

آب و توسعه پایدار

دوره دوازدهم . شماره چهارم (پیاپی ۳۸) . اسفند ۱۴۰۴

بهره‌وری پایایی



نوآوری فناوری

فهرست مقالات

- آینده آبیاری هوشمند: تحلیل بازار جهانی، روندها و فرصت‌ها
ایمان حاجی‌راد، خالد احمد‌آلی، عبدالمجید لیاقت
- کاربرد باکتریوفاژها به‌عنوان عوامل زیستی در تصفیه آب و فاضلاب: یک مطالعه مروری
علیرضا رادخواه، صدیقه آتش‌افرازه
- تحلیل مناقشه اجتماعی انتقال آب خلیج فارس و ارائه الگوی حکمرانی مشارکتی مبتنی بر توسعه پایدار
نادیا انجم شعاع، سید عبدالمجید جلائی، مهدی نجاتی
- طراحی و اعتبارسنجی چک‌لیست جامع ارزیابی کیفیت آموزش غیررسمی آب: ابزاری بومی برای ارزیابی فعالیت‌های سمن‌های محیط‌زیستی
امیرعلی برومند، محمدجواد امیری
- ارزیابی توجیه‌پذیری اجرای طرح فاضلاب باتوجهبه رویکردهای مختلف فنی، اجتماعی و محیط‌زیستی (مطالعه موردی استان مازندران)
جواد وجاht، شادی صراف
- تحلیل هیدرودینامیک جریان و ضریب دبی در سرریزهای با محیط متخلخل در شرایط روگذر آزاد
سید علیرضا اسماعیلی، مجید حیدری، سعید گوهری
- چارچوب همسویی استراتژی‌های مدیریت آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی (یک پژوهش کیفی)
زهرا موسوی، مهرداد حسینی شکیب، سید جواد ایران‌بان فرد
- چارچوبی برای بهبود حکمرانی آب و امنیت غذایی: توسعه یک ابزار سیستمی در سطح ملی
محمد حسینی
- بررسی ارزش اقتصادی آب در صنایع پایه به‌منظور تعیین تعرفه آب (مطالعه موردی: حوضه زاینده‌رود)
شهرام قبادی، علی مریدی، رضا خلیلی
- فرا تحلیل نقش اینترنت اشیا در آینده سیستم‌های آب شهری کلان‌شهر تهران
لیلی بختیاری، نوید آهنگری
- تحلیل پویایی خشکسالی با استفاده از شاخص SPEI و مدل زنجیره مارکوف (مطالعه موردی: ایستگاه هواشناسی همدید مشهد)
حسین جهانگیری، مهدی جباری نوقابی، نفیسه سیدنژاد گل‌ختمی
- ارتقاء پایش خشکسالی هواشناسی در مناطق خشک: ادغام داده‌های بارش ماهواره‌ای مبتنی بر یادگیری ماشین
محمود حاجیانی، مهسا مردانی، معین توسن

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، استاد 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 جلیلی، دانشیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی
حسین علی دادی، استاد گروه مهندسی بهداشت محیط و حرفه‌ای، دانشگاه علوم پزشکی مشهد
سعید مرید، استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس
حمیدرضا ناصری، استاد گروه زمین شناسی، دانشگاه شهید بهشتی

شورای سیاست گذاری

مجیدقنادی (ریاست شورا)، مدیرکل مرکز تحقیقات، 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، رئیس حوضه‌های آبریز 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 سانچ، 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

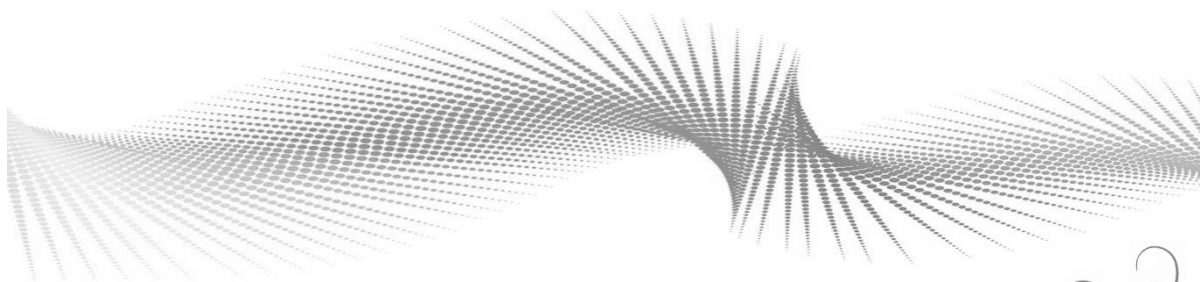
اطلاعات نشر

کارشناس اجرایی: مه‌ری شاهی
ویراستاری: مرجان قوچانیان، مه‌ری شاهی، فاطمه طالبی حسین آباد (فنی و ادبی)، مائده اسکوهی (لاتین)
طراحی جلد: محمد رضا شیخی / صفحه آرایی: رحمان اسدی
ترتیب انتشار، ناشر: فصلنامه، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد
شماره شایا چاپی، I لکترونیکی: ۴۴۷۴-۳۴۲۳ / ۳۳۲۱-۲۷۱۷
تارنما، رایانامه: <https://jwsd.um.ac.ir> Email: jwsd@um.ac.ir
آدرس: دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، دفتر نشریه، کدپستی ۹۱۷۵۱۱۶۳
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)، Agris.CABI.DOA, google scholar

این نشریه طبق نامه شماره ۱۳۶۶۳۱/۲۱/۸۱ مورخ ۱۳۹۴/۶/۲۹ از کمیسیون بررسی نشریات علمی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، اعتبار علمی دریافت نموده است. همچنین در تاریخ ۱۳۹۴/۱۱/۵ موفق به دریافت پروانه انتشار نشریه از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی به شماره ثبت ۷۶۷۶۶ شده است. این نشریه حاصل فعالیت علمی مشترک دانشگاه فردوسی مشهد و انجمن هیدرولیک ایران است.

فهرست مطالب

۱	سرمقاله: پایان نسخه‌های واحد: محلی‌گرایی، داده‌های سیاسی و بازاریابی در حکمرانی آب علی باقری
۴	یادداشت کوتاه: نقش هوش مصنوعی در حکمرانی داده محور آب محمد جواد عبدی / سید حسین سجادی فر
۶	یادداشت کوتاه: فناوری و نوآوری در مدیریت آب وحید اردکانیان
۹	آینده آبیاری هوشمند: تحلیل بازار جهانی، روندها و فرصت‌ها ایمان حاجی‌راد، خالد احمد‌آلی، عبدالمجید لیاقت
۲۴	کاربرد باکتریوفازها به عنوان عوامل زیستی در تصفیه آب و فاضلاب: یک مطالعه مروری علیرضا رادخواه، صدیقه آتش افرازه
۴۷	تحلیل مناقشه اجتماعی انتقال آب خلیج فارس و ارائه الگوی حکمرانی مشارکتی مبتنی بر توسعه پایدار نادیا انجم شعاع، سید عبدالمجید جلائی، مهدی نجاتی
۶۳	طراحی و اعتبارسنجی چک‌لیست جامع ارزیابی کیفیت آموزش غیررسمی آب: ابزاری بومی برای ارزیابی فعالیت‌های سمن‌های محیط‌زیستی امیرعلی برومند، محمد جواد امیری
۷۷	ارزیابی توچیمپذیری اجرای طرح فاضلاب با توجه به رویکردهای مختلف فنی، اجتماعی و محیط‌زیستی (مطالعه موردی استان مازندران) جواد وجاهت، شادی صراف
۸۸	تحلیل هیدرودینامیک جریان و ضریب دبی در سرریزهای با محیط متخلخل در شرایط روگنر آزاد سید علیرضا اسماعیلی، مجید حیدری، سعید گوهری
۱۰۳	چارچوب همسویی استراتژی‌های مدیریت آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی (یک پژوهش کیفی) زهره موسوی، مهرداد حسینی شکیب، سید جواد ایران‌بان فرد
۱۲۳	چارچوبی برای بهبود حکمرانی آب و امنیت غذایی: توسعه یک ابزار سیستمی در سطح ملی محمد حسینی
۱۴۱	بررسی ارزش اقتصادی آب در صنایع پایه به منظور تعیین تعرفه آب (مطالعه موردی: حوضه زاینده‌رود) شهرام قبادی، علی مریدی، رضا خلیلی
۱۵۹	فرا تحلیل نقش اینترنت اشیا در آینده سیستم‌های آب شهری کلان‌شهر تهران لیلی بختیاری، نوید آهنگری
۱۷۷	تحلیل پویایی خشکسالی با استفاده از شاخص SPEI و مدل زنجیره مارکوف (مطالعه موردی: ایستگاه هواشناسی همدید مشهد) حسین جهانگیری، مهدی جباری نوقایی، نفیسه سیدزاد گل خطمی
۱۹۰	ارتقاء پایش خشکسالی هواشناسی در مناطق خشک: ادغام داده‌های بارش ماهواره‌ای مبتنی بر یادگیری ماشین محمود حاجبانی، مهسا مردانی، معین توسن
۲۰۴	یادداشت تحلیلی: کرباوری و کرفهمی در مدیریت آب کشاورزی: زمان برای بازبینی، تأمل و تجدیدنظر فرا رسیده است! (مقاله ترجمه شده) پویا شیرازی، سید محمد رضا ناقدی فر
۲۲۵	یادداشت تحلیلی: صنایع خلاق، شهر دوستدار آب و شهر حساس به آب: عبور از مهندسی محور به سوی حکمرانی مشارکتی محمد جواد سمیعی، محمد فشایی، محمد طلعتی



سرمقاله



علی باقری

دانشیار گروه مهندسی و
مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس
و عضو هیئت تحریریه نشریه

پایان نسخه‌های واحد: محلی‌گرایی، داده‌های سیاسی و بازاندیشی در حکمرانی آب

خاص خود را دارد و راه‌حل موفق، مثلاً در اصفهان، نمی‌تواند به سادگی به خراسان یا خوزستان تعمیم یابد. بنابراین به پایان عصر نسخه‌های واحد رسیده‌ایم و در مواجهه با مسائل آب باید به ماهیت محلی آنها توجه کنیم.

اگر مسئله آب ذاتاً محلی است، ابزارهای مواجهه با آن نیز باید محلی باشند. تأکید بر «پایلوتهای محلی» و «موردکاوی‌ها» - نه به مثابه پروژه‌های نمایشی، بلکه به عنوان آزمایشگاه‌های زنده سیاستگذاری - می‌تواند تحولی بنیادین ایجاد کند. تجربه «ائتلاف نجات آبخوان نیشابور» نشان داد که چگونه یک پایلوت محلی با مشارکت کشاورزان، نهادهای صنفی و دانشگاه، توانست الگویی از مدیریت مشارکتی و سازگاری خلاقانه ارائه دهد که شاید در سطح ملی قابل تکثیر نبود، اما در درون خود درس‌های ارزشمندی برای یادگیری نهادی به همراه داشت.

چنین رویکردی مستلزم پذیرش این واقعیت است که «موفقیت‌های کوچک و تدریجی»، نه طرح‌های بلندپروازانه ملی، می‌توانند اعتماد را بازسازی کنند، ظرفیت دولت را در حل مسئله تقویت نمایند، و حمایت اجتماعی را جلب کنند. هر پایلوت موفق، یک «فرصت دگردیسی» است؛ فرصتی برای نشان دادن اینکه تغییر ممکن است، پیش از آنکه هزینه شکست در مقیاس بزرگ فاجعه‌بار شود. این همان رویکردی است که در برابر «مارپیچ ریسک» - که در آن راه‌حل‌های بزرگ و عرضه‌محور به تشدید بحران می‌انجامند - ایستادگی می‌کند.

بحران آب در ایران به مدد دهه‌ها گزارش‌های کارشناسی، مقاله‌های علمی و هشدارهای محیط‌زیستی، دیگر «مسئله‌ای ناشناخته» نیست. آنچه امروز با آن روبه‌رو هستیم، نه کمبود داده، بلکه بحران حکمرانی است؛ بحرانی که ریشه در نادیده گرفتن پیچیدگی‌های محلی، انباشت منافع گروه‌های مسلط، اصرار بر راه‌حل‌های یکسان و عرضه‌محور، و مهم‌تر از همه، غفلت از «ریسک‌های نوظهوری» دارد که خود این راه‌حل‌ها پدید می‌آورند. این شماره از نشریه «آب و توسعه پایدار» با محوریت «نوآوری در داده، سیاست و فناوری» تلاش دارد افق‌های تازه‌ای بگشاید، اما پیش از هر نوآوری فنی، نیازمند «نوآوری در نگاه» و «بازاندیشی در بنیان‌های سیاستگذاری» هستیم.

آب در هر حوضه آبریز، روایت منحصربه‌فردی از تعامل طبیعت، جامعه، قدرت و تاریخ را بازتاب می‌دهد. چرخه هیدروسوشیال به ما می‌آموزد که آب نه یک مولکول فیزیکی، که پدیده‌ای اجتماعی طبیعی است. با این حال، سیاستگذاری آب در ایران همچنان گرفتار «توهم راه‌حل سراسری» است: سدسازی، انتقال بین‌حوضه‌ای، یا حتی شعار کاهش دو میلیون هکتار سطح زیر کشت، بدون توجه به ظرفیت‌های محلی و وابستگی به مسیر طی‌شده» شکل گرفته‌اند. تجربه نشان داده است که موفقیت اولیه یک پاسخ (مانند سدسازی در دهه‌های ۴۰ و ۵۰) به تدریج به گفتمانی مسلط تبدیل می‌شود که مسیرهای جایگزین را مسدود می‌کند و حتی با ظهور شواهد ناکارآمدی، تغییر رویکرد را ناممکن می‌سازد. هر حوضه، هر دشت، هر آبخوان، زیست‌بوم سیاسی-اجتماعی

یکی از عمیق‌ترین نوآوری‌های سیاستی که باید در دستور کار قرار گیرد، «توانمندسازی هم‌زمان جامعه و حکومت» است. بسیاری از اصلاحات پیشین یا صرفاً بر «تقویت حاکمیت» (با رویکردهای دستوری و متمرکز) متمرکز بودند، یا به «فعالیت‌های مشارکتی نمادین» اکتفا کردند. اما بحران آب، دوگانه «دولت در مقابل مردم» را برنمی‌تابد. آنچه لازم است، ترکیب توانمندسازی جامعه مصرف‌کننده، سرمایه‌گذار، فعال محیط‌زیست و کارشناس محلی با توانمندسازی بدنه اجرایی برای عبور از اینرسی نهادی و وابستگی به مسیر طی‌شده است. در اینجا نیز رویکرد پرداختن به پایلوت‌های محلی، می‌تواند یک راهبرد راهگشا در مواجهه با مسائل آبی باشد.

هیچ بحث جدی درباره نوآوری در سیاستگذاری آب بدون پرداختن به «دینامیک قدرت و منافع» کامل نمی‌شود. آب در ایران به کالایی اقتصادی تبدیل شده که نابرابری را بازتولید می‌کند: از بازار سیاه آب تانکری گرفته تا تخصیص آب به ویلاهای غیرمجاز. گروه‌های مسلط - اعم از صنایع پرآب‌بر، معادن، یا شبکه‌های سوداگر آب - منافع خود را در تداوم وضع موجود تعریف کرده‌اند. مناقشه آبی کشاورزان شرق اصفهان و استان یزد نمونه‌ای بارز از این چرخه معیوب است: انتقال آب از سرشاخه‌های زاینده‌رود به یزد، نه تنها ریسک کم‌آبی را کاهش نداد، بلکه با فعال‌سازی دینامیک قدرت و تهدید متقابل، مرزهای ریسک را از بحران محیط‌زیستی به تنش امنیتی-اجتماعی جابجا کرد و مقیاس آن را به سطح ملی ارتقا داد. هر نوآوری واقعی ناگزیر باید «بازتوزیع قدرت» را در دستور کار قرار دهد: توانمندسازی خرده‌مالکان، زنان روستایی، و جوامع حاشیه‌نشین در تصمیم‌گیری‌های محلی، شفافیت در تخصیص آب، و پاسخگویی نهادها. بدون این مؤلفه، حتی پیشرفته‌ترین فناوری‌های شیرین‌سازی یا سامانه‌های داده‌محور نیز در خدمت بازتولید نابرابری‌های پیشین عمل خواهند کرد.

شاید مهم‌ترین خلأ نظری در سیاستگذاری آب ایران، غفلت از «ریسک به مثابه فرایندی بازتابی» است. گزارش ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC AR6) برای نخستین بار «پاسخ» را به عنوان یکی از مؤلفه‌های سازنده ریسک - علاوه بر سه مؤلفه قبلی شامل: آسیب‌پذیری، تهدید، و در معرض قرارگیری - به رسمیت شناخت. اما آنچه تاکنون مغفول مانده، تبیین مکانیسم‌هایی است که از طریق آنها پاسخ‌های فناورانه و توسعه‌ای - که در ظاهر موفق به نظر می‌رسند - به تشدید ریسک موجود یا ظهور ریسک‌های کاملاً جدید می‌انجامند. پدیده فرونشست زمین در نتیجه بهره‌برداری «موفق» از آب‌های زیرزمینی، یا تشدید بحران کم‌آبی در حوضه زاینده‌رود در پی انتقال‌های بین‌حوضه‌ای، مصادیق بارز این «مارپیچ ریسک بازتابی» هستند. در این مارپیچ، هر پاسخ جدید بستر تولید ریسک‌های پیچیده‌تر و تصمیم‌گیری‌های دشوارتر را فراهم می‌کند. بنابراین، گذار به «توسعه ریسک‌آگاه» به معنای کلاسیک آن کافی نیست؛ نیازمند «توسعه ریسک‌آگاه بازتابی» توأم با تاب‌آوری» هستیم که در آن پیش از اجرای هر سیاستی،

پیامدهای بلندمدت و ناخواسته پاسخ‌ها با نگاه پیشینی (ex ante) ارزیابی شود.

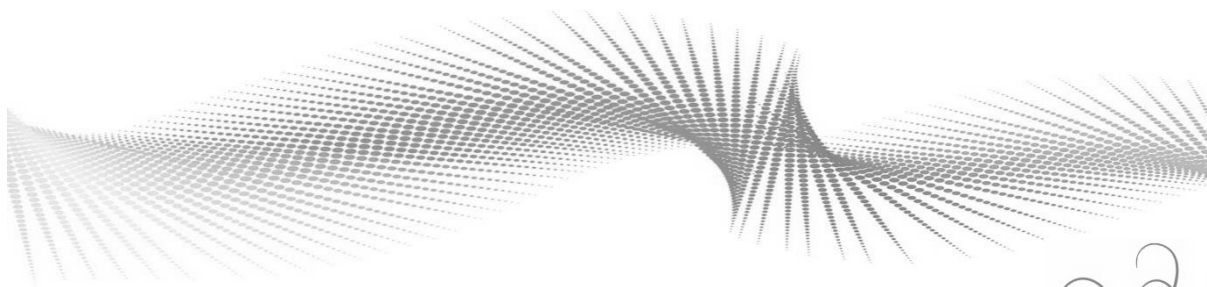
این شماره به نوآوری در داده، سیاست و فناوری می‌پردازد. اما پیش از هر سخنی از داده‌های بزرگ و سامانه‌های هوشمند، باید اذعان کنیم که «داده‌ها هرگز خنثی نیستند و ذاتاً سیاسی هستند». فرآیند انتخاب چه چیزی اندازه‌گیری شود، چه چیزی نادیده گرفته شود، داده به چه کسی داده شود و از چه کسی پنهان بماند، و چگونه تفسیر گردد، همگی در میدان منافع و قدرت تعریف می‌شوند. در ایران، نمونه‌های متعددی از «سیاست‌زدگی داده» سراغ داریم: از گزارش‌های متناقض درباره سطح آب‌های زیرزمینی که نهادهای مختلف با اهداف متفاوت منتشر می‌کنند تا اعلام یا کتمان آمار فرونشست در مجاورت شهرهای بزرگ به دلیل نگرانی از سرمایه‌گذاری و اعتبار سیاسی. این سیاسی بودن داده، نوعی «عدم قطعیت ساختاری» بر فرآیند سیاستگذاری تحمیل می‌کند که فراتر از عدم قطعیت آماری یا اقلیمی معمول است. تصمیم‌گیرنده هیچ‌گاه به داده‌ای «خام» و «بی‌طرف» دست نمی‌یابد؛ بلکه همواره با روایت‌هایی روبه‌روست که پیشاپیش در آزمایشگاه قدرت پالایش شده‌اند. در چنین شرایطی، بزرگترین نوآوری فنی نیز نمی‌تواند به تنهایی شفافیت ایجاد کند، مگر آن که با نهادهای مستقل و پاسخگو برای تولید و اعتبارسنجی داده همراه شود و دسترسی عموم و نهادهای مدنی به داده‌های خام (و نه صرفاً خلاصه‌های از پیش تفسیرشده) تضمین گردد. بدون این بستر، هر سامانه داده‌محور به ابزاری برای بازتولید عدم قطعیت‌های موجود و تقویت گفتمان مسلط تبدیل خواهد شد.

روشن است که سامانه‌های سنجش از دور، سامانه‌های اطلاعات مکانی، پایش لحظه‌ای آبخوان‌ها، و فناوری‌های کم‌آب‌بر (از آبیاری قطره‌ای هوشمند تا شیرین‌سازی با انرژی تجدیدپذیر) ابزارهای ارزشمندی هستند. اما فناوری به تنهایی مسئله را حل نمی‌کند. تجربه ایران مملو از پروژه‌های فناورانه‌ای است که به دلیل نادیده گرفتن زمینه‌های اجتماعی و سیاسی و به ویژه «بازخوردهای رفتاری کنشگران»، نه تنها ناکام ماندند، بلکه بحران را تشدید کردند. اثر بازگشتی (rebound effect) - یعنی تغییر رفتار بازیگران در پاسخ به مداخله که هدف اولیه را خنثی می‌کند - نمونه‌ای از این پدیده است. نوآوری واقعی زمانی رخ می‌دهد که داده به دانش محلی پیوند بخورد، فناوری در خدمت عدالت آبی قرار گیرد، سیاستگذاری از آزمون و خطای محلی تغذیه کند، و مهم‌تر از همه، ریسک‌های ناشی از خود پاسخ‌ها به صورت نظام‌مند پیش‌بینی و پایش شوند.

بحران آب ایران، آیینه تمام‌نمای ناکارآمدی حکمرانی متمرکز و عرضه‌محور است. گذار به سوی آینده‌ای پایدار، مستلزم تحولی پارادایمیک است: از راه‌حل‌های سراسری به پایلوت‌های محلی، از موفقیت‌های بزرگ و فوری به یادگیری تدریجی از طریق موفقیت‌های کوچک، از حاکمیت دستوری به توانمندسازی توأمان جامعه و حکومت، از نادیده گرفتن قدرت

به بازتوزیع عادلانه آن، و از ارزیابی ایستای ریسک به پایش پویای ریسک‌های بازتابی و نوظهور. در کنار همه اینها، باید بپذیریم که داده نیز صحنه نبرد قدرت است و سیاستگذاری آگاهانه مستلزم به رسمیت شناختن عدم قطعیت‌های سیاسی نهفته در تولید و تفسیر داده‌هاست. این همان نوآوری در سیاستگذاری است که این شماره نشریه فراخوان آن را داده

است. آب فقط یک مولکول نیست؛ شبکه‌ای از روابط، منافع، قدرت، داده‌های مناقشه‌برانگیز و ریسک‌های در حال تکوین است. تنها با درک این شبکه در مقیاس محلی، با مشارکت همه کنشگران آن، و با آگاهی از مارپیچ‌های خودتشدیدکننده‌ای که راه‌حل‌های ساده‌انگارانه پدید می‌آورند، می‌توان از بحران، فرصتی برای دگردیسی نهادی ساخت.



یادداشت کوتاه



محمد جواد عبدی

سید حسین سجادی فر

شرکت آب فاضلاب استان تهران

نقش هوش مصنوعی در حکمرانی داده محور آب

مهاجرت تأثیر می‌گذارند. هوش مصنوعی امکان می‌دهد تا این پیوندها به صورت یکپارچه بررسی شده و آثار کوتاه مدت و بلندمدت تصمیم‌ها پیش از اجرا ارزیابی شوند.

یکی از چالش‌های ساختاری حکمرانی آب، نحوه تعریف شاخص‌های عملکرد در بخش‌های مختلف است. هر بخش بر اساس مأموریت‌های قانونی و اهداف تخصصی خود ارزیابی می‌شود، اما این شاخص‌ها اغلب بازتاب‌دهنده کامل پیامدهای فرابخشی تصمیم‌ها نیستند. برای نمونه، موفقیت در افزایش تولید یا صادرات محصولات کشاورزی ممکن است از نظر اقتصادی یک دستاورد تلقی شود؛ اما اگر این موفقیت متکی بر کشت محصولات آب‌بر و شیوه‌های غیراصولی آبیاری و کشت باشد، هزینه‌های زیست‌محیطی آن در بلندمدت بسیار فراتر از منافع کوتاه‌مدت خواهد بود. این هزینه‌ها معمولاً به شکل پراکنده و غیرمستقیم ظاهر می‌شوند و در ارزیابی عملکرد هیچ بخشی به طور کامل انعکاس نمی‌یابند.

این وضعیت لزوماً ناشی از تعارض منافع یا بی‌توجهی به محیط‌زیست نیست، بلکه بیشتر نشان‌دهنده فقدان ابزارهایی است که بتوانند تصویر جامعی از منافع و هزینه‌ها در سطح ملی ارائه دهند. در اینجا هوش مصنوعی می‌تواند نقش کلیدی در هم‌راستاسازی شاخص‌ها ایفا کند. با کمک مدل‌های هوشمند، امکان کمی‌سازی آثار زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی سیاست‌ها فراهم شده و تصمیم‌گیران می‌توانند ارزش واقعی گزینه‌های مختلف را با نگاهی جامع‌تر مقایسه کنند. این رویکرد زمینه را برای تعریف شاخص‌هایی فراهم می‌سازد که علاوه بر کارایی بخشی، پایداری سرزمینی را نیز مدنظر قرار می‌دهند. در این چارچوب، ادغام حسابداری

ایران سرزمینی است که شکل‌گیری تمدن آن با درک عمیق از محدودیت‌های آبی و ضرورت سازگاری با اقلیم خشک و نیمه‌خشک گره خورده است. تجربه‌های تاریخی مدیریت آب در این سرزمین نشان می‌دهد که پایداری و حفاظت از منابع آبی، همواره حاصل تعادل میان بهره‌برداری و نگهداری بوده است. با این حال، در دهه‌های اخیر، افزایش فشارهای اقلیمی، رشد تقاضا، توسعه فعالیت‌های اقتصادی و پیچیده‌تر شدن روابط میان‌بخشی، حکمرانی آب را با چالش‌هایی روبه‌رو کرده که پاسخ به آن‌ها نیازمند رویکردهایی فراتر از ابزارهای سنتی تصمیم‌گیری است.

در چنین بستری، هوش مصنوعی به عنوان یکی از دستاوردهای برجسته عصر داده، فرصتی نوین برای ارتقای کیفیت حکمرانی آب فراهم کرده است. این فناوری نه به منزله جایگزینی تجربه مدیریتی یا دانش تخصصی موجود، بلکه به عنوان ابزاری کمکی برای تصمیم‌سازی آگاهانه‌تر، شفاف‌تر و آینده‌نگرانه قابل بهره‌برداری است. در سطح جهانی، استفاده تدریجی از هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی کشاورزی و حفاظت از محیط‌زیست نشان داده که تصمیم‌های مبتنی بر تحلیل داده‌های جامع، از پایداری و مقبولیت بیشتری برخوردارند.

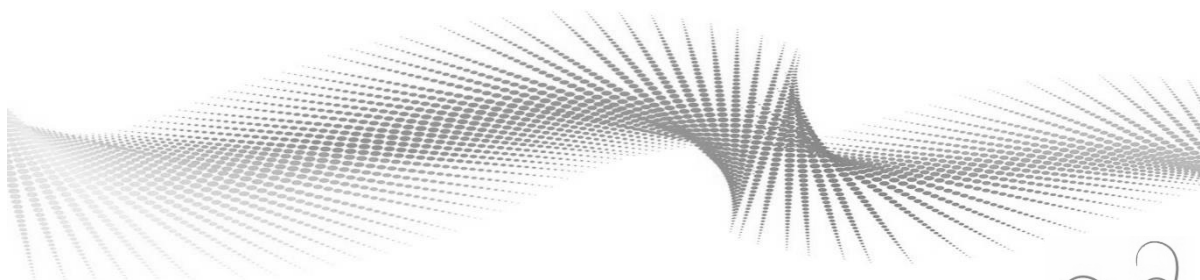
ویژگی برجسته هوش مصنوعی، توانایی آن در تحلیل هم‌زمان روابط پیچیده و چندسطحی است. این قابلیت در حوزه آب اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا تصمیم‌ها معمولاً پیامدهایی فراتر از یک بخش یا بازه زمانی مشخص دارند. برای مثال، سیاست‌های حوزه کشاورزی علاوه بر آثار اقتصادی، بر منابع آب زیرزمینی، کیفیت خاک، سلامت تالاب‌ها و حتی الگوهای

آب در حکمرانی داده‌محور اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. چارچوب‌های استاندارد حسابداری آب، امکان تمایز میان مصارف مصرفی و غیرمصرفی، رصد تغییرات ذخایر و بازنمایی صریح نیازهای زیست‌محیطی را فراهم می‌کنند و با تبدیل پیچیدگی‌های هیدرولوژیک به شاخص‌های قابل فهم برای تصمیم‌گیری، تبیین‌پذیری تحلیل‌های هوش مصنوعی را افزایش می‌دهند. این شفافیت، به‌ویژه در شرایط بروز تعارض میان بخش‌ها و مناطق مختلف، زمینه پاسخگویی نهادی و اعتبار تصمیم‌ها را تقویت می‌کند.

از منظر محیط‌زیستی، بهره‌گیری از هوش مصنوعی می‌تواند به درک دقیق‌تر نقش اکوسیستم‌ها در امنیت آبی و رفاه اجتماعی کمک کند. تالاب‌ها، دریاچه‌ها و آبخوان‌ها نه تنها عناصری طبیعی، بلکه زیرساخت‌های حیاتی سرزمین هستند که خدمات ارزشمندی مانند تنظیم اقلیم، کاهش گرد و غبار و پشتیبانی از معیشت جوامع محلی ارائه می‌دهند. تحلیل‌های مبتنی بر داده می‌توانند این خدمات را به‌شکلی ملموس‌تر در فرآیند تصمیم‌سازی وارد کرده و نشان دهند که حفاظت از محیط‌زیست، بخشی از راه‌حل توسعه پایدار است، نه مانعی در برابر آن.

حرکت به‌سوی بهره‌گیری مؤثر از هوش مصنوعی در حکمرانی آب می‌تواند به‌تدریج و متناسب با ظرفیت‌های موجود انجام شود. آغاز با پروژه‌های پایلوت در حوضه‌های آبریز منتخب، تمرکز بر مسائل مشخص و قابل اندازه‌گیری، و استفاده از داده‌های در دسترس، امکان یادگیری نهادی و کاهش ریسک را فراهم می‌کند. هم‌زمان، یکپارچه‌سازی تدریجی داده‌ها میان نهادهای مرتبط و ارتقای فرهنگ استفاده از داده‌ها، بستر لازم برای تصمیم‌سازی و تصمیم‌گیری هوشمندتر را تقویت خواهد کرد.

در نهایت، هوش مصنوعی فرصتی برای ارتقای عقلانیت جمعی در حکمرانی آب است؛ فرصتی برای اتخاذ تصمیم‌هایی مبتنی بر شواهد، تحلیل‌های بین‌بخشی و نگاه بلندمدت. بهره‌گیری آگاهانه از این فناوری نه نیازمند تغییرات شتاب‌زده است و نه مستلزم بازتعریف مأموریت‌ها، بلکه می‌تواند به‌عنوان ابزاری توانمندساز در چارچوب‌های موجود به‌کار گرفته شود. اگر این مسیر با دقت، تدرج و اعتماد به دانش همراه شود، می‌توان امیدوار بود که حکمرانی آب در ایران بیش از پیش در خدمت پایداری سرزمین، رفاه جامعه و امنیت نسل‌های آینده قرار گیرد.



یادداشت کوتاه



وحید اردکانیان

کارشناس آب و کشاورزی،
عضو هیات امنای انجمن پسته کشور،
و عضو خانه کشاورز ایران

فناوری و نوآوری در مدیریت آب

مقدمه

بحران آب در دهه‌های اخیر از یک چالش محدود جغرافیایی به یک مسئله جهانی با ابعاد چندگانه اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و حتی امنیتی تبدیل شده است. رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی، تغییرات اقلیمی و افزایش سطح رفاه، همگی موجب افزایش تقاضا برای منابع آب شده‌اند، در حالی که عرضه این منابع به دلیل محدودیت‌های طبیعی و تخریب زیست‌محیطی با محدودیت‌های جدی مواجه است. در این میان، بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین، نقش کلیدی در شکل‌گیری و مدیریت این بحران دارد.

بر اساس گزارش‌های فائو، حدود ۷۰ درصد از برداشت آب شیرین در سطح جهان به بخش کشاورزی اختصاص دارد، این سهم در کشورهای در حال توسعه، به دلیل ساختار اقتصادی وابسته به کشاورزی و ضعف فناوری، به حدود ۹۰ درصد می‌رسد. از منظر مصرف واقعی نیز، کشاورزی بیشترین سهم را در مصرف خالص آب دارد، به‌طوری‌که در بسیاری از مناطق، عمده آب برداشت‌شده در این بخش، مصرف شده و به منابع زیرزمینی باز نمی‌گردد.

در عین حال، پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که برای تأمین امنیت غذایی جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰، نیاز به افزایش تولیدات کشاورزی به‌طور قابل‌توجهی وجود دارد که این امر مستلزم بهبود بهره‌وری آب است. بر اساس گزارش‌های یونسکو، تقاضای آب در بخش کشاورزی ممکن است تا میانه

قرن جاری تا ۵۰ درصد افزایش یابد. این روند، ضرورت تحول در شیوه‌های مدیریت آب را به یک الزام راهبردی تبدیل کرده است.

ایران؛ نمونه‌ای از تنش مزمن آب

ایران به‌عنوان کشوری با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، در زمره مناطقی قرار دارد که به‌طور ساختاری با محدودیت منابع آب مواجه‌اند. میانگین بارندگی سالانه کشور حدود ۲۵۰ میلی‌متر است که به‌طور قابل‌توجهی کمتر از میانگین جهانی است. علاوه بر این، توزیع زمانی بارش‌ها عمدتاً در فصول غیرزراعی صورت می‌گیرد و توزیع مکانی آن نیز به‌گونه‌ای است که بخش عمده‌ای از منابع آب در مناطق کم‌تقاضا متمرکز شده‌اند.

در دهه‌های اخیر، فشار بر منابع آب زیرزمینی به دلیل توسعه کشاورزی، افزایش جمعیت و سیاست‌های خودکفایی غذایی، به شدت افزایش یافته است. برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها، منجر به افت سطح آب زیرزمینی، کاهش کیفیت آب و بروز پدیده فرونشست زمین در بسیاری از دشت‌های کشور شده است. این روند نشان می‌دهد که الگوی فعلی بهره‌برداری از منابع آب در ایران پایدار نیست و نیازمند اصلاحات اساسی است.

در این میان، بخش کشاورزی با سهمی بیش از ۸۰ تا ۹۰ درصد از مصرف آب، اصلی‌ترین کانون مداخله برای بهبود وضعیت منابع آبی محسوب می‌شود. بنابراین، هرگونه

سیاست‌گذاری مؤثر در حوزه مدیریت آب، ناگزیر باید بر این بخش متمرکز باشد.

نوآوری و فناوری: راه‌حل یا ابزار؟

در ادبیات توسعه، فناوری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای افزایش بهره‌وری و بهبود کارایی منابع شناخته می‌شود. در حوزه آب و کشاورزی نیز، طی دهه‌های اخیر طیف گسترده‌ای از فناوری‌ها توسعه یافته‌اند که هدف آن‌ها کاهش مصرف آب، افزایش بهره‌وری و بهبود مدیریت مزرعه است. با این حال، تجارب نشان می‌دهند که صرف وجود فناوری، به‌معنای حل مسئله نیست. آنچه اهمیت دارد، «پذیرش و استفاده مؤثر» از این فناوری‌ها توسط بهره‌برداران است. در بسیاری از موارد، فناوری‌هایی که از نظر علمی بسیار کارآمد هستند، در عمل با استقبال محدودی مواجه شده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده آن است که شکاف مهمی میان «کارایی فنی» و «کارایی اقتصادی-اجتماعی» فناوری‌ها وجود دارد.

تحلیل رفتار کشاورزان در پذیرش فناوری

رفتار کشاورزان در مواجهه با فناوری، عمدتاً تابعی از منطق اقتصادی و کاهش ریسک است. برخلاف بنگاه‌های صنعتی که ممکن است برای افزایش رقابت‌پذیری به نوآوری روی آورند، کشاورزان-به‌ویژه در نظام‌های خرده‌مالکی- تمایل دارند از فناوری‌هایی استفاده کنند که:

هزینه اولیه پایینی داشته باشد،
بازگشت سرمایه سریع و قابل پیش‌بینی داشته باشد،
نیاز به دانش فنی پیچیده نداشته باشد،
و ریسک تولید را افزایش ندهد.

در این چارچوب، فناوری‌هایی که این ویژگی‌ها را دارند، با احتمال بیشتری پذیرفته می‌شوند، حتی اگر از نظر فنی در سطح پایین‌تری قرار داشته باشند.

طبقه‌بندی فناوری‌های مدیریت آب

با توجه به مباحث فوق، می‌توان فناوری‌های مدیریت آب در کشاورزی را در سه دسته تحلیلی طبقه‌بندی کرد:

۱- فناوری‌های با اثر مستقیم بر بهره‌وری و درآمد

این فناوری‌ها شامل سیستم‌هایی هستند که به‌طور مستقیم موجب کاهش مصرف آب و افزایش عملکرد محصول می‌شوند. آبیاری قطره‌ای و تحت فشار از مهم‌ترین نمونه‌های این گروه هستند. این فناوری‌ها با افزایش راندمان کاربرد آب، کاهش تلفات و بهبود یکنواختی توزیع، توانسته‌اند در بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار گیرند.

در ایران نیز، اجرای طرح‌های توسعه آبیاری نوین، به‌ویژه در دهه اخیر، موجب افزایش سطح زیر پوشش این فناوری‌ها شده است. با این حال، چالش‌هایی مانند طراحی غیراصولی، عدم نگهداری مناسب و نبود آموزش

کافی، در برخی موارد موجب شده است که عملکرد واقعی این سیستم‌ها کمتر از ظرفیت بالقوه آن‌ها باشد.

۲- فناوری‌های مبتنی بر داده و کشاورزی دقیق

این دسته شامل فناوری‌هایی است که بر پایه جمع‌آوری، پردازش و تحلیل داده عمل می‌کنند. حسگرهای رطوبت خاک، سامانه‌های پیش‌بینی آب‌وهوا، تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای مدیریت مزرعه، از جمله این ابزارها هستند.

این فناوری‌ها می‌توانند به بهینه‌سازی زمان و مقدار آبیاری کمک کنند و از مصرف غیرضروری آب جلوگیری نمایند. با این حال، پیچیدگی فنی، هزینه بالا و نیاز به زیرساخت‌های ارتباطی و آموزشی، موجب شده است که استفاده از آن‌ها در بسیاری از مناطق محدود باشد.

۳- فناوری‌های پیشرفته اتوماسیون

این فناوری‌ها شامل سیستم‌های هوشمند کنترل آبیاری، شیرهای برقی، و سیستم‌های پیشرفته کودآبیاری هستند. این ابزارها بیشتر در گلخانه‌ها و واحدهای تولیدی با مقیاس صنعتی کاربرد دارند و هدف آن‌ها افزایش دقت و کاهش وابستگی به نیروی انسانی است.

در ایران، این فناوری‌ها عمدتاً در واحدهای بزرگ و سرمایه‌بر مورد استفاده قرار می‌گیرند و به‌دلیل هزینه بالا و نیاز به پشتیبانی فنی، در کشاورزی سنتی کمتر رایج هستند.

شکاف کارایی-پذیرش؛ چالش کلیدی

یکی از مهم‌ترین موانع در زمینه استفاده از تکنولوژی‌ها، وجود شکاف میان «کارایی فنی» و «پذیرش عملی» آن‌ها است. این شکاف موکد آن است که موفقیت یک فناوری، صرفاً به ویژگی‌های فنی آن وابسته نیست، بلکه به میزان تطابق آن با شرایط اقتصادی، اجتماعی و نهادی نیز بستگی دارد.

در ایران، این شکاف به‌دلیل محدودیت‌های نهادی، ضعف نظام ترویج، و عدم هماهنگی میان سیاست‌ها، بیشتر نمایان است. در نتیجه، بسیاری از فناوری‌های پیشرفته، علی‌رغم مزایای بالقوه، نتوانسته‌اند به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گیرند.

علاوه بر این، تمرکز صرف بر فناوری‌های مدیریتی آب (نظیر سیستم‌های آبیاری) بدون توجه به فناوری‌های زیستی در سطح گیاه، می‌تواند کارایی مداخلات را محدود کند. به‌طور خاص، اصلاح بذر و توسعه ارقام مقاوم به خشکی، گرما و تنش‌های محیطی یکی از ارکان کلیدی افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی محسوب می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که ارقام به‌نژادی‌شده می‌توانند با بهبود کارایی مصرف آب و حفظ عملکرد در شرایط تنش، به‌طور مستقیم فشار بر منابع آبی را کاهش دهند.

با این حال، مشابه سایر فناوری‌ها، این حوزه نیز با شکاف کارایی-پذیرش مواجه است. چالش‌هایی مانند دسترسی محدود کشاورزان به بذره‌های بهبودیافته، هزینه اولیه بالاتر، عدم انطباق برخی ارقام با شرایط محلی، و ضعف نظام‌های توزیع، مانع از بهره‌برداری کامل از این ظرفیت شده است. همچنین، پذیرش این فناوری‌ها نیازمند اعتماد کشاورزان، انتقال دانش مؤثر، و سازگاری با ترجیحات بازار و زنجیره ارزش است.

بنابراین، نادیده گرفتن هم‌افزایی میان فناوری‌های مهندسی (مانند آبیاری) و فناوری‌های زیستی (مانند اصلاح ارقام) می‌تواند یکی از عوامل تعمیق شکاف کارایی-پذیرش باشد. رویکردهای یکپارچه که به‌طور هم‌زمان به بهبود ژنتیکی گیاه، مدیریت مزرعه و زیرساخت‌های نهادی توجه دارند، در مطالعات انجام شده در این حوزه، به‌عنوان مؤثرترین مسیر برای افزایش تاب‌آوری کشاورزی در برابر کم‌آبی معرفی شده‌اند.

Document Type

Technical paper

فنی و ترویجی

نوع مقاله

The Future of Smart Irrigation: Global Market Analysis, Trends, and Opportunities

I. Hajirad¹, Kh. Ahmadaali^{2*}, A.M. Liaghat³

1, 2, 3- Ph.D. Candidate, Associate Professor, and Professor,
Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of
Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

* Corresponding Author Email: khahmadauli@ut.ac

Received ► 21-06-2025
Revised ► 29-07-2025
Accepted ► 25-08-2025
Available online ► 16-03-2026

آینده آبیاری هوشمند: تحلیل بازار جهانی، روندها و فرصت‌ها

ایمان حاجی‌راد^۱، خالد احمدآلی^{۲*}، عبدالمجید لیاقت^۳

۱ و ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌های کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

* راینامه نویسنده مسئول: khahmadauli@ut.ac

تاریخ دریافت ► ۱۴۰۴/۰۳/۳۱
تاریخ بازنگری ► ۱۴۰۴/۰۵/۰۷
تاریخ پذیرش ► ۱۴۰۴/۰۶/۰۳
تاریخ انتشار ► ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

Abstract

The smart irrigation market, as one of the emerging and rapidly growing sectors in agriculture and water resources management, has attracted considerable attention in recent years. This technology enables optimized and automated irrigation through the use of intelligent devices and systems such as sensors, weather- and soil-moisture-based controllers. The primary objective of these systems is to reduce water losses and improve water use efficiency. The growing demand for smart irrigation technologies is driven by water scarcity, climate change, population growth, and the increasing need for higher food production. Moreover, technological advancements such as the Internet of Things (IoT), machine learning (ML), and big data analytics play a crucial role in optimizing irrigation processes and reducing operational costs. The smart irrigation market is projected to reach USD 3.94 billion by 2029, with a compound annual growth rate (CAGR) of 16.2%. Market growth is influenced by government policies, financial incentives, and investments in research and development. However, challenges such as high initial investment costs and connectivity issues in rural areas remain major barriers to the widespread adoption of this technology. International studies indicate that smart irrigation systems can reduce water consumption by 20-50% and increase water use efficiency by up to approximately 44%, highlighting their effectiveness as a viable solution for addressing water scarcity and enhancing irrigation system performance.

Keywords: Smart Irrigation, Irrigation Market, Smart Technology, Automation.

چکیده

بازار آبیاری هوشمند به عنوان یکی از بخش‌های نوظهور و در حال رشد در صنعت کشاورزی و مدیریت منابع آب، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این فناوری با استفاده از دستگاه‌ها و سیستم‌های هوشمند مانند حسگرها، کنترل‌کننده‌های مبتنی بر داده‌های آب و هوا و رطوبت خاک، امکان آبیاری بهینه و خودکار را فراهم می‌آورد. هدف اصلی این سیستم‌ها کاهش هدررفت آب و بهبود بهره‌وری آب است. افزایش تقاضا برای این فناوری به دلیل کمبود منابع آبی، تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و نیاز به افزایش تولید مواد غذایی است. همچنین، پیشرفت‌های فناوری همچون اینترنت اشیا (IoT)، یادگیری ماشین (ML) و داده‌های کلان (Big Data) نقش مهمی در بهینه‌سازی فرآیند آبیاری و کاهش هزینه‌ها ایفا می‌کنند. پیش‌بینی می‌شود بازار آبیاری هوشمند تا سال ۲۰۲۹ به ۳/۹۴ میلیارد دلار با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) معادل ۱۶/۲ درصد برسد. رشد این بازار تحت تأثیر سیاست‌های دولتی، حمایت‌های مالی و تحقیق و توسعه قرار دارد. با این حال چالش‌هایی مانند هزینه‌های اولیه بالا و مشکلات اتصال در مناطق روستایی، از موانع اصلی پیش روی گسترش همه‌جانبه این بازار محسوب می‌شوند. نتایج مطالعات بین‌المللی حاکی از آن است که سامانه‌های آبیاری هوشمند با کاهش ۲۰ تا ۵۰ درصدی مصرف آب و افزایش بهره‌وری آب تا حدود ۴۴ درصد، می‌توانند به عنوان راهکاری مؤثر برای مقابله با کمبود آب و ارتقای بهره‌وری در سیستم‌های آبیاری مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری هوشمند، بازار آبیاری، هوشمندسازی، خودکارسازی.

How to cite this article:

Hajirad, I., Ahmadaali, Kh., & Liaghat, A.M. (2026). The Future of Smart Irrigation: Global Market Analysis, Trends, and Opportunities. Journal of Water and Sustainable Development, 12(4), 9-23. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i4.2506-1435>

(IoT) و با تحلیل توسط الگوریتم‌های پیشرفته هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی^۲ برای تشخیص الگوهای پیچیده و الگوریتم‌های تصمیم‌گیری تطبیقی برای بهینه‌سازی مداوم آبیاری در شرایط متغیر محیطی، امکان‌پذیر می‌شود. در جهانی که با چالش‌های جدی منابع آبی و نیاز فزاینده به امنیت غذایی روبه‌روست، هوشمندسازی در کشاورزی به عنوان یک راهکار ضروری برای دستیابی به پایداری و بهره‌وری حداکثری از منابع آب مطرح می‌شود (Obaideen و همکاران، ۲۰۲۲). مطالعات مختلف نشان داده است استفاده از سامانه‌های آبیاری هوشمند، به‌ویژه در مناطقی که از حسگرهای رطوبت خاک و داده‌های هواشناسی بهره می‌برند، می‌تواند بین ۲۰ تا ۵۰ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی ایجاد کند. همچنین در برخی گزارش‌ها آمده است بهره‌وری آبیاری در مقایسه با روش‌های سنتی تا ۴۴ درصد افزایش یافته است. این داده‌ها نشان‌دهنده اثربخشی بالای فناوری‌های نوین در مدیریت منابع آبی هستند (Gamal و همکاران، ۲۰۲۳؛ Nsoh و همکاران، ۲۰۲۴؛ University of California Agriculture و Natural Resources، ۲۰۲۰؛ PS Market Research، ۲۰۲۴). شایان ذکر است پیش از ورود به جزئیات فنی و بررسی سطوح مختلف آبیاری هوشمند، ضروری است ابتدا تفاوت میان دو مفهوم کلیدی اتوماسیون و هوشمندسازی به‌روشنی بیان شود؛ چراکه این دو، اگرچه در نگاه اول مشابه به‌نظر می‌رسند، اما در اصل، سطوح متفاوتی از فناوری، تصمیم‌گیری و پاسخ‌گویی به شرایط محیطی را نمایندگی می‌کنند. در ادامه، با تعریف دقیق هر یک و مقایسه آن‌ها از منظر کاربردی، به‌ویژه در حوزه آبیاری، درک عمیق‌تری از ضرورت و مزایای هوشمندسازی حاصل می‌شود.

۲- اتوماسیون^۳

اتوماسیون به فرآیندی گفته می‌شود که در آن فعالیت‌ها به صورت خودکار و بدون نیاز به مداخله مستقیم انسان انجام می‌شوند. در این سیستم‌ها، وظایف از پیش برنامه‌ریزی شده و طبق یک زمان‌بندی مشخص یا مجموعه‌ای از دستورات تعریف شده اجرا می‌شوند (Weyrich، ۲۰۲۴). این ویژگی، اتوماسیون را به گزینه‌ای مناسب برای عملیات تکراری از جمله آبیاری در مقیاس وسیع تبدیل کرده است (Rajakumar و همکاران، ۲۰۰۸). به‌عنوان مثال، در یک سیستم آبیاری قطره‌ای اتوماتیک، ممکن است از تایمرهایی استفاده شود که پمپ آب را هر روز رأس ساعت مشخصی روشن کرده و پس از مدت معینی خاموش کنند. در این حالت، سیستم بدون توجه به شرایط محیطی مانند رطوبت خاک، دمای هوا یا پیش‌بینی بارش عمل می‌کند و صرفاً بر اساس برنامه‌ریزی اولیه وظایف خود را انجام می‌دهد. بنابراین، هرچند سیستم‌های اتوماتیک می‌توانند موجب کاهش نیاز به نیروی انسانی و بهبود مدیریت زمان شوند، اما به دلیل عدم واکنش‌پذیری به داده‌های زنده محیطی در مقایسه با

در دنیای امروز، کشاورزی دیگر فقط یک فعالیت سنتی برای تأمین غذا نیست، بلکه به صنعتی پویا و فناورانه تبدیل شده که مستقیماً با امنیت غذایی، توسعه پایدار، و مدیریت منابع طبیعی در ارتباط است. یکی از حیاتی‌ترین منابع در این حوزه، آب است؛ منبعی که به واسطه تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و بهره‌برداری ناپایدار، با چالش‌های جدی مواجه شده است. در این میان، استفاده بهینه از آب در کشاورزی که بزرگترین مصرف‌کننده این منبع در جهان است بیش از هر زمان دیگری اهمیت یافته است (Petrenko و Bondarenko، ۲۰۲۵). روش‌های آبیاری متداول مانند آبیاری غرقابی که با پخش آب در سطح زمین صورت می‌گیرد، یا روش‌های آبیاری نواری و حتی قطره‌ای بدون کنترل‌کننده‌های پیشرفته باوجود سادگی و رایج بودن با اتلاف قابل توجه آب، احتمال کاهش بهره‌وری محصول و عدم سازگاری بهینه با شرایط اقلیمی متغیر همراه هستند. این اتلاف شامل مواردی مانند تبخیر از سطح خاک، رواناب سطحی و نفوذ عمقی آب به خارج از محدوده توسعه ریشه است که منجر به عدم بهره‌وری بهینه از منابع آبی و کاهش کارایی سیستم آبیاری می‌شود. این شیوه‌ها معمولاً بر پایه قضاوت یا تجربه کشاورز انجام می‌شوند و توانایی پاسخ‌گویی به نیازهای لحظه‌ای گیاهان یا تغییرات اقلیمی مانند بارش، دمای هوا یا میزان رطوبت خاک را ندارند. چنین سیستم‌هایی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نه تنها منجر به کاهش تولید می‌شوند، بلکه موجب آسیب به منابع خاک و آب نیز خواهند شد (Selvakumar و همکاران، ۲۰۲۵). در پاسخ به این چالش‌ها، هوشمندسازی در کشاورزی و به‌ویژه در آبیاری، به‌عنوان رویکردی نوین و آینده‌نگرانه مطرح شده است. در این سیستم‌ها، با بهره‌گیری از سنسورها، اینترنت اشیا (IoT)، هوش مصنوعی و تحلیل داده‌ها، تصمیم‌گیری به‌جای انسان به سامانه‌های خودکار و تطبیق‌پذیر سپرده می‌شود. این سامانه‌ها قادر هستند اطلاعات محیطی مانند رطوبت خاک، دمای هوا، پیش‌بینی بارندگی و نوع گیاه را به‌صورت لحظه‌ای تحلیل کرده و بر اساس آن، برنامه‌ای دقیق، هدفمند و بهینه برای آبیاری ارائه دهند. نتیجه این رویکرد، کاهش مصرف آب، افزایش بهره‌وری، بهبود سلامت گیاه و در نهایت، حفظ منابع طبیعی است (Luu و همکاران، ۲۰۲۵). هوشمندسازی نه تنها موجب صرفه‌جویی در منابع می‌شود، بلکه انعطاف‌پذیری، دقت و پاسخ‌گویی سریع به شرایط محیطی را نیز ممکن می‌سازد. در مقایسه با سیستم‌های آبیاری متداول یا حتی اتوماتیک، سیستم‌های هوشمند قادر هستند با یادگیری و سازگاری، بهترین تصمیم را در هر لحظه اتخاذ کنند؛ تصمیمی که نه تنها به نفع مزرعه است، بلکه آینده‌ای پایدار برای کشاورزی ترسیم می‌کند. این قابلیت با بهره‌گیری از داده‌های جمع‌آوری شده توسط حسگرها و سامانه‌های اینترنت اشیا

سیستم‌های هوشمند، دقت و کارایی کمتری دارند (Dhamal و Mehrotra، ۲۰۲۱؛ Vera و همکاران، ۲۰۲۱). در ادامه انواع اتوماسیون که شامل نیمه اتوماتیک و تمام اتوماتیک هستند بررسی خواهند شد تا تفاوت‌ها و کاربردهای هر یک در سیستم‌های آبیاری روشن‌تر شود.

۱-۲- سیستم نیمه اتوماتیک^۴

سیستم‌ها و کنترل‌های نیمه‌اتوماتیک به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در هر نوبت آبیاری نیازمند توجه و مداخله دستی انسان هستند. این نوع سیستم‌ها معمولاً نسبت به سیستم‌های کاملاً اتوماتیک ساده‌تر، ارزان‌تر و کم‌هزینه‌تر هستند، به همین دلیل در بسیاری از مزارع کوچک یا نیمه صنعتی استفاده می‌شوند. در اغلب سیستم‌های نیمه‌اتوماتیک، از تایمرهای مکانیکی یا الکترونیکی استفاده می‌شود که وظیفه دارند در زمان‌های از پیش تعیین شده، اجزای کنترلی مانند شیرهای برقی یا پمپ‌ها را فعال کنند. در این نوع سیستم‌ها، کشاورز یا اپراتور معمولاً زمان شروع آبیاری و مدت زمان آن را به صورت دستی تعیین می‌کند و پس از پایان آبیاری وظیفه دارد دستگاه‌ها را به حالت اولیه برگرداند یا آن‌ها را به موقعیت‌های جدید منتقل کند تا برای نوبت بعدی آبیاری آماده باشند. در برخی از این سیستم‌ها ممکن است بخشی از فرایندها به صورت کاملاً خودکار انجام شود، درحالی‌که سایر بخش‌ها همچنان به مداخله انسانی یا عملکرد نیمه‌اتوماتیک نیاز دارند. این ترکیب از خودکارسازی و کنترل دستی، با امکان تنظیم هم‌زمان زمان‌بندی و مقدار آبیاری توسط سامانه و کاربر، انعطاف‌پذیری بیشتری در مدیریت فرآیند آبیاری ایجاد می‌کند، اما درعین حال، نیازمند هماهنگی مؤثر بین کنترل‌کننده مرکزی (کنترلر) و اجزای پراکنده در سطح مزرعه است. این ارتباط مؤثر میان اجزا و کنترلر می‌تواند از طریق سیم‌کشی، امواج رادیویی یا شبکه‌های ساده محلی برقرار شود (Rathika و همکاران، ۲۰۲۰؛ Rajakumar و همکاران، ۲۰۰۸). در مجموع، سیستم‌های نیمه‌اتوماتیک گزینه‌ای مناسب برای مزارعی هستند که در آن‌ها هزینه، سهولت نصب و نیاز به کنترل نسبی نسبت به خودکارسازی کامل اهمیت بیشتری دارد.

۲-۲- سیستم تمام اتوماتیک^۵

سیستم‌های تمام اتوماتیک به جز در مواردی مانند بازرسی‌های دوره‌ای یا نگهداری‌های معمول، معمولاً بدون نیاز به دخالت مستقیم اپراتور کار می‌کنند. در این نوع سیستم‌ها، کشاورز می‌تواند زمان یا شرایط شروع آبیاری (مانند رسیدن رطوبت خاک به یک حد مشخص) و مدت آن را تعیین کند و سپس با روشن کردن منبع آب یا فعال‌سازی کنترلرهای برنامه‌ریزی شده، کل فرآیند آبیاری به صورت خودکار انجام می‌گیرد. در این سامانه‌ها، ممکن است از سنسورهای رطوبت خاک مانند تانسیومترها یا بلوک‌های مقاوم‌تری الکتریکی استفاده شود تا

به محض رسیدن رطوبت خاک به سطحی مشخص (از پیش تعیین شده)، کنترل‌های الکتریکی را برای شروع آبیاری فعال کنند. در این زمینه، سنسورها به عنوان عناصر تشخیص‌دهنده، تنها آستانه‌های از پیش تعریف شده را پایش کرده و محرک اجرای دستورات برنامه‌ریزی شده هستند. آن‌ها فاقد قابلیت تحلیل پیچیده داده‌ها، یادگیری الگوها، و اتخاذ تصمیمات تطبیقی بر اساس متغیرهای متعدد محیطی می‌باشند. این ماهیت واکنشی و غیرتحلیلی، تمایز اصلی سیستم‌های تمام‌اتوماتیک از سیستم‌های هوشمند را آشکار می‌سازد. همچنین مدت زمان آبیاری ممکن است با استفاده از تایمرهای برنامه‌ریزی شده، سنسورهای رطوبت خاک یا سنسورهای سطحی آب تنظیم و کنترل شود. نکته مهم در سیستم‌های تمام اتوماتیک این است که نیاز به منبع آب قابل دسترس در هر لحظه دارند؛ مانند چاه‌های کشاورزی یا مخازن ذخیره آب در مزرعه که بتوانند در هر زمان که سیستم به آن‌ها فرمان می‌دهد، آب‌رسانی را انجام دهند. با وجود پیشرفت فناوری، بیشتر مزارع کشاورزی هنوز زیرساخت یا انعطاف‌پذیری لازم برای بهره‌برداری کامل از سیستم‌های کاملاً اتوماتیک را ندارند (Rathika و همکاران، ۲۰۲۰). محدودیت‌هایی مانند منابع آبی محدود، هزینه‌های بالا یا نبود شبکه‌های ارتباطی پیشرفته، استفاده گسترده از این نوع سیستم‌ها را در برخی مناطق دشوار می‌کند.

با وجود مزایای سیستم‌های تمام‌اتوماتیک، محدودیت‌هایی مانند عدم قابلیت تحلیل پیچیده داده‌ها و تصمیم‌گیری تطبیقی وجود دارد؛ این محدودیت‌ها، زمینه را برای معرفی آبیاری خودکار فراهم می‌کنند.

۳- آبیاری خودکار^۶

آبیاری خودکار به سیستمی گفته می‌شود که بدون نیاز به مداخله مستقیم کشاورز، فرآیند آبیاری را بر اساس یک برنامه از پیش تعیین شده انجام می‌دهد. این سیستم معمولاً شامل تایمرها، شیرهای برقی، پمپ‌ها و لوله‌های انتقال آب است که در زمان‌های مشخص، آبیاری را فعال می‌کنند. این روش باعث کاهش نیروی کار و صرفه‌جویی در زمان می‌شود، اما تفاوت عمده آن با سیستم‌های هوشمند در این است که معمولاً فاقد قابلیت یادگیری و تطبیق پویا با تمامی متغیرهای لحظه‌ای و پیچیده محیطی مانند پیش‌بینی بارش، تغییرات دمایی و نوع گیاه است و ممکن است در برخی مواقع باعث مصرف بیش‌ازحد آب یا کم‌آبی برای گیاهان شود (Munusamy و همکاران، ۲۰۲۱؛ Saxena، ۲۰۲۱؛ Zhang و Li، ۲۰۲۵).

۴- هوشمندسازی^۷

هوشمندسازی مرحله‌ای پیشرفته‌تر از اتوماسیون است که در آن سیستم از سنسورها، داده‌ها و الگوریتم‌های هوش مصنوعی استفاده می‌کند تا تصمیم‌گیری بهینه و تطبیقی انجام دهد. سیستم هوشمند توانایی یادگیری و پاسخ به

شرایط محیطی متغیر را دارد (Qian و همکاران، ۲۰۲۴). به عنوان مثال یک سیستم آبیاری هوشمند می تواند شامل ورودی های مختلف معادله بیلان آب در محدوده توسعه ریشه نظیر سنسورهای رطوبت خاک، دمای خاک و یا وردی های اقلیمی و گیاهی باشد. این سیستم تنها در صورتی مؤلفه ذخیره رطوبتی در معادله بیلان آب (آبیاری یا زهکشی) را فعال می کند که رطوبت خاک در حد مطلوب در منطقه توسعه ریشه نباشد. به عنوان مثال سیستم آبیاری هوشمند باید قادر باشد در صورت پیش بینی بارش در گام یا گام های زمانی آینده مقدار آب آبیاری در گام زمانی فعلی را با آن تطبیق دهد. همچنین سیستم آبیاری هوشمند باید قادر به شبیه سازی رفتار و نیازهای گیاهان مختلف باشد. همچنین، اتوماسیون و هوشمندسازی از نظر انعطاف پذیری و تصمیم گیری، کارایی و سطح فناوری هم با هم متفاوت هستند (Nsah و همکاران، ۲۰۲۴). لازم به ذکر است در سیستم های آبیاری، گرچه هوشمندسازی می تواند به طور مستقل به تحلیل و ارائه توصیه های بهینه بپردازد، اما دستیابی به حداکثر کارایی و اثربخشی نیازمند هم افزایی با اتوماسیون است. هوشمندسازی وظیفه تصمیم گیری بهینه را بر عهده دارد، در حالی که اتوماسیون اجرای خودکار این تصمیمات را در مزرعه تضمین می کند، که در نهایت به کاهش مداخله انسانی و بهینه سازی فرآیند آبیاری منجر می شود.

بررسی سطوح مختلف هوشمندسازی در آبیاری به معنای تحلیل و طبقه بندی فناوری ها و روش هایی است که به درجات مختلف برای بهینه سازی مصرف آب و بهبود بهره وری کشاورزی استفاده می شوند. در ادامه، به تشریح این سطوح پرداخته می شود تا تفاوت ها و قابلیت های هر یک به روشنی تبیین شود.

۴-۱- آبیاری نیمه هوشمند^۱

آبیاری نیمه هوشمند ترکیبی از سیستم های اتوماتیک و هوشمند است که از سنسورها، کنترلرهای هوشمند و داده های هواشناسی برای بهینه سازی آبیاری استفاده می کند. این سیستم ها می توانند از تصاویر ماهواره ای برای بررسی وضعیت رطوبت خاک اطلاعات جمع آوری کنند، اما معمولاً از داده های پیشین استفاده می کنند و نمی توانند به طور لحظه ای با تغییرات محیطی تنظیم شوند. تصمیم گیری های این سیستم ها معمولاً به صورت محلی انجام می شود و سطح هوشمندی آن ها نسبت به سیستم های کاملاً هوشمند پایین تر است (Peng و Ferrarezi، ۲۰۲۱).

۴-۲- آبیاری تمام هوشمند^۲

آبیاری هوشمند پیشرفته ترین نوع آبیاری است که از اینترنت اشیا (IoT)، هوش مصنوعی (AI) و الگوریتم های یادگیری ماشین (ML) برای بهینه سازی مصرف آب استفاده می کند. این سیستم قادر است داده های لحظه ای سنسورها، تصاویر ماهواره ای، پیش بینی های هواشناسی و شرایط محیطی را تجزیه و تحلیل کند و با استفاده از مدل های پیشرفته،

بهینه ترین برنامه آبیاری را ارائه دهد. همچنین این سیستم ها معمولاً از طریق اپلیکیشن های موبایل یا پل های کنترلی ابری مدیریت می شوند و به کشاورزان اجازه می دهند از هر جای دنیا بر فرآیند آبیاری نظارت داشته باشند. آبیاری هوشمند نه تنها باعث کاهش مصرف آب می شود، بلکه عملکرد محصول و کیفیت خاک را نیز بهبود می بخشد (Gamal و همکاران، ۲۰۲۳؛ Vallejo-Gomez و همکاران، ۲۰۲۳). سطوح مختلف هوشمندسازی نشان دهنده پیشرفت از کنترل دستی به سیستم های کاملاً خودکار و هوشمند است. هرچه سطح هوشمندسازی بالاتر باشد، دقت در مصرف منابع و بهره وری کشاورزی افزایش می یابد، اما هزینه ها و پیچیدگی های فنی نیز بیشتر خواهد بود. انتخاب سطح مناسب به نیازهای کشاورزان، نوع محصول و منابع مالی و فنی موجود بستگی دارد (Qian و همکاران، ۲۰۲۴).

پس از بررسی مفاهیم پایه ای اتوماسیون و هوشمندسازی در سطوح مختلف و تبیین کاربردهای آن در حوزه های مختلف، اکنون ضروری است که نگاهی جامع تر به وضعیت بازار جهانی هوشمندسازی، به ویژه در بخش آبیاری، صورت گیرد. درک صحیح از روندهای حاکم بر این بازار، نرخ رشد سالانه، محرک های کلیدی توسعه، فناوری های نوظهور، بازیگران اصلی بازار و همچنین چالش های پیش رو، به تصمیم گیران و فعالان این حوزه کمک می کند تا مسیر آینده را با دقت و آگاهی بیشتری ترسیم کنند. بازار جهانی آبیاری هوشمند طی سال های اخیر با رشد قابل توجهی همراه بوده و انتظار می رود در سال های آینده نیز این روند صعودی با شتاب بیشتری ادامه یابد. عواملی مانند تغییرات اقلیمی، کمبود منابع آبی، افزایش تقاضا برای غذا به واسطه رشد جمعیت، پیشرفت های فناورانه در زمینه اینترنت اشیا (IoT) و داده کاوی، و همچنین سیاست های حمایتی دولت ها، از جمله محرک های اصلی رشد این بازار به شمار می روند. برای آشنایی و درک عمیق تر از نقش و اهمیت اینترنت اشیا (IoT) در تحقق این سیستم های پیشرفته، در بخش بعدی به طور مفصل به این مفهوم پرداخته می شود.

۵- اینترنت اشیا (IoT)

مفهوم IoT به طور کلی به بسیاری از اشیاء و وسایل محیط اطراف ما که به شبکه اینترنت متصل شده و توسط نرم افزارهای موجود در تلفن های هوشمند و تبلت که قابل کنترل و مدیریت هستند، اشاره دارد. IoT به زبان ساده، ارتباط حسگرها و دستگاه ها با شبکه ای است که از طریق آن می توانند با یکدیگر و با کاربرانشان تعامل کنند (Choudhary و همکاران، ۲۰۲۵). بررسی سطوح مختلف هوشمندسازی در آبیاری به معنای تحلیل و طبقه بندی فناوری ها و روش هایی است که به درجات مختلف برای بهینه سازی مصرف آب و بهبود بهره وری کشاورزی استفاده می شوند. با درک عمیق تر از نقش فناوری های کلیدی نظیر اینترنت اشیا در تحقق سیستم های آبیاری هوشمند، اکنون ضروری است که نگاهی جامع تر به وضعیت و چشم انداز بازار جهانی

آبیاری هوشمند انداخته شود. در این راستا، تحلیل دقیق بازار، بررسی نرخ رشد مرکب سالانه (CAGR)، پیش‌بینی ارزش بازار در افق‌های مختلف زمانی و شناسایی فرصت‌های سرمایه‌گذاری و توسعه فناوری، اهمیت بالایی دارد. همچنین، آشنایی با شرکت‌های پیشرو، رویکردهای نوآورانه آن‌ها و پروژه‌های موفق جهانی می‌تواند دید روشن‌تری از آینده این صنعت ترسیم نماید. در بخش‌های بعدی، به این موارد به‌طور مفصل پرداخته می‌شود.

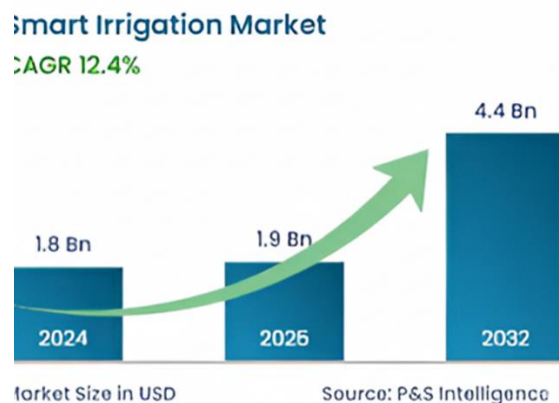
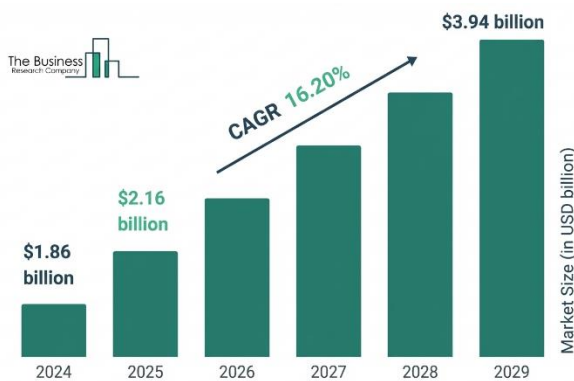
۶- تعریف بازار آبیاری هوشمند^{۱۰}

بازار آبیاری هوشمند به مجموعه‌ای از فناوری‌ها و سیستم‌ها گفته می‌شود که به منظور مدیریت بهینه منابع آبی در زمین‌های کشاورزی، فضای سبز، محوطه‌سازی‌های شهری و دیگر بخش‌ها به کار می‌روند. این سیستم‌ها با استفاده از داده‌های هواشناسی یا اطلاعات به‌دست‌آمده از حسگرهای رطوبت خاک، نیاز آبی محیط را به دقت محاسبه و فرایند آبیاری را به‌طور خودکار و بهینه تنظیم می‌کنند. هدف اصلی این فناوری‌ها کاهش اتلاف آب، حفظ سلامت و کیفیت گیاهان و افزایش بهره‌وری در مصرف منابع آبی است. آبیاری هوشمند معمولاً به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود: سیستم‌های مبتنی بر شرایط اقلیمی و سیستم‌های مبتنی بر حسگر. سیستم‌های اقلیم محور شامل کنترل‌کننده‌هایی هستند که با استفاده از داده‌های محلی هواشناسی، زمان و میزان آبیاری را به‌طور خودکار تنظیم می‌کنند تا آبیاری

متناسب با نیاز واقعی گیاه انجام گیرد. در کنار این، سیستم‌های مبتنی بر حسگر با اندازه‌گیری رطوبت خاک به‌طور دقیق میزان آبیاری را مدیریت می‌کنند. این فناوری‌ها از اجزای مختلفی مانند حسگرها، کنترل‌کننده‌ها، دبی‌سنج‌های آب، نرم‌افزارهای مدیریت آبیاری و سایر تجهیزات پشتیبانی تشکیل شده‌اند (The Business Research Company، ۲۰۲۴).

۷- چشم‌انداز آینده بازار آبیاری هوشمند

بازار جهانی آبیاری هوشمند در سال‌های اخیر با رشد قابل توجهی مواجه شده و روند صعودی آن همچنان ادامه دارد. بر اساس برآوردها، ارزش این بازار در سال ۲۰۲۴ حدود ۱/۸۶ میلیارد دلار تخمین زده می‌شود (The Business Research Company، ۲۰۲۴). انتظار می‌رود این رقم با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) بین ۱۲/۴ تا ۱۶/۲ درصد در بازه زمانی ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۲ افزایش یافته و تا پایان این دوره به حدود ۴/۴ میلیارد دلار برسد. همچنین، پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که ارزش این بازار تا سال ۲۰۲۹ به حدود ۳/۹۴ میلیارد دلار خواهد رسید (شکل ۱). رشد سریع بازار آبیاری هوشمند را می‌توان نتیجه ترکیبی از عوامل فناوریانه، محیط‌زیستی، اقتصادی و سیاست‌گذاری دانست که تقاضا برای راهکارهای نوآورانه و بهره‌ور در حوزه مدیریت منابع آب را در بخش‌های کشاورزی و غیرکشاورزی افزایش داده‌اند (The Business Research Company، ۲۰۲۴؛ SkyQuest Technology، ۲۰۲۴).



شکل ۱- نرخ رشد جهانی بازار آبیاری هوشمند (SkyQuest Technology، ۲۰۲۴)

ارائه یارانه‌ها و مشوق‌ها، آگاهی‌رسانی به کشاورزان درباره مزایای استفاده از سامانه‌های هوشمند و افزایش بهره‌وری محصولات با کمترین اتلاف منابع، نقش به‌سزایی در رشد بازار ایفا کرده‌اند. بر این اساس، نرخ رشد بازار در بازه زمانی ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۱ نیز حدود ۱۴/۷۴ درصد برآورد شده است (شکل ۲). این روند رو به رشد نشان‌دهنده اهمیت راهبردی

از مهمترین عوامل مؤثر بر این رشد می‌توان به افزایش محبوبیت روش‌های کشاورزی دقیق^{۱۱}، ضرورت روزافزون صرفه‌جویی در مصرف آب، توسعه فناوری‌های حسگر و ارتباط بی‌سیم، گسترش استفاده از سامانه‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء (IoT) و ادغام داده‌های اقلیمی در تصمیم‌گیری‌های آبیاری اشاره کرد. افزون بر این، حمایت‌های دولتی از طریق

هوشمندسازی در آبیاری به عنوان راهکاری پایدار، کارآمد و سازگار با شرایط اقلیمی متغیر است که می‌تواند نقش مهمی

در آینده کشاورزی و امنیت غذایی ایفا کند (Verified Market Research, ۲۰۲۵).



شکل ۲- نرخ رشد بازار آبیاری هوشمند در بازه زمانی ۲۰۲۴ تا ۲۰۳۱ (Verified Market Research, ۲۰۲۵)

۸- رشد شهرهای هوشمند و تأثیر آن بر توسعه بازار آبیاری هوشمند

رشد شهرهای هوشمند به طور قابل توجهی به رشد بازار آبیاری هوشمند در آینده کمک می‌کند. افزایش اهمیت راهکارهای آبیاری کارآمد برای استفاده‌های غیرکشاورزی عامل اصلی رشد این بازار به شمار می‌رود. با توجه به اینکه شهرهای هوشمند به یک روند روبه‌رشد در بخش‌های مختلف جهان تبدیل شده‌اند، این شهرها بر مدیریت بهینه منابع آبی برای فضاهای تجاری و مسکونی تأکید دارند. به عنوان مثال، در آوریل ۲۰۲۳، براساس گزارش شاخص شهر هوشمند که توسط مدرسه کسب و کار IMD، یک مدرسه کسب و کار مستقر در سوئیس، منتشر شد، تعداد شهرهای هوشمند با ۱۶/۳٪ افزایش از ۱۱۸ شهر در سال ۲۰۲۱ به ۱۴۱ شهر در سال ۲۰۲۳ رسید. بنابراین، افزایش تعداد شهرهای هوشمند به رشد بازار آبیاری هوشمند کمک می‌کند. این رشد، به ویژه در زمینه‌های مسکونی و تجاری، نیاز به راهکارهای پیشرفته برای مدیریت منابع آب و آبیاری بهینه را بیش از پیش نمایان می‌کند که در نتیجه، تقاضا برای سامانه‌های آبیاری هوشمند افزایش خواهد یافت (The Business Research Company, ۲۰۲۴).

۹- روندها و عوامل محرک رشد بازار آبیاری هوشمند

قابلیت‌های پیشرفته در سامانه‌های آبیاری هوشمند سامانه‌های آبیاری هوشمند به طور گسترده‌ای در اراضی کشاورزی، زمین‌های گلف، مجموعه‌های ورزشی و نواحی مسکونی استفاده می‌شوند. این سامانه‌ها با بهره‌گیری از فناوری اینترنت اشیا (IoT)، به صورت خودکار سطح رطوبت

ادغام فناوری‌هایی مانند یادگیری ماشین (ML)، هوش مصنوعی (AI) و سنجش از دور در این سامانه‌ها، به کشاورزان این امکان را می‌دهد که ناهنجاری‌های آبی، الگوهای مصرف و شرایط غیرعادی را به موقع شناسایی کرده و تصمیم‌گیری بهینه‌تری در مدیریت منابع آب داشته باشند. علاوه بر مزارع کشاورزی، کاربرد این سیستم‌ها به طور گسترده در فضای سبز شهری، زمین‌های ورزشی، باغات مسکونی و پروژه‌های شهر هوشمند نیز گسترش یافته است.

یکی دیگر از عوامل محرک این بازار، کاهش چشمگیر هزینه تجهیزات از جمله حسگرها، کنترلرها و سیستم‌های پایش هوشمند است که امکان استفاده گسترده‌تر را برای کاربران خرد و کلان فراهم کرده است. همچنین، افزایش پدیده‌های اقلیمی افراطی مانند خشکسالی‌های مکرر، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ضرورت استفاده از سامانه‌های آبیاری بسیار کارآمد و هوشمند را دوچندان کرده است (SkyQuest Technology, ۲۰۲۴).

در سطح منطقه‌ای، کشورهای آسیا-اقیانوسیه (APAC) مانند هند، چین، کره جنوبی و استرالیا با سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های ارتباطی، توسعه کشاورزی دقیق و اجرای طرح‌های دولتی حمایتی، به عنوان بازارهای کلیدی در حال ظهور شناخته می‌شوند. برای نمونه، کشور استرالیا با پیاده‌سازی سامانه پیشرفته Manna Irrigation Intelligence به عنوان نخستین راهکار بدون نیاز به نصب حسگر فیزیکی، توانسته با تکیه بر داده‌های ماهواره‌ای و الگوریتم‌های هوشمند، آبیاری را به شکل دقیق و اقتصادی مدیریت نماید. در مجموع، همگرایی پیشرفت‌های فناوری، سیاست‌های حمایتی، فشارهای محیط‌زیستی و تقاضای بازار، نویدبخش آینده‌ای پربازده برای بازار جهانی آبیاری هوشمند در سال‌های پیش‌رو است (Verified Market Research, ۲۰۲۵).

خاک را تشخیص داده و گیاهان را آبیاری می‌کنند. علاوه بر این، استفاده از فناوری‌های پیشرفته‌ای همچون هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین (ML) می‌تواند به تحلیل دقیق داده‌های محیطی مانند تبخیر و تعرق، پیش‌بینی وضعیت رطوبت خاک، و همچنین پیش‌بینی شرایط اقلیمی در آینده کمک کند. به کارگیری چنین فناوری‌هایی موجب بهینه‌سازی مصرف آب و جلوگیری از هدررفت منابع می‌شود. به عنوان مثال آزمایشگاه GEAR وابسته به مؤسسه فناوری ماساچوست (MIT)، در حال توسعه راهکارهایی است که به کشاورزان معیشتی این امکان را دهد تا به راحتی به فناوری‌های کشاورزی دقیق دسترسی پیدا کنند. سامانه آبیاری قطره‌ای مبتنی بر انرژی خورشیدی این مرکز می‌تواند مصرف آب و انرژی را کاهش دهد و در عین حال بهره‌وری محصول را افزایش دهد. علاوه بر این با ترکیب داده‌های هواشناسی و ورودی‌های هوش مصنوعی، زمان‌بندی دقیق آبیاری امکان‌پذیر می‌شود که منجر به کاهش ۴۴ درصدی مصرف آب می‌شود (SkyQuest Technology، ۲۰۲۴؛ PS Market Research، ۲۰۲۴).

راه دور و از طریق اینترنت به سامانه‌های آبیاری خود دسترسی داشته باشند و فرآیند آبیاری را به طور مؤثرتر و اثربخش‌تری انجام دهند. فناوری‌های فرکانس رادیویی (RF) و اتصال بی‌سیم پیشرفته امکان بهبود تعامل‌پذیری میان مرکز کنترل و تجهیزات را فراهم کرده‌اند که منجر به افزایش کارایی سامانه‌های آبیاری می‌شود. با استفاده از 5G، کشاورزان می‌توانند به راحتی از حسگرهای زیر سطحی خاک برای جمع‌آوری داده‌هایی مانند میزان رطوبت، شوری و الگوهای خاک استفاده کنند و این داده‌ها را به صورت آنی به سیستم‌های کنترل ارسال کنند. چنین پیشرفت‌هایی نه تنها فرآیند آبیاری را بهبود می‌بخشد بلکه به کشاورزان کمک می‌کند تا وضعیت سلامت محصولات زراعی خود را نیز به طور دقیق نظارت کنند. این امر فرصت‌های زیادی را برای توسعه و نوآوری در بازار آبیاری هوشمند فراهم می‌آورد (PS Market Research، ۲۰۲۴).

۱۱- تحلیل دینامیک‌های بازار آبیاری هوشمند

۱۱-۱- عوامل محرک

۱۱-۱-۱- کاهش هزینه سنسورها

کاهش مستمر هزینه سنسورها، به ویژه حسگرهای رطوبت خاک و جریان، موجب گسترش چشمگیر دسترسی به فناوری آبیاری هوشمند برای کشاورزان خرد و متوسط شده است. این روند، با فراهم آوردن راه‌حل‌های مقرون‌به‌صرفه، نه تنها به افزایش پذیرش این سیستم‌ها کمک می‌کند، بلکه زمینه را برای فراگیر شدن کشاورزی دقیق در اکوسیستم‌های کشاورزی متنوع فراهم می‌سازد (PS Market Research، ۲۰۲۴).

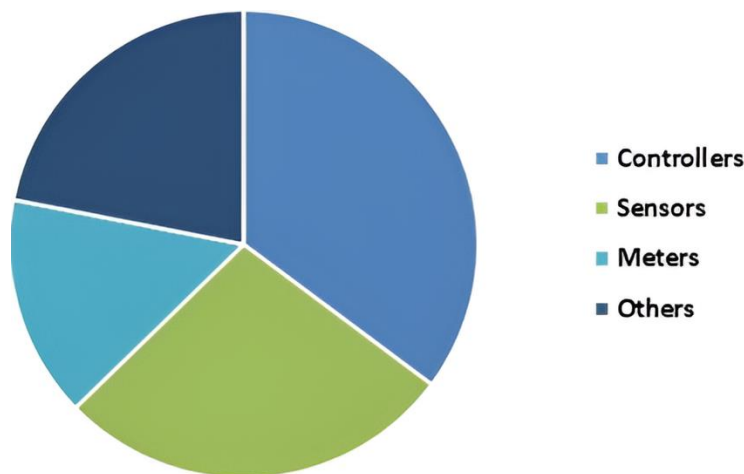
۱۱-۱-۲- هزینه بالای اجرای سیستم‌های آبیاری هوشمند

یکی از موانع اصلی در مسیر رشد بازار آبیاری هوشمند، هزینه بالای اجرای این سامانه‌ها است؛ چالشی که پذیرش این فناوری را، به‌ویژه برای کشاورزان خرد و مناطق کمتر توسعه یافته، محدود کرده و به عمیق‌تر شدن شکاف فناورانه میان کشاورزی سنتی و مدرن می‌انجامد. در حال حاضر، مزایای بی‌شمار فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT) که در سامانه‌های آبیاری هوشمند به کار گرفته می‌شوند، اغلب محدود به کشورهای پیشرفته هستند و بیشتر در تولید محصولات استراتژیکی چون ذرت، گندم و برنج استفاده می‌شود. این موضوع نیز به نوبه خود، مانعی بر سر راه گسترش فراگیر این فناوری در سطح جهانی به‌ویژه در مزارع کوچک مقیاس محسوب می‌شود (KBV Research، ۲۰۲۱). شکل (۳) سهم هریک از اجزای تشکیل‌دهنده آبیاری هوشمند را نشان می‌دهد.

۱۰- ابتکارات دولت‌ها در حمایت از کشاورزی پایدار به عنوان محرک رشد بازار

دولت‌ها در سراسر جهان با اجرای سیاست‌های مختلف در جهت ترویج کشاورزی پایدار و حفاظت از منابع آبی، نقشی اساسی در رشد بازار آبیاری هوشمند ایفا کرده‌اند. در بسیاری از مناطق با تنش آبی مانند آفریقا، خاورمیانه و آسیا، مشوق‌های مالی، یارانه‌ها و تسهیلات بلاعوض برای نصب فناوری‌های بهینه مصرف آب، تأثیرات مثبتی بر توسعه این بازار داشته‌اند.

در کشور هند، برنامه‌هایی مانند "Pradhan Mantri Krishi Sinchayee Yojana" (PMKSY) با اختصاص مبلغ ۹۳,۰۶۸,۵۶ کروڑ روپیه، به منظور بهبود دسترسی کشاورزان به منابع آبی و ارتقای کارایی آبیاری طراحی شده است. این طرح‌ها در کنار برنامه‌های دیگر مانند "Har Khet Ko Pani" و "Per Drop More Crop" با هدف ارتقای کارایی آبیاری و ترویج بهره‌برداری پایدار از منابع آبی، نقش مؤثری در تسریع پذیرش فناوری‌های آبیاری هوشمند داشته است. این ابتکارات، در ترکیب با همکاری‌های دولت‌ها، بخش خصوصی و مراکز پژوهشی، باعث دسترسی بیشتر کشاورزان، به‌ویژه کشاورزان خرد و کم‌برخوردار به فناوری‌های آبیاری هوشمند شده است. پیشرفت‌های فناوری 5G در صنعت کشاورزی نیز فرصت‌های بسیاری را برای فعالان بازار آبیاری هوشمند ایجاد کرده است. این فناوری به کشاورزان این امکان را می‌دهد تا به راحتی از



شکل ۳- سهم هریک از اجزای آبیاری هوشمند (KBV Research, ۲۰۲۱)

۱۱-۲- موانع موجود در بازار آبیاری هوشمند

۱- مشکلات بالای اتصال در مناطق روستایی

یکی از چالش‌های مهم در پذیرش گسترده سیستم‌های آبیاری هوشمند، مشکلات مربوط به اتصال اینترنتی در مناطق روستایی است. بسیاری از مناطق کشاورزی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، با مشکلات جدی در دسترسی به اینترنت و شبکه‌های ارتباطی پایدار مواجه هستند. این مسئله به‌ویژه در مناطقی که به‌طور گسترده‌ای از سیستم‌های آبیاری هوشمند استفاده می‌شود، می‌تواند مانع از بهره‌برداری مؤثر از این سیستم‌ها شود (PS Market Research, ۲۰۲۴).

۲- کمبود آموزش و دانش فنی

علاوه بر مشکلات اتصال اینترنتی، عدم آموزش و آگاهی کافی از نحوه استفاده و نگهداری صحیح از سیستم‌های آبیاری هوشمند نیز می‌تواند موجب کاهش بهره‌وری و عملکرد نامناسب این سیستم‌ها شود. بنابراین، آموزش‌های فنی و برنامه‌های اطلاع‌رسانی باید به‌طور ویژه برای کاربران هدف در نظر گرفته شود (PS Market Research, ۲۰۲۴).

۱۱-۳- تحلیل بازار جهانی آبیاری هوشمند

در تحلیل بخش‌بندی بازار جهانی آبیاری هوشمند، این بازار بر اساس اجزاء، نوع سیستم، کاربرد و منطقه جغرافیایی طبقه‌بندی می‌شود. در ادامه، به بررسی دقیق هر یک از این بخش‌ها پرداخته شده است:

۱۱-۴- تحلیل براساس نوع سیستم

بازار آبیاری هوشمند بر اساس نوع سیستم به دو دسته اصلی سیستم‌های مبتنی بر آب‌وهوا^{۱۲} و سیستم‌های مبتنی بر حسگر^{۱۳} تقسیم می‌شود (شکل ۴):

- سیستم‌های مبتنی بر آب‌وهوا یا همان کنترلرهای ET^{۱۴}: این سیستم‌ها در حال حاضر بخش غالب بازار را تشکیل می‌دهند و با استفاده از اطلاعات اقلیمی مانند دما، باد، تابش خورشید و رطوبت، زمان و میزان آبیاری را تنظیم می‌کنند. این داده‌ها از ایستگاه‌های محلی یا سرویس‌های آنلاین دریافت

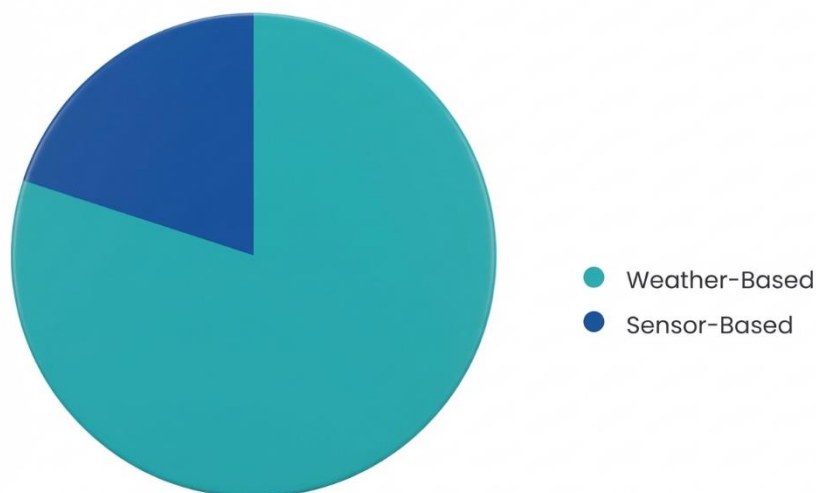
شده و همراه با پارامترهای اختصاصی محل در زمان‌بندی آبیاری به کار می‌روند.

