قرار گیرند که هم به بهبود معیشت کشاورزان کمک کند، هم به بهبود وضعیت اقتصادی دولت، هم باعث ایجاد اشتغال و هم افزایش تولید و کاهش وابستگی شود.

در تمامی موضوعات محیط‌زیستی –می‌توانم مثال‌های متعددی ارائه دهم – اگر با نگاهی متفاوت به آن‌ها توجه شود، فرصت‌های بسیاری ایجاد خواهد شد. به‌عنوان‌نمونه، مشکل سرطان در شمال و برخی مناطق کشور که عمدتاً ناشی از نیترات موجود در منابع آب شرب است، نمونه‌ای از این مشکلات است. اگر دولت‌ها اجازه دهند بخش خصوصی وارد این فرآیندها شود، همه ذی‌نفع خواهند بود. اما می‌توانم مثال‌های زیادی بیاورم که نشان می‌دهد عدم مشارکت مردم و بخش خصوصی باعث بروز این گرفتاری‌ها شده است. برای مثال، مطالعه‌ای در دانشگاه شیراز نشان داده که میکروپلاستیک‌ها در منابع آب وجود دارند. در سد لتیان، مسئول بهره‌برداری گفته است که با هر بار بارندگی، حداقل ده کمپرسی پلاستیک از پشت سد جمع‌آوری می‌شود. آیا درباره ماهیت میکروپلاستیک‌ها به مردم اطلاع‌رسانی می‌کنیم؟ آیا اجازه می‌دهیم تحقیقات بیشتری انجام شود؟ آیا صرفاً از بعد نگرانی مطرح می‌کنیم یا راهکار هم ارائه می‌دهیم؟ آیا می‌توانیم این نگرانی را به تغییر رفتار و فرهنگ مصرف یا نحوه بسته‌بندی منتقل کنیم؟

وقتی هر موضوع محیط‌زیستی را بررسی کنیم، اگر اجازه دهیم فکر و بخش خصوصی وارد شوند و انحصار دولت شکسته شود، بسیاری از مشکلاتی که اکنون مردم متحمل می‌شوند و دولت‌ها مجبور به هزینه‌های هنگفت می‌شوند، قابل حل خواهند بود. من فکر می‌کنم اگر جلساتی با بخش خصوصی و اتاق بازرگانی در زمینه فرصت‌های بهبود محیط زیست برای کسب‌وکار برگزار شود، شرکت‌ها و افراد بسیاری را می‌توان یافت که برای مسائل محیط-زیستی راهکار و بسته‌های پیشنهادی دارند، اما چون به آن‌ها توجه نمی‌شود، بخش خصوصی نمی‌تواند به بهبود وضعیت محیط-زیست کشور کمک کند.

نقش حاکمیت را در حوزه محیط‌زیست چگونه ارزیابی می‌کنید که شرایط به اینجا رسیده است؟

وقتی درباره حکمرانی صحبت می‌کنیم، این واژه دو ریشه دارد: یکی حکمت و دیگری حکم کردن. وقتی سرکوب بخش خصوصی و محدودسازی آن رخ می‌دهد، این‌ها بخشی از «حکم کردن» است. بسیاری از کارشناسان معتقد هستند که ما مشکل حکمرانی داریم، اما زمانی که حکمرانی تعریف می‌شود، شامل شفافیت، پاسخگویی قوانین و مقررات، مشارکت مردم، تحقیق و توسعه و... است. یعنی تمام مؤلفه‌هایی که داریم، اما کارکرد لازم را ندارند و وظایفشان به درستی انجام نمی‌شود. همه این‌ها بخش‌هایی از حکمرانی هستند. وضع قوانین، آگاهی‌بخشی به مردم، نقش دادن به مردم، تحقیق و توسعه؛ همه این‌ها باید بخشی از حکمرانی باشند.

ما احتمالاً باید سلسله نشست‌هایی درباره حکمرانی و محیط‌زیست برگزار کنیم و به سوالاتی پاسخ دهیم: حکمرانی چیست؟ چه نقشی می‌تواند داشته باشد؟ چرا برنامه‌ریزی‌ها پاسخگو نیستند؟ چرا قوانین اجرا نمی‌شوند؟ مثلاً قانون برنامه ششم توسعه تنها حدود ۳۰ درصد اجرا شده است. ما اکنون سه برنامه توسعه داریم که در ۱۵ سال گذشته تنها ۳۰ درصد آن‌ها محقق شده‌اند، با وجود زمانی‌که برای تدوین آن‌ها صرف شده است. باید بررسی کنیم چرا این برنامه‌ها و قوانین جواب نمی‌دهند؟ چگونه می‌توان قوانین و برنامه‌های ما را به گونه‌ای طراحی کرد که پاسخگوی نیازهای مردم باشد؟ پاسخ در مفهوم کلیدی «حکمرانی» است؛ حکمرانی یعنی حل مسائل مردم و چالش‌های کشور بر اساس حکمت.

متأسفانه ما صرفاً از کلمات استفاده می‌کنیم اما کارکرد آن‌ها وجود ندارد. بنابراین واقعاً مشکل ما در حکمرانی است. تا زمانی‌که حکمرانی ما – که مجموعه‌ای از کلیدواژه‌ها هست – به صورت مستمر و هدفمند برای بهبود وضعیت مردم اجرایی نشود و نظارت و پایش جدی برای پیشرفت اهداف صورت نگیرد – که سازمان محیط‌زیست می‌تواند نقش مهمی در این زمینه داشته باشد – چالش‌ها باقی خواهند ماند و بعید است به سادگی حل شوند.

دکتر میترا چراغی
دانشیار گروه مهندسی طبیعت با تخصص آلودگی‌های محیط‌زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

آلودگی‌های غالب در خوزستان چیست؟ آیا مربوط به آلودگی‌های نفتی، صنعتی است یا کشاورزی؟ در صورت امکان پارامترهای آلودگی را به‌صورت کمی در منابع مهم سطحی و زیرزمینی برشمارید.

استان خوزستان به دلیل موقعیت ویژهٔ جغرافیایی و تمرکز فعالیت‌های صنعتی، نفتی و کشاورزی، هم‌زمان با چند منبع اصلی آلودگی روبه‌رو است.طبق نتایج پژوهش‌ها، می‌توان منابع عمده آلودگی را به سه گروه اصلی طبقه‌بندی کرد:

الف) آلودگی‌های نفتی

- خوزستان با وجود بزرگترین میادین نفتی کشور، همواره در معرض نشت هیدروکربن‌های نفتی، پسماند حفاری و نشت لوله‌های انتقال است.
- هیدروکربن‌های نفتی (TPH) و پلی‌آروماتیک‌های نفتی (PAHs)مقادیر نگران‌کننده‌ای دارند. به‌عنوان‌مثال:
  - در برخی مطالعات، غلظت TPH در رسوبات رودخانه کارون تا ۲۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است.
  - غلظت PAHs در آب سطحی رودخانه‌ها گاهی به بیش از۱۵ میکروگرم بر لیتر رسیده که از استاندارد WHO بالاتر است.

ب) آلودگی‌های فلزات سنگین

- منشاء آلودگی فلزات سنگین در رودخانه کارون، صنایع پتروشیمی، صنایع فولاد، فاضلاب‌های صنعتی و رواناب‌های کشاورزی می‌باشد.

پ) آلودگی‌های کشاورزی

- عمدتاً شامل نیترات، فسفات و بقایای سموم آفت‌کش می‌باشد که این آلاینده‌ها در مناطقی که وسعت زیادی از زمین‌های کشاورزی، کشت می‌شوند، غلظت بالایی از این آلاینده‌ها در آب‌های سطحی و زیرزمینی مشاهده می‌شود به‌ویژه در آب‌های زیرزمینی مناطق دشت باوی، ملاثانی، و بخشی از جنوب اهواز که از مهمترین دلایل آن، نفوذپذیری بالای خاک‌های آبرفتی، مصرف بیش از حد کودها و مدیریت نامناسب زه‌آب کشاورزی می‌باشد.

لطفاً در زمینه آلودگی نیترات و نفتی آب زیرزمینی و فاضلاب‌های صنعتی در استان خوزستان توضیح بفرمایید.

استان خوزستان به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص و نقش کلیدی‌اش در صنعت نفت و کشاورزی، با ترکیبی از مشکلات آلودگی آب‌های زیرزمینی روبه‌رو است؛ مسائلی که بخش زیادی از آن به فعالیت‌های گسترده کشاورزی، استخراج و انتقال نفت، صنایع فولاد و پتروشیمی و البته مدیریت ناکافی فاضلاب‌های صنعتی و شهری برمی‌گردد. در این میان، نیترات و ترکیبات نفتی دو آلاینده مهم هستند که هم کیفیت آب آشامیدنی مردم را تهدید می‌کنند و هم سلامت انسان و پایداری اکوسیستم‌های آبخوان را به خطر می‌اندازند.

یکی از اصلی‌ترین دلایل بالا بودن نیترات در سفره‌های آب زیرزمینی خوزستان، استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی در زمین‌های کشاورزی است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که خاک‌های آبرفتی و نفوذپذیر دشت‌های اهواز، باوی، شوشتر و ملاثانی باعث می‌شوند زه‌آب‌های کشاورزی و باقی‌مانده کودهای نیتروژنه به‌راحتی به آبخوان‌ها راه پیدا کنند. در بعضی مناطق کشاورزی، میزان نیترات چاه‌های کم‌عمق، حدود ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیز گزارش شده است؛ یعنی حدود سه تا چهار برابر بیشتر از حد مجاز توصیه‌شده توسط سازمان بهداشت جهانی. این مقدار بالا می‌تواند منجر به بیماری‌های جدی مثل «نارسایی اکسیژن در نوزادان» (متهموگلوبینمیا) یا بعضی از سرطان‌های گوارشی شود.

از طرف دیگر، نشت نفت هم یکی از دغدغه‌های جدی آب‌های زیرزمینی خوزستان است؛ به‌ویژه در مناطق نزدیک میادین نفتی بزرگ مثل اهواز، مارون، شادگان و منصوری. وجود خطوط انتقال قدیمی، حوضچه‌های حفاری و محل‌های نگهداری پسماند نفتی، راه نفوذ ترکیبات نفتی و هیدروکربن‌ها را به خاک و آب زیرزمینی باز گذاشته‌اند.

در کنار این دو منبع اصلی، فاضلاب‌های صنعتی هم شرایط را پیچیده‌تر کرده‌اند. صنایع بزرگی مثل پتروشیمی‌های ماهشهر و آبادان، کارخانه‌های فولاد و مجتمع‌های نیشکری در خوزستان حجم زیادی پساب تولید می‌کنند که اغلب حاوی ترکیبات آلی مقاوم، فلزات سنگین و هیدروکربن‌های نفتی است. اگر این فاضلاب‌ها قبل از تخلیه به طور کامل تصفیه نشوند یا مدیریت درستی نداشته باشند، بخشی از آلودگی به مرور از طریق خاک‌های ماسه‌ای و رسی به آب‌های زیرزمینی نفوذ می‌کند.

آیا به نظر شما قوانینی که در زمینه کنترل و مدیریت آلودگی وجود دارند، کامل هستند یا مشکل از درست اجرا نشدن قوانین است؟

بر اساس تجربه تهیه گزارش در مرکز پژوهش‌های مرکز شورای اسلامی، در سطح کشور قوانین و آیین‌نامه‌های پایه‌ای برای حفاظت از محیط‌زیست و کنترل آلودگی وجود دارد، اما بیشتر این قوانین یا قدیمی هستند یا به‌درستی اجرا نمی‌شوند. قانون‌هایی مثل «حفاظت و بهسازی محیط‌زیست»، «قانون جلوگیری از آلودگی آب» یا حتی استانداردهای ملی تخلیه پساب و... روی کاغذ چارچوب خوبی دارند. اما این کافی نیست که قانونی فقط نوشته شود؛ مهم این است که به‌روز باشد و دقیق و سراسری اجرا شود. مشکل از جایی شروع می‌شود که بخشی از این قوانین برای دهه‌ها پیش نوشته شده‌اند و با شرایط امروز، یعنی با صنعتی شدن گسترده، فشار جمعیتی، مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی، پسماندهای نفتی و حتی تغییرات اقلیمی هم‌خوانی ندارند.

از طرف دیگر، حتی همین قوانینی که داریم، اگر کامل و شفاف اجرا می‌شدند، وضعیت منابع آب خیلی بهتر از حالا بود. چرا؟ چون متأسفانه زیرساخت‌های پایش کیفی در خیلی از مناطق به‌ویژه در خوزستان یا کامل نیست یا به طور مستمر داده‌ها جمع‌آوری نمی‌شوند. خیلی از صنایع آلاینده موظف‌اند تصفیه‌خانه داشته باشند، ولی نظارت کافی نیست یا جریمه‌ها بازدارنده نیستند. حتی گاهی داده‌های آلودگی بین دستگاه‌ها هم به‌خوبی به اشتراک گذاشته نمی‌شود.

از سمت دیگر، در کشاورزی هم فرهنگ مصرف کود و مدیریت زه‌آب هنوز نیاز به آموزش و همراهی دارد. وقتی کشاورزان بدون برنامه کود شیمیایی مصرف می‌کنند و زه‌آب بدون مدیریت به سفره‌های آب زیرزمینی نفوذ می‌کند، حتی اگر بهترین قانون نوشته شود؛ ولی در مزرعه اجرا نشود، عملاً کار بزرگی انجام نمی‌شود.

تجربه کشورهایی که در این زمینه موفق بوده‌اند، نشان می‌دهد راه‌حل ترکیبی است: هم قانون باید متناسب با شرایط روز و آلاینده‌های نوظهور به‌روزرسانی شود، هم نظام پایش آنلاین و شفاف برقرار باشد تا هیچ‌چیز پنهان نماند، هم جرایم برای صنایع آلاینده واقعی و بازدارنده باشد، و مهمتر از همه مردم، کشاورزان و صنعتگران در این مسیر همراه و توانمند شوند.

در یک جمله، قوانین کاغذی به‌تنهایی کافی نیستند؛ مشکل بیشتر از اجرا نشدن درست همان قوانینی است که داریم. تا وقتی این چرخه اصلاح نشود، آلودگی نیترات، آلودگی نفتی و فاضلاب‌های صنعتی همچنان منابع آب زیرزمینی خوزستان و دیگر استان‌های مشابه را تهدید خواهد کرد.

نقش آگاه‌سازی مردم در قالب فعالیت‌های گروه‌های مردم‌نهاد را چگونه می‌بینید؟

تجربه‌های موفق دنیا و حتی پژوهش‌های داخل کشور نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد، ریشه اصلی بخشی از آلودگی‌های محیط‌زیست، فقط کمبود فناوری یا ضعف قوانین نیست؛ بلکه مسئله اصلی فقدان آگاهی عمومی و مشارکت واقعی مردم است. در همین مسیر، گروه‌های مردم‌نهاد یا NGOها می‌توانند نقشی کلیدی و اثرگذار داشته باشند؛ نقشی که در ایران هنوز تا حد زیادی ناشناخته و کمتر حمایت‌شده باقی مانده است.

مطالعات معتبر نشان داده‌اند که وقتی مردم به‌درستی در جریان وضعیت آلودگی آب، خاک و هوا قرار می‌گیرند و اطلاعات را در قالب زبان ساده و قابل فهم دریافت می‌کنند، احتمال اینکه رفتارهایشان را اصلاح کنند و مسئولانه‌تر با محیط‌زیست برخورد کنند بسیار بیشتر می‌شود. مثلاً کشاورزی که بداند مصرف بی‌رویه کود شیمیایی چطور می‌تواند منبع آب آشامیدنی خودش و همسایه‌اش را آلوده کند، با احتمال بیشتری به سمت روش‌های کم‌مصرف‌تر و مدیریت تلفیقی کود می‌رود.

گروه‌های مردم‌نهاد می‌توانند در این مسیر، حلقه واسط بین جامعه محلی، دانشگاه‌ها و دستگاه‌های اجرایی باشند. برای مثال، در استان خوزستان، گروه‌های محلی می‌توانند با آموزش کشاورزان در مورد مدیریت زه‌آب، فرهنگ‌سازی درباره جمع‌آوری و استفاده بهینه از فاضلاب‌های خانگی و حتی مطالبه‌گری برای بهسازی تصفیه‌خانه‌های صنعتی نقشی جدی داشته باشند. شواهد پژوهشی هم نشان می‌دهند مناطقی که در آن‌هاNGO ها فعال‌تر بوده‌اند، کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی وضعیت بهتری داشته است؛ چون مردم از حالت تماشاگر بیرون آمده و در عمل، بخشی از حل مسئله شده‌اند.

نکته مهم این است که کارگروه‌های مردم‌نهاد، فقط توزیع بروشور یا نصب بنر نیست؛ این گروه‌ها می‌توانند پل ارتباطی برای انتقال اطلاعات علمی به زبان ساده باشند. وقتی دانشگاه‌ها و محققان نتایج پایش کیفی رودخانه‌ها و آبخوان‌ها را در اختیار این گروه‌ها بگذارند، آن‌ها می‌توانند با زبان بومی، محلی و قابل درک برای جامعه منتشر کنند. این کار هم ترس بیهوده ایجاد نمی‌کند و هم امید می‌دهد که مردم می‌توانند نقش مثبت داشته باشند.

از سوی دیگر، در بسیاری از کشورها NGOها با برگزاری نشست‌های محلی، گشت‌های میدانی و پروژه‌های آموزش‌محور توانسته‌اند حتی تصمیم‌گیران محلی را متقاعد کنند که در سیاست‌گذاری‌ها صدای مردم را بشنوند. این همان چیزی است که در خوزستان هم می‌تواند نقطه عطف باشد؛ چون چالش‌های این استان مثل آلودگی نفتی و نیترات، با فرمان اداری به‌تنهایی حل نمی‌شوند و نیازمند تغییر رفتار از پایین به بالا است.

به طور خلاصه، آگاه‌سازی درست یعنی ایجاد حس مالکیت و مسئولیت در بین مردم. وقتی جوامع محلی بدانند کیفیت آبی که می‌نوشند یا خاکی که محصولاتشان را در آن می‌کارند مستقیماً به رفتارشان وابسته است، مشارکت فعالانه‌تری خواهند داشت. در این مسیر، گروه‌های مردم‌نهاد می‌توانند دست مردم را در این تغییر رفتار بگیرند، صدایشان را تقویت کنند و بین جامعه، پژوهشگران و مسئولان پیوند واقعی بسازند.

نقش مراکز پژوهشی و دانشگاه‌ها را در این زمینه چگونه ارزیابی می‌کنید؟ اگر این مراکز مؤثر هستند، چه راهکاری وجود دارد که این اثرگذاری بیشتر شود؟

واقعیت این است که دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی می‌توانند ستون فقرات مدیریت علمی منابع آب باشند؛ چون هر سیاست و تصمیم درست، نیاز به داده‌های دقیق و تحلیل علمی دارد. در بحث آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی، مخصوصاً در استان‌هایی مثل خوزستان، دانشگاه‌ها تا حد زیادی همین نقش را بازی کرده‌اند: از پایش کیفیت رودخانه کارون گرفته تا پهنه‌بندی مناطق آلوده و حتی ارائه راهکارهایی مثل استفاده از گیاه‌پالایی برای کاهش فلزات سنگین.

اما این فقط نیمه ماجرا است. همیشه این دغدغه وجود دارد که آیا این حجم از پژوهش‌ها واقعاً در عمل اثرگذار بوده‌اند؟ چرا هنوز با وجود این‌همه مقاله و پروژه دانشگاهی، در بسیاری

از مناطق شاهد وضعیت پایدار نیستیم؟ اینجا همان فاصله‌ای است که ما اساتید و پژوهشگران باید با صدای بلند درباره‌اش حرف بزنیم: اینکه پژوهش وقتی روی کاغذ باقی بماند و وارد زندگی مردم و بستر اجرایی نشود، فقط بخشی از راه را رفته‌ایم.

یکی از دلایلی که اثرگذاری بعضی پژوهش‌ها محدود می‌شود، این است که اغلب نتایج به‌صورت تخصصی و در قالب گزارش‌ها یا مقاله‌های علمی باقی می‌ماند. مخاطب این پژوهش‌ها مدیران اجرایی هستند، اما خیلی وقت‌ها در جریان جزئیات آن قرار نمی‌گیرند، یا اگر هم قرار بگیرند، امکان اجرای دقیقش برایشان فراهم نیست. از طرف دیگر، جامعه محلی هم که عملاً ذی‌نفع اصلی است، معمولاً سهمی در دیدن یا درک عملیاتی نتایج ندارد.

تجربه کشورهای موفق نشان داده که اگر دانشگاه بتواند پل ارتباطی محکمی بین خودش، مدیران و مردم بسازد، شانس اثرگذاری چند برابر می‌شود. مثلاً وقتی کشاورزان بدانند نتایج مدل‌سازی آلودگی نیترات دقیقاً به مدیریت مصرف کود آن‌ها برمی‌گردد، خودشان پای کار می‌آیند. وقتی نتایج پژوهش‌های پایش کیفی رودخانه به زبان ساده منتشر شود و گروه‌های مردم‌نهاد بتوانند آن را برای اهالی منطقه ترجمه کنند، مطالبه‌گری شکل می‌گیرد.

از نگاه من و با تجربه پروژه‌ای که در بوداپست مجارستان به دعوت شهردار Trukbalint به دست آمد، یکی از مهمترین راه‌حل‌ها برای بیشتر شدن تأثیر دانشگاه، این است که پژوهش‌ها «مسئله‌محور» و «کاربردی» باشند، نه فقط برای چاپ مقاله. یعنی باید از همان مرحله تعریف پروژه، مسئله واقعی منطقه و نیاز دستگاه‌های محلی را بشناسیم و درگیرش شویم. دوم اینکه نتایج باید با زبان ساده به مردم منتقل شود و پیگیری اجرای آن هم بخشی از وظیفه تیم‌های دانشگاهی باشد.

نکته دیگر هم این است که اگر قرار باشد همه کار فقط با بودجه پژوهشی دانشگاه پیش برود، این امکان‌پذیر نیست. همکاری با صنعت، بخش خصوصی و حتی استفاده از ظرفیت گروه‌های مردم‌نهاد می‌تواند کمک کند تا نتایج پژوهش از درِ دانشگاه بیرون برود و به تصمیم‌گیری‌های محلی وصل شود.

به‌عنوان یک عضو هیئت علمی، معتقدم اگر این پیوند بین «دانشگاه – مردم – مدیران» قوی‌تر شود، بسیاری از مشکلات آلودگی منابع آب که سال‌ها هست درباره‌اش پژوهش می‌کنیم، بالاخره وارد فاز عمل خواهد شد و اثرات ملموسش را در زندگی مردم خواهیم دید. این همان کاری است که باید برایش بیشتر تلاش کنیم: ترجمه علم به عمل، با زبان ساده، شفاف و درگیرکننده مردم.