- سیستم‌های مبتنی بر حسگر: این سیستم‌ها سریع‌ترین رشد را دارند و با بهره‌گیری از حسگرهای رطوبت خاک در ناحیه ریشه، میزان واقعی رطوبت را اندازه‌گیری کرده و بر اساس آن تصمیم به آبیاری می‌گیرند. این روش دقت بالایی دارد و مستقیماً نیاز آبی گیاه را هدف قرار می‌دهد.

در سال ۲۰۲۴، سامانه‌های کنترل مبتنی بر شرایط جوی با درآمدی معادل ۱/۴ میلیارد دلار آمریکا، بالاترین سهم بازار را به خود اختصاص داده‌اند (PS Market Research, ۲۰۲۴).

این سامانه‌ها به‌طور گسترده در عملیات کشاورزی در مقیاس بزرگ، طراحی فضای سبز مسکونی، زمین‌های ورزشی و گلف، پارک‌های عمومی، گلخانه‌ها و طرح‌های برنامه‌ریزی شهری استفاده می‌شوند. ویژگی بارز این سامانه‌ها، توانایی در تنظیم خودکار آبیاری بر اساس شرایط جوی است که به‌طور چشمگیری در افزایش بهره‌وری منابع آب مؤثر می‌باشد. این فناوری در مناطقی با بارندگی نامنظم و شرایط آب‌وهوایی ناپایدار، به‌عنوان راهکاری مطلوب برای مدیریت بهینه منابع آبی شناخته می‌شود (PS Market Research, ۲۰۲۴).

در مقابل، پیش‌بینی می‌شود بازار سامانه‌های کنترل مبتنی بر حسگر رشد سریع‌تری را در دوره پیش‌بینی شده تجربه کند. این سامانه‌ها به‌طور روزافزون با هدف صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش عملکرد محصولات زراعی در بخش کشاورزی استفاده می‌شوند. عملکرد این سیستم‌ها مبتنی بر تحلیل و کنترل دقیق داده‌هایی است که از طریق حسگرهای مختلفی مانند حسگرهای دما، رطوبت خاک، باران و رطوبت نسبی جمع‌آوری می‌شود. توانمندی در پردازش این داده‌ها موجب می‌شود سامانه‌های حسگرمحور، تصمیم‌گیری هوشمندانه‌تری در خصوص زمان و میزان آبیاری ارائه دهند (PS Market Research, ۲۰۲۴). این روندهای فناورانه، در کنار افزایش نیاز جهانی به بهره‌وری منابع و پایداری محیطی، موجب شده‌اند هر دو نوع سامانه جایگاه ویژه‌ای در بازار آینده آبیاری هوشمند داشته باشند (شکل ۴).



شکل ۴- سهم هریک از سیستم‌ها در بازار آبیاری هوشمند (PS Market Research, ۲۰۲۴)

۵-۱۱- تحلیل اجزا^{۱۵}

در تحلیل اجزای بازار جهانی آبیاری هوشمند، بخش‌های مختلفی بررسی شدند که هر یک نقش حیاتی در عملکرد و بهره‌وری این سیستم‌ها ایفا می‌کنند. این اجزا شامل کنترلرها^{۱۶} و حسگرها^{۱۷}، دبی‌سنج‌های آب^{۱۸} و سایر اجزای مکمل هستند که در ادامه به صورت پیوسته و با توضیحات تخصصی ارائه می‌شود.

در حال حاضر، بخش کنترلرها بزرگترین سهم را از بازار آبیاری هوشمند به خود اختصاص داده است. این کنترلرها به عنوان مغز متفکر سیستم آبیاری هوشمند عمل کرده و برنامه‌ریزی و زمان‌بندی آبیاری را به صورت خودکار انجام می‌دهند. کنترلرهای هوشمند قادر هستند اطلاعات مربوط به شرایط اقلیمی، رطوبت خاک، تبخیر و تعرق گیاه و الگوهای مصرف آب را دریافت کرده و بر اساس آن، برنامه آبیاری را بهینه‌سازی کنند. برخلاف سیستم‌های سنتی که بر پایه زمان‌بندی ثابت عمل می‌کنند، کنترلرهای هوشمند می‌توانند سیستم آبیاری را در زمان بارندگی به صورت خودکار متوقف نمایند و بدون نیاز به تنظیمات فصلی، زمان‌بندی را متناسب با نیاز واقعی گیاه تنظیم کنند. این ویژگی، بهره‌وری مصرف آب را به طور چشمگیری افزایش داده است و هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهد (SkyQuest Technology, ۲۰۲۴). از جمله کنترلرهای هوشمند شناخته شده در بازار می‌توان به محصولات شرکت‌هایی مانند Rain Bird Corporation و Hunter Industries Inc. اشاره کرد که با قابلیت‌های پیشرفته خود در مدیریت خودکار و بهینه آبیاری، نقش مهمی در کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری ایفا می‌کنند.

در کنار کنترلرها، بخش حسگرها سریع‌ترین نرخ رشد را در میان اجزای بازار دارد. این رشد بیشتر به دلیل تقاضای فزاینده برای آبیاری دقیق و داده محور در کشاورزی مدرن و کاربردهای شهری است. حسگرها در این بازار شامل حسگر رطوبت خاک^{۱۹}، حسگر جریان و فشار آب و حسگرهای اقلیمی^{۲۰} هستند. این حسگرها اطلاعات حیاتی مانند میزان

رطوبت خاک، دمای محیط، شدت تابش خورشید، میزان بارش و وضعیت جریان آب را جمع‌آوری می‌کنند و آن را در اختیار کنترلر قرار می‌دهند تا فرآیند تصمیم‌گیری به صورت دقیق و هوشمندانه انجام شود. سیستم‌های مبتنی بر حسگر می‌توانند آبیاری را تنها در زمانی آغاز کنند که میزان رطوبت خاک به زیر سطح تعریف شده برسد و به این ترتیب از آبیاری غیرضروری جلوگیری شود (SkyQuest Technology, ۲۰۲۴). با این حال لازم به ذکر است دقت و صحت اندازه‌گیری حسگرهای رطوبت خاک می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند نوع خاک (به ویژه در خاک‌های سنگین و سبک به دلیل تفاوت در ظرفیت نگهداری آب و خواص الکتریکی)، شوری خاک، دما، و نیاز به کالیبراسیون صحیح قرار گیرد. بنابراین، برای اطمینان از عملکرد بهینه و کاهش خطا در تصمیم‌گیری آبیاری، انتخاب حسگر مناسب بر اساس ویژگی‌های خاک و کالیبراسیون دوره‌ای آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد (Sharma و همکاران, ۲۰۲۱). از دیگر اجزای مهم آن‌ها، دبی‌سنج‌های آب هستند که در سال‌های اخیر به دلیل افزایش کاربرد در مدیریت دقیق مصرف آب و بهبود بهره‌وری آبیاری، استفاده گسترده‌ای یافته‌اند. این ابزارها وظیفه دارند جریان واقعی آب عبوری از سیستم را اندازه‌گیری کرده و اطلاعات مربوط به نرخ جریان، حجم مصرفی و ناهنجاری‌های احتمالی مانند نشت یا انسداد به کنترلر را ارسال کنند. دبی‌سنج‌ها در شناسایی مشکلات عملکردی سیستم نقش کلیدی داشته و به بهینه‌سازی مصرف آب و کاهش تلفات کمک می‌کنند. به عنوان مثال در صورت بروز افزایش ناگهانی جریان آب، دبی‌سنج می‌تواند به صورت فوری هشدار داده و سیستم را به صورت خودکار متوقف نماید.

در نهایت، بخش سایر اجزاء شامل تجهیزات مکملی مانند شیرهای برقی، واحدهای ارتباطی، مازول‌های کنترل از راه دور، واحدهای تغذیه و نرم‌افزارهای مدیریتی به یکپارچگی، کنترل‌پذیری و بهره‌وری بیشتر سیستم آبیاری هوشمند کمک می‌کنند. در مجموع، اجزای مختلف سیستم‌های آبیاری

هوشمند با همکاری و تعامل یکپارچه، امکان مدیریت دقیق، خودکار و مبتنی بر داده مصرف آب را فراهم کرده‌اند. این ترکیب فناورانه موجب افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها، صرفه‌جویی در منابع و ارتقاء عملکرد کشاورزی و فضای سبز در سطوح مختلف شده است. از این‌رو، شناخت دقیق این اجزاء برای طراحی، توسعه و پیاده‌سازی سامانه‌های پیشرفته آبیاری، ضروری و حیاتی است (PS Market Research, ۲۰۲۴).

در سال ۲۰۲۴، دسته کنترلر بالاترین سهم درآمدی را در بازار آبیاری هوشمند به خود اختصاص داده است. کنترلرهای آبیاری هوشمند به دلیل کارایی بالا در مدیریت عملیات آبیاری و قابلیت اتصال آسان به راهکارهای ابری، با استقبال قابل توجهی مواجه شده‌اند. عواملی همچون رشد سریع جمعیت جهانی، کمبود منابع غذایی و آبی، افزایش آگاهی کشاورزان نسبت به مزایای آبیاری هوشمند، حمایت‌های دولتی، هزینه پایین آبیاری و بهره‌وری بالا، از جمله عوامل مؤثر در افزایش تقاضا برای کنترلرهای هوشمند محسوب می‌شوند. در سوی دیگر، دسته حسگرها با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) معادل ۱۳ درصد، سریع‌ترین رشد را در میان اجزای مختلف این بازار تجربه می‌کند. حسگرها تمامی جنبه‌های مرتبط با آبیاری را به‌صورت لحظه‌ای پایش کرده و اطلاعات به روزی درباره رطوبت خاک، دما، رطوبت نسبی، وضعیت محیطی و سلامت گیاهان ارائه می‌دهند. افزایش نیاز به دقت در کشاورزی (کشاورزی دقیق) موجب رشد تقاضا برای به‌کارگیری این حسگرها شده است. همچنین، ادغام این حسگرها با خدمات مبتنی بر فضای ابری، انتقال بی‌وقفه و سریع داده‌ها را ممکن ساخته و محبوبیت آن‌ها را در کاربردهایی مانند زمین‌های گلف، مجتمع‌های ورزشی و طراحی فضای سبز افزایش داده است (PS Market Research, ۲۰۲۴). با اینحال عملکرد بهینه این حسگرها و انتقال مؤثر داده‌ها به خدمات ابری، به وجود زیرساخت‌های ارتباطی پایدار و پوشش اینترنتی کافی بستگی دارد. این مسئله به‌ویژه در بسیاری از مناطق روستایی با پوشش اینترنت ضعیف‌تر، می‌تواند چالشی جدی برای پیاده‌سازی و بهره‌برداری کامل از سیستم‌های آبیاری هوشمند مبتنی بر ابر ایجاد کند و بر گسترش آن‌ها تأثیر بگذارد. بنابراین، در کنار کنترلرها که ستون فقرات سامانه‌های آبیاری هوشمند به شمار می‌روند، حسگرها نقش کلیدی در ارائه داده‌های دقیق و ارتقای تصمیم‌گیری در زمینه مدیریت منابع آبی ایفا می‌کنند.

۱۱-۶- تحلیل کاربردها

در بخش غیرکشاورزی، بازار آبیاری هوشمند در سال ۲۰۲۴ با سهم ۷۵ درصد، بزرگترین سهم بازار را به خود اختصاص داده است و پیش‌بینی می‌شود این موقعیت را در سال‌های آینده حفظ کند. افزایش اهمیت روش‌های آبیاری مؤثر و سیستم‌های آبیاری در کاربردهای غیرکشاورزی مانند مسکونی، چمن‌کاری و منظرسازی، و زمین‌های ورزشی، عامل

اصلی رشد بازار است. توسعه شهرهای هوشمند به عنوان یک روند روبه‌رشد در بسیاری از مناطق جهان، موجب افزایش استفاده از سیستم‌های مدیریت آب در محیط‌های تجاری و مسکونی شده است. به دلیل رشد سریع شهرنشینی، مناطق پوشش سبز برای ساخت زیرساخت‌های بتنی کاهش یافته است، لذا حفظ تعادل سبز و استفاده از آبیاری هوشمند بسیار اهمیت دارد. بخش کشاورزی سریع‌ترین رشد را در بازار آبیاری هوشمند دارد زیرا کشاورزی تقریباً ۷۰ درصد از آب‌های شیرین را مصرف می‌کند، بنابراین نیاز به استفاده از راهکارهای پایدار، به‌ویژه آبیاری هوشمند، ضروری است. مدیریت مؤثر آب برای بهبود نتایج کشاورزی، صرفه‌جویی در مصرف آب و کاهش قابل توجه هزینه‌های عملیاتی اهمیت فراوانی دارد. راهکارهای پیشرفته آبیاری، شامل کنترل‌کننده‌های مبتنی بر آب و حسگرها، در عملیات کشاورزی بزرگ مقیاس و مزارع کوچک در حال استفاده هستند. افزایش آگاهی کشاورزان در مورد استفاده فناوری‌های پیشرفته مدیریت بارش، اقلیم، رطوبت خاک، دما و آبیاری کود می‌تواند به اتوماسیون بسیاری از عملیات منجر شود. کاربردهای ارزیابی شده در اینجا شامل کشاورزی (بخش سریع‌الرشد) با اراضی باز و کارخانه گیاه، و غیرکشاورزی (بخش بزرگتر) با مسکونی، زمین گلف و ورزشگاه، و چمن و منظرسازی هستند (PS Market Research, ۲۰۲۴).

۱۱-۷- تحلیل منطقه‌ای بازار آبیاری هوشمند

بازار آبیاری هوشمند در سال ۲۰۲۴ به‌ویژه در آمریکای شمالی (شکل ۳) با سهم بازار ۴۰ درصد، بیشترین میزان را به خود اختصاص داد، شاهد رشد چشمگیری بود. این موفقیت به عوامل متعددی از جمله افزایش درآمد قابل تصرف، رشد شهرنشینی، افزایش پذیرش روش‌های آبیاری مبتنی بر زمین در کشورهای ایالات متحده و کانادا نسبت داده می‌شود. همچنین، گسترش استفاده از گوشی‌های هوشمند و سایر دستگاه‌های متصل برای دسترسی از راه دور به داده‌های میدانی و افزایش سرمایه‌گذاری در صنعت فناوری کشاورزی، نقش به‌سزایی در تقویت بازار این منطقه ایفا می‌کند. دولت‌های مختلف در این منطقه نیز با اتخاذ سیاست‌های حمایتی و ارائه یارانه‌ها، از جمله تخفیف‌های مالی برای نصب سیستم‌های آبیاری هوشمند، به تشویق کشاورزان و مالکان زمین‌های سبز برای استفاده از این فناوری‌ها پرداخته‌اند. به‌طور خاص، دولت کالیفرنیا با ارائه یارانه‌هایی برای کنترلرهای هوشمند به کشاورزان کمک کرده است تا مصرف آب خود را بهینه کنند. این اقدامات حمایتی، در کنار مزایای اثبات شده آبیاری هوشمند، به‌طور قابل توجهی به افزایش آگاهی و پذیرش این فناوری‌ها در میان کشاورزان و مالکان اراضی سبز منطقه کمک کرده و در نتیجه، به رشد بازار آبیاری هوشمند در آمریکای شمالی شتاب بخشیده است. علاوه‌براین با توجه به ظهور فناوری‌های جدید کشاورزی، دولت‌ها اقدامات آموزشی و آگاهی بخشی را در خصوص نحوه

استفاده صحیح از سیستم‌های آبیاری هوشمند آغاز کرده است. به‌عنوان نمونه، در آمریکای شمالی، اپراتورهای زمین‌های گلف از این فناوری‌ها برای کاهش مصرف آب استفاده می‌کنند، که نشان‌دهنده گسترش کاربرد این سیستم‌ها در بخش‌های غیرکشاورزی است. در نتیجه، انتظار می‌رود که بازار آبیاری هوشمند در این منطقه همچنان از رهبری خود در سطح جهانی محافظت کند (PS Market Research، ۲۰۲۴؛ SkyQuest Technology، ۲۰۲۴).

از سوی دیگر، پیش‌بینی می‌شود آسیا-اقیانوسیه (APAC) سریع‌ترین رشد را در بازار آبیاری هوشمند تجربه کند (شکل ۵)، با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) معادل ۱۳ درصد. این منطقه به دلیل تراکم جمعیتی بالا و مشکلات مکرر کمبود آب ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آبی، اهمیت ویژه‌ای دارد. در این زمینه، کشاورزی به‌ویژه در هند به‌عنوان منبع اصلی معیشت شناخته می‌شود، بنابراین استفاده از فناوری‌های آبیاری هوشمند و کارآمد برای بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی ضروری است. همچنین، در چین، که کشاورزی به‌ویژه کشت برنج نقش حیاتی در اقتصاد دارد، تقاضا برای سیستم‌های آبیاری هوشمند به سرعت در حال افزایش است. در کشت برنج، که معمولاً به غرقابی نیاز دارد، سیستم‌های آبیاری هوشمند نقش مهمی در کنترل دقیق سطح آب و کاهش مصرف بیش از حد ایفا می‌کنند. به‌عنوان مثال سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI)^{۲۷} در مناطقی که امکان کشت برنج به روش غیرغرقابی فراهم است، همچنین فناوری‌های مدیریت دقیق آب در کرت‌های برنج با استفاده از حسگرهای سطح آب و شیرهای کنترل هوشمند، از جمله رویکردهای رایج برای بهینه‌سازی مصرف آب در این محصول است. این نیازها ناشی از شرایط خاص اقلیمی و افزایش جمعیت است که به دنبال دستیابی به بهره‌وری بیشتر از منابع آبی می‌باشد (Kumar و همکاران، ۲۰۲۴). این نیازها ناشی از شرایط خاص اقلیمی و افزایش

جمعیت است که به دنبال دستیابی به بهره‌وری بیشتر از منابع آبی می‌باشد (SkyQuest Technology، ۲۰۲۴).

طبق گزارش سازمان غذا و کشاورزی (FAO)، چین در حال حرکت به سمت اتخاذ فناوری‌های کشاورزی سبز و استراتژی‌های کشاورزی هوشمند اقلیمی است. این کشور همچنین به‌طور فعال به توسعه مکانیزاسیون پیشرفته کشاورزی پرداخته تا ضمن افزایش بهره‌وری، از سلامت خاک نیز محافظت کند. در چارچوب این تلاش‌ها، دولت چین طبق طرح ملی توسعه کشاورزی پایدار، قصد دارد سهم اراضی آبیاری شده که از روش‌های آبیاری بهینه و صرفه‌جو در مصرف آب استفاده می‌کنند را به تقریباً ۷۵ درصد از کل اراضی آبیاری شده افزایش دهد و کارایی مصرف آب در این بخش را تا سال ۲۰۳۰ به حداقل ۶۰٪ ارتقا دهد (PS Market Research، ۲۰۲۴).

در نهایت، به‌طور کلی می‌توان گفت بازار آبیاری هوشمند به‌ویژه در دو منطقه آمریکای شمالی و آسیا-اقیانوسیه در حال تجربه رشد و تحول است. از یک‌سو، کشورهای پیشرفته مانند ایالات متحده و کانادا با بهره‌برداری از فناوری‌های آبیاری هوشمند، در مسیر مدیریت پایدار منابع آب گام برمی‌دارند و از سوی دیگر، کشورهای در حال توسعه در آسیا، به‌ویژه چین و هند، با توجه به چالش‌های منابع آبی و نیازهای کشاورزی، از این فناوری‌ها به‌منظور بهبود بهره‌وری و مقابله با بحران کم‌آبی استفاده می‌کنند. این روندها حاکی از آن است که آبیاری هوشمند نه تنها یک نیاز ضروری در کشاورزی است، بلکه به ابزاری حیاتی برای تضمین امنیت آبی در سطح جهانی تبدیل شده است.

تقسیم‌بندی جغرافیایی بازار آبیاری هوشمند نشان‌دهنده سهم و نرخ رشد متفاوت مناطق و کشورها در این بازار روبه‌رشد است. در این میان، آمریکای شمالی به‌عنوان بزرگترین بازار منطقه‌ای شناخته می‌شود که در آن ایالات متحده بزرگترین بازار کشوری و کانادا دارای بالاترین نرخ رشد در میان بازارهای کشوری محسوب می‌شوند.

تحلیل منطقه‌ای بازار بنادر هوشمند



Source: P&S Intelligence

شکل ۵- نرخ رشد بازار آبیاری هوشمند در کشورهای مختلف جهان (PS Market Research، ۲۰۲۴)

نشان‌دهنده چشم‌اندازهای متنوع بازار بر اساس عوامل اقتصادی، اقلیمی و فناورانه در هر منطقه است.

۱۲- سهم بازار آبیاری هوشمند^{۲۳}

بازار آبیاری هوشمند در حال رشد سریع است و این رشد ناشی از افزایش تقاضا برای فناوری‌های بهینه‌سازی مصرف آب در بخش‌های کشاورزی و غیرکشاورزی است. این بازار به دلیل تنوع بالای کاربردها و فناوری‌های مختلف، به‌طور طبیعی در بخش‌های مختلف پراکنده و به صورت چند لایه ساختاردهی شده است. کاربردهای متنوعی که از آبیاری هوشمند در زمین‌های کشاورزی، فضای سبز، زمین‌های گلف، مجموعه‌های ورزشی و حتی نواحی مسکونی استفاده می‌شود، باعث شده است این بازار بسیار گسترده و متنوع باشد. همچنین فناوری‌هایی مانند کنترل‌کننده‌های مبتنی بر آب‌وهوا، حسگرهای هوشمند و سیستم‌های مجهز به هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین (ML) باعث پیچیدگی و تنوع بیشتر محصولات این صنعت شده است. به همین دلیل، فرصت‌های زیادی برای شرکت‌ها فراهم است تا با ارائه محصولات خاص و شخصی‌سازی شده وارد بازار شوند (SkyQuest Technology, ۲۰۲۴).

در کنار این تنوع کاربرد و فناوری، عوامل جغرافیایی و روندهای فناورانه نیز به‌طور فزاینده‌ای ساختار بازار را شکل می‌دهند. تفاوت در منابع آبی، شرایط اقلیمی، و نوع خاک در مناطق مختلف باعث شده شرکت‌های بومی به این بازار وارد شوند و محصولات خود را بر اساس نیازهای خاص محلی توسعه دهند. علاوه بر این پیشرفت‌های فناورانه و معرفی مداوم محصولات نوآورانه توسط شرکت‌ها باعث شده بازار آبیاری هوشمند روز به روز پیچیده‌تر و رقابتی‌تر شود. شرکت‌های زیادی در تلاش هستند با استفاده از فناوری‌های نوین، مزیت‌های رقابتی خود را حفظ کنند و به تقاضای روزافزون بازار پاسخ دهند. به‌طور کلی این شرایط بستری را برای رشد سریع بازار و ورود شرکت‌های جدید فراهم کرده است (SkyQuest Technology, ۲۰۲۴).

۱۳- بازیکنان اصلی بازار آبیاری هوشمند

در سطح جهانی، برخی از برترین تولیدکنندگان سیستم‌های آبیاری هوشمند بر اساس معیارهایی مانند سهم بازار، حجم فروش (گردش مالی)، نوآوری در محصولات و راه‌حل‌ها، و گستردگی نفوذ جهانی در صنعت آبیاری هوشمند، به عنوان بازیگران کلیدی شناسایی شده‌اند به شرح زیر هستند:

(SkyQuest Technology, ۲۰۲۴)

- The Toro Company (United States)
- Rain Bird Corporation (United States)
- Netafim (Israel)

این امر به دلیل پیشرفت‌های فناورانه، سرمایه‌گذاری‌های کلان در کشاورزی هوشمند و زیرساخت‌های پیشرفته در این کشورها است. در اروپا، کشور آلمان به عنوان بزرگترین بازار کشاورزی و اسپانیا به عنوان کشوری با بالاترین نرخ رشد در این حوزه شناخته می‌شوند. فرانسه نیز به همراه سایر کشورهای ناحیه غرب اروپا نقش مؤثری در توسعه بازار دارد. رشد بازار در اروپا بیشتر تحت تأثیر سیاست‌های محیط‌زیستی، حمایت از کشاورزی پایدار و نوآوری‌های تکنولوژیکی در حوزه مدیریت منابع آبی است (PS Market Research, ۲۰۲۴). منطقه آسیا و اقیانوسیه (APAC) نیز به عنوان بازاری با بالاترین نرخ رشد منطقه‌ای مطرح است. در این منطقه، چین بزرگترین بازار کشاورزی به شمار می‌رود، در حالی که هند با سرعت بالایی در حال رشد است. کشورهایمانند کره جنوبی و ژاپن نیز نقش مهمی در پذیرش فناوری‌های نوین آبیاری دارند. در این منطقه، افزایش جمعیت، کمبود منابع آبی، و نیاز به بهره‌وری بالاتر در کشاورزی از عوامل اصلی تقاضای بالای سیستم‌های آبیاری هوشمند هستند. در منطقه آمریکای لاتین (LATAM)، برزیل بزرگترین بازار کشاورزی است و مکزیک به عنوان کشوری با بالاترین نرخ رشد در حال گسترش استفاده از فناوری‌های آبیاری هوشمند می‌باشد (شکل ۳). این رشد بیشتر ناشی از فشار بر منابع طبیعی، نیاز به بهره‌وری بهتر در کشاورزی و افزایش سرمایه‌گذاری‌ها در تکنولوژی‌های نوین است. در نهایت، منطقه خاورمیانه و آفریقا (MEA) نیز با توجه به شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، بازاری روبه‌رشد برای سیستم‌های آبیاری هوشمند به شمار می‌رود (شکل ۳). در این منطقه، عربستان سعودی بزرگترین بازار کشاورزی است و امارات متحده عربی کشوری با بالاترین نرخ رشد در حوزه توسعه این فناوری محسوب می‌شود. آفریقای جنوبی نیز همراه با سایر کشورهای این منطقه در حال توسعه زیرساخت‌های آبیاری هوشمند برای مقابله با بحران‌های آبی و افزایش بهره‌وری در کشاورزی است. در مجموع، هر منطقه بر اساس شرایط اقتصادی، اقلیمی، و میزان توسعه فناوری، سهم و نقش متفاوتی در بازار جهانی آبیاری هوشمند دارد (PS Market Research, ۲۰۲۴).

برای تبیین روشن‌تر این تفاوت‌ها، می‌توان به آمار و ارقام موجود به شرح زیر اشاره کرد. در تحلیل سهم و پویایی بازار جهانی آبیاری هوشمند، تفاوت‌های چشمگیری میان مناطق مختلف مشاهده می‌شود. در سال ۲۰۲۴، آمریکای شمالی با سهم بازار ۴۰ درصد، بزرگترین بازار منطقه‌ای محسوب می‌شود. در حالی که منطقه آسیا-اقیانوسیه (APAC) با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) معادل ۱۳ درصد، سریع‌ترین رشد را در بازار آبیاری هوشمند تجربه می‌کند. در خصوص آمریکای لاتین (LATAM) و خاورمیانه و آفریقا (MEA)، اگرچه ارقام دقیق سهم بازار یا CAGR در متن به طور مجزا ذکر نشده است، اما این مناطق نیز به دلیل چالش‌های آبی و نیاز به بهره‌وری، بازارهای روبه‌رشدی به شمار می‌روند. این تفاوت‌ها

این حوزه، پیشنهاد می‌شود سرمایه‌گذاری‌های دولتی بر کاهش هزینه تولید سنسورها و ارتقای دانش فنی کشاورزان متمرکز شود. تقویت همکاری‌های بین‌المللی و توسعه زیرساخت‌های ارتباطی نسل جدید مانند 5G می‌تواند سرعت نفوذ این فناوری را در کشورهای درحال توسعه دوچندان کند. در نهایت، آینده آبیاری هوشمند در گرو هم‌افزایی میان دقت داده محور و سهولت عملیاتی است تا توازن میان تولید محصول و حفظ منابع طبیعی برقرار شود.

منابع

- Bondarenko, V., & Petrenko, O. (2025). TRADITIONAL AND MODERN AGRICULTURE. *American Journal of Innovation in Science Research and Development*, 2(1), 5-8.
- Choudhary, V., Guha, P., Pau, G., & Mishra, S. (2025). An overview of smart agriculture using internet of things (IoT) and web services. *Environmental and Sustainability Indicators*, 100607. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100607>
- Dhamal, P., & Mehrotra, S. (2021). Automation Soil Irrigation System Based on Soil Moisture Detection Using Internet of Things. In *Machine Intelligence and Smart Systems: Proceedings of MISS 2020* (pp. 665-673). Springer Nature, Singapore. Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4893-6_55.
- Ferrarezi, R. S., & Peng, T. W. (2021). Smart system for automated irrigation using internet of things devices. *HortTechnology*, 31(6), 642-649. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04860-21>
- Gamal, Y., Soltan, A., Said, L. A., Madian, A. H., & Radwan, A. G. (2023). Smart irrigation systems: Overview. *IEEE Access*, 13, 66109 - 66121. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3251655>
- KBV Research. (2021). *Global Smart Irrigation Market by Type (Climate based and Sensor based), by Component (Controllers, Sensors, Meters, and Others), by End Use (Agricultural, Golf Course, Residential, and Others), by Regional Outlook, Industry Analysis Report and Forecast, 2021-2027*. Website: <https://www.kbvresearch.com/smart-irrigation-market/>. Accessed: December 18, 2025.
- Kumar, M., Sahni, R. K., Waghaye, A. M., Kumar, M., & Randhe, R. D. (2024). Electronic Sensor-Based Automated Irrigation System for Rice Cultivated Under Alternate Wetting and Drying Technique. *AgriEngineering*, 6(4), 4720-4738. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6040270>
- Luu, T. M. N., Yadav, M., Srivastava, A. P., & Gopal, K. (2025). Innovation and Technology to Address the Challenges of Climate Change. In *Effects of Climate*

- Hunter Industries Inc. (United States)
- HydroPoint Data Systems (United States)
- Manna Irrigation Ltd. (Israel)
- Stevens Water Monitoring Systems Inc. (United States)
- Galcon (Israel)
- Rachio Inc. (United States)
- Weathermatic (United States)
- Irrigreen (United States)
- Banyan Water Inc. (United States)
- Delta-T Devices Ltd. (United Kingdom)
- CALSENSE (United States)
- AquaSpy (United States)
- Soil Scout Oy (Finland)
- Acclima Inc. (United States)
- RainMachine - Green Electronics LLC (United States)
- WiseConn Engineering (United States)
- Orbit Irrigation Products (United States)

این شرکت‌ها به طور مداوم در حال سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه نوآوری در حوزه فناوری‌های آبیاری هوشمند هستند. این امر باعث می‌شود آن‌ها بتوانند محصولات پیشرفته‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تری را به بازار عرضه کنند و سهم خود را در این بازار رقابتی افزایش دهند (SkyQuest Technology, ۲۰۲۴).

۱۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

پژوهش حاضر نشان داد بازار آبیاری هوشمند به عنوان یکی از محورهای اصلی تحول در کشاورزی مدرن، نه تنها راهکاری برای مقابله با بحران کم‌آبی، بلکه ابزاری استراتژیک برای ارتقای امنیت غذایی در سطح جهانی است. یافته‌ها حاکی از آن است که گذار از سیستم‌های اتوماسیون سنتی به سامانه‌های هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا (IoT) و هوش مصنوعی، می‌تواند منجر به صرفه‌جویی ۲۰ تا ۵۰ درصدی در مصرف منابع آب و افزایش بهره‌وری تا ۴۴ درصد شود. تحلیل‌های آماری انجام شده در این پژوهش نشان داد ارزش این بازار با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) ۱۶/۲ درصد تا سال ۲۰۲۹ به ۳/۹۴ میلیارد دلار خواهد رسید که این امر بیانگر اعتماد جهانی به کارایی این فناوری است. نقش کلیدی فناوری‌های نوپهور مانند یادگیری ماشین (ML) در تحلیل دقیق نیاز آبی گیاه بر اساس داده‌های لحظه‌ای خاک و هواشناسی، تمایز اصلی این سامانه‌ها با روش‌های اتوماتیک زمان‌بندی شده است. با این حال پذیرش همه‌جانبه این فناوری با چالش‌های جدی از جمله هزینه‌های اولیه بالا برای کشاورزان خرد و زیرساخت‌های ضعیف ارتباطی در مناطق روستایی روبه‌رو است که نیازمند توجه ویژه سیاست‌گذاران است. همچنین، گسترش مفهوم شهرهای هوشمند و استفاده از این سامانه‌ها در فضاهای سبز شهری، افق‌های تجاری جدیدی را فراتر از بخش کشاورزی گشوده است. برای دستیابی به رشد پایدار در

- sensitivity, and site-And sensor-specific calibration functions. Transactions of the ASABE, 64(4), 1123-1139. <https://doi.org/10.13031/trans.14112>
- SkyQuest Technology. (2024). Smart irrigation market size & share. Industry growth. Website: <https://www.skyquestt.com/report/smart-irrigation-market>. Accessed: December 18, 2025.
- The Business Research Company. (2024). Smart irrigation global market report 2025. Website: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/smart-irrigation-global-market>. Accessed: April 18, 2025.
- Vallejo-Gomez, D., Osorio, M., & Hincapie, C. A. (2023). Smart irrigation systems in agriculture: A systematic review. Agronomy, 13(2), 342. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020342>
- Vera, J., Conejero, W., Mira-Garcia, A. B., Conesa, M. R., & Ruiz-Sánchez, M. C. (2021). Towards irrigation automation based on dielectric soil sensors. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 96(6), 696-707. <https://doi.org/10.1080/14620316.2021.1906761>
- Verified Market Research. (2025). Smart Irrigation Market Size By Component (Controllers, Sensors, Water Flow Meters), Application (Agricultural, Non-Agricultural), System (Weather-based Controller, Sensor-based Controller), & Region for 2024-2031. Website: <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/global-smart-irrigation-market-size-and-forecast/>. Accessed: December 18, 2025.
- Weyrich, M. (2024). What Is Automation Technology? Basic Terms and Concepts of Automation Technology. In: Industrial Automation and Information Technology. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-69243-1_2
- Zhang, H., & Li, M. (2025). Towards an intelligent and automatic irrigation system based on internet of things with authentication feature in VANET. Journal of Information Security and Applications, 88, 103927. <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2024.103927>
- Change on Social and Economic Factors (pp. 423-464). IGI Global. Website: <https://www.igi-global.com>. Accessed: December 18, 2025.
- Munusamy, S., Al-Humairi, S. N. S., & Abdullah, M. I. (2021, April). Automatic irrigation system: design and implementation. 2021 IEEE 11th IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE), 256-260. IEEE. Location: Kuala Lumpur, Malaysia.
- Nsoh, B., Katimbo, A., Guo, H., Heeren, D. M., Nakabuye, H. N., Qiao, X., & Kiraga, S. (2024). Internet of Things-Based Automated Solutions Utilizing Machine Learning for Smart and Real-Time Irrigation Management: A Review. Sensors (Basel, Switzerland), 24(23), 7480. <https://doi.org/10.3390/s24237480>
- Obaideen, K., Yousef, B. A., AlMallahi, M. N., Tan, Y. C., Mahmoud, M., Jaber, H., & Ramadan, M. (2022). An overview of smart irrigation systems using IoT. Energy Nexus, 7, 100124. <https://doi.org/10.3390/s20041042>
- PS Market Research. (2024). Smart irrigation market analysis, size, share, and trends. Website: <https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/smart-irrigation-market>. Accessed: December 18, 2025.
- Qian, M., Qian, C., Xu, G., Tian, P., & Yu, W. (2024). Smart Irrigation Systems from Cyber-Physical Perspective: State of Art and Future Directions. Future Internet, 16(7), 234.
- Rajakumar, D., Ramah, K., Rathika, S., & Thiagarajan, G. (2008). Automation in micro-irrigation. Science Tech Entrepreneur, 1-8.
- Rathika, S., Ramesh, T., Priyadharshini, V., Prasanth, A. S., & Shanmugapriya, P. (2020). Automation in Irrigation-A Review. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 9(12), 2974-2990. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.912.352>
- Saxena, S. (2021). An overview on automatic irrigation system. Asian Journal of Research in Business Economics and Management, 11(10), 153-159. <https://doi.org/10.5958/2249-7307.2021.00043.8>
- Selvakumar, P., Usha, M. S., Dhokpande, S. R., Raghunathreddy, B., & Das, A. (2025). Water Conservation: AI Applications in Sustainable Water Use. In Cases on AI-Driven Solutions to Environmental Challenges (pp. 269-296). IGI Global Scientific Publishing. 1st edition. Hershey, PA, USA. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-7483-2.ch010>
- Sharma, K., Irmak, S., Kukal, M. S., Vuran, M. C., Jhala, A. J., & Qiao, X. (2021). Evaluation of soil moisture sensing technologies in silt loam and loamy sand soils: Assessment of performance, temperature

پی‌نوشت‌ها

1. Internet of Things
2. Neural Networks
3. Automation
4. Semi-automatic
5. Fully automatic
6. Automatic Irrigation
7. Smartization
8. Semi-Smart Irrigation

- 16. Controllers
- 17. Sensors
- 18. Water Flow Meters
- 19. Soil Moisture Sensor
- 20. Climate Sensors
- 21. Subsurface Drip Irrigation
- 22. Smart Irrigation Market Share

- 9. Fully Smart Irrigation
- 10. Smart Irrigation Market
- 11. Precision Farming
- 12. Weather-based
- 13. Sensor-based
- 14. Evapotranspiration
- 15. Component Analysis

Document Type

Review Article

مروری

نوع مقاله

Application of Bacteriophages as Biological Agents in Water and Wastewater Treatment: A Review

A.R. Radkhah^{1*}, S. Atash Afrazah²

1- Ph.D. Graduate, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2- Environmental Expert, Faculty of Natural Resources, University of Birjand, Birjand, Iran.

* Corresponding Author Email: alirezaradkhah@ut.ac.ir

Received 17-07-2025
Revised 28-12-2025
Accepted 13-01-2026
Available online 16-03-2026

کاربرد باکتریوفاژها به عنوان عوامل زیستی در تصفیه آب و فاضلاب: یک مطالعه مروری

علیرضا رادخواه^۱، صدیقه آتش افرازه^۲

۱- دانش آموخته دکتری، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- کارشناس محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

* رایانامه نویسنده مسئول: alirezaradkhah@ut.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۴/۲۶
تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۱۰/۰۷
تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۱۰/۲۳
تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

Abstract

Microbial contamination of water and the increasing emergence of antibiotic-resistant bacteria have posed unprecedented challenges to global public health. Current water treatment methods, despite their advantages, face limitations such as the production of harmful byproducts and reduced efficacy against antibiotic-resistant strains. In the alarming situation of increasing antibiotic resistance, bacteriophages (phages) serve as a powerful line of defense and a vital alternative. Bacteriophages are viruses that have a protein core with a nucleic acid called a capsid and a thin, fiber-like tail. Phage proteins bind to specific receptors on the surface of target bacteria, conferring high specificity to them. Some phages have a broad host range and can recognize multiple receptors on different bacterial species and genera. This review examines the potential of bacteriophages as an alternative to antibiotics and a complement to traditional water treatment methods. This systematic review collected and analyzed research from the past 15 years sourced from reputable scientific databases. The extracted data were categorized and analyzed based on the applications of bacteriophages in wastewater treatment. According to the findings, key advantages of phages include high specificity (precise targeting of pathogens without harming beneficial flora), ability to self-replicate in the presence of the host, ability to destroy biofilms and affect antibiotic-resistant bacteria, making them a powerful tool in combating the microbial resistance crisis. The ultimate conclusion of this review is that, despite existing barriers, the transition from purely chemical methods towards "phage therapy" in water treatment is not merely a possibility but an increasing necessity for ensuring water safety in the age of antibiotic resistance. Future advances in phage engineering and the development of smart phage cocktails will facilitate the operational implementation of this strategy on an industrial scale.

Keywords: Bacteriophage, Water Treatment, Antibiotic Resistance, Biofilm, Water Disinfection.

چکیده

آلودگی میکروبی آب و ظهور فزاینده باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک، چالش‌های بی‌سابقه‌ای را برای سلامت عمومی جهانی ایجاد کرده است. روش‌های کنونی تصفیه آب، در کنار مزایای آنها، با محدودیت‌هایی نظیر تولید محصولات جانبی مضر و کاهش کارایی در برابر سویه‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک مواجه هستند. در شرایط هشداردهنده افزایش مقاومت آنتی‌بیوتیکی، باکتریوفاژها (فاژها) به عنوان خط دفاعی قدرتمند و جایگزینی حیاتی عمل می‌کنند. باکتریوفاژها ویروس‌هایی هستند که دارای یک هسته پروتئینی با یک اسید نوکلئیک به نام کپسید و یک دم نازک با الیاف هستند. پروتئین‌های فاژ به گیرنده‌های خاصی روی سطح باکتری‌های هدف متصل می‌شوند. برخی از فاژها طیف میزبانی وسیعی دارند و می‌توانند گیرنده‌های متعددی را روی گونه‌ها و جنس‌های مختلف باکتریایی تشخیص دهند. این مطالعه مروری، پتانسیل باکتریوفاژها به عنوان جایگزینی برای آنتی‌بیوتیک‌ها و تکمیل‌کننده‌ای برای روش‌های سنتی تصفیه آب را بررسی می‌کند. گردآوری و تحلیل تحقیقات ۱۵ سال اخیر از پایگاه‌های علمی معتبر و با به‌کارگیری یک روش نظام‌مند انجام شد. داده‌های استخراج‌شده بر اساس کاربردهای باکتریوفاژها در تصفیه فاضلاب، دسته‌بندی و تحلیل شدند. بر طبق یافته‌های به‌دست آمده، مزایای کلیدی فاژها شامل انحصاریافتگی بالا (هدف‌گیری دقیق پاتوژن‌ها بدون آسیب به فلور مفید)، قابلیت خودتکثیر در حضور میزبان، توانایی از بین بردن بیوفیلم‌ها و اثرگذاری بر باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک است که آن‌ها را به ابزاری قدرتمند در مبارزه با بحران مقاومت میکروبی تبدیل می‌کند. جمع‌بندی این مطالعه نشان می‌دهد که علی‌رغم موانع موجود، گذار از روش‌های صرفاً شیمیایی به سمت «فاژدرمانی» در تصفیه آب، نه تنها یک امکان، بلکه یک ضرورت فزاینده برای تأمین آب ایمن در عصر مقاومت آنتی‌بیوتیکی است. پیشرفت‌های آتی در مهندسی فاژها و توسعه کوکتل‌های هوشمند، عملیاتی‌سازی این راهبرد را در مقیاس صنعتی تسهیل خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: باکتریوفاژ، تصفیه آب، مقاومت آنتی‌بیوتیکی،

بیوفیلم، ضد عفونی آب.

How to cite this article:

Radkhah, A.R., & Atash Afrazah, S. (2026). Application of Bacteriophages as Biological Agents in Water and Wastewater Treatment: A Review. Journal of Water and Sustainable Development, 12(4), 24-46. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i4.2507-1442>

که به دلیل هزینه پایین و کارایی بالا بسیار متداول است، می‌تواند منجر به تولید محصولات جانبی ضد عفونی (DBPs)^۲ مانند تری‌هالومتان‌ها (THMs) و اسیدهای هالواسیتیک (HAAs) شود. این ترکیبات، در صورت قرار گرفتن طولانی مدت در معرض آن‌ها، سرطان‌زا و دارای اثرات سوء بر سلامت انسان هستند. از طرف دیگر، محققانی از قبیل [Kamani و همکاران \(۲۰۲۳\)](#) اظهار داشتند که کارایی برخی از این روش‌ها در برابر باکتری‌هایی که توانایی تشکیل بیوفیلم دارند (لایه چسبنده از باکتری‌ها که روی سطوح تشکیل می‌شود و آن‌ها را در برابر ضد عفونی‌کننده‌ها مقاوم می‌سازد) یا سویه‌هایی که مقاومت ژنتیکی بالایی نسبت به ضد عفونی‌کننده‌ها کسب کرده‌اند، ممکن است کاهش یابد.

استفاده بیش از حد از آنتی‌بیوتیک‌ها در زمینه‌های صنعتی، پزشکی و کشاورزی، وجود باکتری‌های بیماری‌زا و مقاوم به آنتی‌بیوتیک (ARB)^۳ را در فاضلاب افزایش داده است که در برابر روش‌های تصفیه بیولوژیکی و شیمیایی مرسوم، مقاوم‌تر شده‌اند. برخی از بیمارستان‌ها آنتی‌بیوتیک‌های باقیمانده را بدون فیلترکردن به فاضلاب تخلیه می‌کنند و فشار انتخابی بر میکروارگانیسم‌ها وارد می‌کنند و احتمال گسترش ژن‌های مقاومت آنتی‌بیوتیکی^۴ (ARGs) را افزایش می‌دهند [Rodriguez-Mozaz و همکاران، \(۲۰۱۵\)](#). [Adhikari و همکاران \(۲۰۲۴\)](#)، حضور غالب آنتی‌بیوتیک‌های تتراسایکلین، ماکرولیدها، سولفونامیدها و کینولون‌ها را در فاضلاب خانگی گزارش گردید. [Lerminiaux و Cameron \(۲۰۱۹\)](#) اظهار داشتند که تماس طولانی مدت بین میکروارگانیسم‌ها در تصفیه‌خانه‌ها، انتقال افقی ژن بین باکتری‌ها در تصفیه‌خانه‌ها را تسهیل می‌کند؛ باکتری‌های حساس به آنتی‌بیوتیک، ARGها را از طریق انتقال افقی ژن برای تشکیل ARB به دست می‌آورند، در حالی که باکتری‌های مقاوم، ARGها را برای تولید باکتری‌های مقاوم به چند دارو (MDRB) به دست می‌آورند. باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک می‌توانند از تصفیه فاضلاب جان سالم به در ببرند و از طریق تأمین غذا، تماس مستقیم با حیوانات یا تماس غیرمستقیم از طریق مسیرهای مختلف محیطی به انسان منتقل شوند [Trinchera و همکاران، \(۲۰۲۵\)](#). بنابراین، پاتوژن‌های مقاوم به دارو می‌توانند در مکان‌هایی دور از تجویز اولیه دارو توسعه یابند و این ظهور ممکن است مدت‌ها پس از اعمال فشار اولیه انتخاب رخ دهد. پاتوژن‌های انسانی در ابتدا بسیاری از این ژن‌های مرتبط با مقاومت را در خود جای نداده‌اند، که نشان می‌دهد تنها منشأ مناسب برای این ژن‌ها میکروبیوتای محیط بوده است. قبل از سال ۲۰۱۶، سالانه حدود ۷۰۰۰۰۰ مرگ ناشی از مقاومت آنتی‌بیوتیکی ثبت شد و گمان می‌رود که تا سال ۲۰۵۰، مقاومت آنتی‌بیوتیکی منجر به ۱۰ میلیون مرگ سالانه شود [O'Neill، \(۲۰۱۴\)](#). بنابراین، نیاز مبرمی به حل مشکل ظهور مقاومت آنتی‌بیوتیکی وجود دارد.

در عصر حاضر، بشر با چالش‌های بی‌سابقه‌ای در زمینه مدیریت منابع آبی و تصفیه آن روبرو است. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، آلودگی میکروبی آب توسط باکتری‌های بیماری‌زا (پاتوژن‌ها) است که می‌توانند عامل شیوع بیماری‌های واگیردار و تهدیدکننده حیات، نظیر وبا، حصبه، اسهال‌های شدید و عفونت‌های روده‌ای باشند. این معضل، به ویژه در مناطق در حال توسعه که زیرساخت‌های تصفیه آب ناکافی یا نامناسبی دارند، ابعاد گسترده‌تری به خود می‌گیرد و سالانه جان میلیون‌ها نفر، به خصوص کودکان خردسال را، می‌گیرد [Cabral، \(۲۰۱۰\)](#). در کنار این تهدید دیرینه، بحرانی جدید اما به مراتب پیچیده‌تر و فراگیرتر، یعنی ظهور و گسترش فزاینده باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک، سایه خود را بر سلامت عمومی جهان افکنده است. این پدیده که از آن به عنوان «تهدید خاموش قرن بیست و یکم» یا «پاندمی پنهان» یاد می‌شود، نتیجه مستقیم استفاده بی‌رویه، نادرست و بعضاً غیرضروری از آنتی‌بیوتیک‌ها در بخش‌های مختلف است. از تجویز بیش از حد در پزشکی انسانی و دامپزشکی گرفته تا کاربرد گسترده در مزارع کشاورزی و پرورش دام و طیور برای تسریع رشد یا پیشگیری از بیماری، همگی به انتخاب طبیعی و تکامل سویه‌های باکتریایی منجر شده‌اند که سازوکارهای دفاعی پیچیده‌ای در برابر داروهای آنتی‌بیوتیکی موجود توسعه داده‌اند [Briggs، \(۲۰۲۳\)](#). این باکتری‌های مقاوم به چند دارو (MDR)^۱، معروف به «ابر-باکتری‌ها»، قادرند از طریق مسیرهای مختلفی به منابع آبی وارد شوند. فاضلاب‌های بیمارستانی و شهری که حاوی پسماندهای دارویی و باکتری‌های مقاوم هستند، زهاب‌های کشاورزی آلوده به آنتی‌بیوتیک‌ها و کودهای حیوانی و رواناب‌های سطحی که آلاینده‌ها را از مناطق شهری و روستایی جمع‌آوری می‌کنند، همگی می‌توانند به کانال‌هایی برای انتقال این سویه‌های خطرناک به رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و حتی آب‌های زیرزمینی تبدیل شوند. ورود این باکتری‌های مقاوم به زنجیره غذایی یا سیستم‌های توزیع آب آشامیدنی، می‌تواند به شیوع عفونت‌هایی منجر شود که درمان آن‌ها با آنتی‌بیوتیک‌های سنتی دشوار یا حتی غیرممکن است و بار اقتصادی و اجتماعی عظیمی را بر جوامع تحمیل می‌کند [Hazra و همکاران، \(۲۰۲۲\)](#).

در پاسخ به این چالش‌ها، روش‌های سنتی تصفیه آب، نظیر کلرزنی، ازون‌زنی، استفاده از اشعه فرابنفش (UV) و فیلتراسیون فیزیکی، دهه‌هاست که به عنوان خط مقدم دفاع در برابر آلاینده‌های میکروبی عمل کرده‌اند. این روش‌ها با وجود اثربخشی اثبات‌شده در کاهش بار میکروبی، هر یک با محدودیت‌ها و ملاحظات خاص خود روبرو هستند. به عنوان مثال، [González و همکاران \(۲۰۲۳\)](#) گزارش کردند که کلرزنی

مقالات منتخب، پایان‌نامه‌های مرتبط، کتاب‌های معتبر و گزارش‌های سازمان‌های معتبر بین‌المللی مانند سازمان محیط‌زیست^{۱۱} (EPA) ایالات متحده به‌دقت مطالعه و داده‌های کلیدی از آنها استخراج شد. به‌منظور اطمینان از پوشش حداکثری، جستجو در منابع (Reference Mining) مقالات کلیدی نیز صورت پذیرفت. اطلاعات گردآوری‌شده در نهایت بر اساس محورهای اصلی از جمله انواع کاربرد فازها (حذف باکتری‌های شاخص، کنترل بیوفیلم، تشخیص آلودگی)، انواع سیستم‌های تصفیه، مزایا، چالش‌ها و مطالعات موردی، دسته‌بندی و تحلیل شدند تا پایه‌ای مستدل برای مرور جامع حاضر فراهم آید.

فرآیند متعارف تصفیه فاضلاب

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در درجه اول بر حذف آلاینده‌ها از فاضلاب از طریق دو فرآیند اصلی تمرکز دارند: تصفیه اولیه و تصفیه ثانویه (Nathanson و Ambulkar، ۲۰۲۳). پیش‌تصفیه که گاهی اوقات قبل از تصفیه اولیه استفاده می‌شود، شامل غربالگری، حذف شن و ماسه و لایه‌برداری برای حذف اجسام بزرگ است. رسوب اولیه با هدف از بین بردن مواد آلی باقی‌مانده و مواد معلق، لجن اولیه را تشکیل می‌دهد (Mazumder، ۲۰۱۱). پس از آن، تصفیه ثانویه انجام می‌شود و آلاینده‌های زیست‌تخریب‌پذیر، مواد آلی باقیمانده و جامداتی را که در مرحله تصفیه اولیه حذف نشده‌اند، از بین می‌برد. تصفیه ثانویه شامل سیستم‌های رشد معلق و چسبیده است. در سیستم‌های معلق، میکروب‌ها مواد آلی موجود در فاضلاب را متابولیزه می‌کنند، درحالی‌که سیستم‌های رشد چسبیده از محیط‌های جامد برای رشد میکروارگانیسم‌ها استفاده می‌کنند (Nathanson و Ambulkar، ۲۰۲۳). تصفیه ثالثیه، یک فرآیند اختیاری پس از تصفیه ثانویه، آلاینده‌های باقی‌مانده را حذف کرده و میکروارگانیسم‌ها را با استفاده از ضدعفونی کلر از بین می‌برد (Serra و همکاران، ۲۰۱۴). این امر شامل اضافه کردن پودر سفیدکننده یا گاز کلر برای اطمینان از حذف میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا از آب است (Mazumder، ۲۰۱۱).

نقش ضدعفونی‌کننده‌های مرسوم در افزایش مقاومت آنتی‌بیوتیکی

کلرزی

سازوکار غیرفعال‌سازی باکتری‌ها توسط کلرزی به اکسیداسیون عامل کلرزن بستگی دارد که باعث هیدرولیز شده و منجر به تخریب مکانیکی دیواره سلولی باکتری و تغییر نفوذپذیری آن می‌شود (Bommer و همکاران، ۲۰۱۸). پس از اینکه کلر به سیتوپلاسم دسترسی پیدا کرد، شروع به تأثیر بر مولکول‌های هدف می‌کند و مولکول‌های درون سلولی مانند DNA، RNA و پروتئین از سلول نشت می‌کنند. این

اخیراً، علاقه فزاینده‌ای به باکتریوفازها به عنوان عوامل کنترل بیولوژیکی در تصفیه آب و فاضلاب وجود داشته است. این علاقه از توانایی فازها در حذف اختصاصی باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک و مختل کردن بیوفیلم‌های باکتریایی در محیط‌های فاضلاب ناشی می‌شود، در حالی که دارای حداقل سمیت ذاتی هستند (Ioannou و همکاران، ۲۰۲۳). ویژگی قابل توجه باکتریوفازها نسبت به میزبان‌هایشان به دلیل وجود پروتئین‌هایی است که در نوک فیبرهای دم فاز قرار دارند. این پروتئین‌ها به طور خاص به گیرنده‌های باکتریایی متصل می‌شوند و تزریق ماده ژنتیکی فاز را به غشای میزبان آغاز می‌کنند (Shymialevich و همکاران، ۲۰۲۳). بسیاری از مطالعات، از جمله Kwiatek و همکاران (۲۰۱۷)، Lin و همکاران (۲۰۱۰)، Mathieu و همکاران (۲۰۱۹)، Turki و همکاران (۲۰۱۲)، اثربخشی بالای فاز را در برابر ARB و MDRB برای تصفیه فاضلاب گزارش کرده‌اند. با این حال، برخی از عوامل محدودکننده ممکن است بر اثربخشی فرآیند تصفیه در کاربردهای عملی تأثیر بگذارند.

هدف از این مطالعه مروری، بررسی عمیق و گسترده پتانسیل باکتریوفازها در تصفیه آب و فاضلاب به‌عنوان یک جایگزین پایدار و دوستدار محیط‌زیست نسبت به روش‌های شیمیایی رایج است. امید است این بررسی جامع، به درک عمیق‌تر از نقش فازها در تأمین آب سالم و مقابله با تهدیدات میکروبی نوین کمک کند و راه را برای پذیرش گسترده‌تر این راه‌حل بیولوژیکی پایدار در آینده مدیریت منابع آبی هموار سازد.

روش گردآوری اطلاعات

برای گردآوری اطلاعات جامع در این مطالعه مروری، از یک روش نظام‌مند چندمرحله‌ای استفاده شد. ابتدا پایگاه‌های اطلاعاتی علمی بین‌المللی اصلی شامل اسکوپوس^۵ (Scopus)، وب‌آو ساینس^۶ (Web of Science)، پاب‌مد^۷ (PubMed) و گوگل اسکولار^۸ (Google Scholar) به‌همراه پایگاه‌های تخصصی‌تر مانند ساینس دایرکت^۹ (ScienceDirect) و اشپرینگر^{۱۰} (Springr) به‌طور گسترده مورد جستجو قرار گرفتند. کلیدواژه‌های جستجو در زبان‌های انگلیسی و فارسی و با استفاده از عملگرهای بولین تنظیم شدند که شامل ترکیباتی همچون "باکتریوفاز"، "تصفیه فاضلاب"، "حذف پاتوژن"، "بیوکنترل"، "مهندسی محیط‌زیست" و معادل‌های انگلیسی آنها مانند "bacteriophage"، "water purification"، "biological control" و "wastewater treatment" بود. محدوده زمانی جستجو عمده‌تاً مقالات ۱۵ سال اخیر (از ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۴) را دربرمی‌گرفت، اما برای برخی مبانی تاریخی، مقالات کلیدی قدیمی‌تر نیز بررسی شدند. پس از استخراج اولیه، فرآیند غربالگری با ارزیابی عنوان و چکیده مقالات بر اساس معیارهای ورود و خروج (شامل ارتباط موضوعی، دسترسی به متن کامل و کیفیت نشریه) انجام شد. سپس متن کامل

مولکول‌های درون سلولی نشت‌یافته توسط عامل کلرزنی در خارج از سلول آسیب می‌بینند (Ofori و همکاران، ۲۰۱۸). مطالعه Ragab و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کرد که غشای سلولی در دوزهای پایین کلر (کمتر از ۵ میلی‌گرم در لیتر NaOCl) آسیب می‌بیند، در حالی که DNA در دوزهای بالا (بیش از ۵ میلی‌گرم در لیتر NaOCl) کمی آسیب می‌بیند. علاوه بر این، عملکرد ترمیم DNA باکتری پس از ۳۰ دقیقه قرار گرفتن در معرض ۵ میلی‌گرم در لیتر کلر به طور کامل مهار شد.

سوالاتی که باید در اینجا توجه شود این است که «آیا گندزدایی با کلر، فراوانی مقاومت آنتی‌بیوتیکی را در محیط افزایش می‌دهد؟» پس از تجزیه و تحلیل جامع متاژنوم، افزایش قابل توجهی در سیستم‌های دفاعی مربوطه در برابر استرس اکسیداتیو و آنتی‌بیوتیک‌ها مشاهده شد. میکروارگانیسم‌های موجود در سیستم توزیع آب آشامیدنی کلردار توالی‌یابی شدند. این سیستم‌های دفاعی شامل ژن‌های مرتبط با پمپ افلاکس، بتا-لاکتاماز، چندین ژن تنظیم‌شده توسط RpoS، سیستم OxyR و سیستم SoxRS بودند که از جمله عناصری هستند که در این زمینه تنظیم را نشان می‌دهند (Douterelelo و همکاران، ۲۰۱۸). علاوه بر این، طبق برخی مطالعات، تعداد عناصر ژنتیکی متحرک (MGES)^{۱۲} پس از کلرزنی فراوان‌تر شد و منجر به انتقال ARGها به سایر باکتری‌ها شد. مطالعه Jin و همکاران (۲۰۲۰) نشان داده است که فرآیند کلرزنی به تبدیل پاتوژن‌های فرصت‌طلب از غیر ARB به ARB از طریق انتقال ژن کمک می‌کند.

مطالعه Jia و همکاران (۲۰۱۵) از روش‌های توالی‌یابی با توان بالا و متاژنومیک برای بررسی تغییرات در جمعیت باکتریایی و ARGها در طول زمان در یک سیستم توزیع و تصفیه آب آشامیدنی استفاده کرد. نتایج نشان داد که کلرزنی اثرات متفاوتی دارد. این روش می‌تواند با موفقیت اتیلوترن، لیمونوباکتر، متیلوفیلوس و پلی‌نوکلئوباکتر را از بین ببرد، در حالی که باعث افزایش شیوع Acidovorax، Plemons، Pseudomonas، Sphingomonas و Undibacterium در منابع آبی می‌شود. آب آشامیدنی حاوی ۱۵۱ ARG از ۱۵ نوع بود و کلرزنی به وضوح شیوع کلی آنها را افزایش داد، در حالی که تنوع آنها را در باکتری‌های فرصت‌طلب کاهش داد. Acidovorax و Pseudomonas مقاوم به کلر، حاملان اصلی ژن مقاومت به باسیتراسین (bacA) بودند که در درجه اول مسئول افزایش فراوانی ARGها بودند (Jia و همکاران، ۲۰۱۵). تحقیقات متعددی بررسی کرده‌اند که چگونه مواد ضدعفونی‌کننده بر ARGها در بیوفیلم‌ها تأثیر می‌گذارند. یکی از این مطالعات که Giacometti و همکاران (۲۰۲۱) انجام دادند، توسعه ARB و نقش بیوفیلم‌ها را در یک سیستم توزیع آب بررسی کرد. این محققان ARGهای مختلف مقاوم به کلیندامایسین، نورفلوکساسین، سولفامتوکسازول و تتراسایکلین را به مدت یک سال کامل در یک سیستم توزیع آب رصد کردند. یافته‌ها نشان داد که غلظت ARB در آب

لوله‌کشی افزایش یافته است، که احتمالاً به دلیل جدا شدن بیوفیلم است (Giacometti و همکاران، ۲۰۲۱). طبق توالی‌یابی با توان عملیاتی بالا، سطوح نسبی *Bradyrhizobium*، *Acinetobacter* و *Sphingomonas* مقاوم به آنتی‌بیوتیک در آب خروجی بیشتر از آب ورودی بود. این یافته‌ها حاکی از آن است که مواد ضدعفونی‌کننده باعث تجزیه بیوفیلم شده و بر توسعه کلی مقاومت آنتی‌بیوتیکی باکتریایی در میکروارگانیسم‌های موجود در آب لوله‌کشی تأثیر داشته‌اند (Giacometti و همکاران، ۲۰۲۱).

آزون‌زنی

فناوری‌های ضدعفونی‌کننده گازی، روشی مؤثر برای ضدعفونی و جایگزینی مناسب برای کلر در فرآیندهای ضدعفونی آب هستند. ازون (O_3) دومین اکسیدان قوی برای تصفیه آب پس از رادیکال هیدروکسیل، در کنار پلاسمای سرد و دی‌اکسید کلر (ClO_2) به عنوان موفق‌ترین روش در میان ضدعفونی‌کننده‌های گازی شناخته شده است (Botondi و همکاران، ۲۰۲۳). ازون‌زنی باکتری‌ها را از طریق سازوکاری که عمدتاً به شکافت دیواره سلولی بستگی دارد، غیرفعال می‌کند که باعث دنا‌توراسیون اسیدهای نوکلئیک و دی‌میریزاسیون پروتئین‌ها از طریق شکستن پیوندهای کربن و نیتروژن می‌شود (Gomes و همکاران، ۲۰۱۹). ازون (O_3) به شدت با پروتئین‌ها، پپتیدوگلیکان‌ها و لیپیدهای موجود در دیواره سلولی و غشای سلولی، به ویژه اسیدهای آمینه و پیوندهای کربن-کربن غیراشباع، واکنش نشان می‌دهد. در نتیجه، هنگامی که دیواره سلولی و غشای سلولی آسیب می‌بینند، O_3 می‌تواند به ARG درون سلولی (iARG) نیز حمله کند (Travagli و Jorio، ۲۰۲۳). ARG خارج سلولی (eARG) DNA مستقل از باکتری است؛ این ماده از آزادسازی ARG درون سلولی (iARG) حاصل می‌شود و در مقایسه با iARG در برابر حملات اکسیداسیون O_3 آسیب‌پذیرتر است (Botondi و همکاران، ۲۰۲۳). مطالعه Alexander و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که ARGهایی با محتوای گوانین-سیتوزین کمتر می‌توانند به راحتی توسط O_3 آسیب ببینند. با این حال، وجود پیوندهای هیدروژنی بین رشته‌های دوتایی DNA می‌توانست منجر به واکنش‌پذیری O_3 کمتر از حد انتظار به DNA رشته‌ای شود.

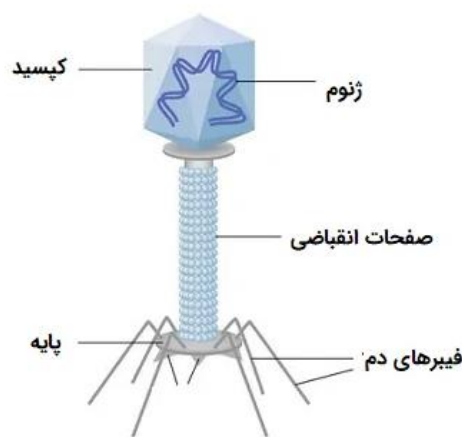
مطالعه Ragab و همکاران (۲۰۲۴) پیشرفت‌های فعلی در کاربرد ازون برای تصفیه پیشرفته آلاینده‌های شیمیایی و بیولوژیکی در فاضلاب را شرح داد. این پیشرفت‌ها شامل مسائل DBP و اثربخشی حذف/ضدعفونی در دوزهای مختلف ازون بود. این مطالعه نشان داد که دوزهای خاص ازون منجر به اختلال در عملکرد iARGها می‌شود. در حالی که O_3 توانایی رضایت‌بخشی در حذف ARB نشان می‌دهد، توانایی آن در حذف ARG کمتر مؤثر است. بنابراین، ممکن است دوز بالاتر ازون برای حذف کامل مقاومت آنتی‌بیوتیکی در فاضلاب لازم باشد. بررسی‌های Hu و Zhang (۲۰۱۳)

نشان داد که استفاده از یک روش ضد عفونی همراه با ازون/کلر، فراوانی نسبی ARG های حامل ARB و عناصر ژنتیکی متحرک را به طور قابل توجهی افزایش می دهد. علی رغم استفاده گسترده از ازون برای حذف ARB، استفاده از این روش می تواند فراوانی ARG ها را در شرایط خاصی افزایش دهد (Ragab و همکاران، ۲۰۲۴).

باکتریوفاژها: ویژگی ها و سازوکار عمل

باکتریوفاژها، که اغلب به سادگی فاژها نامیده می شوند، گروهی منحصر به فرد از ویروس ها هستند که به طور اختصاصی باکتری ها را آلوده کرده و از بین می برند (شکل ۱). ریشه نام آن ها از واژه های یونانی "phagein" به معنای "خوردن" و "bakterion" به معنای "باکتری" گرفته شده است، که به درستی ماهیت "باکتری خوار" آن ها را توصیف می کند (Kasman و Porter، ۲۰۲۵). کشف فاژها در اوایل قرن بیستم، ابتدا توسط فردریک توورت در سال ۱۹۱۵ و

سپس به طور مستقل توسط فلیکس دهرل در سال ۱۹۱۷، نقطه عطفی در تاریخ میکروبیولوژی بود و زمینه ساز تحقیقات گسترده ای در زمینه تعاملات ویروس-باکتری و پتانسیل درمانی آن ها شد. از آن زمان، مشخص شده است که فاژها در هر اکوسیستمی که باکتری ها حضور دارند، از خاک و آب های شیرین گرفته تا اقیانوس ها، سیستم های فاضلاب و حتی بدن انسان و حیوانات، به وفور یافت می شوند. این فراوانی حیرت انگیز، که تخمین زده می شود تعداد کل ذرات فاژ در زیست کره به تعداد زیادی برسد، آن ها را به فراوان ترین موجودات بیولوژیکی روی زمین تبدیل کرده و نقش حیاتی آن ها در تنظیم جمعیت های باکتریایی و حفظ تعادل اکوسیستم ها را نشان می دهد (Zhang و همکاران، ۲۰۲۲). این حضور همه جانبه و نقش کلیدی در کنترل جمعیت های میکروبی، فاژها را به کاندیدایی طبیعی و ایده آل برای کاربردهای بیوتکنولوژیکی در تصفیه آب تبدیل می کند (Naureen و همکاران، ۲۰۲۰).



شکل ۱- ساختار باکتریوفاژ

ساختار فاژها، همانند سایر ویروس ها، نسبتاً ساده اما به شکلی فوق العاده کارآمد و هدفمند طراحی شده است. این سادگی ساختاری، در عین حال، امکان آلوده کردن باکتری میزبان و هدایت فرآیند تکثیر ویروسی را با دقت بالا فراهم می آورد. به طور کلی، هر ذره فاژ از دو جزء اصلی و حیاتی تشکیل شده است: اول، ماده ژنتیکی که می تواند شامل DNA (به صورت دو رشته ای یا تک رشته ای) یا RNA (به صورت دو رشته ای یا تک رشته ای) باشد. این ژنوم ویروسی، دربرگیرنده تمامی اطلاعات ژنتیکی ضروری برای سنتز پروتئین های ویروسی و هدایت ماشین آلات سلولی باکتری برای تکثیر فاژ در داخل آن است (Abd-Allah و همکاران، ۲۰۲۱). دوم، کپسید (Capsid)، که یک پوشش پروتئینی محافظ است و ماده ژنتیکی را احاطه کرده و از آن در برابر آسیب های محیطی محافظت می کند. کپسید خود از زیرواحدهای پروتئینی کوچکتر به نام کپسومر ساخته شده

است. شکل و اندازه کپسید در بین انواع مختلف فاژها بسیار متنوع است و می تواند از اشکال هندسی منظم مانند ایزوکاهدر (بیست وجهی منظم) تا ساختارهای هلیکال (مارپیچی) یا حتی مورفولوژی های پیچیده تر که ترکیبی از این اشکال هستند، متغیر باشد. این تنوع شکلی، به فاژها اجازه می دهد تا به انواع مختلف باکتری ها با ساختارهای دیواره سلولی متفاوت، متصل شوند. علاوه بر این دو جزء اصلی، بسیاری از فاژها، به خصوص آن هایی که باکتری های گرم-منفی را مورد هدف قرار می دهند، دارای یک دم (Tail) هستند (Asensio و همکاران، ۲۰۱۶). دم یک ساختار پروتئینی پیچیده است که از انتهای کپسید به بیرون امتداد می یابد و نقش حیاتی در فرآیند شناسایی و اتصال فاژ به سطح باکتری میزبان و به دنبال آن، تزریق ماده ژنتیکی به درون آن ایفا می کند. این ساختار دم می تواند شامل اجزایی مانند غلاف دم (sheath tail)، فیبرهای دم (fibers tail) و

صفحه پایه (baseplate) باشد که هر یک وظیفه خاصی در فرآیند شناسایی گیرنده‌های سطحی باکتری و نفوذ به دیواره سلولی آن دارند. تنوع در مورفولوژی دم و کپسید، اساس طبقه‌بندی فاژها را در خانواده‌های مختلفی نظیر Myoviridae (دارای دم انقباض‌پذیر)، Siphoviridae (دارای دم بلند و غیرانقباض‌پذیر) و Podoviridae (دارای دم کوتاه) تشکیل می‌دهد (Xiao و همکاران، ۲۰۲۳).

برای درک چگونگی عملکرد فاژها در تصفیه آب و کنترل جمعیت‌های باکتریایی، آشنایی با چرخه زندگی آن‌ها ضروری است. فاژها برای تکثیر خود کاملاً به باکتری میزبان وابسته هستند و چرخه زندگی آن‌ها را می‌توان به دو نوع اصلی تقسیم کرد که هر یک پیامدهای متفاوتی برای باکتری میزبان دارند:

- چرخه لیتیک (Cycle Lytic): این چرخه، که برای کاربردهای ضدباکتریایی در تصفیه آب اهمیت ویژه‌ای دارند، به طور قاطع منجر به مرگ و لیز شدن (تخریب) باکتری میزبان می‌شود. فرآیند چرخه لیتیک به دقت و با هماهنگی خاصی دنبال می‌شود و شامل پنج مرحله کلیدی است:

۱. اتصال (Adsorption): در گام نخست، فاژ با استفاده از ساختارهای سطحی خود، که غالباً شامل فیبرهای دم هستند، به گیرنده‌های خاص و اختصاصی که روی سطح دیواره سلولی باکتری میزبان قرار دارند، متصل می‌شود. این گیرنده‌ها می‌توانند شامل پروتئین‌ها، لیپوپلی‌ساکاریدها یا اسیدهای تیکوئیک باشند. این اتصال، فوق‌العاده اختصاصی است؛ به این معنی که هر فاژ تنها قادر است به باکتری‌هایی با گیرنده‌های سطحی کاملاً سازگار متصل شود، که همین امر، پایه و اساس ویژگی هدفمند فاژها را تشکیل می‌دهد. این ویژگی به فاژها اجازه می‌دهد تا باکتری‌های بیماری‌زا را بدون آسیب رساندن به فلور طبیعی و مفید، از بین ببرند (Leprince و Mahillon، ۲۰۲۳).

۲. تزریق (Penetration/Injection): پس از اتصال محکم، ماده ژنتیکی فاژ (DNA یا RNA) با دقت و سرعت بالا به درون سیتوپلاسم باکتری میزبان تزریق می‌شود. در فاژهای دارای دم پیچیده، غلاف دم منقبض شده و ساقه مرکزی دم دیواره سلولی و غشای باکتری را سوراخ می‌کند تا ژنوم فاژ به داخل سلول راه یابد. این مرحله، باکتری را تحت کنترل ژنتیکی فاژ قرار می‌دهد (Elois و همکاران، ۲۰۲۳).

۳. بیوسنتز (Biosynthesis): به محض ورود، ماده ژنتیکی فاژ به سرعت کنترل سنتز پروتئین و تکثیر باکتری را به دست می‌گیرد. سپس، ژن‌های فاژ بیان می‌شوند و منجر به تولید آنزیم‌هایی مانند نوکلئازها می‌شوند که DNA باکتری میزبان را تجزیه کرده و منابع سلولی را برای ساخت اجزای ویروسی جدید (مانند پروتئین‌های کپسید، اجزای دم و آنزیم‌های لازم برای تکثیر ژنوم فاژ) بسیج می‌کنند. در این مرحله، سلول باکتری عملاً به

یک "کارخانه" تولید فاژ تبدیل می‌شود (Häuser و همکاران، ۲۰۱۲).

۴. بلوغ و مونتاژ (Maturation/Assembly): در این مرحله، تمامی اجزای ویروسی تازه سنتز شده، به طور خودبه‌خود یا با کمک پروتئین‌های کمکی میزبان، به دقت مونتاژ شده و ذرات فاژ کامل و عفونی جدید را تشکیل می‌دهند. این فرآیند مونتاژ، نشان‌دهنده کارایی بالای سیستم ژنتیکی فاژ است و اطمینان می‌دهد که فاژهای تولیدی کاملاً کاربردی و قادر به آلوده کردن باکتری‌های جدید هستند (Veesler و Johnson، ۲۰۱۲).

۵. لیز و رهایش (Release and Lysis): در مرحله نهایی و تعیین‌کننده، فاژ آنزیم‌هایی خاص (مانند لیزین‌ها و هولین‌ها) تولید می‌کند که به تدریج دیواره سلولی باکتری را تخریب کرده و باعث لیز شدن (متلاشی شدن) آن می‌شود. در نتیجه این لیز، باکتری می‌ترکد و تعداد بسیار زیادی (معمولاً ده‌ها تا صدها) ذره فاژ جدید از آن آزاد می‌شوند. این فاژهای تازه آزاد شده به سرعت به جستجوی باکتری‌های میزبان جدید می‌روند و چرخه را تکرار می‌کنند، که منجر به کاهش سریع و مؤثر جمعیت باکتریایی در محیط می‌شود. این توانایی خود-تکثیری و لیز سریع باکتری‌ها، چرخه لیتیک را برای کاربردهای تصفیه آب بسیار ایده‌آل می‌سازد، زیرا به معنای یک واکنش زنجیره‌ای و تقویت‌شونده در حضور باکتری‌های هدف است (Wang و همکاران، ۲۰۰۰).

- چرخه لیزوژنیک (Cycle Lysogenic): این چرخه توسط فاژهای "معتدل" انجام می‌شود و برخلاف چرخه لیتیک، منجر به مرگ فوری باکتری میزبان نمی‌شود، بلکه یک رابطه همزیستی موقت با آن ایجاد می‌کند. در این چرخه، ماده ژنتیکی فاژ (که در این حالت پروفاز نامیده می‌شود) پس از ورود به باکتری، به جای اینکه بلافاصله شروع به تکثیر کند، به داخل کروموزوم باکتری میزبان ادغام می‌شود. در برخی موارد، پروفاز می‌تواند به صورت یک پلاسمید در سیتوپلاسم باکتری باقی بماند و به طور مستقل تکثیر شود. در این حالت، فاژ هیچ آسیبی به باکتری نمی‌رساند و به صورت "خاموش" یا غیرفعال باقی می‌ماند (Qi و Palma، ۲۰۲۴). پروفاز همراه با DNA باکتری میزبان در هر تقسیم سلولی تکثیر می‌شود و به سلول‌های دختری منتقل می‌گردد. در این مرحله، فاژ می‌تواند ژن‌هایی را بیان کند که ممکن است ویژگی‌های جدیدی به باکتری میزبان بدهند (مثلاً تولید توکسین، افزایش مقاومت به آنتی‌بیوتیک‌ها، یا تغییر در ویژگی‌های بیماری‌زایی)، که این پدیده به عنوان تبدیل لیزوژنیک (conversion lysogenic) شناخته می‌شود. این جنبه، یکی از دلایل اصلی است که فاژهای لیزوژنیک در کاربردهای فاژدرمانی و تصفیه آب معمولاً استفاده نمی‌شوند. با این حال، تحت شرایط استرس‌زا خاص (مانند قرار گرفتن در معرض اشعه UV، برخی مواد شیمیایی، کمبود مواد مغذی

یا تغییرات شدید محیطی)، پروفاژ می‌تواند از کروموزوم باکتری جدا شده و وارد چرخه لیتیک شود. این القاء چرخه لیتیک در نهایت منجر به لیز شدن باکتری و رهاش فاژهای جدید می‌شود (Fortier و Sekulovic، ۲۰۱۳).

فاژهای لیزوژنیک به طور کلی برای اهداف درمانی یا ضد عفونی در تصفیه آب ترجیح داده نمی‌شوند، زیرا هدف اصلی در این کاربردها، از بین بردن سریع و مؤثر باکتری‌های بیماری‌زا است و نه همزیستی با آن‌ها یا اعطای ویژگی‌های ناخواسته به باکتری میزبان. بنابراین، در کاربردهای تصفیه آب، تمرکز قاطع بر روی جداسازی، شناسایی و استفاده از فاژهای لیتیک خالص است تا حداکثر کارایی در کاهش بار میکروبی و اطمینان از ایمنی فرآیند تضمین شود. درک دقیق از این دو چرخه، به‌ویژه چرخه لیتیک، برای طراحی استراتژی‌های فاژدرمانی مؤثر و ایمن در حوزه‌های بهداشت محیط، به‌خصوص تصفیه آب، حیاتی است و پایه و اساس نوآوری‌های آینده در این زمینه را فراهم می‌آورد (Venturini و همکاران، ۲۰۲۲).

مزایای باکتریوفاژها نسبت به آنتی‌بیوتیک‌ها در تصفیه آب

باکتریوفاژها کاربردهای متنوعی در محیط‌های مختلف دارند (شکل ۲). از مهم‌ترین زمینه‌های کاربردی برای باکتریوفاژها می‌توان در تصفیه آب اشاره نمود. چالش‌های دوگانه آلودگی میکروبی فزاینده آب و بحران جهانی مقاومت آنتی‌بیوتیکی در این عصر، جستجو برای یافتن راهکارهای تصفیه آب نوین، پایدار و مؤثر را بیش از پیش اهمیت داده است. در این میان، باکتریوفاژها، با مجموعه‌ای از ویژگی‌های بیولوژیکی منحصر به فرد، به عنوان یک جایگزین قدرتمند و نویدبخش برای آنتی‌بیوتیک‌ها و تکمیل‌کننده‌ای برای روش‌های سنتی تصفیه آب مطرح شده‌اند. این مزایا نه تنها به بهبود کارایی فرآیندهای تصفیه کمک می‌کنند، بلکه ملاحظات زیست‌محیطی و بهداشتی بلندمدت را نیز در نظر می‌گیرند (Nwobodo و همکاران، ۲۰۲۲). به برخی از این ویژگی‌ها در ادامه اشاره می‌شود:

- یکی از برجسته‌ترین و حیاتی‌ترین مزایای باکتریوفاژها، اختصاصی بودن بی‌نظیر آن‌ها در هدف‌گیری باکتری‌هاست. در حالی که آنتی‌بیوتیک‌های وسیع‌الطیف به طور غیرانتخابی بر طیف گسترده‌ای از باکتری‌ها، شامل هم باکتری‌های بیماری‌زا و هم باکتری‌های مفید (مانند فلور طبیعی بدن یا میکروارگانیسم‌های ضروری در فرآیندهای بیولوژیکی تصفیه فاضلاب) تأثیر می‌گذارند، هر فاژ معمولاً به طور اختصاصی تنها یک گونه یا حتی یک سویه خاص از باکتری را شناسایی، آلوده و لیز می‌کند. این ویژگی خارق‌العاده، ناشی از نیاز فاژ به شناسایی و اتصال به گیرنده‌های بسیار خاص و دقیق روی سطح دیواره سلولی باکتری میزبان است. در زمینه تصفیه آب، این "جراحی میکروبی" دقیق این امکان را می‌دهد تا

پاتوژن‌های باکتریایی هدف با دقت بالا حذف شود، بدون اینکه به جمعیت‌های میکروبی مفید و ضروری موجود در اکوسیستم آبی آسیبی وارد آید. این رویکرد هدفمند، نه تنها از بهم‌ریختگی تعادل اکولوژیکی جلوگیری می‌کند، بلکه احتمال ایجاد اختلال در فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی آب و فاضلاب را نیز به حداقل می‌رساند و به حفظ پایداری زیست‌محیطی و سلامت کلی اکوسیستم‌های آبی کمک شایانی می‌نماید (Jo و همکاران، ۲۰۲۳).

- باکتریوفاژها راهکاری مؤثر برای مقابله با یکی از سرسخت‌ترین چالش‌ها در سیستم‌های آبی - یعنی تشکیل بیوفیلم‌ها - ارائه می‌دهند. بیوفیلم‌ها، توده‌هایی از باکتری‌ها هستند که درون یک ماتریس پلیمری خارج سلولی^{۱۳} (EPS) جاسازی شده و به سطوح مختلف (مانند سطوح داخلی لوله‌های آب، مخازن ذخیره و تجهیزات صنعتی) می‌چسبند. باکتری‌های درون بیوفیلم به دلیل محافظت توسط این ماتریس چسبنده و همچنین تغییر در وضعیت متابولیکی خود، می‌توانند تا چند صد برابر بیشتر از باکتری‌های منفرد (پلنکتونیک) در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها و ضد عفونی‌کننده‌های سنتی (مانند کلر) مقاومت نشان دهند. این مقاومت بالا، بیوفیلم‌ها را به منبعی دائمی برای آلودگی مجدد آب، گرفتگی لوله‌ها، کاهش کارایی سیستم و حتی خوردگی بیولوژیکی^{۱۴} (MIC) تبدیل می‌کند. قابلیت منحصر به فرد بسیاری از فاژها در تولید آنزیم‌های دیپولیمراز، که قادر به تجزیه این ماتریس پلیمری خارج سلولی هستند، به فاژها امکان می‌دهد تا به باکتری‌های محصور در بیوفیلم دسترسی پیدا کرده و آن‌ها را لیز کنند. این ویژگی، فاژها را به ابزاری قدرتمند برای پیشگیری از تشکیل بیوفیلم و حذف بیوفیلم‌های موجود در زیرساخت‌های آبی تبدیل می‌کند و به این ترتیب، نه تنها کیفیت میکروبی آب را بهبود می‌بخشد، بلکه طول عمر و کارایی زیرساخت‌های حیاتی آبرسانی را نیز به طور چشمگیری افزایش می‌دهد (Mayorga-Ramos و همکاران، ۲۰۲۴).

- یکی از ویژگی‌های انقلابی و اقتصادی فاژها، قابلیت خودتکثیری آن‌هاست. برخلاف آنتی‌بیوتیک‌ها و مواد شیمیایی ضد عفونی‌کننده که پس از مصرف یا تجزیه شدن نیاز به دوزهای مکرر و پیوسته دارند، فاژها در صورت وجود باکتری میزبان، می‌توانند به سرعت خود را تکثیر کرده و تعدادشان را افزایش دهند. این بدان معناست که یک دوز اولیه از فاژها، اگرچه ممکن است برای کاهش اولیه بار باکتریایی نیاز به غلظت قابل توجهی داشته باشد، اما می‌تواند برای مدت زمان طولانی‌تری در سیستم مؤثر باقی بماند و نیاز به تزریق مداوم یا پرهزینه را کاهش دهد. این خاصیت خود-تکثیری، فاژها را از نظر اقتصادی نیز کارآمدتر می‌کند، زیرا هزینه اولیه تولید و کاربرد می‌تواند در طولانی‌مدت با کاهش هزینه‌های عملیاتی و مصرف مواد شیمیایی جبران شود. علاوه بر این، این قابلیت به فاژها امکان می‌دهد تا در صورت بروز آلودگی مجدد باکتریایی، به طور خودکار واکنش نشان داده و جمعیت باکتریایی را کنترل

کنند و یک سیستم پایش و واکنش بیولوژیکی پویا ایجاد نمایند (Loc-Carrillo و Abedon، ۲۰۱۱).

- در مواجهه با بحران جهانی مقاومت آنتی‌بیوتیکی که کارایی داروهای سنتی را به شدت تضعیف کرده است، فاژها به عنوان یک راه‌حل حیاتی و امیدبخش ظاهر می‌شوند. از آنجا که فاژها سازوکار عمل کاملاً متفاوتی نسبت به آنتی‌بیوتیک‌ها دارند (آن‌ها به جای تداخل با مسیرهای بیوشیمیایی خاص باکتری، ساختارهای سلولی آن را هدف قرار داده و لیز می‌کنند)، می‌توانند باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک را نیز به طور مؤثر از بین ببرند (Sahoo و Meshram، ۲۰۲۴). مقاومت باکتری‌ها در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها، که غالباً به دلیل تغییراتی در پمپ‌های خروجی دارو، آنزیم‌های غیرفعال‌کننده دارو، یا تغییر در هدف‌های دارویی ایجاد می‌شود، بر توانایی فاژها برای آلوده کردن و لیز کردن باکتری‌ها بی‌تأثیر است. این ویژگی، فاژها را به ابزاری قدرتمند برای مقابله با سویه‌های باکتریایی فوق‌العاده مقاوم (Pan-Drug Resistant) تبدیل می‌کند که به هیچ یک از داروهای آنتی‌بیوتیکی موجود پاسخ نمی‌دهند. استفاده از فاژها در تصفیه آب می‌تواند به عنوان یک استراتژی مؤثر برای کاهش انتشار ژن‌های مقاومت آنتی‌بیوتیکی در محیط‌زیست عمل کرده و در نتیجه، به کند کردن روند گسترش مقاومت آنتی‌بیوتیکی در سطح جهانی کمک شایانی نماید، که این امر پیامدهای مثبت گسترده‌ای برای بهداشت عمومی در سراسر جهان خواهد داشت (Gaurav و همکاران، ۲۰۲۳).

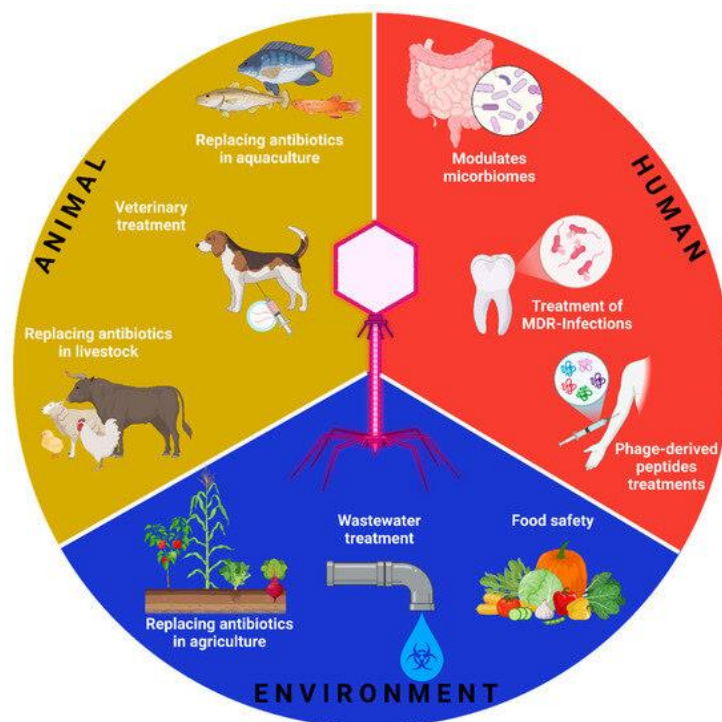
- ایمنی و حداقل عوارض جانبی، از دیگر مزایای چشمگیر باکتریوفاژها است. فاژها به طور طبیعی و در مقادیر بسیار زیاد در محیط‌زیست و در بدن انسان (به عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از میکروبیوم طبیعی) یافت می‌شوند و میلیون‌ها سال است که با ما همزیستی دارند. آن‌ها به طور ذاتی تنها به سلول‌های پروکاریوتی (باکتری‌ها) حمله می‌کنند و هیچ تأثیری بر سلول‌های یوکاریوتی (شامل سلول‌های انسانی، حیوانی و گیاهی) ندارند. این انحصار یافتگی میزبان، می‌تواند آن‌ها را در مقایسه با آنتی‌بیوتیک‌ها که می‌توانند عوارض جانبی متعددی (مانند آسیب به فلور مفید روده و واکنش‌های آلرژیک، یا مسمومیت ارگانی مانند کلیه و کبد) بر روی میزبان داشته باشند، به مراتب ایمن‌تر می‌سازد. همچنین، پس از از بین بردن باکتری‌های هدف و در صورت عدم وجود میزبان کافی برای تکثیر، فاژها به دلیل نداشتن توانایی تکثیر مستقل و همچنین حساسیت به برخی عوامل محیطی، به تدریج در محیط غیرفعال شده و توسط فرآورده‌های طبیعی (مانند تجزیه توسط آنزیم‌های پروتئاز یا اشعه UV طبیعی) از بین می‌روند و

در محیط تجمع نمی‌یابند. این عدم تجمع و ماهیت خود-محدودکننده، فاژها را به یک گزینه کاملاً دوستدار محیط‌زیست و پایدار تبدیل می‌کند که با اصول توسعه پایدار و حفاظت از محیط‌زیست کاملاً همخوانی دارد (Chung و همکاران، ۲۰۲۳).