نقش مدیریت و حکمرانی را در کنترل آلودگی چگونه می‌بینید؟ آیا مسائل اجتماعی در این زمینه می‌توانند نقش داشته باشند؟

وقتی صحبت از کنترل آلودگی‌های محیط‌زیست می‌شود، نمی‌توان نقش مدیریت و حکمرانی را نادیده گرفت. واقعیت این است که حتی اگر بهترین دانش و فناوری را هم داشته باشیم، بدون ساختار مدیریتی قوی و حکمرانی کارآمد، رسیدن به نتایج پایدار بسیار دشوار است. مدیریت یعنی سازمان‌دهی منابع، قوانین، نهادها و افراد به شکلی هماهنگ تا بتوان مسائل پیچیده‌ای مثل آلودگی‌های نفتی، نیترات یا پساب‌های صنعتی را کنترل کرد.

در خوزستان و بسیاری از مناطق دیگر، چالش‌های آلودگی به دلیل وجود صنایع بزرگ، کشاورزی گسترده و جمعیت زیاد، بسیار پیچیده است. مدیریت خوب می‌تواند با برنامه‌ریزی درست، تخصیص منابع مناسب، نظارت مستمر و اجرای دقیق قوانین، جلوی بسیاری از آسیب‌ها را بگیرد. مثلاً اگر یک سیستم پایش آنلاین و واکنش سریع به نشت نفت وجود داشته باشد، می‌توان به‌سرعت اقدام کرد و آلودگی را مهار کرد. اما اگر این سیستم‌ها ضعیف باشند یا تصمیم‌گیری‌ها کند و بدون هماهنگی باشد، مشکلات روزبه‌روز بزرگتر می‌شوند.

اما نکته مهمی که گاهی کمتر به آن توجه می‌شود، نقش مسائل اجتماعی و فرهنگی در حکمرانی محیط‌زیستی است. مسائل اجتماعی مثل باورها، نگرش‌ها، فرهنگ مصرف، میزان آگاهی مردم و اعتماد بین جامعه و دولت تأثیر عمیقی روی موفقیت سیاست‌های کنترلی دارد. مثلاً اگر مردم احساس کنند که تصمیمات حکومتی ناعادلانه یا بدون مشارکت آنها است، ممکن است همکاری نکنند یا حتی رفتارهای نادرستی مثل تخلیه غیرمجاز فاضلاب داشته باشند.

در واقع، حکمرانی خوب فقط اجرای قوانین نیست، بلکه ایجاد فضای مشارکت و همکاری بین دولت، بخش خصوصی، جامعه مدنی و مردم است. وقتی مردم در فرآیند تصمیم‌گیری دخیل شوند و صدایشان شنیده شود، مسئولیت بیشتری نسبت به حفظ محیط‌زیست خواهند داشت و مدیریت نیز کارآمدتر خواهد بود.

بنابراین، کنترل آلودگی موفق وقتی اتفاق می‌افتد که مدیریت و حکمرانی با درک عمیق از مسائل اجتماعی و فرهنگی همراه باشد. باید هم قوانین سخت‌گیرانه و نظارت قوی باشد و هم فرهنگ‌سازی و آگاه‌سازی مردم به‌صورت مستمر انجام شود تا همه به‌صورت یک تیم برای حفاظت از منابع طبیعی تلاش کنند. در نهایت، این ترکیب حکمرانی علمی، شفاف و مشارکتی است که می‌تواند تضمین کند آلودگی‌ها کنترل شده و محیط‌زیست سالمی برای نسل‌های آینده باقی بماند.

باتوجه‌به نکات مطرح شده، به‌طورکلی مشکل اصلی در مدیریت آلودگی کجا است؟ چه راه‌حل‌هایی برای بهبود شرایط پیشنهاد می‌کنید؟

واقعیت این است که وقتی درباره مشکل اصلی در مدیریت آلودگی حرف می‌زنیم، نباید فقط دنبال مقصر فنی یا یک خطای ساده باشیم؛ چون ریشه این مشکل خیلی عمیق‌تر از این‌ها است و به شکل‌گیری یک حکمرانی محیط‌زیستی

درست و هماهنگ برمی‌گردد. امروز بشر، به‌ویژه در کشورهایی مثل ایران، با چالش‌های جدی مثل تخریب منابع طبیعی، افت کیفیت خاک و آب و تهدید سلامت جامعه روبه‌رو است. اگر همین حالا برای این مشکلات فکری نشود، بار سنگینش را نسل‌های آینده باید به دوش بکشند.

مدیریت دولتی و حکمرانی محیط‌زیست یعنی همین: پیدا کردن تعادل بین منافع اقتصادی و منافع عمومی و تلاش برای برنامه‌ریزی‌ای که هم توسعه پایدار را تضمین کند و هم کمترین آسیب را به محیط‌زیست بزند. تجربه من و همکارانم در انجام مطالعات پژوهشی مثل گزارش «درآمدی بر حکمرانی خوب در بخش محیط‌زیست» که در مرکز پژوهش‌های مجلس انجام دادیم، نشان می‌دهد هر وقت شاخص‌های حکمرانی خوب (یعنی پاسخگویی، شفافیت و مشارکت واقعی) تقویت شود، کیفیت محیط‌زیست هم به طور مستقیم بهبود پیدا می‌کند.

اما مسئله اینجا است که تغییر در این سیستم، کار ساده‌ای نیست. هزینه دارد، نیاز به اصلاح ساختارها و تغییر نگرش دارد. بااین‌حال، اگر امروز این هزینه را نپردازیم، در آینده چندبرابر آن را بابت جبران تخریب منابع طبیعی، آلودگی منابع آب و کاهش کیفیت زندگی خواهیم پرداخت.

اگر بخواهم خلاصه کنم، مشکل اصلی مدیریت آلودگی در کشور ما دقیقاً همین است: نبود حکمرانی منسجم و شفاف، ضعف در اجرای قوانین موجود، ناهماهنگی بین دستگاه‌های اجرایی، و از همه مهمتر، کم‌رنگ بودن نقش مردم و ذی‌نفعان محلی در فرایند تصمیم‌گیری. در عمل دیده‌ایم که وقتی مردم پای‌کار باشند، وقتی کشاورز بداند مصرف کود زیاد چطور آب زیرزمینی‌اش را نابود می‌کند، یا وقتی صنعتگر بداند تخلیه فاضلاب بدون تصفیه چه هزینه‌ای برای جامعه دارد، اوضاع فرق می‌کند.

بنابراین راه‌حل چیست؟ از نگاه من، ما باید اول حکمرانی محیط‌زیست را جدی بگیریم: قوانین و دستورالعمل‌های کارآمد داشته باشیم، اجرای دقیق آن‌ها را تضمین کنیم، سیستم‌های پایش و نظارت را واقعی و شفاف کنیم، و مهمتر از همه، مردم و جوامع محلی را درگیر کنیم. هیچ سیاستی بدون همراهی مردم موفق نخواهد شد.

به طور خلاصه، اگر بخواهیم به سمت مدیریت پایدار آلودگی برویم، باید علم، قانون، اجرا و مشارکت واقعی مردم را مثل چهار پایه اصلی یک میز، در کنار هم تقویت کنیم. این مسیر شاید زمان‌بر باشد، اما تنها راهی است که می‌تواند منابع ارزشمند طبیعی این کشور را برای نسل‌های آینده حفظ کند.

مهندس محمد حسین نخعی صدقی
مدیر محیط‌زیست و کیفیت منابع آب شرکت آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان

آلودگی‌های غالب در استان سیستان و بلوچستان چیست؟ آیا مربوط به آلودگی‌های صنعتی است یا کشاورزی؟ در صورت امکان پارامترهای آلودگی را به‌صورت کمی در منابع مهم سطحی و زیرزمینی برشمارید.

۱- قرارگيري آبخوان خاش در جنوب آتشفشان نيمه‌فعال تفتان، و حضور سنگ‌هاي آذرين آندزيتي و بازالتي، توف و كالرملانژ باعث مي‌شود احتمال حضور عناصر سمناک و فلزات سنگين در خاک و منابع آب منطقه افزايش يابد. مطالعات هيدروژئوشيميايي بر روي چشمه‌هاي گرمابي و اسيدي و سرد دامنه‌هاي شمالي و جنوبي كوه تفتان نشان داده است كه مقادير قابل ملاحظه‌اي از عناصر سنگين و بالقوه سمناک آهن، آرسنيک، وانا‌ديم، سرب، روي، كرم، نيكل، كبالت در آب اين چشمه‌ها وجود دارد. غلظت بالاي عناصر سمناک در اين چشمه‌ها ممكن است در صورت استفاده شرب، بهداشتي و كشاورزي مشكلات جدي براي سلامت انسان به وجود آورد. در مجموع، شواهد نشان مي‌دهد كه رهاسازي عناصر سمناک و فلزات سنگين از سنگ‌هاي آتشفشاني در نتيجه عبور جريان آب سطحي و زيرزميني از مناطق دگرساني و چرخش عميق آب چشمه‌هاي گرمابي در حوزه آبريز تفتان مي‌تواند يک تهديد و خطر جدي براي آبخوان‌هاي خاش و پشتكوه در نظر گرفته شود، كه تأمين‌كننده آب شرب و كشاورزي منطقه مي‌باشند.

۲- صنايع و معادن خطري بالقوه براي آلودگي آب زيرزميني هستند. حمل و دفع پسماندهاي جامد و مايع معادن و كارخانه‌ها به‌صورت نادرست، تصادفات و نشت از جمله منابع آلودگي به شمار مي‌آيند. پسماندهاي جامد در هنگام عمليات استخراج فلزات، كاني‌هاي راديواكتيو، نمک، زغال سنگ، فسفات و غيره در معادن اجتناب‌ناپذير است. اين پسماندها در بسياري از معادن بدون رعايت نكات بهداشتي يا محوطه‌سازي مناسب بر روي سطح زمين رها شده يا اينكه در چاله‌هايي كم‌عمق ريخته مي‌شوند. در پي نفوذ باران يا جريان‌هاي سطحي در اين دپوها آبشويه ايجاد مي‌شود كه بسته به كاني‌هاي استخراج شده از معدن، جنس سنگ مادر و غيره، خصوصيات شيميايي متنوعي دارد. آبشويه‌هايي‌هاي كه به داخل خاک وارد مي‌شود منابع آب زيرزميني در زير دپو و نواحي اطراف آن را تهديد كرده يا رودخانه‌هاي مجاور را به مخاطره مي‌اندازد.

۳- طراحي و اجراي نامناسب پروژه‌هاي زيربنايي در بخش آب منجر به آلودگي آب‌هاي زيرزميني مي‌شود. اين پروژه‌ها شامل سدها و مخازن، خاكريزهاي در امتداد رودخانه‌ها، سيل‌گيرها، شبكه‌هاي آبياري زهكشي، تغذيه مصنوعي يا چاه‌هاي آب مي‌باشد. يكي از

مهمترین موارد سوء مدیریت آب در منطقه مورد مطالعه، افت سطح آب زیرزمینی منطقه بوده که منجر به حرکت آب‌هاي شور و آلوده به سمت آب‌هاي شیرین و غیرآلوده مي‌گردد.

٤- بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد مهمترین منابع آلاینده موجود در محدوده مطالعاتی، فاضلاب‌های شهری، روستایی و مراکز دفن پسماند می‌باشد. مراکز جمعیتی شهری و روستایی موجود در محدوده فاقد شبکه جمع‌آوری فاضلاب بوده و فاضلاب تولیدی به شیوه سنتی و از طریق چاه‌های جاذب دفع می‌گردد که منجر به انتقال آلاینده‌ها به منابع آب زیرزمینی می‌گردد. همچنین درحال‌حاضر در تمام مراکز جمعیتی، پسماندهای جمع‌آوری شده به روش سنتی و غیربهداشتی در محلی دفن می‌شوند و هیچگونه مدیریتی بر آنها صورت نمی‌گیرد. از این رو مراکز دفن پسماند و فاضلاب‌های شهری و روستایی به‌عنوان کانون آلاینده با پتانسیل بالا در محدوده مطالعاتی به شمار می‌روند.