- علاوه بر این، بسیاری از فاژها پایداری نسبی در برابر تغییرات شرایط محیطی مانند pH، دما و شوری دارند، که این ویژگی به آن‌ها امکان می‌دهد تا در محیط‌های آبی متنوع و چالش‌برانگیز سیستم‌های تصفیه آب، کارایی خود را حفظ کنند. اگرچه پایداری فاژها بسته به نوع فاژ و شرایط خاص محیطی متفاوت است و ممکن است نیاز به بهینه‌سازی فرمولاسیون و شرایط نگهداری باشد، اما به طور کلی، فاژها نسبت به بسیاری از عوامل شیمیایی ضدعفونی‌کننده، انعطاف‌پذیری بیشتری از خود نشان می‌دهند. این پایداری، آن‌ها را برای کاربرد در انواع مختلف منابع آبی، از آب‌های سطحی گرفته تا فاضلاب‌های شهری و صنعتی، مناسب می‌سازد.

- در نهایت، یکی از مهم‌ترین مزایای زیست‌محیطی استفاده از فاژها، کاهش چشمگیر تولید محصولات جانبی مضر است (Naureen و همکاران، ۲۰۲۰). برخلاف روش‌های شیمیایی ضدعفونی مانند کلرزنی که می‌تواند منجر به تولید ترکیبات آلی هالوژنه (THMs و HAAs) با پتانسیل سرطان‌زایی شود، فرآیند لیز باکتریایی توسط فاژها هیچ‌گونه محصول جانبی سمی یا مضر برای محیط‌زیست یا سلامت انسان تولید نمی‌کند. این ویژگی، فاژها را به یک گزینه کاملاً سبز و پایدار برای تصفیه آب تبدیل می‌کند که نه تنها سلامت جامعه را تضمین می‌کند، بلکه با اهداف حفاظت از منابع طبیعی و کاهش آلودگی‌های شیمیایی نیز هم‌راستا است. عدم تولید ترکیبات شیمیایی ثانویه، همچنین به معنای کاهش نیاز به مراحل تصفیه اضافی برای حذف این ترکیبات و در نتیجه، کاهش هزینه‌های عملیاتی و پیچیدگی کلی فرآیند تصفیه است (Chung و همکاران، ۲۰۲۳).

در مجموع، مجموعه این مزایای چندوجهی، باکتریوفاژها را به کاندیدایی بی‌نظیر و بسیار امیدوارکننده برای انقلاب در رویکردهای تصفیه آب و مقابله با چالش‌های بهداشتی ناشی از آلاینده‌های میکروبی، به ویژه در عصر مقاومت آنتی‌بیوتیکی، تبدیل کرده است. این ویژگی‌ها نه تنها به افزایش کارایی و ایمنی فرآورده‌های تصفیه کمک می‌کنند، بلکه مسیر را برای توسعه راهکارهای دوستدار محیط‌زیست و پایدار هموار می‌سازد که برای آینده سلامت بشر و سیاره زمین حیاتی است (Albarella و همکاران، ۲۰۲۵).



شکل ۲- کاربردهای باکتریوفازها در محیط‌های مختلف، از ایمنی مواد غذایی و تصفیه فاضلاب گرفته تا جایگزینی آنتی‌بیوتیک‌ها در کشاورزی، آبریزی و دامداری، تا تعدیل میکروبیوم‌ها و درمان عفونت‌های ناشی از باکتری‌های مقاوم به دارو (Segundo-Arizmendi و همکاران، ۲۰۲۵)

(۲۰۲۵). استفاده از فازها اجازه می‌دهد تا تنها عوامل بیماری‌زا را حذف کرده و در عین حال، فلور میکروبی مفید و غیربیماری‌زا که برای حفظ تعادل اکوسیستم‌های آبی ضروری هستند، حفظ نمود. برای مقابله با طیف گسترده‌تری از پاتوژن‌های احتمالی و کاهش خطر ایجاد مقاومت باکتریایی، می‌توان از کوکتل‌های فاژی^{۱۵} استفاده کرد. این کوکتل‌ها شامل ترکیبی از چندین فاز مختلف هستند که هر یک طیف میزبانی متفاوتی دارند و به این ترتیب، پوشش وسیع‌تری از سویه‌های باکتریایی هدف را تضمین می‌کنند و یک رویکرد چندوجهی برای کنترل پاتوژن‌ها ارائه می‌دهند. در مناطق و شرایطی که نگرانی‌هایی در مورد تشکیل محصولات جانبی ضدعفونی (DBPs) ناشی از کلرزنی (مانند تری‌هالومتان‌ها که می‌توانند سرطان‌زا باشند) وجود دارد، فازها می‌توانند به عنوان جایگزین اصلی یا مکملی قدرتمند برای ضدعفونی اولیه یا ثانویه آب آشامیدنی به کار روند. این امر نه تنها به کاهش بار شیمیایی آب کمک می‌کند، بلکه به ارائه آبی با کیفیت بالاتر و ایمن‌تر برای مصرف‌کنندگان منجر می‌شود (Jo و همکاران، ۲۰۲۳).

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

کاربرد دیگر فازها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب است که پتانسیل زیادی برای بهبود کارایی فرآیندها و کاهش خطرات زیست‌محیطی دارد. یکی از مهم‌ترین کاربردها، کاهش بار پاتوژنی در فاضلاب خروجی تصفیه‌خانه‌ها است (شکل ۳).

کاربردهای باکتریوفازها در تصفیه آب و فاضلاب

پتانسیل باکتریوفازها به دلیل ویژگی‌های بیولوژیکی بی‌نظیرشان، گستره وسیعی از کاربردها را در حوزه تصفیه آب و مدیریت میکروبیولوژیکی آن در بر می‌گیرد. این میکروارگانیسم‌های طبیعی، راه‌حل‌های نوآورانه‌ای را ارائه می‌دهند که می‌توانند کارایی، ایمنی و پایداری فرآیندهای موجود را به طرز چشمگیری افزایش دهند و به چالش‌های زیست‌محیطی و بهداشتی معاصر پاسخ دهند (Jo و همکاران، ۲۰۲۳).

تصفیه و ضدعفونی آب آشامیدنی

یکی از حیاتی‌ترین و مورد توجه‌ترین کاربردهای فازها، در حوزه تصفیه و ضدعفونی آب آشامیدنی است. هدف نهایی در این بخش، حذف یا غیرفعال کردن پاتوژن‌های باکتریایی (که می‌توانند منجر به بیماری‌های منتقله از آب شوند)، است. فازها به دلیل انحصاریافتگی بسیار بالای خود در هدف‌گیری، می‌توانند به طور دقیق و انتخابی بر علیه پاتوژن‌های خاصی مانند سویه‌های بیماری‌زا از اشریشیا کلی، گونه‌های سالمونلا و شیگلا (عوامل حصبه و اسهال خونی باکتریایی) و ویروس کلا (عامل وبا) و سودوموناس آئروژینوزا (عامل عفونت‌های فرصت‌طلب در افراد با سیستم ایمنی ضعیف) عمل کنند. این رویکرد هدفمند، مزیت قابل توجهی نسبت به کلرزنی یا سایر ضدعفونی‌کننده‌های شیمیایی دارد که بدون تمایز تمامی میکروارگانیسم‌ها را از بین می‌برند (Gao و همکاران، ۲۰۲۳).

فاضلاب‌ها، به ویژه فاضلاب‌های بیمارستانی و صنعتی، اغلب حاوی مقادیر بالایی از باکتری‌های بیماری‌زا و به طور فزاینده‌ای سوبیه‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک هستند. رهاسازی این فاضلاب‌های تصفیه‌نشده یا ناکافی تصفیه شده به محیط‌زیست، می‌تواند منجر به انتشار عوامل بیماری‌زا و ژن‌های مقاومت آنتی‌بیوتیکی به منابع آبی طبیعی، خاک و حتی آب‌های زیرزمینی شود. فاژها با لیز کردن انتخابی این باکتری‌های مضر، می‌توانند به طور مؤثری جمعیت آن‌ها را در فاضلاب خروجی کاهش داده و از انتشار آن‌ها به محیط‌زیست جلوگیری کنند. علاوه بر این، فاژها می‌توانند به بهبود عملکرد کلی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نیز کمک کنند (Withey و همکاران، ۲۰۰۵). به عنوان مثال، در فرآیند لجن فعال، مشکلاتی نظیر کف‌سازی (Foaming) (که ناشی از رشد بیش از حد برخی باکتری‌های رشته‌ای (مانند *Nocardia* spp.) و تشکیل بیوفیلم‌های سطحی است) و همچنین بالکینگ (Bulking) لجن (که به دلیل رشد بیش از حد باکتری‌های رشته‌ای و عدم ته‌نشینی مناسب لجن فعال ایجاد می‌شود و کارایی تصفیه را به شدت کاهش می‌دهد) رایج هستند. فاژهایی که باکتری‌های مسبب این مشکلات را هدف قرار می‌دهند، می‌توانند به کنترل انتخابی این جمعیت‌های میکروبی کمک کرده و پایداری و کارایی فرآیند تصفیه بیولوژیکی را افزایش دهند. این کاربردها به معنای تصفیه فاضلاب مؤثرتر، پایدارتر و با حداقل تأثیرات منفی بر محیط‌زیست است (Sam و همکاران، ۲۰۲۲).

یکی از معضلات مزمن و پرهزینه در زیرساخت‌های آبرسانی، تشکیل بیوفیلم در سیستم‌های توزیع آب است (شکل ۳). بیوفیلم‌ها، توده‌هایی از باکتری‌ها هستند که درون یک ماتریس پلیمری خارج سلولی (EPS) جاسازی شده و به سطوح داخلی لوله‌های آب، مخازن ذخیره، پمپ‌ها و سایر تجهیزات متصل می‌شوند. باکتری‌های محصور در این ماتریس، می‌توانند تا چندین صد برابر بیشتر از باکتری‌های آزاد (پلنکتونیک) در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها و ضدعفونی‌کننده‌های سنتی مقاومت نشان دهند (Erdei-Tombor و همکاران، ۲۰۲۴). این لایه‌های چسبنده نه تنها کیفیت آب را کاهش داده و منبع انتشار مداوم پاتوژن‌ها به جریان آب می‌شوند، بلکه می‌توانند باعث گرفتگی لوله‌ها، افزایش افت فشار، کاهش راندمان انتقال آب و حتی خوردگی بیولوژیکی (MIC) و کاهش طول عمر زیرساخت‌ها شوند. فاژها با توانایی منحصربه‌فرد خود در تولید آنزیم‌های دیپولیمراز، قادر به تجزیه این ماتریس خارج سلولی هستند (Waqas و همکاران، ۲۰۲۳). این تجزیه، به فاژها امکان می‌دهد تا به باکتری‌های محصور شده در عمق بیوفیلم دسترسی پیدا کرده و آن‌ها را لیز کنند. این قابلیت، فاژها را به ابزاری فوق‌العاده مؤثر برای پیشگیری از تشکیل بیوفیلم و حذف بیوفیلم‌های موجود در شبکه‌های آبرسانی تبدیل می‌کند. اعمال فاژها به صورت دوره‌ای یا پیوسته در سیستم‌های توزیع، می‌تواند به پاکسازی خطوط لوله، کاهش

هزینه‌های نگهداری و تعویض زیرساخت‌ها و تضمین ارائه آبی با کیفیت بالا و ایمن به مصرف‌کنندگان کمک کند. این رویکرد، به ویژه در نقاط کور سیستم‌های توزیع که کلر یا سایر ضدعفونی‌کننده‌ها به خوبی به آنجا نمی‌رسند، اهمیت بالایی دارد و می‌تواند به طور چشمگیری ایمنی و کارایی سیستم توزیع آب را ارتقا بخشد (Liu و همکاران، ۲۰۲۲).

صنایع غذایی و کشاورزی

علاوه بر این، کاربرد فاژها به تصفیه آب در صنایع غذایی و کشاورزی نیز گسترش یافته است. آب مورد استفاده در صنایع غذایی، از شستشوی مواد اولیه تا فرآوری و خنک‌سازی محصولات، می‌تواند منبع مهمی از آلودگی‌های باکتریایی باشد که منجر به فساد مواد غذایی، کاهش عمر مفید محصولات و شیوع بیماری‌های منتقله از غذا (مانند آلودگی با سالمونلا یا لیستریا) می‌شود. فاژها می‌توانند به طور مؤثر برای کاهش آلودگی باکتریایی در آب‌های فرآوری مواد غذایی به کار روند و ایمنی محصولات غذایی را به طور قابل توجهی افزایش دهند. به عنوان مثال، فاژهای اختصاصی برای پاتوژن‌های رایج مانند سالمونلا یا لیستریا مونوسایتوژنز می‌توانند به آب شستشوی محصولات کشاورزی (مانند میوه‌ها و سبزیجات) یا به آب مورد استفاده در فرآوری گوشت و مرغ اضافه شوند تا بار پاتوژنی روی سطوح کاهش یابد (Hong و همکاران، ۲۰۲۵). در بخش کشاورزی، تصفیه آب آبیاری با استفاده از فاژها می‌تواند به کاهش انتقال پاتوژن‌های گیاهی (که باعث بیماری‌های گیاهی می‌شوند) و سلامت و امنیت محصولات کشاورزی را تضمین می‌کند، بلکه خطر انتقال بیماری‌های مشترک بین انسان و حیوان را نیز کاهش می‌دهد. استفاده از فاژها در این بخش‌ها می‌تواند به کاهش وابستگی به آنتی‌بیوتیک‌ها و مواد شیمیایی در زنجیره غذایی کمک کند، که این خود یک گام مهم به سوی کشاورزی پایدارتر و ایمنی غذایی بیشتر است (Halawa، ۲۰۲۳).

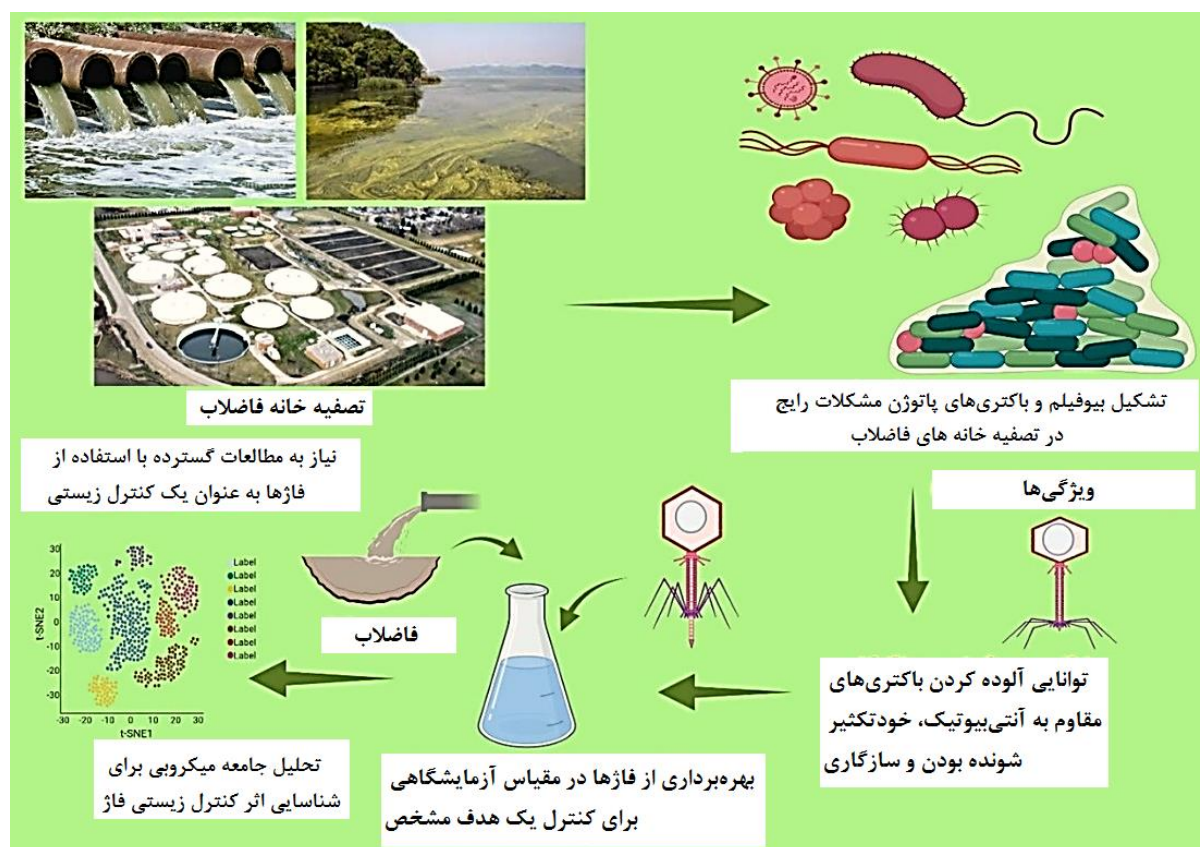
مدیریت آب‌های تفریحی و محیطی

فاژها پتانسیل خود را در مدیریت آب‌های تفریحی و محیطی نیز نشان می‌دهند. در مکان‌هایی مانند استخرها، پارک‌های آبی و دریاچه‌های شنا که تجمع افراد زیاد است، آلودگی باکتریایی می‌تواند خطرناک باشد و منجر به شیوع بیماری‌های پوستی، عفونت‌های چشمی و عفونت‌های گوارشی شود (Hassanein و همکاران، ۲۰۲۳). فاژها می‌توانند به عنوان یک روش مکمل برای حفظ کیفیت آب در این مکان‌ها، به ویژه در برابر باکتری‌هایی که به کلر مقاوم هستند یا در بیوفیلم‌ها پنهان شده‌اند (مثلاً *Pseudomonas aeruginosa* که در استخرها رایج است)، استفاده شوند. این امر به افزایش ایمنی عمومی و بهبود تجربه کاربری در محیط‌های تفریحی کمک می‌کند و یک لایه دفاعی اضافی در

برابر عوامل بیماری‌زا فراهم می‌آورد (Ballesté و همکاران، ۲۰۲۲).

در مجموع، کاربردهای فازها در تصفیه آب بسیار گسترده و متنوع است و قابلیت آن‌ها در ارائه راهکارهای هدفمند، خود-تکثیرشونده، ایمن و دوستدار محیط‌زیست، آن‌ها را به یک فناوری کلیدی و استراتژیک برای مقابله با چالش‌های

بهداشتی و زیست‌محیطی آب در قرن بیست و یکم تبدیل کرده است. این گستردگی کاربرد، نشان‌دهنده پتانسیل انقلابی فازها در ارتقاء سلامت عمومی و پایداری منابع آبی جهانی است و زمینه را برای تحقیقات و نوآوری‌های بیشتر در این حوزه فراهم می‌سازد (Jo و همکاران، ۲۰۲۳).



شکل ۳- کاربرد باکتریوفازها در تصفیه آب (Shivaram و همکاران، ۲۰۲۳)

چند دارویی و تشکیل بیوفیلیم است. فاز لیتیک جدا شده با موفقیت گونه‌های آئروموناس را در کشت خالص آلوده کرد و از نظر pH، دما و مواد شیمیایی سمی نسبتاً پایدار بود. برای تعیین تعداد مناسب فاز برای کشتن باکتری میزبان، نسبت فاز به میزبان ۱:۱۰۰ بررسی شد. میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که فازهای لیتیک رشد باکتری و تشکیل بیوفیلیم را کاهش می‌دهند. داده‌های حاصل از مطالعه نشان داد که فازهای لیتیک نسبت ARB جدا شده از ۶۵ به ۲۰ درصد در ۲۴ ساعت کاهش دادند. این مطالعه شواهدی برای کاربرد فازهای لیتیک برای کنترل ARB در فاضلاب تصفیه شده ارائه می‌دهد.

Azzam و همکاران (۲۰۲۴) مطالعه‌ای با هدف نشان دادن یک راه‌حل مقرون‌به‌صرفه، کارآمد و بدون مواد شیمیایی برای فرآیندهای سریع تصفیه فاضلاب انجام دادند. در این تحقیق، از آب نیل و حوضه آن برای جداسازی و شناسایی ۱۴۶ سویه احتمالی/شریشیا کلی استفاده شد. یافته‌ها نشان داد که ۷۴

تحقیقات موردی

در این بخش، گزارش‌هایی از تحقیقات موردی که با هدف بررسی کاربرد باکتریوفازها در تصفیه آب و فاضلاب انجام گرفته‌اند، مورد بحث قرار گرفته است.

بر طبق گزارش برخی از پژوهشگران، پساب تصفیه‌شده حاوی ARB در برخی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب دام به تصفیه‌خانه فاضلاب شهری بازگردانده می‌شود تا غلظت آمونیاک و فسفر باقیمانده کاهش یابد. Pallavali و همکاران (۲۰۲۳) دریافتند که فاز لیتیک جدا شده می‌تواند ARB جدا شده از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب دام را کاهش دهد و کنترل زیستی مبتنی بر فاز را در کشت‌های مخلوط اعمال کند. ARB و فازهای لیتیک از فاضلاب دام جدا شده و در یک راکتور ناپیوسته با کشت‌های متنوع استفاده شدند. در این مطالعه، باکتری جدا شده از گونه آئروموناس بود و در برابر آنتی‌بیوتیک‌های مختلف (پنی‌سیلین، تتراسایکلین، کولیستین و کانامایسین) مقاوم بود که نشان‌دهنده مقاومت

درصد از این سویه‌ها با استفاده از S-rDNA^{۱۶} تأیید شده‌اند. کلی‌فاژها، به‌ویژه سه فاژ جدید (MCn10/MCn11/MCn12)، در تمام مکان‌های نمونه‌برداری شده در آب نیز موجود بوده و یافت شدند که بالاترین سطح آنها در خروجی‌های حوضه بود. سیفویروس MCn10، میوایروس MCn11 و پودوویروس MCn12 که با استفاده از آنالیز مورفولوژیکی و مولکولی شناسایی شده‌اند، اندازه‌های متفاوتی را نشان دادند. این فاژها توانایی قابل توجهی در مهار رشد هفت سویه باکتریایی متنوع در شرایط خنثی نشان دادند که بیانگر چند ظرفیتی بودن آنها است. راندامان حذف جمعیت اشریشیا کلی به ۹۵٪ رسید، در حالی که برای سیتروباکتر فروندی ۹۱٪، پروتئوس ولگاریس ۷۳٪، سالمونلا ۹۸٪، سودوموناس آئروژینوزا ۵۰٪، سودوموناس فلورسنس ۸۰٪ و انتروکوکوس فکالیس ۹۶٪ بود. با کاربرد فاژهای مذکور، کیفیت فاضلاب تصفیه شده به تدریج افزایش یافت و پس از ۱۲ ساعت به اوج خود رسید که نشان دهنده بهبود تقریباً ۱۰۰٪ پس از شروع استفاده با مخلوط فاژ بود. تحقیق [Azzam و همکاران \(۲۰۲۴\)](#) اهمیت فاژهای چند ظرفیتی را نشان می‌دهد. این فناوری، یک پیشرفت نوآورانه در مدیریت استفاده مجدد از فاضلاب است و خطر نشت غیرمنتظره پاتوژن را کاهش می‌دهد که می‌تواند دستاوردهای اقتصادی قابل توجهی را به همراه داشته باشد. یکی از رویکردهای جدید، بررسی امکان استفاده از باکتریوفاژها برای حذف عوامل بیماری‌زا است. در پژوهش انجام‌شده توسط [Periasamy و Sundaram \(۲۰۱۳\)](#)، فاضلاب بیمارستانی از مکان‌های مختلف تامیل نادو (در کشور هند) جمع‌آوری و برای مطالعه استفاده شد. بر طبق نتایج این مطالعه، فراوانی بالایی از *E. coli* مقاوم به آنتی‌بیوتیک، *Streptococcus* sp. و *Pseudomonas* spp در همه مکان‌ها مشاهده شد که به وضوح میزان آلودگی را نشان می‌داد. همه نمونه‌ها فاژهای اختصاصی علیه *E. coli* داشتند و هیچ یک از نمونه‌ها فاژ علیه کشت MTCC نداشتند. فاژ اختصاصی *E. coli* جداسازی شد و جمعیت فاژ مورد نیاز برای کشتن مؤثر *E. coli* مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده حاکی از این بود که استفاده از فاژها منجر به حذف ۱۰۰٪ پاتوژن از آب فاضلاب در عرض ۱۴ ساعت انکوباسیون، شد. بر اساس یافته‌های [Kwiatek و همکاران \(۲۰۱۷\)](#)، سودوموناس آئروژینوزا اغلب به‌عنوان عامل عفونت‌های متنوع و بیماری‌های مزمن شناخته می‌شود. این باکتری بیوفیلم تشکیل می‌دهد و به طور طبیعی در برابر چندین آنتی‌بیوتیک مقاومت دارد. با توجه به دشواری‌های مرتبط با درمان عفونت‌های مزمن سودوموناس آئروژینوزا، باکتریوفاژها از جمله گزینه‌های درمانی جایگزین هستند که به طور فعال در حال تحقیق هستند. در مطالعه [Kwiatek و همکاران \(۲۰۱۷\)](#)، دو فاژ سودوموناس آئروژینوزا که الزاماً لیتیک هستند، vB_PaeM_MAG1 (MAG1) و vB_PaeP_MAG4 (MAG4)، جداسازی و مشخص شدند. این فاژها به ترتیب

متعلق به جنس PAK_P1likevirus از خانواده Myoviridae و جنس LIT1virus از خانواده Podoviridae بودند. آنها به سرعت توسط میزبان خود جذب شدند (حدود ۹۰٪ در ۵ دقیقه)، دوره نهفته کوتاهی (۱۵ دقیقه) داشتند و در طول نگهداری پایدار بودند. هر فاژ به صورت جداگانه تقریباً در ۵۰٪ از سویه‌های *P. aeruginosa* مورد آزمایش تکثیر شد، که وقتی فاژها در یک کوکتل ترکیب شدند، به ۷۳٪ افزایش یافت. اگرچه MAG4 پس از مدت کوتاهی از آزمایش، بیوفیلم را به طور مؤثرتری کاهش داد، اما MAG1 پس از مدت زمان طولانی‌تری مؤثرتر بود و کمتر برای جمعیت‌های مقاوم به فاژ انتخاب شد.

[Lin و همکاران \(۲۰۱۰\)](#) از فاژ phi AB2 که شبیه فاژهای مشابه phi KMV است و عضو جدیدی از خانواده Podoviridae *Acinetobacter baumannii* است، به‌منظور از بین بردن سویه باکتریایی استفاده کردند. بر طبق نتایج به‌دست آمده، این فاژ جذب سریع (بیش از ۹۹٪ جذب در ۸ دقیقه) و دوره نهفتگی کوتاهی (کمتر از ۱۰ دقیقه) نشان داد. علاوه بر این، قادر به آلوده کردن طیف وسیعی از سویه‌های *A. baumannii* بود و باعث لیز تقریباً کامل شد. این موضوع نشان می‌دهد phi AB2 می‌تواند کاندیدای خوبی به عنوان یک عامل درمانی/ضد عفونی‌کننده برای کنترل عفونت‌های بیمارستانی ناشی از سویه‌های باکتریایی مقاوم به دارو (MDRB) باشد.

در یک مطالعه تحقیقاتی که توسط تیمی از پژوهشگران ایرانی از جمله [Habibinava و همکاران \(۲۰۲۱\)](#) انجام شد، کاربرد باکتریوفاژها در تصفیه فاضلاب مورد بررسی قرار گرفت. این پژوهش با هدف جداسازی باکتریوفاژهای بومی از فاضلاب‌های بیمارستانی و شهری طراحی شد. محققان موفق به جداسازی سه گونه باکتریوفاژ لیتیک از نمونه‌های فاضلاب بیمارستانی شدند. این فاژها علیه باکتری‌های بیماری‌زای مقاوم به آنتی‌بیوتیک از جمله «کلیسیلا پنومونیه» و «انتروباکتر آئروژنز» مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج مطالعه نشان داد که فاژهای جداسازی شده توانایی تشکیل پلاک‌های شفاف و لیز کردن باکتری‌های هدف را دارند. آزمایش‌های کارایی مشخص کرد که این فاژها قادرند به طور موثری جمعیت باکتری‌های مقاوم در محیط فاضلاب را کاهش دهند. پژوهشگران همچنین به بررسی پایداری فاژها در شرایط مختلف محیطی پرداختند. یافته‌ها حاکی از آن بود که فاژهای جداسازی شده کاندیدای مناسبی برای کاربرد در فاژدرمانی و سیستم‌های تصفیه فاضلاب هستند. این مطالعه نتیجه گرفت که استفاده از باکتریوفاژها می‌تواند راهکار امیدبخشی برای حذف باکتری‌های مقاوم از فاضلاب باشد. با این حال، پژوهشگران انجام مطالعات بیشتر برای بهینه‌سازی شرایط عملیاتی را ضروری دانستند.

به‌طور کلی، بسیاری از تحقیقات کاربردهای امیدوارکننده‌ای برای کنترل زیستی مبتنی بر فاژ ذکر کردند و بیان داشتند که استفاده از این روش موجب کاهش تکثیر سویه‌های مقاوم به

آنتی بیوتیک در سیستم‌های تصفیه فاضلاب می‌شود. همچنین، برخی از تحقیقات از جمله [Mathieu و همکاران \(۲۰۱۹\)](#) بیان داشتند که فازها می‌توانند شکوفایی سیانوباکتری‌های مضر را که منبع تولید سموم خطرناک در منابع آبی هستند، را کاهش دهند و به عنوان جایگزینی برای استفاده پیشگیرانه از آنتی بیوتیک‌ها و زیست‌کش‌ها در تصفیه فاضلاب عمل نمایند.

عوامل موثر بر تعاملات بین فاز-میزبان

جذب فازها به میزبان تحت تاثیر عوامل مختلفی قرار دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به شرایط عملیاتی، نوع فاز، محیط فاضلاب و شرایط محیطی اشاره کرد. بنابراین، توسعه تعاملات فاز-میزبان بر میزان عملکرد و کارایی تصفیه بیولوژیکی تأثیر می‌گذارد.

تراکم باکتریایی بسیار بالا در لجن فعال، با بیش از 10^8 سلول در میلی‌لیتر، بستر اصلی را برای انتشار فازها فراهم می‌کند. این تراکم، موانع انتشار را کاهش داده و امکان برخورد کارآمد ویروس با میزبان را افزایش می‌دهد. تنوع گسترده باکتری‌ها از جمله سودوموناس و نیترو فایرها، متناظر با گوناگونی فراوان فازهای تخصص‌محور است ([Runa و همکاران، ۲۰۲۱](#)). از سوی دیگر، حالت فیزیولوژیکی باکتری به شدت بر نتیجه تعامل تأثیرگذار است. باکتری‌هایی که در مناطق هوازی به سرعت تقسیم می‌شوند، به دلیل متابولیسم فعال، هدف آسانی برای فازها هستند ([Hakansson و همکاران، ۲۰۱۸](#)). در مقابل، باکتری‌های راکد در مناطق کم‌غذا یا بی‌هوازی ممکن است با محدود کردن فعالیت آنزیمی مورد نیاز فاز، در برابر عفونت مقاومت کنند. شرایط استرس‌زایی مانند شوک غذایی می‌تواند پاسخ SOS باکتری (یک پاسخ سراسری به آسیب DNA است که منجر به افزایش بیان ژن‌های دخیل در ترمیم DNA و بقای سلول باکتریایی می‌شود) را فعال کرده و با القاء فازهای نهفته، به طور ناگهانی جمعیت فازهای آزاد را افزایش دهد. بنابراین، چرخه‌های رشد باکتری و شرایط متابولیکی آن، پویایی اصلی تعامل فاز-میزبان را شکل می‌دهد ([Dawan و Ahn، ۲۰۲۲](#)).

پارامترهای محیطی مانند pH، دما و اکسیژن محلول به طور مستقیم بر پایداری ذرات فاز و قابلیت عفونت‌زایی آن‌ها حکمرانی می‌کنند. [Brown و همکاران \(۲۰۱۹\)](#) نشان دادند که تعداد ویروس‌ها به طور قابل توجهی تحت تأثیر pH و یون‌های منیزیم قرار دارند که بر جذب فازها به میزبان تأثیر می‌گذارند. در تایید این موضوع، [Sadeghi و همکاران \(۲۰۱۱\)](#) نیز اظهار داشتند که جذب فاز توسط محیط یونی نمونه کنترل می‌شود و بنابراین، واجد آن می‌تواند با تغییر pH و قدرت یونی القا شود. بر طبق نظر [Hoyles و همکاران \(۲۰۱۴\)](#)، این تغییر را می‌توان با استفاده از محلول‌های بافر یا سورفکتانت‌ها، که گاهی اوقات با تصفیه فیزیکی ترکیب می‌شوند، ایجاد کرد.

بر طبق تحقیقات انجام شده، دمای مطلوب در تصفیه‌خانه‌های بی‌هوازی مزوفیل (۲۰-۳۰ درجه سانتی‌گراد)، هم‌زمان سینتیک رشد باکتری و تکثیر فاز را بهینه می‌سازد ([Candel و همکاران، ۲۰۲۵](#)). اکسیژن محلول نیز جامعه باکتریایی فعال را تعیین کرده و بر توزیع فازهای هوازی یا بی‌هوازی تخصص تأثیر می‌گذارد. از طرفی نوع مواد مغذی موجود، ساختار جامعه میزبان و در نتیجه جامعه فاز را پایه‌ریزی می‌کند. محیط‌های غنی از کربن، باکتری‌های هتروتروف سریع‌الرشد را حمایت کرده که هدف ایده‌آلی برای فازهای دارای چرخه لیتیک کوتاه هستند ([Spietz و همکاران، ۲۰۱۵](#)). محدودیت مواد مغذی مانند فسفر یا نیتروژن می‌تواند پاسخ استرس در باکتری را القاء کرده و با تغییر گیرنده‌های سطح سلول، از کارایی اتصال فاز بکاهد ([Pourtois و همکاران، ۲۰۲۰](#)).

پارامترهای کلیدی بهره‌برداری مانند زمان ماند هیدرولیکی^{۱۶} (HRT) و زمان ماند جامدات^{۱۷} (SRT) چارچوب زمانی کلی برای تمام تعاملات بیولوژیکی تعیین می‌کنند. SRT طولانی، که برای غنی‌سازی باکتری‌های کندرشد مانند نیترو فایرها استفاده می‌شود، اجازه تجمع تدریجی جمعیت فازها و پیدایش تعاملات پیچیده تکاملی را می‌دهد ([Kawan و همکاران، ۲۰۲۲](#)). در مقابل، HRT کوتاه می‌تواند فازهای آزاد را پیش از اتصال به میزبان از سیستم خارج کند، اما هم‌زمان زمان تولید مثل باکتری‌ها را نیز محدود می‌سازد ([Huang و همکاران، ۲۰۱۱](#); [Ahn و Hasan، ۲۰۲۲](#)). جدایی عملیاتی بین HRT و SRT در سیستم‌های مدرن، فشار انتخاب‌گری متمایزی ایجاد می‌کند؛ به‌طوری‌که فازهایی با نرخ اتصال بسیار بالا در محفظه‌های با HRT کوتاه موفق‌تر هستند؛ این در حالی است که فازهای معتدل (تمپر) که می‌توانند در ژنوم میزبان ادغام شوند، قادر هستند در هاضم‌هایی با SRT طولانی غلبه یابند ([Huang و همکاران، ۲۰۱۱](#)). این پارامترهای عملیاتی اساساً سرعت چرخه‌های هم‌تکاملی را تنظیم کرده و تعیین می‌کنند که کدام استراتژی فاز (لیتیک سریع در مقابل نهفتگی پایدار) در طول زمان، مزیت رقابتی پیدا خواهد کرد. بنابراین، مدیریت تصفیه‌خانه به طور غیرمستقیم و قدرتمندی سیر روابط فاز-میزبان را هدایت می‌نماید ([Borin و همکاران، ۲۰۲۱](#)).

چالش‌ها و محدودیت‌ها در کاربرد باکتریوفازها در تصفیه آب

با وجود پتانسیل چشمگیر و مزایای فراوانی که باکتریوفازها در تصفیه آب ارائه می‌دهند، مسیر تجاری‌سازی و کاربرد گسترده آن‌ها در مقیاس صنعتی بدون چالش نیست. برای اینکه فازدرمانی به یک روش استاندارد و عملی در سیستم‌های تصفیه آب تبدیل شود، لازم است محدودیت‌های کنونی به دقت شناسایی و راهکارهای مؤثری برای غلبه بر آن‌ها توسعه یابد. نادیده گرفتن این موانع

می‌تواند منجر به ناکارآمدی، هزینه‌های بالا و عدم پذیرش عمومی این فناوری نویدبخش شود (Palma و Qi، ۲۰۲۴).

یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها، پارادوکس ناشی از همان مزیت برجسته فازها یعنی انحصاریافتگی و اختصاصی بودن بالایی آن‌هاست. اگرچه اختصاصیت فازها در هدف‌گیری دقیق پاتوژن‌ها بدون آسیب رساندن به میکروارگانیسم‌های مفید یک مزیت بزرگ محسوب می‌شود، اما در عین حال می‌تواند در سناریوهای عملی به یک محدودیت تبدیل شود. در یک منبع آب یا جریان فاضلاب واقعی، ممکن است طیف وسیعی از سویه‌های باکتریایی بیماری‌زا، حتی درون یک گونه واحد (برای مثال، سویه‌های مختلف *E. coli*)، وجود داشته باشد که همگی نیاز به حذف مؤثر دارند. یافتن یک فاز واحد که قادر به لیز کردن تمامی سویه‌های یک گونه باکتریایی، یا تمامی گونه‌های پاتوژن موجود در آب باشد، عملاً غیرممکن است (Zalewska-Piątek، ۲۰۲۳). این بدان معناست که برای دستیابی به پوشش میکروبی گسترده و تضمین کارایی در برابر تنوع بیولوژیکی موجود در محیط‌های آبی پیچیده، نیاز به استفاده از کوکتل‌های فازی حاوی چندین فاز مختلف با طیف میزبانی متفاوت است. اما این رویکرد نیز چالش‌های خاص خود را دارد: شناسایی، جداسازی، خالص‌سازی، خصوصیت‌دهی و تولید انبوه این تعداد از فازها برای پوشش همه پاتوژن‌های احتمالی که می‌تواند فرآیندی بسیار پیچیده، زمان‌بر، فنی و پرهزینه باشد. علاوه بر این، لازم است ایمنی و اثربخشی هر جزء از کوکتل و همچنین هرگونه اثر متقابل (هم‌افزایی یا رقابت) بین فازهای مختلف در کوکتل، به دقت ارزیابی شود که نیازمند تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی گسترده‌ای است (Hunter-Cevera و همکاران، ۲۰۰۵).

چالش مهم دیگر، مقاومت باکتریایی به فازها است. همانند آنتی‌بیوتیک‌ها، باکتری‌ها نیز توانایی تکامل سازوکارهای دفاعی و مقاومتی در برابر حملات فازها را دارند. این سازوکارها بسیار متنوع هستند؛ شامل: ۱. تغییر در ساختار یا از دست دادن گیرنده‌های سطحی باکتری (که فاز برای اتصال به آن‌ها نیاز دارد)، ۲. تولید آنزیم‌هایی برای تجزیه ماده ژنتیکی فاز پس از ورود به سلول (مانند سیستم‌های محدودکننده-اصلاح‌کننده)، ۳. فعال‌سازی سیستم‌های دفاعی نوظهور و بسیار کارآمدی مانند CRISPR-Cas که ژنوم فاز را هدف قرار داده و به طور دقیق غیرفعال می‌کند، یا حتی توانایی باکتری برای وارد شدن به فازهای غیرفعال متابولیکی (مانند حالت VBNC: Non-Culturable But Viable) که در آن، فازها قادر به تکثیر و لیز باکتری نیستند. (Ahn و Hasan، ۲۰۲۲).

این پدیده مقاومت می‌تواند کارایی فازدرمانی را به مرور زمان کاهش داده و نیاز به تجدید نظر در استراتژی‌های درمانی را ایجاد کند. برای غلبه بر این چالش، نیاز به استراتژی‌های پیشگیرانه و تطبیقی است؛ از جمله استفاده هوشمندانه از کوکتل‌های فازی با فازهایی که سازوکارهای حمله متفاوتی دارند و به گیرنده‌های مختلفی متصل می‌شوند، تا احتمال توسعه مقاومت همزمان به همه آن‌ها

کمتر شود. همچنین، پایش مداوم جمعیت‌های باکتریایی برای شناسایی سویه‌های مقاوم و جداسازی و استفاده از فازهای جدید که به طور مداوم از محیط جداسازی می‌شوند و طیف میزبانی گسترده‌تر و توانایی مقابله با مقاومت‌های نوظهور را دارند، ضروری خواهد بود. چرخش منظم فازها در یک سیستم کاربردی بزرگ نیز می‌تواند به حفظ کارایی در بلندمدت کمک کند (Lin و همکاران، ۲۰۱۷).

پایداری و نگهداری فازها در شرایط محیطی مختلف نیز یک محدودیت عملی مهم محسوب می‌شود. اگرچه بسیاری از فازها نسبت به تغییرات جزئی pH و دما مقاومت نسبی دارند، اما عوامل محیطی شدیدتر می‌توانند فازها را به سرعت غیرفعال کنند. به عنوان مثال، اشعه فرابنفش (UV) که خود یک روش رایج و مؤثر ضدعفونی در تصفیه آب است، به شدت به فازها آسیب می‌رساند و آن‌ها را غیرفعال می‌کند (Wdowiak و همکاران، ۲۰۲۲). غلظت بالای مواد شیمیایی اکسیدکننده (مانند کلر باقیمانده با دوز بالا) و حتی برخی از یون‌های فلزی سنگین نیز می‌توانند بر پایداری فازها تأثیر منفی بگذارند. برای ذخیره‌سازی طولانی‌مدت، حمل و نقل کارآمد و کاربرد مؤثر فازها در مقیاس صنعتی، نیاز مبرمی به توسعه فرمولاسیون‌های پایدار و محافظت‌کننده است که پایداری آن‌ها را در طولانی مدت، حتی در شرایط نامساعد محیطی، حفظ کند. این فرمولاسیون‌ها می‌توانند شامل روش‌هایی مانند خشک کردن انجمادی (Freeze-drying) برای ایجاد پودرهای فازی با عمر مفید طولانی، کپسوله‌سازی (Encapsulation) فازها در پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر برای آزادسازی کنترل‌شده و محافظت در برابر عوامل محیطی، یا استفاده از مواد نگهدارنده و تثبیت‌کننده مناسب باشند. بدون فرمولاسیون‌های پایدار و مقرون‌به‌صرفه، کارایی و هزینه‌اثربخشی فازدرمانی در مقیاس بزرگ کاهش خواهد یافت و مانعی جدی بر سر راه پذیرش گسترده آن خواهد بود (Bule Možar و همکاران، ۲۰۲۳).

تولید انبوه و هزینه‌های اولیه نیز از چالش‌های اقتصادی مهم هستند. تولید فازها در مقیاس صنعتی و با استانداردهای کیفی بالا (مانند خلوص از ناخالصی‌ها و عاری بودن از اندوتوکسین‌ها برای کاربردهای انسانی یا محیطی حساس) نیاز به فناوری‌های پیشرفته تخمیر باکتری میزبان و سپس خالص‌سازی فاز از محیط کشت دارد. تضمین کیفیت ثابت محصول در حجم‌های بالا، کاهش هزینه‌های تولید در عین حفظ کارایی و ایمنی و ایجاد زنجیره تأمین پایدار، از مسائل کلیدی است که برای تجاری‌سازی گسترده فازها باید حل شود. اگرچه در بلندمدت، قابلیت خودتکثیری فازها می‌تواند به کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک کند و آن‌ها را از نظر اقتصادی رقابتی سازد، اما هزینه‌های اولیه تحقیق، توسعه و ایجاد زیرساخت‌های تولید در مقیاس بزرگ می‌تواند بالا باشد و نیاز به سرمایه‌گذاری قابل توجهی دارد (Kamiński و Paczesny، ۲۰۲۴).

روش‌های تشخیص سریع کنونی ممکن است به اندازه کافی سریع و جامع نباشند تا امکان پاسخ فوری با فائدرمانی را فراهم آورند. توسعه فناوری‌های تشخیص سریع و نقطه‌ای (Point-of-Care) برای پاتوژن‌های آبی، که بتوانند در زمان واقعی اطلاعات دقیق را ارائه دهند، می‌تواند کارایی و زمان پاسخ‌دهی فائدرمانی را به طور چشمگیری افزایش دهد (Zalewska-Piątek و همکاران، ۲۰۲۳). با وجود این چالش‌ها، جامعه علمی و صنعتی در سراسر جهان به طور فعال در حال کار بر روی راهکارهایی برای غلبه بر آن‌ها هستند. پیشرفت‌ها در زمینه مهندسی ژنتیک فائدها، توسعه فرمولاسیون‌های پایدارتر و تلاش‌های بین‌المللی برای مقررات‌گذاری، مسیر را برای کاربرد گسترده‌تر این فناوری امیدوارکننده در آینده تصفیه آب هموار خواهد کرد.

مقایسه باکتریوفائدها با روش‌های سنتی ضد عفونی آب

مقایسه‌ای جامع و ساختاریافته بین روش‌های سنتی ضد عفونی آب و روش نوین استفاده از باکتریوفائدها (فائدها) در جدول (۱) ارائه شده است. مزایا، معایب و کاربردهای هر روش به طور مستقیم در این جدول مقایسه شده است. بر طبق نتایج، روش‌های سنتی (به ویژه کلرزنی) به دلیل سادگی، هزینه کم و اثر باقیمانده، ستون فقرات سیستم‌های تصفیه آب در مقیاس بزرگ هستند. با این حال، نگرانی‌ها درباره محصولات جانبی مضر و اثرات زیست‌محیطی آن‌ها رو به افزایش است. از طرفی فائدرایی یک فناوری سبز، هدفمند و بسیار اختصاصی است که پتانسیل فوق‌العاده‌ای برای حل چالش‌های خاص مانند مبارزه با بیوفیلم‌های مقاوم و باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک، بدون عوارض جانبی روش‌های شیمیایی دارد. بررسی مجموع این یافته‌ها حاکی از این است که به احتمال زیاد، آینده ضد عفونی آب نه در جایگزینی کامل روش‌های سنتی، بلکه در ادغام هوشمندانه آن‌ها است. برای مثال، استفاده از یک روش سنتی (مانند UV یا کلرزنی ملایم) برای کنترل کلی میکروارگانیسم‌ها، در کنار به کارگیری کوکتل‌های فائدها اختصاصی برای هدف قرار دادن پاتوژن‌ها یا بیوفیلم‌های سرسخت، می‌تواند یک راهکار بهینه و پایدار باشد.

یکی دیگر از موانع مهم، فقدان یا ناکافی بودن قوانین و مقررات مرتبط با استفاده از فائدهاست. از آنجایی که فائدرمانی در تصفیه آب یک حوزه نسبتاً جدید و در حال توسعه است، چارچوب‌های قانونی مشخصی برای تولید، ارزیابی ایمنی و کاربرد آن‌ها در بسیاری از کشورها وجود ندارد. نهادهای نظارتی بهداشتی و محیط‌زیستی نیاز به تدوین دستورالعمل‌های روشنی برای اطمینان از ایمنی فائدها برای انسان و محیط‌زیست دارند (Zalewska-Piątek و همکاران، ۲۰۲۳). مسائلی مانند حداقل دوز مؤثر، حداکثر غلظت مجاز فائدها در آب تصفیه شده، روش‌های استاندارد ارزیابی خطر برای جلوگیری از انتقال ژن‌های مقاومت آنتی‌بیوتیکی یا سایر ژن‌های نامطلوب از طریق فائدهای لیزوژنیک (که باید به دقت حذف شوند) و روش‌های پایش و کنترل کیفیت دقیق، باید به سرعت مطالعه، بررسی و تدوین شوند. بدون یک چارچوب نظارتی شفاف و مورد قبول جهانی، پذیرش عمومی و تجاری‌سازی فائدها با کندی روبرو خواهد شد و سرمایه‌گذاری در این حوزه با تردید همراه خواهد بود (Nilsson، ۲۰۱۹؛ Zalewska-Piątek و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، تأثیر بلندمدت بر اکوسیستم‌های آبی نیازمند مطالعات دقیق‌تر است. اگرچه فائدها به طور طبیعی در محیط‌زیست یافت می‌شوند و اختصاصی عمل می‌کنند، اما معرفی مقادیر زیادی از فائدهای خاص (به ویژه فائدهای مهندسی شده) به یک اکوسیستم آبی ممکن است تأثیرات ناشناخته‌ای بر پویایی جمعیت‌های میکروبی محلی، چرخه‌های بیوژئوشیمیایی (مانند چرخه‌های نیتروژن یا فسفر)، یا سایر گونه‌های زیستی داشته باشد. نیاز به تحقیقات جامع برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی بلندمدت استفاده از فائدها در مقیاس بزرگ برای تصفیه آب وجود دارد تا از هرگونه پیامد منفی ناخواسته جلوگیری شود و از سلامت اکوسیستم‌ها اطمینان حاصل گردد (Naureen و همکاران، ۲۰۲۰).

در نهایت، نیاز به تشخیص و شناسایی سریع پاتوژن‌ها نیز یک چالش عملی است. برای اعمال فائدرمانی هدفمند، لازم است که باکتری‌های بیماری‌زا موجود در آب به سرعت و با دقت شناسایی شوند تا بتوان فائدهای مناسب را از کوکتل‌های موجود انتخاب و اعمال کرد. در شرایط اضطراری یا آلودگی‌های ناگهانی گسترده، زمان اهمیت بالایی دارد و

جدول ۱- مقایسه بین روش‌های مختلف ضد عفونی و کنترل میکروبی آب (Ragab و همکاران، ۲۰۲۴)

معیار مقایسه	روش نوین: فائترایی	روش‌های سنتی (شیمیایی/ فیزیکی)
نمونه‌های رایج	استفاده از ویروس‌های اختصاصی برای آلوده کردن و از بین بردن باکتری‌های هدف	کلر زنی، ازون زنی، پرتو فرابنفش (UV)، استفاده از نانوذرات (مثل نانوذرات نقره)
سازوکار عمل	اتصال اختصاصی به باکتری میزبان، تزریق DNA، تکثیر درون باکتری و لیز (تخریب باکتری و آزادسازی فائزهای جدید).	کلر/ازون: اکسیداسیون و تخریب دیواره سلولی. UV: آسیب به DNA و جلوگیری از تکثیر. نانوذرات: اختلال در غشای سلولی، تولید رادیکال‌های آزاد.
طیف اثر	طیف بسیار محدود و اختصاصی: معمولاً فقط یک گونه خاصی از باکتری را هدف قرار می‌دهند.	طیف گسترده (Broad-Spectrum): طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها (باکتری‌ها، ویروس‌ها، پروتوزوئاها) را از بین می‌برند.
مزایای کلیدی	۱. اختصاصی بودن بالا: به میکروبیوم مفید و فلور طبیعی آسیب نمی‌زنند. ۲. خودتکثیرشونده: در حضور باکتری هدف تکثیر می‌شوند. ۳. بی‌خطر برای انسان، جانوران و گیاهان. ۴. عدم ایجاد محصولات جانبی مضر (DBPs) ۵. موثر در برابر باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک.	۱. کارایی اثبات شده و سریع ۲. ارزان و اجرای آسان (به ویژه کلر) ۳. اثر باقیمانده (در مورد کلر) برای محافظت در شبکه توزیع ۴. فناوری شناخته شده و در دسترس
معایب و چالش‌ها	۱. اختصاصی بودن بالا: نیاز به شناسایی دقیق پاتوژن هدف دارد؛ روی میکروب‌های مختلط کم اثر است. ۲. امکان توسعه مقاومت باکتریایی در برابر فائز (که با استفاده از "کوکتل فازی" قابل مدیریت است). ۳. فقدان اثر باقی‌مانده شیمیایی در سیستم. ۴. تأثیرپذیری از شرایط محیطی (دما، pH، ذرات معلق). ۵. مقررات و چارچوب‌های قانونی ناشناخته یا در حال توسعه.	۱. تولید محصولات جانبی ضد عفونی (DBPs) مانند تری هالومتان‌ها (در مورد کلر) که می‌توانند سرطان‌زا باشند. ۲. آسیب به میکروبیوم غیرهدف و محیط زیست. ۳. امکان ایجاد مقاومت میکروبی در درازمدت. ۴. عدم اثر باقیمانده (در مورد UV). ۵. خوردگی تجهیزات (در مورد کلر). ۶. هزینه بالای راه‌اندازی (در مورد ازون و UV).
کاربردهای عملی در صنعت آب	بیوفیل‌زدایی (Biofilm Removal): حذف بیوفیل‌ها از سطوح لوله‌ها و مخازون. کنترل باکتری‌های بیماری‌زا؛ مانند <i>لژیونلا</i> در سیستم‌های خنک‌کننده. پایش پاتوژن‌ها (Phage Typing): استفاده به عنوان شاخص زیستی برای شناسایی آلودگی باکتریایی خاص.	کلر: ضد عفونی رایج در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب. UV: در سیستم‌های کوچک، بیمارستانی و به عنوان مکمل. ازون: اکسیداسیون پیشرفته و رنگ‌بری. نانوذرات: در فیلترها و سطوح ضد میکروبی.
ملاحظات اقتصادی	هزینه تحقیق و توسعه و تولید اولیه بالا، اما به دلیل خودتکثیری، ممکن است در مقیاس بزرگ مقرون به صرفه شود.	کلر: بسیار مقرون به صرفه. UV / ازون: هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا، اما هزینه عملیاتی متغیر.
اثر بر محیط زیست	کاملاً زیست تخریب پذیر و طبیعی هستند و به عنوان بخشی از اکوسیستم میکروبی محسوب می‌شوند.	می‌توانند برای آبزیان سمی باشند و تعادل اکوسیستم‌های آبی را برهم بزنند.

چشم‌انداز و تحقیقات پیش رو در کاربرد باکتریوفائزها در تصفیه آب

با وجود چالش‌هایی که در مسیر کاربرد گسترده باکتریوفائزها در تصفیه آب وجود دارد، چشم‌انداز آینده این فناوری بسیار امیدوارکننده به نظر می‌رسد. پیشرفت‌های اخیر در بیوتکنولوژی، زیست‌شناسی مولکولی و مهندسی ژنتیک، در

حال هموار کردن راه برای غلبه بر بسیاری از محدودیت‌های کنونی هستند و پتانسیل فائدرمانی را به سطحی بی‌سابقه ارتقا می‌دهند. تمرکز تحقیقات آتی بر توسعه راه‌حل‌های نوآورانه و جامع است که کارایی، ایمنی و مقرون به صرفه بودن فائزها را در محیط‌های آبی تضمین می‌کند و آن‌ها را به ابزاری

کلیدی در مدیریت منابع آبی تبدیل می‌سازد (Zalewska-Piatek و همکاران، ۲۰۲۳).

یکی از زمینه‌های کلیدی و حیاتی برای پیشرفت، تأسیس و توسعه بانک‌های فاز جامع و پایگاه‌های داده ژنومی دقیق است. شناسایی، جداسازی و خصوصیت‌دهی فازهای جدید از محیط‌های طبیعی متنوع (مانند فاضلاب، خاک، رودخانه‌ها، آب‌های دریا و حتی محیط‌های پاتوژن خیز نظیر بیمارستان‌ها) برای غلبه بر چالش انحصاریافتگی بالا و مقاومت باکتریایی حیاتی است. ایجاد این بانک‌های اطلاعاتی غنی، به محققان امکان می‌دهد تا به مجموعه‌ای گسترده از فازها با طیف میزبانی متنوع و ویژگی‌های مطلوب (مانند توانایی بالا در لیز کردن بیوفیلیم‌ها، پایداری در برابر شرایط محیطی سخت و سرعت بالای تکثیر) دسترسی داشته باشند (Cui و همکاران، ۲۰۲۴). همراه با این، تعیین توالی ژنومی (Sequencing Genomic) و تحلیل دقیق ژنوم فازهای جدید، برای اطمینان از ایمنی آن‌ها (عدم وجود ژن‌های مقاومت آنتی‌بیوتیکی، ژن‌های توکسین‌زا، یا ژن‌های مرتبط با چرخه لیزوژنیک) و درک بهتر سازوکارهای عملکردی‌شان ضروری است. این رویکرد در شناسایی و طبقه‌بندی فازها، پایه و اساس توسعه کوکتل‌های فازای ایمن، کارآمد و هدفمند را فراهم می‌آورد و تضمین می‌کند که تنها فازهای لیتیک و بی‌خطر به سیستم‌های آبی معرفی می‌شوند (Klumpp و همکاران، ۲۰۱۲).

مهندسی ژنتیک فازها به‌عنوان یک ابزار قدرتمند، پتانسیل عظیمی برای بهینه‌سازی و بهبود ویژگی‌های فازها برای کاربردهای تصفیه آب دارد. با استفاده از روش‌های پیشرفته مهندسی ژنتیک، می‌توان فازها را به گونه‌ای دقیق اصلاح کرد که خصوصیات هدفمندی را از خود نشان دهند. برای مثال، می‌توان فازها را مهندسی کرد تا طیف میزبانی گسترده‌تری داشته باشند (تولید فازهای پلی‌والانت) و بتوانند چندین گونه یا سویه باکتریایی را به طور همزمان هدف قرار دهند، که این امر پیچیدگی فرمولاسیون در کوکتل‌های فازای را کاهش می‌دهد. همچنین، می‌توان ژن‌هایی را به ژنوم فازها اضافه کرد یا آن‌ها را اصلاح نمود که مقاومت فازها را در برابر عوامل محیطی مخرب مانند اشعه UV، دماهای بالا یا غلظت‌های مشخص کلر افزایش دهند، که این امر پایداری آن‌ها را در سیستم‌های تصفیه آب واقعی بهبود می‌بخشد (Jia و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، مهندسی ژنتیک می‌تواند برای تقویت توانایی فازها در تجزیه ماتریس بیوفیلیم از طریق بیان بیشتر آنزیم‌های دیپلمراز^{۱۸} یا حتی حذف ژن‌های لیزوژنیک از فازهای معتدل به کار رود تا اطمینان حاصل شود که آن‌ها تنها چرخه لیتیک را دنبال می‌کنند و هیچ ژن ناخواسته‌ای را به باکتری میزبان منتقل نمی‌کنند. این پیشرفت‌ها، فازهایی با عملکرد بهینه‌تر، ایمنی بالاتر و کارایی بیشتر را در اختیار قرار می‌دهند (Bleriot و همکاران، ۲۰۲۴).

ترکیب فازدرمانی با روش‌های سنتی تصفیه آب یک رویکرد هم‌افزایی (Synergistic) و بسیار امیدوارکننده است که

می‌تواند محدودیت‌های هر دو روش را پوشش دهد. به جای جایگزینی کامل روش‌های موجود، فازها می‌توانند به عنوان یک مکمل قدرتمند عمل کنند. به عنوان مثال، فازها می‌توانند برای پیش‌تصفیه آب آلوده به کار روند تا بار باکتریایی را به میزان قابل توجهی کاهش دهند، سپس آب از طریق فرآیندهای فیزیکی (مانند غشاهای اولترافیلتراسیون یا نانوفیلتراسیون) عبور داده شود تا فازهای آزاد و بقایای باکتریایی از آب حذف شوند و آب خروجی با بالاترین کیفیت ممکن حاصل شود (Liu و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین، می‌توان از فازها در کنار دوزهای کمتر کلر یا ازون استفاده کرد تا به کارایی ضدعفونی بالاتری دست یافت و در عین حال تولید محصولات جانبی مضر ضدعفونی (DBPs) را به حداقل رساند. این "رویکرد ترکیبی" (Approach Hybrid) می‌تواند نه تنها اثربخشی را افزایش دهد، بلکه هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی را نیز کاهش دهد. استفاده از فازها در مراحل قبل از کلرزنی به دلیل از بین بردن باکتری‌ها، می‌تواند منجر به کاهش نیاز به دوزهای بالای کلر و در نتیجه، کاهش مقاومت باکتری‌ها به کلر در بلندمدت شود، که هم از نظر زیست‌محیطی و هم از نظر بهداشتی مطلوب است (Gao و همکاران، ۲۰۲۵).

توسعه سیستم‌های تحویل فاز هوشمند و کنترل‌شده نیز برای کاربرد مؤثر آن‌ها در مقیاس بزرگ و در شرایط عملیاتی متنوع حیاتی است. این سیستم‌ها می‌توانند شامل کپسوله‌سازی (Encapsulation) فازها در نانوذرات یا میکروکپسول‌های زیست‌تخریب‌پذیر باشند. این کپسول‌ها فازها را در برابر تخریب ناشی از عوامل محیطی مانند اشعه UV، تغییرات pH یا مواد شیمیایی محافظت می‌کنند و امکان آزادسازی کنترل‌شده و پایداری آن‌ها را در طول زمان و در نقطه مورد نظر فراهم می‌آورند (Venkataraman و همکاران، ۲۰۲۵). این امر می‌تواند عمر مفید فازها را در سیستم‌های تصفیه افزایش داده و نیاز به دوزبندی مکرر را کاهش دهد، که به طور مستقیم بر کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش پایداری سیستم تأثیر می‌گذارد. همچنین، توسعه بیوراکتورهای اختصاصی که قادر به تکثیر و حفظ غلظت بهینه فازها در نقطه کاربرد باشند، می‌تواند کارایی و پایداری فرآیند را بهبود بخشد و امکان تولید فاز در محل را فراهم آورد (Cui و همکاران، ۲۰۲۴).

فناوری‌های نظارت و تشخیص سریع پاتوژن‌ها نیز نقش محوری در آینده فازدرمانی خواهند داشت. توسعه حسگرهای زیستی پیشرفته و سیستم‌های پایش در زمان واقعی که قادر به شناسایی سریع و دقیق پاتوژن‌های باکتریایی هدف و همچنین حضور و فعالیت فازهای موجود در آب باشند، به اپراتورهای تصفیه‌خانه امکان می‌دهد تا به سرعت و با دقت بالا به تغییرات در کیفیت میکروبی آب واکنش نشان داده و دوز مناسب و اختصاصی فاز را اعمال کنند. این سیستم‌های هوشمند می‌توانند به صورت خودکار عمل کرده و کارایی فرآیند تصفیه را بهینه سازند، که این امر به ویژه در شرایط

اضطراری و برای پیشگیری از شیوع بیماری‌های منتقله از آب اهمیت دوچندان پیدا می‌کند (Oon و همکاران، ۲۰۲۳). در کنار پیشرفت‌های فنی، انجام مطالعات میدانی در مقیاس بزرگ برای ارزیابی جامع کارایی، ایمنی و مقرون‌به‌صرفه بودن فائزها در شرایط واقعی تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب و سیستم‌های توزیع، ضروری است. این مطالعات به جمع‌آوری داده‌های حیاتی برای بهینه‌سازی روش‌های کاربرد، ارزیابی دقیق اثرات بلندمدت زیست‌محیطی و اقتصادی و ارائه شواهد علمی محکم برای نهادهای نظارتی و تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند. این مرحله از تحقیق و توسعه، برای جلب اعتماد عمومی و پذیرش صنعتی فائزدرمانی بسیار حیاتی است (Bastías و León، ۲۰۱۵).

نهایتاً، تدوین قوانین و استانداردهای بین‌المللی شفاف و یکپارچه برای تولید، ارزیابی و کاربرد فائزها اهمیت بالایی دارد. با توجه به ماهیت نوین این فناوری در حوزه تصفیه آب، نهادهای نظارتی در بسیاری از کشورها فاقد چارچوب‌های قانونی مشخص هستند (Zalewska-Piątek و همکاران، ۲۰۲۳). همکاری نزدیک و فعال بین نهادهای نظارتی، صنعت و جامعه علمی در سطح جهانی کمک خواهد کرد یک چارچوب قانونی جامع و همسو که ایمنی و کارایی فائزدرمانی را تضمین کند ایجاد شود، همچنین مسائل مربوط به ثبت اختراع و مالکیت فکری را حل و فصل نماید و فرآیند تایید و تجاری‌سازی محصولات فائزی را تسهیل کند (Lezotre، ۲۰۱۴). این امر اعتماد عمومی را جلب کرده و مسیر را برای پذیرش جهانی فائزها به عنوان یک ابزار ارزشمند و پایدار در تصفیه آب هموار خواهد ساخت. با ادامه تحقیقات و سرمایه‌گذاری در این زمینه‌ها، می‌توان انتظار داشت که باکتریوفائزها نقش محوری و حتی انقلابی در تضمین دسترسی به آب سالم و مقابله با تهدیدات میکروبی نوظهور در سال‌های آینده ایفا کنند و به یک ستون اصلی در استراتژی‌های مدیریت منابع آب پایدار تبدیل شوند.

جمع‌بندی

با بررسی جامع پتانسیل‌های باکتریوفائزها، می‌توان آن‌ها را راه‌حلی نوین و امیدوارکننده در حوزه تصفیه آب ارزیابی کرد. این موجودات میکروسکوپی با سازوکاری منحصربه‌فرد، پاسخی طبیعی به چالش‌های پیچیده آلودگی میکروبی هستند. مهم‌ترین نقطه قوت فائزها، اختصاصی بودن عمل آن‌ها در هدف‌گیری پاتوژن‌های خاص است. این ویژگی موجب حذف دقیق عوامل بیماری‌زا، بدون آسیب زدن به میکروارگانیسم‌های مفید و برهم زدن تعادل اکولوژیک می‌شود. توانایی خودتکثیری در مواجهه با باکتری‌های میزبان، مزیت پایداری محسوب شده و نیاز به افزودن مکرر مواد شیمیایی را کاهش می‌دهد. فائزها قابلیت بی‌ظیری در نفوذ و تخریب بیوفیلم‌های مقاوم دارند. این امر، چالش

آلودگی مزمن در سیستم‌های توزیع و تصفیه آب را به‌طور ریشه‌ای حل می‌کند. در شرایط هشداردهنده افزایش مقاومت آنتی‌بیوتیکی، فائزها به عنوان خط دفاعی قدرتمند و جایگزینی حیاتی عمل می‌کنند. این فناوری، رویکردی پایدار و دوستدار محیط‌زیست در مقایسه با بسیاری از روش‌های شیمیایی متداول ارائه می‌دهد. با این وجود، آینده موفقیت‌آمیز این فناوری در ادغام هوشمندانه با روش‌های سنتی تصفیه نهفته است. یک سیستم تلفیقی می‌تواند از اثربخشی گسترده روش‌هایی مانند کلرزنی و دقت هدفمندی فائزها بهره‌مند شود. چنین هماهنگی، کارایی کلی سیستم را افزایش و عوارض جانبی زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد. در نهایت، باکتریوفائزها نه به عنوان یک جایگزین کامل، بلکه به عنوان مکملی قدرتمند در مجموعه فناوری‌های تصفیه آب ظاهر می‌شوند. این فناوری پتانسیل آن را دارد که سهم قابل‌توجهی در تضمین ایمنی و سلامت منابع آبی ایفا کند. با توسعه تحقیقات و رفع چالش‌های فنی، می‌توان به نقش آفرینی گسترده فائزها در آینده تصفیه آب امیدوار بود. این امر گامی بلند در جهت تأمین آب سالم و حفاظت از بهداشت عمومی به شمار می‌رود.

منابع

- Abd-Allah, I.M., El-Housseiny, G.S., Yahia, I.S., Aboshanab, K.M., & Hassouna, N.A. (2021). Rekindling of a Masterful Precedent; Bacteriophage: Reappraisal and Future Pursuits. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 11, 635597. doi: 10.3389/fcimb.2021.635597
- Adhikari, S., Lee, H. H., & Kim, D. H. (2024). 'Primary' antibiotics in wastewater treatment plants. *iScience*, 27(9), 110789. doi: 10.1016/j.isci.2024.110789
- Albarella, D., Dall'Ara, P., Rossi, L., & Turin, L. (2025). Bacteriophage Therapy in Freshwater and Saltwater Aquaculture Species. *Microorganisms*, 13(4), 831. doi: 10.3390/microorganisms13040831
- Alexander, J., Knopp, G., & Dötsch, A. (2016). Ozone treatment of conditioned wastewater selects antibiotic resistance genes, opportunistic bacteria, and induce strong population shifts. *Science of the Total Environment*, 559, 103–112. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.154
- Asensio, M.A., Morella, N.M., Jakobson, C.M., Hartman, E.C., Glasgow, J.E., Sankaran, B., et al. (2016). A Selection for Assembly Reveals That a Single Amino Acid Mutant of the Bacteriophage MS2 Coat Protein Forms a Smaller Virus-like Particle. *Nano Letters*, 16(9), 5944–5950. doi: 10.1021/acs.nanolett.6b02948

- Environmental Research and Public Health, 7(10), 3657–3703. doi: 10.3390/ijerph7103657
- Candel, M., Ballesteros, L., Fernandez-Rodriguez, J., Perez, M., & Solera, R. (2025). Study of the Effect of Temperature to Optimize the Anaerobic Digestion of Slaughterhouse Sludge by Co-Digestion with Slaughterhouse Wastewater. *Recycling*, 10(2), 47. doi: 10.3390/recycling10020047
- Chung, K.M., Nang, S.C., & Tang, S.S. (2023). The Safety of Bacteriophages in Treatment of Diseases Caused by Multidrug-Resistant Bacteria. *Pharmaceuticals*, 16(10), 1347. doi: 10.3390/ph16101347
- Cui, L., Watanabe, S., Miyanaaga, K., Kiga, K., Sasahara, T., Aiba, Y., Tan, X.E., Veerananarayanan, S., Thitiananpakorn, K., Nguyen, H.M., & Wannigama, D.L. (2024). A Comprehensive Review on Phage Therapy and Phage-Based Drug Development. *Antibiotics*, 13(9), 870. doi: 10.3390/antibiotics13090870
- Dawan, J., & Ahn, J. (2022). Bacterial Stress Responses as Potential Targets in Overcoming Antibiotic Resistance. *Microorganisms*, 10(7), 1385. doi: 10.3390/microorganisms10071385
- Douterelo, I., Calero-Preciado, C., Soria-Carrasco, V., & Boxall, J. B. (2018). Whole metagenome sequencing of chlorinated drinking water distribution systems. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 4(12), 2080–2091. doi: 10.1039/C8EW00395E
- Elois, M.A., Silva, R.D., Pilati, G.V.T., Rodríguez-Lázaro, D., & Fongaro, G. (2023). Bacteriophages as Biotechnological Tools. *Viruses*, 15(2), 349. doi: 10.3390/v15020349
- Erdei-Tombor, P., Kiskó, G., & Taczman-Brückner, A. (2024). Biofilm Formation in Water Distribution Systems. *Processes*, 12(2), 280. doi: 10.3390/pr12020280
- Fortier, L.C., & Sekulovic, O. (2013). Importance of Prophages to Evolution and Virulence of Bacterial Pathogens. *Virulence*, 4(5), 354–365. doi: 10.4161/viru.24498
- Gao, R., Gao, S.H., Li, J., Su, Y., Huang, F., Liang, B., Fan, L., Guo, J., & Wang, A. (2025). Emerging Technologies for the Control of Biological Contaminants in Water Treatment: A Critical Review. *Engineering*, 48, 185–204. doi: 10.1016/j.eng.2024.08.022
- Gaurav, A., Bakht, P., Saini, M., Pandey, S., & Pathania, R. (2023). Role of Bacterial Efflux Pumps in Antibiotic Resistance, Virulence, and Strategies to Discover Novel Efflux Pump Inhibitors. *Microbiology*, 169(5), 001333. doi: 10.1099/mic.0.001333
- Azzam, M. I., ElSayed, E. E., Marwa, M. G., & Abdallah, S. K. (2024). New phage-based wastewater pollution control solution with safe reuse. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 21, 100951. doi: 10.1016/j.enmm.2024.100951
- Ballesté, E., Blanch, A.R., Muniesa, M., García-Aljaro, C., Rodríguez-Rubio, L., Martín-Díaz, J., Pascual-Benito, M., & Jofre, J. (2022). Bacteriophages in Sewage: Abundance, Roles, and Applications. *FEMS Microbes*, 3, xtac009. doi: 10.1093/femsmc/xtac009
- Bleriot, I., Pacios, O., Blasco, L., Fernández-García, L., López, M., Ortiz-Cartagena, C., Barrio-Pujante, A., García-Contreras, R., Pirnay, J.P., Wood, T.K., & Tomás, M. (2024). Improving Phage Therapy by Evasion of Phage Resistance Mechanisms. *JAC Antimicrobial Resistance*, 6(1), dlae017. doi: 10.1093/jacamr/dlae017
- Bommer, A., Böhrer, O., & Johannsen, E. (2018). Effect of chlorine on cultivability of Shiga toxin producing *Escherichia coli* (STEC) and β -lactamase genes carrying *E. coli* and *Pseudomonas aeruginosa*. *International Journal of Medical Microbiology*, 308(8), 1105–1112. doi: 10.1016/j.ijmm.2018.09.004
- Borin, J.M., Avrani, S., Barrick, J.E., Petrie, K.L., & Meyer, J.R. (2021). Coevolutionary phage training leads to greater bacterial suppression and delays the evolution of phage resistance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(23), e2104592118. doi: 10.1073/pnas.2104592118
- Botondi, R., Lembo, M., Carboni, C., & Eramo, V. (2023). The Use of Ozone Technology: An Eco-Friendly Method for the Sanitization of the Dairy Supply Chain. *Foods*, 12(5), 987. doi: 10.3390/foods12050987
- Briggs, A. (2023). Climate Change, Conflict, and Contagion: Emerging Threats to Global Public Health. *IntechOpen*, 5, 3–18. doi: 10.5772/intechopen.108920
- Brown, M.R., Baptista, J.C., Lunn, M., Swan, D.L., Smith, S.J., & Davenport, R.J. (2019). Coupled virus-bacteria interactions and ecosystem function in an engineered microbial system. *Water Research*, 152, 264–273. doi: 10.1016/j.watres.2019.01.003
- Bule Možar, K., Miloloža, M., Martinjak, V., Cvetnić, M., Kušić, H., Bolanča, T., Kušić Grgić, D., & Ukić, Š. (2023). Potential of Advanced Oxidation as Pretreatment for Microplastics Biodegradation. *Separations*, 10(2), 132. doi: 10.3390/separations10020132
- Cabral, J.P. (2010). Water Microbiology: Bacterial Pathogens and Water. *International Journal of*

- Constructed Wetlands. *Chemosphere*, 303(Pt 2), 135148. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135148
- Hong, P.Y., Mathieu, J., Cheng, H., Narayanasamy, S., Castillo, D.A., Goel, R., & Alvarez, P.J. (2025). Phage Biocontrol in Water Treatment and Reuse Systems: A Nascent Field with Significant Innovation Opportunities. *Current Opinion in Biotechnology*, 91, 103242. doi: 10.1016/j.copbio.2024.103242
- Hoyles, L., McCartney, A. L., Neve, H., Gibson, G. R., Sanderson, J. D., & Heller, K. J. (2014). Characterization of virus-like particles associated with the human faecal and caecal microbiota. *Research in Microbiology*, 165(10), 803–812. doi: 10.1016/j.resmic.2014.10.006
- Huang, Z., Ong, S. L., & Ng, H. Y. (2011). Submerged anaerobic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment: effect of HRT and SRT on treatment performance and membrane fouling. *Water Research*, 45(2), 705–713. doi: 10.1016/j.watres.2010.08.035
- Hunter-Cevera, J., Karl, D., & Buckley, M. (2005). Marine Microbial Diversity: The Key to Earth's Habitability. *American Society for Microbiology*, 12, 5–22. doi: 10.1128/AAMCol.8Apr.2005
- Ioannou, P., Baliou, S., & Samonis, G. (2023). Bacteriophages in Infectious Diseases and Beyond—A Narrative Review. *Antibiotics*, 12(6), 1012. doi: 10.3390/antibiotics12061012
- Jia, H.J., Jia, P.P., Yin, S., Bu, L.K., Yang, G., & Pei, D.S. (2023). Engineering Bacteriophages for Enhanced Host Range and Efficacy: Insights from Bacteriophage-Bacteria Interactions. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1172635. doi: 10.3389/fmicb.2023.1172635
- Jia, S., Shi, P., Hu, Q., & He, M. (2015). Bacterial Community Shift Drives Antibiotic Resistance Promotion during drinking Water Chlorination. *Environmental Science & Technology*, 49(20), 12271–12279. doi: 10.1021/acs.est.5b03521
- Jin, M., Liu, L., Wang, D., & Shi M. (2020). Chlorine disinfection promotes the exchange of antibiotic resistance genes across bacterial genera by natural transformation. *The ISME Journal*, 14(7), 1847–1856. doi: 10.1038/s41396-020-0656-9
- Jo, S.J., Kwon, J., Kim, S.G., & Lee, S.J. (2023). The Biotechnological Application of Bacteriophages: What to Do and Where to Go in the Middle of the Post-Antibiotic Era. *Microorganisms*, 11(9), 2311. doi: 10.3390/microorganisms11092311
- Kamani, H., Baniasadi, M., Abdipour, H., Mohammadi, L., Rayegannakhost, S., Moein, H., & Azari, A. (2023). Health Risk Assessment of BTEX Compounds (Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylene) in Giacometti, F., Shirzad-Aski, H., & Ferreira, S. (2021). Antimicrobials and food-related stresses as selective factors for Antibiotic Resistance along the farm to Fork Continuum. *Antibiotics*, 10(6), 671. doi: 10.3390/antibiotics10060671
- Gomes, J., Matos, A., Gmurek, M., Quinta-Ferreira, R. M., & Martins, R. C. (2019). Ozone and Photocatalytic Processes for Pathogens Removal from Water: A Review. *Catalysts*, 9(1), 46. doi: 10.3390/catal9010046
- González, Y., Gómez, G., Moeller-Chávez, G.E., & Vidal, G. (2023). UV Disinfection Systems for Wastewater Treatment: Emphasis on Reactivation of Microorganisms. *Sustainability*, 15(14), 11262. doi: 10.3390/su151411262
- Habibinava, F., Zolfaghari, M. R., Sabouri Shahrabak, S., Zargar, M., & Soleimani, M. (2021). Isolation of Lytic Bacteriophages against MDR-Klebsiella pneumoniae and MDR-Enterobacter aerogenes from Sewage Samples: A Potential Tool for Medical Purposes. *Iranian Journal of Medical Microbiology*, 15(1), 46–66.
- Hakansson, A. P., Orihuela, C. J., & Bogaert, D. (2018). Bacterial-Host Interactions: Physiology and Pathophysiology of Respiratory Infection. *Physiological Reviews*, 98(2), 781–811. doi: 10.1152/physrev.00040.2016
- Halawa, E.M. (2023). Challenges of Bacteriophages Application in Controlling Bacterial Plant Diseases and How to Overcome Them. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 21(1), 98. doi: 10.1186/s43141-023-00549-y
- Hasan, M., & Ahn, J. (2022). Evolutionary Dynamics Between Phages and Bacteria as a Possible Approach for Designing Effective Phage Therapies Against Antibiotic-Resistant Bacteria. *Antibiotics*, 11(7), 915. doi: 10.3390/antibiotics11070915
- Hassanein, F., Masoud, I.M., Fekry, M.M., Abdel-Latif, M.S., Abdel-Salam, H., Salem, M., & Shehata, A.I. (2023). Environmental health aspects and microbial infections of the recreational water: Microbial Infections and Swimming pools. *BMC Public Health*, 23(1), 302. doi: 10.1186/s12889-023-15183-z
- Häuser, R., Blasche, S., Dokland, T., Haggård-Ljungquist, E., von Brunn, A., Salas, M., Casjens, S., Molineux, I., & Uetz, P. (2012). Bacteriophage Protein-Protein Interactions. *Advances in Virus Research*, 83, 219–298. doi: 10.1016/B978-0-12-394438-2.00006-2
- Hazra, M., Joshi, H., Williams, J.B., & Watts, J.E.M. (2022). Antibiotics and Antibiotic Resistant Bacteria/Genes in Urban Wastewater: A Comparison of Their Fate in Conventional Treatment Systems and

- Biofilm-Based Infections: A Review. *Pharmaceutics*, 14(2), 427. doi: 10.3390/pharmaceutics14020427
- Loc-Carrillo, C., & Abedon, S.T. (2011). Pros and Cons of Phage Therapy. *Bacteriophage*, 1(2), 111-114. doi: 10.4161/bact.1.2.14590
- Mathieu, J., Yu, P., & Zuo, P. (2019). Going viral: Emerging opportunities for phage-based bacterial control in Water Treatment and Reuse. *Accounts of Chemical Research*, 52(4), 849-857. doi: 10.1021/acs.accounts.8b00576
- Mayorga-Ramos, A., Carrera-Pacheco, S.E., Barba-Ostria, C., & Guamán, L.P. (2024). Bacteriophage-Mediated Approaches for Biofilm Control. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 14, 1428637. doi: 10.3389/fcimb.2024.1428637
- Mazumder, D. (2011). Process evaluation and treatability study of wastewater in a textile dyeing industry. *International Journal of Energy and Environment*, 2(6), 1053-1066.
- Nathanson, J.A., & Ambulkar, A. (2023). Wastewater Treatment. In *Encyclopedia Britannica*. www.britannica.com/technology/wastewater-treatment. Accessed on 23 May 2023.
- Naureen, Z., Dautaj, A., Anpilogov, K., Camilleri, G., Dhuli, K., Tanzi, B., Maltese, P.E., Cristofoli, F., De Antoni, L., Beccari, T., Dundar, M., & Bertelli, M. (2020). Bacteriophages Presence in Nature and Their Role in the Natural Selection of Bacterial Populations. *Acta Biomedica*, 91(13-S), e2020024. doi: 10.23750/abm.v91i13-S.10819
- Nilsson, A.S. (2019). Pharmacological Limitations of Phage Therapy. *Upsala Journal of Medical Sciences*, 124(4), 218-227. doi: 10.1080/03009734.2019.1688433
- Nwobodo, D., Ugwu, M.C., Oliseloke Anie, C., Al-Ouqaili, M.T.S., Chinedu Ikem, J., Victor Chigozie, U., & Saki, M. (2022). Antibiotic Resistance: The Challenges and Some Emerging Strategies for Tackling a Global Menace. *Journal of Clinical Laboratory Analysis*, 36(9), e24655. doi: 10.1002/jcla.24655
- Ofori, I., Maddila, S., Lin, J., & Jonnalagadda, S. B. (2018). Chlorine dioxide inactivation of *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* in water: the kinetics and mechanism. *Journal of Water Process Engineering*, 26, 46-54. doi: 10.1016/j.jwpe.2018.09.001
- O'Neill, J. (2014). Antimicrobial Resistance: Tackling a crisis for the health and wealth of nations. *Review on Antimicrobial Resistance*, 15, 10-30.
- Oon, Y.L., Oon, Y.S., Ayaz, M., Deng, M., Li, L., & Song, K. (2023). Waterborne Pathogens Detection Technologies: Advances, Challenges, and Future Different Indoor Air Using Monte Carlo Simulation in Zahedan City, Iran. *Heliyon*, 9(9), e20294. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e20294
- Kamiński, B., & Paczesny, J. (2024). Bacteriophage Challenges in Industrial Processes: A Historical Unveiling and Future Outlook. *Pathogens*, 13(2), 152. doi: 10.3390/pathogens13020152
- Kasman, L.M., & Porter, L.D. (2025). Bacteriophages. In *StatPearls*. StatPearls Publishing. New York, USA.
- Kawan, J. A., Suja', F., Pramanik, S. K., Yusof, A., Abdul Rahman, R., & Abu Hasan, H. (2022). Effect of Hydraulic Retention Time on the Performance of a Compact Moving Bed Biofilm Reactor for Effluent Polishing of Treated Sewage. *Water*, 14(1), 81. doi: 10.3390/w14010081
- Klumpp, J., Fouts, D.E., & Sozhamannan, S. (2012). Next Generation Sequencing Technologies and the Changing Landscape of Phage Genomics. *Bacteriophage*, 2(3), 190-199. doi: 10.4161/bact.22111
- Kwiatk, M., Parasion, S., & Rutyna, P. (2017). Isolation of bacteriophages and their application to control *Pseudomonas aeruginosa* in planktonic and biofilm models. *Research in Microbiology*, 168(3), 194-207. doi: 10.1016/j.resmic.2016.10.009
- León, M., & Bastías, R. (2015). Virulence reduction in bacteriophage resistant bacteria. *Frontiers in Microbiology*, 6, 343. doi: 10.3389/fmicb.2015.00343
- Leprince, A., & Mahillon, J. (2023). Phage adsorption to gram-positive bacteria. *Viruses*, 15, 196. doi: 10.3390/v15010196
- Lerminiaux, N. A., & Cameron, A. D. S. (2019). Horizontal transfer of antibiotic resistance genes in clinical environments. *Canadian Journal of Microbiology*, 65(1), 34-44. doi: 10.1139/cjm-2018-0275
- Lezotre, P.L. (2014). State of Play and Review of Major Cooperation Initiatives. *International Cooperation, Convergence and Harmonization of Pharmaceutical Regulations*, 7(5) 158-170. doi: 10.1016/B978-0-12-800053-3.00002-1
- Lin, D.M., Koskella, B., & Lin, H.C. (2017). Phage Therapy: An Alternative to Antibiotics in the Age of Multi-Drug Resistance. *World Journal of Gastrointestinal Pharmacology and Therapeutics*, 8(3), 162-173. doi: 10.4292/wjgpt.v8.i3.162
- Lin, N.-T., Chiou, P.-Y., & Chang, K.C. (2010). Isolation and characterization of ϕ AB2: a novel bacteriophage of *Acinetobacter baumannii*. *Research in Microbiology*, 161(4), 308-314. doi: 10.1016/j.resmic.2010.03.007
- Liu, S., Lu, H., Zhang, S., Shi, Y., & Chen, Q. (2022). Phages Against Pathogenic Bacterial Biofilms and

- Hernández-Baltazar, E. (2025). Bacteriophages: A Challenge for Antimicrobial Therapy. *Microorganisms*, 13(1):100. doi: 10.3390/microorganisms13010100
- Serra, T., Colomer, J., & Pau, C. (2014). Tertiary treatment for wastewater reuse based on the *Daphnia magna* filtration- comparison with conventional tertiary treatments. *Water Science and Technology*, 70(4), 705-711. doi: 10.2166/wst.2014.284
- Shivaram, K.B., Bhatt, P., Applegate, B., & Simsek, H. (2023). Bacteriophage-based biocontrol technology to enhance the efficiency of wastewater treatment and reduce targeted bacterial biofilms. *Sci Total Environ.*, 862, 160723. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160723
- Shymialeovich, D., Wójcicki, M., Wardaszka, A., Świder, O., Sokołowska, B., & Błażej, S. (2023). Application of Lytic Bacteriophages and Their Enzymes to Reduce Saprophytic Bacteria Isolated from Minimally Processed Plant-Based Food Products-In Vitro Studies. *Viruses*, 15(1), 9. doi: 10.3390/v15010009
- Spietz, R. L., Williams, C. M., Rocap, G., & Horner-Devine, M. C. (2015). A Dissolved Oxygen Threshold for Shifts in Bacterial Community Structure in a Seasonally Hypoxic Estuary. *PLOS ONE*, 10(8), e0135731. doi: 10.1371/journal.pone.0135731
- Travagli, V., & Iorio, E. L. (2023). The Biological and Molecular Action of Ozone and Its Derivatives: State-of-the-Art, Enhanced Scenarios, and Quality Insights. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(10), 8465. doi: 10.3390/ijms24108465
- Trinchera, M., De Gaetano, S., Sole, E., Midiri, A., Silvestro, S., Mancuso, G., Catalano, T., & Biondo, C. (2025). Antimicrobials in Livestock Farming and Resistance: Public Health Implications. *Antibiotics*, 14(6), 606. doi: 10.3390/antibiotics14060606
- Turki, Y., Ouzari, H., & Mehri, I. (2012). Evaluation of a cocktail of three bacteriophages for the biocontrol of *Salmonella* of wastewater. *Food Research International*, 45(2), 1099-1105. doi: 10.1016/j.foodres.2011.05.041
- Veesler, D., & Johnson, J.E. (2012). Virus Maturation. *Annual Review of Biophysics*, 41, 473-496. doi: 10.1146/annurev-biophys-042910-155407
- Venkataraman, S., Shahgolzari, M., Yavari, A., & Hefferon, K. (2025). Bacteriophages as Targeted Therapeutic Vehicles: Challenges and Opportunities. *Bioengineering*, 12(5), 469. doi: 10.3390/bioengineering12050469
- Venturini, C., Fabijan, A.P., Lubian, A.F., Barbirz, S., & Iredell, J. (2022). Biological Foundations of Successful Bacteriophage Therapy. *EMBO Perspectives*. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1286923. doi: 10.3389/fmicb.2023.1286923
- Pallavali, R., Shin, D., & Choi, J. (2023). Phage-Based Biocontrol of Antibiotic-Resistant Bacterium Isolated from Livestock Wastewater Treatment Plant. *Water*, 15(8), 1616. doi: 10.3390/w15081616
- Palma, M., & Qi, B. (2024). Advancing Phage Therapy: A Comprehensive Review of the Safety, Efficacy, and Future Prospects for the Targeted Treatment of Bacterial Infections. *Infectious Disease Reports*, 16(6), 1127-1181. doi: 10.3390/idr16060092
- Periasamy, D., & Sundaram, A. (2013). A novel approach for pathogen reduction in wastewater treatment. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 11, 12. doi: 10.1186/2052-336X-11-12
- Pourtois, J., Tarnita, C. E., & Bonachela, J. A. (2020). Impact of Lytic Phages on Phosphorus- vs. Nitrogen-Limited Marine Microbes. *Frontiers in Microbiology*, 11, 221. doi: 10.3389/fmicb.2020.00221
- Ragab, S., Mustafa, M. K., & Hassan, Y.Y. (2024). Potential use of bacteriophages as biocontrol agents against multidrug-resistant pathogens in wastewater treatment: a review. *Environmental Sustainability*, 7, 287-302. doi: 10.1007/s42398-024-00322-y
- Rodriguez-Mozaz, S., Chamorro, S., & Marti, E. (2015). Occurrence of antibiotics and antibiotic resistance genes in hospital and urban wastewaters and their impact on the receiving river. *Water Research*, 69, 234-242. doi: 10.1016/j.watres.2014.11.021
- Runa, V., Wenk, J., Bengtsson, S., Jones, B.V., & Lanham, A.B. (2021). Bacteriophages in Biological Wastewater Treatment Systems: Occurrence, Characterization, and Function. *Frontiers in Microbiology*, 12, 730071. doi: 10.3389/fmicb.2021.730071
- Sadeghi, G., Schijven, J. F., Behrends, T., Hassanizadeh, S. M., Gerritse, J., & Kleingeld, P. J. (2011). Systematic Study of Effects of pH and Ionic Strength on Attachment of Phage PRD1. *Ground Water*, 49(1), 12-19. doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00767.x
- Sahoo, K., & Meshram, S. (2024). The Evolution of Phage Therapy: A Comprehensive Review of Current Applications and Future Innovations. *Cureus*, 16(9), e70414. doi: 10.7759/cureus.70414
- Sam, T., Le Roes-Hill, M., Hoosain, N., Welz, P.J., & van Wyk, J. (2022). Strategies for Controlling Filamentous Bulking in Activated Sludge Wastewater Treatment Plants: The Old and the New. *Water*, 14(20), 3223. doi: 10.3390/w14203223
- Segundo-Arizmendi, N., Arellano-Maciél, D., Rivera-Ramírez, A., Piña-González, A.M., López-Leal, G., &

Zhang, Q.Y., Ke, F., Gui, L., & Zhao, Z. (2022). Recent Insights into Aquatic Viruses: Emerging and Reemerging Pathogens, Molecular Features, Biological Effects, and Novel Investigative Approaches. *Water Biology and Security*, 1(4), 100062. doi: 10.1016/j.watbs.2022.100062

Zhang, Y., & Hu, Z. (2013). Combined treatment of *Pseudomonas aeruginosa* biofilms with bacteriophages and chlorine. *Biotechnology and Bioengineering*, 110(1), 286–295. doi: 10.1002/bit.24630

پىنوشتها

- 1- Multi-Drug Resistant Bacteria
- 2- Disinfection By-Products
- 3- Antibiotic-resistant bacteria
- 4- Antibiotic resistance genes
- 5- <https://www.scopus.com>
- 6- <https://www.webofscience.com>
- 7- <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>
- 8- <https://scholar.google.com>
- 9- <https://www.sciencedirect.com>
- 10- <https://link.springer.com>
- 11- Environmental Protection Agency
- 12- Mobile Genetic Elements
- 13- Extracellular Polymeric Substance
- 14- Microbiologically Influenced Corrosion
- 15- Phage Cocktails
- 16- Hydraulic Retention Time
- 17- Sludge Retention Time
- 18- Depolymerase enzymes

- Molecular Medicine*, 14(7), e12435. doi: 10.15252/emmm.202012435
- Wang, I.N., Smith, D.L., & Young, R. (2000). Holins: The Protein Clocks of Bacteriophage Infections. *Annual Review of Microbiology*, 54, 799–825. doi: 10.1146/annurev.micro.54.1.799
- Waqas, U., Farhan, A., Haider, A., Kumar, U., & Raza, A. (2023). Advancements in Biofilm Formation and Control in Potable Water Distribution Systems: A Comprehensive Review and Analysis of Chloramine Decay in Water Systems. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6), 111377. doi: 10.1016/j.jece.2023.111377
- Wdowiak, M., Paczesny, J., & Raza, S. (2022). Enhancing the Stability of Bacteriophages Using Physical, Chemical, and Nano-Based Approaches: A Review. *Pharmaceutics*, 14(9), 1936. doi: 10.3390/pharmaceutics14091936
- Withey, S., Cartmell, E., Avery, L.M., & Stephenson, T. (2005). Bacteriophages–Potential for Application in Wastewater Treatment Processes. *Science of the Total Environment*, 339(1–3), 1–18. doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.09.021
- Xiao, H., Tan, L., Tan, Z., Zhang, Y., Chen, W., Li, X., Song, J., Cheng, L., & Liu, H. (2023). Structure of the Siphophage Neck-Tail Complex Suggests That Conserved Tail Tip Proteins Facilitate Receptor Binding and Tail Assembly. *PLOS Biology*, 21(12), e3002441. doi: 10.1371/journal.pbio.3002441
- Zalewska-Piątek, B. (2023). Phage Therapy–Challenges, Opportunities and Future Prospects. *Pharmaceutics*, 16(12), 1638. doi: 10.3390/ph16121638

Document Type

Applied Article

پژوهش کاربردی

نوع مقاله

Analysis of the Social Conflict in the Persian Gulf Water Transfer Project and the Proposal of a Participatory Governance Model Based on Sustainable Development

N. Anjomshoa^{1*}, S. A. M. Jalaei², M. Nejati³

1- Ph.D. Student, Department of Economics, Faculty of Economics and Management, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

2, 3- Professor and Associate Professor, Department of Economics, Faculty of Economics and Management, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

* Corresponding, Author Email: anjomshoa@aem.uk.ac.ir

Received 23-07-2025

Revised 06-10-2025

Accepted 16-10-2025

Available online 16-03-2026

تحلیل مناقشه اجتماعی انتقال آب خلیج فارس و ارائه الگوی حکمرانی مشارکتی مبتنی بر توسعه پایدار

نادیا انجم شعاع^۱، سید عبدالمجید جلائی^۲، مهدی نجاتی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

۲ و ۳- به ترتیب استاد و دانشیار گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

* رایانامه نویسنده مسئول: anjomshoa@aem.uk.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۷/۱۴

تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۷/۲۴

تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

Abstract

The Persian Gulf Water Transfer Project is one of the largest infrastructure initiatives in Iran's water sector, implemented to provide drinking water and support export-oriented industrial development. Despite the stated benefits, the project has faced criticisms and opposition from environmental specialists, social activists, and some scientific institutions. This study aims to identify the main roots of social conflicts surrounding the project and to propose a participatory governance model based on sustainable development. A qualitative research approach was adopted, employing document analysis of official and media sources alongside semi-structured interviews with key stakeholders. Data were analyzed using thematic analysis with MAXQDA software. The research framework is grounded in sustainable development across economic, social, and environmental dimensions, as well as participatory governance theories. Findings indicate that the primary roots of conflict include competing stakeholder interests, lack of transparency in policymaking, disregard for alternative options, and public distrust. In addition, significant challenges were identified across all three dimensions of sustainable development. The importance of this study lies in presenting a context-specific participatory governance model that emphasizes multi-stakeholder dialogue, transparency of information, and collective decision-making. This model can contribute to improving policymaking and project management in water transfer initiatives within Iran and similar local contexts. However, due to the specific socio-political characteristics of the Persian Gulf Water Transfer Project, the findings are not necessarily generalizable to other projects, serving primarily as guidance for policymakers in comparable initiatives.