٥- بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد مهمترین منابع آلاینده موجود در محدوده مطالعاتی ایرانشهر فاضلاب‌های شهری و روستایی شهرک صنعتی و مرکز دفن مواد جامد زائد می‌باشد. علاوه‌براین باتوجه‌به رونق کشاورزی در این منطقه می‌توان فعالیت های کشاورزی را نیز از جمله عوامل اثرگذار بر کیفیت آب در نظر گرفت.

پیشگیری از آلودگی آب از اهمیت شایان توجهی برخوردار است چرا که رفع آلودگی اگر امکان‌پذیر هم باشد هزینه و زمان زیادی را به خود اختصاص می‌دهد. آب را در اثر تصفیه می‌توان پاکیزه نمود؛ ولی این عمل آلودگی آن را کاملاً برطرف نمی‌کند؛ بنابراین نمی‌توان آب را از کلیه مواد آلوده‌کننده آن پاک ساخت؛ زیرا عوامل آلوده کننده زیاد بوده و جهت از بین بردن هریک از آن‌ها تصفیه به خصوصی لازم است. پس برای مبارزه اساسی با آلودگی آب باید منشأ آلودگی را شناخت و در همان منبع با آن مبارزه کرد.

لطفاً در زمینه آلودگی نیترات آب زیرزمینی و فاضلاب‌های صنعتی در استان سیستان و بلوچستان توضیح بفرمایید.

از بررسی نقشه‌های حریم کیفی چاه‌های محدوده‌های مطالعاتی مشاهده می‌شود که حریم کیفی اکثر چاه‌های این محدوده در نواحی با کاربری کشاورزی قرار دارد و احتمال آلودگی با سموم کشاورزی، کودها و نیترات در این چاه‌ها وجود دارد.

آیا به نظر شما قوانینی که در زمینه کنترل و مدیریت آلودگی وجود دارند، کامل هستند یا مشکل از درست اجرا نشدن قوانین است؟

اثربخش نبودن قوانین موجود، نبود سیستم جامع و به‌روز در حوضه آلودگی منابع آب، عدم وجود قوانین سخت‌گیرانه در حوضه آلودگی منابع آب، عدم تعیین مجازات کیفری مشخصی برای آلوده‌کنندگان منابع آب و قانون‌گریزان در این زمینه و از طرفی نادیده گرفته شدن اندک قوانین موجود در حوضه کیفیت منابع آب توسط مدیران بالادستی در شرکت‌های تابعه و حتی نادیده گرفتن دفاتر کیفی در شرکت‌های آب منطقه‌ای

بازتاب آلودگی منابع آب در منابع اینترنتی

رودخانه قره‌سو و افزایش مخاطرات محیط‌زیستی آن

سرچشمه‌های رودخانه قره‌سو در روستاهای بالادست شهرستان نمین واقع شده است و در طول مسیر دو سه رودخانه فصلی هم به آن اضافه شده و در ادامه تا مشکین‌شهر و شهرهای شمالی استان اردبیل جریان می‌یابد، این رودخانه در نهایت از طریق بالهارود به ارس می‌ریزد.

این رودخانه که روزگاری برای ساکنان حاشیه آن خیر و برکت به همراه داشته است امروز شرایط مناسبی ندارد و ورود پساب صنعتی و فاضلاب مشکلات عدیده‌ای برای اهالی این روستاها ایجاد کرده است.

در همین زمینه مرتضی طاهری‌فر، معاون دادستان مرکز استان اردبیل با بیان اینکه نباید واقعیات را کتمان کنیم، گفت: نتیجه کتمان واقعیت همین شرایط اسف‌باری است که در رودخانه قره‌سو شاهد هستیم.

وی اضافه کرد: دادستانی مرکز استان و شهرستان نمین از چند سال قبل به این مسئله ورود کرده و در بازدیدهای میدانی و جلسات تخصصی موضوع را بررسی کرده است.

طاهری‌فر با تأکید بر اینکه نباید به همه چیز نگاه قضایی و سلبی داشته باشیم، گفت: مسئله آلودگی رودخانه قره‌سو یک‌شبه رخ نداده است، واقعیت این است که این وضعیت از گذشته به دلیل عدم مسئولیت‌شناسی مسئولان وقت به این روز افتاده است.

وی با بیان اینکه وعده‌های داده شده در باره قره‌سو باید عملی شود، خاطرنشان کرد: شرایط موجود خطرات جدی هم برای محیط‌زیست، هم مصارف کشاورزی و دامی و هم برای طبیعت به همراه دارد و سلامت شهروندان را تهدید می‌کند.

طاهری‌فر با بیان اینکه برطرف کردن آلودگی این رودخانه یک مطالبه مردمی است و دادستانی پیگیر این مطالبه است، اضافه کرد: دستگاه‌های ذی‌ربط اعم از محیط‌زیست، شرکت آب و فاضلاب، شرکت شهرک‌های صنعتی و شهرداری باید به تناسب مسئولیت خود پاسخگو باشند و هر کس به وظیفه خود عمل کند (ایرنا، ١٤٠٤الف).

آلودگی آب‌ها در گیلان؛ تهدیدی جدی برای سلامت مردم و محیط‌زیست

به گزارش خبرنگار گروه اســتان‌های خبرگزاری دانشــجو، در ســال‌های اخیر آلودگی آب‌ها به یکی از جدی‌ترین چالش‌های این اسـتان تبدیل شـده اسـت. ورود آلاینده‌ها و فاضـلاب‌ها به دریاچه‌ها و رودخانه‌ها نه تنها به سلامت محیط‌زیست آسیب می‌زنـد، بلکـه زنـدگی مردم بومی را نیز تحـت تـأثیر قرار داده اســت. بر اســاس جدیدترین گزارش‌ها، رودخانه‌های اســتان گیلان از جمله رودخانه‌های ســفیدرود، زرجوب و گوهررود با حجم زیادی از فاضـلاب صـنعتی و خانگی روبه‌رو هسـتند که به‌شـدت کیفیت آب را کاهش داده و به سـلامت شـهروندان آســیب می‌زنند. این آســیب‌ها در برخی موارد به‌صــورت بیماری‌های پوستی، مشـکلات تنفسـی و بیماری‌های گوارشـی نمایان می‌شود.

طبق برآورد کارشــناســان، زرجوب آلوده‌ترین رودخانه اســتان گیلان و حتی کشور است. عمق فاجعه محیط‌زیستی و انسانی آنجا مشــخص می‌شــود که عمده آب شــرب و کشــاورزی شــهرســتان رشــت از زرجوب و گوهررود تأمین می‌شــود. این یعنی محیط‌زیســت و از آن مهمتر، مردم رشــت و به‌تبع آن اســتان گیلان، اصــلی‌ترین قربانی وعده‌وعیدها و آلودگی‌های فزاینده هسـتند. عماد مطالبی، مشـاور کمیسـیون بهداشـت و محیط‌زیست و خدمات شهری شورای شهر رشت، اظهار کرد: حفظ زرجوب و گوهررود نیازمند اقدام عملی و فوری اســت و باید حیات و زیست شهروندی همه رشتوندان را از این تهدید و بلای بهداشت و سلامت جامعه نجات دهیم؛ زیرا آیندگان ما را قضـاوت خواهند کرد که چگونه بی‌تفاوت بودیم و هیچ چاره و اقـدام عملی واقعی برای این مشــکـل بزرگ نـداشــتیم (خبرگزاری دانشجو، ۱۴۰۲).

فسفر سد ژاوه ۶/۵ برابر استاندارد؛ رکورددار آلودگی در کشور

به گزارش ایرنا (۱۴۰۴ب)، ســد ژاوه در ۳۹ کیلومتری جنوب غربی ســنندج و در مســیر جاده ســنندج - کامیاران، بر روی رودخانه گاورود (ژاوه‌رو) احداث شده است؛ ساخت این سد از سال ۱۳۸۸ آغاز و ساختمان آن در سال ۱۳۹۳ به پایان رسید.

ظرفیت ذخیره‌ســازی این ســد حدود ۹۵ میلیون مترمکعب اعلام شــده که در صــورت بهره‌برداری کامل، امکان انتقال سالانه ۷۰ میلیون مترمکعب آب به دشت‌های قروه و دهگلان فراهم می‌شود.

با وجود تکمیل زیرساخت‌های سد، موضوع کیفیت آب ورودی به آن، اکنون به دغدغه‌ای اساسی برای متخصصان و فعالان محیط‌زیسـت تبدیل شـده اسـت؛ حبیب‌الله محمدی، عضـو هیئت علمی دانشگاه کردستان، از جمله منتقدان آبگیری این سد در شرایط فعلی است.

وی باتوجه‌به بررســی‌های علمی انجام شــده، تأکید می‌کند آبگیری سد ژاوه، بر اساس وضعیت فعلی و تجمع حجم بالایی از آلاینده‌های میکروبی، شـیمیایی و صـنعتی فاقد صـلاحیت علمی و محیط‌زیستی است؛ آب این سد به شدت آلوده بوده و حتی برای کشاورزی هم قابل استفاده نیست.

به گفته محمدی، فاضــلاب حدود ۸۰ تا ۸۵ روســتا به طور مستقیم یا غیرمستقیم به رودخانه‌های منتهی به این سد وارد می‌شـود؛ همچنین خروجی تصـفیه‌خانه آب شـرب سـنندج، فاضـلاب خام نایسـر و برخی مناطق دیگر، به همراه بخشـی از جریان رودخانه گاوه‌رود به مخزن سد راه می‌یابند.

او می‌افزاید: پس از تصفیه، خروجی فاضلاب سنندج دارای بار میکروبی و میزان بالایی از فسـفر اسـت؛ افزون بر این، آلودگی ناشی از کشتارگاه‌ها و دامداری‌ها نیز وارد زنجیره آب سد شده و در نهایت همه این آلاینده‌ها در مخزن سد انباشته می‌شوند.

این عضو هیئت علمی دانشگاه کردستان می‌گوید: سد ژاوه با ظرفیت ذخیره ۹۵ میلیون مترمکعب آب، در شرایط فعلی برای آبگیری مناسب نبوده و آبگیری مرحله‌ای هم عملاً به تشـکیل گنداب منجر خواهد شد.

به گفته محمدی رشـد شـدید گیاهان هرز و عدسـک آبی در سطح آب سد و جلبک‌ها، پس از مرگ، لایه‌های ضخیم لجن ایجاد کرده و شــرایط بی‌هوازی را به وجود می‌آورد که این امر منجر به تولید گازهای متعفن نظیر متان و ســولفید هیدروژن می‌شــود و با توجه به جهت باد غالب (جنوب غرب به‌ســوی شــهر ســنندج)، بوی این گازها می‌تواند به شــهر نفوذ کند و بحران جدی محیط‌زیستی ایجاد کند.

او می‌گوید: از منظر شــاخص تغذیه‌گرایی (Eutrophication)، آب ســد ژاوه با غلظت فسـفر ۶۴۵ میکروگرم در لیتر، بالاترین میزان تغذیه‌گرایی را در میان سـدهای کشـور دارد و بر اسـاس اســتانداردهای علمی، عبور میزان فســفر از ۱۰۰ میکروگرم در لیتر، نشان‌دهنده وضعیت فوق تغذیه‌گراست.

آب ســد ژاوه با غلظت فسـفر ۶۴۵ میکروگرم در لیتر، بالاترین میزان تغذیه‌گرایی را در میان سـدهای کشـور دارد و بر اسـاس اســتانداردهای علمی، عبور میزان فســفر از ۱۰۰ میکروگرم در لیتر، نشــان‌دهنده وضــعیت فوق تغذیه‌گراســت. نکته حائز اهمیت این اســت که ســد ژاوه در مقایســه با ســد قشــلاق ســنندج که پس از ۴۷ ســال هنوز به مرحله فوق تغذیه‌گرایی نرسیده است، ولی سد ژاوه در صورت آبگیری، بالاترین سطح تغذیه‌گرایی را خواهد داشت.