Keywords: Social Conflict, Water Transfer, Participatory Governance, Sustainable Development.

چکیده

پروژه انتقال آب خلیج فارس یکی از بزرگترین طرح‌های زیرساختی کشور در حوزه منابع آب است که با هدف تأمین آب شرب و توسعه صنایع صادرات‌محور اجرا شده است. با وجود مزایای مطرح شده، این پروژه با نقدها و مخالفت‌هایی از سوی متخصصان محیط‌زیست، فعالان اجتماعی و برخی نهادهای علمی مواجهه بوده است. این پژوهش با هدف شناسایی ریشه‌های اصلی مناقشات اجتماعی پیرامون پروژه و ارائه الگوی حکمرانی مشارکتی مبتنی بر توسعه پایدار انجام شده است. روش پژوهش کیفی بوده و از تحلیل اسنادی منابع رسمی و رسانه‌ای، همراه با مصاحبه‌های نیمه ساختاریافته با ذی‌نفعان کلیدی استفاده شده است. داده‌ها با روش تحلیل تماتیک و با بهره‌گیری از نرم‌افزار MAXQDA تحلیل شده‌اند. چارچوب پژوهش بر توسعه پایدار در سه بعد اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی و نظریه‌های حکمرانی مشارکتی استوار است. یافته‌ها نشان داد ریشه‌های اصلی مناقشه شامل تضاد منافع میان ذی‌نفعان، نبود شفافیت در سیاست‌گذاری، نادیده گرفتن گزینه‌های جایگزین و بی‌اعتمادی عمومی است. در هر سه بعد توسعه پایدار نیز، چالش‌های جدی شناسایی شد. اهمیت پژوهش در ارائه یک مدل حکمرانی مشارکتی بومی است که بر گفت‌وگوی چند ذی‌نفعی، شفافیت اطلاعاتی و تصمیم‌گیری جمعی مبتنی است. این مدل می‌تواند در بهبود سیاست‌گذاری و مدیریت پروژه‌های انتقال آب در ایران و پروژه‌های مشابه در شرایط بومی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، به دلیل ویژگی‌های خاص اجتماعی-سیاسی پروژه انتقال آب خلیج فارس، یافته‌ها به طور قطعی به سایر پروژه‌ها تعمیم‌پذیر نیستند؛ بلکه بیشتر به عنوان راهنمایی برای سیاست‌گذاران در پروژه‌های مشابه قابل توجه‌اند.

واژه‌های کلیدی: مناقشه اجتماعی، انتقال آب، حکمرانی مشارکتی، توسعه پایدار.

How to cite this article:

Anjomshoa, N., Jalaei, S.A., & Nejati, M. (2026). Analysis of the Social Conflict in the Persian Gulf Water Transfer Project and the Proposal of a Participatory Governance Model Based on Sustainable Development. Journal of Water and Sustainable Development, 12(4), 47-62. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i4.2507-1444>

پروژه انتقال آب خلیج فارس به فلات مرکزی ایران، با هزینه‌ای بالغ بر ۸ میلیارد دلار و ظرفیت انتقال سالانه ۱ میلیارد مترمکعب آب، یکی از بزرگترین طرح‌های زیرساختی کشور در حوزه مدیریت منابع آب است. هدف اصلی این پروژه تأمین آب شرب و پشتیبانی از توسعه صنایع صادرات‌محور در مناطق مرکزی ایران است که با بحران منابع آبی مواجه‌اند ([فدایی تهرانی و ابارشی، ۱۴۰۳](#)). با این حال، با وجود مزایای اقلیمی این پروژه‌ها، مناقشات گسترده‌ای در خصوص ابعاد عدالت محیط‌زیستی و حکمرانی آن در جریان است. از جمله مهم‌ترین چالش‌های موجود، تضاد منافع میان بازیگران کلیدی و حاشیه‌ای، ناتوانی در تقویت مشارکت رویه‌ای و همچنین فقدان شفافیت در شبکه سیاستی تصمیم‌گیر است. ([قربانی و همکاران، ۱۴۰۴](#)).

این پروژه نه تنها یک طرح منطقه‌ای یا استانی؛ بلکه بخشی از سیاست‌های کلان کشور در راستای تأمین امنیت آبی و توسعه پایدار است که در اسناد بالادستی همچون سند چشم‌انداز ۱۴۰۴ و برنامه‌های توسعه ششم و هفتم گنجانده شده است. بنابراین، تحلیل مناقشه اجتماعی پیرامون آن نیز باید در چارچوب سیاست عمومی ملی و نه تنها در سطح محلی یا استانی صورت گیرد. با این وجود، فقدان حکمرانی مشارکتی مناسب و بی‌توجهی به نظرات جوامع محلی باعث شده بسیاری از ذی‌نفعان پروژه، به‌ویژه در مناطق مبدأ، اعتراضات شدیدی علیه آن داشته باشند ([محمدی و همکاران، ۱۳۹۸](#)). به‌طور ویژه، نگرانی‌های محیط‌زیستی ناشی از برداشت آب و تأثیرات آن بر اکوسیستم‌های دریایی و خشک، یکی از مسائلی است که منتقدان به آن اشاره دارند ([Doortmans و همکاران، ۲۰۲۲](#)).

تجربه‌های بین‌المللی نیز نشان می‌دهد فناوری و توسعه صنعتی در صورت همراهی با حکمرانی مشارکتی می‌توانند موفق باشند. به‌عنوان مثال در پروژه انتقال آب جنوب-شمال چین، استفاده از فناوری‌های پیشرفته تصفیه و پمپاژ زمانی توانست اثربخش باشد که با مشارکت جوامع محلی و گزارش‌دهی عمومی همراه شد ([Li و همکاران، ۲۰۲۲](#)). در هند نیز برخی طرح‌های مدیریت منابع آب تنها پس از آنکه سازوکارهای مشارکت اجتماعی و نظارت جامعه مدنی در کنار فناوری‌های نوین آبیاری قرار گرفتند، به نتایج پایدار دست یافتند ([UN Water، ۲۰۲۳](#)).

پژوهش حاضر در چارچوب اصول توسعه پایدار قابل توضیح است و با برخی از اهداف توسعه پایدار سازمان ملل ([SDGs](#))^۲ هم‌راستا است؛ به‌ویژه هدف ششم (آب پاک و بهداشت)، هدف هفتم (انرژی پاک و مقرون به صرفه) و هدف سیزدهم (اقدام اقلیمی).

این پژوهش با هدف مخالفت با فناوری‌های انتقال یا توسعه صنعتی نوشته نشده است؛ بلکه با هدف تحلیل مناقشات اجتماعی پیرامون پروژه انتقال آب خلیج فارس و ارائه الگویی برای حکمرانی مشارکتی مبتنی بر توسعه پایدار، ریشه‌های اصلی این مناقشات بررسی خواهد شد. تحلیل‌های انجام شده در این زمینه نشان دادند یکی از عوامل کلیدی در افزایش تعارضات، عدم شفافیت در فرآیند تصمیم‌گیری و نادیده گرفتن گزینه‌های جایگزین است ([حسینی و کریمی، ۱۴۰۲](#)). علاوه بر این، پژوهش‌ها نشان می‌دهند پیاده‌سازی حکمرانی مشارکتی و استفاده از فناوری‌های نوین می‌تواند به کاهش این تعارضات و تقویت پایداری پروژه‌های بزرگ زیرساختی کمک کند ([Zhang و همکاران، ۲۰۲۳](#)). هدف این مقاله این است که مدل حکمرانی مشارکتی مناسبی برای پروژه‌های انتقال آب ارائه دهد که بر گفت‌وگوی چند ذی‌نفعی، شفافیت اطلاعات و تصمیم‌گیری جمعی مبتنی باشد و نه تنها این مدل، در تضاد با فناوری‌های نوین نیست، بلکه مکمل آن‌ها است و می‌تواند به افزایش پذیرش اجتماعی و کارایی پروژه‌های بزرگ زیرساختی کمک نماید.

نوآوری این پژوهش در دو بعد اصلی است: نخست، تمرکز بر مناقشه اجتماعی پروژه انتقال آب خلیج فارس با رویکرد کیفی و تحلیل تماتیک که کمتر در ادبیات داخلی مورد توجه قرار گرفته است؛ دوم، ارائه یک مدل بومی حکمرانی مشارکتی مبتنی بر داده‌های میدانی و اسناد بالادستی که می‌تواند در سیاست‌گذاری و مدیریت پروژه‌های مشابه به کار گرفته شود.

بر این اساس، سؤال اصلی پژوهش چنین است: ریشه‌های اصلی مناقشه اجتماعی پیرامون پروژه انتقال آب خلیج فارس چیست و چگونه می‌توان الگویی برای حکمرانی مشارکتی مبتنی بر توسعه پایدار ارائه داد؟

در کنار این پرسش، دو سؤال فرعی نیز مطرح است: ۱. ابعاد اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی مناقشات ذی‌نفعان چه تفاوت‌ها و اشتراکاتی دارند؟

۲. چه محرک‌ها و بسترهای نهادی می‌توانند زمینه‌ساز پذیرش حکمرانی مشارکتی در پروژه‌های انتقال آب باشند؟

پیشینه پژوهش

مطالعات پیشین درباره پروژه‌های انتقال آب در ایران و جهان بیشتر بر ابعاد فنی و محیط‌زیستی متمرکز بوده‌اند. در ایران، [فدایی تهرانی و ابارشی \(۱۴۰۳\)](#) به بررسی فنی و اقتصادی نمک‌زدایی و انتقال آب شور پرداخته و پیامدهای آن را تحلیل کردند. همچنین [محمدی و کرباسی \(۱۴۰۲\)](#) بر ضرورت بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی و اصلاح الگوهای رفتاری مصرف‌کنندگان تأکید داشته‌اند.

در سطح بین‌المللی، [Li و همکاران \(۲۰۲۲\)](#) در مطالعه‌ای پیرامون پروژه انتقال آب جنوب-شمال چین به پیامدهای اکولوژیکی این طرح پرداختند. همچنین [Doortmans و](#)

همکاران (۲۰۲۲) با ارائه مدل مفهومی جدید، بر پیچیدگی‌ها و ابعاد اقتصادی-اجتماعی انتقال‌های بین‌حوضه‌ای در جهان تأکید کردند. [Rollason و همکاران \(۲۰۲۲\)](#) نیز چارچوبی برای تحلیل ابعاد چندگانه پروژه‌های انتقال آب ارائه کردند. از منظر نظری، [Ostrom \(۱۹۹۰\)](#) در نظریه مدیریت منابع مشترک و [Ansell و Gash \(۲۰۰۸\)](#) در چارچوب حکمرانی مشارکتی، بر اهمیت گفت‌وگوی چند ذی‌نفعی، شفافیت و اعتمادسازی را برای کاهش مناقشات و مدیریت پایدار منابع تأکید کردند. باین‌وجود، کاربرد عملی این نظریه‌ها در پروژه‌های انتقال آب در ایران کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

مطالعات جدیدتر نیز بر ضرورت حکمرانی تطبیقی و مشارکتی در پروژه‌های انتقال آب تأکید کردند. برای نمونه، [Zhang و همکاران \(۲۰۲۳\)](#) در مورد چین نشان دادند بدون مشارکت محلی و شفافیت اطلاعاتی، پروژه‌های انتقال آب با مقاومت اجتماعی روبه‌رو می‌شوند. همچنین گزارش [UN Water \(۲۰۲۳\)](#) درباره هند و آفریقا نشان داد بی‌توجهی به پیوست‌های اجتماعی و محیط‌زیستی، موجب افزایش نابرابری و کاهش مشروعیت اجتماعی می‌شود.

رهبرقاسی (۱۴۰۳) در پژوهش خود به این نکته اشاره کرد حکمرانی آب در ایران با مشکلات ساختاری، نهادی و اجتماعی زیادی روبه‌رو است که منجر به بحران منابع آبی شده است. این مسائل نیازمند اصلاحات جدی در نهادهای مدیریت آب و تصمیم‌گیری‌های مشارکتی در پروژه‌های بزرگ زیرساختی مانند انتقال آب خلیج فارس است. همچنین **خان‌محمدی و همکاران (۱۴۰۲)** بر لزوم اصلاح ساختار حکمرانی و استفاده از مدل‌های مشارکتی تأکید کرد و نشان داد مشارکت ذی‌نفعان و شفافیت اطلاعاتی می‌تواند به کاهش مناقشات اجتماعی و تقویت پایداری پروژه‌ها کمک کند. تفاوت پژوهش حاضر با مطالعات گذشته در آن است که به‌جای تمرکز صرف بر جنبه‌های فنی یا محیط‌زیستی، به‌طور مستقیم مناقشه اجتماعی پروژه انتقال آب خلیج فارس با رویکرد کیفی (مصاحبه نیمه ساختاریافته و تحلیل تماتیک) بررسی می‌شود و در نهایت، یک مدل حکمرانی مشارکتی بومی مبتنی بر اصول توسعه پایدار (اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی) پیشنهاد می‌دهد. این خلأ در ادبیات پژوهشی ایران و حتی مطالعات بین‌المللی کمتر پررنگ شده و نوآوری اصلی مطالعه حاضر محسوب می‌شود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با رویکرد کیفی به تحلیل مناقشات اجتماعی پروژه انتقال آب خلیج فارس پرداخته و از روش‌های مصاحبه

نیمه ساختار یافته و تحلیل اسنادی برای گردآوری داده‌ها استفاده کرده است. داده‌ها با روش تحلیل تماتیک و با بهره‌گیری از نرم‌افزار MAXQDA ۳ تحلیل شده‌اند. برای شفاف‌سازی مسیر مطالعه، فلوچارت مراحل پژوهش در انتهای این بخش ارائه شده است.

- جامعه آماری و نمونه‌گیری

جامعه آماری شامل پنج گروه ذی‌نفعان کلیدی پروژه عبارتند از کارشناسان و پژوهشگران حوزه آب و محیط‌زیست، مدیران و مسئولان اجرایی پروژه، نمایندگان بخش صنعت و معدن، فعالان اجتماعی و سازمان‌های مردم‌نهاد و نمایندگان جوامع محلی بوده است؛ که با استفاده از نمونه‌گیری هدفمند، ۱۰ مصاحبه عمیق با افراد منتخب از این گروه‌ها انجام شد تا تنوع دیدگاه‌ها پوشش داده شود. انتخاب نمونه‌ها بر اساس دانش و تجربه مرتبط با پروژه صورت گرفت.

- روش گردآوری داده‌ها

۱- مصاحبه‌های نیمه ساختار یافته

تعداد ۱۰ مصاحبه نیمه ساختار یافته با ترکیب مشارکت‌کنندگان زیر با راهنمای پرسش‌های باز درباره ابعاد اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی پروژه انجام شد. تمامی مصاحبه‌ها با اخذ رضایت آگاهانه از مشارکت‌کنندگان، حفظ محرمانگی اطلاعات با استفاده از کدها، احترام به آزادی پاسخ‌گویی و رعایت امانت‌داری در نقل قول‌ها انجام شد.

از نظر موضع نسبت به پروژه، ۴ نفر موافق، ۴ نفر مخالف و ۲ نفر دیدگاه بینابینی داشتند؛ بنابراین تعادل نسبی میان دیدگاه‌ها برقرار شد، اگرچه برخی مخالفان استدلال‌های بیشتری ارائه کردند که در تحلیل تماتیک پررنگ‌تر بازتاب یافته است. جدول (۱) ترکیب کامل مصاحبه‌شوندگان، جایگاه/سمت آن‌ها و موضع آن‌ها را نشان می‌دهد.

برای مطالعه کیفی تک‌موردی با تحلیل تماتیک، انتخاب ۱۰ مصاحبه به‌عنوان حجم نمونه براساس اصول پژوهش کیفی و با تأکید بر مفهوم "قدرت اطلاعاتی" و "اشباع نظری/کدی" تعیین شد. قدرت اطلاعاتی به این معنا است که حجم نمونه باید اطلاعات کافی و مرتبط برای پاسخ به سؤالات پژوهش فراهم کند، که به عواملی مانند تمرکز خاص پژوهش، تنوع نمونه و عمق داده‌ها بستگی دارد ([Malterud و همکاران، ۲۰۱۶](#)). این پژوهش با تمرکز مشخص بر مناقشات اجتماعی پروژه انتقال آب خلیج فارس، تنوع ذی‌نفعان (شامل کارشناسان دانشگاهی، مدیران اجرایی، نمایندگان صنایع، فعالان اجتماعی و جوامع محلی) و عمق مصاحبه‌های نیمه ساختار یافته (۴۵ تا ۷۵ دقیقه) طراحی شد.

جدول ۱- مشخصات مصاحبه‌شوندگان و موضوع آن‌ها

گروه مصاحبه‌شونده	تعداد	جایگاه/سمت	موضوع نسبت به پروژه
کارشناسان و پژوهشگران دانشگاهی	۳ نفر	دو استاد دانشگاه (مهندسی آب و محیط‌زیست) + یک پژوهشگر ارشد	۱ دیدگاه موافق و ۲ دیدگاه مخالف
مدیران اجرایی پروژه	۲ نفر	مدیر پروژه در شرکت مهندسی آب + معاون فنی پیمانکار اصلی	۲ دیدگاه موافق
نمایندگان صنایع فولاد و مس	۲ نفر	مدیر میانی کارخانه فولاد یزد + مدیر برنامه‌ریزی شرکت مس کرمان	۱ دیدگاه موافق و ۱ دیدگاه بینابین
فعالان اجتماعی و محیط‌زیست	۲ نفر	عضو هیات مدیره NGO ^۴ محیط‌زیستی + عضو انجمن حفاظت از منابع آب تهران	۲ دیدگاه مخالف
نمایندگان جوامع محلی*	۲ نفر	یک نفر از ساکنان محلی یزد (مقصد) + یک نفر از ساکنان محلی بندرعباس (مبدأ)	۲ دیدگاه بینابین

* در خوشه جوامع محلی، دو مطلع (یزد و بندرعباس) مشارکت داشتند که به دلیل هم‌پوشانی محتوایی، به‌عنوان یک واحد تحلیلی در گزارش لحاظ شده‌اند. بنابراین مجموع کل مصاحبه‌ها همچنان ۱۰ نفر در نظر گرفته شده است.

انجام شد تا صحت تفسیر پژوهشگر تأیید شود و سوگیری‌های احتمالی کاهش یابد. سوم، بازبینی همتا توسط دو پژوهشگر مستقل آشنا با روش‌شناسی کیفی صورت گرفت، که شامل بررسی کدها، مقوله‌ها و کدهای نهایی بود تا انسجام تحلیل تضمین شود. همچنین مستندسازی دقیق فرآیند کدگذاری و یادداشت‌های تحلیلی در MAXQDA امکان ردیابی تصمیمات پژوهشگر و افزایش اتکاپذیری را فراهم کرد. این اقدامات، براساس با معیارهای اعتباربخشی در پژوهش‌های کیفی (Lincoln و Guba، ۱۹۸۵)، کیفیت یافته‌ها و قابلیت اعتماد به نتایج پژوهش را تقویت کرد.

۲- تحلیل اسنادی

اسناد بالادستی شامل سند چشم‌انداز ۱۴۰۴، برنامه‌های ششم و هفتم توسعه، سند ملی آب، سیاست‌های کلی محیط‌زیست و قانون حفاظت و بهره‌برداری از منابع آب بررسی شدند تا هم‌راستایی پروژه با سیاست‌های کلان ارزیابی شود. مشارکت محلی و ادراک جوامع از پروژه نیز بر اساس دو منبع اصلی فوق یعنی مصاحبه‌های نیمه ساختار یافته و تحلیل اسناد بالادستی نیز گردآوری شد.

- تجزیه و تحلیل داده‌ها

داده‌ها با روش تحلیل تماتیک بر اساس مدل شش مرحله‌ای [Clarke و Braun \(۲۰۰۶\)](#) تحلیل شدند، این شش مرحله عبارت‌اند از: (۱) آشنایی با داده‌ها از طریق مطالعه مکرر، (۲) کدگذاری اولیه جملات کلیدی، (۳) جستجوی مضامین، (۴) بازبینی و پالایش مضامین، (۵) تعریف و نام‌گذاری مضامین و (۶) تدوین گزارش نهایی. همچنین در این فرآیند از نرم‌افزار MAXQDA برای سازماندهی و کدگذاری داده‌ها به ترتیب مراحل زیر استفاده شد.

۱- معرفی فرآیند کدگذاری

این تعداد مصاحبه با حداکثر تنوع در ۵ خوشه ذی‌نفعان (دولت، صنعت، دانشگاه، سازمان‌های مردم‌نهاد و جامعه محلی) هم‌خوانی دارد، هر خوشه با ۱ تا ۳ نماینده پوشش داده شد تا تنوع دیدگاه‌ها برای استخراج کدها تضمین شود. در خوشه جوامع محلی، به‌منظور پوشش هر دو سوی پروژه، با دو مطلع (یکی از ساکنان محلی یزد به‌عنوان مقصد و دیگری از ساکنان محلی بندرعباس به‌عنوان مبدأ) مصاحبه شد. باتوجه به هم‌پوشانی محتوایی و نزدیکی دیدگاه‌های آنان (هر دو موضع بینابین داشتند)، داده‌های این دو مصاحبه به‌صورت یک واحد تحلیلی کدگذاری و در جدول (۱) گزارش شده است؛ از این‌رو تعداد کل مصاحبه‌ها همچنان ۱۰ در نظر گرفته شد. فرآیند کدگذاری در نرم‌افزار MAXQDA نشان داد از مصاحبه نهم به بعد، کد جدیدی استخراج نشد، که نشانه رسیدن به اشباع نظری/کدی بود، یعنی داده‌های جدید اطلاعات نو یا متفاوتی به تحلیل اضافه نکردند ([Saunders و همکاران، ۲۰۱۸](#)). برای اطمینان از جامعیت داده‌ها، مصاحبه دهم انجام شد (مصاحبه دهم شامل دو مطلع محلی (یزد و بندرعباس) در قالب یک واحد تحلیلی بود که کد جدیدی تولید نکرد، اما به کامل شدن داده‌های مربوط به جامعه محلی افزود) تا از عدم از دست رفتن مضامین احتمالی اطمینان حاصل شود. این رویکرد با مطالعات کیفی مشابه که دامنه ۶ تا ۲۰ مصاحبه را برای تحلیل تماتیک پیشنهاد می‌کنند و اغلب در ۸ تا ۱۵ مصاحبه به اشباع کدی می‌رسند، هم‌خوانی دارد ([Guest و همکاران، ۲۰۰۶](#)).

برای ارتقای اعتبار و اعتمادپذیری یافته‌ها، روش‌های متعددی به‌کار گرفته شد. نخست، مثلث‌بندی داده‌ها با ترکیب داده‌های مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته و تحلیل اسناد بالادستی (مانند سند چشم‌انداز ۱۴۰۴، برنامه‌های توسعه و سند ملی آب) انجام شد تا یافته‌ها از منابع مختلف تأیید شوند و از یک‌جانبه‌گرایی جلوگیری شود ([Denzin، ۲۰۱۷](#)). دوم، بازبینی توسط مشارکت‌کنندگان با ارائه خلاصه‌ای از کدها و مضامین استخراج شده به برخی مصاحبه‌شوندگان

در ابتدا متن مصاحبه‌ها در نرم‌افزار MAXQDA وارد شد و در سه مرحله کدگذاری باز، محوری و انتخابی تحلیل گردید. در مرحله نخست، کدهای باز از دل داده‌ها استخراج شدند و سپس در قالب حوزه‌های محوری گروه‌بندی شدند. در نهایت این حوزه‌ها در سطح انتخابی به چهار کد اصلی پژوهش (حکمرانی و شفافیت، تعارض منافع، ریسک محیط‌زیستی و عدالت اجتماعی) تجمیع شدند.

۲- ارائه جدول کتابچه کدها

برای شفافیت بیشتر، در جدول (۲) نمونه‌ای از کدهای استخراج شده همراه با تعریف عملیاتی و نقل‌قول‌های مرتبط از مصاحبه‌شوندگان ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد چگونه مفاهیم خام مصاحبه‌ها به کدهای باز و سپس به حوزه‌های محوری و انتخابی تبدیل شده‌اند.

جدول ۲- کتابچه کدها

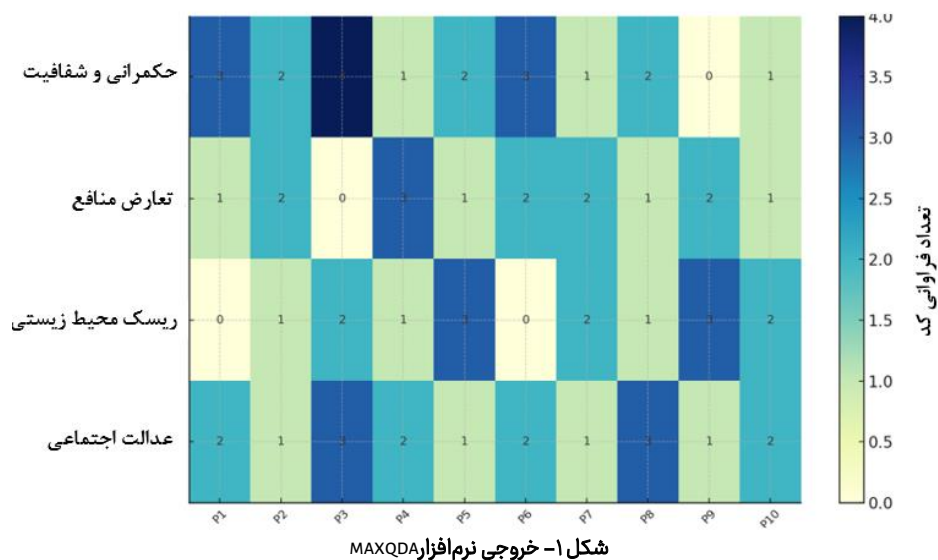
کد انتخابی	کد محوری	کد باز	نمونه نقل‌قول از مصاحبه
حکمرانی و شفافیت	شفافیت ناکافی	عدم شفافیت اطلاعاتی	ما هیچ گزارشی از هزینه‌های واقعی پروژه ندیدیم و فقط آمار کلی اعلام می‌شود، درحالی‌که برای تصمیم‌گیری به جزئیات دقیق نیاز داریم.
	پاسخگویی مبهم	ابهام در نقش نهادها	واقعاً نمی‌دانیم کدام وزارتخانه یا سازمان مسئول پاسخگویی است؛ هر بار که پیگیری می‌کنیم، ما را به نهاد دیگری ارجاع می‌دهند.
تعارض منافع	برتری صنایع مقصد	اولویت صنایع بر نیاز محلی	به نظر می‌رسد همه چیز در این پروژه برای صنایع فولاد و مس طراحی شده و نیازهای مردم محلی کاملاً نادیده گرفته شده است.
	بی‌توجهی به گزینه‌های دیگر	نادیده گرفتن گزینه‌های کم‌هزینه‌تر	هیچ‌وقت به گزینه‌های ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر مثل بازچرخانی آب یا اصلاح الگوی کشت فکر نکردند و مستقیم سراغ انتقال آب رفتند.
ریسک محیط‌زیستی	تهدید اکوسیستم دریایی	نگرانی از پساب شور	اگر این پساب شور دوباره به خلیج فارس برگردد، چه بلایی سر اکوسیستم دریایی و تنوع زیستی آن خواهد آمد؟
	مصرف انرژی بالا	وابستگی به برق فسیلی	این پروژه به اندازه مصرف یک نیروگاه کامل برق نیاز دارد و مشخص نیست این حجم انرژی قرار است از چه منبعی تأمین شود.
عدالت اجتماعی	نابرابری فضایی	تفاوت منافع مبدأ و مقصد	آب از استان ما خارج می‌شود، اما سود و منفعتش به جای دیگری می‌رسد؛ این عادلانه نیست.
	مشارکت محدود	مشارکت صوری مردم	ما فقط برای یک جلسه نمادین دعوت شدیم تا عکس یادگاری بگیرند، اما در تصمیم‌گیری واقعی هیچ نقشی نداشتیم.

۳- ارائه شکل خروجی

شکل (۱) خروجی^۵ CMB نرم‌افزار MAXQDA را نشان می‌دهد که توزیع و بسامد کدهای استخراج شده در میان مصاحبه‌شوندگان را به تصویر می‌کشد. هر ستون بیانگر یک مصاحبه و هر ردیف نمایانگر یکی از مضمون‌های اصلی پژوهش است (حکمرانی و شفافیت، تعارض منافع، ریسک محیط‌زیستی و عدالت اجتماعی). شدت رنگ در هر خانه نشان‌دهنده فراوانی کدگذاری آن مضمون در مصاحبه مربوط به آن است.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تم تعارض منافع و ریسک محیط‌زیستی در اغلب مصاحبه‌ها بیشترین بسامد را داشته است؛ به این معنا که بخش زیادی از گفت‌وگوها به موضوعاتی همچون تضاد میان صنایع و جوامع محلی یا

نگرانی از پیامدهای محیط‌زیستی پروژه اختصاص یافته است. در مقابل، مضمون عدالت اجتماعی و حکمرانی و شفافیت اگرچه در همه مصاحبه‌ها مطرح شده‌اند، اما از نظر فراوانی کمتر از دو مضمون دیگر تکرار شده‌اند. این الگو نشان می‌دهد مناقشات اجتماعی پیرامون پروژه، بیش از همه بر محور تضاد منافع و تهدیدهای محیط‌زیستی متمرکز بوده و مسائل مرتبط با عدالت فضایی و شفافیت نهادی به‌عنوان عوامل زمینه‌ای یا تقویت‌کننده در نظر گرفته می‌شوند. به‌طور کلی، شکل (۱) اهمیت نسبی مضامین پژوهش را به‌صورت بصری آشکار می‌کند و نشان می‌دهد که چگونه دیدگاه‌های مصاحبه‌شوندگان در خصوص ابعاد مختلف توسعه پایدار توزیع شده‌اند. این یافته، مبنای تحلیل‌های تفصیلی در بخش «نتایج و بحث» قرار گرفته است.



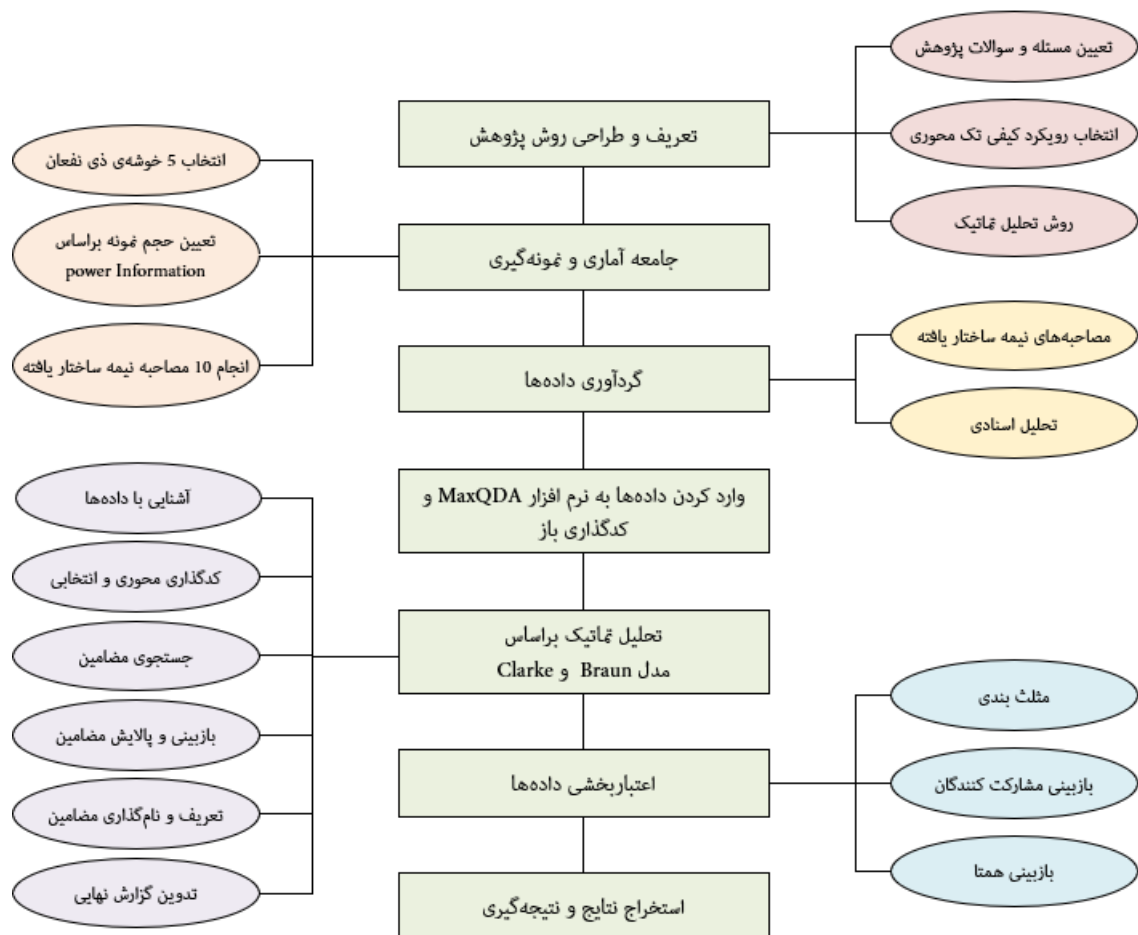
به منظور جمع بندی بخش مواد و روش ها، فلوچارت مراحل پژوهش در شکل (۲) ارائه شده است. این فلوچارت تصویری یکپارچه از روند کلی پژوهش را از ابتدا تا انتها نشان می دهد.

- اعتبار بخشی و روایی

برای اطمینان از اعتبار و اعتماد پذیری یافته ها، مجموعه ای از اقدامات روش شناختی در طول فرایند پژوهش انجام شد. چهار بعد براساس جدول (۳) که برای هر کدام اقداماتی انجام شده است، برای تأیید یافته ها مدنظر قرار گرفت.

جدول ۳- اعتبار بخشی

معیار	اقدامات انجام شده
اعتبار	- نمونه گیری هدفمند با تنوع حداکثری
	- مثلث بندی داده ها
	- بازبینی کدها/ تم ها توسط مشارکت کنندگان
	- مرور یافته ها توسط هم تایان
انتقال پذیری	- توصیف دقیق و غنی از بستر پژوهش و پروژه
	- ارائه نقل قول های مستقیم از مصاحبه شوندگان
	- تبیین شرایط اجتماعی- اقتصادی و نهادی مرتبط
اتکاپذیری	- ثبت و نگهداری مسیر کدگذاری و یادداشت های تحلیلی
	- استفاده از نرم افزار MAXQDA برای انسجام کدگذاری
	- بازبینی درون تیمی جهت کنترل هم خوانی داده ها
تأیید پذیری	- ناشناس سازی داده ها و رعایت محرمانگی
	- مستند سازی تصمیمات پژوهشگر
	- استفاده از شواهد مستقیم (نقل قول ها) برای حمایت از تحلیل ها



شکل ۲- فلوچارت گام‌های پژوهش

نتایج و بحث

مواضع موافق یا مخالف نبوده، بلکه تلاش شده است تمامی دیدگاه‌ها با شفافیت و دقت بازتاب یابد. به همین دلیل، در کنار استدلال‌های مخالفان که گاه پررنگ‌تر و تفصیلی‌تر بیان شده، نظرات موافقان نیز در بخش‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی به‌طور نظام‌مند مطرح شده است.

- بعد اقتصادی

تحلیل مصاحبه‌ها نشان داد که دیدگاه‌های اقتصادی پیرامون پروژه انتقال آب به سه مضمون اصلی قابل تقسیم است: توجیه اقتصادی پروژه، تأثیر بر اشتغال و توسعه صنعت و هزینه فرصت منابع مالی. جدول (۴) دیدگاه‌های مختلف پیرامون این مضامین را نشان می‌دهد.

پروژه انتقال آب خلیج فارس به فلات مرکزی ایران، در ابعاد اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی مناقشه برانگیز است و دیدگاه‌های موافق، مخالف و بینابین در میان ذی‌نفعان مختلف وجود دارد. در این بخش، یافته‌های حاصل از مصاحبه‌های نیمه ساختار یافته با ۱۰ نفر از ذی‌نفعان کلیدی در قالب سه بعد توسعه پایدار ارائه می‌شود. مضامین اصلی از طریق تحلیل تماتیک استخراج شده و دیدگاه‌های موافق، مخالف و بینابینی در هر بخش منعکس شده است. لازم به ذکر است تحلیل دیدگاه‌های ذی‌نفعان در این پژوهش به‌صورت توصیفی و مبتنی بر داده‌های گردآوری شده ارائه شده است. هدف نویسندگان، برجسته‌سازی هیچ‌یک از

جدول ۴- دیدگاه‌های مختلف در بعد اقتصادی

مضمون اصلی	دیدگاه موافقان	دیدگاه مخالفان	دیدگاه بینابین
توجیه اقتصادی پروژه	سرمایه‌گذاری بلندمدت برای امنیت آبی و صنعتی	هزینه سنگین و بازگشت‌پذیری پایین	مشروط به اصلاح ساختار مصرف و بازبینی مسیر انتقال
تأثیر بر اشتغال و توسعه صنعت	پشتیبانی از صنایع استراتژیک و رشد اشتغال	ایجاد وابستگی به آب وارداتی، شغل‌های ناپایدار	نیاز به پیوست صنعتی و بهره‌وری منطقه‌ای
هزینه فرصت منابع مالی	اولویت با نجات صنعت کشور	بهرتر بود منابع صرف اصلاح کشاورزی و بازچرخانی می‌شد.	ترکیبی از هر دو مورد مطلوب است.

همچنین تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که پروژه انتقال آب خلیج فارس از نظر اقتصادی با حمایت‌هایی برای تأمین آب صنایع کلیدی مانند فولاد و مس مواجه است، زیرا این بخش‌ها، نقش مهمی در اشتغال‌زایی و توسعه مناطق مرکزی دارند. مدیران صنعتی بر توجیه اقتصادی پروژه تأکید دارند و آن را گامی برای کاهش وابستگی به منابع آب محلی می‌دانند. با این حال، مخالفان، از جمله کارشناسان اقتصادی، به هزینه‌های سنگین اجرای پروژه (بیش از ۸ میلیارد دلار) و بازگشت‌پذیری پایین آن اشاره کرده‌اند و پیشنهاد داده‌اند منابع بهینه‌سازی مصرف آب یا کشاورزی اختصاص یابد. این تضاد اقتصادی نشان‌دهنده نیاز به ارزیابی دقیق‌تر توجیه‌پذیری و بهره‌وری است. این یافته‌ها حاکی از ناکارآمدی ساختار تصمیم‌گیری است که بدون در نظر گرفتن گزینه‌های جایگزین، به مقاومت ذی‌نفعان منجر شده است. نظریه مدیریت منابع مشترک [Ostrom \(۱۹۹۰\)](#) بر اهمیت همکاری و ارزیابی اقتصادی جامع تأکید دارد که در این پروژه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. شکاف بین هزینه‌های بالا و سودآوری محدود، ناپایداری اقتصادی را برجسته می‌کند که با اصول توسعه پایدار [Brundtland \(۱۹۸۷\)](#) هم‌راستا نیست. از منظر اقتصادی، علاوه بر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی، موضوع قیمت تمام شده آب انتقالی اهمیت دارد.

برآوردها نشان می‌دهد هزینه نمک‌زدایی و انتقال هر مترمکعب آب از خلیج فارس به فلات مرکزی حدود ۴ تا ۵ دلار است، درحالی‌که گزینه‌های جایگزین مانند بازچرخانی پساب صنعتی یا ارتقای راندمان آبیاری کشاورزی می‌توانند با هزینه‌ای به مراتب پایین‌تر تأمین آب کنند ([World Bank Group, ۲۰۲۳](#)). علاوه بر این، بخشی از هزینه‌های واقعی پروژه در قالب یارانه‌های پنهان انرژی و اعتبارات ارزی پوشش داده شده و در محاسبات رسمی منعکس نمی‌شود. بنابراین، قیمت واقعی آب برای صنایع مصرف‌کننده کمتر از ارزش اقتصادی آن است و این مسئله موجب تخصیص نامطلوب منابع می‌شود. از منظر ارزش افزوده و صادرات نیز باید توجه داشت که صنایع آب‌بری همچون فولاد و مس بدون این پروژه لزوماً تعطیل نمی‌شوند؛ زیرا امکان تطبیق با فناوری‌های کم‌آب‌بر (مانند استفاده از سیستم‌های خنک‌سازی خشک یا بازچرخانی آب فرآیندی) وجود دارد؛ لذا ارزیابی اقتصادی پروژه باید در قالب مقایسه‌ای با سناریوهای جایگزین صورت گیرد تا مشخص شود کدام گزینه بیشترین بازده اقتصادی و کمترین هزینه فرصت را دارد. در جدول (۵) مقایسه‌ای کمی و کیفی میان هزینه‌ها و منافع پروژه انتقال آب با سناریوهای جایگزین انجام شده است.

جدول ۵- مقایسه کمی و کیفی میان هزینه‌ها و منافع پروژه انتقال آب با سناریوهای جایگزین

سناریو	هزینه سرمایه گذاری	هزینه عملیاتی سالانه (وابسته به نرخ انرژی و فناوری)	هزینه تمام شده هر متر مکعب آب	فواید اقتصادی	معایب کلیدی	یارانه‌ها و حمایت‌های پنهان
پروژه انتقال آب خلیج فارس	حدود ۸ تا ۱۰ میلیارد دلار	۲۰۰ تا ۴۰۰ میلیون دلار (نگهداری و پمپاژ)	۴ تا ۵ دلار	افزایش ارزش افزوده صنایع فولاد و مس تا ۲۰٪ و صادرات غیرنفتی	وابستگی به آب وارداتی و هزینه تمام شده بالای آب	یارانه انرژی و ارز دولتی
بازچرخانی آب در صنایع	حدود ۱ تا ۳ میلیارد دلار	۵۰ تا ۱۰۰ میلیون دلار (تصفیه و بازیافت)	۱ تا ۲ دلار	حفظ تولید صنایع بدون تعطیلی و افزایش بهره‌وری تا ۳۰٪	نیاز به فناوری (تحریم‌ها مانع ارتقا بهره‌وری)	حداقل یارانه مورد نیاز
کشاورزی با راندمان بالا (بهینه‌سازی آبیاری)	حدود ۲ تا ۴ میلیارد دلار	۱۰۰ تا ۲۰۰ میلیون دلار (فناوری‌های قطره‌ای)	۱/۵ تا ۰/۸ دلار	کاهش مصرف آب تا ۳۰٪ و افزایش تولید محصول تا ۱۵٪	تغییر الگوی کشت سخت برای کشاورزان	یارانه محدود تجهیزات
فناوری‌های کم‌آب‌بر در صنایع	حدود ۳ تا ۵ میلیارد دلار	۱۵۰ تا ۳۰۰ میلیون دلار (انرژی و فناوری)	-	حفظ صادرات و افزایش کارایی تا ۴۰٪	هزینه اولیه بالا و نیاز به واردات فناوری	بدون یارانه مستقیم

جدول ۶- دیدگاه‌های مختلف در بعد اجتماعی

مضمون اصلی	دیدگاه موافقان	دیدگاه مخالفان	دیدگاه بینابین
مشارکت اجتماعی در تصمیم‌گیری	تصمیم کارشناسی، مردم‌محور	پروژه بدون شفافیت و مشارکت اجرا شده است.	نیاز به بازنگری سازوکارهای مشارکت و اطلاع‌رسانی
اثر بر عدالت فضایی و منطقه‌ای	توسعه مناطق محروم مرکزی	تضییع منابع جنوب برای مرکز	نیاز به موازنه عادلانه در تخصیص منافع
پاسخگویی و شفافیت اجرایی	مجریان پاسخگو هستند.	ابهام در قراردادهای، هزینه‌ها و منابع	نیازمند گزارش دهی شفاف دوره‌ای

- بعد اجتماعی

تحلیل بعد اجتماعی مناقشه نشان داد سه مضمون اصلی در این حوزه قابل شناسایی است: مشارکت اجتماعی در تصمیم‌گیری، اثر بر عدالت فضایی و منطقه‌ای و پاسخگویی و شفافیت اجرایی. جدول (۶) خلاصه این یافته‌ها را نشان می‌دهد.

همچنین در بعد اجتماعی، فقدان مشارکت معنادار ذی‌نفعان و مسائل عدالت فضایی از چالش‌های اصلی هستند. جوامع محلی مبدأ (مثل بندرعباس) احساس محرومیت از منابع خود دارند، زیرا آب به مناطق مقصد منتقل می‌شود، درحالی‌که آن‌ها از مزایای بی‌بهره‌اند. نبود شفافیت در فرآیند تصمیم‌گیری و ابهام در هزینه‌ها و قراردادهای بی‌اعتمادی عمومی را تشدید کرده است. موافقان، ازجمله برخی مدیران، بر ضرورت توسعه مناطق محروم تأکید دارند، اما این ادعا بدون مشارکت واقعی ذی‌نفعان اعتبار خود را از دست داده است. این موضوع به تضاد منافع بین ذی‌نفعان (جوامع محلی، صنعت، دولت) برمی‌گردد که با ناکارآمدی ساختارهای تصمیم‌گیری تشدید شده است. پژوهش [Gash و Ansell \(۲۰۰۸\)](#) بر نیاز به گفتگوی چند ذی‌نفعی برای اعتمادسازی

- بعد محیط‌زیستی

تحلیل بعد محیط‌زیستی مناقشه نشان داد سه مضمون اصلی در این زمینه قابل شناسایی است: آسیب به دریا و ساحل جنوب، مصرف انرژی و ردپای کربن و تغییر اکولوژیکی در مقصد. جدول (۷) خلاصه این یافته‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۷- دیدگاه‌های مختلف در بعد محیط‌زیستی

مضمون اصلی	دیدگاه موافقان	دیدگاه مخالفان	دیدگاه بینابین
آسیب به دریا و ساحل جنوب	آسیب ناچیز به منابع دریایی در مقیاس منطقه‌ای	تخریب تنوع زیستی، شوری و گرمای آب	قابل مدیریت با پیوست محیط‌زیستی مؤثر
مصرف انرژی و ردپای کربن	استفاده از انرژی‌های نو برای پمپاژ	وابستگی شدید به برق، تشدید بحران انرژی	نیازمند ارزیابی چرخه عمر و بازطراحی مسیرها
تغییر اکولوژیکی در مقصد	احیای مناطق بی‌آب	احتمال ناپایداری در اکوسیستم خشک	نیاز به مطالعات دقیق پیش از اجرا

همچنین از منظر محیط‌زیستی، پروژه با انتقادات جدی روبه‌رو است. فعالان محیط‌زیست به تخریب تنوع زیستی خلیج فارس به دلیل برداشت آب و پساب شور و مصرف بالای انرژی برای پمپاژ به فلات مرکزی اشاره کرده‌اند؛ که ردپای کربن را افزایش می‌دهد. تغییرات اکولوژیکی در مناطق خشک مقصد نیز ناپایداری اکوسیستم‌ها را به دنبال داشته است. موافقان معتقدند فناوری‌های نوین و انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند اثرات را کاهش دهند، اما فقدان شفافیت در پیوست‌های محیط‌زیستی این ادعاها را زیر سؤال برده است. این یافته‌ها با پژوهش [Doortmans و همکاران \(۲۰۲۲\)](#) هم‌راستا است که چالش‌های محیط‌زیستی پروژه‌های انتقال آب را برجسته کرده است. ناکارآمدی در ارزیابی محیط‌زیستی و عدم هماهنگی با سیاست‌های کلان، شکاف بین اسناد و اجرا را نشان می‌دهد. ناپایداری محیط‌زیستی، باتوجه‌به

آسیب به اکوسیستم‌ها و مصرف انرژی بالا، یکی از موانع اصلی توسعه پایدار است.

- ریشه‌های مناقشه و تحلیل اسناد بالادستی

بر اساس تحلیل داده‌ها، ریشه‌های اصلی مناقشه پیرامون پروژه انتقال آب خلیج فارس را می‌توان در چهار عامل اصلی خلاصه کرد که در جدول (۸) نشان داده شده است. نتایج تحلیل نشان داد عمیق‌ترین لایه مناقشه، تضاد منافع بین استان‌های مبدأ و مقصد و همچنین بین گروه‌های مختلف ذی‌نفع است. این تضاد منافع با نبود شفافیت کافی در سیاست‌گذاری و اجرا تشدید شده است. همچنین، نادیده گرفتن گزینه‌های جایگزین یا مکمل مانند بازچرخانی آب، بهبود راندمان و مدیریت تقاضا، باعث شده تا حامیان رویکردهای دیگر، نسبت به پروژه موضع انتقادی داشته باشند.

جدول ۸- ریشه‌های مناقشه

عامل ریشه‌ای	توضیح
تضاد منافع بین استان‌ها و ذی‌نفعان	نابرابری در بهره‌مندی از منابع آب انتقالی
فقدان سیاست‌گذاری شفاف و پاسخ‌گو	عدم انتشار پیوست‌های مطالعاتی و گزارش‌های عمومی
نبود جایگزین‌سنجی و گزینه‌های مقایسه‌ای	نادیده گرفتن راهکارهایی مانند بازچرخانی و بهینه‌سازی مصرف
نادیده گرفتن پیامدهای تجاری و رقابتی	عدم ارزیابی جامع اثرات بر الگوهای تجاری، رقابت‌پذیری و وابستگی‌های اقتصادی
بی‌اعتمادی عمومی و رسانه‌ای	اطلاعات ناهماهنگ و نگاه سیاسی به پروژه‌ها

نیازمند رویکردی جامع و چندبعدی است که تمامی این عوامل را به صورت هم‌زمان مورد توجه قرار دهد.

- تحلیل تطبیقی اسناد بالادستی مرتبط با پروژه

در کنار تحلیل میدانی، اسناد بالادستی جمهوری اسلامی ایران نیز برای بررسی میزان هم‌راستایی پروژه انتقال آب با سیاست‌های کلان مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج این بررسی در جدول (۹) خلاصه شده است.

نادیده گرفتن پیامدهای تجاری و رقابتی پروژه، عامل جدید شناسایی شده در این پژوهش است که کمتر در مطالعات قبلی مورد توجه قرار گرفته بوده است. این عامل شامل نگرانی‌ها درباره تداوم تکیه بر صنایع آب‌بر، رقابت‌پذیری بین‌المللی، وابستگی اقتصادی جدید و عدم هماهنگی بین سیاست‌های آبی و تجاری کشور است. تحلیل عمیق‌تر نشان می‌دهد این پنج عامل به صورت متقابل بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند و چرخه‌ای از بی‌اعتمادی و تشدید مناقشات ایجاد می‌کنند. به همین دلیل، رفع این مناقشات

جدول ۹- موضع اسناد بالادستی در ابعاد سه‌گانه توسعه پایدار

نام سند	موضع در بعد اقتصادی	موضع در بعد محیط‌زیستی	موضع در بعد اجتماعی
سند چشم‌انداز ۱۴۰۴	تأکید بر توسعه متوازن و امنیت اقتصادی مناطق مرکزی	اشاره ضمنی به حفاظت از منابع طبیعی	تأکید بر عدالت فضایی و توسعه متوازن منطقه‌ای
برنامه ششم توسعه	توسعه صنعت و تأمین آب برای صنایع اولویت‌دار	لزوم اجرای طرح‌ها با رعایت ملاحظات محیط‌زیستی	توسعه مناطق کم‌برخوردار از طریق زیرساخت‌ها
برنامه هفتم توسعه	تأکید بر افزایش بهره‌وری مصرف آب در صنعت و تأمین آب برای فعالیت‌های مولد	لزوم کنترل برداشت بی‌رویه و اجرای پیوست‌های محیط‌زیستی پروژه‌ها	اولویت‌بخشی به مناطق کم‌برخوردار و مشارکت ذی‌نفعان در سیاست‌گذاری منطقه‌ای
سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی	تأکید بر خودکفایی، تولید داخلی و کاهش وابستگی	اشاره کلی به حفاظت از محیط‌زیست	عدالت اجتماعی و کاهش نابرابری‌ها
سند راهبردی توسعه صادرات غیرنفتی	توسعه زنجیره ارزش در صنایع مزیت‌دار	عدم اشاره مستقیم	توسعه متوازن مناطق از طریق صادرات
سیاست‌های کلی محیط‌زیست (۱۳۹۴)	بیان کلی درباره لزوم پایداری منابع اقتصادی	تأکید صریح بر لزوم ارزیابی محیط‌زیستی پیش از اجرای پروژه‌ها	تأکید بر مشارکت عمومی در تصمیم‌گیری‌های محیط‌زیستی و توسعه‌ای
سند ملی آب کشور	تأمین امنیت آبی مناطق بحرانی و خشک‌سالی‌زده	حفاظت از منابع آبی و اکوسیستم‌ها	مدیریت مشارکتی منابع آب با حضور مردم و ذی‌نفعان
قانون حفاظت و بهره‌برداری از منابع آب	استفاده منطقی از منابع برای توسعه اقتصادی	ممنوعیت تخریب منابع طبیعی بدون انجام ارزیابی محیط‌زیستی	مسئولیت اجتماعی دولت در قبال جوامع محلی و لزوم اطلاع‌رسانی شفاف

۳- در حوزه اجتماعی، اسناد بالادستی بر عدالت فضایی، توسعه متوازن و مشارکت ذی‌نفعان تأکید دارند؛ اما یافته‌های مصاحبه‌ها حاکی از ضعف در اجرای این اصول است.

تضاد کلیدی شناسایی شده:

- اسناد آبی: حمایت از ادامه صنایع آب‌بر (فولاد، مس، پتروشیمی)
- اسناد تجاری: تأکید بر حرکت به سمت صادرات با ارزش‌افزوده بالا و کم‌آب‌بر

این ناسازگاری اسناد بالادستی خود یکی از ریشه‌های اصلی مناقشه اجتماعی پیرامون پروژه محسوب می‌شود. در مجموع،

تحلیل تطبیقی اسناد بالادستی نشان داد که:

۱- از نظر اقتصادی، اگرچه تأمین آب برای مناطق کم‌آب در اسناد تأکید شده است؛ اما برنامه هفتم توسعه بر بهره‌وری تأکید دارد و انتقال آب را تنها زمانی مجاز می‌داند که بهره‌وری و بازدهی آن توجیه‌پذیر باشد.

۲- از منظر محیط‌زیستی، تمامی اسناد بر لزوم ارزیابی جامع محیط‌زیستی پیش از اجرای پروژه‌ها تأکید دارند؛ اما شواهد نشان می‌دهد شفافیت کافی در مورد پیوست‌های محیط‌زیستی این پروژه وجود ندارد.

شکاف قابل توجهی بین اصول اعلام شده در اسناد بالادستی و نحوه اجرای پروژه در عمل وجود دارد که نیاز به بازنگری در رویکرد حکمرانی آب کشور را بیشتر نمایان می‌سازد. بررسی اسناد بالادستی نشان داد برداشت‌های متفاوتی از این اسناد امکان‌پذیر است. از یک‌سو، در برخی موارد (مانند سند چشم‌انداز ۱۴۰۴ و برنامه‌های توسعه) می‌توان انتقال آب را در راستای تأمین امنیت آبی و پشتیبانی از صنایع اولویت‌دار تعبیر کرد. این اسناد بر توسعه صنعتی، عدالت منطقه‌ای و تأمین آب برای مناطق کم‌آب تأکید دارند که با نگاه موافق به پروژه هم‌راستا است. از سوی دیگر، همان اسناد با تأکید بر ارزیابی محیط‌زیستی و لزوم بهره‌وری بالا، زمینه‌ای برای نقد و مخالفت با اجرای پروژه در شرایط فعلی فراهم می‌کنند؛ بنابراین، تحلیل این اسناد بسته به زاویه دید و اولویت‌های سیاست‌گذاری می‌تواند هم در جهت حمایت و هم در جهت مخالفت تفسیر شود. پژوهش حاضر تلاش کرده است هر دو دیدگاه را بازتاب دهد و به‌جای داوری نهایی، تضادها و شکاف‌های موجود در سطح اسناد و اجرا را برجسته نماید. هدف اصلی در بخش بعدی ارائه تفسیری عمیق‌تر از مناقشه اجتماعی پیرامون پروژه انتقال آب خلیج فارس و ارائه الگویی برای حکمرانی مشارکتی آن است.

- تضاد منافع بین ذی‌نفعان و ناکارآمدی ساختار تصمیم‌گیری

یافته‌های پژوهش نشان داد پروژه انتقال آب خلیج فارس به فلات مرکزی ایران با وجود اهداف توسعه‌ای و صنعتی خود، با مناقشه‌ای عمیق در سطح اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی مواجه است. تحلیل مصاحبه‌ها آشکار کرد در قلب این مناقشه، تضاد منافع بین ذی‌نفعان مختلف قرار دارد. این یافته با نظریه مدیریت منابع مشترک [Ostrom \(۱۹۹۰\)](#) همسو است که بر پیچیدگی تعارضات در منابع مشترک تأکید می‌کند.

مدیران صنعتی و مسئولان اجرایی بیشتر بر نقش راهبردی پروژه در تأمین آب برای صنایع و جلوگیری از مهاجرت تأکید داشتند، درحالی‌که کارشناسان مستقل و فعالان محیط‌زیست بر ناکارآمدی اقتصادی، پیامدهای محیط‌زیستی و نابرابری اجتماعی متمرکز بودند. این تضاد دیدگاه، مصداق از آنچه [Castillo \(۲۰۲۲\)](#) در نظریه "ساختار تعارض در منابع آب" مطرح می‌کند، است که سه سطح تعارض را شناسایی کرده است: تعارض منافع عینی، تعارض روش‌ها و تعارض ارزش‌ها. ناکارآمدی ساختار تصمیم‌گیری در مدیریت این تضاد منافع، یکی از یافته‌های کلیدی پژوهش است. مصاحبه‌شوندگان به فقدان سازوکارهای لازم برای گفتگوی سازنده، مشارکت معنادار و حل اختلاف اشاره داشتند. این یافته با [پژوهش محمدی و کرباسی \(۱۴۰۲\)](#) همخوانی دارد که بر نیاز به مشارکت اجتماعات محلی در طرح‌های انتقال آب تأکید کرده‌اند.

برخلاف اصول هشت‌گانه [Ostrom \(۲۰۱۰\)](#) برای حکمرانی پایدار منابع مشترک، به‌ویژه اصول مشارکت در تصمیم‌گیری،

سازوکارهای حل اختلاف و ساختارهای چندلایه، پروژه انتقال آب خلیج فارس فاقد چنین مکانیسم‌هایی بوده است. این امر منجر به افزایش شکاف بین طرفین مناقشه و افزایش مقاومت اجتماعی شده است.

- شکاف بین اسناد بالادستی و اجرا: مسئله حکمرانی

تحلیل تطبیقی اسناد بالادستی نشان داد اگرچه اصول توسعه پایدار، مشارکت اجتماعی و حفاظت محیط‌زیست در اسناد مختلف مورد تأکید قرار گرفته، اما در اجرای پروژه شکاف قابل توجهی بین این اصول و عملکرد واقعی وجود دارد. این یافته با نتایج پژوهش [Doortmans و همکاران \(۲۰۲۲\)](#) همخوانی دارد که در بررسی ۳۶ پروژه انتقال آب در ۲۲ کشور، به شکاف بین سیاست‌گذاری و اجرا به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی اشاره کرده است.

این شکاف، نشان‌دهنده ضعف در نظام حکمرانی آب کشور است. همان‌طور که [Gash و Ansell \(۲۰۰۸\)](#) در نظریه حکمرانی مشارکتی خود اشاره می‌کنند، گفتگوی مستمر، اعتمادسازی و یادگیری جمعی، عناصر کلیدی برای غلبه بر چنین شکاف‌هایی هستند. درحالی‌که سند ملی آب کشور بر مدیریت مشارکتی منابع آب تأکید دارد، یافته‌های مصاحبه نشان داد مشارکت ذی‌نفعان در تصمیم‌گیری‌ها، محدود و غیر نظام‌مند بوده است. سیاست‌های کلی محیط‌زیست بر لزوم ارزیابی پیش از اجرای پروژه‌ها تأکید می‌کند، اما شواهد نشان می‌دهد شفافیت کافی در مورد نتایج این ارزیابی‌ها وجود نداشته است. این امر با یافته‌های [فدایی تهرانی و ابارشی \(۱۴۰۳\)](#) همسو است که به ضرورت ارزیابی جامع جنبه‌های فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی طرح‌های نمک‌زدایی و انتقال آب اشاره کرده است.

- ناپایداری در ابعاد سه‌گانه: اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی

بعد اقتصادی: هزینه‌های اجرای پروژه انتقال آب خلیج فارس حدود ۸ میلیارد دلار برآورد شده است نشان‌دهنده سرمایه‌گذاری سنگین این طرح است ([فدایی تهرانی و ابارشی، ۱۴۰۳](#)). علاوه بر آن، هزینه‌های سالانه نگهداری و پمپاژ آب نزدیک به ۲۰۰ میلیون دلار در سال تخمین زده می‌شود. درحالی‌که هیچ برنامه مشخصی برای بازدهی مالی پایدار ارائه نشده است. هزینه فرصت این سرمایه‌گذاری نیز قابل توجه است؛ به‌طورمثال، طبق گزارش [World Bank Group \(۲۰۲۳\)](#)، اصلاح الگوی مصرف آب کشاورزی با راندمان فعلی ۳۵ درصد می‌تواند تا ۲۰ درصد از مصرف آب کشور را کاهش دهد؛ سرمایه‌گذاری در این بخش می‌توانست بازده اقتصادی-اجتماعی بیشتری به همراه داشته باشد.

بعد اجتماعی: چالش عدالت فضایی و مشارکت اجتماعی از مهمترین موانع پایداری اجتماعی پروژه است. نتایج مصاحبه‌های میدانی نشان داد حدود ۸۰ درصد از ساکنان محلی بندرعباس معتقد

هستند هیچ منفعت مستقیمی از پروژه دریافت نکرده‌اند، درحالی‌که ۱۰۰ درصد نمایندگان صنایع مقصد (استان‌های یزد و کرمان) تأمین آب صنعتی را یک مزیت جدی برای توسعه خود می‌دانند. همچنین، تنها ۱۰ درصد از فرایندهای تصمیم‌گیری نمایندگانی از جوامع محلی را شامل شده است. این اعداد نشان‌دهنده نابرابری در توزیع منافع و محدودیت در مشارکت معنادار هستند.

بعد محیط‌زیستی:

از منظر محیط‌زیستی، پروژه با چالش‌های جدی مواجه است. برداشت سالانه حدود ۱ میلیارد مترمکعب آب از خلیج فارس و تخلیه شورابه (حدود ۱/۵ میلیون مترمکعب در سال) می‌تواند اکوسیستم‌های دریایی را دچار آسیب کند. فرآیند نمک‌زدایی و پمپاژ آب به فلات مرکزی سالانه حدود ۲/۵ تراوات‌ساعت انرژی الکتریکی مصرف می‌کند (معادل مصرف سالانه یک نیروگاه متوسط در ایران). این مصرف انرژی منجر به انتشار تقریبی ۱/۲ میلیون تن دی‌اکسیدکربن در سال می‌شود. این یافته‌ها با برآوردهای جهانی نیز هم‌خوانی دارد؛ به‌طور متوسط، نمک‌زدایی آب دریا به ۳/۵ تا ۴/۵ کیلووات ساعت انرژی برای هر مترمکعب آب نیاز دارد (Li و همکاران، ۲۰۲۲).

از مناقشه به سوی همکاری: الگوی حکمرانی مشارکتی

الگوی طراحی شده در این پژوهش، ساختار حکمرانی مشارکتی پروژه انتقال آب خلیج فارس را با جزئیات نهادی، سلسله‌مراتب تصمیم‌گیری و روابط عملکردی میان سطوح مختلف سیاست‌گذاری، تصمیم‌سازی و اجرا ترسیم کرده است. این الگو بر مبنای یافته‌های کیفی و تحلیل اسناد بالادستی مبنی بر ضرورت تبیین دقیق‌تر جایگاه نهادها و میزان الزام‌آوری تصمیمات طراحی شده است.

در شکل (۳) ساختار سه‌سطحی حکمرانی (شورای عالی آب کشور، شورای چندذی‌نفعی و دستگاه‌های اجرایی) و فرایندهای ارتباطی مؤثر شامل گفت‌وگوی چندذی‌نفعی، تصمیم‌گیری جمعی و شفافیت اطلاعاتی نمایش داده شده است که به ترتیب به هم‌سوسازی منافع، اعتمادسازی و مشروعیت، و آگاه‌سازی ذی‌نفعان منجر می‌شوند.

در رأس این ساختار، شورای عالی آب کشور به‌عنوان نهاد بالادستی و مرجع سیاست‌گذاری کلان قرار دارد. این شورا وظیفه دارد چارچوب‌های راهبردی و معیارهای پایداری اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی پروژه‌های انتقال آب را تصویب و بر اجرای آن‌ها نظارت کند. در سطح میانی، شورای چندذی‌نفعی به‌عنوان رکن اصلی حکمرانی مشارکتی عمل می‌کند؛ شورایی که زیرمجموعه‌ی شورای عالی آب تعریف شده و موظف است گزارش‌های تحلیلی و ارزیابی‌های خود را به آن شورا ارائه دهد. تصمیمات و پیشنهادهای این شورا، پس از بررسی در شورای عالی آب کشور، برای تصویب نهایی و ابلاغ اجرایی به هیئت دولت ارائه می‌شوند.

اعضای این شورا شامل نمایندگان وزارت نیرو، وزارت صنعت، معدن و تجارت، سازمان حفاظت محیط‌زیست، سازمان برنامه و بودجه، دانشگاهیان، صنایع بزرگ مصرف‌کننده (فولاد و مس)، سازمان‌های مردم‌نهاد و نمایندگان جوامع محلی مبدأ و مقصد است.

این شورا نقش واسط میان نهادهای تصمیم‌گیر ملی و دستگاه‌های اجرایی محلی را ایفا کرده و محور اصلی گفت‌وگوی بین‌بخشی و هم‌سوسازی منافع محسوب می‌شود. همچنین، شورا می‌تواند در تعامل مشورتی با کمیسیون‌های تخصصی مجلس شورای اسلامی (به‌ویژه کمیسیون‌های انرژی و محیط‌زیست)، یافته‌ها و ارزیابی‌های خود را برای تقویت نظارت پارلمانی بر سیاست‌های آبی کشور ارائه نماید.

در سطح اجرایی، دستگاه‌های اجرایی و شرکت‌های تابعه وزارت نیرو (از جمله شرکت‌های آب منطقه‌ای و شرکت‌های بهره‌بردار صنعتی) قرار دارند که مسئولیت اجرای تصمیمات شورا، نظارت میدانی و ارائه‌ی گزارش عملکرد به شورای چندذی‌نفعی را بر عهده دارند.

این ساختار سه‌سطحی موجب می‌شود جریان تصمیم‌گیری از بالا به پایین و جریان پاسخ‌گویی از پایین به بالا به‌صورت هم‌زمان برقرار باشد. از نظر ماهیت الزام‌آوری، تصمیمات شورای چندذی‌نفعی جنبه الزام مشورتی دارند؛ به‌این‌معنی که مصوبات شورا پس از تأیید شورای عالی آب و درج در مصوبات هیئت دولت به تصمیمات الزام‌آور تبدیل می‌شوند.

در نتیجه، شورا نقش نهاد تصمیم‌ساز و هماهنگ‌کننده را ایفا می‌کند که با ایجاد هم‌گرایی میان ذی‌نفعان، زمینه تصمیم‌گیری‌های قانونی و الزام‌آور را در سطوح بالادستی فراهم می‌سازد.

افزون بر تبیین ساختار نهادی، الگوی پیشنهادی بر مجموعه‌ای از شاخص‌های میان‌بهدی پایداری تأکید دارد که از یافته‌های کیفی پژوهش استخراج شده است. این شاخص‌ها پیونددهنده سه بعد اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی هستند و جهت‌گیری تصمیم‌گیری در سطوح مختلف حکمرانی آب را تعیین می‌کنند.

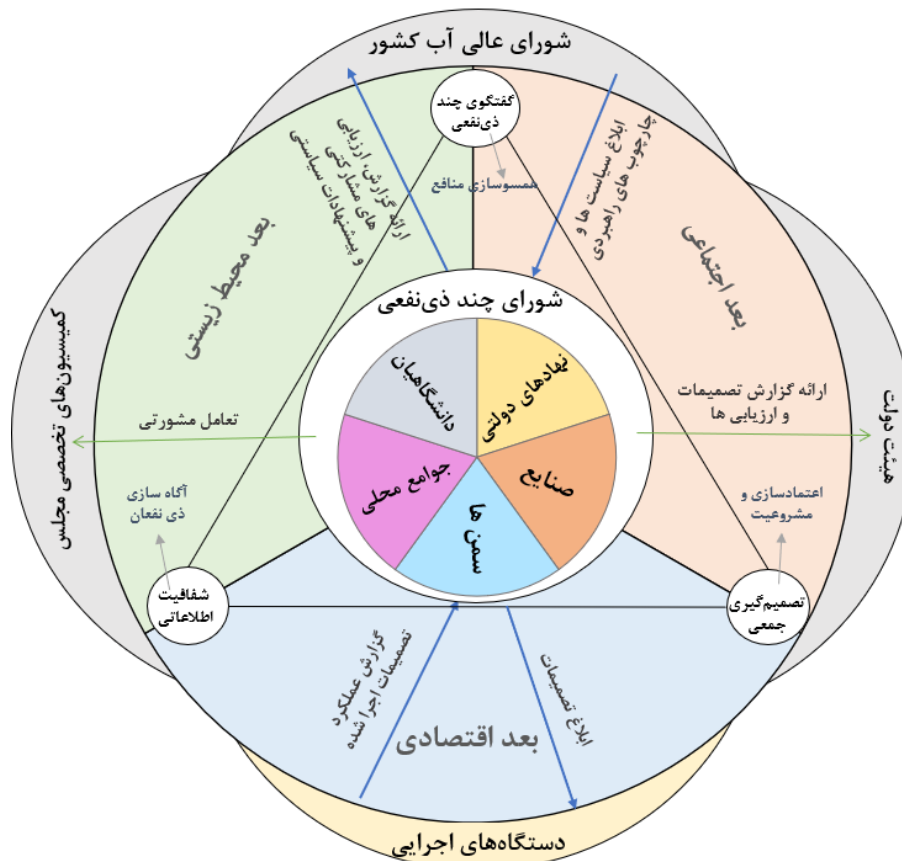
در بخش ارتباطی الگو، پیوند میان مؤلفه‌های فرآیندی و نتایج اجتماعی بر سه رابطه محوری استوار است:

۱) گفت‌وگوی چند ذی‌نفعی به‌عنوان سازوکار اصلی تعامل میان دولت، صنایع، نهادهای مدنی و جوامع محلی عمل می‌کند و زمینه هم‌سوسازی منافع را فراهم می‌سازد؛ گفت‌وگوی مستمر موجب می‌شود تضاد منافع به تفاهم و همکاری تبدیل شود.

۲) تصمیم‌گیری جمعی حاصل تعامل و هم‌فکری ذی‌نفعان در چارچوب شورای چند ذی‌نفعی است و پیامد مستقیم آن اعتمادسازی و مشروعیت‌بخشی به فرآیند حکمرانی است. مشارکت واقعی در تصمیم‌گیری، احساس تعلق و مالکیت نسبت به نتایج را افزایش داده و رضایت اجتماعی را تقویت می‌کند.

۳) شفافیت اطلاعاتی به عنوان یکی از اصول بنیادین حکمرانی خوب، ابزار اصلی آگاه‌سازی ذی‌نفعان از پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی پروژه است؛ انتشار عمومی داده‌ها و گزارش‌های اثرات محیط‌زیستی موجب ارتقای آگاهی، کاهش ابهام و افزایش پاسخ‌گویی نهادی می‌شود.

در مجموع، الگوی پیشنهادی علاوه بر بازنمایی ساختار نهادی حکمرانی آب، منطق درونی تعاملات اجتماعی، اعتمادسازی و تصمیم‌گیری مشارکتی را نیز تبیین می‌کند و به این ترتیب چارچوبی یکپارچه برای تحلیل و بهبود حکمرانی مشارکتی در پروژه‌های بزرگ انتقال آب فراهم می‌سازد.



شکل ۳- الگوی پیشنهادی حکمرانی مشارکتی

- پیامدهای عملی: از نظریه تا عمل

پایاده‌سازی الگوی حکمرانی مشارکتی در عمل، نیازمند تغییراتی در سطوح مختلف حکمرانی آب کشور است:

الف) سطح نهادی: تشکیل شورای چند ذی‌نفعی مدیریت پروژه با حضور نمایندگان همه گروه‌های ذی‌نفع، تدوین آیین‌نامه‌های شفاف برای مشارکت عمومی و ایجاد سازوکارهای حل اختلاف.

ب) سطح اجرایی: بازنگری در مسیرهای انتقال آب با هدف کاهش آسیب‌های محیط‌زیستی و مصرف انرژی، استفاده از فناوری‌های نوین برای کاهش اثرات منفی و اجرای برنامه‌های جبرانی برای جوامع محلی متأثر.

ج) سطح سیاست‌گذاری: تدوین سیاست‌های یکپارچه برای مدیریت منابع آب با رویکرد حوضه‌ای، بازنگری در قیمت‌گذاری آب برای انعکاس ارزش واقعی آن و ادغام راهبردهای مدیریت عرضه و تقاضا.

این تغییرات، نیازمند تعهد سیاسی در سطوح بالای تصمیم‌گیری، ظرفیت‌سازی در سطح جوامع محلی و بخش خصوصی و تغییر در فرهنگ سازمانی نهادهای متولی آب است. همچنین، ضروری است این تغییرات با فرآیندهای پایش و ارزیابی مستمر همراه باشند تا امکان یادگیری و اصلاح در طول زمان فراهم شود.

باتوجه به یافته‌های **هنما و همکاران (۱۴۰۲)** تلفیق سه بعد اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی برای تضمین پایداری توسعه ناشی از انتقال آب ضروری است. به همین منظور، پیشنهاد می‌شود مکانیسمی برای ارزیابی مستمر پایداری پروژه بر اساس شاخص‌های سه‌گانه توسعه پایدار ایجاد شود و نتایج آن به صورت شفاف در اختیار ذی‌نفعان قرار گیرد.

در نهایت، با استناد به مطالعه **Zhang و همکاران (۲۰۲۳)** پیوند آب، انرژی و تجارت باید به عنوان یک چارچوب یکپارچه برای تصمیم‌گیری در نظر گرفته شود. این امر مستلزم همکاری بین بخشی بین وزارتخانه‌های نیرو، صنعت و معدن،

کشاورزی و محیط‌زیست است تا سیاست‌های هماهنگ و منسجمی برای مدیریت پایدار منابع آب تدوین و اجرا شود. یافته‌های پژوهش نشان داد دیدگاه‌های ذی‌نفعان در سه بعد اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی متنوع و گاه متضاد است. موافقان بر اهمیت توسعه صنعتی، تأمین آب صنایع و ایجاد اشتغال تأکید داشتند، درحالی‌که مخالفان بر هزینه‌های سنگین، پیامدهای محیط‌زیستی و بی‌عدالتی اجتماعی اشاره کردند.

توصیه‌های ارائه شده در این پژوهش، حاصل تحلیل داده‌های میدانی و اسناد هستند. به‌عنوان مثال، ضرورت مشارکت ذی‌نفعان نه تنها یک توصیه نظری، بلکه نتیجه مستقیم مصاحبه با جوامع محلی و فعالان صنعتی است که فقدان شفافیت و مشارکت را عامل اصلی بی‌اعتمادی دانسته‌اند. علاوه‌براین، پذیرش حکمرانی مشارکتی تنها یک انتخاب داوطلبانه نیست، بلکه تحت تأثیر مجموعه‌ای از محرک‌ها و الزامات قرار دارد. بی‌توجهی به مشارکت اجتماعی می‌تواند موجب افزایش تعارضات، تأخیر در اجرای پروژه و هزینه‌های مضاعف اقتصادی شود؛ در مقابل، وجود فشارهای اجتماعی، الزامات قانونی و نهادی نظیر سیاست‌های کلی محیط‌زیست، سند ملی آب، مصوبات شورای عالی آب و ماده ۲۷ قانون تأمین مالی توسعه، همراه با نیاز صنایع به کاهش تعارضات و افزایش مشروعیت اجتماعی، همگی زمینه را برای حرکت به سمت الگوی حکمرانی مشارکتی فراهم می‌سازند.

نتیجه‌گیری

پروژه انتقال آب خلیج فارس با طیفی از دیدگاه‌های موافق، مخالف و بینابین مواجه است. حامیان پروژه بر توسعه صنعتی، اشتغال، تأمین امنیت آبی و عدالت منطقه‌ای تأکید دارند، درحالی‌که منتقدان نگرانی‌هایی درباره پیامدهای محیط‌زیستی، هزینه‌های اقتصادی، بهره‌وری و عدالت اجتماعی مطرح می‌کنند. تحلیل اسناد بالادستی نشان داد این اسناد ظرفیت دوگانه دارند و می‌توانند هم مبنای حمایت و هم مبنای نقد پروژه باشند.

تحلیل داده‌ها نشان داد مناقشات ذی‌نفعان در ابعاد اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی، اشتراکاتی مانند تضاد منافع و بی‌اعتمادی عمومی و تفاوت‌هایی در اولویت‌ها دارند. همچنین، شفافیت اطلاعاتی، مشارکت ذی‌نفعان و بسترهای نهادی مناسب از محرک‌های کلیدی پذیرش حکمرانی مشارکتی در پروژه‌های انتقال آب شناسایی شدند.

نوآوری اصلی پژوهش در ارائه یک مدل حکمرانی مشارکتی بومی است که بر شفافیت، گفت‌وگوی چند ذی‌نفعی و تصمیم‌گیری جمعی تأکید دارد. این مدل نه در تضاد با فناوری‌های نوین و توسعه صنعتی است و نه جایگزین آن‌ها؛ بلکه به‌عنوان مکمل، می‌تواند پذیرش اجتماعی، مدیریت تضاد منافع و اثربخشی پروژه‌های بزرگ زیرساختی را افزایش دهد.

تجربه‌های بین‌المللی نیز نشان می‌دهد موفقیت پروژه‌های بزرگ زیرساختی زمانی حاصل می‌شود که فناوری و توسعه صنعتی با حکمرانی مشارکتی و شفافیت نهادی همراه باشند. براین‌اساس، یافته‌های این پژوهش علاوه بر کمک به مدیریت تضادهای اجتماعی در سطح محلی و منطقه‌ای، می‌تواند راهنمای سیاست‌گذاری ملی در حوزه حکمرانی آب و توسعه پایدار باشد. مدل حکمرانی مشارکتی پیشنهادی، با تلفیق شفافیت، مشارکت ذی‌نفعان و تصمیم‌گیری جمعی، می‌تواند پذیرش اجتماعی و اثربخشی پروژه‌های بزرگ را افزایش داده و به کاهش تعارضات اجتماعی کمک کند، بدون آنکه توسعه صنعتی و فناوری‌های نوین را محدود کند.

پیشنهادهای

لازم است پیش از ادامه یا توسعه پروژه، پیوست‌های اجتماعی و محیط‌زیستی تقویت شده و فرآیندهای تصمیم‌گیری به سوی شفافیت و چندصدایی هدایت شود؛ بنابراین، پیشنهادت سیاستی زیر برای بهبود فرآیند تصمیم‌گیری و کاهش مناقشه اجتماعی ارائه می‌شود:

- ۱- الزام‌آوری پیوست‌های اجتماعی و محیط‌زیستی برای تمامی پروژه‌های انتقال آب، با انتشار عمومی نتایج پیش از اجرا؛
- ۲- استقرار نظام ارزیابی مستقل و چندبعدی برای پروژه‌های زیرساختی در سه سطح ملی، منطقه‌ای و محلی؛
- ۳- ایجاد ساختارهای گفت‌وگوی چند ذی‌نفعی شامل ساکنان مبدأ و مقصد، دانشگاهیان، فعالان محیط‌زیست و صنایع؛
- ۴- بازطراحی ساختار حکمرانی آب کشور با تمرکز بر بهره‌وری، بازچرخانی و فناوری‌های کم‌مصرف به‌جای طرح‌های بزرگ‌مقیاس پرهزینه؛
- ۵- تأسیس رصدخانه اجتماعی پروژه‌ها برای سنجش مستمر اعتماد عمومی، پذیرش اجتماعی و آثار اجتماعی-اقتصادی؛
- ۶- پایش مستمر داده‌های علمی و اقلیمی با بهره‌گیری از دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی به‌عنوان بازوی مشورتی دولت. این پژوهش، باوجود تلاش برای جامعیت، با محدودیت‌هایی مواجه بوده است. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به ترکیب محدود جامعه محلی در نمونه‌گیری اشاره کرد؛ هرچند دو مطلع از یزد (مقصد) و بندرعباس (مبدأ) در مصاحبه‌ها مشارکت داشتند، داده‌های آنان به‌صورت یک واحد تحلیلی تلفیق شد و بنابراین نتایج مرتبط با عدالت اجتماعی و مشارکت محلی باید با احتیاط بیشتری تفسیر شوند. همچنین می‌توان به دسترسی محدود به برخی از ذی‌نفعان کلیدی، عدم امکان مشاهده مستقیم فرآیندهای تصمیم‌گیری و دشواری در دستیابی به اطلاعات دقیق مالی و اقتصادی پروژه اشاره کرد. بنابراین، برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود مطالعات کمی برای ارزیابی دقیق‌تر آثار اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی پروژه، بررسی تطبیقی این پروژه با نمونه‌های مشابه در سایر کشورها و پژوهش‌های عملی در زمینه طراحی و آزمون مدل‌های مشارکتی حکمرانی آب انجام شود.

در نهایت، پروژه انتقال آب خلیج فارس به فلات مرکزی ایران، باوجود چالش‌های موجود، می‌تواند با اصلاح رویکرد حکمرانی، بهبود شفافیت و تقویت مشارکت اجتماعی، به الگویی برای مدیریت پایدار منابع آب در کشور تبدیل شود. این امر مستلزم عزم ملی، همکاری بین‌بخشی و تعهد به اصول توسعه پایدار در همه ابعاد اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی است. همچنین پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی با طراحی چارچوب نظری مستقل و صاحب‌ه‌ای گسترده‌تر به تحلیل تفصیلی مشارکت محلی در پروژه‌های انتقال آب بپردازند، زیرا این موضوع ظرفیت نگارش مقاله‌ای جداگانه و کامل را دارد.

سپاسگزاری

این پژوهش مستخرج از رساله دکتری نویسنده اول می‌باشد که با حمایت مالی و علمی مرکز نوآوری، همکاری‌های علمی و دفتر تحقیقات کاربردی فرماندهی انتظامی جمهوری اسلامی ایران (فراجا) انجام شده است. نویسندگان بر خود واجب می‌دانند از همکاری‌ها، راهنمایی‌های تخصصی و پشتیبانی‌های این سازمان، صمیمانه تقدیر و تشکر نمایند.

منابع

- قربانی، مهدی، عوض پور، رضا، و رحیمی، مجید. (۱۴۰۴). تحلیل سیاستی انتقال آب بین‌حوضه‌ای: پیامدهای حکمرانی و عدالت محیط‌زیستی، *مجله حکمرانی طبیبی*، ۲ (۴)، ۱-۲۲.
<https://doi.org/10.22059/jnrg.2026.406650.107>
- محمدی، حمیدرضا، حکیمی خرم، علی، و احمدی، ابراهیم. (۱۳۹۸). امکان سنجی پروژه‌های انتقال آب در ایران. *مجله پژوهش‌های جغرافیای انسانی*، ۲۷ (۱)، ۲۳-۴۵.
<https://doi.org/10.22059/jhgr.2018.248156.1007>
- محمدی، حسین، و کرباسی، علی. (۱۴۰۲). رفتار مصرف‌کنندگان و سیاست‌های بهینه‌سازی مصرف آب در ایران. *پژوهش‌های اقتصادی و توسعه پایدار*، ۲۴ (۲)، ۹۱-۱۱۰.
<https://doi.org/10.22034/ecor.2023.24.2.91>
- Ansell, C., & Gash, A. (2008). Collaborative governance in theory and practice. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 18(4), 543-571.
<https://doi.org/10.1093/jopart/mum032>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77-101.
<https://doi.org/10.1191/1478088706qp0630a>
- Brundtland, G. H. (1987). *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*, Vol 1. Oxford University Press. 1st edition. Oxford, UK.
- Castillo, D. (2022). The structure of conflict in water resources: Competing needs and governance. *Water Policy*, 24(2), 187-203.
<https://doi.org/10.2166/wp.2022.191>
- Denzin, N. K. (2017). *The research act: A theoretical introduction to sociological methods*. Routledge. 1st ed. London, England.
- Doortmans, M., Sinha, P. N., & Bracken, L. (2022). Interbasin water transfer in a changing world: A new conceptual model. *Progress in Physical Geography*, 46(3), 371-397.
<https://doi.org/10.1177/03091333221075911>
- Guest, G., Bunce, A., & Johnson, L. (2006). How many interviews are enough? An experiment with data saturation and variability. *Field Methods*, 18(1), 59-82.
<https://doi.org/10.1177/1525822X05279903>
- Li, Y., Xu, Z., Liu, J., & Chen, X. (2022). Social and ecological implications of the South-North

- حسینی، فاطمه، و کریمی، رضا. (۱۴۰۲). راهکارهای بهینه‌سازی حکمرانی و کاهش تعارضات در پروژه‌های بزرگ زیرساختی آب. *فصلنامه سیاست‌گذاری عمومی*، ۱۹ (۳)، ۳۵-۱۰.
<https://doi.org/10.22059/jppolicy.2023.94632>
- خان‌محمدی، حمید، صدقیان ترک‌نژاد، نرگس، و اصلی‌پور، حسن. (۱۴۰۲). تحلیل عوامل مؤثر بر حکمرانی آب در ایران. *فصلنامه خط‌مشی‌گذاری عمومی*، ۱۴ (۵۰)، ۹۶-۶۴.
<https://doi.org/10.30495/jpp.2023.19321.2541>
- رهبرقاضی، محمودرضا، و طالع‌ی حور، رهبر. (۱۴۰۳). چالش‌های حکمرانی آب در ایران: بررسی علل و پیامدها از منظر داده بنیاد. *فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری عمومی*، ۲۵ (۳)، ۴۵-۶۸.
<https://doi.org/10.22059/jpq.2024.380935.1008>
- رهنما، حمید، زارع، محمد، و احمدی، حمید. (۱۴۰۲). تلفیق ابعاد اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی در پروژه‌های بزرگ انتقال آب. *مجله پژوهش‌های مدیریت منابع طبیبی*، ۱۰ (۱)، ۳۰-۱۱.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.04.020>
- فدایی‌تهرانی، محمد رضا، و ابارشی، مریم. (۱۴۰۳). ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی نمک‌زدایی در سه کشور پیشرو. *نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۹ (۱)، ۷۱-۸۵.

<https://doi.org/10.22112/JWWSE.2023.394456.1>

362

1893-1907. <https://doi.org/10.1007/s11135-017-0574-8>

UN-Water (UN Educational, Scientific and Cultural Organization). (2023). World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water. UNESCO Publishing. Paris, France. <https://www.unwater.org/publications>

World Bank Group. (2023). Water Scarcity and Economic Development: World Bank's Economic Analysis of Water Resource Management. World Bank Group. Washington, DC, USA. <https://www.worldbank.org/en/topic/waterscarcity>

Zhang, L., Xu, Z., Li, Z., & Wang, J. (2023). Participatory approaches in water transfer projects: Governance and sustainability challenges. *Environmental Science & Policy*, 123, 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.05.008>

پی‌نوشت‌ها

- 1- United Nations Water
- 2- Sustainable Development Goals
- 3- MAX ,well Qualitative Data Analysis Software
- 4- Non-Governmental Organization
- 5- Non-Governmental Organization

Water Transfer Project in China. *Ecological Indicators*, 140, 109023. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109023>

Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic inquiry*. Sage. Beverly Hills, CA, United States.

Malterud, K., Siersma, V. D., & Guassora, A. D. (2016). Sample size in qualitative interview studies: Guided by information power. *Qualitative Health Research*, 26(13), 1753-1760. <https://doi.org/10.1177/1049732315617444>

Ostrom, E. (1990). *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*, Vol 1. Cambridge University Press, 1st edition. Cambridge, UK.

Ostrom, E. (2010). Institutional Diversity in the Governance of Common-Pool Resources. In *The Drama of the Commons* (413-429), Vol 1. National Academy Press. 1st edition. Washington, DC, USA.

Rollason, E., Bracken, L. J., Hardy, R. J., & Large, A. R. G. (2022). Interbasin water transfers in a changing world: A new conceptual model. *Progress in Physical Geography*, 46(3), 371-397. <https://doi.org/10.1177/03091333221075911>

Saunders, B., Sim, J., Kingstone, T., Baker, S., Waterfield, J., Bartlam, B., Burroughs, H., & Jinks, C. (2018). Saturation in qualitative research: Exploring its conceptualization and operationalization. *Quality & Quantity*, 52(4),

Design and Validation of a Comprehensive Checklist for Assessing the Quality of Non-Formal Water Education: A Localized Tool for Evaluating Environmental NGOs' Activities

A. Boroumand¹, 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 Disaster Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

* Corresponding Author Email: mjamiri@ut.ac.ir

Received ▶ 03-08-2025
Revised ▶ 07-09-2025
Accepted ▶ 28-10-2025
Available online ▶ 16-03-2026

Abstract

In recent years, Environmental Non-Governmental Organizations (ENGOS) have emerged as key actors in promoting non-formal water education. However, the lack of standardized, context-specific, and multidimensional evaluation tools to assess the quality of Environmental Education (EE) provided by these organizations has created a significant gap in their learning systems and continuous improvement processes. This study aims to design and validate a comprehensive, localized checklist for evaluating the quality of EE in Iranian ENGOS. The research adopted an exploratory mixed-methods approach, conducted in two phases. In the first phase, qualitative content analysis of documents and interviews with 15 experts led to the extraction of a preliminary framework consisting of 7 main criteria and 13 sub-criteria. In the second phase, a modified Delphi technique involving 6 experts was employed for content validation (using CVR and CVI indices), while statistical analysis was used to assess the tool's reliability (via Cronbach's alpha and exploratory factor analysis). The results demonstrated that the final checklist exhibits high reliability ($\alpha = 0.91$) and a coherent factor structure. This tool can be utilized for both internal and external evaluations of the quality of EE provided by ENGOS, offering a robust foundation for enhancing organizational learning, evidence-based decision-making, and strengthening collaboration between governmental and civil institutions.

Keywords: Water Education, Environmental Advocacy, Non-Governmental Organization (NGO), Content Analysis.

طراحی و اعتبارسنجی چکلیست جامع ارزیابی کیفیت آموزش غیررسمی آب: ابزاری بومی برای ارزیابی فعالیت‌های سمن‌های محیط‌زیستی

امیرعلی برومند^۱، محمد جواد امیری^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری برنامه‌ریزی محیط‌زیست، گروه برنامه‌ریزی، مدیریت محیط‌زیست و HSE، دانشکده 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 ▶ ۱۴۰۴/۰۵/۱۲
تاریخ بازنگری ▶ ۱۴۰۴/۰۶/۱۶
تاریخ پذیرش ▶ ۱۴۰۴/۰۸/۰۶
تاریخ انتشار ▶ ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

چکیده

در سال‌های اخیر، نقش سازمان‌های مردم‌نهاد فعال در حوزه آب به‌عنوان بازیگران کلیدی در ترویج آموزش غیررسمی محیط‌زیستی پررنگ‌تر شده است. با این حال، نبود ابزارهای ارزیابی استاندارد، بومی و چندبُعدی برای سنجش کیفیت آموزش‌های ارائه شده توسط این نهادها، موجب شکل‌گیری خلأیی جدی در نظام یادگیری و بهبود مستمر فعالیت‌های آن‌ها شده است. هدف این پژوهش، طراحی و اعتبارسنجی یک چکلیست جامع و بومی‌سازی شده برای ارزیابی کیفیت آموزش آب در سازمان‌های مردم‌نهاد ایرانی است. این پژوهش با رویکرد ترکیبی اکتشافی در دو مرحله انجام شد. در مرحله نخست، با بهره‌گیری از تحلیل محتوای کیفی اسناد و مصاحبه با ۱۵ نفر از خبرگان، الگوی اولیه شامل ۷ معیار اصلی و ۱۳ زیرمعیار استخراج شد. در مرحله دوم، از تکنیک دلفی اصلاح شده با مشارکت ۶ خبره برای اعتبارسنجی محتوایی (با شاخص‌های CVI و CVR) و از تحلیل آماری برای سنجش پایایی ابزار (با آزمون آلفای کرونباخ و تحلیل عاملی اکتشافی) استفاده شد. نتایج نشان داد چکلیست نهایی دارای پایایی بسیار مطلوب ($\alpha = 0.91$) و ساختار عاملی منسجم است. این ابزار می‌تواند برای ارزیابی درونی و بیرونی کیفیت آموزش آب در سمن‌ها به‌کار رود و بستر مناسبی برای ارتقاء یادگیری سازمانی، تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد و تقویت تعامل میان نهادهای دولتی و مدنی فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی: آموزش آب، ترویج محیط‌زیست، سازمان مردم‌نهاد، تحلیل محتوا.

How to cite this article:

Boroumand, A., & Amiri, M.J. (2026). Design and Validation of a Comprehensive Checklist for Assessing the Quality of Non-Formal Water Education: A Localized Tool for Evaluating Environmental NGOs' Activities. Journal of Water and Sustainable Development, 12(4), 63-76. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i4.2508-1446>

توانمندسازی ذی‌نفعان محلی می‌پردازد. ماهیت غیررسمی این آموزش‌ها انعطاف‌پذیری بالایی در محتوا، مخاطب و روش اجرا ایجاد کرده و آن را به ابزاری مؤثر برای جبران کاستی‌های نظام آموزشی کلاسیک و رسیدن به اقشار مختلف جامعه تبدیل می‌کند. طیف وسیع فعالیت‌های این حوزه شامل برگزاری کارگاه‌های آموزشی تخصصی برای ذی‌نفعان محلی و کشاورزان، سازماندهی بازدیدهای میدانی از پروژه‌های الگویی مدیریت آب، اجرای برنامه‌های آگاهی‌بخشی در جوامع محلی و همچنین طراحی و راه‌اندازی کمپین‌های فرهنگی و رسانه‌ای است. هر یک از این روش‌ها با کارکردی خاص، به اشکال گوناگون به ترویج صرفه‌جویی، حفاظت از کیفیت منابع آب، معرفی فناوری‌های کم‌مصرف و نهادینه کردن فرهنگ صحیح مصرف می‌پردازند. این کمپین‌ها با بهره‌گیری از ظرفیت رسانه‌های جمعی و شبکه‌های اجتماعی، سعی در ایجاد گفتمان عمومی و تأثیرگذاری بر افکار جامعه در مقیاسی وسیع‌تر دارند.»

امروز سمن‌های محیط‌زیستی به روش‌های مختلف به تنویر افکار عمومی و جلب مشارکت‌های اجتماعی می‌پردازند، از این‌رو پتانسیل‌های بالقوه و بالفعل این مجموعه‌های مردمی در حوزه‌های مختلف حکمرانی محیط‌زیست دیگر بر کسی پوشیده نیست (شاطری و همکاران، ۱۴۰۰) تا جایی که عالی‌ترین مسئولان محیط‌زیست کشور نیز بر آن اذعان کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، شینا انصاری، معاون رئیس‌جمهور و رئیس سازمان حفاظت محیط‌زیست، در نخستین جلسه کارگروه ملی ارتقای فرهنگ حفاظت محیط‌زیست بر نقش مؤثر انجمن‌ها و تشکل‌های مردمی در آموزش عمومی، فرهنگ‌سازی و حفاظت محیط‌زیست تأکید کرد و گفت: «بدون همراهی و مشارکت آگاهانه و داوطلبانه مردم، حل مسائل محیط‌زیستی کشور ممکن نیست. سازمان حفاظت محیط‌زیست با سابقه‌ای طولانی در تعامل با تشکل‌ها، تقویت همکاری با جامعه مدنی را ضرورتی جدی می‌داند. یکی از کارآمدترین اشکال مشارکت مردمی در قالب تشکل‌های مردمی شکل می‌گیرد. در حفاظت از عرصه‌های طبیعی و مناطق تحت مدیریت، علاوه بر اقدامات حاکمیتی، استفاده از ظرفیت مردم امری راهبردی است، زیرا حفاظت پایدار از طبیعت تنها با همراهی جامعه امکان‌پذیر خواهد بود. همچنین در موضوعاتی مانند جلوگیری از تغییر کاربری‌ها، مقابله با تخریب منابع طبیعی و مدیریت بحران‌های محیط‌زیستی، مشارکت اجتماعی نقشی تعیین‌کننده دارد.» (انصاری، ۱۴۰۴). در این زمینه مطالعه محمدی و همکاران (۱۳۹۹) به خوبی نشان داد آموزش‌های محیط‌زیستی که اکنون سمن‌ها ارائه می‌کنند نمی‌تواند تمامی نیازهای آموزشی شهروندان جهت حفاظت محیط‌زیست را برطرف کند، لذا همان‌طور که امیری و برومند (۱۴۰۴) به روشنی نشان دادند، شناسایی و تعیین شاخص‌های ارزیابی، موجب ارتقاء کیفیت آموزش محیط‌زیستی سمن‌ها خواهد شد. لذا یکی از مسائل

در دوران معاصر، پیچیدگی فزاینده مسائل محیط‌زیست در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی منجر به شکل‌گیری رویکردهایی چندسطحی در مواجهه با این بحران‌ها شده است (Boroumand و همکاران، ۲۰۲۶). در این میان، آموزش آب^۱ به‌عنوان یکی از ارکان توانمندسازی اجتماعی، به ابزاری برای توسعه سرمایه شناختی^۲، ارتقای دانستنی‌ها، نگرش‌ها و رفتارهای محیط‌زیستی^۳ و تسهیل گذار به سمت پایداری اجتماعی-بوم‌شناختی^۴ تبدیل شده است (برومند و کلاهی، ۱۴۰۰؛ ملک‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱؛ امیری و برومند، ۱۴۰۴الف). آموزش آب، صرفاً محدود به انتقال دانش نظری نیست، بلکه حوزه‌ای فراگیر برای پرورش شایستگی‌های بین‌رشته‌ای^۵ و افزایش سواد آبی محسوب می‌شود که حوزه‌های شناختی، عاطفی و رفتاری^۶ را پوشش می‌دهد. از این رو، ضرورت ارزیابی کیفیت این آموزش‌ها از منظر ساختاری، محتوایی و کارکردی^۷، به یکی از دغدغه‌های اساسی نظریه‌پردازان و کنشگران حوزه آموزش محیط‌زیست تبدیل شده است (کلاهی و برومند، ۱۴۰۳؛ برومند و امیری، ۱۴۰۳الف؛ رسولی و همکاران، ۱۳۹۷). در این زمینه، نقش خانواده‌ها (برومند و امیری، ۱۴۰۳ب) و سازمان‌های مردم‌نهاد محیط‌زیستی^۸ در تولید و بازتوزیع دانش بی‌بدیل است (برومند و طباطبائی یزدی، ۱۳۹۸). آن‌ها می‌توانند در میان‌مدت و بلندمدت از طریق آموزش‌های غیررسمی به تغییر نگرش و رفتار جامعه، افزایش حساسیت نسبت به بحران آب و در نهایت مصرف مسئولانه‌تر آب توسط شهروندان کمک کنند و با تکیه بر سرمایه اجتماعی و قابلیت نفوذ در بسترهای فرهنگی بومی، شکاف موجود میان سیاست‌گذاری رسمی و نیازهای واقعی^۹ جامعه را کاهش دهند. بااین‌حال، رویکردهای اجرایی این سمن‌ها غالباً فاقد سازوکارهای ارزیابی نهادینه شده^{۱۰} و عمدتاً مبتنی بر تجارب زیسته، دانش ضمنی و انگیزش داوطلبانه است. نبود شاخص‌های عینی و چارچوب‌های استاندارد، موجب شده است که کیفیت آموزش‌های ارائه شده توسط سمن‌ها دچار ناهمگونی مفهومی و اجرایی شود (کلاهی، ۱۴۰۰؛ ملک‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱؛ امیری و برومند، ۱۴۰۴ج).

باتوجه به ادبیات تخصصی و منابع کلیدی (Fang و همکاران، ۲۰۲۳؛ رسولی و همکاران، ۱۳۹۷؛ امیری و برومند، ۱۴۰۴ب)، در پژوهش حاضر آموزش‌های غیررسمی آب توسط سمن‌ها اینگونه تعریف می‌شود:

«به مجموعه‌ای از فرآیندهای ساختار یافته اما خارج از چارچوب نظام آموزشی رسمی اطلاق می‌شود که با هدف ارتقای سواد آبی، تغییر نگرش و ترویج رفتارهای پایدار در مدیریت منابع و مصارف آب در میان گروه‌های مختلف جامعه هدف اجرا می‌شود. این آموزش‌ها عمدتاً بر پایه رویکردی مشارکتی و نیازمحور استوار بوده و با تکیه بر روش‌های تعاملی، به انتقال دانش بومی و علمی، ظرفیت‌سازی و

بنیادین در این زمینه، فقدان ابزارهای ارزیابی معتبر، قابل تکرار و بومی سازی شده برای سنجش کیفیت برنامه های آموزش آب در سمن ها است.

باوجود تدوین شاخص ها و استانداردهایی در سطح بین المللی، مانند راهنماهای اتحادیه جهانی حفاظت از طبیعت (IUCN)^{۱۱} و چارچوب آموزش برای توسعه پایدار یونسکو (UNESCO)^{۱۲}، این الگوها بیشتر با ساختارهای حکمرانی رسمی و نظام های آموزشی دولتی هم راستا هستند و کمتر به بایسته های نهادی سمن ها و پویایی های غیررسمی آن ها می پردازند (Oe و همکاران، ۲۰۲۲؛ Selçuk و Mercan، ۲۰۲۳). این خلأ معرفتی و اجرایی، باعث شده ارزیابی کیفیت در آموزش های مردم نهاد به سطحی از قضاوت های ذهنی و سلیقه ای تقلیل یابد که فاقد پشتوانه روش شناختی است. افزون بر آن، مفهوم کیفیت در آموزش آب نیز به طور ذاتی مفهومی سیال و زمینه مند (وابسته به زمینه)^{۱۳} است؛ چراکه تحت تأثیر متغیرهایی مانند اهداف برنامه ویژگی های مخاطبان، ابزارهای اجرایی و چارچوب های ارزشی حاکم بر سمن ها قرار دارد. بنابراین، هرگونه چک لیست یا ابزار ارزیابی، نه تنها باید از اعتبار درونی^{۱۴} و قابلیت اعتماد^{۱۵} برخوردار باشد، بلکه باید انعطاف پذیری کافی برای انطباق با تنوع بوم شناختی و فرهنگی فعالیت های سمن ها را داشته باشد. در غیاب چنین ابزارهایی، امکان مقایسه، پایش و ارتقای نظام مند آموزش های آبی در عرصه جامعه مدنی بسیار محدود می شود (Becher، ۲۰۲۴).

از منظر روش شناختی، طراحی چک لیست جامع برای ارزیابی کیفیت آموزش آب در سمن ها مستلزم رویکردی آمیخته^{۱۶} است که بتواند از یک سو مبانی نظری موجود در حوزه کیفیت آموزش، یادگیری تحول گرا^{۱۷} و آموزش مشارکتی را بازخوانی کند و از سوی دیگر، در تعامل با تجربه زیسته کنشگران میدانی و اسناد بالادستی، ساختاری قابل اجرا و بومی شده ارائه دهد. این ترکیب نظری-عملیاتی، امکان تولید ابزاری را فراهم می سازد که انسجام مفهومی، روایی فرهنگی و کارآمدی اجرایی داشته باشد. از سوی دیگر، ارزیابی کیفیت آموزش آب تنها نباید در سطح دروندادها و فرایندها متوقف شود، بلکه باید بر نتایج و تأثیرات میان مدت و بلندمدت نیز تمرکز داشته باشد. چک لیستی که تنها به ارزیابی محتوای آموزشی یا روش های تدریس بسنده کند، نمی تواند بازتاب دهنده کل نگرانه کیفیت برنامه های سمن ها باشد. بنابراین، تدوین این ابزار، نیازمند پوشش طیفی از معیارها از برنامه ریزی آموزشی^{۱۸} تا مشارکت ذی نفعان^{۱۹} و توسعه پایدار درونی نهاد است. درعین حال، باید توجه داشت که مفهوم کیفیت در آموزش آب با اصول عدالت بوم شناختی^{۲۰}، یادگیری میان نسلی^{۲۱} و بازاندیشی انتقادی^{۲۲} پیوند خورده است. این مفاهیم، چنانچه در چک لیست لحاظ نشوند، می توانند باعث تقلیل آموزش آبی به ابزاری سطحی، مناسکی و کم اثر شوند. چک لیستی که این مؤلفه های مفهومی را نادیده می گیرد، نه تنها قادر به سنجش اثربخشی واقعی برنامه ها نخواهد بود،

بلکه در سطح عملکردهای مدیریتی نیز کارآمد نخواهد بود (Fang و همکاران، ۲۰۲۳؛ امیری و برومند، ۱۴۰۴).

پژوهش حاضر، با درک خلأ موجود در فضای ارزیابی آموزش آب در سمن های ایرانی، با هدف طراحی و اعتبارسنجی یک چک لیست جامع، چندبعدی و کاربردی انجام شده است. این چک لیست، ضمن بهره گیری از منابع بین المللی و بومی سازی مفاهیم، در تلاش است تا معیاری عملیاتی برای سنجش کیفیت، انسجام درونی، اثربخشی رفتاری و پایداری فرآیندهای آموزشی ارائه دهد. همچنین، این ابزار می تواند به عنوان سکوی یادگیری سازمانی^{۲۳} برای سمن ها عمل کند و موجب ارتقای حرفه ای در سطح طراحی، اجرا و ارزیابی برنامه های آموزش آب شود. به این ترتیب هدف کلان پژوهش حاضر، فراتر از تدوین صرف یک ابزار ارزیابی، تلاش برای تقویت ظرفیت نهادهای جامعه مدنی در تولید دانش بومی، بازتاب تجارب زمینه ای و مشارکت فعال در توسعه سیاست های عمومی در حوزه آموزش آب است. این چک لیست می تواند نه تنها به عنوان ابزار مدیریتی، بلکه به عنوان بستری برای گفتمان سازی^{۲۴} میان کنشگران، نهادهای آموزشی، سیاست گذاران و دانشگاه ها به کار رود. از این رو، یافته های این پژوهش زمینه ساز توسعه رویکردهای نهادی پایدار و مردم پایه در آموزش آب خواهد بود. همچنین با توجه به ساختار شبکه شکل های محیط زیستی کشور^{۲۵}، این چک لیست می تواند در تعامل با شبکه به مرور مورد استفاده، بازنگری و توسعه قرار گیرد.

روش پژوهش

پژوهش حاضر با رویکردی ترکیبی و با تأکید بر روش شناسی اکتشافی طراحی شده است که هدف آن تدوین و اعتبارسنجی یک چک لیست جامع برای ارزیابی کیفیت آموزش آب در سازمان های مردم نهاد ایرانی است. فرآیند پژوهش در دو مرحله متوالی اجرا شده است: مرحله نخست، کیفی و اکتشافی با تمرکز بر تحلیل محتوای اسناد و مصاحبه با خبرگان و مرحله دوم، کمی و ارزشیابانه با هدف طراحی ساختار نهایی چک لیست و بررسی اعتبار و پایایی آن است. این طراحی دو مرحله ای، امکان استخراج داده های زمینه ای و هم زمان سنجش قابلیت تعمیم ابزار پیشنهادی را فراهم آورده است.

در مرحله نخست، برای شناسایی ابعاد و مؤلفه های بنیادین کیفیت آموزش آب در بستر فعالیت سمن ها، از تحلیل محتوای کیفی قیاسی و استقرایی استفاده شد. داده های اولیه از طریق تحلیل اسناد سیاستی (مانند اسناد فرادست وزارت نیرو و بخشنامه های شرکت های آب منطقه ای، برنامه های یونسکو و چارچوب های اتحادیه جهانی حفاظت از طبیعت) و مصاحبه نیمه ساختاریافته با ۱۵ نفر از خبرگان آموزش محیط زیست، ترویج کشاورزی، علوم و مهندسی آب، مدیران سمن های فعال و اعضای هیئت علمی دانشگاه ها گردآوری شد و با استفاده از کدگذاری سه مرحله ای کدگذاری باز^{۲۶}،

محوری^{۲۷} و گزینشی^{۲۸}، الگوهای مفهومی اولیه برای ساخت چکلیست استخراج شد. در مرحله دوم، به منظور طراحی نهایی چکلیست، از رویکرد تحلیل دلفی اصلاح شده^{۲۹} استفاده شد. نسخه اولیه چکلیست شامل ۷ معیار اصلی و ۲۸ زیرمعیار بود که برای اعتبارسنجی محتوایی به ۶ خبره در حوزه‌های آموزش محیط‌زیست، برنامه‌ریزی آموزشی و مدیریت سمن‌ها ارائه شد. ارزیابی‌ها بر اساس شاخص‌های CVR^{۳۰} و CVI^{۳۱} انجام شد و پس از دو دور بازخوردگیری و تعدیل^{۳۲}، چکلیست به نسخه نهایی با ۷ معیار و ۱۳ زیرمعیار تثبیت شد. برای تحلیل داده‌های این مرحله از نرم‌افزار SPSS و محاسبه میانگین، انحراف معیار و سطح توافق استفاده شد.

برای سنجش پایایی چکلیست، از روش آزمون آلفای کرونباخ^{۳۳} استفاده شد. چکلیست نهایی توسط ۳۰ نفر از اعضای فعال سمن‌های محیط‌زیستی در قالب یک مطالعه آزمایشی تکمیل شد. مقدار آلفای کرونباخ کل ابزار برابر با ۰/۹۱ به دست آمد که نشان‌دهنده پایایی بسیار مطلوب ابزار است. همچنین تحلیل عاملی اکتشافی^{۳۴} برای بررسی ساختار درونی چکلیست انجام شد و شواهد مناسبی از همبستگی درونی زیرمعیارها با معیارهای کلان به دست آمد. در نهایت، انسجام روش‌شناختی پژوهش با رعایت ملاک‌های اعتمادپذیری^{۳۵} کیفی از جمله قابلیت تأیید^{۳۶}، قابلیت انتقال^{۳۷} و وابستگی^{۳۸} تضمین شده است.



شکل ۱- روندنمای پژوهش^۴

همچنین برای افزایش روایی تفسیری^{۳۹}، یافته‌ها با چند تن از مشارکت‌کنندگان به اشتراک گذاشته شد تا دقت در بازنمایی مفاهیم تضمین شود. به این ترتیب چکلیست طراحی شده

علاوه بر پشتوانه نظری و میدانی، اعتبار روان‌سنجی و قابلیت کاربرد در محیط‌های واقعی دارد. در شکل (۱) روند طراحی و اجرای پژوهش به صورت گام به گام نشان داده شده است.

(۱) برنامه‌ریزی آموزشی، (۲) محتوای آموزشی، (۳) روش‌ها و فنون تدریس، (۴) ارزیابی اثربخشی، (۵) مشارکت جامعه، (۶) مدیریت منابع و (۷) توسعه پایدار.

همچنین زیرمعیارها شامل شاخص‌هایی همچون تناسب محتوا و کیفیت علمی، نیازسنجی، طراحی برنامه‌ها، منابع انسانی، زیرساخت‌ها، تنوع روش‌ها، مشارکت فعال، جلب مشارکت‌های مردمی، مدیریت منابع مالی، پایداری برنامه‌ها، سنجش دانش و پایش دانش و رفتار بود (شکل ۲).

تحلیل محتوای اسناد ملی و بین‌المللی مرتبط با آموزش آب، در کنار تحلیل مضمون مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان، به شناسایی اولیه ۷ معیار کلان و ۱۳ زیرمعیار تخصصی برای ارزیابی کیفیت آموزش آب در سازمان‌های مردم‌نهاد انجامید. معیارهای شناسایی شده عبارت بودند از:



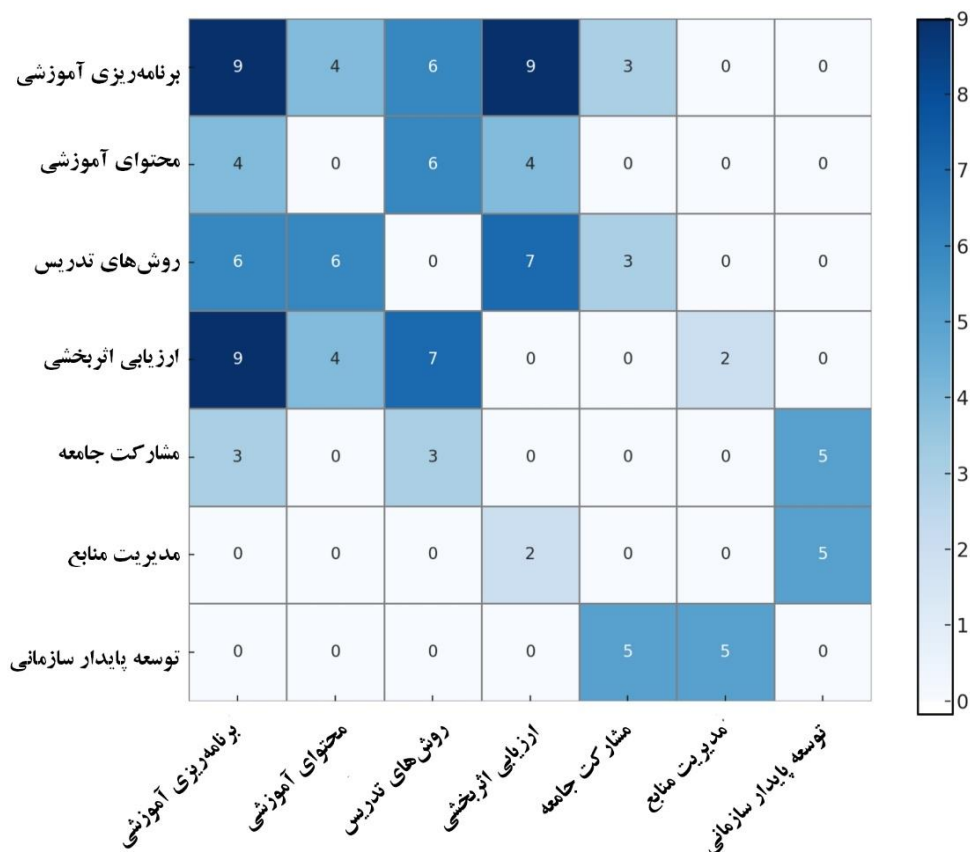
شکل ۲- طرح‌واره گرافیکی معیارها و زیرمعیارهای ارزیابی کیفیت آموزش غیررسمی محیط‌زیست در سمن‌ها

بررسی شد. شاخص نسبت روایی محتوا (CVR) برای هر زیرمعیار بر اساس فرمول لاوشه محاسبه شد. براساس جدول لاوشه برای ۱۲ نفر، حداقل مقدار CVR معنادار برابر ۰/۵۶ است. نتایج نشان داد تمام زیرمعیارها CVR بالاتر از آستانه داشتند (محدوده بین ۰/۶۷ تا ۱/۰۰) که بیانگر توافق جمعی در مورد ضرورت محتوایی آن‌ها است. همچنین شاخص روایی محتوا از منظر شاخص CVI در سه سطح وضوح^{۴۲}، ارتباط^{۴۳} و سادگی^{۴۴} برای هر گویه سنجیده شد. میانگین CVI برای کل ابزار برابر با ۰/۹۱ محاسبه شد که نشان‌دهنده روایی محتوایی مطلوب در طراحی گویه‌ها و معیارهای ابزار است. بازخوردهای کیفی خبرگان نیز منجر به بازنویسی ۷ گویه، حذف ۳ گویه مشابه، حذف و اضافه یک زیرمعیار جدید در زیرمجموعه محتوای آموزشی شد (جدول ۱).

پس از انجام، فرایند کدگذاری سه‌مرحله‌ای باز، محوری و گزینشی، نقشه هم‌وقوعی مفاهیم^{۴۱} (شکل ۳) نشان داد که بالاترین هم‌پوشانی مفهومی میان "برنامه‌ریزی آموزشی" و "ارزیابی اثربخشی" وجود دارد، که به‌طور معناداری نشان‌دهنده همبستگی طراحی و سنجش در کیفیت آموزش است. همچنین تحلیل بسامد مفاهیم نشان داد سمن‌ها بیشترین تمرکز محتوایی را بر حوزه آموزش عملی، تعاملات محلی و انعطاف‌پذیری آموزشی دارند که بیانگر ماهیت کاربردی و زمینه محور فعالیت‌های آنان است.

تحلیل روایی محتوا

نسخه اولیه چک‌لیست توسط ۱۵ نفر از خبرگان دانشگاهی و فعالان با سابقه سمن‌های محیط‌زیستی در دو دور دلفی



شکل ۳- نقشه هم‌رخدادی هفت معیار اصلی ارزیابی کیفیت آموزش غیررسمی محیط‌زیست در سمن‌ها (شدت رنگ‌ها نمایانگر میزان هم‌وقوعی مفاهیم است).

جدول ۱- نتایج تحلیل روابی محتوا CVR و CVI برای معیارهای چک‌لیست

معیار	تعداد گویه‌ها	توافق خبرگان (%)	CVI میانگین	محدوده CVR	CVR میانگین
برنامه‌ریزی آموزشی	۲۴	۹۶	۰/۹۴	۱/۰۰ - ۰/۸۵	۰/۹۲
محتوای آموزشی	۱۲	۹۲	۰/۹۱	۱/۰۰ - ۰/۷۸	۰/۸۹
روش‌ها و فنون تدریس	۱۲	۹۰	۰/۸۹	۱/۰۰ - ۰/۷۵	۰/۸۷
ارزیابی اثربخشی	۱۲	۸۸	۰/۸۸	۰/۹۲ - ۰/۶۷	۰/۸۵
مشارکت جامعه	۶	۸۵	۰/۸۶	۰/۹۰ - ۰/۷۰	۰/۸۲
مدیریت منابع	۶	۸۳	۰/۸۴	۰/۸۹ - ۰/۶۷	۰/۸۰
توسعه پایدار	۶	۸۴	۰/۸۵	۰/۹۲ - ۰/۷۰	۰/۸۱

سنجش پایایی و ساختار نهایی چک‌لیست

برای بررسی پایایی ابزار، چک‌لیست نهایی در یک مطالعه آزمایشی با مشارکت ۳۰ نفر از اعضای سمن‌های فعال در حوزه آموزش آب در استان‌های تهران، خراسان رضوی، فارس و گیلان اجرا شد. ملاک انتخاب این استان‌ها تنوع جغرافیایی، وجود سمن‌های فعال در حوزه آب و دسترسی پژوهشگران به اعضای فعال و کنشگران این سمن‌ها بود. تحلیل داده‌ها با استفاده از آزمون آلفای کرونباخ نشان داد میزان پایایی برای کل ابزار برابر با ۰/۹۱ است. همچنین پایایی در سطح معیارها نیز بین ۰/۷۶ تا ۰/۸۹ گزارش شد همه در سطح قابل قبول

($\leq 0/70$) قرار دارند. این یافته‌ها حاکی از انسجام درونی مناسب و ثبات ابزار در سنجش مفاهیم مورد نظر است (جدول ۲).

به‌منظور تحلیل ساختار عاملی، از تحلیل عاملی اکتشافی با استفاده از روش مؤلفه‌های اصلی و چرخش واریمکس^{۴۵} بهره‌گیری شد. شاخص کفایت نمونه‌گیری KMO برابر با ۰/۷۹ و آزمون کرویت بارلت معنادار ($Sig < 0/001$) بود که شرایط اجرای تحلیل عاملی را تأیید کرد. نتایج، تأیید کننده ساختار هفت‌عاملی ابزار و انطباق مناسب زیرمعیارها با عوامل کلان بود (جدول ۳).

جدول ۲- نتایج پایایی چک لیست بر اساس آزمون آلفای کرونباخ

معیار	تعداد گویه‌ها	ضریب آلفای کرونباخ	تفسیر
برنامه‌ریزی آموزشی	۲۴	۰/۸۹	پایایی بسیار مطلوب
محتوای آموزشی	۱۲	۰/۸۵	پایایی مطلوب
روش‌ها و فنون تدریس	۱۲	۰/۸۴	پایایی مطلوب
ارزیابی اثربخشی	۱۲	۰/۸۲	پایایی مطلوب
مشارکت جامعه	۶	۰/۷۸	پایایی قابل قبول
مدیریت منابع	۶	۰/۷۶	پایایی قابل قبول
توسعه پایدار	۶	۰/۷۹	پایایی قابل قبول
کل چک لیست	۷۸	۰/۹۱	پایایی بسیار مطلوب

جدول ۳- نتایج تحلیل عاملی اکتشافی برای ساختار چک لیست

مؤلفه	مقدار ویژه	واریانس تبیین شده (%)	واریانس تجمعی (%)	بارهای عاملی (محدوده)	تعداد گویه‌های نگهداشته شده
برنامه‌ریزی آموزشی	۵/۸۲	۲۲/۴	۲۲/۴	۰/۶۵ - ۰/۸۲	۲۴
محتوای آموزشی	۳/۱۵	۱۵/۷	۳۸/۱	۰/۵۸ - ۰/۷۹	۱۲
روش‌های تدریس	۲/۹۱	۱۲/۳	۵۰/۴	۰/۵۴ - ۰/۷۶	۱۲
ارزیابی اثربخشی	۲/۴۳	۱۰/۱	۶۰/۵	۰/۵۱ - ۰/۷۲	۱۲
مشارکت جامعه	۱/۸۷	۸/۵	۶۹/۰	۰/۴۸ - ۰/۶۸	۶
مدیریت منابع	۱/۶۵	۷/۲	۷۶/۲	۰/۴۵ - ۰/۶۴	۶
توسعه پایدار	۱/۵۲	۶/۸	۸۳/۰	۰/۴۳ - ۰/۶۱	۶

ساختار نهایی چک لیست

در نهایت، چک لیست طراحی شده شامل ۷ معیار اصلی، ۳۴ زیرمعیار و ۹۶ گویه ارزیابی است که در قالب طیف لیکرت پنج‌درجه‌ای (از بسیار ضعیف (کاملاً ناموفق) تا بسیار قوی (کاملاً موفق)) تدوین شده است. این ابزار قابلیت استفاده در دو سطح «خودارزیابی داخلی» توسط سمن‌ها و «ارزیابی بیرونی» توسط نهادهای ناظر یا تسهیل‌گران مستقل را دارد.

ساختار چک لیست به گونه‌ای طراحی شده که بتواند طیفی از عملکردهای آموزشی از سطح پایه تا سطح حرفه‌ای را پوشش دهد. همچنین راهنمای تفسیر نمرات، سطح‌بندی کیفیت (پایین، متوسط، مطلوب، پیشرو) و پیشنهادهای بهبود در نسخه نهایی گنجانده شده است. جدول (۴) مشخصات فنی و چارچوب کلی چک لیست تهیه شده را نشان می‌دهد. در جدول (۵) نسخه نهایی چک لیست جامع ارزیابی آموزش غیررسمی محیط زیست در سمن‌ها ارائه شده است.

جدول ۴- مشخصات فنی چک لیست تهیه شده

معیار	تعداد گویه‌ها	نسبت گویه به کل (به درصد)	وزن اولیه	وزن نرمال شده	توضیحات
برنامه‌ریزی آموزشی	۲۴	۳۳/۳ %	۳	۰/۲۵	اساسی‌ترین بخش با بیشترین تأثیر
محتوای آموزشی	۱۲	۱۶/۷ %	۲	۰/۱۶۷	محور اصلی کیفیت آموزش
روش‌های تدریس	۱۲	۱۶/۷ %	۲	۰/۱۶۷	تعیین‌کننده اثربخشی
ارزیابی اثربخشی	۱۲	۱۶/۷ %	۲	۰/۱۶۷	سنجش نتایج
مشارکت جامعه	۶	۸/۳ %	۱	۰/۰۸۳	درگیرسازی ذی‌نفعان
مدیریت منابع	۶	۸/۳ %	۱	۰/۰۸۳	کارایی عملیاتی
توسعه پایدار	۶	۸/۳ %	۱	۰/۰۸۳	استمرار فعالیت‌ها

جدول ۵- چک‌لیست جامع ارزیابی آموزش آب در سمن‌ها

معیارها		گویه	امتیازدهی				
معیار	زیرمعیار		بسیار قوی (کاملاً موفق)	قوی (موفق)	نظری ندارم	ضعیف (ناموفق)	بسیار ضعیف (کاملاً ناموفق)
برنامه‌ریزی آموزشی	نیازسنجی	محتوای آموزشی با نیازهای دقیق جامعه محلی تطابق کامل دارد.					
		مسائل محیط‌زیستی منطقه به دقت شناسایی و تحلیل شده‌اند.					
		همه ذی‌نفعان کلیدی در فرآیند نیازسنجی مشارکت داشته‌اند.					
		سطح دانش پایه مخاطبان به درستی ارزیابی شده است.					
		تفاوت‌های فرهنگی جامعه در طراحی برنامه در نظر گرفته شده است.					
	طراحی برنامه	برنامه آموزشی با اسناد بالادستی محیط‌زیستی کشور هماهنگ است.					
		اهداف آموزشی به صورت SMART (ویژه، قابل اندازه‌گیری، دست‌یافتنی، مرتبط، زمان‌دار) تعریف شده‌اند.					
		محتوای آموزشی از تنوع و جامعیت کافی برخوردار است.					
		برنامه زمان‌بندی واقع‌بینانه و قابل اجرا طراحی شده است.					
		منابع و بودجه لازم به درستی تخصیص یافته است.					
	منابع انسانی	مکانیسم‌های ارزیابی اثربخشی به دقت طراحی شده‌اند.					
		برنامه مدیریت ریسک برای شرایط غیرمنتظره تهیه شده است.					
		مربیان از صلاحیت‌های حرفه‌ای و تخصص کافی برخوردارند.					
		نسبت تعداد مربیان به مخاطبان متناسب است.					
		برنامه‌های مستمر توانمندسازی مربیان اجرا می‌شود.					
محتوای آموزشی	زیرساخت	از مشارکت کارشناسان محلی به خوبی استفاده می‌شود.					
		داوطلبان آموزش دیده به اندازه کافی در برنامه مشارکت دارند.					
		سیستم پایش و ارزیابی عملکرد مربیان اثربخش است.					
		محل برگزاری برنامه‌ها از شرایط مناسب برخوردار است.					
		پشتیبانی فنی و لجستیکی مناسبی وجود دارد و تجهیزات آموزشی کافی و باکیفیت تأمین شده است.					
	تناسب محتوا	امکانات ویژه برای افراد با نیازهای خاص در نظر گرفته شده است.					
		ایمنی و بهداشت محیط کاملاً رعایت می‌شود.					
		مدیریت سبز اعم از کاهش مصرف پلاستیک یکبارمصرف، توجه به آب مجازی و ردپای کربن در پذیرایی و تبلیغات، و مدیریت مصرف منابع در اجرای برنامه‌های آموزشی مدنظر است.					
		دسترسی به محل برگزاری برای همه گروه‌ها به نحو آسان میسر است.					
		محتوای آموزشی دقیقاً متناسب با نیازهای محلی طراحی شده است.					
	کیفیت علمی	مسائل روز و چالش‌های جدید محیط‌زیستی پوشش داده شده‌اند.					
		تلفیق مناسبی بین دانش بومی و علمی ایجاد شده است.					
		تفاوت‌های جنسیتی در طراحی محتوا در نظر گرفته شده است.					
		محتوا برای گروه‌های سنی مختلف مناسب‌سازی شده است.					
		مثال‌ها و موارد مطرح شده با زندگی روزمره مخاطبان مرتبط است.					
روش‌ها و فنون تدریس	تنوع روش‌ها	همه مطالب به منابع معتبر و به‌روز استناد داده‌اند.					
		محتوای آموزشی به صورت مستمر به‌روزرسانی می‌شود.					
		اطلاعات ارائه شده از صحت علمی کامل برخوردارند.					
		عمق مطالب با سطح دانش مخاطبان متناسب است.					
		دیدگاه‌های مختلف به صورت متعادل ارائه شده‌اند و اطلاعات با شفافیت کامل در اختیار مخاطبان قرار می‌گیرد.					
	۵. سایر	از سخنرانی‌های تعاملی به جای روش‌های یک‌طرفه استفاده می‌شود.					
		کارگاه‌های عملی بخش اصلی برنامه آموزشی را تشکیل می‌دهند.					
		بازدیدهای میدانی به‌صورت منظم و هدفمند برگزار می‌شوند.					
		از بازی‌وارسازی برای تقویت یادگیری کودکان و از روش داستان‌سرایی برای بزرگسالان استفاده می‌شود.					
		بحث‌های گروهی و تبادل نظر تشویق می‌شود.					
		پروژه‌های مشارکتی بخش مهمی از فرآیند یادگیری است.					
		مخاطبان در فرآیند یادگیری مشارکت فعال دارند.					

ارزیابی اثربخشی	سنجش دانش	فرصت‌های کافی برای بیان نظرات شخصی فراهم است.			
		فعالیت‌های گروهی به خوبی سازماندهی شده‌اند.			
		یادگیرندگان در قبال یادگیری خود احساس مسئولیت می‌کنند.			
		از روش‌های خودارزیابی به طور مؤثر استفاده می‌شود.			
		بازخوردهای مستمر به بهبود یادگیری کمک می‌کند.			
	سنجش نگرش و رفتار	از پیش‌آزمون و پس‌آزمون برای سنجش یادگیری استفاده می‌شود.			
		پرسش‌های تحلیلی و تفکر انتقادی در ارزیابی‌ها گنجانده شده است.			
		پروژه‌های تحقیقی بخشی از فرآیند ارزیابی است.			
		ارائه‌های علمی مخاطبان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.			
		از آزمون‌های عملکردی برای سنجش مهارت‌ها استفاده می‌شود.			
مشارکت جامعه	جلب مشارکتهای مردمی	سطح درک مطلب مخاطبان به دقت ارزیابی می‌شود.			
		پرسشنامه‌های استاندارد سنجش نگرش به کار گرفته می‌شود.			
		مصاحبه‌های کیفی برای درک تغییرات نگرشی و رفتاری انجام می‌شود.			
		رفتار مخاطبان در طول برنامه به دقت مشاهده می‌شود.			
		محتوای گفتار و تعاملات مخاطبان تحلیل می‌شود.			
		از روش‌های ارزشیابی مشارکتی استفاده می‌شود.			
		مخاطبان در فرآیند خودارزیابی نگرش مشارکت دارند.			
		همه ذینفعان کلیدی به درستی شناسایی شده‌اند.			
		روش‌های مؤثری برای جذب داوطلبان به کار گرفته می‌شود.			
		برنامه‌های ترویجی به خوبی سازماندهی شده‌اند.			
مدیریت منابع	مدیریت منابع مالی	کمپین‌های آگاهی‌بخش تأثیرگذاری بالایی دارند.			
		شبکه‌سازی اجتماعی به صورت فعال انجام می‌شود.			
		همکاری مؤثری با رسانه‌های محلی وجود دارد.			
		منابع درآمدی متنوع و پایدار هستند.			
		گزارش‌های مالی با شفافیت کامل ارائه می‌شوند.			
		هزینه‌ها با کارایی بالا مدیریت می‌شوند.			
		برنامه‌ریزی مالی بلندمدت وجود دارد.			
		از روش‌های نوین جذب سرمایه استفاده می‌شود.			
		ریسک‌های مالی به دقت مدیریت می‌شوند.			
		برنامه‌ریزی بلندمدت با چشم‌انداز واضح وجود دارد.			
توسعه پایدار	بایداری برنامه‌ها	منابع مالی به گونه‌ای تأمین می‌شود که استقلال سازمان حفظ شود.			
		نیروی انسانی به صورت پایدار جذب و نگهداری می‌شود.			
		فرهنگ نوآوری در سازمان نهادینه شده است.			
		برنامه‌ها به طور پیوسته مستندسازی و فرآیندها و نتایج برنامه‌های آموزشی ثبت و ضبط می‌شوند.			
		سیستم‌های ارزیابی مستمر عملکرد وجود دارد و برنامه‌ها توانایی انطباق با تغییرات محیطی را دارند.			

نتایج و بحث

۲۰۰۸) و آموزش مکان‌مبنا^{۴۷} (Ito و Igano، ۲۰۲۰؛ Stickney،

۲۰۲۰؛ برومند و امیری، ۱۴۰۳ الف) طراحی شده است.

مقایسه ساختار طراحی شده با الگوهای بین‌المللی مانند چارچوب آموزش برای توسعه پایدار یونسکو (Oe و همکاران،

۲۰۲۲) و مدل‌های مفهومی پژوهشگرانی همچون Fang و همکاران (۲۰۲۳) نشان می‌دهد ابزار حاضر هم‌راستا با

جهت‌گیری‌های کلان جهانی در آموزش آب است، اما درعین‌حال ویژگی‌های بومی خود را نیز حفظ کرده و باتوجه‌به تجربیات محلی و ملاحظات فرهنگی-اجتماعی سمن‌های ایرانی توسعه یافته است.

در بعد عملیاتی، یافته‌ها نشان داد بیشترین هم‌پوشانی مفهومی در میان معیارهای «برنامه‌ریزی آموزشی» و «ارزیابی

یافته‌های این پژوهش نشان داد کیفیت آموزش آب در سمن‌ها مفهومی چندبعدی و پیچیده است که باید در بستری از معیارهای ساختاری، محتوایی، اجرایی و ارزشی ارزیابی شود. چک‌لیست نهایی با هفت معیار اصلی و ۱۳ زیرمعیار، تلاشی برای پاسخ به این پیچیدگی مفهومی و ایجاد ابزاری استاندارد، بومی‌سازی شده و کاربردی برای ارزیابی فعالیت‌های آموزشی نهادهای مردم‌نهاد است. این چک‌لیست در بعد نظری، در پیوند با رویکردهای نوین در آموزش آب مانند یادگیری تحول‌آفرین (York، ۲۰۱۴؛ Pérez-Martín و Esquivel-Martín، ۲۰۲۴)، آموزش مشارکتی^{۴۸} (Barrett)،

اثربخشی» وجود دارد. این هم‌پوشانی را می‌توان به‌عنوان نشانه‌ای از اهمیت چرخه یادگیری سازمانی در آموزش آب تحلیل کرد؛ یعنی جایی که طراحی آموزشی، اجرا و ارزیابی به‌صورت یک سیستم باز و بازخوردپذیر عمل می‌کنند. همچنین سهم پایین معیارهایی نظیر «مشارکت جامعه» و «توسعه پایدار نهادی» در ادبیات سمن‌ها، می‌تواند حاکی از غفلت یا کم‌توجهی به ابعاد ساختاری پایداری در اجرای برنامه‌های آموزشی باشد. این مسئله، نیازمند بازاندیشی در رویکردهای رایج آموزش در سمن‌ها و تقویت بعد مشارکت و یادگیری جمعی است.

در بعد نظری، این پژوهش با ترکیب تحلیل محتوای کیفی و فرآیند دلفی، الگویی معتبر برای تولید ابزارهای ارزیابی مشارکتی در حوزه آموزش آب ارائه کرده است. چنان‌که پژوهش‌های هم‌تا [Sterling \(۲۰۱۰\)](#)؛ [Huckle و Sterling \(۲۰۱۴\)](#)؛ [Heiss و Leicht \(۲۰۱۸\)](#) نیز تأکید کرده‌اند، فقدان ابزارهای بومی‌سازی شده با قابلیت ارزیابی منظم در سطح جامعه مدنی، یکی از موانع اصلی در ارتقای کیفیت آموزش آب در کشورهای در حال گذار است. پژوهش حاضر، با تکیه بر مشارکت مستقیم ذی‌نفعان، توانسته است پیوند میان مفاهیم نظری و بایسته‌های عملی را تا حدودی برقرار کند و الگویی برای پروژه‌های مشابه فراهم آورد.

با وجود نقاط قوت فوق، این پژوهش با محدودیت‌هایی نیز مواجه بوده است. نخست آنکه دامنه مشارکت‌کنندگان در مرحله دلفی و آزمون پایایی به استان‌های خاصی محدود شد اما برای توسعه و بهبود این ابزار، باید این چک لیست توسط شبکه سمن‌های محیط‌زیستی کشور در استان‌های مختلف بهره‌برداری و سپس بازنگری شود. همچنین برخی از مفاهیم بنیادین آموزش آب نظیر «یادگیری انتقادی»، «سواد بوم‌شناختی» یا «ارزیابی یادگیری‌محور» در قالب گویه‌های چک‌لیست، به دلیل ملاحظات اجرایی، به‌صورت کامل بازنامی نشده‌اند. با این حال، ساختار انعطاف‌پذیر ابزار طراحی شده، امکان بازنگری و توسعه آن را در آینده فراهم می‌سازد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر با هدف پر کردن خلأ ارزیابی کیفی آموزش آب در نهادهای مردم‌نهاد ایران، به طراحی و اعتبارسنجی یک چک‌لیست جامع، بومی‌سازی شده و مبتنی بر شواهد اقدام کرد. نتایج نشان داد کیفیت آموزش آب در سطح سمن‌ها تنها از مسیر ارزیابی‌های جامع، ساختاریافته و چندبعدی قابل ارتقاء است؛ چراکه فعالیت‌های آموزشی این نهادها در تعاملی پیچیده با بافت اجتماعی، فرهنگی، بوم‌شناختی و نهادی عمل می‌کنند. ابزار طراحی شده در این پژوهش، نه تنها قابلیت شناسایی نقاط قوت و ضعف فعالیت‌های آموزشی را فراهم می‌آورد، بلکه می‌تواند به‌عنوان بستری برای یادگیری سازمانی، مستندسازی تجارب و ارتقای استانداردهای حرفه‌ای در سمن‌ها به‌کار رود.

یافته‌های پژوهش تأکید دارند فرآیندهای ارزشیابی آموزش آب باید به‌گونه‌ای طراحی شود که درکنار پوشش مؤلفه‌های برنامه‌ریزی، محتوا، تدریس، ارزشیابی، مشارکت، منابع و پایداری نهادی، توانایی انطباق با شرایط محلی و ویژگی‌های ذاتی نهادهای مردم‌نهاد را نیز داشته باشد. چک‌لیست طراحی شده، با تأکید بر انعطاف‌پذیری، قابلیت خودارزیابی و ساختار مقیاس‌پذیر، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مرجع برای توسعه الگوهای مدیریت کیفیت در آموزش‌های مردمی عمل کند. از این منظر، این پژوهش سهمی نظری و کاربردی در ادبیات بومی‌سازی ابزارهای ارزیابی در آموزش آب ارائه می‌دهد.

براساس واقعیت‌های میدانی درحال حاضر سوگیری‌های زیادی در محتوای ارائه شده از سمن‌های محیط‌زیستی در برنامه‌های آموزش محیط‌زیستی‌شان وجود دارد؛ به‌عنوان مثال در آموزش‌های آبی سمن‌ها، اغلب تأکید بسیار بر آب‌های سطحی (سد، انتقال و تالاب) در مقابل آب‌های نادیدنی زیرزمینی، مخاطبان را دچار خطای شناختی و فهم نادرست از واقعیت میدانی منابع سرزمینی می‌کند. امید است کاربست این چک لیست در ارزیابی آموزش‌های آبی سمن‌ها بتواند از چنین خطاهایی در محتواگزیابی آموزشی جلوگیری کند و ساختار علمی‌تر و مدون‌تری به این آموزش‌ها ببخشد.

باتوجه به ظرفیت‌های ابزار طراحی شده، پیشنهاد می‌شود که این چک‌لیست به‌صورت آزمایشی در شبکه تشکلهای محیط‌زیستی استان‌ها و مناطق متنوع جغرافیایی و فرهنگی کشور اجرا شود تا میزان انطباق آن با بافت‌های مختلف سنجیده شده و نسخه‌های منطقه‌ای آن توسعه یابد. همچنین می‌توان از این چک‌لیست در پروژه‌های مشارکتی میان سمن‌ها و نهادهای دولتی (مانند سازمان حفاظت محیط‌زیست، شهرداری‌ها و ادارات آموزش و پرورش) استفاده کرد تا زمینه گفت‌وگوی مؤثر بین بخش‌های رسمی و غیررسمی آموزش آب فراهم شود.

پیشنهاد دیگر، توسعه سامانه‌های دیجیتال برای پیاده‌سازی این چک‌لیست در قالب ابزارهای ارزیابی آنلاین یا اپلیکیشن‌های همراه است که امکان ارزیابی سریع، ذخیره نتایج و مقایسه عملکرد دوره‌ای سمن‌ها را فراهم سازد. همچنین استفاده از این ابزار در فرآیندهای اعتبارسنجی، رتبه‌بندی یا تخصیص منابع حمایتی به سمن‌ها، می‌تواند نقش کلیدی در نهادینه‌سازی کیفیت و پاسخ‌گویی در آموزش‌های محیط‌زیستی ایفا کند.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی، با تمرکز بر توسعه شاخص‌های نتیجه‌محور و سنجش اثربخشی بلندمدت آموزش‌های ارائه شده توسط سمن‌ها، به تکمیل مدل‌های ارزیابی کیفی در این حوزه کمک کنند. ترکیب این چک‌لیست با سایر ابزارهای سنجش یادگیری، تغییر رفتار و توانمندسازی اجتماع‌محور، می‌تواند مسیرهایی نو برای طراحی نظام‌های تلفیقی ارزیابی در آموزش آب بگشاید.

کلاهی، مهدی، و برومند، امیرعلی. (۱۴۰۳). ریشه‌یابی علل حاشیه‌ای شدن ارائه درس شناخت محیط‌زیست در آموزش عالی ایران. فصلنامه علمی آموزش محیط‌زیست و توسعه پایدار، ۱۲(۳)، ۹-۲۸.
<https://doi.org/10.30473/ee.2023.65087.2557>

کلاهی، مهدی. (۱۴۰۰). گروداران منابع طبیعی. فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۸(۱)، ۱۹-۳۰.

<https://doi.org/10.22067/jwsd.v8i1.88313>

محمدی، ندا، بابایی، فرزاد، محمدی، علی، و حیات غیب، داود. (۱۳۹۹). بررسی وضعیت آموزش محیط‌زیست در سازمان‌های مردم‌نهاد محیط‌زیستی ایران. علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۲۲(۱)، ۳۹۱-۴۰۲.
<https://doi.org/10.30495/jest.2020.27922.368>

ملک‌زاده، علی، طباطبائی 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)، ۳۷-۵۷.
<https://doi.org/10.22126/ges.2022.7529.2506>

Barrett, M. J. (2008). Participatory pedagogy in environmental education: Reproduction or disruption?. In Participation and learning: Perspectives on education and the environment, health and sustainability (212-224). Dordrecht: Springer. Amsterdam. Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6416-6_13

Becher, K. (2024). Non-formal sustainability education: Case study of environmental NGOs in Iceland (Doctoral dissertation). Faculty of Subject Teacher Education, School of Education, University of Iceland. Reykjavik. Iceland.
<https://skemman.is/bitstream/1946/47077/1/Kallahana%20Becher%20master%20thesis%202024%20final%20report.pdf>

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>

Fang, W. T., Hassan, A. A., & LePage, B. A. (2023). The living environmental education: Sound

امیری، محمدجواد، و برومند، امیرعلی. (۱۴۰۴). شالوده آموزش محیط‌زیست. انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران.
https://press.ut.ac.ir/book_4036.html

امیری، محمدجواد و برومند، امیرعلی. (۱۴۰۴). مباحث ویژه آموزش محیط‌زیست. انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران.
https://press.ut.ac.ir/book_4031.html

امیری، محمدجواد، و برومند، امیرعلی. (۱۴۰۴). مهندسی آموزش محیط‌زیست. انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران.
https://press.ut.ac.ir/book_4032.html

انصاری، شینا. (۱۴۰۴). تأکید معاون رئیس‌جمهور و رئیس سازمان حفاظت محیط‌زیست بر حکمرانی فرهنگی محیط‌زیست و نقش مشارکت اجتماعی در حفاظت از طبیعت. پایگاه اطلاع‌رسانی دولت.
<https://dolat.ir/detail/477261>. ۲۴ بهمن ۱۴۰۴.

برومند، امیرعلی، و امیری، محمد جواد. (۱۴۰۳). ارائه طرح‌واره مفهومی آموزش حواس افزوده محیط‌زیست: رهیافتی به‌سوی پایداری. محیط‌شناسی، ۵۰(۲)، ۲۳۷-۲۶۱.

<https://doi.org/10.22059/jes.2022.340394.100>

برومند، امیرعلی، و امیری، محمد جواد. (۱۴۰۳). واکاوی تجارب زیست‌والدین مهدی از تربیت محیط‌زیستی فرزندان‌شان. جامعه‌شناسی کاربردی، ۳۵(۱)، ۱۰۹-۱۳۸.
<https://doi.org/10.22108/jas.2024.139823>

برومند، امیرعلی، و طباطبائی یزدی، فاطمه. (۱۳۹۸). آموزش محیط‌زیستی در سازمان‌های غیردولتی محیط‌زیستی (ENGO) بستر ساز توسعه سرمایه‌های اجتماعی. دومین کنفرانس ملی علوم و مهندسی محیط‌زیست و توسعه پایدار. دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی. تهران، ایران.
<https://civilica.com/doc/1007516>

برومند، امیرعلی، و کلاهی، مهدی. (۱۴۰۰). آسیب‌شناسی آموزش آب در درس «انسان و محیط‌زیست» (پایه یازدهم، متوسطه دوم). تدریس پژوهی، ۹(۱)، ۲۰۵-۲۳۳.
 رسولی، محمدبهنام، سمیعی، محمدجواد، و زینلی، مهدی. (۱۳۹۷). راهنمای برنامه‌ریزی برای افزایش سواد آبی و محیط‌زیستی: درآمدی بر مفاهیم و رویکردها. نشر شایسته گستر. ۸۸.

شاطری، پروانه، صالحی، صادق، محسنی، رضا علی، و شریفی، منصور. (۱۴۰۰). سازمان‌های مردم‌نهاد محیط‌زیستی و شیوه‌های جلب مشارکت اعضا (مطالعه سازمان‌های مردم‌نهاد محیط‌زیستی تهران با رهیافت نظریه بنیادی). جامعه‌شناسی کاربردی، ۳۲(۲)، ۹۱-

York, R. A. (2014). Re-connecting with nature: Transformative environmental education through the arts. University of Toronto. Toronto. Canada.
<https://utoronto.scholaris.ca/server/api/core/bitstreams/a26d6dc2-2e95-4ec2-9cdb-ab5dcfdcd16/content>

پی‌نوشت‌ها

۱- در قلمرو آموزش محیط‌زیست، مفهوم آموزش آب (Water Education) فراتر از انتقال صرف اطلاعات هیدرولوژیکی یا ترویج رفتاری صرفاً مصرف‌گرایانه در قبال منابع آبی عمل کرده و به مثابه یک زیرساخت اجتماعی-فرهنگی راهبردی برای حکمرانی آب و ارتقای تاب‌آوری اقلیمی جوامع تلقی می‌شود. این مفهوم میان‌رشته‌ای، با عبور از پارادایم سنتی "آموزش درباره آب" که عمدتاً بر مؤلفه‌های علمی-اکولوژیکی مانند چرخه طبیعی و انسان‌ساخت آب، ظرفیت برد و اصول حفاظت از منابع تأکید دارد، به سوی رویکردی تحول‌آفرین و کنش‌محور تحت عنوان "آموزش برای آب" سوق یافته است. در این چارچوب نوین، آموزش با تلفیق سه مؤلفه به‌هم‌پیوسته شامل مؤلفه علمی (مبانی نظری و نتایج پژوهش‌های بنیادین در مورد رابطه انسان و محیط)، مؤلفه هنجاری (شامل اصول اخلاقی، حقوقی و زیبایی‌شناختی ناظر بر حفاظت از منابع) و مؤلفه ارزشی (ترویج انگاره‌هایی که طبیعت را به مثابه یک ارزش جهانی به دور از نگاه صرفاً مصرف‌گرایانه معرفی می‌کند)، بستر لازم برای شکل‌گیری نگرش سیستمی و پرورش نسلی آگاه و مسئول را فراهم می‌آورد. برنامه‌های پیشرو در این عرصه، با به‌کارگیری روش‌های یادگیری تجربی و مبتنی بر مکان، مانند "داستان‌گویی" برای درک عمیق‌تر، رویکرد "یادگیری در حین انجام دادن" در آزمایشگاه‌های کوچک‌مقیاس و اتصال مستمر مفاهیم به چالش‌های واقعی نظیر خشکسالی‌های جهانی یا مناقشات بر سر حوضه‌های رودخانه‌های فرامرزی، نه تنها به ارتقای سواد آبی و درک پیچیدگی‌های تغییر اقلیم یاری می‌رسانند، بلکه ظرفیت توسعه تفکر انتقادی، مهارت‌های حل مسئله و توانایی کنش جمعی برای تصمیم‌سازی و مشارکت مؤثر شهروندان در فرآیندهای حکمرانی آب را نیز تقویت می‌نمایند.

۲- از منظر رویکردهای میان‌رشته‌ای در آموزش محیط‌زیست، سرمایه شناختی (Cognitive Capital) به مجموعه‌ای از ساختارهای ذهنی، مدل‌های تفسیری و چارچوب‌های ادراکی اطلاق می‌شود که از طریق فرآیندهای یادگیری عمیق و درونی‌سازی مفاهیم پیچیده بوم‌شناختی در ذهن فراگیران شکل می‌گیرد. این سرمایه ناملموس، فراتر از انباشت صرف داده‌های علمی درباره اکوسیستم‌های آبی، شامل توانایی پردازش سیستمی اطلاعات، درک روابط علی-معلولی چندلایه در شبکه‌های اجتماعی-بوم‌شناختی و ظرفیت بازنمایی ذهنی پیامدهای بلندمدت مداخلات انسانی در طبیعت است. در قلمرو آموزش محیط‌زیست، سرمایه شناختی نه صرفاً به مثابه محصول نهایی آموزش، بلکه به‌عنوان زیرساخت عصبی-شناختی کنش‌های آینده تلقی می‌شود که با ایجاد تغییر در بازنمایی‌های ذهنی افراد از رابطه انسان-طبیعت، امکان پردازش هم‌زمان مؤلفه‌های علمی، هنجاری و ارزشی مسائل آبی را فراهم می‌آورد و بدین ترتیب، زمینه را برای شکل‌گیری تصمیم‌های آگاهانه و مسئولانه در مواجهه با چالش‌های محیط‌زیستی در فرآیند توسعه پایدار فراهم می‌کند.

۳- رفتارهای مسئولانه محیط‌زیستی (Responsible Environmental Behaviors)، به عنوان مجموعه‌ای از کنش‌های هدفمند و مبتنی بر آگاهی تعریف می‌شوند که نه تنها از طریق سازوکارهای شناختی-هنجاری درونی‌شده هدایت می‌گردند، بلکه از ظرفیت سنجش پیامدهای محیط‌زیستی کنش‌ها در سطوح مختلف برخوردارند. این رفتارها که از مدل‌های تلفیقی روان‌شناسی محیطی و علوم شناختی تغذیه می‌کنند، شامل سه لایه به‌هم‌پیوسته هستند: لایه اول، رفتارهای پیشگیرانه مانند بهینه‌سازی مصرف و مشارکت در طرح‌های حفاظت از منابع؛ لایه دوم، رفتارهای کنش‌گرایانه نظیر مشارکت مدنی در فرآیندهای تصمیم‌سازی محلی مرتبط با آب؛ و لایه سوم، رفتارهای تحول‌آفرین که به تغییر بنیادین الگوهای مصرفی و سبک زندگی در راستای اصول پایداری

science toward a cleaner, safer, and healthier future (p. 279). Springer Nature (Springer Singapore). Singapore. Singapore
<https://doi.org/10.1007/978-981-19-4234-1>

Ito, H., & Igano, C. (2020). Place-based environmental education to promote eco-initiatives: the case of Yokohama, Japan. *Regional studies, regional science*, 7(1), 292-308.

<https://doi.org/10.1080/21681376.2020.1794950>

Leicht, A., & Heiss, J. (2018). Issues and trends in education for sustainable development (Vol. 5). UNESCO publishing. Paris. France.
<http://unesdoc.unesco.org/images/0026/002614/261445e.pdf>

Mercan, G., & Selçuk, Z. V. (2023). Environmental Education in Non-Governmental Organizations: The Significant Contributions of United Nations Units. *Journal of Multidisciplinary Studies in Education*, 7(3), 102-111. <https://izlik.org/JA35RJ84XT>

Oe, H., Yamaoka, Y., & Ochiai, H. (2022). A qualitative assessment of community learning initiatives for environmental awareness and behavior change: applying UNESCO education for sustainable development (ESD) framework. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), 3528.
<https://doi.org/10.3390/ijerph19063528>

Pérez-Martín, J. M., & Esquivel-Martín, T. (2024). New insights for teaching the one health approach: Transformative environmental education for sustainability. *Sustainability*, 16(18), 7967.
<https://doi.org/10.3390/su16187967>

Sterling, S. (2010). Sustainable education. In *Science, society and sustainability* (127-140). Routledge. New York. USA. doi:
<https://doi.org/10.4324/9780203875124>

Sterling, S., & Huckle, J. (2014). Education for sustainability. Routledge. London. UK.

Stickney, J. (2020). Philosophical walks as place-based environmental education. *Journal of Philosophy of Education*, 54(4), 1071-1086. doi:
<https://doi.org/10.1111/1467-9752.12469>

منجر می‌شوند. آنچه رفتار مسئولانه را از کنش‌های عادی متمایز می‌سازد، وجود مؤلفه‌های فراشناختی و خودتنظیمی است که به فرد امکان می‌دهد در موقعیت‌های پیچیده و متعارض، بر اساس اصول اخلاقی درونی‌شده و نه صرفاً تابع هنجارهای موقعیتی، تصمیم‌گیری کرده و در قبال تأثیرات محیط‌زیستی انتخاب‌های خود پاسخگو باشد.

۴- تسهیل‌گذار به سمت پایداری اجتماعی-بوم‌شناختی (Facilitating the Transition towards Social-Ecological Sustainability)، به مثابه یک فرآیند چندوجهی و غیرخطی از دگرگونی نهادی-فرهنگی تعریف می‌شود که در آن، برنامه‌های آموزشی به عنوان واسطه‌های تغییر، شکاف میان دانش نظری و کنش جمعی را پر می‌کنند. این مفهوم بر اساس نظریه‌های پیچیدگی و رویکردهای سیستم‌های تطبیقی، بر این پیش‌فرض استوار است که سیستم‌های اجتماعی-بوم‌شناختی دارای ویژگی‌هایی چون ظهور، خودسازماندهی و وابستگی به مسیر طی‌شده هستند و بنابراین، گذار به پایداری نیازمند مداخلاتی هدفمند در سطوح مختلف یادگیری (فردی، جمعی، نهادی) است. در این فرآیند، آموزش آب با ایجاد بسترهای یادگیری مشارکتی و میان‌رشته‌ای، به توسعه ظرفیت تطبیقی (Adaptive Capacity) جوامع محلی یاری می‌رساند و از طریق تقویت حلقه‌های بازخوردی بین دانش بومی و دانش علمی، زمینه را برای هم‌آفرینی (Co-creation) راهکارهای نوآورانه در مدیریت منابع آبی فراهم می‌آورد. چنین رویکردی، ضمن کاهش اینرسی نهادی و مقاومت‌های فرهنگی در برابر تغییر، بستر لازم برای گذار از وضعیت‌های ناپایدار کنونی به سوی رژیم‌های جدید اجتماعی-بوم‌شناختی را که با ویژگی‌هایی چون انعطاف‌پذیری، عدالت بین‌نسلی و توازن اکولوژیک مشخص می‌شوند، مهیا می‌سازد.

۵- پرورش شایستگی‌های بین‌رشته‌ای (Fostering Interdisciplinary Competencies) در راستای افزایش سواد آبی، به مثابه فرایندی یکپارچه از توسعه توانایی‌های شناختی-عملیاتی تعریف می‌شود که طی آن، فراگیران قادر به درک هم‌زمان ابعاد هیدرولوژیک، بوم‌شناختی، اجتماعی-اقتصادی و فرهنگی مسائل آب می‌گردند. سواد آبی در این چارچوب، فراتر از دانش پایه درباره چرخه آب و روش‌های صرفه‌جویی، به مثابه ظرفیتی سیستمی برای تحلیل روابط پیچیده میان سیستم‌های طبیعی و انسانی، درک پیامدهای غیرخطی مداخلات در حوضه‌های آبریز و ارزیابی انتقادی گفتمان‌های رقیب در سیاست‌گذاری منابع آب تعریف می‌شود. این شایستگی‌های بین‌رشته‌ای که از تلفیق دانش بوم‌شناختی، درک فرایندهای هیدروپلیتیک و آگاهی از سازوکارهای عدالت محیط‌زیستی حاصل می‌شوند، بستر لازم برای شکل‌گیری ذهنیتی کل‌نگر را فراهم می‌آورند که بدون آن، هرگونه مداخله آموزشی در قلمرو آب به فروکاستن مسئله‌ای چندبعدی به راه‌حل‌های تک‌بعدی و ناکارآمد منجر خواهد شد.

۶- آموزش آب در رویکردهای نوین، مبتنی بر یک مدل سه‌وجهی شناختی، عاطفی و رفتاری (Cognitive, Affective, and Behavioral Domains of Water Education) طراحی می‌شود که در آن، حوزه شناختی شامل انتقال مفاهیم علمی و بوم‌شناختی مرتبط با منابع آبی (نظیر هیدرولوژی، اکولوژی آب‌های شیرین، و مدل‌های اقلیمی) و نیز توسعه ظرفیت تحلیل سیستمی و تفکر انتقادی درباره مسائل آب است. حوزه عاطفی، متکفل درونی‌سازی ارزش‌ها و نگرش‌های بنیادین نسبت به طبیعت و منابع آبی از طریق برانگیختن حس دلبستگی مکانی، همدلی با نسل‌های آینده و بازتعریف هویت فردی در پیوند با اکوسیستم‌های آبی می‌باشد. حوزه رفتاری نیز بر شکل‌دهی و تثبیت الگوهای کنش فردی و جمعی در قبال آب متمرکز است که از مدیریت بهینه مصرف در مقیاس خرد تا مشارکت فعال در فرایندهای تصمیم‌سازی و کنش‌گری جمعی برای حفاظت از منابع آبی را در بر می‌گیرد. تعامل دیالکتیکی این سه حوزه، پیش‌شرط لازم برای گذار از رویکردهای سطحی و صرفاً اطلاعات‌محور به سوی آموزش تحول‌آفرینی است که قادر به بازسامانی بنیادین رابطه انسان با منابع آبی باشد.

۷- تحلیل نظام‌مند آموزش آب مستلزم ادراک هم‌زمان سه ساحت به‌هم‌پیوسته است: نخست، ساحت ساختاری ناظر بر زیرساخت‌های نهادی، تشکیلاتی و شبکه‌های اجرایی است که بستر تحقق برنامه‌های آموزشی را فراهم می‌آورند و شامل مؤلفه‌هایی چون معماری برنامه‌های درسی، سازوکارهای تأمین و تربیت تسهیلگران و الگوهای حکمرانی آموزشی در سطوح محلی و ملی می‌شود. دوم، ساحت محتوایی، متکفل چپستی مفاهیم، نظریه‌ها و ارزش‌هایی است که در

فرایند آموزش منتقل می‌شوند و بر اساس رویکردهای نوین، می‌بایست حاصل هم‌آفرینی دانش علمی، دانش بومی، و ملاحظات اخلاقی-حقوقی باشند. سوم، ساحت کارکردی که به چگونگی و چرایی اجرای برنامه‌ها، شامل روش‌های یاددهی-یادگیری، سازوکارهای ارزشیابی و الگوهای تعامل با ذی‌نفعان محلی می‌پردازد. هم‌افزایی و توازن این سه ساحت، شرط اساسی اثربخشی پایدار آموزش آب است، به نحوی که غفلت از هر یک، به ناکارآمدی کل نظام آموزشی در مواجهه با پیچیدگی‌های مسائل آبی منجر خواهد شد.

۸- سازمان‌های مردم‌نهاد محیط‌زیستی (Environmental NGOs)، تشکیل‌های غیردولتی، غیرانتفاعی و داوطلبانه‌ای هستند که توسط شهروندانی با دغدغه‌های مشترک برای حفاظت محیط‌زیست و منابع طبیعی شکل می‌گیرند و به عنوان پل ارتباطی میان مردم و دولت، نقش واسطه‌گری برای تعامل مسئولانه و آگاهانه بین جامعه و حاکمیت را ایفا می‌کنند. پیشینه این سازمان‌ها اگرچه ریشه در انجمن‌های داوطلبانه در طول تاریخ دارد، اما شکل مدرن آن‌ها به ویژه در عرصه بین‌المللی با تأسیس نهادهایی چون صلیب سرخ جهانی در سال ۱۸۶۳ آغاز شد و پس از جنگ جهانی دوم و با تأسیس سازمان ملل متحد در سال ۱۹۴۵، عبارت "سازمان غیردولتی" به طور رسمی وارد ادبیات حقوقی و سیاسی جهان گردید. مأموریت‌های اصلی این سازمان‌ها در حوزه محیط‌زیست طیفی از فعالیت‌ها را در بر می‌گیرد که شامل آموزش، اطلاع‌رسانی و فرهنگ‌سازی برای ارتقای دانش و آگاهی محیط‌زیستی جامعه، بررسی و مطالعه معضلات محیط‌زیستی و ارائه راهکارهای مبتکرانه برای حل آن‌ها، انجام اقدامات عملی برای حفاظت از منابع طبیعی و تنوع زیستی و در نهایت، ایفای نقش مطالبه‌گری و تأثیرگذاری بر سیاست‌گذاری‌ها در سطوح محلی، ملی و بین‌المللی برای دستیابی به توسعه‌ای پایدار و عادلانه است. سازمان‌های مردم‌نهاد محیط‌زیستی در چند دهه اخیر، دگرگونی پارادایمی عمیقی را در ساختار و عملکرد آموزش محیط‌زیستی خود تجربه کرده‌اند. از منظر ساختاری، این تشکلهای از مدل سنتی سازمان‌دهی داوطلبانه و غیررسمی که عمدتاً مبتنی بر کنش‌گری مقطعی و علاقه‌مندی‌های فردی اعضا بود، به سوی ساختارهای حرفه‌ای و نهادی‌شده با دبیرخانه‌های دائمی و کارکنان تمام‌وقت حرکت کرده‌اند. این گذار از "عضویت محوری" به "کارشناسی محوری" نه تنها پاسخی به پیچیدگی فزاینده مسائل محیط‌زیست و ضرورت تخصص‌گرایی در آموزش است، بلکه امکان برنامه‌ریزی راهبردی بلندمدت، جذب منابع مالی پایدار و متنوع و ایجاد حافظه سازمانی برای حفظ و انتقال دانش انباشته‌شده را فراهم می‌آورد. به موازات این تحول ساختاری، عملکرد این سازمان‌ها در قلمرو آموزش محیط‌زیست نیز از رویکردهای صرفاً آگاهی‌بخشی و یک‌سویه، به سوی مداخلات چندوجهی و شبکه‌ای گذر کرده است. در سطح عملکردی، پارادایم نوین آموزش محیط‌زیستی سازمان‌های مردم‌نهاد با عبور از الگوی سنتی "آموزش درباره طبیعت" که عمدتاً بر انتقال اطلاعات علمی و توصیه‌های رفتاری ساده متمرکز بود، به سمت رویکردی تحول‌آفرین و مبتنی بر توانمندسازی جوامع محلی جهت‌گیری یافته است. این تغییر پارادایم در قالب روش‌های یادگیری مشارکتی، رویکرد "کل مدرسه" (Whole School Approach) و برنامه‌های درسی میان‌رشته‌ای تجلی یافته که هدف نهایی آن‌ها پرورش شهروندانی کنش‌گر با ظرفیت تفکر انتقادی و حل مسئله است. سازمان‌های مردم‌نهاد امروزه با ایفای نقش "عامل تغییر" (Change Agent) در پیوند دادن نظام‌های آموزشی رسمی با جوامع محلی و همچنین تسهیل هم‌آفرینی دانش میان کارشناسان، جوامع بومی و سیاست‌گذاران، بستری برای گذار از آموزش سطحی به یادگیری اجتماعی عمیق فراهم می‌کنند که در آن مخاطبان نه صرفاً دریافت‌کنندگان دانش، بلکه مشارکت‌کنندگانی فعال در تولید راه‌حل‌های بوم‌نهاد برای چالش‌های پایداری هستند.

۹- نقش سازمان‌های مردم‌نهاد محیط‌زیستی به‌عنوان بازیگران غیردولتی در تولید و بازتوزیع دانش، به مثابه حلقه واسطی راهبردی برای کاهش شکاف میان سیاست‌گذاری رسمی و نیازهای واقعی جوامع محلی عمل می‌کند. این تشکلهای با قرار گرفتن در فضای بینابینی نهادهای حاکمیتی و اجتماعات محلی، قادر به انجام دو کارکرد اساسی و به‌هم‌پیوسته هستند: نخست، تولید دانش مرزن‌نشین (Boundary Knowledge) از طریق تبدیل دانش بومی، تجربی و ضمنی ساکنان محلی به داده‌های نظام‌مند و قابل استفاده برای برنامه‌ریزی، و سپس بازتوزیع این دانش بوم‌نهاد در عرصه‌های سیاست‌گذاری؛ و دوم، ترجمه و ساده‌سازی دانش فنی-تخصصی تولیدشده در مراکز علمی و

24. Discourse making
۲۵. برای آشنایی بیشتر به وبسایت شبکه تشکلهای مردم نهاد محیط زیست و منابع طبیعی کشور مراجعه کنید: <https://iranenngos.ir/>
26. Open Coding
27. Axial Coding
28. Selective Coding
29. Modified Delphi Technique
30. Content Validity Ratio
31. Content Validity Index
32. Rounds of feedback and adjustment
33. Cronbach's Alpha Test
34. Exploratory Factor Analysis
35. Trustworthiness
36. Confirmability
37. Transferability
38. Dependability
39. Interpretive Validity
40. Research protocol
41. Code Co-occurrence Map
42. Clarity
43. Relevance
44. Simplicity
- Varimax Rotation
45. Varimax Rotation
46. Participatory Education
47. Place-based Education

نهادهای دولتی به زبانی قابل فهم و متناسب با بافت فرهنگی-اجتماعی جوامع محلی. این فرآیند دوطرفه تولید و بازتوزیع دانش، به سازمانهای مردم نهاد امکان می دهد تا با پر کردن خلأ ارتباطی میان نظام بوروکراتیک سیاست گذاری (که غالباً از منطق بالا به پایین و یکسان انگار پیروی می کند) و زیست جهان جوامع محلی (که مبتنی بر نیازهای ملموس، محدودیت های عینی و اولویت های بومی است)، زمینه را برای شکل گیری سیاست های برخورداری از مشروعیت اجتماعی و اثربخشی عملیاتی فراهم آورند. بدین ترتیب، این سازمان ها با واسطه گیری شناختی و کارگزاری معرفتی، نه تنها به دمکراتیک سازی فرآیند تولید دانش یاری می رسانند، بلکه با تسهیل هم آفرینی راه حل های بوم نهاد، از گسست میان متن سیاست ها و بستر اجرای آن ها جلوگیری کرده و به پایداری و عدالت محور شدن مداخلات محیط زیستی کمک می کنند.

10. Institutionalized Evaluation Mechanisms
11. International Union for Conservation of Nature
12. The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) Education for sustainable development (ESD) Framework
13. Context-dependent
14. Construct Validity
15. Reliability
16. Mixed-method Approach
17. Transformative Learning
18. Educational Planning
19. Stakeholder Engagement
20. Ecological Justice
21. Intergenerational Learning
22. Critical Reflection
23. Organizational Learning Platform

Evaluating the Feasibility of Implementing a Wastewater Project Considering Various Technical, Social, and Environmental Approaches (Case Study of Mazandaran Province)

J. Vejahat^{1*}, Sh. Saraf²

1- Master of Water Structure, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran.

2- Master of Water Structure, Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

* Corresponding Author Email: j.vejahat@ut.ac.ir

Received ▶ 04-08-2025
Revised ▶ 09-12-2025
Accepted ▶ 13-12-2025
Available online ▶ 16-03-2026

ارزیابی توجیه پذیری اجرای طرح فاضلاب با توجه به رویکردهای مختلف فنی، اجتماعی و محیط زیستی (مطالعه موردی استان مازندران)

جواد وجاht^{۱*}، شادی صراف^۲

۱- کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

* رایانامه نویسنده مسئول: j.vejahat@ut.ac.ir

تاریخ دریافت ▶ ۱۴۰۴/۵/۱۳
تاریخ بازنگری ▶ ۱۴۰۴/۰۹/۱۸
تاریخ پذیرش ▶ ۱۴۰۴/۰۹/۲۲
تاریخ انتشار ▶ ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

Abstract

Sewage projects are among the most important urban infrastructure facilities that bring about appropriate living conditions and increased social welfare for the people. In this regard, the present study was conducted to investigate the feasibility of implementing a wastewater project in the study area adjacent to the Caspian Sea in the cities of Babol and Amirkola. The results obtained showed that by examining the above options in terms of environmental, social, economic and technical factors, including seven criteria (ease of project implementation, compliance with technical standards, public satisfaction with the desired option, improvement of public health and hygiene, endangerment of water and soil quality in the region, investment cost of each alternative plan) and giving them points, and considering the goals of sustainable development, the option of implementing the complete collection network, transmission line and wastewater treatment plants in Babol and Amirkola with the highest score is the priority. Given the increasing trend of population growth in the cities of Babol and Amirkola, the traditional wastewater disposal system, due to long-term environmental pollution, will not be responsive to the region's sanitary and environmental needs. The option of constructing a collection network and wastewater treatment to common national environmental standards for the study area has been identified as the superior choice, and it will have significant impacts on the health and environmental status of this city and its surrounding areas. Furthermore, by recovering wastewater and utilizing it in agriculture, water wastage, especially in water-scarce regions, can be prevented. Thus, the implementation of this project is environmentally justified.

Keywords: Assessment, Amirkola, Babol, Environmental, Wastewater.

چکیده

طرح های فاضلاب از مهمترین تأسیسات زیربنایی شهری می باشند که شرایط زندگی مناسب و افزایش رفاه اجتماعی را برای مردم به همراه می آورند. در این راستا پژوهش حاضر به منظور بررسی توجیه پذیری اجرای طرح فاضلاب در محدوده مورد مطالعه در مجاورت دریای خزر در شهرهای بابل و امیرکلا صورت گرفته است. نتایج به دست آمده مشخص نمود که با بررسی گزینه های مختلف از جنبه عوامل محیط زیستی، اجتماعی، اقتصادی و فنی مشتمل بر معیارهای هفت گانه (سهولت اجرای طرح، تطابق با استانداردهای فنی، رضایتمندی مردم از گزینه مورد نظر، بهبود سلامت و بهداشت عمومی مردم، به مخاطره افتادن کیفیت آب و خاک منطقه، هزینه سرمایه گذاری هر طرح گزینه) و امتیازدهی به آن ها و با توجه به اهداف توسعه پایدار، گزینه اجرای کامل شبکه جمع آوری، خط انتقال و تصفیه خانه های فاضلاب شهر بابل و امیرکلا با بالاترین امتیاز در اولویت می باشد. با توجه به روند فزاینده رشد جمعیت در شهر بابل و امیرکلا، سامانه سنتی دفع فاضلاب به دلیل آلودگی های محیطی در دراز مدت پاسخگوی نیازهای بهداشتی و محیط زیستی منطقه طرح نخواهد بود. گزینه احداث شبکه جمع آوری و تصفیه فاضلاب تا حد استانداردهای رایج محیط زیستی در سطح کشور برای محدوده مطالعاتی گزینه برتر بوده و تأثیرات عمده ای را بر وضعیت بهداشت و محیط زیست این شهر و مناطق اطراف خواهد داشت، ضمن اینکه با بازیابی فاضلاب و استفاده در کشاورزی از هدر رفتن آب خصوصاً در مناطق کم آب جلوگیری می شود. به این ترتیب اجرای این پروژه به لحاظ محیط زیستی توجیه لازم را دارد.

واژه های کلیدی: ارزیابی، امیرکلا، بابل، محیط زیستی، فاضلاب

How to cite this article:

Vejahat, J., & Saraf, Sh. (2026). Evaluating the Feasibility of Implementing a Wastewater Project Considering Various Technical, Social, and Environmental Approaches (Case Study of Mazandaran Province). Journal of Water and Sustainable Development, 12(4), 77-87. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i4.2508-1447>

نمود. به منظور درک بهتر اهمیت مسئله مورد نظر، به برخی از مهمترین پژوهش‌های صورت گرفته بررسی می‌شود.

طالبی و روحانی (۱۳۹۳) در پژوهش خود انتخاب بهینه محل و نوع فرآیند جمع‌آوری فاضلاب با تحلیل سلسله مراتبی چندمعیاره در شهر ورزقان را بررسی نمودند. با در نظر گرفتن شرایط خاص جغرافیایی و ژئوتکنیکی محل، ابتدا پنج گزینه مطرح شده برای انتخاب محل تصفیه‌خانه توسط روش تحلیل سلسله مراتبی بررسی شد و سپس چهار گزینه غیرمتعارف جمع‌آوری فاضلاب شامل سپتیک تانک با خروجی ثقیلی، سپتیک‌تانک با خروجی تحت‌فشار، شبکه مکشی و شبکه ساده جمع‌آوری فاضلاب برای این منطقه در نظر گرفته شد. نتایج این پژوهش نشان داد استفاده از شبکه ساده جمع‌آوری فاضلاب، بهترین روش در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. **معینی و افشار (۱۳۹۳)** بهینه‌سازی طراحی جامع تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی با الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان را انجام دادند. در این تحقیق با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان و ارائه روشی ابتکاری، مسئله نمونه‌ای حل و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک مقایسه شد. نتایج نشان داد روش پیشنهادی روشی مناسب در حل مسئله طراحی جامع بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی می‌باشد.

عسگریان و همکاران (۱۳۹۴) ارزیابی ریسک شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری فازی را انجام دادند. در این پژوهش، به منظور برنامه‌ریزی برای مدیریت عملکرد شبکه در شرایط بحرانی، مانند بروز خطرات طبیعی و انسان‌ساز، الگویی برای ارزیابی ریسک شبکه‌های فاضلاب در مواجهه با بحران‌ها تدوین شد. باتوجه به بزرگی ریسک‌های محاسبه شده، تهدیدات و مخاطرات در چند گروه یعنی تهدیدات با ریسک کم تا تهدیدات با ریسک زیاد، دسته‌بندی شدند و رویکردهای اصلی به‌کار رفته در برابر آن‌ها به سه دسته رویکردهای مقابله با ریسک، انتقال ریسک و پذیرش ریسک تقسیم شد. این روند برای شبکه فاضلاب منطقه تحت پوشش تصفیه‌خانه شهرک غرب تهران به عنوان مطالعه موردی اجرا شد و بحران‌های ورود آلاینده شیمیایی و تغییرات شدید در کیفیت فاضلاب به عنوان پرمخاطره‌ترین بحران‌ها شناخته شد. رویکرد پیشنهادی در مقابل این بحران‌ها، رویکرد مقابله و کاهش خطر ریسک است.