این استاد دانشگاه کردستان ادامه می‌دهد: این میزان فسفر رشـد شـدید جلبک‌ها را در پی خواهد داشـت که مشـکلاتی مشابه سد داریان اما با شدت بسیار بیشتر برای تأسیسات پایین‌دست سد ایجاد می‌کند.

محمدی با استناد به مطالعات علمی انجام شده تأکید می‌کند که آبگیری ســد ژاوه در شــرایط فعلی منجر به ایجاد بحران محیط‌زیسـتی خواهد شـد و چنین عملی فاقد هر گونه توجیه علمی است.

او می‌گوید: هرگونه تخصــیص آب از این ســد به اســتان، به معنای انتقال فاضلاب است و استفاده از سدهایی مثل سد آزاد به‌عنوان جایگزین برای تأمین آب اکیداً توصیه می‌شود.

آبگیری مقطعی ۳/۱ میلیون مترمکعبی برای اهـداف فنی نیز مورد مخالفت کارگروه اســتانی بوده، اما بدون توجه به نظر کارشــناســان، این اقدام انجام شــده اســت؛ به گفته دکتر محمدی، اسـتدلال مسـئولان سـد مبنی بر «آبگیری به‌منظور

مشاهده نتایج» از منظر علمی مردود است؛ زیرا نتایج آن کاملاً پیش‌بینی‌پذیر است.
این استاد دانشگاه کردستان می‌گوید: برخلاف کشورهای پیشرفته همچون آلمان و ژاپن که پایش دقیق و مداومی بر آب سدها و فاضلاب‌ها دارند، در ایران حتی در اوج آلودگی، تست آبگیری اجرا می‌شود که رویکردی فاقد توجیه فنی است.

بررسی‌های سال‌های ۱۳۹۲، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۹ هم عدم صلاحیت آب سد ژاوه را تأیید کرده است؛ همچنین هنوز آلودگی‌ها رفع نشده و تصفیه‌خانه ساندج قابلیت پالایش حجم فزاینده آلاینده‌ها را ندارد؛ برای مثال، در برخی زمان‌ها، بایپس خروجی تصفیه‌خانه تا ۶۰۰ تا ۷۰۰ لیتر بر ثانیه می‌رسد و در دوره بارندگی، رواناب نیز وارد رودخانه‌ها می‌شود (خبرگزاری ایرنا، ۱۴۰۴الف).

دکتر حسین مصطفوی
عضو هیئت علمی پژوهشکده علوم محیطی دانشگاه شهید بهشتی

یک رودخانه در چه شرایطی، آلوده به حساب می‌آید؟

رودخانه آلوده به معنای تغییر مقدار هر نوع ماده شامل مواد شیمیایی، فیزیکی یا بیولوژیکی نسبت به حد مجاز و نرمال آن برای کاربردهای مختلف است؛ اما مشکلات رودخانه‌های کشور ما فراتر از این‌ها است و مشکلات متعددی وجود دارد که به‌صورت اکولوژیکی در حال نابودی رودخانه‌های ایران است.

اهمیت پرداختن به این موضوع چیست؟

برای پی‌بردن به اهمیت موضوع در ابتدا باید به خدمات و اهمیت رودخانه‌ها برای ذی‌نفعان اشاره کنیم. یکی از ذی‌نفعان اصلی انسان‌ها هستند که طبقات مختلف دارند، مانند کشاورزان، جوامع محلی، سازمان‌ها و ارگان‌های مختلف، دیگری زیستمندان و گونه‌هایی که در داخل رودخانه‌اند یا به‌صورت شبکه غذایی و زنجیره غذایی به حیات رودخانه وابسته‌اند.
برای مثال در حوضه خزر، رودخانه‌ها شریان‌های حیاتی برای گونه‌های شیلاتی هستند، زیرا برخی از ماهیان مانند ماهیان خاویاری یک مرحله از زندگی خود را در رودخانه‌ها می‌گذرانند و اگر نتوانند این مرحله را طی کنند چرخه تولید مثل این گونه‌ها از بین می‌رود که هم فشار قابل‌توجهی بر جمعیت این گونه آبزی و زیستگاه آن وارد می‌آورد و هم بر مصرف خاویار و گوشت آن تأثیر خواهد گذاشت، به علاوه به لحاظ ارزآوری روی اقتصاد کشور هم اثرگذار خواهد بود .
رودخانه‌ها خدمات گوناگونی مانند تأمین غذا، تولید انرژی، گردشگری، توسعه کشاورزی و صنعت مصرف آب شرب و... ارائه می‌کنند. با شناخت این خدمات می‌توانیم به اهمیت سالم نگه داشتن این اکوسیستم که حیات و بقای ما را تضمین می‌کند پی‌ببریم و برای این هدف تلاش کنیم. خداوند متعال هم در قرآن در آیه ۳۰ سوره انبیا در این راستا می‌فرماید: " وَجَعَلنا مِنَ الماءِ كُلَّ شَی ءٍ حَیٍّ"

در کشورهای پیشرفته دنیا برای حل این معضل چه تدابیری اندیشیده می‌شود؟

کشورهای توسعه یافته اروپایی برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۷ برنامه منسجمی طراحی کردند که شامل ارزیابی، شناسایی انواع چالش‌ها و انجام اقدامات عملیاتی بوده تا بتوانند رودخانه‌ها را طوری احیا کنند که خدمات از دست رفته آن‌ها برگردد. ما هم اگر بخواهیم رودخانه‌های سالمی داشته باشیم باید مانند این کشورها به‌صورت یکپارچه به جنبه‌های مختلف این موضوع توجه کنیم.
یکی از این جنبه‌ها، تغییرات کاربری اراضی است. در دهه‌های اخیر، توسعه در بیشتر نواحی کشور، به شکل ناپایدار صورت گرفته که اگر با برنامه‌ریزی درست انجام می‌شد، می‌توانست موفق‌تر باشد و آسیب کمتری به محیط‌زیست وارد کند. برای مثال، رودخانه‌های استان گلستان در فصل تابستان از قسمت‌های میانه آب ندارند و این مسئله تنها به‌خاطر تغییر اقلیم نیست، بلکه به دلیل توسعه کشاورزی ناپایدار و الگوی کشت نامناسب با توجه به شرایط اقلیمی است.
دردناک است که بگوییم در برخی از استان‌ها مانند فارس، اصفهان، لرستان و... کشت برنج را توسعه داده‌اند، درحالی‌که با توجه به اقلیمشان پتانسیل آن را ندارند. در شرق حوضه خزر هم همین اتفاق افتاده و در سال‌های اخیر برداشت بی‌رویه آب به‌خاطر کشت برنج مشکلات زیادی به بار آورده است. در مناطقی که کمبود آب وجود داشته باشد چاه‌های غیرمجاز حفر می‌کنند که باعث فرونشست زمین می‌شود و از این نظر کشور ما رتبه قابل‌قبولی در دنیا ندارد.

کم‌آبی و آلودگی آب چه ارتباطی با یکدیگر دارند؟

همه این موارد به‌صورت اکولوژیکی با هم در ارتباط‌اند. متأسفانه در کشور ما برای ایجاد توسعه، عوارض آن به‌درستی در نظر گرفته نمی‌شود. در کنار دریاچه ارومیه که دغدغه هر ایرانی است میزان زیادی باغ‌های سیب در ارتفاعات و شیب‌ها احداث شده که نیاز به آبیاری فراوان دارد.
مورد دیگر، ریختن پساب‌های کشاورزی به رودخانه‌هاست. این پساب‌ها دارای کود، سموم و فلزات سنگین هستند که علاوه بر کاهش کیفیت آب می توانند از طریق زنجیره غذایی، عامل ایجاد سرطان و سایر بیماری‌ها شوند و هزینه‌های گزافی برای مردم و دولت ایجاد کنند.
یکی از مشکلاتی که کم‌آبی برای رودخانه‌ها ایجاد می‌کند این است که با کم شدن آب، رودخانه خاصیت خود پالایی را از دست می‌دهد و همین امر باعث آلوده‌تر شدن آب رودخانه‌ها و کاهش کیفیت مناسب آب می‌شود.

بنده هفته گذشته در شهر نور بودم و به من اطلاع دادند دچار کمبود آب هستیم. آیا کمبود آب در شمال ایران نامفهوم نیست؟ این مسئله زنگ خطری برای کشور است. کمبود آب در نواحی کم‌آب کشور باعث مهاجرت افراد زیادی به شمال ایران شده و این افزایش جمعیت، مسائلی مثل خرید زمین، توسعه ساخت‌وسازهای بی‌رویه و رشد ناپایدار برای شمال کشور ایجاد خواهد کرد که به‌طورقطع در آینده مشکل‌ساز خواهد بود.

بنده نگرانم که خطه سرسبز شمال هم در آینده دور یا نزدیک تبدیل به کویر شود. این قضیه یک فاجعه بزرگ محیط‌زیستی برای کل کشور به وجود خواهد آورد و مسئولان از همین حالا باید به فکر آن باشند.

برای حل این موضوع چه راهکاری پیشنهاد می‌دهید؟

ظرفیت و برد مهاجرت برای هر استان باید مشخص و از ساخت‌وسازهای بی‌رویه و غیرقانونی در حریم رودخانه‌ها و در سطح حوضه‌های آبریز جلوگیری شود. با افزایش جمعیت، فشار بر منابع هم افزایش پیدا می‌کند و محیط‌زیست آسیب می‌بیند. در برخی نقاط از «سپتیک تانک» (مخزن تصفیه فاضلاب) استفاده می‌شود؛ اما این کار معمولاً در ارتفاعات جواب نمی‌دهد و فاضلاب در نهایت به آب‌های زیرزمینی نفوذ پیدا کرده و سبب آلوده شدن آنها می‌شود. همچنین تراشیدن جنگل‌ها برای جاده یا ساخت‌وساز باعث بالابردن سرعت آب شده و سیلاب‌ها را بیشتر می‌کند که عوارض محیط‌زیستی، انسانی و اقتصادی خود را دارد.

رودخانه‌ها با چه تغییرات دیگری مواجه‌اند؟

یکی از این تغییرات، تغییر در پیوستگی‌های رودخانه‌ها است، یعنی بر سر راه رودخانه‌ها مانعی قرار گیرد که از مهاجرت ماهی‌ها جلوگیری کند و باعث تغییرات فیزیولوژیکی آن‌ها شود. یکی از این موانع، وجود سدها هستند. در برخی کشورها در کنار سدها مسیرهای ماهی‌رو ایجاد می‌کنند تا مانعی برای مهاجرت ماهی‌ها به‌وجود نیاید و حقابه (حداقل میزان آبی که لازم است تا رودخانه پایدار بماند و تأثیرات اکولوژیکی به حداقل برسد) تعیین می‌کنند.

همچنین برای ساخت پل بر روی رودخانه و استحکام آن سازه‌های مستحکمی با ارتفاع می‌سازند و یک سیل‌بند به وجود می‌آورند؛ اما باید مسیرهای ماهی‌رو در نظر گرفته شود تا گونه‌های مختلف بتوانند مهاجرت بلندمدت، کوتاه‌مدت، داخلی و خارجی (از دریا به رودخانه و برعکس) انجام دهند.

در ایران چنین کارهایی انجام نمی‌شود، بنابراین ماهی‌هایی مثل ماهی خاویار و ماهی سفید وقتی به رودخانه می‌آیند و نمی‌توانند مهاجرت کنند تولید مثل آن‌ها با شکست مواجه خواهد شد. تغییر دیگر مربوط به تغییرات هیدرولوژیکی رودخانه‌ها است که معمولاً بر اثر مدیریت نشدن آب سدها و برداشت بی‌رویه برای باغات و زمین‌های کشاورزی اتفاق می‌افتد. برای مثال دریاچه ارومیه خشک شده اما آب در سدها هست. من نمی‌گویم سد نباید ساخته شود؛ اما تأکید می‌کنم قبل از هر کاری باید ارزیابی همه‌جانبه صورت بگیرد.