ماجد و گلزاری (۱۳۹۵) تحلیل اقتصادی و محیط‌زیستی جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب را انجام دادند. باتوجه به افزایش جمعیت و رشد سریع و روزافزون تقاضا برای کالاهای و خدمات، چه در بخش صنعت و خدمات و چه در بخش کشاورزی، و افزایش تولید آب آلوده، ساماندهی به وضعیت فاضلاب‌های شهری و صنعتی اهمیت قابل ملاحظه‌ای دارد. به‌این‌منظور در نظر گرفتن منافع و هزینه‌ها به صورت جامع و در قالب منافع و هزینه‌های اجتماعی در تحلیل‌های هزینه و فایده منجر به

افزایش رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی، دسترسی هر چه بیشتر به علوم و فنون، توسعه مراکز صنعتی و تجاری و غیره سبب تولید انواع مواد نامطلوب شده که منجر به آلودگی محیط‌زیست و تهدید سلامت انسان‌ها شده است. در این میان یکی از مشکلاتی که موجبات نگرانی را فراهم می‌آورد، مسئله حفاظت محیط‌زیست در برابر آلودگی‌های ایجاد شده در ابعاد گسترده آن می‌باشد.

در گذشته نه چندان دور یک تعادل نسبی بین فعالیت‌های انسانی و قدرت خودپالایی محیط‌زیست برقرار بود به‌طوری‌که مواد تخلیه شده به محیط به مرور زمان تجزیه شده و به جزیی از عناصر طبیعی محیط‌زیست بدون اثرات منفی تبدیل می‌شدند. امروزه به دلایل مذکور از قدرت خود پالایی محیط‌زیست کاسته شده و در مواردی نیز توان پالایش محیط‌زیست از بین رفته است. از طرفی دیگر تولید محصولات جدید با سرعت تجزیه پذیری کم نیز بر مشکلات موجود افزوده است (**طالبی و روحانی، ۱۳۹۳**).

یکی از منابع آلاینده‌ای که به محیط‌زیست تخلیه می‌شوند، فاضلاب‌های شهری بوده که به دلیل حجم بالا و وجود آلاینده‌های گوناگون شیمیایی و میکروبی مورد توجه قرار گرفته است. تخلیه فاضلاب تصفیه نشده به محیط‌زیست را از دو دیدگاه می‌توان بررسی کرد: دیدگاه اول مربوط به اثرات بهداشتی این منبع آلودگی بر محیط‌زیست به‌خصوص منابع آب می‌باشد. باتوجه به ظرفیت محدود خودپالایی منابع پذیرنده، هنگامی که مصرف اکسیژن محلول توسط میکروارگانیسم‌های موجود در فاضلاب سریع‌تر از جان‌نشین شدن آن انجام پذیرد، مقدار اکسیژن محلول به شدت تقلیل یافته و کیفیت منبع کاهش می‌یابد. هر متر مکعب فاضلاب می‌تواند حجم عظیمی از منابع آب سالم را به شدت آلوده کند به‌طوری‌که تصفیه مجدد آن مستلزم هزینه سرمایه‌گذاری بالایی خواهد بود. دیدگاه دوم، مربوط به هدر دادن این منبع آبی عظیم می‌باشد. حدود ۹۹/۹ درصد از مواد تشکیل دهنده فاضلاب را آب و تنها ۰/۱ درصد آن را ناخالصی‌ها تشکیل داده‌اند. از این رو در مناطق وسیعی از جهان به‌خصوص در مناطق کم‌آب، فاضلاب‌ها به عنوان یک منبع تجدیدپذیر مورد توجه می‌باشند (**شیرزاد و عبدالهی، ۱۳۹۶**).

در این راستا پژوهش حاضر به منظور بررسی توجیه‌پذیری اجرای طرح فاضلاب در محدوده مورد مطالعه در مجاورت دریای خزر در شهرهای بابل و امیرکلا صورت گرفته است. اجرای طرح‌های فاضلاب در مناطق مختلف علاوه بر مزیت‌های متعددی که دارد، باید از جنبه‌های مختلف توجیه‌پذیر باشد. از جمله رویکردهای مورد بررسی در پژوهش حاضر می‌توان به ارزیابی‌های فنی، محیط‌زیستی، سلامتی، اقتصادی و اجتماعی با استفاده از روش سلسله‌مراتبی چندمعیاره (AHP) اشاره

تصمیم‌گیری صحیح در این زمینه است. روشن شدن ابعاد چند جانبه اقتصادی و محیط‌زیستی تصفیه و به‌کارگیری فاضلاب کمک می‌نماید تا تحلیل‌های هزینه - فایده پروژه‌های مذکور با در نظر گرفتن تمام هزینه‌ها و منافع اجتماعی انجام پذیرد و برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری در این زمینه مبتنی بر اصول علمی، به روش‌های درستی انجام پذیرد.

شیرزاد و عبدالهی (۱۳۹۶) به طراحی بهینه شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری با تاکید بر جنبه‌های اجرایی در شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهر ارومیه پرداختند. نتایج به‌دست آمده برای شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهر ارومیه بیانگر ورود مقادیر قابل توجه آب باران (تا ۱۰ برابر دبی فاضلاب) به داخل شبکه بوده و اعمال آب باران در محاسبات طراحی منجر به افزایش قابل توجه ابعاد لوله‌ها و هزینه اجرای شبکه می‌شود. **ذوالفقاری و همکاران (۱۴۰۱)** ارزیابی اقتصادی پتانسیل استحصال انرژی از فاضلاب شهری در خرم‌آباد را بررسی نمودند. نتایج نشان داد به طور سالیانه با استفاده از روش هضم بی‌هوازی می‌توان ۲۲۶/۲ مترمکعب بیوگاز تولید کرد. با استفاده از سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت می‌توان ۲۴۸/۸ مگاوات انرژی حرارتی و ۴۷۶/۳ کیلووات‌ساعت انرژی الکتریکی تولید کرد. همچنین، ارزیابی اقتصادی سیستم نشان می‌دهد هزینه‌های سالانه سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی به‌ترتیب ۱۰۳/۲ و ۱۴۶/۲ میلیارد ریال خواهد بود. در مقابل تصفیه‌خانه قادر است تا با صرفه‌جویی مصرف گاز طبیعی، فروش کود تولید شده و فروش برق تولیدی به شبکه به طور سالیانه ۴۴/۶ میلیارد ریال درآمد کسب کند. نرخ بازگشت سرمایه اقتصادی برای اجرای این طرح ۳ سال و ۶ ماه محاسبه شده است. اجرای این طرح علاوه بر توجیه‌پذیری اقتصادی قادر خواهد بود تا از انتشار گازهای گلخانه‌ای به طور قابل توجهی جلوگیری کند.

مسعودی (۱۴۰۱) تحلیل جامعه‌شناختی مشارکت اجتماعی در طراحی و اجرای شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب شهری را صورت دادند. جامعه آماری کلیه خانوارهای ساکن شهر زرنده کرمان هستند و یکی از این طرح‌ها در این شهر در حال اجرا است و نمونه‌گیری تصادفی خوشه‌ای به تعداد ۳۷۵ نفر از بین آنها انتخاب شد. داده‌ها در نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل شد. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد، متغیرهای مستقل با وابسته رابطه خطی مستقیم دارند و توانسته‌اند ۳۶ درصد تغییرات متغیر وابسته را پیش‌بینی کنند از سوی دیگر بر اساس ضرایب تأثیر رگرسیون خطی (β) طبقه اجتماعی و فرهنگی ($\beta=0.16$)، وجود چالش در دفع فاضلاب خانگی ($\beta=0.16$)، آگاهی از شیوه‌های اجرای طرح

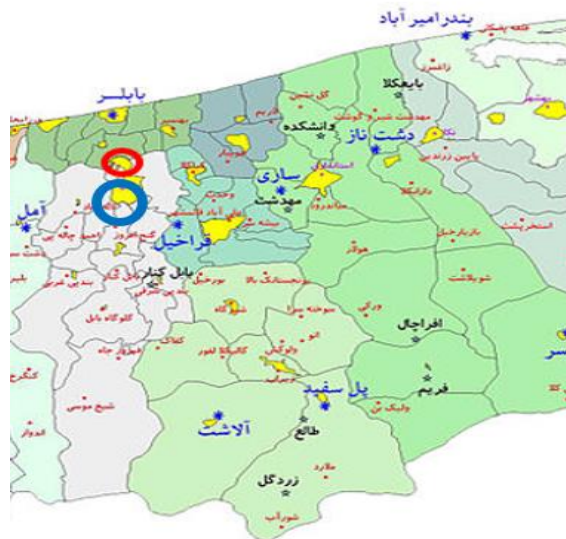
فاضلاب ($\beta=0.16$)، مشارکت در امور اجتماعی ($\beta=0.26$)، رضایت از کیفیت زندگی شهری ($\beta=0.24$) و اعتماد اجتماعی و نهادی ($\beta=0.15$) بر تمایل به مشارکت در پیاده‌سازی طرح تصفیه فاضلاب شهری زرنده مؤثر هستند. در بخش دیگری از یافته‌ها مشخص شد از مهمترین آثار این طرح از نظر مردم افزایش آب برای صنعت، کاهش خطرات ریزش چاه‌ها و بهبود کیفیت بهداشت محلات خواهد بود.

بررسی مطالعات مشابه بیانگر آن است که روش‌های مبتنی بر رویکردهای آمار به همراه بررسی خصوصیات فنی، نقش به‌سزایی در توجیه‌پذیری اجرای طرح‌های شبکه جمع‌آوری فاضلاب خواهند داشت. در این پژوهش این امر به صورت عملیاتی در مقیاس واقعی بررسی شد. اهداف متعددی از دلایل انجام این پژوهش بوده که مهمترین آن‌ها ارزیابی تأثیر انکارناپذیر عوامل محیط‌زیستی، اجتماعی و سلامتی، وای عوامل فنی و اقتصادی در ایجاد یک پروژه فاضلاب می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان مازندران در محدوده جغرافیایی بین ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۳۴ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است. این استان دارای مساحتی بالغ بر ۲۳۸ هزار کیلومترمربع می‌باشد که حدود ۱/۴۶ درصد از مساحت کل کشور را شامل می‌شود. در شکل (۱) موقعیت استان مازندران و محدوده مورد مطالعه مشخص شده است. شهر بابل به‌عنوان مرکز شهرستان بابل، بین ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه و ۱۵ ثانیه عرض شمالی و ۵۲ درجه و ۴۴ دقیقه و ۲۰ ثانیه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. بابل پرجمعیت‌ترین شهرستان مازندران (با جمعیت ۵۳۱۹۳۰ نفر در سرشماری ۱۳۹۵) است. این شهرستان دارای ۶ بخش، ۷ شهر و ۱۳ دهستان می‌باشد. شهر امیرکلا از جمله شهرهای شهرستان بابل می‌باشد. امیرکلا از شمال به شهرستان بابلسر و از جنوب به شهر بابل محدود می‌شود. شهر امیرکلا نسبت به سطح دریا در ارتفاع پایین‌تری قرار داشته و متوسط ارتفاع آن حدود ۷- متر می‌باشد. شیب کلی این شهر از جنوب به شمال است. رودخانه بابل‌رود در قسمت غرب امیرکلا قرار دارد که از کوه‌های البرز سرچشمه گرفته و پس از طی مسیر از شهر بابل وارد شهر امیرکلا شده و از قسمت کنار شرقی شهر عبور کرده و به دریای خزر می‌ریزد.



راهنمای نقشه

محدوده بابل

محدوده امیرکلا



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه

بررسی وضعیت فنی

اجرای شبکه فاضلاب در محدوده مورد مطالعه از ابتدای سال ۱۳۷۴ آغاز و دوره ۳۰ ساله طرح برای آن در نظر گرفته شد. باتوجه به اجرای تدریجی شبکه فاضلاب دو شهر مذکور، نیاز به بازنگری در مطالعات باتوجه به تغییرات صورت گرفته در سطح شهر از آنجاکه ساخت و ساز و همچنین تغییرات جمعیتی اجتناب ناپذیر بوده است، لذا اجرای طرح به تعویق افتاده و مشمول گذر زمان گردیده است. جمعیت شهرهای بابل و امیرکلا بر اساس نتایج برآورد انجام شده در سال ۱۴۰۵ به ترتیب ۴۱۴۲۲۱ و ۵۳۵۹۵ نفر پیش بینی شده است. سرانه کل فاضلاب تولید شده برای شهرهای بابل و امیرکلا به ازای هر نفر در روز به ترتیب ۱۵۰ و ۱۴۱ لیتر و سرانه جریان بارندگی و رواناب نیز برای هر دو شهر ۶۸ لیتر نظر گرفته شده است. بر اساس مبانی فوق شبکه فاضلاب شهر بابل طراحی شد. طول کل شبکه طراحی شده بابل و امیرکلا حدود ۴۶۶ کیلومتر می باشد. بخش زیادی فاضلاب روهای اصلی و نیمه اصلی اجرا شده است. در این طرح ۱۳ فقره ایستگاه پمپاژ و بالابر پیش بینی شده است که در نهایت فاضلاب شهر توسط خط انتقال به قطر ۱۲۰۰ میلی متر و به طول ۸۲۰۰ متر به تصفیه خانه فاضلاب شهر منتقل می شود. در حال حاضر خط اول جریان از مدول اول تصفیه خانه به روش لجن فعال - هوادهی گسترده در دست بهره برداری است. باوجود اینکه طرح فاضلاب بابل و امیرکلا به صورت یکپارچه بوده است، ولی تاکنون فقط شبکه جمع آوری فاضلاب فقط برای بخش هایی از شهر بابل اجرا شده و بهره برداری از تصفیه خانه

مشترک دو شهر بابل و امیرکلا صورت گرفته است. همانطور که پیش تر نیز بیان شد، شهر امیرکلا فاقد شبکه جمع آوری فاضلاب بوده ولی مطالعات مرحله اول پیش تر در قالب "طرح فاضلاب بابل و امیرکلا" توسط مشاور مهتاب قدس صورت گرفته بود. با این وجود، به دلیل بروز تغییرات در شرایط هیدرولیکی و فنی، جمعیت و ... لزوم بازنگری در مطالعات مرحله اول اجتناب ناپذیر بوده است. اطلاعات کلی درباره طرح فاضلاب شهر بابل و امیرکلا شامل شبکه و تصفیه خانه در جدول (۱) ارائه شده است.

بر اساس اطلاعات جمع بندی شده در طرح فاضلاب بابل، میزان پیشرفت فیزیکی و اجرایی شبکه جمع آوری فاضلاب، در بخش خطوط فاضلاب و فرعی ۴۱٪، در بخش خطوط اصلی ۲۵٪ و در بخش خطوط انتقال فاضلاب ۵۰٪ به دست آمده است. در بخش ایستگاه های پمپاژ، از تعداد کل ایستگاه های مورد نظر برای طرح فاضلاب بابل، تعداد ۴ واحد معادل با ۲۲ درصد اجرایی شده و در مدار بهره برداری می باشد. در طرح فاضلاب امیرکلا نیز باتوجه به اینکه تاکنون طرح جمع آوری و انتقال فاضلاب این شهر به مرحله اجرا نرسیده است، لذا پیشرفت فیزیکی در کلیه بخش های شبکه جمع آوری، خطوط اصلی و انتقال و ایستگاه پمپاژ برابر با صفر درصد می باشد. بنابراین، ضروری است اجرای طرح فاضلاب بابل (در نواحی نیمه تمام) و امیرکلا از جهات مختلف بررسی شده و توجیه پذیری آن ارزیابی شود.

جدول ۱- خصوصیات فنی طرح فاضلاب بابل و امیرکلا

توضیح	واحد	مقدار	
		بابل	امیرکلا
سال شروع طرح	سال	۱۳۷۴	
سال پایان طرح	سال	۱۴۳۰	
جمعیت در پایان دوره طرح	نفر	۴۱۴۲۲۱	۵۳۵۹۵
کل فاضلاب تولید شده	LPCD	۱۵۰	۱۴۱
بارندگی و رواناب	LPCD	۶۸	
جریان ورودی به تصفیه‌خانه	m ³ /d	۸۳۶۸۵	۱۰۳۱۸
ظرفیت نهایی تصفیه‌خانه	m ³ /d		۹۴۰۰۳

ارزیابی وضعیت محیط‌زیستی

ارزیابی اثرات محیط‌زیستی به منظور اتخاذ تصمیمات آگاهانه حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین انجام برنامه‌ریزی جهت پیشگیری از تأثیرات منفی محیط‌زیستی طرح‌ها و کاهش هزینه‌های سوء در آینده در ابعاد محلی و ملی ضروری خواهد بود.

در ارزیابی پیامدهای محیط‌زیستی (EIA)، اثرات ناشی از فعالیت‌های پروژه پیشنهاد شده که می‌تواند بر محیط فیزیکی، طبیعی و اجتماعی منطقه پروژه (به صورت منفی یا مثبت) تأثیرگذار باشد، شناسایی شده و براساس اثرات احتمالی طرح، راهکارهای کاهش و مدیریت اثر به منظور جلوگیری از بروز اثرات مضر و یا به حداقل رساندن آن‌ها ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که صحت اجرای برنامه‌های مدیریت محیط‌زیست با ارائه برنامه پایش محیط‌زیست کنترل می‌شود.

مشکلات مربوط به آلودگی فاضلاب از گذشته به عنوان يك معضل جدی مورد توجه بوده و امروزه با پیشرفت فناوری، این مشکلات نه تنها برطرف نشده بلکه به صورت متفاوتی افزایش یافته است. مشکلات جدی دیگری از قبیل استفاده‌های روز افزون از مواد شیمیایی خطرناک و غیر قابل تجزیه از قبیل حلال‌های شیمیایی، رنگ‌ها، آفت‌کش‌ها و فلزات سنگین در این زمینه تشدید کننده خواهد بود. این مواد به دلیل اینکه اغلب سمی بوده و به دلیل غیر قابل تجزیه بودن در محیط‌زیست باقی می‌مانند، از نظر اثرات منفی بر سلامت و بهداشت جامعه و همچنین از نظر تخریب محیط‌زیست اهمیت دارند. البته با ارتقاء آگاهی، دانش و مهارت در حفظ محیط‌زیست می‌توان از اثرات زیان‌بار موارد فوق جلوگیری نمود.

ارزیابی محیط‌زیستی يك پروژه فاضلاب مستلزم شناسایی، اندازه‌گیری و جمع‌بندی کلیه اثرات ناشی از اجرای آن پروژه می‌باشد. شناسایی اثرات در قدم اول مستلزم توصیف و درک شرایط محیط‌زیستی قبل از اجرای پروژه می‌باشد. از جمله فاکتورهایی که در این زمینه باید مد نظر قرار گیرند موقعیت جغرافیایی محل (به منظور تعیین اهمیت نسبی اثرات)، زمان‌بندی شروع اثرات، دوره زمانی تداوم هر اثر و همچنین برگشت‌پذیر یا غیرقابل برگشت بودن اثرات می‌باشند. پس از

شناخت وضعیت موجود منطقه و نیز شناخت اثرات طرح بر محدوده مطالعاتی، تجزیه و تحلیل اثرات محیط‌زیستی طرح فاضلاب براساس روش Wooten & Rau که جمع جبری حاصل ضرب‌های اعداد مربوط به اهمیت اثر در دامنه اثر را مبنای تجزیه و تحلیل قرار داده است، صورت می‌گیرد (Rau و Wooten، ۱۹۸۰)

ارزیابی وضعیت سلامتی

اثرات بهداشتی ناشی از استفاده مجدد از پساب خروجی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب دغدغه بسیار مهمی در مناطق خشک و نیمه خشک جهان است. به‌منظور به حداقل رساندن تأثیرات بهداشتی ناشی از استفاده مجدد از آب، دستورالعمل‌های زیادی منتشر شده که از جمله آن‌ها می‌توان به دستورالعمل‌های تأیید شده توسط سازمان بهداشت جهانی اشاره نمود.

پروژه فعلی احتمال بهبود سطح سلامت عمومی ناشی از اجرای پروژه را به حداکثر می‌رساند. در این بررسی، فرآیند تصفیه فاضلاب به‌گونه‌ای طراحی شده است تا اطمینان حاصل شود که نحوه کارکرد آن همواره به گونه‌ای باشد که الزامات استانداردهای سازمان بهداشت جهانی را برآورده سازد. دستورالعمل‌های سازمان بهداشت جهانی بر مبنای مطالعات اپیدمیولوژیک در مورد تأثیرات دفع فضولات و استفاده مجدد از پساب خروجی آن‌ها انجام گرفته است. درحال حاضر این استانداردها معتبرترین مستندات به منظور انجام فرآیند طراحی تصفیه‌خانه و نحوه تخلیه لجن و پساب خروجی است. اهداف کیفی تعیین شده برای پساب خروجی تصفیه شده مطابق با استاندارد سازمان بهداشت جهانی و استاندارد ملی ایران است.

فرآیند تصفیه باید به‌گونه‌ای طراحی شود که معیار نبود تخم کرمک‌ها یا کرم‌های روده (به میزان کمتر از ۱ مورد در هر لیتر) و باکتری‌های باسیلی شکل مدفوعی (کمتر از ۱۰۰/۴۰۰ میلی لیتر) را در پساب و لجن خروجی از تصفیه‌خانه فاضلاب پوشش دهد.

درباره عملکرد و کارایی سیستم گندزدایی باتوجه‌به بررسی‌های گسترده صورت گرفته، استفاده از سیستم UV نسبت به روش کلرزی محدودیت‌های بیشتری دارد. بنابراین برای

ضد عفونی پساب تصفیه شده تصفیه خانه فاضلاب بابل و امیرکلا، روش کلر زنی پیشنهاد شده است که سبب تأمین شرایط بهداشتی مورد نظر خواهد شد.

باتوجه به اینکه پساب خروجی این تصفیه خانه در فصول زراعی برای آبیاری اراضی کشاورزی می تواند استفاده شود، اجرای این پروژه با بهبود بخشیدن به کیفیت آب مورد استفاده برای آبیاری اراضی، فعالیت های آبیاری را به طور مستقیم تحت تأثیر قرار خواهد داد. لذا اجرای طرح فاضلاب در محدوده مطالعاتی، علاوه بر تأمین یک منبع آب سالم و دائمی برای آبیاری، با جلوگیری از تخلیه فاضلاب خام به معابر و آبراهه ها، از اشاعه آلودگی و عوامل بیماری زا در منطقه مطالعاتی طرح، به طرز چشمگیری جلوگیری خواهد کرد.

نظر به اینکه یکی از دلایل اصلی گسترش بیماری های عفونی ناشی از آب آلوده به فاضلاب، بالاخص در شهرهای شمالی، عدم وجود سیستمی بهداشتی جهت جمع آوری و دفع فضولات انسانی، آبیاری اراضی کشاورزی با فاضلاب خام و همچنین تماس مستقیم با آب های آلوده می باشد، روشن است که بهبود روش های جمع آوری، تصفیه و دفع فاضلاب تأثیر چشمگیری بر کاهش احتمال وقوع بیماری های وابسته به آب آلوده به فاضلاب خواهد داشت. به دلیل عدم اجرای کامل طرح فاضلاب در این شهر، در حال حاضر ساکنین شهر بابل و امیرکلا غالباً فاضلاب خود را به چاه های جذبی تخلیه می کنند. با اجرای کامل طرح بهداشتی جمع آوری و دفع فاضلاب در شهرهای طرح، فاضلاب های خانگی توسط سیستم بهداشتی جمع آوری و دفع فاضلاب کنترل خواهند شد که این امر منابع آب های سطحی و زیرزمینی را از آلودگی حفظ و به طور کلی منجر به بهبود شرایط محیط زیستی منطقه خواهد شد.

ارزیابی وضعیت اجتماعی

این پروژه مستلزم جابه جا شدن مردم یا از بین رفتن املاک آن ها نیست. زیرا خطوط جمع آوری و انتقال فاضلاب در معابر عمومی شهر ساخته خواهد شد. همچنین، باتوجه به موقعیت تصفیه خانه فاضلاب بابل و امیرکلا، تدابیر لازم به منظور به حداقل رساندن اثرات بوی بد و سر و صدای ناشی از فعالیت تصفیه خانه وجود دارد. انتظار بر این است که این پروژه با استفاده از افراد منطقه در زمینه توسعه، مدیریت، بهره برداری و نگهداری تصفیه خانه و شبکه جمع آوری فاضلاب و تعداد اندکی جهت پایش و مدیریت مسائل محیط زیستی طرح، فرصت های شغلی زیادی را برای مردم محلی ایجاد نماید. واضح است تأثیرات اقتصادی ناشی از این پروژه در کوتاه مدت با بررسی مطالعات مرتبط قابل پیش بینی نمی باشد. همچنین باتوجه به پتانسیل بالای منطقه برای انجام فعالیت های کشاورزی، انتظار می رود بعد از بهره برداری کامل از طرح و استفاده از پساب خروجی از پساب خروجی از تصفیه خانه فاضلاب با هدف تأمین آب بخش کشاورزی،

شرایط کشاورزی نیز در محدوده مورد مطالعه تأثیر مثبتی یابد.

تغییرات کاربری زمین يك اثر جزئی است که در فاز ساخت و ساز پروژه رخ می دهد. از آنجایی که فاضلاب روها در اماکن عمومی ساخته می شوند، سبب ایجاد تغییر کاربری زمین نشده و یا تغییرات کوتاه مدتی در این زمینه ایجاد می کنند و زمین تصفیه خانه فاضلاب که در نزدیکی امیرکلا احداث شده است، قبلاً در مرحله ساخت و ساز تغییر کاربری اراضی یافته است.

طرح های فاضلاب از مهمترین تأسیسات زیربنایی شهری می باشند که شرایط زندگی مناسب و افزایش رفاه اجتماعی را برای مردم به همراه می آورند. بنابراین تدارک یک شبکه جمع آوری و تصفیه خانه مناسب فاضلاب برای يك شهر شرایط ساخت و ساز در مناطق توسعه نیافته این شهر را تسهیل می نماید که خود فعالیت های ساخت و ساز با فراهم سازی فرصت های شغلی بیشتر، تأثیرات اقتصادی مثبتی را برای این شهر به همراه خواهند داشت.

اثرات زیر احتمالاً در طول فاز ساختمانی و در حین عملیات لوله گذاری و نیز توسعه تصفیه خانه فاضلاب ایجاد می شوند، البته خاطر نشان می سازد تمامی این اثرات کوتاه مدت بوده و پس از اتمام فعالیت های فاز ساختمانی پایان خواهند یافت. فعالیت هایی چون لوله گذاری فاضلاب در فاز ساختمانی طرح موجب بروز اثرات منفی زیر بر ساکنان محلی خواهد شد:

- مشکلات دسترسی به مناطق مسکونی و ساختمان ها؛
 - آلودگی صوتی در حین حفاری ترانشه ها و فعالیت های ساخت و ساز؛
 - مشکلات تلاقی با شبکه آب های سطحی
 - اثرات احتمالی ناشی از لرزه بر ساختمان های قدیمی و فرسوده؛
 - بسته شدن راه ها و یا بخشی از آن ها که موجب بروز تراکم ترافیک شده و یا استفاده از مسیر انحرافی که موجب افزایش مدت زمان مسافرت می شود؛
 - مشکلات پیش آمده برای عابران پیاده در حین عبور از مناطق در حال ساخت و ساز؛
 - آلودگی و گرد و غبار ناشی از فعالیت های ساخت و ساز؛
 - ترافیک ناشی از حمل و نقل مواد اولیه و نخاله های ساختمانی در حین ساخت اجزاء پروژه؛
 - ساخت انشعابات فاضلاب خانگی ممکن است برای ساکنان محلی مزاحمت ایجاد کند؛
 - مزاحمت ناشی از جابه جایی خطوط خدمات همگانی نظیر خط آب، گاز، برق، تلفن و غیره، به خصوص در مناطقی که نقشه های ساخت آن ها تهیه نشده باشد.
- این اثرات کوتاه مدت افرادی را تحت تأثیر قرار می دهد که در مجاورت عملیات ساخت و ساز زندگی می کنند. همچنین اثراتی که عابران پیاده را تحت تأثیر قرار می دهند نیز کوتاه مدت خواهند بود.

تحلیل مقایسه‌ای چند معیاری به روش AHP

روش AHP يك فرايند سلسله مراتبی است. در سطح اول این سلسله مراتب طرح‌های مورد مقایسه، در سطح دوم معیارها یا عوامل و در سطح سوم آن طرح‌های منتخب بررسی و ارزیابی می‌شوند.

در این روش معیارها (عوامل) به عنوان معیارهای تصمیم‌گیری انتخاب طرح بهینه مد نظر قرار می‌گیرند. در مرحله اول روش AHP طرحها از نظر هر کدام از معیارها در ماتریس‌های

جداگانه با هم مقایسه می‌شوند. مبنای مقایسه و اهمیت معیارها براساس جدول (۲) خواهد بود:

در مرحله دوم، ماتریس‌های محاسبه ارزشیابی طرح‌ها از نظر هر کدام از عوامل یا معیارها تهیه می‌شوند. اعداد این ماتریس از تقسیم اعداد سلول‌های ماتریس‌های مقایسه طرح‌ها از نظر عوامل به حاصل جمع ستون‌های عمودی مربوط به هر طرح به‌دست می‌آیند. سپس برای هر طرح، میانگین ردیف‌ها محاسبه و در ستون میانگین‌ها یادداشت می‌شوند. اعداد ستون میانگین‌های این جداول به عنوان ضریب معیارها (عوامل) محسوب می‌شوند.

جدول ۲- مقیاس امتیازدهی در مقایسه عوامل (معیارها)

امتیاز	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
اهمیت مساوی	مساوی	کمتری بهتر	کمی بهتر	کمی تا خیلی بهتر	خیلی بهتر	خیلی تا خیلی بهتر	خیلی بهتر	خیلی خیلی بهتر تا بینهایت بهتر	بینهایت بهتر

در مقایسه طرح‌ها مطابق جدول (۲) به طرح‌ها امتیاز داده می‌شود. باتوجه‌به این نکته که در جدول (۲) امتیازهای منفی وجود ندارد. به هنگام مقایسه دو عامل که اولی در رتبه پایین‌تری نسبت به دومی قرار دارد، ابتدا عامل دوم را نسبت به عامل اولی ارزیابی نموده و در محل مناسب خود در ماتریس قرار می‌گیرد. سپس در مکان مربوط به مقایسه طرح اول با دوم عکس امتیاز داده شده اعمال می‌شود. بر اساس روش AHP در مرحله سوم لازم است ضریب همخوانی به‌دست آید. به‌این‌ترتیب مشخص خواهد شد تا چه اندازه همخوانی در دادن امتیازها رعایت شده است. در روش AHP ضریب یا نسبت همخوانی نشان‌دهنده همخوان بودن امتیازهایی است که به عوامل مختلف داده شده است. هر چه مقدار این ضریب بیشتر باشد، همخوانی کمتر بوده و به ازای کاهش مقدار این ضریب، منجر به افزایش همخوانی می‌گردد. به‌طورکلی اگر این ضریب کمتر از ۰/۱ باشد، امتیازهای داده شده با یکدیگر همخوانی داشته و در غیر این‌صورت در اعمال امتیازها باید تجدید نظر صورت گیرد. در مرحله چهارم روش AHP عوامل دو به دو نیز با هم مورد مقایسه قرار گرفته‌اند و برحسب اهمیتی که دارند، مشمول امتیاز می‌شوند. پس از تشکیل این ماتریس محاسبه ادامه یافته و با به‌دست آوردن میانگین اجزا ماتریس در ردیف‌ها، وزن عوامل یا معیارها به‌دست می‌آید. با ضرب ماتریس وزن طرح‌ها بر حسب عوامل در بردار وزن عوامل، ماتریس جدیدی

به‌دست می‌آید که اگر در آن اجزا و ستون مربوط به هر کدام از طرح‌ها با هم جمع شود مقدار ارزش نهایی هر يك از طرح‌ها به دست خواهد آمد.

برای مقایسه چند معیاری به روش AHP، مجموعاً هفت معیار شامل عوامل محیط‌زیستی، اجتماعی، اقتصادی و فنی بررسی شده است. معیارهای مورد نظر با توجه به سهولت عملیات اجرایی، انطباق با استانداردهای فنی، بهداشت عمومی، رضایت‌مندی اجتماعی، حفظ کیفیت خاک، حفظ کیفیت آب، سرمایه‌گذاری اولیه می‌باشد.

معیارهای مورد نظر در گزینه‌های مورد مقایسه در جدول (۳) نشان داده شده است. در این جدول وضعیت بهبود یافته نسبی (با دو گزینه اجرای شبکه و خط انتقال بدون تصفی خانه و با تصفیه‌خانه) نسبت به وضعیت موجود (استفاده از چاه جذبی) و نیز عرضه خدمات ترکیبی (استفاده از چاه‌های جاذب و بخشی از شبکه و تصفیه‌خانه فاضلاب) مقایسه شده‌اند. در این پژوهش از نرم‌افزار EC 2000 به منظور تحلیل داده‌ها استفاده شده است.

باتوجه‌به مقادیر جدول (۳) به عنوان مبنای امتیازدهی برای مقادیر کیفی به منظور مقایسه معیارها طراحی شده و جدول (۴) که ضرایب همخوانی محاسبه شده را ارائه می‌نماید، شکل‌های (۲) تا (۹) وزن گزینه‌های مختلف از نظر معیارهای مذکور و نیز نرخ ناسازگاری هر کدام را نمایش می‌دهند.

جدول ۳- معیارهای مورد نظر در گزینه‌های مورد مقایسه

معیار	فنی		اجتماعی		محیط زیستی		اقتصادی
	سهولت اجرا	انطباق با استانداردها	بهبود سلامت	میزان رضایتمندی از وضعیت دفع فاضلاب	کیفیت خاک	کیفیت آب	
وضع موجود	۸	۳	۲	۲	۲	۲	۶
اجرای شبکه جمع‌آوری و انتقال فاضلاب	۶	۵	۴	۵	۳	۵	۳
اجرای شبکه جمع‌آوری و انتقال فاضلاب و تصفیه‌خانه	۲	۸	۸	۹	۸	۸	۱
تلفیقی (استفاده از بخشی از چاه‌های جاذب و شبکه جمع‌آوری و تصفیه‌خانه)	۴	۶	۶	۸	۴	۶	۲

جدول ۴- ضریب همخوانی معیارها

معیار	سهولت اجرا	انطباق با استانداردهای فنی	رضایتمندی	بهداشت عمومی	کیفیت خاک	کیفیت آب	سود خالص سالیانه	سرمايه‌گذاري اوليه
ضریب همخوانی	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۲

یک از معیارهای چهارگانه‌ای که در جدول (۳) قید شده است می‌باشد. در هر یک از شکل‌های (۲) تا (۹)، به ترتیب وضع موجود، اجرای شبکه جمع‌آوری و انتقال فاضلاب، اجرای شبکه جمع‌آوری و انتقال فاضلاب و تصفیه‌خانه و تلفیقی (استفاده از بخشی از چاه‌های جاذب و شبکه جمع‌آوری و تصفیه‌خانه) می‌باشند.

براساس جدول (۴) کلیه اعداد مربوط به ضریب همخوانی، مقادیری کوچکتر از ۰/۱ داشته و این امر نشان‌دهنده آن است که در امتیازات دادن ه معیارهای هشت‌گانه همخوانی لازم رعایت شده است. باتوجه به محاسبات انجام شده و با در نظر گرفتن مجموعه معیارهای محیط زیستی، اقتصادی، اجتماعی و فنی، نتایج زیر در شکل‌های (۲ تا ۹) به دست آمده است که بیانگر وزن هر

Priorities with respect to:
Goal: choose the best plan
>simplicity of performance



شکل ۲- وزن گزینه‌های مختلف از نظر سهولت اجرا

Priorities with respect to:
Goal: choose the best plan
>compare with standard



شکل ۳- وزن گزینه‌های مختلف از نظر استاندارد

Priorities with respect to:
Goal: choose the best plan
>health



شکل ۴- وزن گزینه‌های مختلف از نظر بهداشت

Priorities with respect to:
Goal: choose the best plan
>soil quality



شکل ۵- وزن گزینه‌های مختلف از نظر کیفیت خاک

Priorities with respect to:
Goal: choose the best plan
>social



شکل ۶- وزن گزینه‌های مختلف از نظر رضایت‌مندی از دفع فاضلاب

Priorities with respect to:
Goal: choose the best plan
>water quality



شکل ۷- وزن گزینه‌های مختلف از نظر کیفیت آب

Priorities with respect to:
Goal: choose the best plan
>primary cost

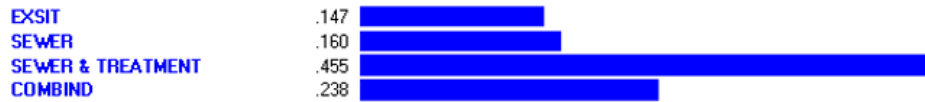


شکل ۸- وزن گزینه‌های مختلف از نظر سرمایه‌گذاری

Synthesis with respect to:

Goal: choose the best plan

Overall Inconsistency = .01



شکل ۹- وزن نهایی گزینه‌ها

بررسی‌های انجام گرفته در این بخش مشخص می‌شود که طرح به لحاظ اجتماعی توجیه لازم را دارد. باتوجه به روند فزاینده رشد جمعیت در شهر بابل و امیرکلا، سامانه سنتی دفع فاضلاب به دلیل آلودگی‌های محیطی در دراز مدت پاسخگوی نیازهای بهداشتی و محیط‌زیستی منطقه طرح نخواهد بود. گزینه احداث شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب تا حد استانداردهای رایج محیط‌زیستی در سطح کشور برای محدوده مطالعاتی گزینه برتر بوده و تأثیرات عمده‌ای را بر وضعیت بهداشت و محیط‌زیست این شهر و مناطق اطراف خواهد داشت، ضمن اینکه با بازیابی فاضلاب استفاده در کشاورزی از هدر رفتن آب خصوصاً در مناطق کم‌آب جلوگیری می‌شود. به این ترتیب اجرای این پروژه به لحاظ محیط‌زیستی توجیه لازم را دارد. در مطالعات توجیهی طرح‌های فاضلاب پس از ارزشیابی طرح از دیدگاه مالی (خصوصی) با انجام برخی اصلاحات در ساختار هزینه‌ای و درآمدی می‌توان موقعیت طرح را از دیدگاه اجتماعی و اقتصادی نیز مشخص نمود. در مقایسه روش‌های قابل پیش‌بینی جمع‌آوری و یا دفع فاضلاب شهر بابل و امیرکلا چهار گزینه به شرح زیر بررسی شده است:

- الف- حفظ وضع موجود دفع فاضلاب (تخلیه بخش زیادی از شهر به چاه‌های جاذب)
 - ب- سامانه جمع‌آوری فاضلاب و انتقال به خارج از شهر
 - ج- سامانه جمع‌آوری فاضلاب و انتقال به تصفیه‌خانه
 - د- حالت ترکیبی گزینه الف و ج
- با بررسی گزینه‌های فوق از جنبه عوامل محیط‌زیستی، اجتماعی، اقتصادی و فنی مشتمل بر معیارهای هفت‌گانه (سهولت اجرای طرح، تطابق با استانداردهای فنی، رضایتمندی مردم از گزینه مورد نظر، بهبود سلامت و بهداشت عمومی مردم، به مخاطره افتادن کیفیت آب و خاک منطقه، هزینه سرمایه‌گذاری هر طرح گزینه) و امتیازدهی به آن‌ها و باتوجه به اهداف توسعه پایدار، گزینه اجرای کامل شبکه جمع‌آوری، خط انتقال و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهر بابل و امیرکلا بالاترین امتیاز در اولویت می‌باشد. همانطور که از اوزان نمایش داده شده در شکل‌ها مشخص است، شرایط موجود بهترین شرایط را از نظر سهولت اجرا و شرایط اجرای شبکه جمع‌آوری، خط انتقال و تصفیه‌خانه فاضلاب بدترین شرایط را دارد. از دیدگاه انطباق با استانداردهای فنی شرایط اجرای شبکه جمع‌آوری، خط انتقال و تصفیه‌خانه فاضلاب بیشترین

همانطور که از وزن‌های نمایش داده شده در شکل‌های (۲) تا (۹) مشخص است، از نظر سهولت اجرا، شرایط موجود بهترین وضعیت و شرایط اجرای شبکه جمع‌آوری، خط انتقال و تصفیه‌خانه فاضلاب، بدترین وضعیت را خواهد داشت. از دیدگاه انطباق با استانداردهای فنی، شرایط اجرای شبکه جمع‌آوری، خط انتقال و تصفیه‌خانه فاضلاب بیشترین تطابق و شرایط موجود کمترین انطباق را دارد. از لحاظ رعایت مسائل بهداشتی، شرایط اجرای شبکه جمع‌آوری خط انتقال و تصفیه‌خانه فاضلاب بهترین وضعیت و شرایط و شرایط موجود بدترین وضعیت را نشان می‌دهد. از نظر میزان رضایتمندی مردم، شرایط اجرای شبکه و خط انتقال فاضلاب و همچنین شرایط اجرای شبکه جمع‌آوری، خط انتقال و تصفیه‌خانه فاضلاب بالاترین میزان انطباق و ماندگاری وضعیت موجود کمترین میزان انطباق را خواهد داشت. از نظر حفاظت از کیفیت خاک و منابع آب، شرایط اجرای شبکه، خط انتقال و تصفیه‌خانه فاضلاب در بهترین حالت و وضعیت موجود در بدترین حالت قرار دارد و در انتها از نظر سرمایه‌گذاری اولیه، شرایط موجود بیشترین وزن و شبکه جمع‌آوری، خط انتقال و تصفیه فاضلاب کمترین وزن را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

باتوجه به دانش مهندسی کشور درباره اجرای کامل طرح‌های فاضلاب شامل شبکه‌های جمع‌آوری، خطوط انتقال و نیز تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با گزینه‌های فرآیندی پیشنهادی در این طرح، اجرای طرح جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب از نظر فنی کاملاً موجه است.

هم‌زمان با ارزیابی‌های صورت گرفته و ضمن توجه به بررسی‌های فنی، ابعاد اجتماعی نیز اهمیت دارد، بنابراین به منظور درک صحیحی از وضعیت موجود نسبت به تدوین پرسش‌نامه اقدام گردید. مطابق با نتایج به دست آمده از پرسش‌نامه‌ها، ۹۸ درصد از اهالی شهرهای مورد نظر احداث مجاری فاضلاب را از نظر بهداشتی بسیار مؤثر می‌دانند که این نکته می‌تواند به عنوان یک عامل مساعد در اجرای طرح مد نظر قرار گیرد. به این ترتیب ۹۴ درصد نتایج پرسشنامه‌هایی که برای جمع‌بندی بین ذی‌نفعان پخش شده بود حکایت از رضایت مردم در تمایل به اتصال در شبکه جمع‌آوری فاضلاب دارد که علاقه‌مندی ساکنان را نشان می‌دهد. در حدود ۹۸ درصد نظردهندگان نیز در ارتباط با سوال نگهداری و حفاظت تأسیسات بعد از احداث، نظر مثبت داشته‌اند. در مجموع با

تطابق و وضعیت موجود کمترین انطباق را دارد. شرایط اجرای شبکه جمع‌آوری خط انتقال و تصفیه‌خانه فاضلاب بهترین وضعیت از لحاظ رعایت مسائل بهداشتی و شرایط موجود بدترین وضعیت را نشان می‌دهد. میزان رضایتمندی مردم از شرایط اجرای شبکه و خط انتقال فاضلاب و نیز شرایط اجرای شبکه جمع‌آوری، خط انتقال و تصفیه‌خانه فاضلاب بالاترین نسبت را به خود اختصاص داده درحالی‌که وضعیت موجود کمترین رضایتمندی مردم را در بر دارد. حفاظت از کیفیت خاک و منابع آب در شرایط اجرای شبکه، خط انتقال و تصفیه‌خانه فاضلاب در بهترین حالت و وضعیت موجود در بدترین حالت قرار دارد.

منابع

ذوالفقاری، زهرا، کزازی، سینا، و حاجی‌نژاد، احمد. (۱۴۰۱). ارزیابی اقتصادی پتانسیل استحصال انرژی از فاضلاب شهری در خرم‌آباد، سیستم‌های انرژی پایدار، ۱ (۳)، ۲۵۱-۲۶۳.

<https://doi.org/10.22059/SES.2023.344878.101>

1

شیرزاد، اکبر، و عبدالهی، احمدرضا. (۱۳۹۶). طراحی بهینه شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری با تاکید بر جنبه‌های اجرایی در شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهر ارومیه، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳ (۲)، ۲۱۵-۲۲۰.

<https://doi.org/10.22067/iwrr.v3i1.59789>

طالبی، حسن، و روحانی، زکیه. (۱۳۹۳). انتخاب بهینه محل و نوع فرآیند جمع‌آوری فاضلاب با تحلیل سلسله مراتبی چند معیاره در شهر ورزقان، آب و فاضلاب، ۲۵ (۵)، ۱۲۸-۱۳۳.

<https://doi.org/10.22067/ww.v47i1.43713>

عسگریان، مانده، تابش، مسعود، روزبهرانی، عباس. (۱۳۹۴). ارزیابی ریسک شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری فازی. آب و فاضلاب، ۴، ۷۴-۸۷.

<https://doi.org/10.22067/iwrr.v3i1.43475>

ماجد، وحید، گلزاری، ساحره. (۱۳۹۵). تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب، آب و توسعه پایدار، ۳ (۱)، ۸۳-۹۲.

<https://doi.org/10.22067/jwsd.v3i1.59446>

مسعودی، حمید. (۱۴۰۱). تحلیل جامعه شناختی مشارکت اجتماعی در طراحی و اجرای شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب شهری، آب و توسعه پایدار، ۹ (۱)، ۱۰۵-۱۱۶.

<https://doi.org/10.22067/jwsd.v9i1.2110.1090>

معینی، رامتین، افشار، محمدهادی. (۱۳۹۳). بهینه‌سازی طراحی جامع تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی با الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان، آب و فاضلاب، ۲۵ (۱)، ۱۴-۲۴.

<https://doi.org/10.22067/ww.v3i1.48415>

Rau, J. G., & Wooten, D. C. (1980). Environmental impact analysis, John Wiley & Sons, NewYork, USA.

Document Type

Applied Article

پژوهش کاربردی

نوع مقاله

Hydrodynamic Analysis of Flow and Discharge Coefficient in Weirs with Porous Media under Free Overtopping Conditions

S. A. R. Esmaili¹, M. Heydari^{2*}, S. Gohari²

1, 2- Ph.D. Candidate and Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

* Corresponding Author Email: mheydari@basu.ac.ir

Received 11-08-2025
Revised 05-09-2025
Accepted 06-09-2025
Available online 16-03-2026

تحلیل هیدرودینامیک جریان و ضریب دبی در سرریزهای با محیط متخلخل در شرایط روگذر آزاد

سید علیرضا اسماعیلی^۱، مجید حیدری^{۲*}، سعید گوهری^۲

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

* راینامه نویسنده مسئول: mheydari@basu.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۵/۲۰
تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۶/۱۴
تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۶/۱۵
تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

Abstract

In this experimental study, the discharge coefficient of flow over rectangular broad-crested weirs was examined under two conditions: solid and porous (gabion). For the porous weir, eight tests were conducted with effective lengths of 30 cm and 60 cm, using three gradations with mean particle diameters of 11 mm, 19 mm, and 28 mm. Initially, under free-flow conditions downstream of the weir, discharge coefficients for solid and gabion weirs were calculated and compared. Additionally, variations in velocity profiles and Reynolds shear stress distributions within the hydraulic domain of the weir were evaluated. The analysis of the water surface profile demonstrated that increasing gabion particle size reduced resistance to flow, thereby requiring a greater discharge to achieve fully overtopping conditions. Conversely, at constant discharge, increasing the weir length enhanced hydraulic resistance, leading to a higher upstream head. Examination of discharge coefficients revealed an increasing trend with longer weir lengths at equal discharges. On average, coefficients for porosities of 38%, 42%, and 45% were 0.74, 0.82, and 0.89 for the 30 cm weir, and 0.95, 1.00, and 1.20 for the 60 cm weir, respectively, whereas the solid weir yielded a coefficient of about 0.38. Furthermore, by applying a multivariable correlation equation and employing a gene expression programming (GEP) model based on dimensional analysis, an efficient predictive relationship for discharge over gabion weirs was developed, achieving a coefficient of determination of 98%.

Keywords: Porous Weir, Velocity Profiles, Reynolds Shear Stress, Water Surface Profile, GEP.

چکیده

در این پژوهش آزمایشگاهی، ضریب دبی جریان در سرریزهای لبه پهن مستطیلی در دو حالت صلب و متخلخل (گابیونی) بررسی شد. در بخش مربوط به سرریز متخلخل، هشت آزمایش با دو طول مؤثر ۳۰ و ۶۰ سانتی متر و سه نوع دانه بندی با قطر متوسط ۱۱، ۱۹ و ۲۸ میلی متر اجرا شد. در مرحله نخست، با ایجاد شرایط جریان آزاد در پایین دست، ضرایب دبی برای سرریزهای صلب و گابیونی محاسبه و مقایسه شد. همچنین تغییرات پروفیل سرعت جریان و توزیع تنش برشی رینولدزی در محدوده هیدرولیکی سرریز ارزیابی شد. نتایج تحلیل پروفیل سطح آب نشان داد افزایش اندازه ذرات گابیون موجب کاهش مقاومت در برابر عبور جریان شده و در نتیجه برای دستیابی به شرایط جریان کاملاً روگذری، دبی بیشتری مورد نیاز است. در مقابل، در شرایط دبی ثابت، افزایش طول سرریز مقاومت هیدرولیکی را تقویت کرده و موجب افزایش بار هیدرولیکی بالادست می شود. بررسی ضرایب دبی نشان داد در دبی یکسان، با افزایش طول سرریز روند تغییرات ضریب دبی صعودی است. به طور میانگین، ضرایب دبی برای تخلخل های ۳۸، ۴۲ و ۴۵ درصد در طول ۳۰ سانتی متر به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۸۲، ۰/۸۹ و در طول ۶۰ سانتی متر معادل ۰/۹۵، ۱/۰ و ۱/۲۰ محاسبه شد، در حالی که این مقدار در حالت صلب حدود ۰/۳۸ گزارش شد. با به کارگیری معادله همبستگی چندمتغیره و استفاده از مدل برنامه ریزی ژنتیکی بیان ژن (GEP) مبتنی بر تئوری تحلیل ابعادی، رابطه ای کارآمد برای محاسبه دبی عبوری بر روی سرریز گابیونی استخراج شد که ضریب تعیین آن برابر با ۹۸ درصد حاصل شد.

واژه های کلیدی: سرریز متخلخل، پروفیل سرعت، تنش برشی رینولدز، پروفیل سطح آب، GEP.

How to cite this article:

Esmaili, S.A.R., Heydari, M., & Gohari, S. (2026). Hydrodynamic Analysis of Flow and Discharge Coefficient in Weirs with Porous Media under Free Overtopping Conditions. Journal of Water and Sustainable Development, 12(4), 88-102.
<https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i4.2508-1449>

اثبات کرده است که برای دبی یکسان، بار هیدرولیکی در سرریز گابیونی کمتر از سرریز صلب بوده و این کاهش با افزایش اندازه سنگدانه‌ها تشدید می‌شود. همچنین [Dhahir و همکاران \(۲۰۱۷\)](#) فاصله تشکیل پرش هیدرولیکی را تابعی از میزان استهلاک انرژی در سرریزهای گابیونی معرفی کردند. [Percy و Sargison \(۲۰۰۹\)](#) بیان کردند ضریب دبی سرریزهای صلب با افزایش شیب بالادست سرریز، کاهش می‌یابد.

[Mohajeri و Safarzadeh \(۲۰۱۸\)](#) نیز به تحلیل عددی جریان بر روی سرریزهای گابیونی لبه‌پهن مستطیلی با استفاده از مدل‌های CFD نرم‌افزار (Flow-3D) و مدل آشفتگی- RNG k-ε پرداختند. این مطالعه با استفاده از نتایج آزمایشگاهی [Mohamed \(۲۰۱۰\)](#) صحت‌سنجی شد. نتایج نشان داد با افزایش اندازه دانه‌ها، دبی عبوری از درون سرریز افزایش یافته و در نتیجه ارتفاع آب در بالادست کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش جریان، مقاومت بستر گابیونی افزایش یافته و باعث تبدیل رفتار آن به سازه‌ای مشابه سرریز صلب می‌شود.

[Zahiri و Najafzadeh \(۲۰۱۷\)](#) از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) برای پیش‌بینی دبی در مقاطع مرکب کانال‌ها استفاده کردند. [Khatibi و همکاران \(۲۰۱۴\)](#) در مطالعه آزمایشگاهی اتلاف انرژی در سرریزهای گابیونی پله‌ای، عملکرد برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) را در کنار شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) بررسی کرده و نشان دادند این روش قادر به بازنمایی دقیق روابط هیدرولیکی پیچیده میان متغیرهای جریان است. همچنین سایر پژوهشگران از جمله [Kim و همکاران \(۲۰۱۴\)](#)، [Salmasi و همکاران \(۲۰۲۰\)](#)، [Rahmanshahi و Shafai Bejestan \(۲۰۲۰\)](#)، [Roushangar و همکاران \(۲۰۱۴\)](#)، [Azamathulla و همکاران \(۲۰۱۰\)](#) عملکرد مناسب و صحیح برنامه‌نویسی بیان ژن در پژوهش‌های آزمایشگاهی از جمله برآورد ضریب دبی در سرریز مستطیلی لب‌پهن، ضریب سرریزهای اوجی، ضریب دبی سرریزهای گابیونی قوسی، افت انرژی سرریزهای پلکانی، افت انرژی در بلوک‌های شیب‌دار، ضریب زبری، فرسایش بستر، پیش‌بینی سرعت در کانال‌های مرکب، را تأیید کردند.

[Fathi-Moghaddam و همکاران \(۲۰۱۸\)](#) با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی (CFD)، عملکرد هیدرولیکی سرریزهای گابیونی با تخلخل‌های ۴۳، ۴۴ و ۴۶ درصد و در اشکال مثلثی و دوزنقه‌ای را بررسی کردند. نتایج نشان داد کاهش قطر متوسط ذرات مصالح گابیونی منجر به کاهش ضریب دبی (C_d)، دبی عبوری و اتلاف انرژی جریان می‌شود، به گونه‌ای که این کاهش به ترتیب تا حدود ۲۷، ۳۴ و ۸ درصد قابل مشاهده است.

در ادامه [Shariq و همکاران \(۲۰۲۰\)](#) اثبات کردند افزایش قطر ذرات و عمق جریان بالادست موجب افزایش دبی عبوری از درون سرریز می‌شود، درحالی‌که دبی عبوری در سرریزهای با ذرات ریزتر کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. آن‌ها همچنین

سرریزها از سازه‌های کلیدی هیدرولیکی در مدیریت، انتقال و کنترل جریان به شمار می‌روند و در اندازه‌گیری و تنظیم دبی در آبراهه‌ها، رودخانه‌ها و مخازن کاربرد گسترده‌ای دارند. هندسه سرریز، به‌ویژه شکل لبه و مقطع آن، نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی هیدرولیکی این سازه‌ها ایفا می‌کند. در این میان، سرریزهای گابیونی لبه‌پهن به دلیل پایداری سازه‌ای و قابلیت مطلوب در سنجش دبی جریان، به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد در طراحی‌های هیدرولیکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نوع سرریزها مدیریت مؤثر سیلاب‌های کوتاه‌مدت و حفظ کیفیت محیط‌زیستی رودخانه‌ها را ممکن ساخته و با کاهش هزینه اجرایی نسبت به سازه‌های صلب، گزینه‌ای اقتصادی محسوب می‌شوند. عملکرد هیدرولیکی سرریزهای گابیونی به دلیل تخلخل بدنه و امکان عبور جریان از میان مصالح، به‌طور اساسی با سرریزهای صلب تفاوت دارد. این ویژگی منجر به پیچیدگی در رفتار جریان، شامل تغییرات ضریب دبی، پروفیل سطح آب و تأثیر ویژگی‌های دانه‌بندی بر پارامترهای هیدرولیکی می‌شود. با وجود مطالعات انجام شده، رفتار هیدرولیکی سرریزهای گابیونی لبه‌پهن مستطیلی در شرایط مختلف جریان به‌طور جامع شناسایی نشده و همچنان نیازمند پژوهش‌های دقیق‌تر است.

سرریزهای گابیونی در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران متعددی قرار گرفته و از منظرهای گوناگون هیدرولیکی بررسی شده‌اند. هرچند این سرریزها از نظر هندسی مشابه نمونه‌های صلب هستند، عبور جریان از میان بدنه متخلخل آن‌ها موجب تفاوت‌های اساسی در رفتار و عملکرد هیدرولیکی سازه می‌شود.

[Michioku و همکاران \(۲۰۰۵\)](#) با بهره‌گیری از مدل‌سازی یک‌بعدی جریان در محیط متخلخل، رابطه‌ای نظری برای دبی عبوری از سرریزهای سنگریزه‌ای ارائه کردند. این مطالعه نشان داد که دبی تابعی از عمق جریان در بالادست و پایین‌دست، طول و تخلخل سرریز و قطر متوسط مصالح است و صحت آن با داده‌های آزمایشگاهی تأیید شد.

[Chanson \(۲۰۰۶\)](#) با نقد و تکمیل یافته‌های پژوهش [Michioku و همکاران \(۲۰۰۵\)](#) بر اهمیت بررسی برهم‌کنش جریان روگذری و درون‌گذری در سرریزهای متخلخل تأکید کرد و بیان داشت که در بسیاری از کاربردهای مهندسی، این دو مؤلفه نمی‌توانند به‌صورت مجزا در نظر گرفته شوند. وی همچنین نقش شکل هندسی پایین‌دست سازه و زبری سطح را در شدت جریان تراوشی و آشفتگی جریان تأثیرگذار دانست.

بررسی‌هایی پژوهش‌هایی مانند [Leu و همکاران \(۲۰۰۸\)](#) نشان داد با افزایش تخلخل سازه، شدت آشفتگی جریان پایین‌دست کاهش می‌یابد، درحالی‌که [Mohamed \(۲۰۱۰\)](#)

به دست آمده از مطالعه بر روی مدل های آزمایشگاهی پرداخته تا تاثیر عوامل مختلف مانند عمق آب، تخلخل، قطر دانه بندی و ابعاد هندسی سازه بر روی ضریب دبی در شرایط جریان آزاد تعیین شود.

مواد و روش ها

پژوهش حاضر در آزمایشگاه مدل های فیزیکی و هیدرولیکی گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. آزمایش ها در فلوم آزمایشگاهی به طول ۷ متر، عرض ۵۰ سانتیمتر و ارتفاع ۶۵ سانتیمتر، بر روی یک شاسی به ارتفاع ۸۰ سانتیمتر از زمین و شیب ثابت ۰/۰۱ انجام شد (شکل ۱). دبی بیشینه کانال ۳۰ لیتر بر ثانیه می باشد. شرایط جریان در محدوده سرریز گابیونی با استفاده از داده های اندازه گیری شده سرعت توسط سرعت سنج صوتی ADV مدل نورتن با فرکانس ۲۵ هرتز ثبت شد. قسمت ورودی کانال در بالادست مجهز به آرام کننده جریان بود و تراز سطح آب با دستگاه عمق سنج نقطه ای مجهز به ورنیه به دقت $\pm 0/1$ میلی متر اندازه گیری شد.

نشان دادند گرادیان هیدرولیکی در سرریزهای گابیونی از قانون فورشهیمیر تبعیت می کند و در میان روابط موجود، رابطه [Ergun \(۱۹۵۲\)](#) برای محاسبه گرادیان هیدرولیکی دقت بالاتری دارد.

از منظر آزمایشگاهی، [Salmasi و همکاران \(۲۰۲۱a\)](#) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای گابیونی مستطیلی را در شرایط جریان آزاد و مستغرق بررسی کرده و دریافتند ضریب دبی در سرریزهای گابیونی به طور معناداری بیشتر از سرریزهای صلب است. همچنین مشخص شد که مقدار C_d در شرایط جریان آزاد حدود ۱۷ درصد بیشتر از حالت مستغرق است.

در مطالعه ای دیگر، [Shariq و همکاران \(۲۰۲۲\)](#) با انجام آزمایش های فیزیکی بر روی سرریزهای صلب و گابیونی تحت جریان آزاد و مستغرق، تغییرات پروفیل سطح آب و اثر تخلخل را ارزیابی کردند. نتایج آنان نشان داد نسبت افت انرژی به ارتفاع تاج در سرریزهای گابیونی بر مقدار ضریب دبی تأثیر مستقیم دارد.

این پژوهش با تمرکز بر بررسی عملکرد رفتار هیدرولیکی سرریزهای گابیونی لبه پهن مستطیلی، به ارائه نتایج



الف

ب

ج

شکل ۱- الف) شمای کلی از سرریز گابیونی آزمایشگاهی و تمام تجهیزات مورد استفاده، ب) موقعیت دستگاه سرعت سنج ADV و مانومترهای اندازه گیری، ج) عمق سنج مکانیکی

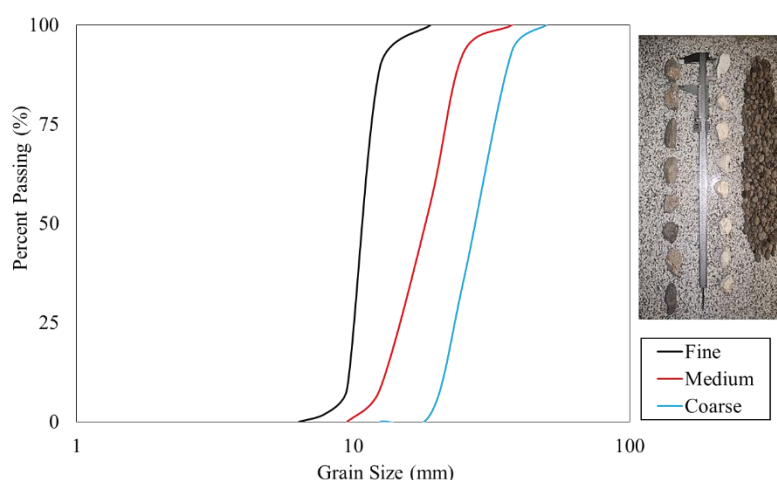
و ۱۶ درصد از ذرات از آن کوچکتر است، محاسبه و در جدول (۱) ارائه شده است.

باتوجه به دانه بندی یکنواخت ذرات ($1.35 - 1.3 < C_u$)، می توان با اطمینان از تأثیر انحراف معیار هندسی توزیع اندازه ذرات گابیون صرف نظر کرد.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}} \quad (2)$$

سه نوع دانه بندی مربوط به سرریز گابیونی و با ۲ طول گابیون در مجموع تعداد ۶ مدل سرریز لبه پهن گابیونی برای بررسی فراهم شد. به منظور تعیین اندازه متوسط ذرات سنگی (D_{50}) تشکیل دهنده گابیون از آزمایش دانه بندی به روش ASTM استفاده شد. منحنی دانه بندی ذرات در شکل (۲) نمایش داده شده است. اندازه متوسط سنگدانه های مورد استفاده ۱۱، ۱۹ و ۲۸ میلی متر می باشد. انحراف معیار (σ_g) و ضریب یکنواختی ذرات (C_u) با استفاده از روابط (۱) و (۲) که براساس (D_{60}) ، (D_{10}) ، (D_{84}) و (D_{16}) قطری که به ترتیب ۸۴، ۱۰، ۶۰، ۱۶



شکل ۲- دانه بندی مصالح مورد استفاده در سرریز لبه پهن گابیونی

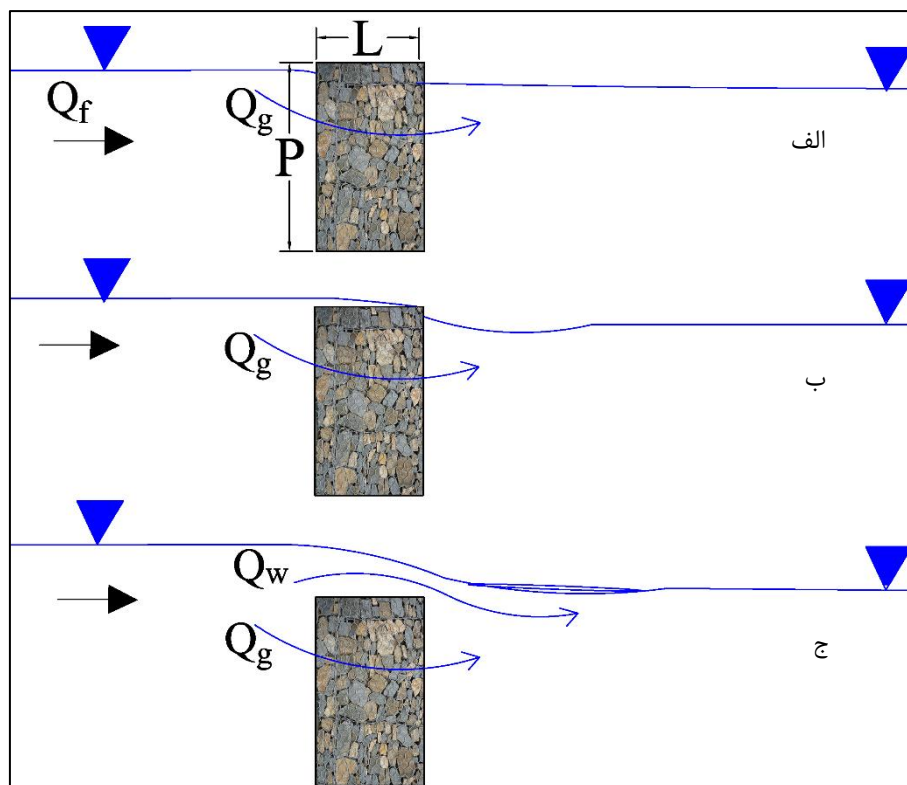
جدول ۱- مشخصات مصالح مورد استفاده

نوع دانه بندی	D_{50}	D_{10}	D_{60}	D_{84}	C_u	n	σ_g
Fine	۱۱	۹/۶	۱۱/۵	۱۳	۱/۲	۳۸	۰/۶۸
Medium	۱۹	۱۳	۱۷	۲۱/۷	۱/۳	۴۱	۰/۸۳
Coarse	۲۸	۲۱/۴	۲۹	۳۵	۱/۳	۴۵	۰/۷۸

بخشی از روی سرریز (Q_w) عبور می کند. جریان عبوری از بالای سرریز به عنوان جریان روگذر و بخشی که از داخل گابیون عبور می کند به عنوان درون گذر شناخته می شود. ناحیه جداشدگی خطوط جریان در بالادست به عمق آب روی سرریز وابسته است. ناحیه میانی در بالادست سرریز به عنوان ناحیه رکود خواهد بود. در پایین دست سرریز جریان عبوری از روی سرریز در برخورد به جریان عبوری از درون آن ناحیه ای با اغتشاش زیاد ایجاد می کند که از نظر هیدرولیکی اهمیت خاصی دارد و به عنوان راهکاری بر اتلاف انرژی مورد استفاده قرار می گیرد.

قبل از شروع آزمایش ها، تراز بستر در قسمت بالادست و پایین دست کانال ثبت شد. جریان ثابتی در کانال برقرار و پس از پایداری جریان عمق آب در قسمت های بالادست و پایین دست با استفاده از عمق سنج مکانیکی اندازه گیری شد. در سرریزهای گابیونی، باتوجه به شدت جریان ورودی، مشخصات مصالح داخل سرریز، هدایت هیدرولیکی و هندسه سرریز، جریان عبوری از سرریز را می توان به سه بخش: ۱- جریان درون گذر ($H < P$)، ۲- جریان روگذر ($H = P$) و ۳- جریان بینابینی (هم زمان درون گذر و روگذر ($H \leq P$)) تقسیم کرد (شکل ۵).

مسیر جریان در بالادست (Q_f) در نزدیکی و به سمت سرریز دو مسیر را ادامه می دهد، بخشی از آن از درون سرریز (Q_g) و



شکل ۳- شرایط مختلف جریان عبوری از سرریز گابیونی (الف) جریان درون گذر، (ب) جریان همزمان درون گذر و روگذر (بینابینی)، (ج) جریان روگذر

آنالیز ابعادی

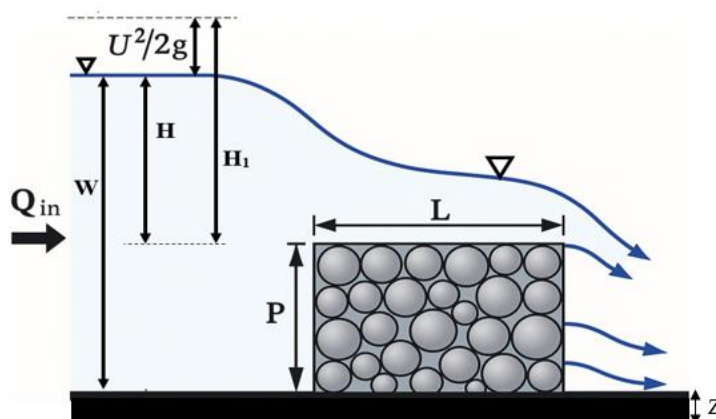
طرح شماتیک جریان عبوری از روی یک سرریز گابیونی لبه پهن در شکل (۱) نشان داده شده است. از آنجایی که بسیاری از روابط حاکم بر پدیده‌های هیدرولیکی را نمی‌توان مستقیماً از قوانین حاکم بر سیالات و تئوری‌های موجود، مانند قوانین بقای جرم، انرژی و ممنتوم به دست آورد (اسماعیلی و همکاران، ۱۴۰۱)؛ بنابراین به منظور تحلیل هیدرولیکی جریان در سرریزهای گابیونی، در ابتدا سعی شد با تحلیل ابعادی بر اساس تئوری باکینگهام پارامترهای بدون بعدی برای محاسبه ضریب سرریز به دست آید. درحالت کلی، چندین رابطه

به‌منظور محاسبه دبی عبوری از سرریزهای لبه پهن مستطیلی وجود دارد. اما رابطه مشخص برای دبی جریان روی یک سرریز لبه پهن به‌صورت زیر است (Safarzadeh و Mohajeri، ۲۰۱۸).

$$Q_w = \frac{2}{3} C_d B \sqrt{\frac{2}{3} g H_1^3} \quad (3)$$

در این رابطه (H_1) تراز سطح آب در بالادست سرریز گابیونی است. این مقدار با استفاده از رابطه زیر استخراج می‌شود.

$$H_1 = H + \left(\frac{1}{2} g \right) \left(\frac{Q}{B(H+P)} \right)^2 \quad (4)$$



شکل ۴- پارامترهای هیدرولیکی در سرریز گابیونی لبه پهن مستطیلی

در روابط بالا، W: عمق آب بالادست سرریز، H: ارتفاع سطح آب نسبت به تراز تاج سرریز در بالادست (در فاصله ۴H) و P: ارتفاع سرریز می‌باشد.

پارامترهای طول سرریز (L)، قطر متوسط مصالح سنگی مورد استفاده (D_{50})، عرض کانال (B)، سرعت جریان در بالادست (V)، تخلخل ذرات تشکیل‌دهنده (n)، شتاب ثقل (g)، جرم واحد حجم مایع (ρ)، لزجت دینامیکی (μ) که می‌توانند در برآورد دبی جریان عبوری (Q_w) تأثیرگذار باشند. (۵)

$$Q_w = f(B, H, P, L, V, \rho, \mu, g, d_{50}, n)$$

باتوجه به اینکه در شرایط جریان آزاد به دلیل آشفتگی جریان نیروی چسبندگی اهمیت کمتری داشته و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. لذا بر اساس روش پای باکینگهام متغیرهای مؤثر به عوامل زیر وابسته است.

$$\frac{q^2}{gh^3} = f\left(\frac{P}{H}, \frac{H}{L}, \frac{d_{50}}{H}, Re\right) \quad (۶)$$

$$q = \sqrt{gh^3} \cdot f\left(\frac{H}{L}, \frac{d_{50}}{H}, Re\right) \quad (۷)$$

$$q = \sqrt{gH^3} \cdot f\left(\frac{H}{L}, \frac{d_{50}}{H}, Re, n\right) = C_d \sqrt{gH^3} \quad (۸)$$

تنها عامل متغیر همان دبی (q) در واحد عرض است که به صورت بار آبی روی سرریز در عامل بی بعد $\left(\frac{H}{L}\right)$ ظاهر شده است، لذا $\left(\frac{H}{L}\right)$ و رینولدز جریان (Re) از یکدیگر مستقل نبوده

و Re از رابطه (۸) حذف شده است. همچنین به دلیل وابسته بودن اندازه ذرات با تخلخل انتخاب یکی از دو مؤلفه کافی خواهد بود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ضریب دبی سرریز گابیونی در شرایط جریان آزاد به صورت تابعی از پارامترهای بدون بعد زیر می‌باشد:

$$C_d = f\left(\frac{H}{L}, \frac{d_{50}}{H}\right) \quad (۹)$$

مدل سرریز گابیونی

در این مجموعه آزمایش‌ها مدل‌های سرریز گابیونی به صورت جعبه‌های آماده در اندازه‌های مختلف استفاده شد. به ازاء هر دانه‌بندی دبی‌های مختلف در آبراهه برقرار شد. محدوده دبی استفاده شده در جدول (۲) درج شده است. آزمایش‌ها در شرایط جریان آزاد انجام شد به گونه‌ای که سرریز بتواند به صورت مستقل جریان را کنترل کند و عمق پایین‌دست در تعیین دبی نقشی نداشته باشد. پروفیل سطح آب از طریق تصویربرداری از روبه‌روی جریان ثبت شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار plotdigitizer مقادیر آنها استخراج شد. برای اطمینان از موقعیت جریان توسعه یافته در مقطع آزمایش داده‌های سرعت لحظه‌ای با استفاده از ADV در فواصل ۴ تا ۴/۳ متری از ورودی کانال نسبت به خط مرکزی و روی سطح بستر اندازه‌گیری شد.

جدول ۲- گزینه‌های مورد آزمایش در مدل‌های سرریز صلب و گابیونی

Model	Q (l/s)	L (mm)	P (mm)	(mm) D_{50}	Z (mm)
A	۲۵-۱۸	۳۰۰	۲۰۰	۱۱	۱۰
B	۲۵-۱۸	۳۰۰	۲۰۰	۱۹	۱۰
C	۲۵-۱۸	۳۰۰	۲۰۰	۲۸	۱۰
D	۲۵-۱۸	۶۰۰	۲۰۰	۱۱	۱۰
E	۲۵-۱۸	۶۰۰	۲۰۰	۱۹	۱۰
F	۲۵-۱۸	۶۰۰	۲۰۰	۲۸	۱۰
Solid A	۲۵-۱۸	۳۰۰	۲۰۰	-	۱۰
Solid B	۲۵-۱۸	۶۰۰	۲۰۰	-	۱۰

پیش‌بینی در مدل بیان ژن همان داده‌های جدید یا دیده نشده‌اند که برای ارزیابی توانایی مدل در تعمیم روابط استخراج شده استفاده می‌شوند. کیفیت و تنوع این داده‌ها مستقیماً بر اعتبار علمی و کاربردی بودن مدل اثر می‌گذارد. باتوجه به دقت روش الگوریتم ژنتیک از نرم‌افزار GeneXproTools به منظور تخمین روابط تجربی (Heravi و همکاران ۲۰۲۴)، از نرم‌افزار بیان شده برای تعیین رابطه بین پارامترهای استفاده شد.

فرایندهای ارزیابی

در این مطالعه از شاخص‌های آماری شامل ضریب تعیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، برای تبیین رابطه

الگوریتم بیان ژن (GEP)

مدل بیان ژن نوعی الگوریتم تکاملی است که ترکیبی از قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک (GA) و برنامه‌نویسی ژنتیکی (GP) محسوب می‌شود. در این روش، راه‌حل‌ها به صورت کروموزوم‌های خطی متشکل از ژن‌ها کدگذاری شده و طی فرآیندهای انتخاب، جهش و بازترکیب تکامل می‌یابند. مزیت اصلی این مدل نسبت به سایر روش‌های یادگیری ماشین، تولید مدل‌های صریح ریاضی و قابل تفسیر است که توانایی شناسایی روابط غیرخطی پیچیده میان متغیرها را فراهم می‌سازد. با وجود مزایایی همچون دقت و انعطاف‌پذیری بالا، این روش نیازمند تنظیم دقیق پارامترها بوده و در برخی موارد مستعد تولید مدل‌های پیچیده و بیش‌برازش است. داده‌های

بین داده‌های محاسباتی و مشاهده‌ای به صورت روابط (۱۰) و (۱۱) استفاده شد.

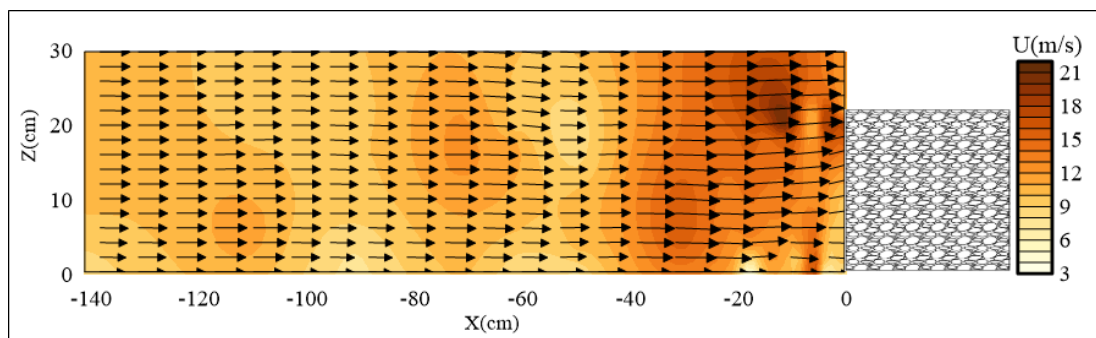
$$R^2 = \frac{\sum O_i N_i - \frac{1}{n} \sum O_i \sum N_i}{(\sum O_i^2 - \frac{1}{n} (\sum O_i)^2) (\sum N_i^2 - \frac{1}{n} (\sum N_i)^2)} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{(O_i - N_i)^2}{n}} \quad (11)$$

که در آنها O_i مقدار مشاهده‌ای، N_i مقدار محاسباتی و n تعداد مشاهدات می‌باشد.

نتایج و بحث

در شکل (۵) خطوط هم‌سرعت طولی و توزیع قائم سرعت طولی در بالادست سرریز با استفاده از داده‌برداری سرعت از طریق سرعت‌سنج صوتی با استفاده از نرم‌افزار Surfer برای طول سرریز ۳۰ سانتی‌متر و تخلخل ۴۱ درصد ترسیم شد. توزیع قائم سرعت طولی نشان می‌دهد که میدان برداری سرعت متأثر از تخلخل سازه گابیونی است. در بالادست سرریز، میانگین سرعت روندی افزایشی دارد، اما آهنگ شتاب



شکل ۵- نیمرخ قائم بردارهای سرعت طولی برحسب عمق در بالادست



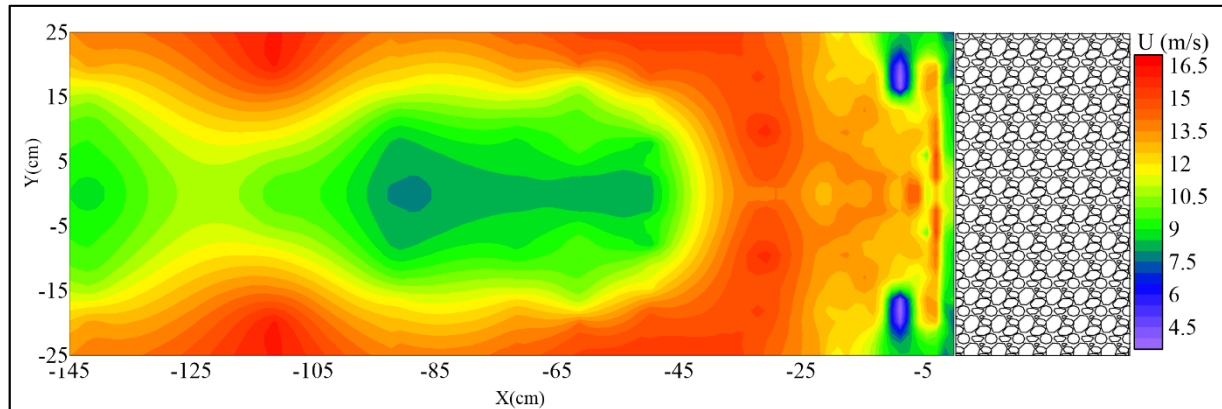
شکل ۶- تشکیل جریان آشفته و چرخشی در پایین دست سرریز

جریان برگشتی در بالادست ضعیف‌تر است اما تغییرات عمقی سرعت نسبت به حالت بدون گابیون متفاوت می‌باشد. در چنین شرایطی، افزایش سرعت در نزدیکی سرریز عمدتاً ناشی از جدایش جریان از جدارها و نازک شدن لایه مرزی است که منجر به شتاب‌گیری جریان و افزایش عدد فرود تا محدوده جریان فوق‌بحرانی می‌شود. در مقابل، سرریزهای

براساس شکل (۷) که با استفاده از نرم‌افزار Surfer استخراج شده است، جریان در بالادست سرریز لبه‌پهن گابیونی الگوی نسبتاً پایدار داشته و توزیع مؤلفه طولی سرعت با گرادینان‌های مشخصی در راستای طولی و عرضی همراه است. در سرریزهای با بدنه متخلخل، به دلیل عبور بخشی از جریان از میان مصالح گابیونی، نسبت به سرریزهای صلب پدیده

نفوذناپذیر با ایجاد مانع کامل در برابر جریان، موجب شکل‌گیری جریان برگشتی و تداخل با جریان پیش‌رونده شده که این پدیده خود سبب افزایش موضعی سرعت و ایجاد ناپایداری هیدرولیکی در بالادست می‌شود. همچنین کاهش

سرعت در نزدیکی جداره‌ها در سرریزهای گابیونی، بیشتر ناشی از توزیع غیریکنواخت تنش‌های برشی و اثرات سه‌بعدی جریان از جمله لایه‌های مرزی عرضی و جریان‌های ثانویه می‌باشد.



شکل ۷- کانتور توزیع مؤلفه طولی سرعت (u) در صفحه X-Y بالادست سرریز لبه پهن گابیونی در عمق ۱۵ سانتی‌متری

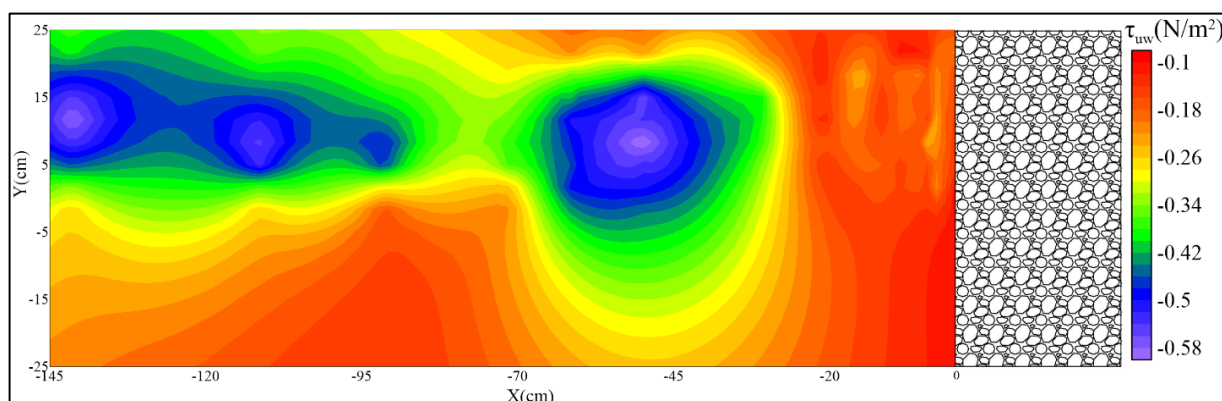
تنش برشی رینولدز

در جریان‌های آشسته به دلیل تشکیل گردابه‌ها، تنش برشی رینولدز (RSS) حاصل می‌شود (هروی و همکاران ۱۴۰۳). در این شرایط ذرات سیال با حرکت تصادفی و نرخ جابه‌جایی یک‌دوره سیال بین لایه‌ها به‌عنوان شار مومنتوم معرفی می‌شود و با نام اختصاری RSS در صفحه XZ به‌صورت معادله‌های (۱۲) و (۱۳) تعریف می‌شود (Sahu و همکاران ۲۰۲۳).

$$\tau_{uw} = -\rho \overline{u'w'} \quad (12)$$

$$\overline{u'w'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(w_i - \bar{w}) \quad (13)$$

که در آن u' ، w' نوسان‌های سرعت، ρ چگالی سیال، u_i ، w_i به ترتیب نشان‌دهنده مولفه سرعت سیال در جهت طولی و عرضی و $\bar{u}$ ، $\bar{w}$ میانگین زمانی مولفه‌های سرعت می‌باشند.



شکل ۸- تنش برشی رینولدز در بالادست سرریز لبه پهن گابیونی در عمق ۱۵ سانتی‌متری

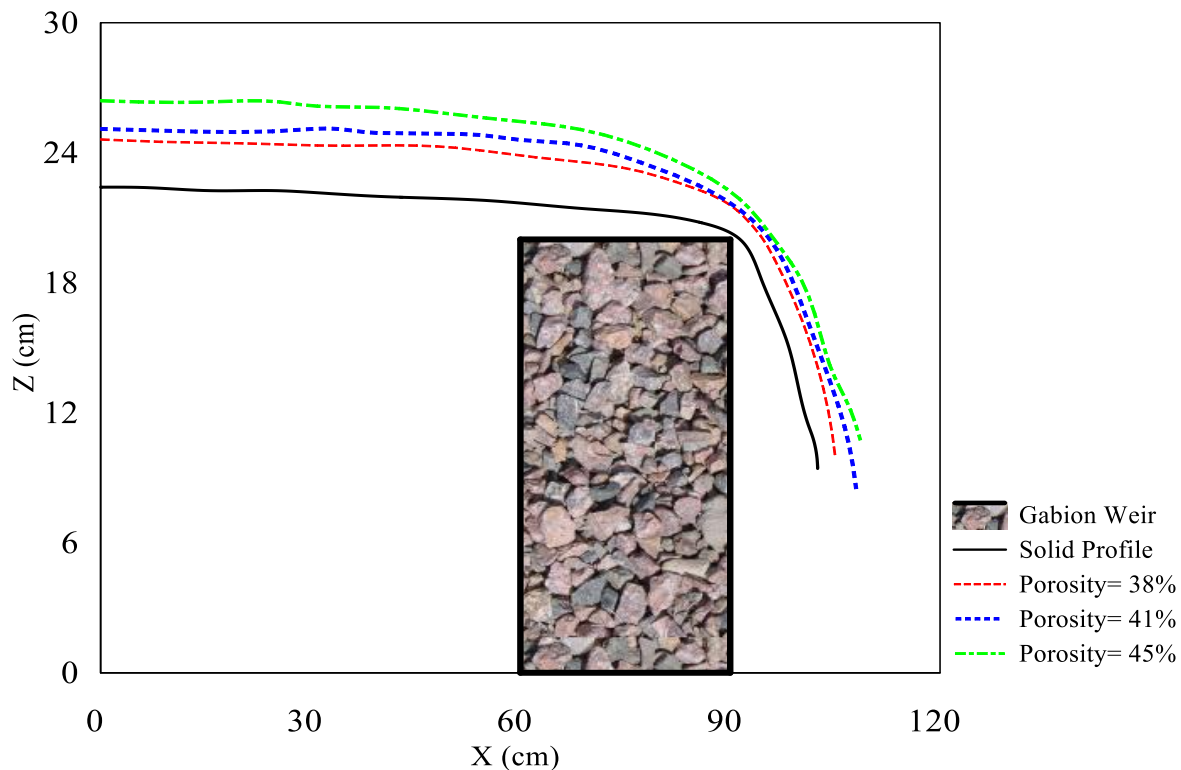
بررسی تغییرات تراز سطح آب

برای بررسی اثر تغییر اندازه مصالح و همچنین افزایش طول گابیون، پروفیل سطح آب در هر مرحله، از طریق تصویربرداری ثبت شد. شکل‌های (۹ و ۱۰) پروفیل سطح آب در طول سرریز

با تخلخل‌های مختلف در شرایط جریان آزاد اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. باتوجه‌به شکل (۵) با افزایش اندازه مصالح سرریز گابیونی برای یک دبی مشخص به دلیل مقاومت کمتر در برابر جریان و عبور بیشتر جریان از درون سرریز نوع جریان

عبوری متفاوت خواهد بود؛ بنابراین برای ایجاد جریان کاملاً روگذر با افزایش اندازه دانه‌بندی نیاز به افزایش دبی خواهد بود که متناظر است با بار آبی ثابت در دبی کمتر در دانه‌بندی ریزتر است. به‌طور کلی بیشترین بار آبی برای مصالح درشت

دانه کمترین بار آبی مربوط به مصالح ریزدانه است. همچنین با مقایسه نیم‌رخ‌های سطح آب با نیم‌رخ سطح آب مدل نفوذناپذیر مشاهده می‌شود بار آبی بیشتری نسبت به سرریز نفوذ پذیر دارد.



شکل ۹- پروفیل سطح آب بر روی سرریز گابیونی و صلب با طول ۳۰ سانتی‌متر

شکل (۱۰) پروفیل‌های سطح آب در شرایط افزایش طول سرریز را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با ثابت بودن مقادیر دبی، افزایش طول سرریز سبب افزایش بار آبی در بالادست شده است. این امر به سبب کاهش جریان عبوری از درون سرریز به علت افزایش مقاومت ناشی از افزایش طول سرریز است. لذا بیشترین بار آبی برای مصالح درشت‌تر با تخلخل ۴۵ درصد و کمترین بار آبی مربوط به مصالح ریزتر با تخلخل ۳۸ درصد است.

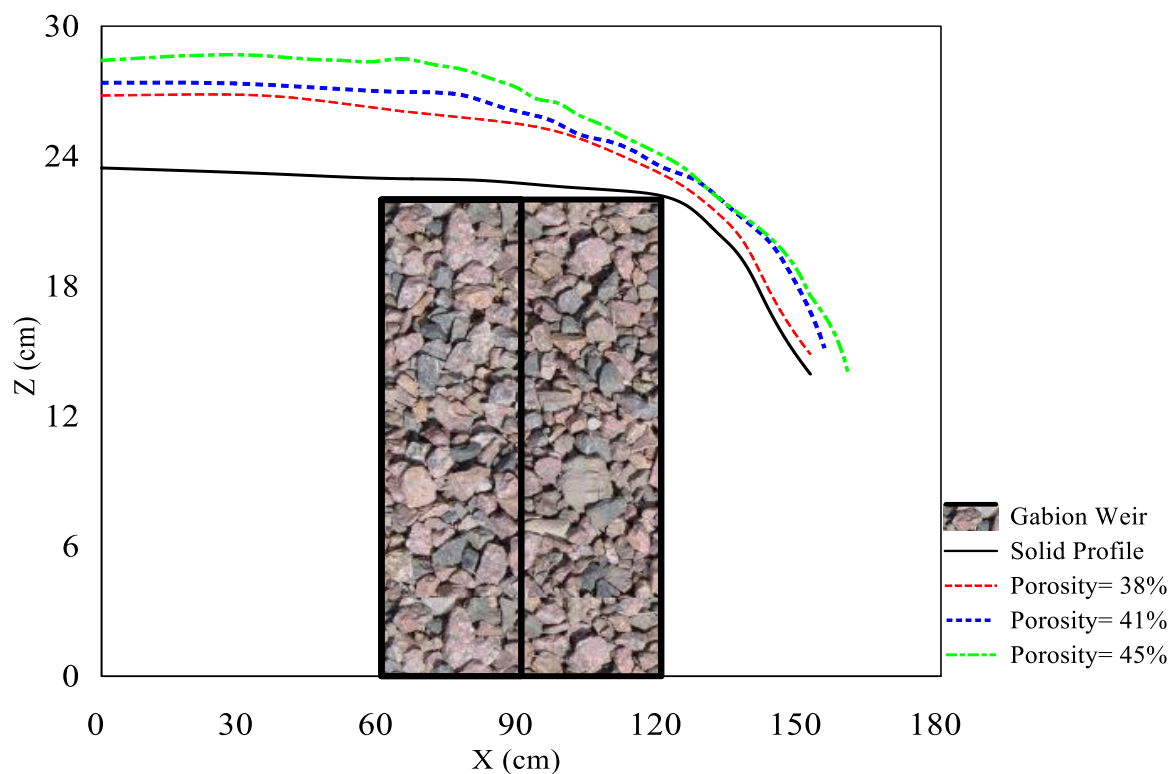
ضریب دبی سرریز لبه پهن مستطیلی گابیونی

شکل‌های (۱۱ و ۱۲) رابطه بین دبی جریان از روی سرریز را در برابر نسبت عمق بالادست به طول سرریز در شرایط آزاد جریان نشان می‌دهد. تاثیرپذیری سرریز گابیونی در اثر تغییرات $\frac{H}{L}$ در شرایط جریان آزاد، کمتر است زیرا تقسیم جریان به دو قسمت روگذر و درون گذر اجازه می‌دهد ضمن عبور دبی بیشتر، ضریب دبی نیز تقریباً از یک مقدار ثابتی برخوردار شود.

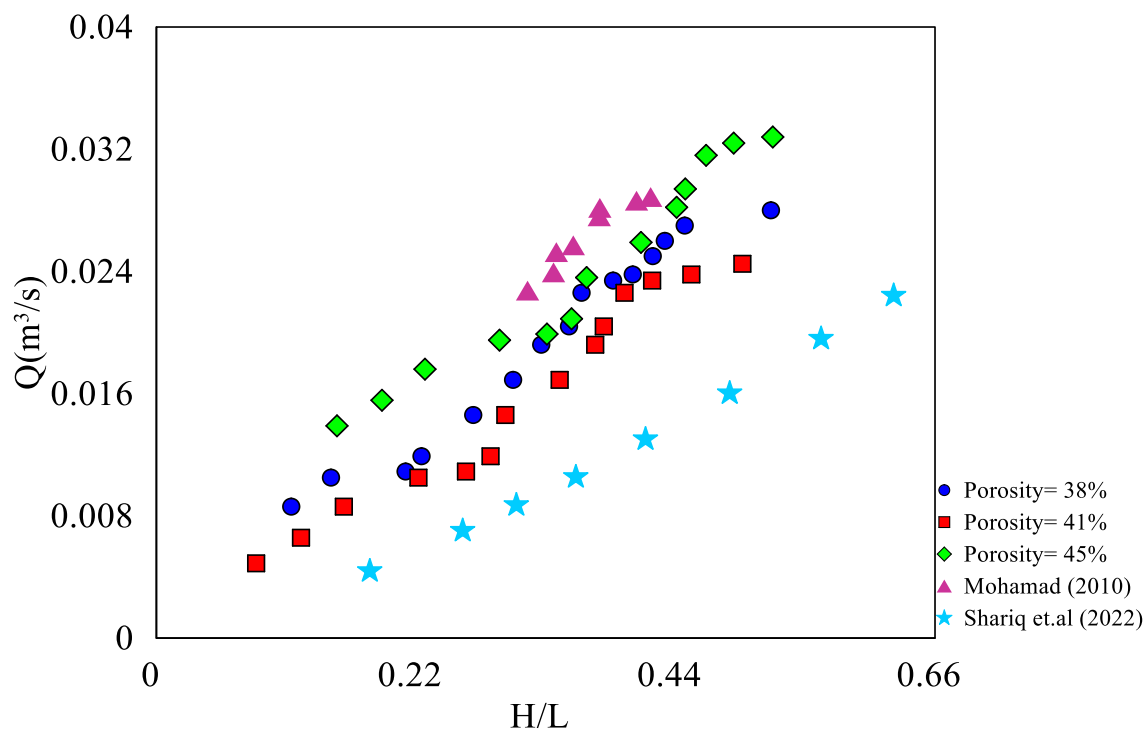
Mohamed (۲۰۱۰) در پژوهشی بر روی سرریز گابیونی، به ازای طول سرریز ۲۰ سانتی‌متر با متوسط دانه‌بندی‌های ۰/۷، ۰/۲۸ و ۲/۹ سانتی‌متر، ضریب دبی سرریز گابیونی مقادیر بین ۰/۶

تا ۰/۸ را ارائه داد که از مقادیر معمول بسیار کمتر است. همچنین Shariq و همکاران (۲۰۲۲) به ازاء طول سرریز ۳۰ سانتی‌متر با متوسط دانه‌بندی‌های ۴/۶ و ۵/۷ سانتی‌متر، ضریب دبی سرریز را تقریباً ۰/۶۵ محاسبه کردند که از مقادیر معمول بسیار کمتر است.

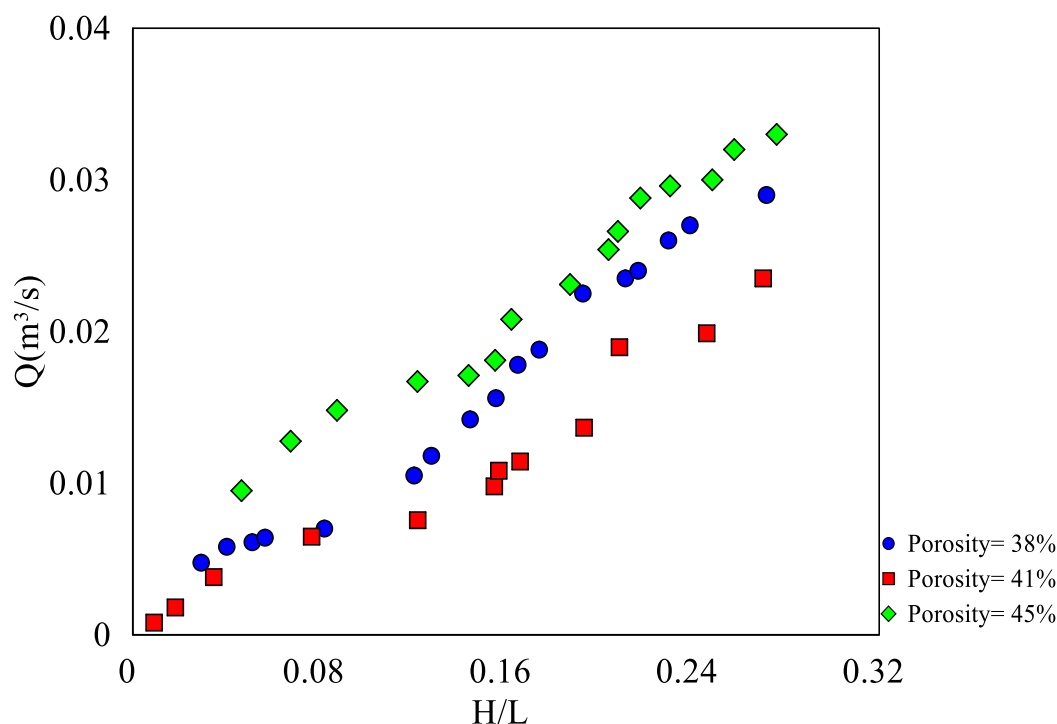
از طرفی مقایسه داده‌های آزمایشگاهی مقادیر دبی سرریزهای لبه پهن صلب و گابیونی نشان می‌دهد، به دلیل عبور جریان از داخل محیط متخلخل به ازای ارتفاع آب کمتر نسبت به سرریز لبه پهن صلب، دبی بیشتری را عبور داده لذا ضریب دبی مدل نفوذناپذیر همواره کمتر از مدل گابیونی بوده و با افزایش اندازه دانه‌بندی این ضریب روند افزایشی خواهد داشت که روند این تغییرات با نتایج سایر پژوهشگران (Mohammad, ۲۰۱۰؛ Shariq و همکاران، ۲۰۲۲؛ Biabani و همکاران، ۲۰۲۲) همخوانی دارد. شکل‌های (۱۳ و ۱۴) مقایسه ضریب دبی محاسباتی با تخلخل‌های مختلف را در پژوهش حاضر، با مطالعات این پژوهشگران نشان می‌دهد.



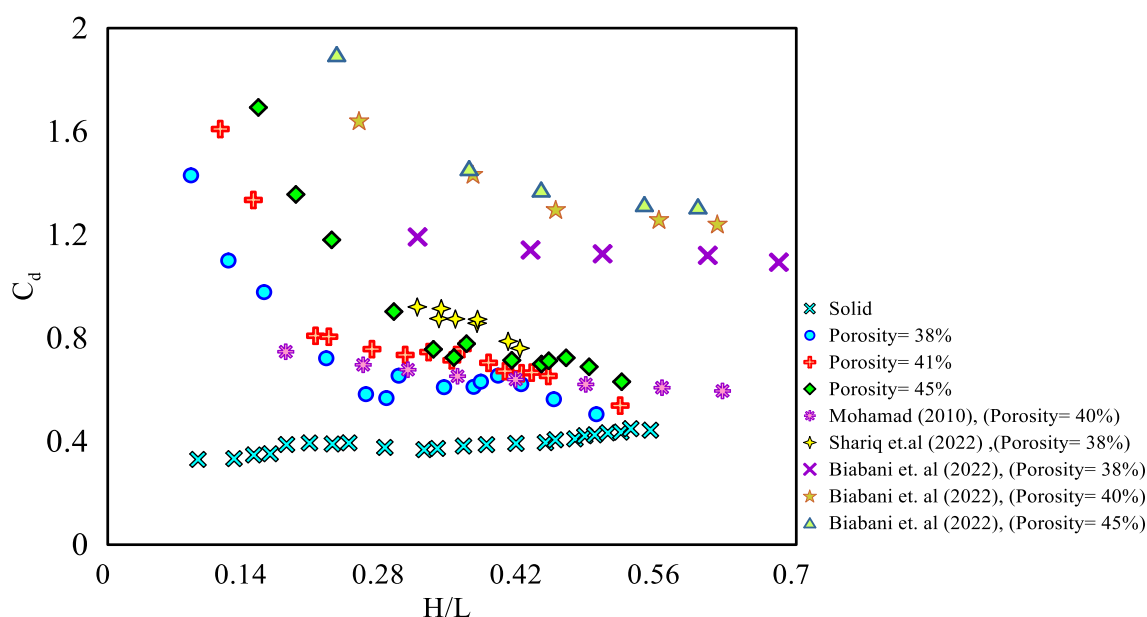
شکل ۱۰- پروفیل سطح آب بر روی سرریز گابیونی و صلب با طول ۶۰ سانتی‌متر



شکل ۱۱- تغییرات دبی نسبت به $(\frac{H}{L})$ برای طول سرریز ۳۰ سانتی‌متر



شکل ۱۲- تغییرات دبی نسبت به $(\frac{H}{L})$ برای طول سرریز ۶۰ سانتی‌متر



شکل ۱۳- تغییرات ضریب دبی نسبت به $(\frac{H}{L})$ با طول سرریز ۳۰ سانتی‌متر

تحلیل آماری برای ارزیابی دقت معادلات (۱۴) و (۱۵) برای سرریزهای گابیونی با طول‌های ۰/۳ و ۰/۶ متر انجام شد. شاخص‌های آماری مختلفی از جمله ضریب تعیین (R^2), جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به کار گرفته شدند. مقدار این شاخص‌ها برای طول سرریز گابیونی ۰/۳ متر به ترتیب برابر ۰/۹۵، ۰/۶۸ و برای طول سرریز ۰/۶ متر به ترتیب برابر ۰/۹۶ و ۰/۱۳۷ به دست آمد.

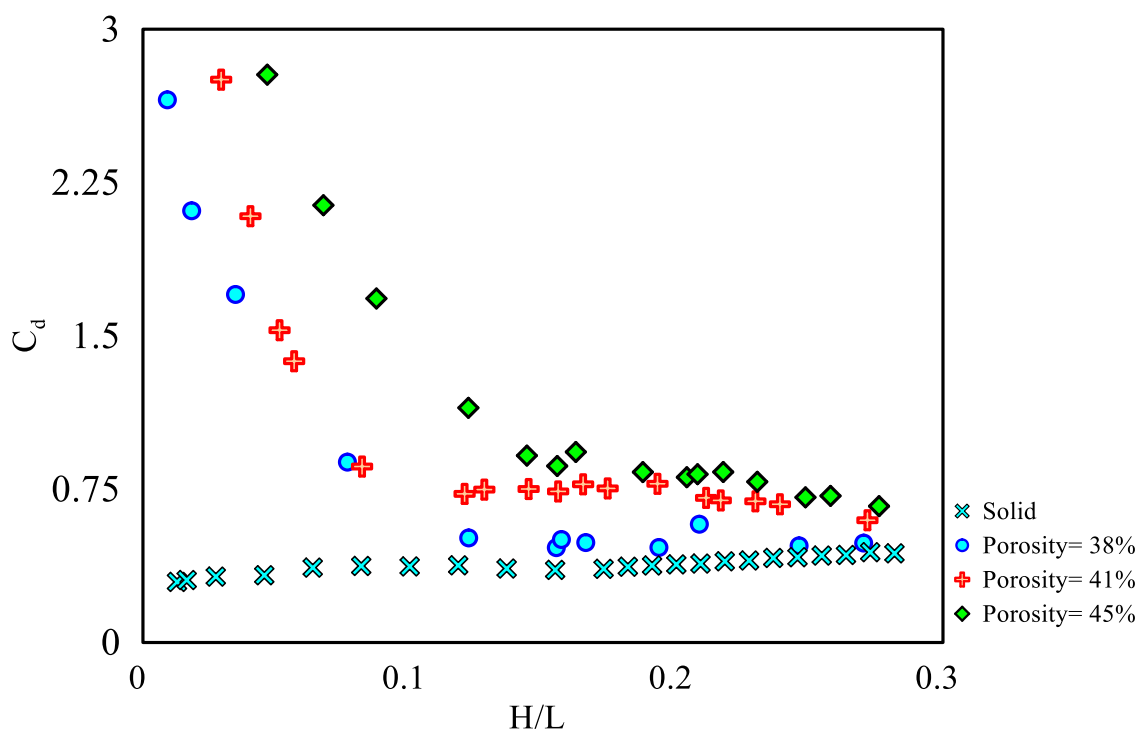
نرم‌افزار GeneXproTools با بهره‌گیری از تکنیک برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) به کار گرفته شد تا رابطه میان پارامترهای بی‌بعد تعیین شود.

$$C_d = 3.75 \left(\frac{H}{L} \right)^3 + \left(\frac{d_{50}}{H} \right)^2 - 2 \frac{H}{L} + \frac{d_{50}}{H} + 1.012 \quad (14)$$

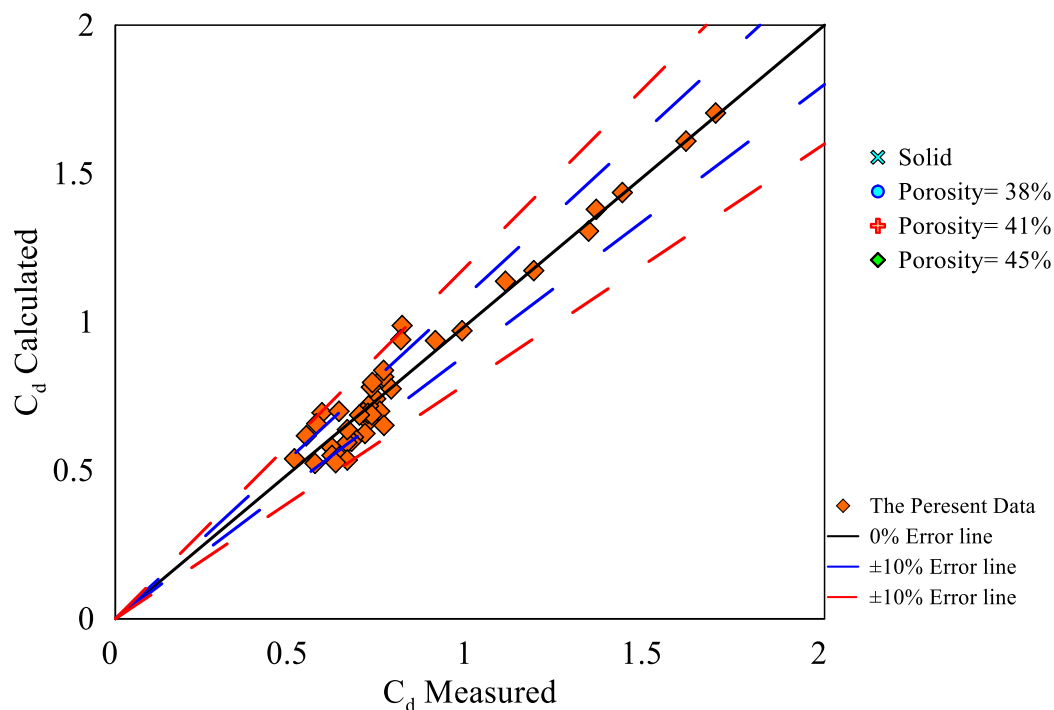
$$C_d = 2 \left(\frac{H}{L} \right)^3 + 1.762 \left(\frac{H}{L} \right)^2 - \left(\frac{d_{50}}{H} \right)^2 - 3.377 \frac{d_{50}}{H} + 0.240 \frac{1}{L} - 0.0576 \quad (15)$$

محاسبه با استفاده از رابطه‌های (۱۶) و (۱۷) خطاهایی در محدوده $\pm 10\%$ و $\pm 20\%$ نشان می‌دهند.

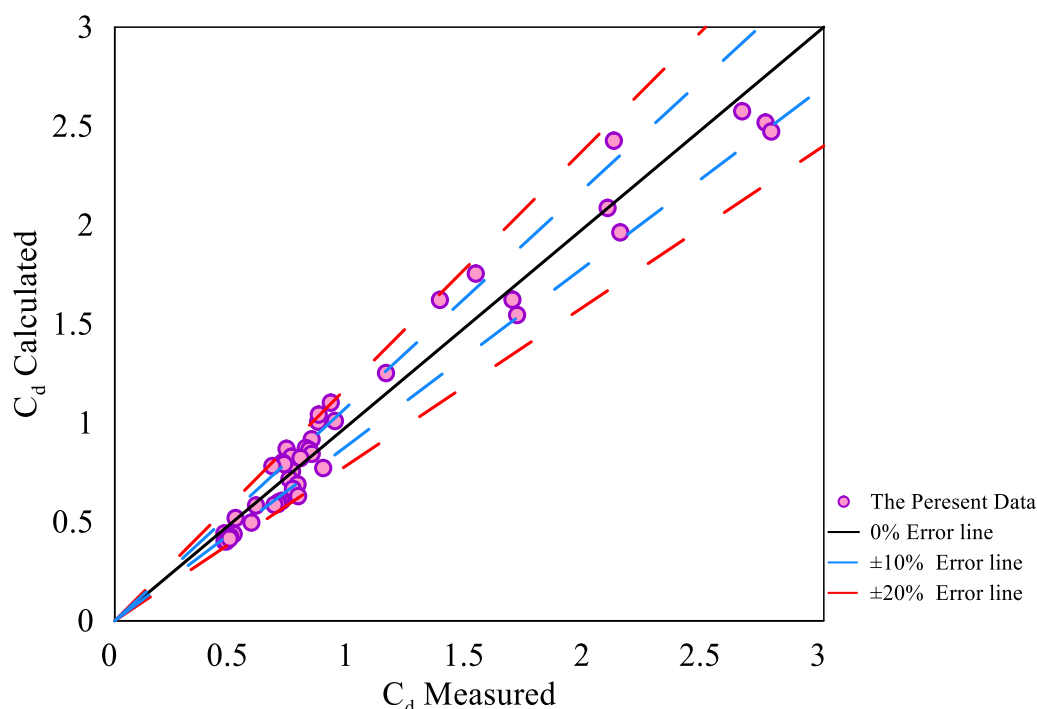
شکل‌های (۱۴ و ۱۵) به ترتیب برای طول سرریز گابیونی 0.3 m و 0.6 m ، درجه بالایی از انطباق با خط کامل (خط ۴۵) را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که تقریباً 95% از مجموعه داده‌ها هنگام



شکل ۱۴- تغییرات ضریب دبی نسبت به $(\frac{H}{L})$ با طول سرریز ۶۰ سانتی‌متر



شکل ۱۵- ارزیابی مقادیر ضریب C_d برآورد شده نسبت به مشاهداتی (سرریز با طول ۰/۳ متر)



شکل ۱۶- ارزیابی مقادیر ضریب C_d برآورد شده نسبت به مشاهداتی (سرریز با طول ۰/۶ متر)

منابع

اسماعیلی، سیدعلیرضا، و گوهری، سعید، و حیدری، مجید. (۱۴۰۱). بررسی عوامل موثر در انتقال رسوب در جریان غیرماندگار. مهندسی عمران شریف، ۳۸/۲ (۱/۱). ۱۴۵-۱۵۵.

<https://doi.org/10.24200/j30.2021.58434.2978>

هروی، زهرا، و اژدری مقدم، مهدی، و اسماعیلی، کاظم، و گیوه چی، محمد، و بحرپیما، عبدالحمید. (۱۴۰۳). ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد طرح جدید مدل‌های محافظ بستر (F-jacks) در اطراف پایه پل بر اصلاح الگوی جریان. نشریه هیدرولیک، ۱۹ (۱). ۶۷-۸۷.

<https://doi.org/10.30482/jhyd.2023.395247.16>

۴۳

Azamathulla, H. M., Ghani, A. A., Zakaria, N. A., & Guven, A. (2010). Genetic programming to predict bridge pier scour. Journal of Hydraulic Engineering, 136(3), 165-169.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000133](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000133).

Biabani, R., Salmasi, F., Nouri, M., & Abraham, J. (2022). Flow over embankment gabion weirs in free flow conditions. Journal of Hydro-Environment Research, 44, 65-76.

<https://doi.org/10.1016/j.jher.2022.03.003>.

Chanson, H. (2006). Discussion of "Discharge through a permeable rubble mound weir" by

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با هدف بررسی آزمایشگاهی جریان عبوری از روی سرریزهای با محیط متخلخل ۶ مدل از این نوع سرریز و ۲ مدل سرریز صلب استفاده شد. شرایط جریان بالادست سرریز گابیونی با سرعت‌سنج صوتی (ADV) اندازه‌گیری شد. خلاصه نتایج به شرح زیر است.

نتایج پروفیل قائم سرعت طولی استخراج‌شده نشان می‌دهد، بیشترین سرعت طولی در سطح جریان اتفاق می‌افتد. در بالادست سازه، تنش برشی رینولدز به‌طور نسبتاً خطی در نزدیکی سطح جریان تغییر می‌کند. با افزایش تخلخل سازه، محل بیشینه تنش برشی رینولدز به سمت پایین دست جابه‌جا می‌شود و مقدار بیشینه تنش برشی رینولدز کاهش می‌یابد.

مقادیر ضریب دبی سرریز گابیونی لبه پهن از مقادیر مربوط به ضریب سرریز صلب لبه پهن به‌صورت قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. به‌طوری‌که ضریب دبی سرریز گابیونی برای طول ۳۰ سانتی‌متر با تخلخل‌های ۳۸، ۴۲ و ۴۵ درصد به‌طور میانگین به ترتیب برابر ۰/۷۳، ۰/۸۱ و ۰/۸۹ و برای طول ۶۰ سانتی‌متر هم به ترتیب ۰/۹۵، ۱/۰ و ۱/۱ است.

در نتایج بررسی شاخص‌های ارزیابی در روش بیان ژن نشان داد رابطه‌های تعریف شده برای طول‌های مختلف سرریز گابیونی، با ضریب تعیین ۹۵ درصد می‌تواند به‌طور کارآمدی برای برآورد دبی سرریز گابیونی و معادله سرریز لبه پهن استفاده شود.

- <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2008.03.004>.
- Michioku, K., Maeno, S., Furusawa, T., & Haneda, M. (2005). Discharge through a permeable rubble mound weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(1), 1-10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:1(1)).
- Mohamed, H. I. (2010). Flow over gabion weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(8), 573-577. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000217](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000217).
- Rahmanshahi, M., & Shafai Bejestan, M. (2020). Gene-expression programming approach for development of a mathematical model of energy dissipation on block ramps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(2), 04019033. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001426](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001426).
- Roushangar, K., Akhgar, S., Salmasi, F., & Shiri, J. (2014). Modeling energy dissipation over stepped spillways using machine learning approaches. *Journal of Hydrology*, 508, 254-265. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.053>.
- Safarzadeh, A., & Mohajeri, S. H. (2018). Hydrodynamics of rectangular broad-crested porous weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(10), 04018028. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001347](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001347).
- Sahu, C., Eldho, T. I., & Mazumder, B. S. (2023). Experimental study of flow hydrodynamics around circular cylinder arrangements using particle image velocimetry. *Journal of Fluids Engineering*, 145(1), 011302. <https://doi.org/10.1115/1.4056024>.
- Salmasi, F., & Abraham, J. (2020). Discussion of "Hydrodynamics of rectangular broad-crested porous weirs" by Akbar Safarzadeh and Seyed Hossein Mohajeri. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(4), 07020003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001450](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001450).
- Kohji Michioku, Shiro Maeno, Takaaki Furusawa, and Masanori Haneda. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(4), 432-433. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:4\(432\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:4(432)).
- Dhahir, F. M., & Mohammed-Hasan, A. M. (2017). Using of hydraulic jump characteristics as criterion for energy dissipation in rectangular gabion weir. *International Journal of Advanced Research*, 5(7), 268-276. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/4953>.
- Ergun, S. (1952). *Fluid flow through packed columns*. Chemical Engineering Progress, 48(2), 89-94.
- Fathi-Moghaddam, M., Sadrabadi, M. T., & Rahmanshahi, M. (2018). Numerical simulation of the hydraulic performance of triangular and trapezoidal gabion weirs in free flow condition. *Flow Measurement and Instrumentation*, 62, 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.05.005>.
- Heravi, Z., Moghaddam, M. A., Esmaili, K., Givehchi, M., & Bahrpeyma, A. (2024). Impact of installing new scour prevention countermeasure (F-jacks) around bridge pier on flow pattern and scour control. *Ocean Engineering*, 313, 119326. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112838>.
- Kim, S., Singh, V. P., & Seo, Y. (2014). Evaluation of pan evaporation modeling with two different neural networks and weather station data. *Theoretical and Applied Climatology*, 117(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0985-y>.
- Khatibi, R., Salmasi, F., Ghorbani, M. A., & Asadi, H. (2014). Modelling energy dissipation over stepped-gabion weirs by artificial intelligence. *Water Resources Management*, 28(7), 1807-1821. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0595-z>.
- Leu, J. M., Chan, H. C., & Chu, M. S. (2008). Comparison of turbulent flow over solid and porous structures mounted on the bottom of a rectangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(6), 331-337.

- and Instrumentation, 74, 101769. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101769>.
- Shariq, A., Hussain, A., & Ahmad, Z. (2022). Flow over gabion weir under free and submerged flow conditions. Flow Measurement and Instrumentation, 86, 102199. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102199>.
- Yue, Z., Zhou, W., & Li, T. (2021). Impact of the Indian Ocean dipole on evolution of the subsequent ENSO: Relative roles of dynamic and thermodynamic processes. Journal of Climate, 34(9), 3591–3607. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0663.1>.
- Zahiri, A., & Najafzadeh, M. (2018). Optimized expressions to evaluate the flow discharge in main channels and floodplains using evolutionary computing and model classification. International Journal of River Basin Management, 16(1), 123–132. <https://doi.org/10.1080/15715124.2017.1372442>.
- Salmasi, F., Sabahi, N., & Abraham, J. (2021a). Discharge coefficients for rectangular broad-crested gabion weirs: Experimental study. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 147(3), 04021001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001487](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001487).
- Salmasi, F., Sattari, M. T., & Nurcheshmeh, M. (2021b). Genetic programming approach for estimating energy dissipation of flow over cascade spillways. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 45(1), 443–455. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00541-3>.
- Sargison, J. E., & Percy, A. (2009). Hydraulics of broad-crested weirs with varying side slopes. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 135(1), 115–118. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2009\)135:1\(115\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2009)135:1(115)).
- Shariq, A., Hussain, A., & Ahmad, Z. (2020). Discharge equation for the gabion weir under through flow condition. Flow Measurement

Document Type

Applied Article

پژوهش کاربردی

نوع مقاله

Alignment Framework for Urban Water Management Strategies with Circular Economy Approach: A Qualitative Research

چارچوب همسویی استراتژی‌های مدیریت آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی (یک پژوهش کیفی)

Z. Mousavi¹, M. Hosseini Shakib^{2*}, S. J. Iranbanfard³

زهرا موسوی^۱، مهرداد حسینی شکیب^{۲*}، سید جواد ایرانبانفرد^۳

1- Ph.D. Student, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Economics, SR.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

۱- دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد

2- Associate Professor, Department of Industrial Management, Ka.C.,

علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

Islamic Azad University, Karaj, Iran.

۲- دانشیار گروه مدیریت صنعتی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

3- Associate Professor, Department of Management, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

۳- دانشیار گروه مدیریت، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

* Corresponding, Author Email: mehrdad.shakib@kiaui.ac.ir

* راینامه نویسنده مسئول: mehrdad.shakib@kiaui.ac.ir

Received 17-08-2025

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۵/۲۶

Revised 25-10-2025

تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۸/۰۳

Accepted 31-10-2025

تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۸/۰۹

Available online 16-03-2026

تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

Abstract

چکیده

The increasing water stress at both global and national levels, particularly in countries such as Iran, has shown that linear and single-dimensional approaches to urban water management are no longer capable of addressing the existing complex challenges. In this context, adopting a circular economy approach and aligning water supply and demand management strategies in an integrated manner has emerged as a strategic necessity. This research aims to design a strategic framework for aligning urban water supply and demand management with the circular economy approach. In today's world, the growing challenges of water scarcity and limited water resources necessitate a review of traditional management models and a shift toward innovative and sustainable approaches. The circular economy, as a new paradigm, provides the opportunity to create alignment between supply strategies and demand management. In this research, using the thematic analysis method, 91 scientific articles published between 2015 and 2024 were examined. The research results led to the identification of five main dimensions (resource and infrastructure management strategies, circular economy strategies, demand and consumption management strategies, planning and policy-making strategies, and stakeholder participation and collaboration strategies), 26 components, and 62 indicators. This framework can serve as a guide for policymakers and urban water specialists in designing and implementing strategies aligned with circular economy principles and provide the foundation for achieving sustainable water resource management.

افزایش تنش آبی در مقیاس جهانی و ملی، به‌ویژه در کشورهایی همچون ایران، نشان داده است که رویکردهای خطی و تک‌بعدی در مدیریت آب شهری دیگر پاسخگوی چالش‌های پیچیده موجود نیست. در این شرایط، بهره‌گیری از رویکرد اقتصاد چرخشی و همسویی یکپارچه استراتژی‌های مدیریت عرضه و تقاضای آب، به‌عنوان یک ضرورت استراتژیک مطرح می‌شود. این پژوهش با هدف طراحی چارچوبی استراتژیک برای همسویی مدیریت تأمین و تقاضای آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی انجام شده است. در دنیای امروز، چالش‌های روزافزون کمبود آب و محدودیت منابع آبی، ضرورت بازنگری در مدل‌های مدیریتی سنتی و حرکت به سمت رویکردهای نوآورانه و پایدار را ایجاد می‌کند. اقتصاد چرخشی به عنوان پارادایمی نوین، امکان ایجاد همسویی بین استراتژی‌های تأمین و مدیریت تقاضا را فراهم می‌آورد. در این پژوهش، با استفاده از روش تحلیل مضمون، ۹۱ مقاله علمی منتشر شده در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ بررسی شد. نتایج پژوهش منجر به شناسایی پنج بُعد اصلی (استراتژی‌های مدیریت منابع و زیرساخت‌ها، استراتژی‌های اقتصاد چرخشی، استراتژی‌های مدیریت تقاضا و مصرف، استراتژی‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری، و استراتژی‌های مشارکت و همکاری ذی‌نفعان)، ۲۶ مؤلفه و ۶۲ شاخص شد. این چارچوب می‌تواند به عنوان راهنمایی برای سیاست‌گذاران و متخصصان حوزه آب شهری در طراحی و پیاده‌سازی استراتژی‌های همسو با اصول اقتصاد چرخشی عمل کند و زمینه دستیابی به مدیریت پایدار منابع آب را فراهم آورد.

Keywords: Circular Economy, Water Resource Management, Water Supply Strategies, Water Demand Management, Water Resource Sustainability.

واژه‌های کلیدی: اقتصاد چرخشی، مدیریت منابع آب، استراتژی‌های

تأمین آب، مدیریت تقاضای آب، پایداری منابع آب.

How to cite this article:

Mousavi, Z., Hosseini Shakib, M. & Iranbanfard, S. J. (2026). Alignment Framework for Urban Water Management Strategies with Circular Economy Approach: A Qualitative Research. Journal of Water and Sustainable Development, 12(4), 103-122. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i4.2508-1451>

تنش آبی شدید بود. در زمینه مطالعات داخلی نیز، [Karimi](#) و [Alavijeh](#) (۲۰۲۱) چالش‌های امنیت آب شهری در ایران را شناسایی کردند و [Ardalan](#) و [همکاران](#) (۲۰۱۸) مسائل آب شهری تهران را بررسی کردند، اما هیچ‌یک چارچوب جامعی برای یکپارچه‌سازی استراتژی‌های تأمین و تقاضا با رویکرد اقتصاد چرخشی ارائه نکردند. بنابراین، شکاف اصلی، فقدان یک چارچوب یکپارچه و عملیاتی است که هم‌زمان پنج بُعد کلیدی (مدیریت منابع و زیرساخت‌ها، اقتصاد چرخشی، مدیریت تقاضا و مصرف، برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری، و مشارکت ذی‌نفعان) را پوشش دهد و شاخص‌های قابل اندازه‌گیری برای سنجش همسویی در شرایط خاص کشورهای با کمبود آب مانند ایران ارائه کند.

کارایی و اثربخشی استراتژی‌های مدیریت آب شهری، زمانی به حداکثر می‌رسد که بین رویکردهای تأمین و تقاضا هماهنگی و همسویی وجود داشته باشد. عدم همسویی بین این استراتژی‌ها منجر به هدررفت منابع، افزایش هزینه‌ها، کاهش بهره‌وری و در نهایت ناپایداری سیستم آب شهری خواهد شد ([Smol](#) و [همکاران](#)، ۲۰۲۰). به‌عنوان مثال سرمایه‌گذاری در توسعه منابع آب جدید بدون توجه به مدیریت تقاضا و کاهش مصرف، یا تمرکز صرف بر کاهش مصرف بدون توجه به ظرفیت‌سازی منابع تأمین آب، هر دو می‌توانند منجر به عدم تعادل و ناکارآمدی سیستم آب شهری شوند ([Shahangian](#) و [همکاران](#)، ۲۰۲۲).

رویکرد اقتصاد چرخشی در مدیریت آب شهری، با تأکید بر چرخه بسته آب، بازیافت و استفاده مجدد از پساب، بازیابی منابع و انرژی، و کاهش اتلاف منابع، چارچوبی مناسب برای ایجاد همسویی بین استراتژی‌های تأمین و تقاضا فراهم می‌آورد. این رویکرد، از یک طرف با افزایش بهره‌وری منابع آبی موجود و ایجاد منابع آبی جدید از طریق بازچرخانی، امکان تأمین نیازهای آبی را فراهم می‌کند و از طرف دیگر، با ترویج الگوهای مصرف پایدار و بهینه‌سازی مصرف، فشار بر منابع آبی را کاهش می‌دهد ([Fernandes](#) و [Cunha Marques](#)، ۲۰۲۳).

کشور ایران به عنوان یکی از کشورهای واقع در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، با چالش‌های جدی در زمینه مدیریت منابع آب مواجه است. افت سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش کیفیت منابع آب و افزایش تقاضا برای آب در بخش‌های مختلف، ضرورت بازنگری در استراتژی‌های مدیریت آب و حرکت به سمت رویکردهای پایدارتر را دوچندان کرده است ([Karimi Alavijeh](#) و [همکاران](#)، ۲۰۲۱). در این راستا، اقتصاد چرخشی می‌تواند به عنوان رویکردی نوین، زمینه بهبود مدیریت منابع آب و افزایش تاب‌آوری سیستم‌های آبی را فراهم آورد ([Ardalan](#) و [همکاران](#)، ۲۰۱۸).

باوجود اهمیت موضوع، مطالعات محدودی در زمینه طراحی چارچوب‌های استراتژیک برای همسویی مدیریت تأمین و تقاضای آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی صورت گرفته

افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی، تغییرات اقلیمی و محدودیت منابع آبی، چالش‌های جدی را برای مدیریت آب شهری در سراسر جهان ایجاد کرده است ([Al](#) و [Abou Taleb](#)، ۲۰۲۱). بر اساس گزارش‌های بین‌المللی، بیش از ۴۰ درصد از جمعیت جهان با تنش آبی مواجه هستند و پیش‌بینی می‌شود این آمار تا سال ۲۰۵۰ به بیش از ۵۵ درصد افزایش یابد. در چنین شرایطی، رویکردهای سنتی مدیریت آب که عمدتاً مبتنی بر استفاده یکبار مصرف از منابع آبی هستند، دیگر پاسخگوی نیازهای جوامع نیستند و ضرورت حرکت به سمت مدل‌های پایدارتر را ایجاد می‌کنند ([Feizizadeh](#) و [همکاران](#)، ۲۰۲۱).

اقتصاد چرخشی به عنوان پارادایمی نوین در توسعه پایدار، با تغییر دیدگاه از الگوی خطی "استخراج-تولید-مصرف-دفع" به الگوی چرخه‌ای "کاهش-استفاده مجدد-بازیافت"، امکان بهره‌برداری مؤثرتر و پایدارتر از منابع محدود را فراهم می‌آورد ([Borrión](#) و [Domenech](#)، ۲۰۲۲). مفهوم اقتصاد چرخشی در حوزه آب، به دنبال بازآفرینی و بازسازی سیستم‌های آبی از طریق طراحی هوشمندانه، نوآوری در فرآیندها، و به حداقل رساندن اتلاف منابع است ([Koseoglu-Imer](#) و [همکاران](#)، ۲۰۲۳).

همسویی استراتژی‌های تأمین و تقاضای آب شهری در چارچوب اقتصاد چرخشی، به معنای ایجاد هماهنگی و تعادل بین رویکردهای تأمین (منبع‌محور) و رویکردهای تقاضا (مصرف‌محور) با هدف دستیابی به کارایی بیشتر، اثربخشی بالاتر و پایداری بلندمدت منابع آبی است ([Xiang](#) و [همکاران](#)، ۲۰۲۱). باوجود اهمیت این همسویی، بررسی ادبیات موضوعی نشان می‌دهد که اغلب مطالعات صورت گرفته یا بر جنبه تأمین آب تمرکز داشته‌اند یا به مدیریت تقاضا پرداخته‌اند و کمتر پژوهشی به ارائه چارچوبی جامع برای همسویی این دو جنبه در بستر اقتصاد چرخشی پرداخته است ([Kakwani](#) و [Kalbar](#)، ۲۰۲۴).

به طور مشخص، مرور پژوهش‌های موجود نشان می‌دهد که مطالعات پیشین بیشتر بر یک یا دو بُعد محدود از مدیریت آب شهری تمرکز داشته‌اند. به‌عنوان مثال [Smol](#) و [همکاران](#) (۲۰۲۰) چارچوبی برای اقتصاد چرخشی در بخش آب و فاضلاب اروپا ارائه کردند، اما این چارچوب بر جنبه‌های فنی و زیرساختی متمرکز بود و ابعاد مدیریت تقاضا، سیاست‌گذاری و مشارکت ذی‌نفعان را به صورت یکپارچه در نظر نگرفت. همچنین، [Cunha Marques](#) و [Fernandes](#) (۲۰۲۳) بر بازاستفاده از آب تمرکز کردند، اما چارچوب عملیاتی برای همسویی استراتژیک بین تأمین و تقاضا ارائه ندادند. از سوی دیگر، [Kakwani](#) و [Kalbar](#) (۲۰۲۴) به اولویت‌بندی استراتژی‌های چرخشی آب پرداختند، اما مدل آن‌ها فاقد شاخص‌های عملیاتی مشخص برای بستر ایران و کشورهای با

است. براین اساس، هدف اصلی این پژوهش، طراحی چارچوبی جامع برای همسویی استراتژی‌های تأمین و تقاضای آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی است. سؤال اصلی پژوهش این است که چه ابعاد، مؤلفه‌ها و شاخص‌هایی باید در چارچوب استراتژیک همسویی مدیریت تأمین و تقاضای آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی در نظر گرفته شوند؟ یافته‌های این پژوهش می‌تواند به عنوان راهنمایی برای سیاست‌گذاران، مدیران و متخصصان حوزه آب شهری در طراحی و پیاده‌سازی استراتژی‌های همسو با اصول اقتصاد چرخشی عمل کند و زمینه دستیابی به مدیریت پایدار منابع آب را فراهم آورد. همچنین، نتایج این پژوهش می‌تواند پایه و اساسی برای پژوهش‌های آینده در زمینه ارزیابی و بهبود عملکرد سیستم‌های آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی باشد.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مدیریت منابع آب شهری

مدیریت منابع آب شهری به مجموعه فعالیت‌های برنامه‌ریزی، توسعه، توزیع و مدیریت بهینه منابع آبی در محیط‌های شهری گفته می‌شود. این رویکرد مدیریتی با هدف تأمین پایدار آب با کیفیت مناسب برای مصارف مختلف شهری، کاهش آسیب‌پذیری در برابر خشکسالی و سیل، و حفظ اکوسیستم‌های آبی صورت می‌گیرد (Xiong و همکاران، ۲۰۲۵). در دهه‌های اخیر، با افزایش چالش‌های محیط‌زیستی، محدودیت منابع آبی و رشد شتابان جمعیت شهری، دیدگاه‌های نوینی در زمینه مدیریت آب شهری مطرح شده‌اند که بر یکپارچگی، پایداری و انعطاف‌پذیری تأکید دارند (Vinagre و همکاران، ۲۰۲۳).

یکی از مهمترین تحولات در این زمینه، ظهور مفهوم "مدیریت یکپارچه منابع آب" است که به دنبال ایجاد هماهنگی بین جنبه‌های مختلف چرخه آب شهری، از منابع تأمین گرفته تا مصرف و در نهایت تصفیه و بازچرخانی پساب است (Mukhopadhyay، ۲۰۲۵). رویکرد مدیریت یکپارچه منابع آب، با در نظر گرفتن هم‌زمان ابعاد محیط‌زیستی، اقتصادی، اجتماعی و فنی، چارچوبی جامع برای تصمیم‌گیری در حوزه آب شهری فراهم می‌آورد و امکان همسویی بهتر بین استراتژی‌های تأمین و تقاضا را ایجاد می‌کند (Nazemi و همکاران، ۲۰۲۰).

از دیگر تحولات مهم در حوزه مدیریت آب شهری، می‌توان به "مدیریت هوشمند آب" اشاره کرد که با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین همچون اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی، داده‌های بزرگ (Zamany و همکاران، ۲۰۲۴) و فناوری‌های سنجش از راه دور، امکان نظارت دقیق، تصمیم‌گیری بهنگام و بهینه‌سازی مستمر سیستم‌های آبی را فراهم می‌آورد (Xiang و همکاران، ۲۰۲۱).

در ایران، مدیریت منابع آب شهری با چالش‌های جدی از جمله محدودیت منابع، فرسودگی زیرساخت‌ها (آب بدون درآمد بیش از ۳۰ درصد) و الگوی مصرف بالاتر از استانداردهای جهانی مواجه است (Ardalan و همکاران، ۲۰۱۸؛ Nazari و همکاران، ۲۰۱۸). باتوجه به این چالش‌ها، لزوم بازنگری در رویکردهای مدیریت آب شهری و حرکت به سمت مدل‌های پایدارتر بیش از پیش احساس می‌شود. در این راستا، اقتصاد چرخشی به عنوان رویکردی نوین می‌تواند چارچوب مناسبی برای تحول در سیستم‌های آب شهری و ایجاد تعادل بین منابع و مصارف فراهم آورد (Raoufi و Gorji، ۲۰۲۱).

اقتصاد چرخشی و کاربرد آن در بخش آب

اقتصاد چرخشی پارادایمی نوین در توسعه اقتصادی است که در تقابل با مدل سنتی اقتصاد خطی (تولید، مصرف و دفع) قرار می‌گیرد. این مفهوم بر بازسازی و بازآفرینی سیستم‌های تولید و مصرف با هدف حفظ ارزش محصولات، مواد و منابع در طولانی‌ترین زمان ممکن و به حداقل رساندن تولید ضایعات و پسماندها تأکید دارد. در اقتصاد چرخشی، چرخه‌های تولید و مصرف به گونه‌ای طراحی می‌شوند که منابع در یک چرخه بسته حرکت کرده و پسماندها به عنوان منابع جدید مورد استفاده قرار می‌گیرند (Han و همکاران، ۲۰۲۰).

اصول بنیادین اقتصاد چرخشی عبارتند از: کاهش^۲، استفاده مجدد^۳، بازیافت^۴، بازیابی^۵ و بازطراحی^۶. این اصول در کنار یکدیگر، چارچوبی جامع برای تحول در سیستم‌های تولید و مصرف و حرکت به سمت توسعه پایدار فراهم می‌آورند (Ranjbari و همکاران، ۲۰۲۱). اقتصاد چرخشی با ایجاد ارزش افزوده از پسماندها، کاهش وابستگی به منابع اولیه و کاهش آلودگی‌های محیط‌زیستی، به دنبال ایجاد هم‌افزایی بین اهداف اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی است (Schröder و همکاران، ۲۰۲۰).

در حوزه آب، اقتصاد چرخشی به دنبال بازطراحی سیستم‌های آبی از خطی به چرخه‌ای است تا بتوان از منابع آبی به صورت بهینه‌تر و پایدارتر استفاده کرد (Smol و همکاران، ۲۰۲۰). در این رویکرد، آب به عنوان یک منبع ارزشمند در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند در چرخه‌های متعدد استفاده شود و در هر چرخه، ارزش آفرینی جدیدی ایجاد کند. کاربرد اصول اقتصاد چرخشی در بخش آب شامل بازچرخانی و استفاده مجدد از آب، بازیابی منابع و انرژی از فاضلاب، جمع‌آوری آب باران، کاهش هدررفت از طریق فناوری‌های هوشمند، و مدیریت تقاضا از طریق بهینه‌سازی مصرف است (Smol و همکاران، ۲۰۲۰؛ Fernandes و Cunha Marques، ۲۰۲۳). تجربیات جهانی مانند پروژه NEWater در سنگاپور (تأمین ۴۰ درصد نیاز آبی) و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها در پرت استرالیا، اثربخشی اقتصاد چرخشی در کاهش تنش آبی را نشان می‌دهند (Koseoglu-Imer و همکاران، ۲۰۲۳؛ Silva، ۲۰۲۳).

در ایران، اقدامات محدودی در زمینه بازچرخانی آب و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها انجام شده است، اما چالش‌های فنی، مالی، قانونی و فرهنگی مسیر گذار به اقتصاد چرخشی را دشوار کرده‌اند (Raoufi و Gorji، ۲۰۲۱؛ Karimi Alavijeh و همکاران، ۲۰۲۱).

استراتژی‌های اقتصادی در مدیریت چرخشی آب

گذار به اقتصاد چرخشی آب، علاوه بر نیاز به تحولات فنی و زیرساختی، مستلزم بازطراحی ابزارها و استراتژی‌های اقتصادی است که انگیزه‌های لازم برای تغییر رفتار مصرف‌کنندگان، جذب سرمایه‌گذاری بخش خصوصی و اجرای پروژه‌های نوآورانه را فراهم آورند. استراتژی‌های اقتصادی در این حوزه به سه دسته اصلی قابل تقسیم‌اند: مکانیزم‌های قیمت‌گذاری، ابزارهای مالی و مشوق‌ها و مدل‌های کسب‌وکار نوین (Al-Saidi و Dehnavi، ۲۰۱۹).

مکانیزم‌های قیمت‌گذاری به عنوان یکی از مؤثرترین ابزارهای مدیریت تقاضا، نقش کلیدی در ترغیب مصرف بهینه و حمایت از بازچرخانی آب دارند. قیمت‌گذاری پلکانی، تعرفه‌های متمایز بر اساس نوع مصرف، و اعمال قیمت واقعی آب (که هزینه‌های محیط‌زیستی را نیز در بر گیرد) از جمله رویکردهای مورد استفاده هستند (Al-Saidi و Dehnavi، ۲۰۱۹). بااین‌حال، طراحی نظام قیمت‌گذاری باید با رعایت عدالت اجتماعی و حمایت از اقشار آسیب‌پذیر همراه باشد تا پذیرش عمومی را به همراه داشته باشد (Shahangian و همکاران، ۲۰۲۲).

ابزارهای مالی و مشوق‌های اقتصادی شامل یارانه‌های هدفمند برای نصب تجهیزات کم‌مصرف، معافیت‌های مالیاتی برای پروژه‌های بازچرخانی آب و پرداخت پاداش به مصرف‌کنندگانی است که در صرفه‌جویی آب موفق عمل می‌کنند. تجربیات بین‌المللی نشان می‌دهد که ترکیب مشوق‌های مثبت (یارانه و پاداش) با جریمه‌های اقتصادی (برای مصرف بیش از حد)، اثربخشی بیشتری نسبت به رویکردهای تک‌بعدی دارد (Savari و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، مشارکت عمومی - خصوصی و تأمین مالی از طریق اوراق سبز، ابزارهای نوینی هستند که می‌توانند منابع مالی لازم برای توسعه زیرساخت‌های اقتصاد چرخشی آب را فراهم آورند (Smol و همکاران، ۲۰۲۰).

مدل‌های کسب‌وکار نوین در اقتصاد چرخشی آب، بر ارزش‌آفرینی از منابعی تمرکز دارند که پیش‌تر به عنوان پسماند تلقی می‌شدند. به‌عنوان مثال فروش آب بازچرخانی شده با قیمت رقابتی برای مصارف صنعتی و کشاورزی، بازیابی و فروش مواد مغذی از فاضلاب (مانند فسفر و نیتروژن)، تولید بیوگاز و انرژی از لجن، و ارائه خدمات مشاوره‌ای برای بهینه‌سازی مصرف آب در صنایع، نمونه‌هایی از این مدل‌ها هستند (Han و همکاران، ۲۰۲۰؛ Guerra-Rodríguez و همکاران، ۲۰۲۰). این مدل‌ها علاوه بر کاهش فشار بر منابع

آبی، فرصت‌های شغلی و درآمدزایی جدیدی نیز ایجاد می‌کنند (Fernandes و Cunha Marques، ۲۰۲۳).

در ایران، باوجودپتانسیل بالا، استفاده از استراتژی‌های اقتصادی در حوزه اقتصاد چرخشی آب هنوز محدود است. نظام قیمت‌گذاری فعلی آب اغلب پایین‌تر از هزینه واقعی تأمین و توزیع است که انگیزه کافی برای صرفه‌جویی ایجاد نمی‌کند (Nazari و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین، ابزارهای مالی و مشوق‌های اقتصادی برای حمایت از پروژه‌های بازچرخانی آب به‌طور سیستماتیک طراحی و اجرا نشده‌اند (Karimi Alavijeh و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین، توسعه و پیاده‌سازی استراتژی‌های اقتصادی مناسب، یکی از پیش‌نیازهای اساسی گذار به اقتصاد چرخشی آب در کشور است.

همسویی استراتژیک در مدیریت تأمین و تقاضای آب

همسویی استراتژیک به معنای ایجاد هماهنگی و تعادل بین استراتژی‌های مختلف در راستای دستیابی به اهداف سازمانی است. در حوزه مدیریت آب، همسویی استراتژیک بین مدیریت تأمین و تقاضا، به معنای ایجاد تعادل و هماهنگی بین استراتژی‌های افزایش عرضه آب (مانند توسعه منابع جدید، کاهش هدررفت) و استراتژی‌های مدیریت تقاضا (مانند کاهش مصرف، بهینه‌سازی الگوهای مصرف) است (Rodrigues و همکاران، ۲۰۲۴).

رویکردهای سنتی مدیریت آب یا بر افزایش منابع تأمین (سدسازی، انتقال آب) یا بر کاهش مصرف (اصلاح الگوها، تجهیزات کم‌مصرف) متمرکز بوده‌اند. هر دو رویکرد به تنهایی با محدودیت‌هایی مواجه‌اند: رویکرد تأمین‌محور به دلیل محدودیت منابع و هزینه‌های بالا پاسخگو نیست و رویکرد تقاضا‌محور نیز در شرایط رشد جمعیت و توسعه اقتصادی کافی نیست (Al-Saidi و Dehnavi، ۲۰۱۹؛ Shahangian و همکاران، ۲۰۲۲).

رویکرد نوین در مدیریت آب، بر یکپارچه‌سازی هم‌زمان استراتژی‌های تأمین و تقاضا تأکید دارد که منجر به کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری و تاب‌آوری بیشتر در برابر بحران‌های آبی می‌شود (Santos و همکاران، ۲۰۲۳؛ Tsatsou و همکاران، ۲۰۲۳).

اقتصاد چرخشی با ایجاد چرخه‌های بسته آب، پل ارتباطی بین استراتژی‌های تأمین و تقاضا ایجاد می‌کند؛ برای مثال، بازچرخانی پساب هم منابع تأمین را افزایش می‌دهد و هم مصرف را بهینه می‌کند (Kyriakopoulos، ۲۰۲۳؛ Soto Rios و همکاران، ۲۰۲۳). در ایران، باتوجه‌به چالش‌های روزافزون کمبود آب، آلودگی منابع و رشد تقاضا، لزوم حرکت به سمت همسویی استراتژیک بین مدیریت تأمین و تقاضای آب بیش از پیش احساس می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد رویکرد فعلی مدیریت آب در ایران، هنوز تا حد زیادی بر افزایش منابع تأمین متمرکز است و توجه کافی به مدیریت تقاضا نمی‌شود (Mahdavinia و Mokhtar، ۲۰۱۹).

برخی پژوهش‌ها در ایران به بررسی راهکارهای ایجاد تعادل بین تأمین و تقاضای آب پرداخته‌اند. به عنوان مثال [داوودی و قضاوی \(۱۳۹۹\)](#) با استفاده از ماتریس SWOT به تعیین استراتژی‌های مدیریتی مناسب منابع آب در حوضه آبریز شهری نطنز پرداخته‌اند و بر لزوم توجه هم‌زمان به جنبه‌های تأمین و تقاضا تأکید کرده‌اند. همچنین [نظامی و همکاران \(۱۴۰۲\)](#) با توسعه یک مدل پویایی‌های سیستم برای مدیریت پایدار آب شهری در اصفهان، نشان داده‌اند که سناریوهای ترکیبی که هم بر بهبود منابع تأمین و هم بر کاهش تقاضا تمرکز دارند، نتایج بهتری نسبت به سناریوهای تک‌بعدی دارند.

با این حال همچنان خلأهای پژوهشی متعددی در زمینه طراحی چارچوب‌های جامع برای همسویی استراتژیک بین مدیریت تأمین و تقاضای آب با رویکرد اقتصاد چرخشی در ایران وجود دارد. این پژوهش با هدف پر کردن بخشی از این خلأ و ارائه چارچوبی جامع برای همسویی استراتژیک در مدیریت آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی انجام شده است.

مروری بر پژوهش‌های پیشین

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه اقتصاد چرخشی آب و مدیریت پایدار منابع آبی انجام شده است. در این بخش، به مرور برخی از مهمترین پژوهش‌های مرتبط پرداخته می‌شود.

[Smol و همکاران \(۲۰۲۰\)](#) در پژوهشی با عنوان "مدل اقتصاد چرخشی در بخش آب و فاضلاب اروپا"، چارچوبی برای پیاده‌سازی اصول اقتصاد چرخشی در بخش آب و فاضلاب ارائه کردند. این چارچوب شامل پنج حوزه کلیدی است: مدیریت منابع آب، تصفیه آب، توزیع آب، جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب و بازیافت آب و مواد. پژوهشگران تأکید کردند که گذار به اقتصاد چرخشی آب نیازمند نوآوری‌های فناورانه، تغییرات قانونی و نهادی، و مشارکت ذی‌نفعان مختلف است.

[Fernandes و Cunha Marques \(۲۰۲۳\)](#) در مطالعه‌ای با عنوان "بررسی بازاستفاده از آب از منظر اقتصاد چرخشی" به تحلیل راهکارهای بازچرخانی و استفاده مجدد از آب پرداختند. آنها با بررسی تجارب موفق در کشورهای مختلف، چارچوبی برای ارزیابی پتانسیل بازاستفاده از آب در مناطق مختلف ارائه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که بازاستفاده از آب می‌تواند تا ۳۰ درصد از مصرف آب تازه را کاهش دهد و منافع اقتصادی و محیط‌زیستی قابل توجهی به همراه داشته باشد.

[Kakwani و Kalbar \(۲۰۲۴\)](#) در پژوهشی با عنوان "اولویت‌بندی استراتژی‌های اقتصاد چرخشی آب شهری با استفاده از شاخص چرخشی آب" به توسعه یک چارچوب برای ارزیابی و اولویت‌بندی استراتژی‌های چرخشی در بخش آب شهری پرداختند. آنها با استفاده از رویکرد تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و شاخص چرخشی آب (WCI)، استراتژی‌های

مختلف را در سه شهر هند ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که بازچرخانی آب خاکستری و استفاده از سیستم‌های جمع‌آوری آب باران، بالاترین اولویت را در همه شهرها داشتند.

[Koseoglu-Imer و همکاران \(۲۰۲۳\)](#) در مطالعه‌ای با عنوان "چالش‌های فعلی و چشم‌اندازهای آینده برای اقتصاد چرخشی کامل آب در کشورهای اروپایی" موانع و محرک‌های گذار به اقتصاد چرخشی آب را بررسی کردند. آنها پنج دسته اصلی از چالش‌ها را شناسایی کردند: فنی، اقتصادی، قانونی و نهادی، اجتماعی و فرهنگی، و محیط‌زیستی. همچنین، راهکارهایی برای غلبه بر این چالش‌ها از جمله توسعه فناوری‌های نوین، بهبود چارچوب‌های قانونی، افزایش آگاهی عمومی، و تقویت همکاری بین ذی‌نفعان ارائه کردند.

[Santos و همکاران \(۲۰۲۳\)](#) در پژوهشی با عنوان "مدیریت پایدار آب: درک ابعاد اجتماعی-اقتصادی و فرهنگی"، به بررسی نقش عوامل اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی در مدیریت پایدار آب پرداختند. آنها با استفاده از مطالعات موردی در کشورهای مختلف، چارچوبی برای ارزیابی تأثیر این عوامل بر موفقیت برنامه‌های مدیریت آب ارائه کردند. نتایج نشان داد موفقیت برنامه‌های مدیریت آب، به میزان قابل توجهی به پذیرش اجتماعی، مشارکت ذی‌نفعان و زمینه‌های فرهنگی وابسته است.

[Al-Saidi و همکاران \(۲۰۲۱\)](#) در مطالعه‌ای با عنوان "اقتصاد چرخشی در تأمین اساسی: چارچوب‌سازی رویکرد برای بخش‌های آب و غذای کشورهای شورای همکاری خلیج فارس" پتانسیل اقتصاد چرخشی در مدیریت آب و غذا در منطقه خاورمیانه را بررسی کردند. آنها چارچوبی برای ارزیابی و پیاده‌سازی راهکارهای چرخشی در این منطقه ارائه کردند و بر اهمیت همکاری منطقه‌ای، توسعه فناوری‌های بومی، و مشارکت بخش خصوصی تأکید کردند.

در ایران نیز برخی پژوهش‌ها در زمینه مدیریت پایدار آب و اقتصاد چرخشی انجام شده است. [Mahdavinia و Mokhtar \(۲۰۱۹\)](#) در پژوهشی با عنوان "مواجهه با پایداری در مدیریت آب‌های زیرزمینی با استفاده از رویکرد پویایی‌های سیستم: یک مطالعه موردی در ایران" به توسعه یک مدل پویایی‌های سیستم برای مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی پرداختند.

[Karimi Alavijeh و همکاران \(۲۰۲۱\)](#) در مطالعه‌ای با عنوان "چشم‌اندازهای امنیت آب شهری کنونی و آینده در ایران" چالش‌ها و فرصت‌های پیش روی مدیریت آب شهری در ایران را بررسی کردند. آنها با تحلیل روندهای موجود و استفاده از روش سناریونویسی، چالش‌های آینده مدیریت آب شهری را شناسایی و راهکارهایی برای مقابله با این چالش‌ها ارائه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد تلفیق راهکارهای فنی (مانند بازچرخانی آب) و غیرفنی (مانند اصلاح قوانین و مشارکت ذی‌نفعان) می‌تواند به بهبود امنیت آب شهری در ایران کمک کند.

[Ardalan و همکاران \(۲۰۱۸\)](#) در پژوهشی با عنوان "مسائل آب شهری در کلان‌شهر تهران" چالش‌های مدیریت آب در تهران را بررسی کردند. آنها با استفاده از مطالعات میدانی و تحلیل داده‌های موجود، مشکلات اصلی مدیریت آب در تهران را شناسایی کردند، از جمله: افت سطح آب‌های زیرزمینی، نشست زمین، آلودگی منابع آب، فرسودگی شبکه توزیع، و الگوی نامناسب مصرف. پژوهشگران بر لزوم اتخاذ رویکردی یکپارچه و پایدار در مدیریت آب شهری تأکید کردند و راهکارهایی برای بهبود وضعیت ارائه دادند.

[Gorji و Raoufi \(۲۰۲۱\)](#) در مطالعه‌ای با عنوان "مدیریت آب و انرژی در یک سایت پایدار: مطالعه موردی یک محیط زندگی برای کودکان خیابانی در تهران، ایران" راهکارهای پایدار در مدیریت آب و انرژی را بررسی کردند. آنها با طراحی یک سیستم یکپارچه که شامل جمع‌آوری آب باران، بازچرخانی آب خاکستری و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بود، توانستند مصرف آب را تا ۴۵ درصد کاهش دهند. این مطالعه نشان داد اجرای اصول اقتصاد چرخشی در مقیاس کوچک و محلی نیز می‌تواند نتایج قابل توجهی داشته باشد.

مرور پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد باوجود مطالعات متعدد در زمینه اقتصاد چرخشی آب و مدیریت پایدار منابع آبی، خلأهایی در زمینه طراحی چارچوب‌های جامع برای همسویی استراتژیک بین مدیریت تأمین و تقاضای آب با رویکرد اقتصاد چرخشی وجود دارد. اغلب پژوهش‌ها بر جنبه‌های فنی و مهندسی اقتصاد چرخشی آب متمرکز بوده‌اند یا موانع و محرک‌های گذار به اقتصاد چرخشی را بررسی کرده‌اند، اما کمتر به ارائه چارچوبی جامع و یکپارچه برای همسویی استراتژیک در مدیریت آب شهری توجه کرده‌اند.

بنابراین، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ، به طراحی چارچوبی جامع برای همسویی استراتژیک بین مدیریت تأمین و تقاضای آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی می‌پردازد. این چارچوب می‌تواند به عنوان راهنمایی برای سیاست‌گذاران، مدیران و متخصصان حوزه آب شهری در طراحی و پیاده‌سازی استراتژی‌های همسو با اصول اقتصاد چرخشی عمل کند و زمینه دستیابی به مدیریت پایدار منابع آب را فراهم آورد.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، کیفی است. روش اصلی مورد استفاده برای استخراج و تحلیل داده‌ها، تحلیل مضمون بوده که یکی از روش‌های متداول در تحلیل داده‌های کیفی است. تحلیل مضمون، فرآیندی برای شناخت الگوها یا مضامین درون داده‌ها است که به پژوهشگر امکان

می‌دهد تا مفاهیم و مضامین کلیدی را از میان حجم وسیعی از داده‌های کیفی استخراج کند ([Braun و همکاران، ۲۰۲۱](#)).

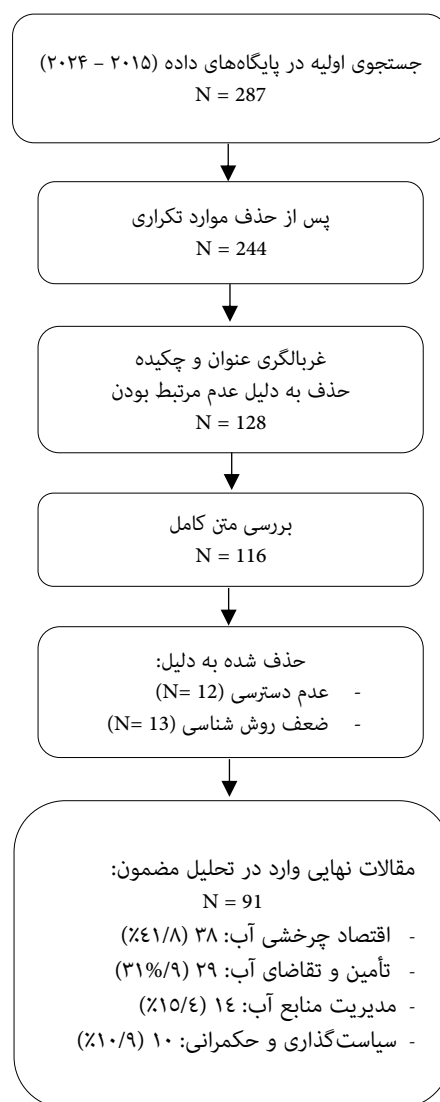
جامعه پژوهش شامل ۹۱ مقاله علمی منتشر شده در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ در زمینه مدیریت منابع آب، اقتصاد چرخشی و استراتژی‌های تأمین و تقاضای آب شهری است. این مقاله‌ها از پایگاه‌های داده معتبر بین‌المللی از جمله Scopus، Web of Science، IEEE Xplore، ScienceDirect و همچنین پایگاه‌های داخلی مانند SID، Magiran، Civilica و Noormags استخراج شده‌اند. از مجموع مقاله‌های بررسی شده، ۸۵ مقاله به زبان انگلیسی و ۶ مقاله به زبان فارسی بودند که دربرگیرنده مطالعات مختلف در زمینه مدیریت منابع آب، اقتصاد چرخشی و استراتژی‌های تأمین و تقاضای آب شهری در ایران و دیگر کشورها هستند.

برای انتخاب مقاله‌ها از مجموعه‌ای از کلیدواژه‌های تخصصی استفاده شد که شامل: اقتصاد چرخشی، مدیریت منابع آب، تأمین آب شهری، تقاضای آب، همسویی استراتژیک، بهینه‌سازی مصرف آب، بازیافت آب، مدیریت یکپارچه منابع آب، پایداری منابع آب، بازچرخانی آب، مدل‌سازی تقاضای آب، برنامه‌ریزی منابع آب، بهره‌وری آب، اقتصاد آب، استراتژی‌های تأمین آب و استراتژی‌های تقاضای آب بودند. همچنین، معادل انگلیسی این کلیدواژه‌ها نیز در جستجوها استفاده شدند.

جستجوی اولیه در پایگاه‌های داده بیان شده، ۲۸۷ مقاله را شناسایی کرد. پس از حذف ۴۳ مقاله تکراری، ۲۴۴ مقاله برای غربالگری عنوان و چکیده باقی ماندند. در این مرحله، ۱۲۸ مقاله به دلیل عدم مرتبط بودن با موضوع پژوهش (مانند مقالات مربوط به آب کشاورزی یا صنعتی خالص بدون ارتباط با مدیریت شهری) حذف شدند. سپس، ۱۱۶ مقاله به صورت کامل بررسی شدند که از این میان، ۲۵ مقاله به دلیل عدم دسترسی به متن کامل یا نبود کیفیت روش‌شناسی مناسب کنار گذاشته شدند. در نهایت، ۹۱ مقاله وارد فرآیند تحلیل مضمون شدند (۱).

شکل ۱).

از ۹۱ مقاله نهایی، ۳۸ مقاله (۴۱/۸٪) به طور مستقیم به اقتصاد چرخشی آب پرداخته بودند، ۲۹ مقاله (۳۱/۹٪) به مدیریت تأمین و تقاضای آب شهری، ۱۴ مقاله (۱۵/۴٪) به استراتژی‌های مدیریت منابع آب، و ۱۰ مقاله (۱۰/۹٪) به جنبه‌های سیاست‌گذاری و حکمرانی آب شهری متمرکز بودند. فرآیند غربالگری مقاله‌ها با استفاده از معیارهای ورود و خروج مشخص انجام شد که در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- نمودار جریان PRISMA فرآیند انتخاب مقاله‌ها

جدول ۱- معیارهای ورود و خروج مقاله‌ها

معیارهای خروج	معیارهای ورود
مقاله‌ها به زبان‌های دیگر	مقاله‌ها به زبان انگلیسی یا فارسی
مقاله‌های منتشر شده قبل از ۲۰۱۵	منتشر شده بین ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴
مقاله‌های کنفرانسی، فصل کتاب، یا گزارش‌های خاکستری	مقاله‌های پژوهشی، مروری، یا موردکاوی در نشریات معتبر علمی
تمرکز صرف بر آب کشاورزی یا صنعتی بدون ارتباط با مدیریت شهری	تمرکز بر مدیریت آب شهری، اقتصاد چرخشی آب، یا همسویی استراتژی‌های تأمین و تقاضا
مقاله‌ها صرفاً نظری بدون ارائه چارچوب یا داده	ارائه داده‌های تجربی، چارچوب مفهومی، یا مدل استراتژیک
عدم دسترسی به متن کامل	دسترسی به متن کامل
ضعف شدید روش‌شناسی یا یافته‌های مبهم	کیفیت روش‌شناسی مناسب (روش تحقیق مشخص، یافته‌های قابل اتکا)

امکان دستیابی به جدیدترین یافته‌های پژوهشی و روندهای نوین در حوزه همسویی استراتژی‌های تأمین و تقاضای آب شهری را فراهم می‌آورد. جستجوی مقاله‌ها تا پایان سال ۲۰۲۴ انجام شد و مقاله‌های منتشرشده تا این تاریخ در تحلیل لحاظ شدند.

انتخاب بازه زمانی ده ساله (۲۰۱۵-۲۰۲۴) بر اساس دو دلیل اصلی صورت گرفت: ۱- مفهوم اقتصاد چرخشی به طور جدی از سال ۲۰۱۵ و پس از انتشار بسته اقتصاد چرخشی توسط کمیسیون اروپا^۷ در ادبیات علمی مورد توجه قرار گرفت و کاربرد آن در بخش آب و فاضلاب شهری نیز از همین دوره به سرعت رشد یافت (Smol و همکاران، ۲۰۲۰). ۲- این بازه

فرآیند تحلیل مضمون در این پژوهش بر اساس رویکرد [Braun و همکاران \(۲۰۲۱\)](#) انجام شد. این رویکرد شامل شش گام اصلی است که برای شناسایی، تحلیل و گزارش الگوها (مضامین) در داده‌ها استفاده می‌شود:

۱. آشنایی با داده‌ها: در این گام، پژوهشگران با مطالعه دقیق متون منتخب، به آشنایی عمیق با محتوای آنها پرداختند. این مرحله شامل خواندن مکرر داده‌ها، جستجوی معانی و الگوهای اولیه، و ثبت ایده‌های اولیه بود.
۲. کدگذاری اولیه: در این مرحله، پژوهشگران به شناسایی و کدگذاری ویژگی‌های مهم داده‌ها پرداختند. کدگذاری به صورت دستی و با استفاده از رویکرد کدگذاری باز انجام شد.
۳. جستجوی مضامین: در این گام، کدهای شناسایی شده بر اساس شباهت‌های مفهومی دسته‌بندی شدند تا

مضامین پایه (شاخص‌ها) شکل گیرند. سپس با تحلیل روابط بین مضامین پایه، مضامین سازمان‌دهنده (مؤلفه‌ها) شناسایی شدند.

۴. بازنگری مضامین: در این مرحله، مضامین شناسایی شده مورد بازبینی و پالایش قرار گرفتند تا از انسجام درونی و تمایز بیرونی آنها اطمینان حاصل شود.
 ۵. تعریف و نام‌گذاری مضامین: در این گام، تعاریف دقیق و نام‌های مناسب برای هر یک از مضامین شناسایی شده ارائه شد.
 ۶. تدوین گزارش: در گام نهایی، یافته‌های به‌دست آمده از تحلیل مضمون در قالب یک چارچوب منسجم ارائه شد.
- برای شفافیت فرآیند کدگذاری و تحلیل مضمون، نمونه‌ای از استخراج کدها از متن مقاله‌ها و تبدیل آن‌ها به مضامین پایه، سازمان‌دهنده و فراگیر در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- نمونه فرآیند کدگذاری و استخراج مضامین

نمونه متن از مقاله	کد باز استخراج شده	مضمون پایه (شاخص)	مضمون سازمان‌دهنده (مؤلفه)	مضمون فراگیر (بعد)
"Rainwater harvesting systems can reduce urban water demand by 20-30%" (Silva, 2023)	کاهش تقاضا از طریق آب باران	سیستم‌های جمع‌آوری آب باران	توسعه زیرساخت‌های سبز	استراتژی‌های مدیریت منابع و زیرساخت‌ها
"Treated wastewater can be reused for irrigation and industrial purposes" (Fernandes & Cunha Marques, 2023)	استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده	تصفیه و استفاده مجدد از پساب	بازيافت و استفاده مجدد	استراتژی‌های اقتصاد چرخشی
"Smart meters enable real-time monitoring of water consumption" (Xiang et al., 2021)	نظارت آنی بر مصرف	هوشمندسازی مصرف	بهینه‌سازی مصرف	استراتژی‌های مدیریت تقاضا و مصرف
"Progressive tariff structures incentivize water conservation" (Al-Saidi & Dehnavi, 2019)	تعرفه پلکانی برای ترغیب صرفه‌جویی	قیمت‌گذاری پلکانی	سیاست‌های قیمت‌گذاری	استراتژی‌های مدیریت تقاضا و مصرف
"Public-private partnerships accelerate circular water projects" (Al-Saidi et al., 2021)	مشارکت بخش خصوصی در پروژه‌های چرخشی	مشارکت عمومی-خصوصی	همکاری‌های بین‌بخشی	استراتژی‌های مشارکت و همکاری ذینفعان
"Legal frameworks must support water reuse practices" (Koseoglu-Imer et al., 2023)	چارچوب قانونی حمایت از بازچرخانی	مقررات حمایتی	چارچوب‌های قانونی و نظارتی	استراتژی‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری

فرآیند کدگذاری و تحلیل مضمون به صورت دستی و با استفاده از Microsoft Excel (نسخه ۲۰۲۱) برای سازماندهی و دسته‌بندی کدها انجام شد. انتخاب این رویکرد باتوجه‌به ماهیت کیفی پژوهش، حجم قابل مدیریت داده‌ها (۹۱ مقاله) و نیاز به تعامل عمیق و انعطاف‌پذیر پژوهشگران با متن صورت گرفت. در نرم‌افزار Excel، برای هر مقاله یک ردیف اختصاص یافت که شامل اطلاعات کلیدی (نویسنده، سال، عنوان، هدف پژوهش)، کدهای استخراج شده، مضامین مرتبط بود. این روش امکان جستجو، فیلتر، و دسته‌بندی مکرر کدها را برای شناسایی الگوها فراهم کرد. مطالعات پیشین نیز نشان دادند که در پژوهش‌های کیفی با حجم داده متوسط، استفاده از ابزارهای ساده مانند نرم‌افزار Excel

می‌تواند به اندازه نرم‌افزارهای تخصصی (مانند NVivo یا MAXQDA) مؤثر باشد، به شرطی که فرآیند به صورت منظم و شفاف مستند شود ([Braun و همکاران، ۲۰۲۱](#)). به منظور به‌دست آمدن اطمینان از اعتبار و پایایی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل مضمون، اقدامات متعددی انجام شد:

- کنترل اعتبار درونی: از روش مثلث‌سازی منابع داده استفاده شد. مضامین استخراج شده با منابع مختلف شامل مقالات علمی-پژوهشی، گزارش‌های تخصصی سازمان‌های معتبر بین‌المللی و اسناد بالادستی ملی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند.
- بازبینی توسط همکاران پژوهش: فرآیند کدگذاری و استخراج مضامین توسط دو پژوهشگر دیگر متخصص در

- کنترل روایی ترجمه: برای اطمینان از صحت ترجمه مفاهیم و اصطلاحات تخصصی، از روش ترجمه مضاعف استفاده شد.

یافته‌های پژوهش

در این بخش، یافته‌های حاصل از تحلیل مضمون ارائه می‌شوند. ابتدا ابعاد پنج‌گانه مدل همسویی استراتژی‌های تأمین و تقاضای آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی معرفی می‌شوند و سپس مؤلفه‌ها و شاخص‌های هر بُعد تشریح می‌شوند.

ابعاد مدل همسویی استراتژی‌های تأمین و تقاضای آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی

بر اساس نتایج تحلیل مضمون، مدل همسویی استراتژی‌های تأمین و تقاضای آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی دارای پنج بُعد اصلی است که در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

حوزه مدیریت منابع آب و اقتصاد چرخشی مورد بازبینی قرار گرفت. پس از اعمال اصلاحات، ضریب توافق کدگذاری بین پژوهشگران (کاپای کوهن) به ۰/۸۵ رسید که نشان‌دهنده توافق بالای کدگذاران است.

- بررسی اعتبار توسط خبرگان: مدل استخراج شده در اختیار ۸ نفر از خبرگان حوزه آب و فاضلاب شهری و اقتصاد چرخشی قرار گرفت. نتایج این ارزیابی نشان داد میانگین امتیاز تمام ابعاد مدل بالاتر از ۴ (از مقیاس ۵) بوده و ضریب CVR برای تمامی مؤلفه‌ها و شاخص‌ها بالاتر از ۰/۷۵ است.
- آزمون بازآزمون کدگذاری: ۱۵ مقاله به صورت تصادفی انتخاب و مجدداً با فاصله زمانی یک ماه کدگذاری شدند. مقایسه کدهای استخراج شده در دو مرحله نشان داد که ۸۳ درصد از کدها مشابه بوده‌اند.
- اشباع نظری: پس از تحلیل حدود ۸۰ مقاله، مضامین جدیدی استخراج نشد و در ۱۱ مقاله باقیمانده، صرفاً شواهد بیشتری برای تأیید مضامین قبلی به دست آمد.

جدول ۳- ابعاد مدل همسویی استراتژی‌های تأمین و تقاضای آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی

تعریف	بُعد
مجموعه راهبردهایی که بر مدیریت بهینه منابع آبی، توسعه، نگهداری و بهبود زیرساخت‌های تأمین، انتقال و توزیع آب تمرکز دارند، با هدف افزایش پایداری، کارایی و تاب‌آوری سیستم آب شهری.	استراتژی‌های مدیریت منابع و زیرساخت‌ها
راهبردهایی که با تمرکز بر بازچرخانی، بازیافت و استفاده مجدد از آب و همچنین بازیابی منابع و انرژی از فاضلاب، به دنبال ایجاد چرخه‌های بسته در سیستم آب شهری و حداکثرسازی ارزش‌آفرینی از منابع آبی هستند.	استراتژی‌های اقتصاد چرخشی
مجموعه راهکارهایی که بر مدیریت و بهینه‌سازی الگوهای مصرف آب، کاهش تقاضا و افزایش کارایی مصرف در بخش‌های مختلف شهری تمرکز دارند.	استراتژی‌های مدیریت تقاضا و مصرف
راهبردهایی که بر ایجاد چارچوب‌های قانونی، نهادی و سیاستی مناسب برای تسهیل گذار به مدیریت پایدار و چرخشی آب شهری تمرکز دارند.	استراتژی‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری
راهکارهایی که بر جلب مشارکت و همکاری تمامی ذی‌نفعان شامل شهروندان، بخش خصوصی، سازمان‌های دولتی و نهادهای مدنی در فرآیند مدیریت آب شهری تأکید دارند.	استراتژی‌های مشارکت و همکاری ذی‌نفعان

تأمین و توزیع آب را بهبود می‌بخشند. مدیریت یکپارچه زیرساخت‌ها به دنبال ایجاد هماهنگی بین تمام اجزای سیستم آب شهری است (Fu و همکاران، ۲۰۲۳). بهینه‌سازی شبکه توزیع با هدف کاهش هدررفت آب که در برخی شهرهای ایران به بیش از ۳۰ درصد می‌رسد، اهمیت ویژه‌ای دارد (Ardalan و همکاران، ۲۰۱۸). توسعه زیرساخت‌های سبز، رویکردی نوآورانه است که با الهام از طبیعت به دنبال ایجاد راه‌حل‌های پایدار برای مدیریت آب شهری است (Stefanakis، ۲۰۱۹).

مؤلفه‌ها و شاخص‌های مدل همسویی استراتژی‌های تأمین و تقاضای آب شهری

در ادامه، مؤلفه‌ها و شاخص‌های هر یک از ابعاد پنج‌گانه مدل همسویی استراتژی‌های تأمین و تقاضای آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی تشریح می‌شوند.

بُعد "استراتژی‌های مدیریت منابع و زیرساخت‌ها" شامل ۵ مؤلفه و ۱۱ شاخص است که در جدول (۴) ارائه شده‌اند. این بُعد بر استراتژی‌هایی تمرکز دارد که زیرساخت‌های فیزیکی

جدول ۴- مؤلفه‌ها و شاخص‌های بُعد استراتژی‌های مدیریت منابع و زیرساخت‌ها

مؤلفه‌ها	شاخص‌ها	معیار سنجش/عملیاتی‌سازی
مدیریت یکپارچه زیرساخت‌ها	نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه	درصد زیرساخت‌های تحت برنامه نگهداری دوره‌ای (%)
	هوشمندسازی شبکه‌های توزیع	تعداد کنتورهای هوشمند نصب شده به ازای هزار مشترک
	رصد و پایش منابع آبی	تعداد ایستگاه‌های پایش کیفیت و کمیت آب فعال
بهینه‌سازی شبکه توزیع	مدیریت نشت و هدررفت	درصد آب بدون درآمد (NRW) - هدف کاهش به زیر ۲۰٪
	نوسازی شبکه‌های فرسوده	درصد خطوط لوله بازسازی شده سالانه (%)
مدیریت کیفیت منابع	پایش کیفیت منابع آب	تعداد نمونه‌برداری و آزمایش کیفی در ماه
	ارتقای استانداردهای کیفی	درصد انطباق با استانداردهای WHO (%)
توسعه زیرساخت‌های سبز	سیستم‌های جمع‌آوری آب باران	حجم آب باران جمع‌آوری شده (مترمکعب در سال)
	توسعه زیرساخت‌های طبیعی	مساحت باغ‌های باران و زیرساخت‌های سبز (متر مربع)
بهره‌برداری پایدار	بهینه‌سازی مصرف انرژی	کیلووات ساعت مصرف انرژی به ازای مترمکعب آب توزیعی
	کاهش کربن در عملیات	تن معادل CO ₂ کاهش یافته در سال

بخش خصوصی و کاهش بار مالی دولت را فراهم می‌آورند (Han و همکاران، ۲۰۲۰). ابزارهای مالی پایدار مانند اوراق سبز^۸ و صندوق‌های اختصاصی اقتصاد چرخشی، مکانیزم‌های نوین تأمین مالی هستند که در کشورهای پیشرو با موفقیت اجرا شده‌اند (Al-Saidi و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، سازوکارهای قیمت‌گذاری انگیزشی مانند تعرفه پلکانی، قیمت‌گذاری حاشیه‌ای، و تخفیف برای استفاده از آب بازیافتی، ابزارهای مؤثری برای مدیریت تقاضا و ترویج رفتار پایدار هستند (Dehnavi و Al-Saidi، ۲۰۱۹). در نهایت، ایجاد بازارهای آب و تجارت حقایق به می‌تواند به تخصیص کارآمدتر منابع آبی بین بخش‌های مختلف منجر شود (Smol و همکاران، ۲۰۲۰).

بُعد "استراتژی‌های اقتصاد چرخشی" شامل ۸ مؤلفه و ۱۶ شاخص است که در جدول (۵) ارائه شده‌اند. استراتژی‌های اقتصاد چرخشی، قلب مدل همسویی را تشکیل می‌دهند و به دنبال بازطراحی سیستم آب شهری از خطی به چرخه‌ای هستند (Smol و همکاران، ۲۰۲۰). بازیافت و استفاده مجدد از آب می‌تواند تا ۳۰ درصد از مصرف آب تازه را کاهش دهد (Cunha Marques و Fernandes، ۲۰۲۳)، و بازیابی منابع انرژی از فاضلاب علاوه بر کاهش هزینه‌های تصفیه، منافع اقتصادی قابل توجهی ایجاد می‌کند (Guerra-Rodríguez و همکاران، ۲۰۲۰). مدل‌های کسب‌وکار چرخشی مانند مشارکت عمومی-خصوصی (PPP) و قراردادهای BOT/BOO، چارچوب‌های اقتصادی نوینی هستند که امکان جذب سرمایه

جدول ۵- مؤلفه‌ها و شاخص‌های بُعد استراتژی‌های اقتصاد چرخشی

مؤلفه‌ها	شاخص‌ها	معیار سنجش/عملیاتی‌سازی
بازیافت و استفاده مجدد	تصفیه و استفاده مجدد از پساب	حجم پساب بازیافتی به کل فاضلاب تولیدی (%)
	شبکه‌های ثانویه توزیع	طول شبکه توزیع آب بازیافتی (کیلومتر)
بازیابی منابع و انرژی	استحصال انرژی از پساب	مگاوات ساعت انرژی تولیدی از بیوگاز در سال
	بازیابی مواد مغذی	تن فسفر و نیتروژن استخراج شده سالانه
فناوری‌های سبز	فناوری‌های نوین تصفیه	تعداد واحدهای تصفیه با فناوری‌های پیشرفته (UV، MBR)
	مشارکت عمومی-خصوصی (PPP)	تعداد قراردادهای PPP فعال در پروژه‌های بازچرخانی
مدل‌های کسب‌وکار چرخشی	قراردادهای BOT/BOO	تعداد پروژه‌های ساخت-بهره‌برداری-واگذاری آب
	مدل خدمات انرژی (ESCO)	حجم سرمایه‌گذاری ESCO در بهینه‌سازی مصرف (میلیارد ریال)
ابزارهای مالی پایدار	اوراق سبز	حجم تأمین مالی از طریق اوراق سبز (میلیارد ریال)
	صندوق‌های اقتصاد چرخشی	سرمایه صندوق‌های اختصاصی برای پروژه‌های چرخشی آب
سازوکارهای قیمت‌گذاری	تعرفه پلکانی انگیزشی	تفاوت قیمت بین بلوک اول و آخر مصرف (%)
	قیمت‌گذاری حاشیه‌ای	قیمت هر مترمکعب اضافی بر اساس هزینه واقعی (ریال)
ابزارهای بازار آب	تخفیف برای استفاده از آب بازیافتی	درصد تخفیف تعرفه برای مصرف‌کنندگان آب بازیافتی (%)
	بازار تجارت حقایق	حجم معاملات حقایق (مترمکعب در سال)
کاهش ردپای محیط‌زیستی	بازارهای ثانویه آب	تعداد معاملات آب بازیافتی بین بخش‌ها
	کاهش آلودگی منابع آبی	درصد کاهش BOD و COD در پساب خروجی (%)

(Shahangian و همکاران، ۲۰۲۲). تحلیل الگوهای مصرف، پایه و اساس برنامه‌ریزی برای مدیریت تقاضاست و به درک بهتر رفتار مصرف‌کنندگان کمک می‌کند (Santos و همکاران، ۲۰۲۳).

بُعد "استراتژی‌های مدیریت تقاضا و مصرف" شامل ۴ مؤلفه و ۶ شاخص است که در جدول (۶) ارائه شده‌اند. مدیریت تقاضا و مصرف، رویکردی است که به جای تمرکز بر افزایش منابع تأمین، بر کاهش و بهینه‌سازی مصرف متمرکز است

سیاست‌های قیمت‌گذاری، ابزاری قدرتمند برای تأثیرگذاری بر رفتار مصرفی هستند، اما باید با ملاحظات اجتماعی و عدالت

در دسترسی به آب همراه باشند (Al-Saidi و Dehnavi، ۲۰۱۹).

جدول ۶- مؤلفه‌ها و شاخص‌های بُعد استراتژی‌های مدیریت تقاضا و مصرف

مؤلفه‌ها	شاخص‌ها	معیار سنجش/عملیاتی‌سازی
تحلیل الگوهای مصرف	الگوهای مصرف بخشی	سرانه مصرف به تفکیک بخش خانگی، تجاری، عمومی (لیتر/نفر/روز)
بهینه‌سازی مصرف	صرفه‌جویی در مصرف	درصد کاهش مصرف نسبت به سال پایه (%)
	تجهیزات کم‌مصرف	درصد واحدهای مسکونی با تجهیزات کم‌مصرف (%)
مدیریت پیک تقاضا	متعادل‌سازی تقاضا	نسبت حداکثر به متوسط مصرف روزانه ^۹
	مشوق‌های اقتصادی	میزان پاداش پرداختی به مشترکین صرفه‌جو (میلیون ریال/سال)
سیاست‌های قیمت‌گذاری	نظام یارانه‌ای هدفمند	درصد یارانه آب برای دهک‌های پایین درآمدی (%)

بُعد "استراتژی‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری" شامل ۷ مؤلفه و ۲۴ شاخص است که در جدول (۷) ارائه شده‌اند. چارچوب‌های قانونی و نظارتی مناسب، نقشی کلیدی در تسهیل گذار به اقتصاد چرخشی آب دارند (Koseoglu-Imer و همکاران، ۲۰۲۳). مدیریت یکپارچه منابع آب، رویکردی

است که به دنبال ایجاد هماهنگی بین تمام جنبه‌های چرخه آب شهری است. حکمرانی مشارکتی آب، زمینه مشارکت تمامی ذی‌نفعان در فرآیند تصمیم‌گیری را فراهم می‌آورد و منجر به تصمیمات بهتر و پذیرش اجتماعی بیشتر می‌شود (Tsatsou و همکاران، ۲۰۲۳).