متأسفانه ما سدهایی داریم که آبی در آن‌ها وجود ندارد یا آب درون سد آن‌قدر کم است که نمی‌توانند رهاسازی کنند. در گذشته رودخانه‌هایی داشتیم که یک فرد بزرگسال نمی‌توانست از آن عبور کند؛ اما درحال‌حاضر یک کودک به‌راحتی از آن عبور می‌کند.

اگر برای انجام هر کار، ارزیابی دقیق انجام گیرد و برای کاهش خسارت‌های محیط‌زیستی، راهکارهای مطلوب و کاربردی ارائه شود، هم توسعه شکل می‌گیرد و هم محیط‌زیست آسیب نمی‌بیند و هم بقای اکوسیستم حاصل می‌شود.

مشکل دیگر مربوط به تغییرات کیفی آب رودخانه‌ها است که منشأ آن‌ها پساب‌های رها شده شهری، کشاورزی و صنعتی بدون تصفیه یا بدون تصفیه مطلوب است. توسعه بدون مطالعه و ارزیابی کارگاه‌های تولید شن و ماسه در حاشیه بیشتر رودخانه‌ها، دپوی زباله‌ها در حاشیه رودخانه‌ها یا مناطقی که به لحاظ مخاطره محیط‌زیستی به‌درستی ارزیابی نشده‌اند، توسعه بی‌رویه مزارع پرورش ماهی به‌خصوص سردابی، گسترش رستوران‌های بین‌راهی در حاشیه رودخانه‌ها بدون رعایت ضوابط محیط‌زیست برای زباله‌های آن‌ها و عدم کنترل بر پساب سمی برخی از صنایع از جمله مشکلاتی هستند که می‌توانند بر کیفیت آب رودخانه تأثیرات نامناسبی بگذارند .این مسائل باید ساماندهی شوند. برای مثال باید به سمت توسعه سیستم‌های زباله‌سوز و سیستم های تصفیه مدرن برویم.

سال گذشته برای ارزیابی رودخانه «توجی» استان مازندران دعوت شدم و متأسفانه چندین هزار بچه‌ماهی به‌خاطر فاضلاب سمی یک کارخانه تلف شده بودند. پساب سمی علاوه بر تلف کردن ماهی‌ها می‌تواند به داخل رودخانه رسوب کرده و از طریق زنجیره غذایی سبب آسیب دیدن اکوسیستم و ذی‌نفعان آن به‌خصوص انسان شود.

در ژاپن، کارخانه‌ای با ریختن جیوه در رودخانه علاوه بر آسیب زدن به حیات‌وحش باعث شد تا سال‌ها کودکان ناقص در آن منطقه متولد شوند. بعضی از آفت‌ها و بیماری‌ها بین انسان و حیوانات مشترک هستند و این بی‌مسئولیتی‌ها باعث آسیب دیدن هر دو گونه (انسان و حیوان) می‌شود. بسیاری از کارخانه‌ها یا سیستم تصفیه ندارند یا سیستمشان قدیمی شده است.

مشکل دیگر تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها است، یعنی رودخانه‌ها را به شکلU در می‌آورند که باعث از بین رفتن بستر، دیواره‌ها و پوشش گیاهی می‌شود .این مسئله علاوه بر تنوع زیستی، ممکن است باعث ایجاد سیلاب‌های وحشتناک هم بشود.

مشکل بعدی بیولوژیکی یا زیستی است، مانند صید بی‌رویه گونه‌های آبزیان و صیدهای غیرقانونی مانند کشتن ماهی‌ها با سموم مختلف، جریان الکتریکی، دام‌های گوشگیر و ورود گونه‌های غیربومی که هرچه شرایط رودخانه‌ها نامساعدتر شود شرایط برای زیست آن‌ها بیشتر فراهم می‌شود، زیرا گونه‌های غیربومی، گونه‌های مقاومی هستند و با آب کم و

حتی لجن هم می‌توانند زندگی کنند. درحال‌حاضر در برخی رودخانه‌ها ماهی‌های کاراس، آمورچه و گامبوزیا زیست می‌کنند که میزبان آلودگی‌ها هستند و با گونه‌های بومی که ذخایر کشور هستند، رقابت غذایی دارند.
همچنین با آلودگی زیستی یا بیولوژیکی رودخانه‌ها هم مواجه هستیم که به ورود میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، مواد آلی و سایر مواد زیستی غیرطبیعی به رودخانه‌ها اشاره دارد و می‌تواند سلامت انسان‌ها و حیات‌وحش را تهدید کند .این نوع آلودگی می‌تواند از منابع مختلف ازجمله فاضلاب‌های شهری، فاضلاب‌های صنعتی، کودهای شیمیایی و پسماندهای کشاورزی ناشی شود.

سخن آخر؟

عوامل تهدیدکننده رودخانه‌ها مختلف و همه این چالش‌ها بر روی هم به‌صورت اکولوژیکی و یکپارچه مؤثر هستند و اگر اقدام علمی و فوری انجام نشود درگیر مشکلات عظیم‌تری خواهیم شد؛ بنابراین باید مانند اروپا مشخص شود که در بازه‌های مختلف، چه نوع و چه تعداد استرس یا فشار محیط‌زیستی وجود دارد تا با ایجاد راهکارها و اقدامات مناسب و همکاری تمام ارگان‌ها و سازمان ها آن‌ها را مدیریت کنیم و همه شرایط لازم برای بهره‌برداری پایدار فراهم شود (خبرگزاری اطلاعات آنلاین، ۱٤۰٤).

ارزیابی مصاحبه‌های انجام شده با متخصصان حوزه آلودگی منابع آب زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار تحلیل داده‌های کیفی MAXQDA ۲٤

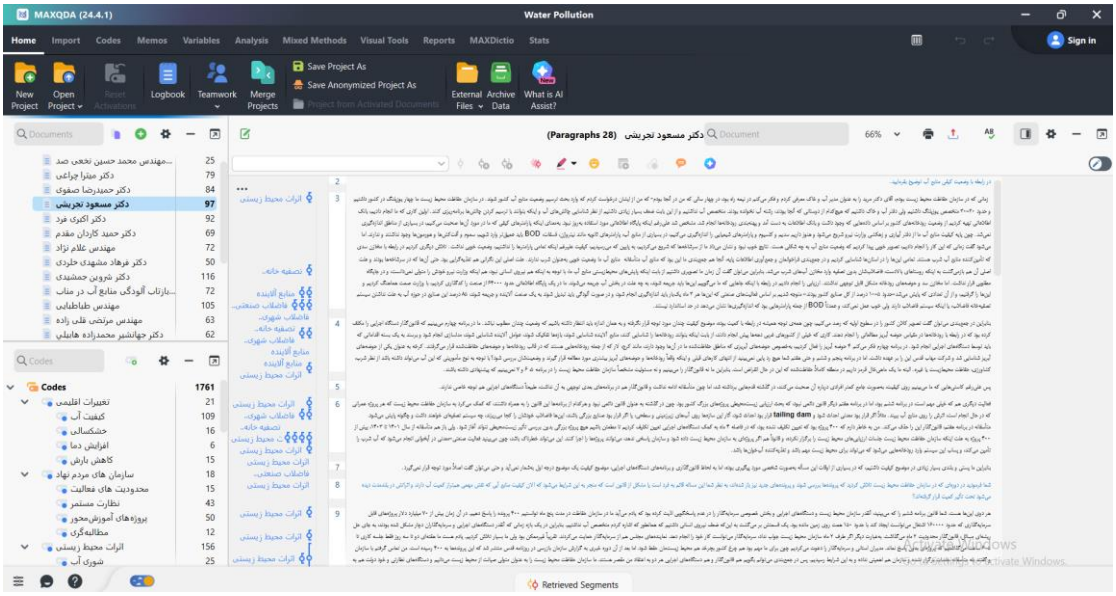
نرم‌افزار MAXQDA یکی از ابزارهای پیشرفته در تحلیل داده‌های کیفی است که امکان کدگذاری متون، مصاحبه‌ها، و اسناد مختلف را به شکل ساختاریافته و سیستماتیک فراهم می‌آورد. کدگذاری در این نرم‌افزار به معنای اختصاص‌دادن یک کد به بخش‌های مشخصی از متن است که نشان‌دهنده مفهوم یا موضوع خاصی می‌باشد. این فرآیند به پژوهشگر کمک می‌کند تا علاوه بر تحلیل محتوایی، میزان اهمیت یا فراوانی هر موضوع در میان متخصصان را نیز به طور کمی نشان دهد. در مجموع، نشان‌دهنده رویکرد منظم و تحلیلی پژوهش برای گردآوری، سازماندهی و تحلیل داده‌های کیفی است که امکان بررسی عمیق‌تر موضوعات را فراهم می‌آورد. در این مطالعه به تحلیل داده‌های کیفی حاصل از مصاحبه با متخصصان حوزه آلودگی آب‌های زیرزمینی و برداشت دیدگاه‌های تخصصی آن‌ها پرداخته شده است. با استفاده از قابلیت‌های این نرم‌افزار، الگوها و مفاهیم کلیدی شناسایی شدند. در شکل ۲، تحلیل و کدگذاری مصاحبه‌ها و مستندات ارائه شده است. به‌طورکلی، ۱۷٦۱ کد از مجموع مصاحبه‌ها استخراج گردید. همچنین در شکل (۳)، فراوانی کدها در محورهای مصاحبه‌ها، به‌منظور تحلیل رابطه بین مضامین مختلف و بررسی فراوانی کدها در داده‌های کیفی آورده شده است. پس از تحلیل داده‌های کیفی مصاحبه با متخصصان حوزه آلودگی منابع آب زیرزمینی، محورهای کلیدی شامل موارد زیر می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۱- کدهای محوری و کدهای باز مستخرج از مصاحبه‌های انجام شده با متخصصان حوزه آلودگی منابع آب زیرزمینی

کدهای محوری و کدهای باز آلودگی منابع آب زیرزمینی			
تغییرات اقلیمی • کیفیت آب • خشکسالی • افزایش دما • کاهش بارش	سازمان مردم‌نهاد (NGO) • نظارت مستمر • پروژه‌های آموزش‌محور • مطالبه‌گری • محدودیت‌های فعالیت	اثرات محیط‌زیستی • فرونشست زمین • خشکیدگی تالاب‌ها • آلودگی نیترات • آلودگی فلزات سنگین • شوری آب	
چالش‌های قانونی • خلأ قانونی • ضعف قوانین • ضعف اجرا • تداخل سازمانی • نبود نظارت • عدم شفافیت	منابع آلاینده • شیرابه زباله • پسماند شهری • نشت نفت • پساب‌های صنعتی • رواناب کشاورزی • فاضلاب صنعتی • فاضلاب شهری	راهکارها • حکمرانی مؤثر • مدیریت پایدار • مشارکت مردمی • مدیریت پسماند • کشاورزی پایدار • بازچرخانی آب • تصفیه‌خانه	

در شکل (۲)، تحلیل و کدگذاری مصاحبه‌ها و مستندات با استفاده از نرم‌افزار MAXQDA ارائه شده است. این تحلیل به صورت تفکیکی بر اساس نام مصاحبه‌شوندگان که متخصصان حوزه آلودگی آب‌های زیرزمینی هستند، انجام شده است. بنابراین، هر ستون جدول مربوط به یک مصاحبه‌شونده یا منبع خبرگزاری است و کدگذاری‌ها نشان می‌دهد که هر کدام از این متخصصان چه موضوعات و مفاهیمی را بیشتر مورد تأکید یا بحث قرار داده‌اند.

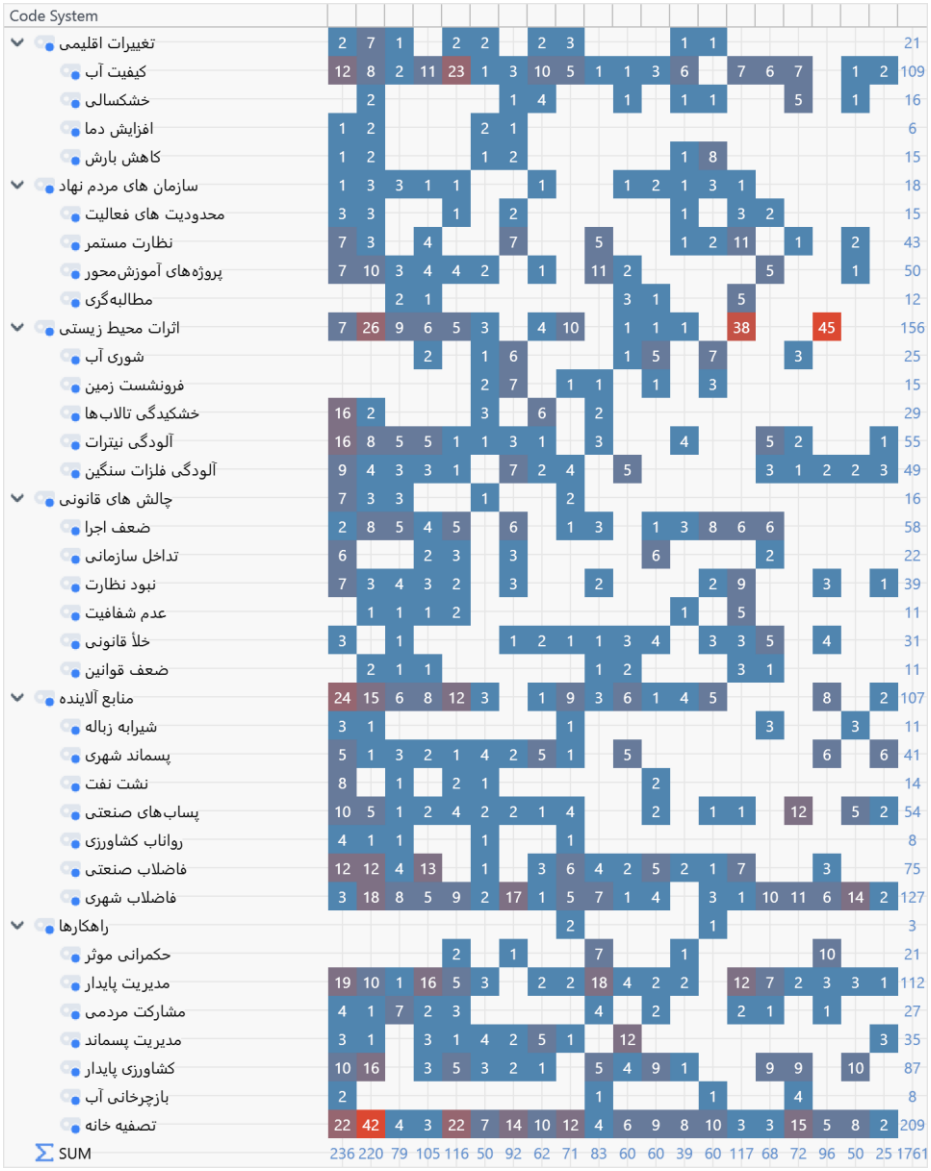
هر کدگذاری با هدف نشان‌دادن موضوعات کلیدی مانند تغییرات اقلیمی، سازمان‌های مردم‌نهاد، اثرات محیط‌زیستی، چالش‌های قانونی، منابع آلاینده و راهکارهای پیشنهادی صورت گرفته است که هر کدام به زیرشاخه‌های مرتبط تقسیم‌بندی شده و در گفتگوهای تخصصی برجسته شده‌اند. این فرآیند اهمیت موضوعات مختلف را برجسته ساخته و چارچوبی نظام‌مند برای تحلیل تدوین نموده است.



شکل ۲- تحلیل و کدگذاری مصاحبه‌ها و مستندات در نرم‌افزار MAXQDA

در شکل (۳)، جدول ماتریسی از سیستم کدگذاری کیفی که استخراج شده از داده‌های مصاحبه می‌باشد نشان داده شده است. فراوانی هر کد در مصاحبه با متخصصان حوزه آلودگی آب‌های زیرزمینی ارائه گردید. در شکل (۳)، هر سطر، مربوط به کد (مضامین اصلی و فرعی) است و ستون‌ها منابع مصاحبه (مصاحبه شوندگان و خبرگزاری اینترنتی) می‌باشند. اعداد نشان داده شده در سلول‌ها، بیانگر تعداد دفعات اشاره به هر کد در هر مصاحبه و سند را منعکس می‌کنند. به این ترتیب اعداد مجموع کدها نیز در انتهای هر سطر و ستون وجود دارد.

باتوجه‌به فراوانی کدهای مستخرج از مصاحبه با متخصصان حوزه آلودگی منابع آب زیرزمینی می‌توان نتیجه گرفت مهمترین دغدغه‌ها در زمینه آلودگی منابع آب زیرزمینی به ترتیب مربوط به تصفیه‌خانه‌ها، اثرات محیط‌زیستی، فاضلاب شهری، مدیریت پایدار، کیفیت آب و منابع آلاینده بوده است. همچنین، ضعف نهادی و قانونی به‌عنوان یک مانع کلیدی در مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی شناسایی شده است. این یافته‌ها می‌تواند به سیاست‌گذاران در این حوزه کمک نماید تا برنامه‌های خود را بر کنترل آلاینده‌ها، توسعه فناوری‌های تصفیه، تقویت قوانین و حکمرانی آب متمرکز کنند.



شکل ۳- فراوانی کدهای مستخرج از مصاحبه با متخصصان حوزه آلودگی منابع آب زیرزمینی در نرم‌افزار MAXQDA

جمع‌بندی

سؤال اصلی: چرا از لابلای گفتار متخصصان و دست‌اندرکاران به این نتیجه می‌رسیم که در حوزه آب و محیط‌زیست وضعیت آلودگی منابع آب رو به گسترش است؟

شنیدن سخنان متخصصین در کشور از شمال تا جنوب و از شرق تا غرب حس غیرقابل توصیفی را ایجاد می‌کند که بیان آن بسیار سخت است. نگاه اجمالی به شرایط کشور در سال‌های قبل لزوم تحلیلی جامع از سیاست‌های نظام حکمرانی را طلب می‌کند. پس از پایان جنگ هشت ساله که نتیجه آن از بین رفتن تقریباً تمامی زیرساخت‌های کشور بود. اوضاع اقتصادی در وضعیت بحرانی و منابع تولیدی کشور نابود شده و کشور برای پایداری و استقامت تنها منبع تولید کار و درآمدی که در اختیار داشت فقط آب و زمین بود. برنامه‌های توسعه اقتصادی و اجتماعی و... پی‌درپی تدوین شد بدون آنکه این برنامه‌ها در نگاه توسعه‌ای خود آینده‌نگری جامعی داشته باشند. هدف‌سازی برای تولید محصولات کشاورزی تا مرز خودکفایی با منابع آب محدود و روش‌های حمایتی نادرست از تکنیک‌ها و فناوری جدید در بخش کشاورزی توانست کشور را به‌تدریج به سمت شرایط بحرانی در زمینه آب و خاک و هوا هدایت کند. توسعه غیرهدفمند یا هدفمندی نادرست مسیر تغییرات منابع آب و خاک کشور را به سمت و سویی کشاند که امروز با چالش‌های بسیار جدی و چاله‌ای عمیق روبه‌رو شده است.

آب ماده‌ای است که جایگزین ندارد. در خیلی از ناترازی‌ها که محصول مدیریت نادرست در کشور بوده می‌توان با صرف هزینه و مدیریت صحیح ناترازی‌ها را کاهش و شرایط را به وضعیت مطلوب برگرداند و یا کنترل نمود. اما مسئله ناترازی

آب متفاوت است. آب قابل دسترس در هر منطقه‌ای از جهان متفاوت می‌باشد. کشور ما از نظر اقلیمی جزء نواحی خشک و نیمه‌خشک می‌باشد و لذا آب قابل دسترس نسبت به مناطق مرطوب بسیار کمتر است و این خود یک محدودیت بزرگ و یک عامل مؤثر در تصمیم‌گیری‌های حوزه آب می‌باشد. باید اذعان نمود هر طرح و پروژه‌ای که قرار است اجرا شود باید آب مصرفی آن مورد توجه قرارگیرد. بر اساس گفتار متخصصان خیلی از طرح‌های زیربنایی همچون ذوب‌آهن یا معادن استخراج مواد معدنی، مجتمع‌های فولاد در مناطق کم آب احداث شده که این امر نیازمندی به تأمین آب را افزایش داده است برداشت بخش قابل توجهی از منابع آب تجدیدپذیر و فرورفت سطح مخازن زیرزمینی کسری قابل‌توجهی در منابع آبی ایجاد کرده است.

می‌گوید کمیت و کیفیت آب را می‌توان همچون دو روی یک سکه تلقی نمود که هرچه منابع آبی تقلیل یابند کیفیت آنها کاهش می‌یابد. مثل پایین رفتن تراز آب زیر زمینی و حمله‌ور شدن آب‌های شور یا کاهش آب سدها و بی کیفیتی آب در ترازهایی پایین کاهش جریان رودخانه‌ها و افزایش نسبت آلاینده‌ها به حجم کل رودخانه و از این دست، مثال‌های زیادی قابل بیان است. در موضوع آلودگی منابع آب یکی از دلایل اثرات زمین‌زاد یا تأثیر لایه‌های زمین به دلیل کیفیت آن موجب آلودگی آب می‌شود که باید با مدیریت به هنگام و بجا استفاده از چنین آب‌هایی ممانعت نمود. اما بخش زیادی از منابع آلوده‌کننده به دلیل عدم مدیریت و شناخت مسئله ایجاد می‌شود. نمونه بسیار بارز آن را می‌توان در کشف‌رود مشاهده کرد. تصاویر زیر گوشه‌ای از فضای آلوده این رودخانه فصلی در خراسان و مشهد را نشان می‌دهد. علی‌رغم مطالعات و پیگیری‌های سازمان‌های ذی‌ربط هنوز به‌عنوان یک معضل در حاشیه شهر مشهد وجود دارد. متأسفانه این مشکل در بسیاری از نقاط کشور به دلیل عدم وجود یا کفایت سیستم‌های تصفیه فاضلاب همچون بوشهر، رشت و کرمان وجود دارد.

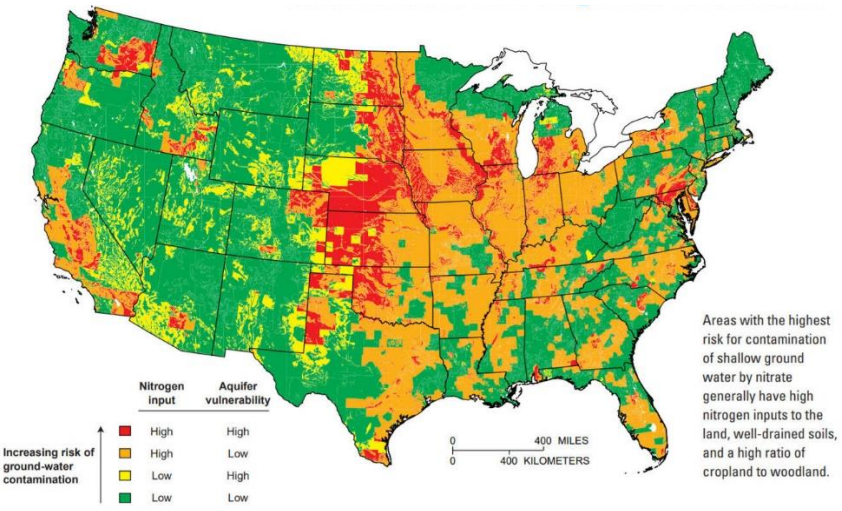
یکی از مهمترین دلایل توسعه آلودگی در منابع آبی نبود داده و اطلاعات موردنیاز می‌باشد. در عین حال به دلیل عدم اعتماد بخش دولتی (متولی منابع آب) به بخش پژوهشی و دانشگاهی دسترسی به اطلاعات مورد نیاز یا وجود ندارد یا با چالش‌های زیادی روبه‌رو است که همین امر موجب دور نگهداشتن بخش تحقیقات از انجام طرح‌های پژوهشی و تحقیقاتی و ریشه‌یابی مسائل شده است. چنین رفتاری با نگاه امنیتی به اطلاعات و عدم دسترسی صورت می‌گیرد. در همین راستا نگاهی به سیاست‌های در پیش گرفته سایر کشورها در این زمینه نشان می‌دهد که در بسیار مناطق اطلاعات و داده‌های مورد نیاز برای پژوهشگران به‌آسانی در اختیار قرارمی گیرد. شکل (۵) نقشه غلظت نیترات را در آمریکا نشان می‌دهد.

در این کشور علاوه بر نقشه فوق مدارک و اسناد بسیار زیادی از جنبه‌های مختلف در فضای دسترسی مجازی وجود دارد که زمینه را برای در اختیار داشتن اطلاعات کافی توسط پژوهشگران تسهیل می‌نماید.

مورد دیگر از نکات بسیار با اهمیت که لازم است بدان اشاره شود، وارونه جلوه دادن نقش سازمان محیط‌زیست از سوی مافیای ثروت و قدرت (کسانی که به دنبال گرفتن طرح‌های عمرانی با منافع زیاد و اثرات مثبت غیرضروری یا مضر به حال کشور) می‌باشند. چنان وانمود می‌کنند که این سازمان به‌عنوان مانعی در مسیر انجام طرح‌های عمرانی و توسعه‌ای در کشور است. در واقع نقش قانون‌گذران در این موضوع بسیار اثربخش است.



شکل ٤- وضعیت کشف‌رود در سال‌های اخیر(چرا بهبود و مناسب‌سازی صورت نمی‌گیرد)



شکل ٥- مناطقی در آمریکا که در معرض خطر بالای آلودگی نیتروژنی آب‌های زیرزمینی هستند (USGS، ١٩٩٩)

زیرا تصـــویب مهلت کوتاه دو ماهه برای اعلام نظر ســـازمان محیط‌زیســت موجب شـده بسـیاری از طرح‌ها پس از گذشـت این زمان به‌صـورت قانونی می‌توانند اقدامات اجرایی طرح‌ها را شـروع کرده بدون آنکه مجوز سـازمان محیط‌زیسـت را داشـته باشـند. این به‌عنوان یک نمونه بارز از نقص قوانین و اثرات آن می‌باشد. از سوی دیگر بنابر نظر مسئولان سابق این سازمان هنوز اثرات مثبت اعمال نظرات سازمان محیط‌زیست در انواع اقداماتی که به محیط‌زیست ربط دارد برای مردم و کارشناسان تبیین نشـده اسـت که این خود یک چالش بزرگ در مسـیر توسعه پایدار می‌باشد.

تحلیل کیفی گفتار متخصصان در این زمینه سندی روشن بر مشـــکلات و معضـــلات پیش روی بهبود وضـــعیت آلودگی محیط‌زیســت و منابع آب می‌باشـد. با نگاه اجمالی به شـکل (۳) که حاصل تحلیل کیفی بیانات متخصصان است می‌توان به‌ســادگی دلایل بروز معضــل آلودگی منابع آب و راهکارهای پیشـنهادی را مشـاهده کرد. در یک جمع‌بندی کلی چند نکته از سخن متخصصین در ادامه آمده است:

۱- در برنامه‌ریزی‌های توسعه نگاه به اثرات آینده طرح‌ها انجام نشده است.

۲- نظام نظارت جامع و پیوسته و مورد وثوق وجود ندارد.

۳- قوانین و آیین‌نامه‌های موجود یا کامل نیســـتند و یا اجرا نمی‌شـــود. در واقع به دلیل ناچیز بودن جرایم، منافع عدم رعایت پروتکل‌های محیط‌زیستی به‌مراتب بیشتر است.

٤-نقش متخصـــصـــان واقعی و دلســـوز در طرح‌های عمرانی بسیار کم‌رنگ است.

منابع

خبرگزاری اطلاعات آنلاین. (١٤٠٤). بحرانی که رودخانه‌های کشـــور را تـهـدیـد مـی‌کـنـد. کـد خـبـر ۹۷۰۱۳. ettelaat.com/xQqS. ۱۲ خرداد ١٤٠٤.

خبرگزاری ایرنا. (١٤٠٤الف). رودخانه قره‌سو و افزایش مخاطرات مـحـیـط‌زیسـتـی آن. کـد خـبـر ۸۵۸٤۸۱۰٤. https://irna.ir/xjTJ۹۸. ۱۰ خرداد ١٤٠٤.

خبرگزاری ایرنا (١٤٠٤ب). فسـفر سـد ژاوه ۶.۵ برابر اسـتاندارد؛ رکـورددار آلـودگـی در کشـــور. کـد خـبـر: ۸۵۹۰۰۲٤۵ . https://irna.ir/xjV۸Sf. ۱۱ مرداد ١٤٠٤.

خبرگزاری دانشـــجو. (١٤٠٤). آلودگی آب‌ها در گیلان؛ تهدیدی جدی برای سلامت مردم و محیط‌زیست. گزارش استان گیلان. کد خبر:۱۲۳۷۱۲۰. ۲۰ اسفند ۱٤۰۳ https://snn.ir/۰۰۵BpY.

Filipenco, D. (۲۰۲۵). Water pollution in the world: major causes and statistics. https://www.developmentaid.org/news-stream/author/daniil-filipenco.

USGS. (۱۹۹۹). Areas at high risk of nitrogen contamination of groundwater. https://www.usgs.gov/water-science-school/science/groundwater-quality.

پی‌نوشت‌ها

۱- World Health Organization

۲- Guidelines for Drinking-water Quality

۳- United Nations Environment Programme

٤- Organization for Economic Co-operation and Development

Water and sustainable development

in the name of God

Volume 12, Issue 3 [Serial No. 37], December 2025

Grantee: College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Manager in Charge: Shahnooshi Foroushani, N. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Editor in Chief: Davary, K. Prof. Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board

Alidadi, H. Prof., Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran
Ansari, H. Prof., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Bagheri, A. Asso. Prof., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Esmaili, K. Asso. Prof., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Jolaini, M. Asso. Prof., Agricultural and Natural Resources Research Center of Khorasan Razavi, Mashhad, Iran
Morid, S. Prof., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Nassery, H.R. Prof., Shahid Behesti University, Tehran, Iran

Guiding Council

Ghannadi, M. General Manager of the Office of Research, Technology Development and Communication with the Industry of the Country Water & Wastewater Engineering Company, Chairman of the Council
Esmailian, H. Managing director of Mashhad Water & Wastewater Company
Nematnejad, M.A., Managing director of Khorasan Razavi Province's Regional Water Company
Ghandhari, A.,Head of Aras, Atrak and Northern Basins, Iran Water Resources Management Company
Shahnooshi Foroushani, N. Manager in Charge
Davary, K. Editor in Chief

Advisory Editors

Noori Esfandiari, A. Representative of Water Think tank at Iran Water Resources Management Company
Dehghanisanij, H. Agricultural Engineering Research Institute
Sajadifar, S.H. Representative of Country Water and Wastewater Engineering Company
Kalaei, G.H. Representative of Mashhad Water & Wastewater Company
Ghanbari, F. Representative of Mashhad Water & Wastewater Company
Mirgasemi, S.H. Representative of Khorasan Razavi Province's Regional Water Company
Arjmandsharif, M. Representative of Khorasan Razavi Province's Regional Water Company

Publication information

Executive Expert: Shahedi,M. Talebi Hossein Abad (F.i)
Editor: Quchanian,M. Shahedi,M. Talebi Hossein Abad,F. Oskouhi (M.i)
Graphic: Shaikhi,M.R. / **Design:** Asadi, R.
Publisher: Quarterly/Ferdowsi University of Mashhad
ISSN Print/ Online: 2717-3321/2423-5474
Website/ E.Mail: http://jwsd.um.ac.ir / Email: jwsd@um.ac.ir
Address: Department of Water Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. P.O.Box: 917751163
Sponsor(journal): Mashhad Water & Wastewater Company
Sponsor(probing inquiry): Khorasan Razavi Province's Regional Water Company
Indexing: ISC, Agris, CABI, DOAJ, google scholar, SID, Magiran

Due to certificate no. 3/18/126631 dated 20/9/2015 from the scientific publications review Commission of the Ministry of Science, Research and Technology in Iran. also Due to registration number no76766 dated 25/1/2016 from the Ministry of Culture and Islamic Guidance, this journal has been licensed to publish. This journal is an output of joint scientific activities between the Ferdowsi University of Mashhad and the I.Hydraulic Association of Iran

Journal of
Water and Sustainable Development
Volume 12 -Issue 3 (serial No.37) - December 2025

Articles in issue:

- **Urban Flood Management With the Aim of Supplying a Portion of the Water Required for the Green Spaces of Ferdowsi University of Mashhad Campus**
  S. Afrasiabi, S. R. Khodashenas, A. Mosaedi
- **Food Security in the 21st Century: Exploring Challenges, Threats, and Solutions for Sustainability**
  I. Hajirad, P. Pourmohammad
- **Hydraulic Modeling and Executive Proposal for Ouality Management of Inflow Water to the Darkhoveyn Water Treatment Plant**
  D. Horri, J. Ahadiyan, M. Shafai Bejestan, S.M. Sajjadi
- **Numerical Analysis of the Three-Dimensional Flow Field Around Riverbank Spur Dikes in a Grouped Arrangement**
  F. Golchin, N. Kardan, M. Dini
- **A Review of Laboratory and Numerical Methods in Subsidence Modeling: Challenges and Solutions**
  A. Asghari, H. Sarbaz
- **An Analysis of Return Flow, Its Importance, and Amount in Iran and Other Countries in the World**
  Z. Kazemi, A. Majidi, E. Alizadeh, J. Mirzavand
- **Identification of Social and Psychological Factors Influencing Household Water Consumption in Tehran**
  M. Ramshini, B. Hajipour
- **Assessing the Security of Drinking Water Facilities and Their Infrastructure Using Passive Defense Approach a Pilot City**
  A. Nasirian, A. Akbarpour, A.A. Ameri, M. Mardani
- **Designing a Comprehensive Sensory Environmental Education (SEE) Curriculum with a Focus on Water (Specialized for Lower Secondary Education)**
  A.A. Boroumand, M.J. Amiri
- **A Review of Artificial Intelligence Applications in Smart Irrigation Management**
  Z. Ayyab Koushk Gozar, S. M. R. Naghedifar, A. N. Ziaei
- **Investigating the Impact of Climate Differences on Seasonal and Annual Precipitation Changes and Fluctuations in Iran**
  A.H. Karimi Khalilabad, A. Mosaedi, S. M. R. Naghedifar
- **Polysaccharide-Based Hydrogels in Water Treatment: Mechanisms, Applications, and Future Perspectives (A Review)**
  A.R. Radkhah1, S. Eagderi, S. Atash Afrazah

ISSN (Print): 2423-5474