جدول ۷- مؤلفه‌ها و شاخص‌های بُعد استراتژی‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری

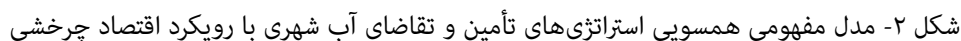
مؤلفه‌ها	شاخص‌ها	معیار سنجش/عملیاتی‌سازی
برنامه‌ریزی استراتژیک	برنامه‌های توسعه پایدار	وجود سند راهبردی ۲۰۱۰-۲۰ ساله آب شهری (بله/خیر)
	تصمیم‌گیری استراتژیک	تعداد جلسات کمیته راهبردی آب در سال
	آینده‌نگری در منابع آب	وجود مطالعات سناریونویسی برای افق ۲۰۴۰ (بله/خیر)
مدیریت ریسک و بحران	ارزیابی ریسک	تعداد ارزیابی‌های ریسک آبی انجام شده در سال
	مدیریت بحران کم‌آبی	وجود طرح مدیریت بحران خشکسالی (بله/خیر)
	تاب‌آوری سیستم‌های آبی	شاخص تاب‌آوری آب شهری (۱۰۰-۰)
چارچوب‌های قانونی و نظارتی	برنامه‌های اضطراری	تعداد تمرین‌های شبیه‌سازی بحران آبی در سال
	استانداردسازی	درصد انطباق با استانداردهای ملی و بین‌المللی (%)
	سیاست‌های آب شهری	تعداد سیاست‌نامه‌های مصوب اقتصاد چرخشی آب
مدیریت یکپارچه	مقررات حمایتی	تعداد آیین‌نامه‌های حمایتی برای بازچرخانی آب
	ضمانت‌های اجرایی	وجود مکانیزم نظارت و پایش اجرای قوانین (بله/خیر)
	همگرایی سیاست‌ها	تعداد جلسات هماهنگی بین‌بخشی در سال
سیاست‌های تشویقی	مدیریت جامع منابع آب	وجود کمیته یکپارچه‌سازی مدیریت آب (بله/خیر)
	یکپارچه‌سازی سیستم‌ها	درصد یکپارچگی سیستم‌های اطلاعاتی آب (%)
	مشوق‌های مالیاتی	میزان معافیت مالیاتی برای پروژه‌های چرخشی (میلیارد ریال)
همسویی با اهداف توسعه پایدار	جوایز صرفه‌جویی	تعداد برندگان جوایز ملی صرفه‌جویی آب در سال
	یارانه‌های سبز	حجم بودجه یارانه پروژه‌های سبز آب (میلیارد ریال)
	پاداش‌های محلی	تعداد شهرداری‌های دریافت‌کننده پاداش مدیریت پایدار آب
حکمرانی مشارکتی آب	انطباق با شاخص‌های SDG	درصد تحقق هدف SDG (آب پاک و بهداشت) (%)
	برنامه‌های ملی آب	درصد اجرای برنامه ملی مدیریت جامع آب (%)
	همسویی با تعهدات بین‌المللی	تعداد گزارش‌های ملی ارسالی به مجامع بین‌المللی در سال
شفافیت در مدیریت منابع	نظام تصمیم‌گیری مشارکتی	درصد تصمیمات اتخاذ شده با مشارکت ذی‌نفعان (%)
	پاسخگویی نهادی	تعداد گزارش‌های عملکرد شفاف منتشر شده در سال
		وجود پرتال اطلاعات آب برای دسترسی عموم (بله/خیر)

بُعد "استراتژی‌های مشارکت و همکاری ذی‌نفعان" شامل ۲ مؤلفه و ۵ شاخص است که در جدول (۸) ارائه شده‌اند. آموزش و آگاه‌سازی، زمینه‌ساز تغییر در رفتار مصرفی و پذیرش اجتماعی راهکارهای نوین مانند بازچرخانی آب است (Savari و همکاران، ۲۰۲۱). همکاری‌های بین‌بخشی، امکان استفاده از ظرفیت‌های تمامی بخش‌ها از جمله دولت، بخش خصوصی،

دانشگاه‌ها و سازمان‌های مردم‌نهاد را فراهم می‌آورد (Al-Saidi و همکاران، ۲۰۲۱).

بر اساس یافته‌های پژوهش، مدل مفهومی همسویی استراتژی‌های تأمین و تقاضای آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی در شکل (۲) ارائه شده است.

مؤلفه‌ها	شاخص‌ها	معیار سنجش/عملیاتی‌سازی
آموزش و آگاه‌سازی	برنامه‌های آموزشی	تعداد ساعات آموزش عمومی در سال
	کمپین‌های رسانه‌ای	درصد کاهش سرانه مصرف پس از کمپین (%)
همکاری‌های بین‌بخشی	آموزش مدارس	تعداد دانش‌آموزان شرکت‌کننده در برنامه‌های آموزش آب
	مشارکت عمومی-خصوصی	تعداد قراردادهای PPP منعقد شده در حوزه آب
	تعامل بین سازمانی	تعداد جلسات هماهنگی بین‌سازمانی در سال



این مدل نشان دهنده تعاملات پیچیده و چندجانبه بین پنج بُعد اصلی است. ماهیت روابط بین ابعاد به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱) روابط علی (تأثیرگذاری مستقیم): استراتژی‌های مدیریت منابع و زیرساخت‌ها (جنبه تأمین) و استراتژی‌های مدیریت تقاضا و مصرف (جنبه تقاضا) به طور مستقیم بر استراتژی‌های اقتصاد چرخشی تأثیر می‌گذارند. به عنوان مثال بهبود زیرساخت‌های توزیع (کاهش نشت) منجر به افزایش کارایی سیستم می‌شود که زمینه بازچرخانی آب را تسهیل می‌کند. همچنین، کاهش مصرف از طریق مدیریت تقاضا، فشار بر منابع را کاهش داده و امکان تخصیص آب بازیافتی را افزایش می‌دهد (Rodrigues و همکاران، ۲۰۲۴).

۲) روابط تسهیل‌کننده (زمینه‌سازی): استراتژی‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری و استراتژی‌های مشارکت ذی‌نفعان نقش تسهیل‌کننده و زمینه‌ساز دارند. این ابعاد به طور مستقیم منابع آب را تولید یا مصرف نمی‌کنند، اما چارچوب‌های قانونی، مالی، و اجتماعی لازم برای اجرای موفق سه بُعد دیگر را فراهم می‌آورند. به عنوان مثال وجود قوانین حمایتی برای بازچرخانی آب و مشارکت عمومی-خصوصی، پیاده‌سازی استراتژی‌های اقتصاد چرخشی را تسهیل می‌کند (Koseoglu-Imer و همکاران، ۲۰۲۳).

۳) روابط بازخوردی (اثر دوطرفه): بین استراتژی‌های اقتصاد چرخشی و دو بُعد تأمین و تقاضا، ارتباط بازخوردی وجود دارد. بازچرخانی و استفاده مجدد از پساب، هم منابع تأمین را افزایش می‌دهد (بازخورد به جنبه تأمین) و هم با جایگزینی آب تازه با آب بازیافتی، مصرف آب با کیفیت بالا را کاهش می‌دهد (بازخورد به جنبه تقاضا). این حلقه بازخورد مثبت، چرخه بسته آب را تقویت کرده و به همسویی دینامیک بین تأمین و تقاضا منجر می‌شود (Smol و همکاران، ۲۰۲۰).

بحث و تحلیل یافته‌ها

بررسی ابعاد پنج‌گانه مدل همسویی استراتژی‌های تأمین و تقاضای آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی نشان می‌دهد که این مدل، جنبه‌های مختلف مدیریت آب شهری را پوشش می‌دهد و چارچوبی جامع برای ایجاد همسویی بین استراتژی‌های تأمین و تقاضا فراهم می‌آورد.

بُعد استراتژی‌های مدیریت منابع و زیرساخت‌ها، بر جنبه تأمین آب تمرکز دارد و با بهینه‌سازی منابع و زیرساخت‌های موجود و توسعه زیرساخت‌های سبز، به دنبال افزایش پایداری و کارایی سیستم آب شهری است. این یافته با مطالعات پیشین (Fu و همکاران، ۲۰۲۳؛ Stefanakis، ۲۰۱۹) همسو است که بر اهمیت مدیریت یکپارچه زیرساخت‌ها و توسعه زیرساخت‌های سبز در مدیریت پایدار آب شهری تأکید کرده‌اند.

بُعد استراتژی‌های اقتصاد چرخشی، قلب مدل همسویی را تشکیل می‌دهد و با تمرکز بر بازچرخانی، بازیافت و استفاده مجدد از آب، و همچنین بازیابی منابع و انرژی از فاضلاب، پل

ارتباطی بین استراتژی‌های تأمین و تقاضا ایجاد می‌کند. این یافته با نتایج مطالعات Smol و همکاران (۲۰۲۰) و Fernandes و Cunha Marques (۲۰۲۳) همخوانی دارد که بر نقش کلیدی اقتصاد چرخشی در ایجاد تعادل بین منابع و مصارف آب تأکید کرده‌اند.

بُعد استراتژی‌های مدیریت تقاضا و مصرف، بر جنبه تقاضای آب تمرکز دارد و با تحلیل الگوهای مصرف، بهینه‌سازی مصرف، مدیریت پیک تقاضا و سیاست‌های قیمت‌گذاری، به دنبال کاهش و بهینه‌سازی مصرف آب است. این یافته با مطالعات پیشین (Shahangian و همکاران، ۲۰۲۲؛ Santos و همکاران، ۲۰۲۳) همسو است که بر اهمیت مدیریت تقاضا در کنار مدیریت منابع تأکید کرده‌اند.

بُعد استراتژی‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری، چارچوب قانونی و نهادی لازم برای حمایت از استراتژی‌های سه‌گانه فوق را فراهم می‌آورد. اهمیت این بُعد در مطالعات پیشین (Kyriakopoulos، ۲۰۲۳؛ Koseoglu-Imer و همکاران، ۲۰۲۳) نیز مورد تأکید قرار گرفته است که نشان می‌دهد بدون چارچوب‌های قانونی و نهادی مناسب، گذار به اقتصاد چرخشی آب با موانع جدی مواجه خواهد شد.

بُعد استراتژی‌های مشارکت و همکاری ذی‌نفعان، زمینه مشارکت و همکاری تمامی بازیگران را در فرآیند مدیریت آب شهری فراهم می‌کند. اهمیت این بُعد در مطالعات پیشین (Savari و همکاران، ۲۰۲۱؛ Velenturf و همکاران، ۲۰۱۸) نیز مورد تأکید قرار گرفته است که نشان می‌دهد مشارکت ذی‌نفعان، کلید موفقیت در گذار به اقتصاد چرخشی آب است.

مدل ارائه شده در این پژوهش، چارچوبی جامع برای ایجاد همسویی بین استراتژی‌های تأمین و تقاضای آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی فراهم می‌آورد. این همسویی از طریق سه مکانیزم اصلی ایجاد می‌شود:

- ایجاد چرخه‌های بسته: استراتژی‌های اقتصاد چرخشی با تمرکز بر بازچرخانی و استفاده مجدد از آب، چرخه‌های بسته‌ای ایجاد می‌کنند که در آن، آب پس از مصرف دوباره وارد چرخه تأمین می‌شود. این چرخه‌های بسته، پل ارتباطی بین جنبه‌های تأمین و تقاضا ایجاد می‌کنند و منجر به کاهش فشار بر منابع آبی می‌شوند (Smol و همکاران، ۲۰۲۰).

- بهینه‌سازی هم‌زمان منابع و مصارف: مدل ارائه شده، بر بهینه‌سازی هم‌زمان منابع (از طریق استراتژی‌های مدیریت منابع و زیرساخت‌ها) و مصارف (از طریق استراتژی‌های مدیریت تقاضا و مصرف) تأکید دارد. این رویکرد یکپارچه، منجر به افزایش کارایی کل سیستم آب شهری می‌شود و از اتلاف منابع جلوگیری می‌کند (Rodrigues و همکاران، ۲۰۲۴).

- ایجاد چارچوب‌های حمایتی: استراتژی‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری و استراتژی‌های مشارکت و همکاری ذی‌نفعان، چارچوب‌های حمایتی لازم برای تسهیل

همسویی بین استراتژی‌های تأمین و تقاضا را فراهم می‌آورند. این چارچوب‌ها شامل ابزارهای قانونی، نهادی، مالی و اجتماعی هستند که بستر لازم برای گذار به اقتصاد چرخشی آب را ایجاد می‌کنند (Koseoglu-Imer و همکاران، ۲۰۲۳).

برای تبیین دقیق‌تر نوآوری‌ها و مزایای مدل پیشنهادی، مقایسه‌ای جامع با مدل‌های پیشین در جدول ۹ ارائه شده است.

مدل پیشنهادی در این پژوهش دارای چهار مزیت اصلی نسبت به مطالعات پیشین است: ۱) درحالی‌که مطالعات پیشین بیشتر بر یک یا دو بُعد (مانند فنی-زیرساختی یا اقتصادی) تمرکز داشتند، مدل حاضر پنج بُعد کلیدی را به صورت یکپارچه پوشش می‌دهد و همسویی بین آنها را محور قرار داده است؛ ۲) شاخص‌های این مدل برخلاف شاخص‌های کیفی و کلی مطالعات پیشین، دارای معیارهای کمی و قابل اندازه‌گیری هستند که امکان سنجش عملکرد و مقایسه بین شهرها را فراهم می‌آورند؛ ۳) این پژوهش با ارائه تحلیل هزینه-فایده، معرفی مدل‌های کسب‌وکار مشخص، و تبیین ابزارهای مالی نوین، خلأ جدی مطالعات پیشین در زمینه جنبه‌های اقتصادی اقتصاد چرخشی آب را پر کرده است و ۴) باتوجه به چالش‌های خاص ایران (کمبود شدید آب، فرسودگی زیرساخت‌ها، محدودیت منابع مالی)، مدل به گونه‌ای طراحی

شده که با شرایط محلی سازگار باشد و درعین حال قابلیت تعمیم به سایر کشورهای منطقه را داشته باشد. یکی از جنبه‌های حیاتی در پیاده‌سازی مدل همسویی، ارزیابی اقتصادی استراتژی‌ها از منظر هزینه-فایده و بازگشت سرمایه است. بر اساس مرور پژوهش‌های انجام شده، استراتژی‌های مختلف مدل دارای ساختارهای اقتصادی متفاوتی هستند که در جدول ۱۰ خلاصه شده‌اند.

با اولویت‌بندی اقتصادی استراتژی‌ها بر اساس تحلیل هزینه-فایده، استراتژی‌ها به سه دسته قابل تقسیم‌اند:

الف) استراتژی‌های با اولویت بالا: شامل قیمت‌گذاری پلکانی، کمپین‌های آموزشی، و مدیریت نشت که با هزینه پایین و بازگشت سرمایه سریع، می‌توانند در کوتاه‌مدت نتایج قابل توجهی ایجاد کنند (Dehnavi و Al-Saidi، ۲۰۱۹).

ب) استراتژی‌های با اولویت متوسط: شامل هوشمندسازی شبکه، جمع‌آوری آب باران، و بازچرخانی آب خاکستری که با هزینه متوسط و دوره بازگشت سرمایه ۳-۷ سال، منافع اقتصادی و محیط‌زیستی قابل توجهی دارند (Silva، ۲۰۲۳؛ Fu و همکاران، ۲۰۲۳).

ج) استراتژی‌های با اولویت بلندمدت: شامل تصفیه متمرکز پساب، بازیابی مواد مغذی، و تولید بیوگاز که نیازمند سرمایه‌گذاری بالا و دوره بازگشت سرمایه طولانی‌تر هستند، اما در بلندمدت پایداری اقتصادی و محیط‌زیستی بالایی ایجاد می‌کنند (Guerra-Rodríguez و همکاران، ۲۰۲۰).

جدول ۹- مقایسه تطبیقی مدل پیشنهادی با مطالعات پیشین

معیار مقایسه	Smol و همکاران (۲۰۲۰)	Kakwani و Kalbar (۲۰۲۴)	Cunha و Fernandes Marques (۲۰۲۳)	Santos و همکاران (۲۰۲۳)	مدل پیشنهادی (پژوهش حاضر)
تعداد ابعاد	۵ حوزه فنی	۳ حوزه	۱ حوزه (بازاستفاده)	۲ حوزه	۵ بُعد یکپارچه
پوشش جنبه اقتصادی	محدود	محدود	متوسط	ضعیف	جامع و تفصیلی
پوشش جنبه تأمین	قوی	متوسط	ضعیف	ضعیف	قوی
پوشش جنبه تقاضا	ضعیف	متوسط	ضعیف	متوسط	قوی
همسویی تأمین-تقاضا	X	جزئی	X	X	✓محوری
سیاست‌گذاری و حکمرانی	محدود	X	X	جزئی	جامع (۷ مؤلفه)
مشارکت ذینفعان	جزئی	X	X	قوی	جامع (۴ مؤلفه)
عملیاتی‌سازی شاخص‌ها	کیفی	نیمه کمی	کیفی	کیفی	کمی و قابل سنجش
ابزارهای اقتصادی	محدود	X	محدود	X	تفصیلی (Green، PPP، Bonds، تعرفه)
مدل‌های کسب‌وکار	کلی	X	X	X	مشخص (BOT، ESCO، بازار آب)
تحلیل هزینه-فایده	X	جزئی	محدود	X	✓جامع
مدل مفهومی روابط	X	خطی	X	X	✓با تبیین روابط علی
تطبیق با شرایط ایران	X	X	X	X	✓باتوجه به چالش‌های محلی
قلمرو جغرافیایی	اروپا	هند	عمومی	عمومی	ایران (قابل تعمیم)
نوع پژوهش	مروری	کمی (AHP)	مروری	میدانی	کیفی (تحلیل مضمون)

جدول ۱۰- تحلیل اقتصادی استراتژی‌های کلیدی مدل

منبع	منافع اقتصادی	دوره بازگشت سرمایه (ROI)	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	استراتژی
Cunha و Fernandes Marques (۲۰۲۳)	کاهش ۲۰-۳۰٪ هزینه تامین آب تازه	۵-۱۰ سال	متوسط تا بالا	بازچرخانی و استفاده مجدد از پساب
Fu و همکاران (۲۰۲۳)	کاهش ۱۵-۲۵٪ هدررفت آب	۳-۷ سال	متوسط	هوشمندسازی شبکه توزیع
Silva (۲۰۲۳)	کاهش ۱۰-۲۰٪ تقاضای آب شهری	۲-۵ سال	پایین تا متوسط	جمع‌آوری آب باران
Guerra-Rodríguez و همکاران (۲۰۲۰)	درآمدزایی از فروش انرژی + کاهش هزینه تصفیه	۷-۱۲ سال	بالا	بازیابی انرژی از پساب
Dehnavi و Al-Saidi (۲۰۱۹)	افزایش ۱۰-۱۵٪ درآمد + کاهش مصرف	فوری	بدون هزینه اضافی	قیمت‌گذاری پلکانی
Al-Saidi و همکاران (۲۰۲۱)	جذب سرمایه بخش خصوصی + انتقال فناوری	متغیر	بدون بار مالی دولت	مشارکت عمومی- خصوصی (PPP)

چالش‌های اقتصادی در ایران شامل پایین بودن تعرفه آب (که انگیزه کافی برای صرفه‌جویی ایجاد نمی‌کند)، محدودیت منابع مالی دولتی برای سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها، و ضعف در جذب سرمایه‌گذاری بخش خصوصی به دلیل موانع قانونی و نهادی است ([Karimi Alavijeh و همکاران، ۲۰۲۱](#)). بنابراین، اصلاح نظام قیمت‌گذاری، ایجاد مشوق‌های مالی برای سرمایه‌گذاری خصوصی، و توسعه ابزارهای مالی نوین، پیش‌نیازهای اساسی برای گذار به اقتصاد چرخشی آب در ایران هستند.

یکی از تحولات بنیادین در مدیریت آب شهری، تغییر از رویکردهای سنتی منبع‌محور به رویکردهای چرخشی است. جدول (۱۱) مقایسه‌ای جامع بین این دو رویکرد از منظر اقتصادی ارائه می‌دهد.

مدل‌های تامین مالی برای اجرای استراتژی‌های اقتصاد چرخشی آب، ابزارهای مالی نوینی مورد نیاز است. مشارکت عمومی-خصوصی (PPP) با مدل‌های BOT (ساخت-بهره‌برداری-واگذاری) و BOO (ساخت-مالکیت-بهره‌برداری) می‌تواند بار مالی را از دولت برداشته و سرمایه‌گذاری بخش خصوصی را جذب کند ([Al-Saidi و همکاران، ۲۰۲۱](#)). همچنین، اوراق سبز به عنوان ابزاری نوین برای تامین مالی پروژه‌های پایدار، در کشورهای پیشرو مورد استفاده قرار گرفته و می‌تواند الگویی برای ایران باشد ([Han و همکاران، ۲۰۲۰](#)). مدل ESCO (شرکت‌های خدمات انرژی) نیز برای پروژه‌های بهینه‌سازی مصرف آب و انرژی، مدل مالی مناسبی است که در آن بخش خصوصی سرمایه‌گذاری می‌کند و از صرفه‌جویی ایجاد شده سود می‌برد ([Smol و همکاران، ۲۰۲۰](#)).

جدول ۱۱- مقایسه هزینه-فایده رویکردهای سنتی و چرخشی در تأمین آب

معیار	رویکردهای سنتی	رویکردهای چرخشی	منبع
نمک‌زدایی آب دریا			
هزینه سرمایه‌گذاری	۳۰۰۰ - ۵۰۰۰ دلار/مترمکعب در روز	-	Koseoglu-Imer و همکاران (۲۰۲۳)
هزینه بهره‌برداری	۰/۵ - ۱/۵ دلار/مترمکعب	-	
مصرف انرژی	۳ - ۴ کیلووات ساعت/مترمکعب	-	
انتقال بین حوضه‌ای			
هزینه سرمایه‌گذاری	۲۰۰۰ - ۴۰۰۰ دلار/مترمکعب در روز	-	Nazemi و همکاران (۲۰۲۰)
هزینه بهره‌برداری	۰/۳ - ۰/۸ دلار/مترمکعب	-	
آسیب‌های محیط‌زیستی	بسیار بالا (تخریب اکوسیستم)	-	
بازچرخانی پساب			
هزینه سرمایه‌گذاری	-	۸۰۰ - ۱۵۰۰ دلار/مترمکعب در روز	Fernandes و Cunha Marques (۲۰۲۳)
هزینه بهره‌برداری	-	۰/۲ - ۰/۵ دلار/مترمکعب	
مصرف انرژی	-	۰/۵ - ۱/۵ کیلووات ساعت/مترمکعب	
جمع‌آوری آب باران			
هزینه سرمایه‌گذاری	-	۳۰۰ - ۷۰۰ دلار/مترمکعب در روز	Silva (۲۰۲۳)
هزینه بهره‌برداری	-	۰/۵ - ۱/۵ دلار/مترمکعب	
مصرف انرژی	-	تقریباً صفر (جاذبه‌ای)	
منافع جانبی			
زیست‌محیطی	منفی (انتشار کربن، تخریب محیط)	مثبت (کاهش آلودگی، حفظ منابع)	Smol و همکاران (۲۰۲۰)
اجتماعی	محدود	بالا (اشتغال‌زایی، مشارکت محلی)	
انعطاف‌پذیری	پایین (وابستگی به منابع خاص)	بالا (تنوع منابع)	

آب و فاضلاب و سازمان‌های متولی مدیریت منابع آبی استفاده شود. ابعاد، مؤلفه‌ها و شاخص‌های مدل، راهنمای مناسبی برای تدوین استراتژی‌های جامع و یکپارچه در مدیریت آب شهری هستند. همچنین، می‌تواند به عنوان چارچوبی برای ارزیابی وضعیت موجود سیستم‌های آب شهری از منظر اقتصاد چرخشی و شناسایی نقاط قوت و ضعف استفاده شود. این ارزیابی می‌تواند به شناسایی شکاف‌های موجود و اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی کمک کند. شاخص‌های ارائه شده در مدل می‌توانند به عنوان مبنایی برای تعریف شاخص‌های عملکردی کلیدی (KPIs) در سیستم‌های مدیریت عملکرد استفاده شوند. این شاخص‌ها امکان سنجش پیشرفت در مسیر گذار به اقتصاد چرخشی آب را فراهم می‌آورند.

علاوه‌براین، مدل ارائه شده می‌تواند به عنوان چارچوبی برای آموزش و توانمندسازی متخصصان حوزه آب شهری استفاده شود. این آموزش‌ها می‌توانند به افزایش آگاهی و دانش متخصصان در زمینه اقتصاد چرخشی آب و راهکارهای ایجاد همسویی بین استراتژی‌های تأمین و تقاضا کمک کنند. همچنین، می‌تواند به عنوان زبان مشترکی برای گفتگو و همکاری بین ذی‌نفعان مختلف شامل شرکت‌های آب و فاضلاب، شهرداری‌ها، سازمان‌های محیط‌زیستی، بخش خصوصی و جامعه مدنی استفاده شود. این زبان مشترک، امکان هماهنگی و همکاری بهتر بین ذی‌نفعان را فراهم می‌آورد.

باتوجه‌به چالش‌های روزافزون کمبود آب در ایران، مدل ارائه شده می‌تواند چارچوب مناسبی برای بازنگری در رویکردهای

بر اساس جدول ۱۱) رویکردهای چرخشی از مزایای اقتصادی قابل توجهی نسبت به رویکردهای سنتی برخوردارند. بازچرخانی پساب با هزینه سرمایه‌گذاری ۵۰-۷۰٪ کمتر از نمک‌زدایی و هزینه بهره‌برداری ۶۰-۷۰٪ پایین‌تر، گزینه‌ای اقتصادی‌تر است ([Cunha Marques و Fernandes](#), ۲۰۲۳). همچنین جمع‌آوری آب باران با هزینه سرمایه‌گذاری بسیار پایین و تقریباً بدون هزینه انرژی، کم‌هزینه‌ترین گزینه محسوب می‌شود ([Silva](#), ۲۰۲۳). از منظر محیط‌زیستی، رویکردهای سنتی معمولاً دارای ردپای کربنی بالا و آسیب‌های اکولوژیکی قابل توجهی هستند، درحالی‌که رویکردهای چرخشی علاوه بر کاهش فشار بر منابع طبیعی، به کاهش آلودگی و حفظ اکوسیستم‌ها نیز کمک می‌کنند ([Smol](#) و همکاران، ۲۰۲۰). در زمینه انعطاف‌پذیری نیز، تنوع منابع در رویکردهای چرخشی (آب باران، پساب بازیافتی، آب خاکستری) تاب‌آوری سیستم را در برابر خشکسالی و بحران‌های آبی افزایش می‌دهد. در ایران، باتوجه‌به هزینه بالای انرژی و محدودیت منابع مالی، تغییر رویکرد از استراتژی‌های سنتی پرهزینه به رویکردهای چرخشی می‌تواند منافع اقتصادی قابل توجهی به همراه داشته باشد. به‌عنوان مثال جایگزینی یک طرح انتقال بین حوضه‌ای با ترکیبی از بازچرخانی پساب (۵۰٪)، جمع‌آوری آب باران (۳۰٪)، و کاهش تقاضا (۲۰٪) می‌تواند هزینه‌های سرمایه‌گذاری را تا ۶۰٪ کاهش دهد و در عین حال پایداری بیشتری ایجاد کند.

مدل ارائه شده در این پژوهش می‌تواند کاربردهای متعددی در مدیریت آب شهری ایران داشته باشد. این مدل می‌تواند به عنوان چارچوبی برای برنامه‌ریزی استراتژیک در شرکت‌های

مدیریت آب شهری و حرکت به سمت مدل‌های پایدارتر فراهم آورد. مطالعات پیشین (Karimi Alavijeh و همکاران، ۲۰۲۱؛ Ardalan و همکاران، ۲۰۱۸) نشان داده‌اند که رویکرد فعلی مدیریت آب در ایران، هنوز تا حد زیادی بر افزایش منابع تأمین متمرکز است و توجه کافی به مدیریت تقاضا و اقتصاد چرخشی نمی‌شود. بنابراین، مدل این پژوهش می‌تواند به عنوان راهنمایی برای تغییر این رویکرد و حرکت به سمت مدیریت یکپارچه و پایدار آب شهری عمل کند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش با هدف طراحی چارچوبی برای همسویی استراتژی‌های تأمین و تقاضای آب شهری با رویکرد اقتصاد چرخشی انجام شد. با استفاده از روش تحلیل مضمون، ۹۱ مقاله علمی منتشر شده در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ بررسی شد و یک مدل پنج‌بعدی شامل ۲۶ مؤلفه و ۶۲ شاخص عملیاتی استخراج شد.

یافته‌های پژوهش نشان داد همسویی استراتژیک بین تأمین و تقاضای آب شهری در بستر اقتصاد چرخشی، نیازمند توجه هم‌زمان به پنج بُعد اصلی است: استراتژی‌های مدیریت منابع و زیرساخت‌ها (جنبه تأمین)، استراتژی‌های اقتصاد چرخشی (پل ارتباطی)، استراتژی‌های مدیریت تقاضا و مصرف (جنبه تقاضا)، استراتژی‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری (چارچوب حمایتی قانونی) و استراتژی‌های مشارکت و همکاری ذی‌نفعان (چارچوب حمایتی اجتماعی). در این مدل، استراتژی‌های اقتصاد چرخشی نقش محوری در ایجاد همسویی ایفا می‌کنند؛ به گونه‌ای که با تمرکز بر بازچرخانی، بازیافت و استفاده مجدد از آب و همچنین بازیابی منابع و انرژی از فاضلاب، چرخه‌های بسته‌ای ایجاد می‌کنند که در آنها، آب پس از مصرف دوباره وارد چرخه تأمین می‌شود و از اتلاف منابع جلوگیری می‌کند.

مقایسه مدل پیشنهادی با مطالعات پیشین نشان داد که این مدل از چهار مزیت اصلی برخوردار است: جامعیت و یکپارچگی (پوشش هم‌زمان پنج بُعد کلیدی)، عملیاتی‌سازی کامل شاخص‌ها (ارائه معیارهای قابل اندازه‌گیری)، تمرکز ویژه بر ابعاد اقتصادی (ارائه تحلیل هزینه-فایده، مدل‌های کسب‌وکار، و ابزارهای مالی)، و تطبیق با شرایط خاص ایران (توجه به چالش‌های کمبود آب، فرسودگی زیرساخت‌ها، و محدودیت منابع مالی). تحلیل اقتصادی نشان داد رویکردهای چرخشی مانند بازچرخانی پساب و جمع‌آوری آب باران با هزینه سرمایه‌گذاری ۵۰-۸۰٪ کمتر و هزینه بهره‌برداری ۹۰-۶۰٪ پایین‌تر نسبت به رویکردهای سنتی مانند نمک‌زدایی و انتقال بین‌حوضه‌ای، گزینه‌های اقتصادی‌تری محسوب می‌شوند و در عین حال منافع محیط‌زیستی و اجتماعی بیشتری دارند.

بر اساس یافته‌های پژوهش، پیاده‌سازی موفق مدل نیازمند اقدامات هماهنگ در سه افق زمانی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت است. در افق کوتاه‌مدت (۱-۲ سال)، اولویت اصلی

باید بر اقداماتی باشد که با هزینه پایین و بازگشت سرمایه سریع، نتایج ملموسی ایجاد کنند. اصلاح نظام قیمت‌گذاری آب از طریق اجرای تعرفه پلکانی با شیب تند، راه‌اندازی برنامه‌های پاداش صرفه‌جویی برای مشترکین کم‌مصرف و اجرای پروژه‌های پایلوت بازچرخانی آب در محله‌های نمونه از جمله این اقدامات هستند. هم‌زمان، تدوین و اصلاح قوانین و مقررات حمایتی برای تسهیل مشارکت بخش خصوصی و جذب سرمایه‌گذاری در پروژه‌های اقتصاد چرخشی ضروری است.

در افق میان‌مدت (۳-۵ سال)، تمرکز باید بر توسعه زیرساخت‌ها و ابزارهای مالی نوین باشد. توسعه مدل‌های مشارکت عمومی-خصوصی (PPP) با قراردادهای بلندمدت BOT یا BOO برای پروژه‌های هوشمندسازی شبکه، بازچرخانی پساب، و بازیابی انرژی می‌تواند بار مالی را از دولت برداشته و منابع مالی بخش خصوصی را جذب کند. انتشار اوراق قرضه سبز به عنوان ابزار نوین تأمین مالی برای پروژه‌های پایدار آب، تجربه موفق است که در کشورهای پیشرو اجرا شده و می‌تواند الگویی برای ایران باشد. همچنین، سرمایه‌گذاری در بازسازی و هوشمندسازی شبکه‌های توزیع با هدف کاهش هدررفت به زیر ۲۰ درصد، یکی از اولویت‌های اصلی این دوره است.

در افق بلندمدت (۵-۱۰ سال)، هدف باید تحول بنیادین در نظام مدیریت آب شهری و نهادینه‌سازی اقتصاد چرخشی باشد. ایجاد بازار تجارت حقایق برای خرید و فروش آب بین بخش‌های مختلف، توسعه سیستم‌های متمرکز بازچرخانی با قابلیت بازیافت آب، انرژی، و مواد مغذی، و نهادینه‌سازی مدل شرکت‌های خدمات انرژی و آب (ESCO) از جمله اقدامات کلیدی این دوره هستند. برای تحقق این اهداف، ایجاد ساختاری یکپارچه برای هماهنگی بین سازمان‌های مختلف درگیر در مدیریت آب شهری، تدوین استراتژی‌های ملی و منطقه‌ای برای گذار به اقتصاد چرخشی آب، و تقویت ظرفیت نهادی و فنی شرکت‌های آب و فاضلاب ضروری است.

علاوه بر اقدامات فوق، جلب مشارکت فعال ذی‌نفعان در تمامی مراحل برنامه‌ریزی، پیاده‌سازی، و ارزیابی از عوامل کلیدی موفقیت است. اجرای برنامه‌های آموزشی و آگاه‌سازی عمومی برای افزایش آگاهی درباره اهمیت مدیریت پایدار آب و مزایای اقتصاد چرخشی، توانمندسازی جوامع محلی برای مشارکت در پروژه‌های کوچک‌مقیاس بازچرخانی، و ایجاد کانال‌های ارتباطی مؤثر بین شهروندان و شرکت‌های آب برای دریافت بازخورد و افزایش شفافیت از جمله اقدامات مورد نیاز در این زمینه است. همچنین، توسعه همکاری‌های بین‌بخشی بین دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی، بخش خصوصی، و سازمان‌های دولتی می‌تواند به انتقال دانش، توسعه فناوری‌های بومی، و افزایش ظرفیت نوآوری کمک کند.

این پژوهش با محدودیت‌هایی مواجه بوده است که باید در تفسیر یافته‌ها مدنظر قرار گیرند. ۱- این پژوهش تنها بر مبنای مرور ادبیات و تحلیل مضمون انجام شده و فاقد اعتبارسنجی

ارائه راهکارهای انطباقی برای افزایش تاب‌آوری سیستم‌های آب شهری در برابر این چالش جهانی اهمیت ویژه‌ای دارد.

منابع

داوودی، سید میثم، و قضاوی، رضا. (۱۳۹۹). تعیین استراتژی‌های مدیریتی مناسب منابع آب حوضه آبریز شهری نطنز با استفاده از ماتریس SWOT. هیدروژئومورفولوژی، ۲۲(۶)، ۲۲۶-۱۰۵.

<https://doi.org/10.22034/hyd.2020.10811>

نظامی، نیما، تیز قدم غازانی، مصطفی، ضرغامی، مهدی و عباسی، مریم. (۱۴۰۲). توسعه یک مدل پویایی‌های سیستم به منظور ارتقای مدیریت پایدار آب شهری در شهر اصفهان، مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۱)، ۲۴-۱.

<https://doi.org/10.22093/wvwj.2022.338545.3252>

Abou Taleb, M., & Al Farooque, O. (2021). Towards a circular economy for sustainable development: An application of full cost accounting to municipal waste recyclables. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124047.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124047>

Al-Saidi, M., & Dehnavi, S. (2019). Comparative scorecard assessment of urban water pricing policies—The case of Jordan and Iran. *Water*, 11(4), 704. <https://doi.org/10.3390/w11040704>

Al-Saidi, M., Das, P., & Saadaoui, I. (2021). Circular economy in basic supply: Framing the approach for the water and food sectors of the Gulf Cooperation Council countries. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1273-1285.

<https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.004>

Ardalan, A., Khaleghy Rad, M., & Hadi, M. (2018). Urban water issues in the megacity of Tehran. *Urban Drought*, Springer, 263-288.

http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-8947-3_16

Braun, V., Clarke, V., & Terry, G. (2021). *Thematic Analysis: A Practical Guide*. SAGE Publications Limited.

<https://doi.org/10.1177/1035719X211058251>

Domenech, T., & Borrión, A. (2022). Embedding circular economy principles into urban regeneration and waste management: Framework and metrics. *Sustainability*, 14(3), 1293. <https://doi.org/10.3390/su14031293>

Feizizadeh, B., Ronagh, Z., Pourmoradian, S., Abedi Gheshlaghi, H., Lakes, T., & Blaschke, T. (2021). An efficient GIS-based approach for sustainability assessment of urban drinking water consumption patterns: A study in Tabriz city, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 64,

تجربی یا میدانی است؛ بنابراین، کارایی و اثربخشی مدل در شرایط واقعی هنوز آزمون نشده است. ۲- نبود داده‌های کمی دقیق درباره عملکرد فعلی شرکت‌های آب و فاضلاب ایران، امکان مقایسه وضع موجود با مدل پیشنهادی را محدود کرده است. ۳- محدودیت در پوشش زبان‌های مورد بررسی (فقط فارسی و انگلیسی) سبب شده است تا نتایج و یافته‌های پژوهش‌های منتشر شده به زبان‌های دیگر در این مرور لحاظ نگردند. ۴- تفاوت‌های قابل توجه بین شهرهای مختلف ایران از نظر اقلیم، جمعیت، توسعه‌یافتگی و منابع مالی ممکن است کاربردی‌پذیری برخی شاخص‌ها را در برخی زمینه‌ها محدود کند.

بر اساس یافته‌ها و محدودیت‌های این پژوهش، مسیرهای متعددی برای پژوهش‌های آینده وجود دارد. مهمترین اولویت، انجام مطالعات موردی میدانی در شهرهای نمونه با شرایط متفاوت برای اعتبارسنجی تجربی مدل و ارزیابی کارایی و اثربخشی آن در شرایط واقعی است. این مطالعات می‌توانند شامل مصاحبه با مدیران و متخصصان، پیمایش از شهروندان و تحلیل داده‌های عملکردی شرکت‌های آب باشند. توسعه سیستم وزن‌دهی و اولویت‌بندی شاخص‌ها با استفاده از روش‌های کمی مانند فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی یا فرآیند تحلیل شبکه‌ای می‌تواند به تعیین اهمیت نسبی شاخص‌ها در شرایط مختلف کمک کند. همچنین، طراحی یک شاخص ترکیبی چرخشی آب شهری که امکان سنجش سطح چرخشی بودن سیستم آب هر شهر و مقایسه بین شهرها را فراهم آورد، می‌تواند ابزار مفیدی برای ارزیابی پیشرفت و اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری‌ها باشد. از منظر روش‌شناختی، توسعه مدل‌های پویایی‌های سیستم برای شبیه‌سازی تعاملات پیچیده بین ابعاد پنج‌گانه مدل و پیش‌بینی تأثیرات بلندمدت اجرای استراتژی‌های مختلف می‌تواند به تصمیم‌گیری بهتر کمک کند. انجام مطالعات جامع هزینه-فایده، تحلیل حساسیت و ارزیابی ریسک مالی برای هر یک از استراتژی‌های مدل در شرایط مختلف اقتصادی نیز برای ارائه راهنمای عملیاتی به سرمایه‌گذاران و تصمیم‌گیران ضروری است. بررسی پذیرش اجتماعی و موانع فرهنگی پیش روی راهکارهای اقتصاد چرخشی، به ویژه بازچرخانی پساب، و طراحی استراتژی‌های ارتباطی و آموزشی مؤثر برای افزایش پذیرش عمومی از دیگر مسیرهای مهم پژوهشی است. مطالعات تطبیقی بین‌المللی برای مقایسه تجربیات کشورهای موفق در پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی آب با شرایط ایران و استخراج درس‌های کاربردی قابل انتقال نیز می‌تواند بسیار مفید باشد. همچنین، طراحی و پیاده‌سازی یک پلتفرم نرم‌افزاری تحت وب برای پایش مستمر شاخص‌های مدل، ارزیابی عملکرد شهرها، و تسهیم تجربیات موفق بین شرکت‌های آب و فاضلاب می‌تواند به نهادینه‌سازی مدل و تسهیل یادگیری سازمانی کمک کند. در نهایت، ارزیابی تأثیرات سناریوهای مختلف تغییرات اقلیمی بر عملکرد و پایداری استراتژی‌های مدل و

- <https://link.springer.com/article/10.1007/s40899-018-0219-7>
- Mukhopadhyay, R. (2025). Integrated Urban Water Management Plans. In *Urban Development with Treated Recycled and Reuse of Wastewater: Sustainable Management* (77-91). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-0857-7_6
- Nazari, B., Liaghat, A., Akbari, M. R., & Keshavarz, M. (2018). Irrigation water management in Iran: Implications for water use efficiency improvement. *Agricultural Water Management*, 208, 7-18. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.003>
- Nazemi, N., Foley, R. W., Louis, G., & Keeler, L. W. (2020). Divergent agricultural water governance scenarios: The case of Zayanderud basin, Iran. *Agricultural Water Management*, 229, 105921. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105921>
- Ranjbari, M., Saidani, M., Esfandabadi, Z. S., Peng, W., Lam, S. S., Aghbashlo, M., & Tabatabaei, M. (2021). Two decades of research on waste management in the circular economy: Insights from bibliometric, text mining, and content analyses. *Journal of Cleaner Production*, 314, 128009. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128009>
- Raoufi, A., & Gorji, M. (2021). Water and energy management in a sustainable site: A case study of a living environment for street children in Tehran, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 68, 102797. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102797>
- Rodrigues, P. M., Pinto, F. S., & Marques, R. C. (2024). A framework for enabling conditions for wastewater reuse. *Sustainable Production and Consumption*, 46, 355-366. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.022>
- Santos, E., Carvalho, M., & Martins, S. (2023). Sustainable water management: Understanding the socioeconomic and cultural dimensions. *Sustainability*, 15(17), 13074. <https://doi.org/10.3390/su151713074>
- Savari, M., Abdeslahi, A., Gharechae, 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>
- Schröder, P., Lemille, A., & Desmond, P. (2020). Making the circular economy work for human 102584. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2020.102584>
- Fernandes, E., & Cunha Marques, R. (2023). Review of water reuse from a circular economy perspective. *Water*, 15(5), 848. <https://doi.org/10.3390/w15050848>
- Fu, G., Sun, S., Hoang, L., Yuan, Z., & Butler, D. (2023). Artificial intelligence underpins urban water infrastructure of the future: A holistic perspective. *Cambridge Prisms: Water*, 1, e14. <http://dx.doi.org/10.1017/wat.2023.15>
- Guerra-Rodríguez, S., Oulego, P., Rodríguez, E., Singh, D. N., & Rodríguez-Chueca, J. (2020). Towards the implementation of circular economy in the wastewater sector: Challenges and opportunities. *Sustainability*, 12(3), 12345. <https://doi.org/10.3390/w12051431>
- Han, J., Heshmati, A., & Rashidghalam, M. (2020). Circular economy business models with a focus on servitization. *Sustainability*, 12(21), 8799. <https://doi.org/10.3390/su12218799>
- Kakwani, N., & Kalbar, P. (2024). Prioritization of strategies for urban water circular economy using water circularity indicator. *Journal of Cleaner Production*, 26(5), 480-505. <http://dx.doi.org/10.2166/wp.2024.233>
- Karimi Alavijeh, N., Fallahi, M., Ahmadi, M., Salehinia, N., & Dahl Larsen, N. (2021). Perspectives of current and future urban water security in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 321, 129004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129004>
- Koseoglu-Imer, D. Y., Oral, H. V., Calheiros, C. S. C., Krzeminski, P., Güçlü, S., Pereira, S. A., & Devolli, A. (2023). Current challenges and future perspectives for the full circular economy of water in European countries. *Journal of Environmental Management*, 345, 118627. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118627>
- Kyriakopoulos, G. L. (2023). Circular economy and sustainable strategies: Theoretical framework, policies and regulation challenges, barriers, and enablers for water management. In *Water Management and Circular Economy*, Elsevier, 197-230. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95280-4.00014-X>
- Mahdavinia, R., & Mokhtar, A. (2019). Dealing with sustainability in groundwater management using system dynamics approach: A case study in Iran. *Sustainable Water Resources Management*, 5(4), 1405-1417.

- economy: Perspectives from government partners. *Sustainability*, 10(5), 1401. <https://doi.org/10.3390/su10051401>
- Vinagre, V., Fidélis, T., & Luís, A. (2023). How can we adapt together? Bridging water management and city planning approaches to climate change. *Water*, 15(4), 715. <https://doi.org/10.3390/w15040715>
- Xiang, X., Li, Q., Khan, S., & Khalaf, O. I. (2021). Urban water resource management for sustainable environment planning using artificial intelligence techniques. *Environmental Impact Assessment Review*, 86, 106515. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106515>
- Xiong, Q., Wang, D., Shao, B., Yu, H., Wu, X., Lu, Y., & Xu, H. (2025). Unlocking Zero Liquid Discharge: A Parallel Water Supply Strategy to Realize Selective Salt Crystallization for Long-Term Interfacial Solar Evaporation. *Advanced Functional Materials*, 2409257. <https://doi.org/10.1002/adfm.202409257>
- Zamany, A., Khamseh, A., & Iranbanfard, S. (2024). Unveiling the landscape of High-Tech transfer in Industry 5.0: A text mining exploration. *Journal of AI and Data Mining*, 12(3), 369-392. <https://doi.org/10.22044/jadm.2024.14580.2558>
- development. *Resources, Conservation and Recycling*, 156, 104686. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104686>
- Shahangian, A., Tabesh, M., Yazdanpanah, M., Zobeidi, T., & Raoof, M. (2022). Promoting the adoption of residential water conservation behaviors as a preventive policy to sustainable urban water management. *Journal of Environmental Management*, 313, 115005. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115005>
- Silva, J. A. (2023). Water supply and wastewater treatment and reuse in future cities: A systematic literature review. *Water*, 15(17), 3064. <https://doi.org/10.3390/w15173064>
- Smol, M., Adam, C., & Preisner, M. (2020). Circular economy model framework in the European water and wastewater sector. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(3), 682-697. <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-019-00960-z>
- Soto-Rios, P. C., Nagabhatla, N., & Acevedo-Juárez, B. (2023). Circulatory pathways in the water and wastewater sector in the Latin American Region. *Water*, 15(6), 1092. <https://doi.org/10.3390/w15061092>
- Stefanakis, A. I. (2019). The role of constructed wetlands as green infrastructure for sustainable urban water management. *Sustainability*, 11(24), 6981. <https://doi.org/10.3390/su11246981>
- Tsatsou, A., Pergar, P., Frantzeskaki, N., Malamis, S., & Atanasova, N. (2023). Planning nature-based solutions for water management and circularity in Ljubljana, Slovenia: Examining how urban practitioners navigate barriers and perceive institutional readiness. *Urban Forestry & Urban Greening*, 89, 128090. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128090>
- Velenturf, A. P., Purnell, P., Tregent, M., Ferguson, J., & Holmes, A. (2018). Co-producing a vision and approach for the transition towards a circular

پی‌نوشت‌ها

- 1- Smart Water Management
- 2- Reduce
- 3- Reuse
- 4- Recycle
- 5- Recover
- 6- Redesign
- 7- European Commission Circular Economy Package
- 8- Green Bonds
- 9- Peak Factor

Document Type

Applied Article

پژوهش کاربردی

نوع مقاله

A Framework for Improving Water and Food Security Governance: Developing a Systemic Tool at the National Level

M. Hosseini

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

Email: mohammad.hosseini@mail.um.ac.ir

Received 19-08-2025
Revised 03-11-2025
Accepted 04-11-2025
Available online 16-03-2026

چارچوبی برای بهبود حکمرانی آب و امنیت غذایی: توسعه یک ابزار سیستمی در سطح ملی

محمد حسینی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

رایانامه: Mohammad.hosseini@mail.um.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۵/۲۸
تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۸/۱۲
تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۸/۱۳
تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

Abstract

Food security is a fundamental pillar of sustainable development, and its realization requires effective and accountable governance throughout the entire food supply chain. A review of previous national studies indicates that food security governance in the country has predominantly focused on improving productivity, while facing challenges such as weak conceptual definitions of food security, constraints on transparency and stakeholder engagement, and the absence of integrated policy mechanisms. Adopting a systems approach and employing system dynamics, this study proposes a conceptual framework as an innovative tool for analyzing and improving water and food governance. The framework enables the assessment of key institutions, their interrelationships, and the effectiveness of existing policies based on data and empirical evidence, thereby helping to identify institutional bottlenecks and develop corrective scenarios. The tool highlights the interdependence of food production on scarce water resources and underscores the need to link water and food governance. The results of implementing the current status scenario indicate that food availability exceeds 80%, while the access index varies between 60% and 90%. However, water extraction at a rate of 50% above sustainable levels highlights the unsustainability of production. Furthermore, with a daily food consumption of 4 kilograms, the nutritional health index fluctuates between 43% and 63%, indicating an unfavorable nutritional status. Overall, the focus of current policies on increasing production, without regard for nutritional health and resource sustainability, has placed the country's food security in a precarious position and led to the degradation of production resources. Therefore, the implementation of innovative approaches to enhance food security sustainability is essential.

Keywords: Sustainable Food Systems, Natural Resource Policy Making, Strategic Policy Instruments, Participatory Governance, Conceptual Framework.

چکیده

امنیت غذایی از ارکان بنیادین توسعه پایدار محسوب می‌شود و تحقق آن مستلزم حکمرانی مؤثر و پاسخ‌گو در سراسر زنجیره تأمین غذا است. بررسی مطالعات پیشین داخلی نشان می‌دهد که حکمرانی امنیت غذایی در کشور متمرکز بر بهبود بهره‌وری بوده و با چالش‌هایی مانند ضعف در تعریف مفهومی امنیت غذایی، محدودیت در شفافیت و مشارکت ذی‌نفعان و فقدان سازوکارهای سیاست‌گذاری یکپارچه مواجه است. پژوهش حاضر با رویکرد سیستمی و بهره‌گیری از پویایی سیستم‌ها، چارچوبی مفهومی را به عنوان ابزاری نوین برای تحلیل و بهبود حکمرانی آب و غذا ارائه می‌دهد. این چارچوب بر پایه داده‌ها و شواهد، امکان ارزیابی نهادهای کلیدی، روابط میان آن‌ها و میزان اثربخشی سیاست‌ها را فراهم می‌سازد و به شناسایی گلوگاه‌های نهادی و تدوین سناریوهای اصلاحی کمک می‌کند. اهمیت ابزار ارائه شده در برجسته‌سازی وابستگی تولید غذا به منابع محدود آب، ضرورت پیوند میان حکمرانی غذا و آب، است. نتایج اجرای سناریوی وضعیت حال حاضر نشان می‌دهد فراهمی غذا بیش از ۸۰ درصد و شاخص دسترسی بین ۶۰ تا ۹۰ درصد متغیر است، درحالی‌که برداشت ۵۰ درصد بیش از حد پایدار از منابع آبی، ناپایداری تولید را نمایان می‌کند. همچنین با مصرف روزانه ۴ کیلوگرم غذا، شاخص سلامت تغذیه بین ۴۳ تا ۶۳ درصد در نوسان بوده که بیانگر وضعیت نامطلوب تغذیه است. در مجموع، تمرکز سیاست‌های فعلی بر افزایش تولید، بدون توجه به سلامت تغذیه و پایداری منابع، امنیت غذایی کشور را در وضعیتی شکننده قرار داده و باعث تخریب منابع تولید شده است، لذا به‌کارگیری رویکردهای نوآورانه برای ارتقای پایداری امنیت غذایی ضروری است.

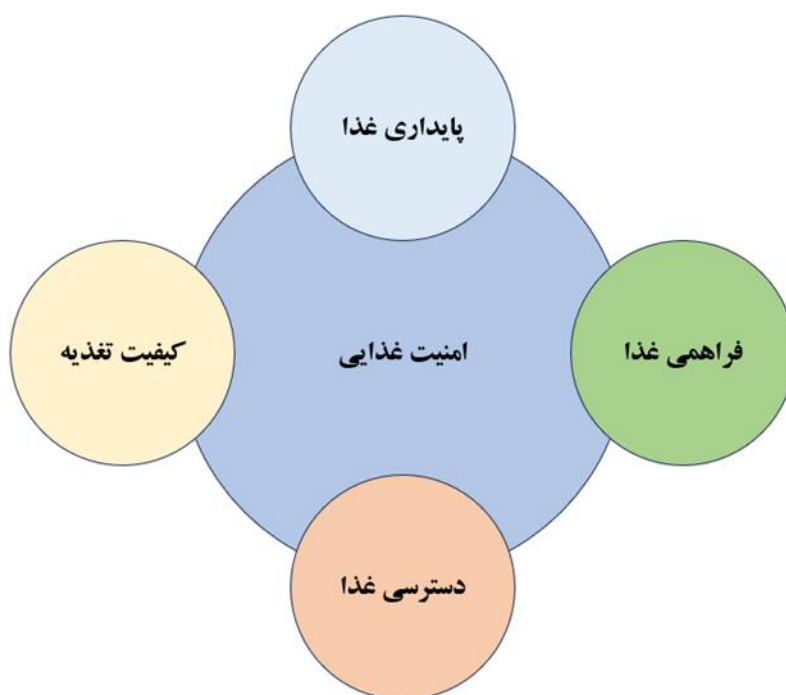
واژه‌های کلیدی: سامانه‌های غذایی پایدار، سیاست‌گذاری منابع طبیعی، ابزارهای راهبردی سیاستی، حکمرانی مشارکتی، چارچوب مفهومی.

How to cite this article:

Hosseini, M. (2026). A Framework for Improving Water and Food Security Governance: Developing a Systemic Tool at the National Level. Journal of Water and Sustainable Development, 12(4), 123-140. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i4.2508-1452>

و کشاورزی ملل متحد (فائو) امنیت غذایی را وضعیتی تعریف می‌کند که در آن، تمامی افراد در هر زمان، از لحاظ فیزیکی، اقتصادی و اجتماعی، به غذای کافی، ایمن و مغذی برای زندگی فعال و سالم دسترسی پایدار داشته باشند ([sumsion](#) و [همکاران، ۲۰۲۳](#)). این تعریف بر چهار بعد اصلی موجودیت غذا، دسترسی به غذا، کیفیت تغذیه‌ای و پایداری سیستم غذایی استوار است که در شکل (۱) ارائه شده است ([upton](#) و [همکاران، ۲۰۱۶](#)).

امنیت غذایی یکی از مهمترین دغدغه‌های جوامع در قرن بیست و یکم به شمار می‌رود و در سال‌های اخیر به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، به مسئله‌ای راهبردی در حوزه حکمرانی تبدیل شده است. این مفهوم، هم‌زمان با تحولات اقلیمی، فشار بر منابع طبیعی و رشد سریع جمعیت، به ابعادی پیچیده و چندوجهی دست‌یافته است. سازمان خواربار



شکل ۱- چهار رکن اساسی در زمینه امنیت غذایی

اضافه برداشت از منابع آبی و خاکی صورت می‌گیرد که پایداری محیط‌زیستی را به شدت تهدید می‌کند. براساس گزارش وزارت نیرو، از ۸۶ میلیارد مترمکعب آب مصرفی در بخش کشاورزی، ۲۸ درصد بیش از ظرفیت قابل برنامه‌ریزی است و این امر موجب تشدید بحران‌های محیط‌زیستی و کاهش تاب‌آوری منابع می‌شود ([سلطانی و همکاران، ۱۴۰۰](#)). از سوی دیگر، در حوزه تقاضا نیز مشکلات متعددی وجود دارد. الگوهای مصرف ناسالم، نرخ بالای ضایعات مواد غذایی و ناکارآمدی در مدیریت تقاضا، موجب شده است با وجود تولید نسبتاً بالا، کشور با تهدید ناامنی غذایی مواجه باشد ([Prasad و Schultz، ۲۰۱۰](#)). بررسی‌ها نشان می‌دهد اصلاح رژیم غذایی و کاهش ضایعات می‌تواند نقش به‌سزایی در بهبود تعادل عرضه و تقاضا ایفا کند. همچنین، تجارت ناهمگن مواد غذایی و عدم هم‌راستایی جریان آب مجازی با سیاست‌های ملی، پایداری سیستم غذایی را با تهدید مواجه کرده است ([Maroufpoor و همکاران، ۲۰۲۱](#)).

این چهار بعد، در کنار یکدیگر، چارچوبی جامع برای ارزیابی وضعیت امنیت غذایی ارائه می‌دهند و نشان می‌دهند که تحقق امنیت غذایی، تنها به معنای افزایش تولید نیست، بلکه نیازمند توزیع عادلانه، حفظ کیفیت غذا، توجه به الگوهای مصرف و پایداری بلندمدت منابع طبیعی است. درواقع، امنیت غذایی مفهومی میان‌رشته‌ای است که به‌طور مستقیم با حکمرانی منابع آب و خاک، سیاست‌های کشاورزی، وضعیت اقتصادی خانوارها، سلامت عمومی و حتی فرهنگ غذایی جوامع در ارتباط است.

در ایران، مسئله امنیت غذایی در دهه‌های اخیر به‌واسطه عوامل مختلفی از جمله فشار بر منابع آب و خاک، بهره‌برداری ناپایدار از اراضی، تغییرات اقلیمی، ضعف سیاست‌گذاری یکپارچه، و کاهش انگیزه نیروی انسانی در بخش کشاورزی با چالش‌های جدی مواجه شده است. اگرچه حدود ۸۰ درصد از نیاز غذایی کشور در داخل تولید می‌شود ([سلطانی و همکاران، ۱۴۰۰](#)) اما بررسی‌ها نشان می‌دهد این تولید بیشتر با اتکا به

حکمرانی پایدار غذا و بازتعریف مسئولیت‌های منطقه‌ای برای دستیابی به امنیت غذایی ملی محسوب می‌شود.

پیشینه پژوهش

امنیت غذایی به‌عنوان یکی از بنیادی‌ترین ارکان توسعه پایدار، همواره در کانون توجه سیاست‌گذاران، پژوهشگران و نهادهای بین‌المللی قرار داشته است. باتوجه به پیوستگی و درهم‌تنیدگی مفهوم امنیت آبی و امنیت غذایی و همچنین ارتباط مستقیم توزیع و پراکندگی جمعیت و امنیت غذایی، مطالعات متعددی به بررسی راهبردهای مؤثر برای حفظ و ارتقاء امنیت غذایی پرداخته‌اند. در این بخش، پیشینه پژوهش‌های انجام شده در سه محور اصلی بررسی می‌شود: (۱) منابع آب، (۲) منابع خاک و (۳) جمعیت روستایی. این مطالعات شامل دو دسته کلان پژوهش‌های بین‌المللی و داخلی هستند که در ادامه به‌صورت یکپارچه و تحلیلی مرور می‌شود.

پژوهش‌های متمرکز بر محور منابع آب

مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهند ارتباط میان امنیت غذایی و بهره‌برداری کارآمد از منابع آب روزبه‌روز پررنگ‌تر می‌شود. در ادبیات علمی این حوزه، تأکید اصلی بر چارچوب همبست آب-انرژی-غذا^۲ است؛ چارچوبی که با اذعان به وابستگی‌های متقابل میان سه بخش کلیدی توسعه، راهکارهایی برای مدیریت تلفیقی و پایدار منابع ارائه می‌دهد (Rasul و Sharma، ۲۰۱۵؛ Mitra و همکاران، ۲۰۲۰).

در چارچوب بیان شده، پژوهش‌هایی مانند Chen و همکاران (۲۰۱۱) و Cheng و همکاران (۲۰۱۵) نشان داده‌اند افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی نه تنها به حفظ منابع آب کمک می‌کند، بلکه موجب تقویت امنیت غذایی، به‌ویژه در مناطق خشک و کم‌آب می‌شود. همچنین، پژوهش‌های Seidou و همکاران (۲۰۲۰) نشان می‌دهد فناوری‌هایی مانند جمع‌آوری آب باران، آبیاری قطره‌ای و سامانه‌های حسگر پیشرفته می‌توانند نقش مهمی در هم‌افزایی منابع ایفا کنند. از منظر اجتماعی نیز، Shams (۲۰۲۱) بر نقش مشارکت جوامع محلی در مدیریت منابع آب تأکید داشته‌اند. آنان به‌ویژه نقش جوانان به‌عنوان نیروی کار فعال و بانگیزه را در حفظ منابع به‌عنوان عاملی کلیدی در افزایش تاب‌آوری غذایی و آبی معرفی می‌کنند.

در ایران نیز، مطالعاتی مانند احسان (۱۴۰۰) و صفوی و همکاران (۱۳۹۹) با بهره‌گیری از مدل‌هایی مانند ویپ^۳، به تحلیل الگوهای مصرف آب در کشاورزی پرداخته و پیشنهادهایی برای بهبود بهره‌وری از طریق به‌کارگیری فناوری‌های نوین در آبیاری، ارائه داده‌اند. همچنین استفاده از گونه‌های شورپسند و مقاوم به شوری، به‌منظور تولید غذا در مناطق خشک، یکی از نوآوری‌های مبتنی بر دانش بومی است که Fazeli-Nasab (۲۰۱۵) به آن پرداخته است. باوجود

علاوه بر این چالش‌های اجتماعی و جمعیتی مانند مهاجرت نیروی کار کشاورزی از روستاها به شهرهای بزرگ، به‌ویژه در استان‌های مستعد تولید غذا، موجب کاهش بهره‌وری و تضعیف بنیان‌های انسانی تولید غذا در کشور شده است. بنا بر یافته‌های Carlile و همکاران (۲۰۲۱) استان‌های مهاجرفرستی مانند خوزستان، ایلام و کرمانشاه که سهم قابل‌توجهی در تولیدات کشاورزی کشور دارند، به دلیل کمبود فرصت‌های اقتصادی و کاهش سودآوری فعالیت‌های کشاورزی، با پدیده‌ی فرسایش نیروی انسانی مواجه شده‌اند. در مقابل، استان‌های مهاجرپذیر مانند تهران، اصفهان و البرز با فشار مضاعف بر زیرساخت‌ها روبه‌رو هستند که خود زمینه‌ساز افزایش نرخ بیکاری و نابسامانی‌های اجتماعی شده است (Carlile و همکاران، ۲۰۲۱).

در چنین شرایطی، سیاست‌گذاری و حکمرانی در حوزه امنیت غذایی نیازمند ابزاری جامع، هوشمند و تعاملی است که بتواند با تحلیل داده‌های واقعی، طراحی و ارزیابی سناریوهای مختلف و پیش‌بینی پیامدهای سیاست‌ها، به تصمیم‌گیرندگان در اتخاذ راهبردهای کارآمد کمک کند. استفاده از مدل‌های پویای سیستمی، تلفیق داده‌های مکانی، و بهره‌گیری از مؤلفه‌های بازی‌وارسازی، می‌تواند منجر به ارتقای کیفیت سیاست‌گذاری، مشارکت بیشتر ذی‌نفعان، و بهبود پایداری منابع غذایی شود (Breeman و همکاران، ۲۰۱۵؛ Kuchenbecker و همکاران، ۲۰۱۷).

پژوهش حاضر در راستای بهبود حکمرانی منابع آب و امنیت غذایی، با هدف طراحی یک ابزار تحلیلی برای بهبود حکمرانی امنیت غذایی در سطح ملی انجام شده است. هدف اصلی این پژوهش، توسعه یک رویکرد سیستمی و پویا برای متعادل‌سازی پایدار میان تولید غذا، تجارت آب مجازی و میزان مصرف غذا در کشور با کمترین هزینه اقتصادی است. این ابزار با استفاده از داده‌های بومی، امکان بررسی پیامدهای سناریوهای مختلف را فراهم می‌سازد و زمینه‌ساز ارتقاء شفافیت و اثربخشی سیاست‌ها خواهد بود.

پژوهش حاضر با تکیه بر شواهد علمی و تحلیل سیستمی، ابزاری کارآمد با رویکردی نوآورانه برای تقویت حکمرانی منابع تولید غذا و ارتقاء امنیت غذایی در کشور طراحی کرده و گامی عملی در جهت تحقق توسعه کشاورزی پایدار بردارد. هدف از ارائه این مقاله و مدل طراحی‌شده در آن، تبیین مفهومی نو از امنیت غذایی در پهنه سرزمینی ایران است؛ مفهومی که فراتر از تولید و توزیع غذا، بر مسئولیت‌پذیری منطقه‌ای و عدالت در تقسیم بار امنیت غذایی تأکید دارد. در چارچوب این مدل، هر شهرستان باتوجه به منابع پایه و ظرفیت‌های تولیدی خود موظف به ایفای نقش مؤثر در تأمین غذا است. اما شهرستان‌هایی که درآمد خود را از مسیرهای دیگری چون صنعت، خدمات یا تجارت به‌دست می‌آورند، در راستای ایجاد تعادل و رعایت عدالت لازم است تا، سهمی در تأمین هزینه‌های غذا در مناطق تولیدکننده بر عهده بگیرند. این نگاه سیستمی و بازخوردمحور، گامی اساسی در جهت استقرار

تلاش‌های بیان شده، همچنان چالش‌هایی ازجمله فقدان سیستم‌های یکپارچه اطلاعاتی برای رصد مصرف منابع، نبود سازوکارهای تشویقی برای پذیرش فناوری‌های کم‌مصرف و ضعف در هم‌افزایی سیاست‌های بخشی در کشور دیده می‌شود.

پژوهش‌های متمرکز بر محور منابع خاک

مطالعات جهانی به‌وضوح نشان می‌دهند کیفیت و سلامت خاک از پیش‌شرط‌های اساسی برای پایداری تولید غذا و مقابله با بحران‌های اقلیمی هستند. پژوهشگرانی چون [Mugandani و همکاران \(2021\)](#) و [Dagunga \(2021\)](#) با معرفی کشاورزی حفاظتی به‌عنوان یک راهبرد کلیدی، بیان داشته‌اند که استفاده از روش‌هایی مانند کشت پوششی، تناوب زراعی و خاک‌ورزی حداقلی می‌تواند ضمن افزایش عملکرد محصولات، از تخریب ساختاری خاک جلوگیری کند.

همچنین، مطالعاتی مانند [Ball و همکاران \(2017\)](#) و [Oldfield و همکاران \(2018\)](#) نشان داده‌اند که تمرکز بر افزایش مواد آلی خاک و به‌کارگیری هم‌زمان کودهای آلی و شیمیایی (مدیریت تلفیقی مواد مغذی) نه‌تنها بازدهی محصولات را افزایش می‌دهد بلکه منجر به بازسازی اکوسیستم خاک می‌شود.

در سطح ملی، راهکارهایی مشابه در قالب استفاده از کودهای زیستی ([Ammal و همکاران، ۲۰۲۱](#)) بهره‌برداری از گیاهان مقاوم به شوری، و استفاده از مالچ‌های معدنی برای کاهش تبخیر از سطح خاک در مناطق بیابانی بررسی شدند ([طاهرآبادی و همکاران، ۱۳۹۶](#)). ازجمله اقدامات دیگر، استفاده از مدل‌سازی‌های اقلیمی برای پیش‌بینی تغییرات رطوبت خاک و تدوین راهکارهای سازگاری است که [احسان \(۱۴۰۰\)](#) در آن نقش داشته است.

بااین‌حال چالش‌هایی مانند نبود نهادهای مؤثر در مدیریت خاک، فقدان سیاست‌های تشویقی برای توسعه کشاورزی حفاظتی، و کمبود پایگاه داده‌های جامع و دقیق درباره کیفیت خاک در سطح ملی همچنان پابرجا است. همچنین، اغلب فعالیت‌ها در قالب پروژه‌های موضعی باقی‌مانده و به مقیاس ملی تعمیم نیافته‌اند.

۳-۲- پژوهش‌های متمرکز بر محور توزیع جمعیت

تحلیل روندهای جهانی در دهه اخیر بیانگر آن است که تحقق امنیت غذایی بدون توجه به پایداری اجتماعی و حفظ جمعیت مولد در مناطق روستایی امکان‌پذیر نیست. مطالعاتی همچون [Ristić و همکاران \(۲۰۲۰\)](#) و [Wu و همکاران \(۲۰۱۹\)](#) تأکید دارند که کشاورزی چندمنظوره، توسعه زیرساخت‌های روستایی مانند راه، بازار و سیستم‌های آبیاری، و همچنین تنوع‌بخشی به معیشت روستایی از طریق اکو توریسم یا صنایع تبدیلی، ابزارهای مؤثری برای نگهداشت جمعیت در روستاها هستند.

پژوهش‌های [Indardi و Nugroho \(۲۰۲۱\)](#) و [Iqbal \(۲۰۲۳\)](#) بر لزوم آموزش کشاورزان، تشکیل گروه‌های تعاونی و انتقال دانش کشاورزی از نسل‌های مسن به جوان با رویکرد کارآفرینانه تأکید می‌ورزند. همچنین، [Huang و Huang \(۲۰۲۳\)](#) بر اهمیت حکمرانی مشارکتی و نقش آن در تقویت اعتماد و حس تعلق در بین کشاورزان تأکید کرده‌اند.

در ایران نیز، [ترابی \(۱۴۰۰\)](#)، [تیشه‌یار \(۱۴۰۰\)](#) و [خیراللهی \(۱۳۹۸\)](#) با تمرکز بر پیوند دانش بومی و فناوری‌های نوین، توسعه زیرساخت‌های اقتصادی روستاها، به بررسی رابطه پایداری جمعیت روستایی و امنیت غذایی پرداخته‌اند. بهینه‌سازی شبکه توزیع، کاهش ضایعات غذایی و افزایش جذابیت حرفه کشاورزی برای جوانان از دیگر موضوعات مطرح شده در این زمینه است. همچنان مشکلاتی مانند نبود سیاست‌گذاری‌های تلفیقی، کمبود نهادهای میان‌بخشی برای تنظیم توزیع جمعیت و بی‌توجهی به نقش فرآوری و بازاریابی در زنجیره ارزش کشاورزی وجود دارد.

در جمع‌بندی، می‌توان گفت امنیت غذایی تنها یک مسئله فنی یا کشاورزی نیست، بلکه در تقاطع منابع طبیعی، ساختارهای اجتماعی، نظام‌های حکمرانی و ظرفیت‌های نهادی معنا می‌یابد. در این زمینه، رویکردهای نوین بین‌رشته‌ای که به‌طور هم‌زمان فناوری، مدیریت پایدار و مشارکت جوامع محلی را در برمی‌گیرند، می‌توانند راهکارهای مؤثری برای ارتقای امنیت غذایی ارائه دهند.

روش پژوهش

پژوهش حاضر از لحاظ هدف کاربردی است. در مطالعه حاضر به ارائه چارچوب مدیریتی در قالب ابزاری با رویکرد سیاستی کلان برای بهبود امنیت غذایی در سطح ملی پرداخته شده است. باتوجه به گستردگی موضوع مورد بحث و دسترسی بهتر به داده‌های کشوری، مطالعه حاضر در سطح ملی انجام گرفت. این پژوهش از طریق مطالعه منابع متعدد (کتاب معتبر، مقالات به‌روز در زمینه امنیت غذایی و ...) در زمینه بهبود پایدار امنیت غذایی گردآوری شده است. به‌منظور تحلیل عملکرد چارچوب مدیریتی ارائه شده از آمارهای رسمی منتشر شده در رسانه‌های معتبر توسط وزارت نیرو و وزارت جهاد کشاورزی استفاده شده است. همچنین عملکرد چارچوب ارائه شده تحت سناریو وضعیت حال حاضر امنیت غذایی در کشور، مورد بحث و بررسی قرار گرفت. باتوجه به گستردگی موضوع بهبود امنیت غذایی و اهمیت تبادلات زیرمجموعه‌ها و بخش‌ها در سیستم، منطقه مورد مطالعه کل کشور انتخاب شد.

ایران کشوری در خاورمیانه است که در مختصات جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی ۴۴ تا ۶۳ درجه طول شرقی جای دارد و از شمال به آذربایجان، ارمنستان، ترکمنستان و دریای خزر (دریای کاسپین)، از شرق به پاکستان و افغانستان، از جنوب به خلیج فارس و دریای عما و از غرب به ترکیه و عراق می‌رسد. کل گستره ایران، ۱/۶۴۸/۱۹۵

کیلومترمربع است که ۱۱۶/۶۰۰ کیلومترمربع آن را آب‌های این کشور تشکیل می‌دهند. نزدیک به یک‌سوم از مرز ۸/۳۳۴ کیلومتری آن نیز آبی است. این کشور خاورمیانه‌ای، موقعیت استراتژیکی در منطقه خلیج فارس دارد (خاتمی و همکاران، ۱۴۰۰).

میانگین بلندمدت بارش در ایران از سال ۱۹۰۱ تا ۲۰۲۴ برابر با ۲۲۷/۸۰ میلی‌متر در سال بوده است که بیشترین مقدار آن برای سال ۱۹۵۷ معادل ۳۴۳/۳۶ میلی‌متر و کمترین مقدار آن برای سال ۲۰۲۱ با ۱۲۸/۵ میلی‌متر بوده است (افروغ و همکاران، ۱۴۰۴). همچنین میانگین سالانه تبخیر پتانسیل بیش از ۲۰۰۰ میلی‌متر و تسلط اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک بر ۸۵٪ مساحت آن، در یکی از کم‌آب‌ترین منطقه‌های دنیا قرار گرفته است (خاتمی و همکاران، ۱۴۰۰). اما میزان آب برداشت شده برای مصرف کشاورزی با احتساب اضافه برداشت‌ها، ۸۶ میلیارد مترمکعب در سال است که باران‌دمان میانگین ۳۸ درصد در کل کشور مصرف می‌شود. توزیع منابع آب بین مصارف کشاورزی به شرح زیر است: درختان میوه ۳۲ درصد، گیاهان با مصرف علوفه (شامل جو و ذرت) ۲۴ درصد، گندم ۱۱ درصد، سبزی-صیفی ۷ درصد، دانه‌های روغنی ۳ درصد، سیب‌زمینی ۲ درصد، حبوبات ۱ درصد و سایر مصارف کشاورزی (دام، آبزیان، گیاهان تزئینی) ۵ درصد. اما وزارت نیرو آب قابل‌برنامه‌ریزی برای کشاورزی در کشور را ۶۴ میلیارد مترمکعب در سال تعیین کرده است. این امر حاکی از آن است که ۲۸ درصد اختصاص فعلی به کشاورزی کشور اضافه برداشت بوده و موجب تخریب و آسیب جدی به محیط‌زیست می‌شود. سلطانی و همکاران (۱۴۰۰) حجم آب قابل بهره‌برداری پایدار برای کشاورزی سالانه بین ۳۹ تا ۴۱ میلیارد مترمکعب است. بنابراین می‌توان گفت اضافه برداشت نیمی از اختصاص فعلی را تشکیل می‌دهد (نه‌بندانی و همکاران، ۱۴۰۰).

کل سطح زیر کشت کشور ۱۴/۳ میلیون هکتار است، که ۵/۹ میلیون هکتار آن کشت دیم و ۸/۴۱ میلیون هکتار آن کشت آبی است. لازم به ذکر است ۹۰ درصد تولیدات گیاهی در کشور در کشت آبی صورت می‌گیرد. براساس برآورد سلطانی و همکاران (۱۴۰۰) خلأ عملکرد نسبی ۶۰ درصد به‌دست آمده است، این امر به آن معنا است که عملکردهای فعلی تنها ۴۰ درصد عملکرد پتانسیل است. از آنجاکه بخش قابل توجهی از اراضی فعلی در دسته نامناسب یا خیلی ضعیف برای کشاورزی قرار دارند لذا افزایش سطح زیر کشت برای افزایش تولید غیرممکن به نظر می‌رسد. البته لازم به ذکر است که گاه‌آپاک‌تراشی‌هایی در اراضی جنگلی صورت می‌گیرد تا اراضی قابل‌کشت استحصال شود که این امر ضربه شدید و جبران‌ناپذیری بر پیکره طبیعت منطقه هست و هیچ وجه قابل‌قبول نیست (نه‌بندانی و همکاران، ۱۴۰۰).

جغرافیای ایران نقش مهمی در شکل‌دهی به شیوه‌های کشاورزی آن، به‌ویژه در مورد منابع آبی دارد. این کشور بیشتر خشک و نیمه‌خشک است و بخش قابل‌توجهی از فعالیت‌های

کشاورزی آن به دلیل دسترسی محدود به آب‌های سطحی به آبیاری وابسته است. تقریباً ۹۲ درصد از مصرف آب کشاورزی ایران از منابع آب آبی به‌دست می‌آید که وابستگی حیاتی به آب‌های زیرزمینی و سطحی برای بهره‌وری کشاورزی را برجسته می‌کند (Karandish و Hoekstra، ۲۰۱۷). این اتکا با توزیع نابرابر منابع آب در سراسر کشور تشدید می‌شود که منجر به نابرابری‌های منطقه‌ای قابل‌توجهی در تولیدات کشاورزی می‌شود (Pirafzali Zefrehei و همکاران، ۲۰۲۲).

بخش کشاورزی در ایران به دلیل عوامل انسانی ازجمله کاهش آب‌های زیرزمینی و تغییرات اقلیمی با چالش‌های شدیدی مواجه است. مطالعات نشان می‌دهد؛ منابع آب زیرزمینی با نرخ‌های هشداردهنده‌ای در حال کاهش است، که در درجه اول به دلیل فعالیت‌های کشاورزی ناپایدار و افزایش تقاضای آب از سوی جمعیت روبه‌رشد است (Asaadi و همکاران، ۲۰۱۹؛ Noori و همکاران، ۲۰۲۱). برداشت بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی منجر به پدیده‌ای به نام «ورشکستگی آب‌های زیرزمینی» شده است که در آن شکاف بین تأمین و استفاده از آب‌های زیرزمینی ناپایدار می‌شود و منجر به تخریب محیط‌زیست مانند فرونشست زمین و کاهش کیفیت آب می‌شود. این وضعیت خطرات قابل‌توجهی را برای امنیت غذایی به همراه دارد.

اما از لحاظ تولید غذای موردنیاز جمعیت، ایران با تولید بیش از ۸۰ درصد غذای مورد نیاز در داخل کشور (خودکفایی) وضعیت مناسبی دارد اما باید به این نکته توجه کرد که بیش از نیمی از آب برداشت شده توسط بخش کشاورزی، اضافه برداشت بوده که از عوامل اصلی ناپایداری محیط‌زیست است، بنابراین به لحاظ پایداری که یکی از چهار جزء اصلی امنیت غذایی است، کشور ایران در وضع نامناسبی قرار دارد (نه‌بندانی و همکاران، ۱۴۰۰). ایران با محدودیت‌هایی در منابع آبی و زمینی مواجه است که نیازمند به‌کارگیری سیاست‌گذاری و طراحی برنامه راهبردی پایدار برای افزایش تولید محصول و تضمین امنیت غذایی است (Mesgaran و همکاران، ۲۰۱۷).

لذا می‌توان اشاره داشت که علاوه بر چالش‌های محیط‌زیستی و نهادی مطرح‌شده، نحوه حکمرانی امنیت غذایی در ایران درحال حاضر بیشتر بر دو رکن «فراهمی» و «دسترسی» متمرکز است، درحالی‌که ارکان بنیادین دیگر امنیت غذایی مانند پایداری منابع تولید و سلامت تغذیه تا حد زیادی نادیده گرفته شده‌اند. این رویکرد بخشی‌نگر، موجب شده است که سیاست‌گذاری‌ها بیشتر معطوف به افزایش تولید و توزیع غذا باشند و ارتباط نظام‌مند میان سیاست‌های کشاورزی، منابع آب و سلامت تغذیه‌ای جامعه کمتر مورد توجه قرار گیرد. در چنین شرایطی، نیاز به چارچوبی جامع و تحلیلی که بتواند ابعاد مختلف امنیت غذایی را به‌صورت تعاملی و بازخوردمحور ارزیابی کند، به‌شدت احساس می‌شود.

پژوهش حاضر با رویکردی مبتنی بر نگرش سیستمی و پویایی سیستم‌ها، چارچوبی مفهومی براساس با تعریف دقیق سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد برای امنیت غذایی طراحی

کرده است. این چارچوب با ادغام چهار رکن اصلی امنیت غذایی (فراهمی، دسترسی، پایداری و سلامت تغذیه) و تحلیل روابط متقابل میان آن‌ها، تصویری واقع‌گرایانه‌تر از وضعیت امنیت غذایی در ایران ارائه می‌دهد. ویژگی برجسته این چارچوب در آن است که با استفاده از داده‌های رسمی و سناریوسازی‌های پویا، امکان ارزیابی سیاست‌ها پیش از اجرا را فراهم کرده و در نتیجه، احتمال خطای سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری‌های ناپایدار را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، تأثیر تغییرات اقلیمی بر کشاورزی ایران را نیز نمی‌توان نادیده گرفت. مطالعات نشان داده‌اند که نوسانات بارندگی و دما، به‌ویژه در مناطق با منابع آبی محدود، اثر مستقیم و قابل توجهی بر عملکرد محصولات کشاورزی دارند (Jafari و همکاران، ۲۰۲۲؛ Jafari و همکاران، ۲۰۲۱). انعطاف‌پذیری بخش کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی و مدیریت مؤثر منابع محدود آب، شرط اساسی تداوم تولید و امنیت غذایی پایدار است (Shojaei-Miandoragh و همکاران، ۲۰۱۹). در این راستا، پژوهش حاضر با هدف ارائه چارچوبی سیاست‌محور و تحلیلی، از روش پویایی سیستم‌ها بهره گرفته است تا بتواند رفتارهای پویا، تکرارشونده و بازخوردی سیستم پیچیده امنیت غذایی را مدل‌سازی کند. فرایند مدل‌سازی در این پژوهش در محیط نرم‌افزار ونسیم انجام گرفته و شامل سه گام اصلی بوده است: نخست، شناسایی متغیرهای کلیدی و روابط علی میان آن‌ها بر اساس داده‌ها و منابع علمی معتبر؛ دوم، طراحی مدل مفهومی با تأکید بر حلقه‌های بازخورد و نقاط حساس سیستم؛ و سوم، اجرای سناریوی پایه در دیاگرام حالت جریان که بازنمایی‌کننده وضعیت فعلی امنیت غذایی در ایران است. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد چارچوب ارائه شده می‌تواند ابزار مؤثری برای درک نظام‌مند، ارزیابی و اصلاح سیاست‌های امنیت غذایی در سطح ملی به‌شمار آید.

ساختاردهی مسئله و طراحی مدل مفهومی

در نخستین گام، مرزهای مسئله در سطح ملی تعریف شد؛ این انتخاب از یک‌سو ناشی از دسترسی گسترده‌تر به داده‌های کشوری و از سوی دیگر مبتنی بر هدف سیاست‌گذاری کلان در سطح کشور بوده است. سپس با بهره‌گیری از مطالعات کتابخانه‌ای، تحلیل گزارش‌های رسمی (وزارت نیرو، وزارت جهاد کشاورزی، مرکز آمار ایران) و مشارکت

خبرگان دانشگاهی، مؤلفه‌های کلیدی امنیت غذایی شامل تولید داخلی، منابع آب و خاک، بهره‌وری، فشار اقلیمی، ساختار مصرف و توان سیاست‌گذاری شناسایی شدند. پس از شناسایی مؤلفه‌های کلیدی امنیت غذایی، یک مدل مفهومی به‌صورت حلقه‌های علی و معلولی^۴ طراحی شد. این مدل نشان‌دهنده روابط علت و معلولی بین مؤلفه‌های اصلی امنیت غذایی و پویایی‌های بازخوردی حاکم بر آن‌ها است. برای اطمینان از اعتبار مدل مفهومی و ارتباط بین مؤلفه‌ها در مدل حلقه‌های علی و معلولی، چندین نشست تخصصی با اساتید و خبرگان دانشگاهی در حوزه‌های اگروتکنولوژی، اقتصاد کشاورزی اکولوژی و صنایع غذایی (از دانشگاه فردوسی مشهد) برگزار شد. در این نشست‌ها، از دیدگاه‌ها و تجارب متخصصان رشته‌های گوناگون و مرتبط با حوزه امنیت غذایی بهره گرفته شد تا ساختار مدل، مفروضات بنیادین و روابط کلیدی آن ارزیابی، نقد و بازنگری شود. در نهایت، بر اساس بازخوردهای دریافت شده، نسخه نهایی مدل مفهومی تدوین و نهایی شد. در شکل (۲) مدل حلقه‌های علی و معلولی به نمایش گذاشته شده است.

شکل (۲) دیاگرام حلقه‌های علی و معلولی مدل مفهومی امنیت غذایی در ایران را نمایش می‌دهد. در این دیاگرام، متغیر «تولید غذا» به‌عنوان یکی از متغیرهای محوری مدل، از دو منبع اصلی یعنی منابع آب و منابع خاک تأثیر می‌پذیرد. بخشی از تولیدات کشاورزی در فرآیند برداشت، حمل‌ونقل و مصرف به‌صورت تلفات و ضایعات غذایی از چرخه دسترسی خارج می‌شود؛ و حاصل جمع «تولید داخلی» با «میزان واردات» و کسر «صادرات»، مقدار کل موجودی در متغیر مخزن غذا را شکل می‌دهد که به‌طور مستقیم بر فراهمی غذا به‌عنوان نخستین و بنیادی‌ترین رکن امنیت غذایی اثرگذار است.

در ادامه، با تولید غذا، درآمد به‌دست آمده از فعالیت‌های کشاورزی نیز افزایش می‌یابد. بخشی از این درآمد صرف معیشت کشاورزان شده و بخش دیگر به توسعه کشاورزی اختصاص می‌یابد. توسعه کشاورزی در سه مسیر عمده قابل انجام است: احداث گلخانه‌ها، افزایش سطح زیرکشت و بهبود بهره‌وری منابع آب در کشاورزی، میزان و جهت تغییر در این مؤلفه‌ها تابعی از سطح درآمد بخش کشاورزی است، به‌طوری‌که افزایش درآمد می‌تواند موجب توسعه و برعکس کاهش درآمد باعث ایجاد محدودیت در این مؤلفه‌ها شود.

(به عنوان مثال واحد در سال یا ماه) و در مدل سازی پویایی سیستم ها نقش موتور محرک سیستم را ایفا می کنند. از جمله ویژگی های کلیدی متغیرهای نرخ می توان به موارد زیر اشاره کرد: وابسته به زمان و شرایط محیطی هستند و معمولاً پاسخ گو به بازخوردهای داخلی یا محرک های خارجی اند، فرمول بندی آنها اغلب پیچیده تر از متغیرهای حالت است، زیرا بر پایه روابط علت و معلولی، ضرایب تأثیر و ترکیب متغیرهای کمکی محاسبه می شوند. ممکن است شامل تأخیر زمانی، آستانه های حساسیت، یا حلقه های بازخورد مثبت و منفی باشند.

در این مدل، متغیرهای نرخ یا مستقیماً از داده های سالانه و آماری حاصل شده اند یا با استفاده از روابط ریاضی استخراج شده از مطالعات مدل سازی بین المللی به صورت دینامیک فرموله شده اند. در صورت عدم دسترسی به داده های مستقیم، از تخمین های پارامتریک، روابط غیرخطی یا توابع حساسیت استفاده شده است تا نرخ ها در مواجهه با تغییرات محیطی یا سیاستی، واکنش منطقی و واقع گرایانه ای نشان دهند.

متغیرهای حالت^۳

متغیرهای حالت، هسته مرکزی مدل سازی پویایی سیستم ها را تشکیل می دهند. این متغیرها معرف انباشت در سیستم هستند و رفتار تجمعی متغیرهای نرخ را در طول زمان بازنمایی می کنند. به بیان ساده، این متغیرها وضعیت فعلی یک مؤلفه را نشان می دهند و تغییر آنها تنها در اثر ورود یا خروج از طریق جریان ها (نرخ ها) امکان پذیر است.

از جمله ویژگی های کلیدی متغیرهای حالت می توان به موارد زیر اشاره کرد: حافظه سیستم محسوب می شوند و روندهای تاریخی را ذخیره می کنند، دارای مقدار اولیه هستند و در هر گام زمانی با حاصل جمع یا تفریق جریان ورودی و خروجی به روزرسانی می شوند، در شرایط پایدار، در صورت برابری نرخ ورودی و خروجی، مقدار آنها ثابت می ماند. در مدل سازی امنیت غذایی، متغیرهای حالت به عنوان نماینده وضعیت ذخیره ای و پایدار مؤلفه ها عمل می کنند. آنها اغلب از طریق داده های آماری رسمی استخراج شده اند، اما در مواردی نیز با استفاده از انتگرال گیری از داده های نرخ یا از طریق تخمین های علمی بر پایه منابع معتبر بین المللی مقداردهی اولیه شده اند. دقت در تعیین مقدار اولیه این متغیرها برای تحلیل پویای مدل در سناریوهای بلندمدت حیاتی است.

برخی از این نرخ ها به صورت مستقیم از داده های آماری استخراج شده اند، اما بخش قابل توجهی از آنها با استفاده از روابط ریاضی برگرفته از مطالعات بین المللی مانند مدل

سیستمی غذا توسط فائو^{۱۳}، مدل GAEZ^{۱۴}، و رویکردهای کمی سازی OECD^{۱۵} تدوین شده اند.

متغیرهای کمکی^۶

این دسته، متغیرهای میانجی و تبیینی هستند که برای بازنمایی مفاهیم انتزاعی یا ترکیبی استفاده شده اند و اغلب به عنوان پارامترهای واسطه یا ضرایب تأثیر در روابط اصلی به کار می روند، و بیشتر از آمارهای رسمی برداشته شده اند.

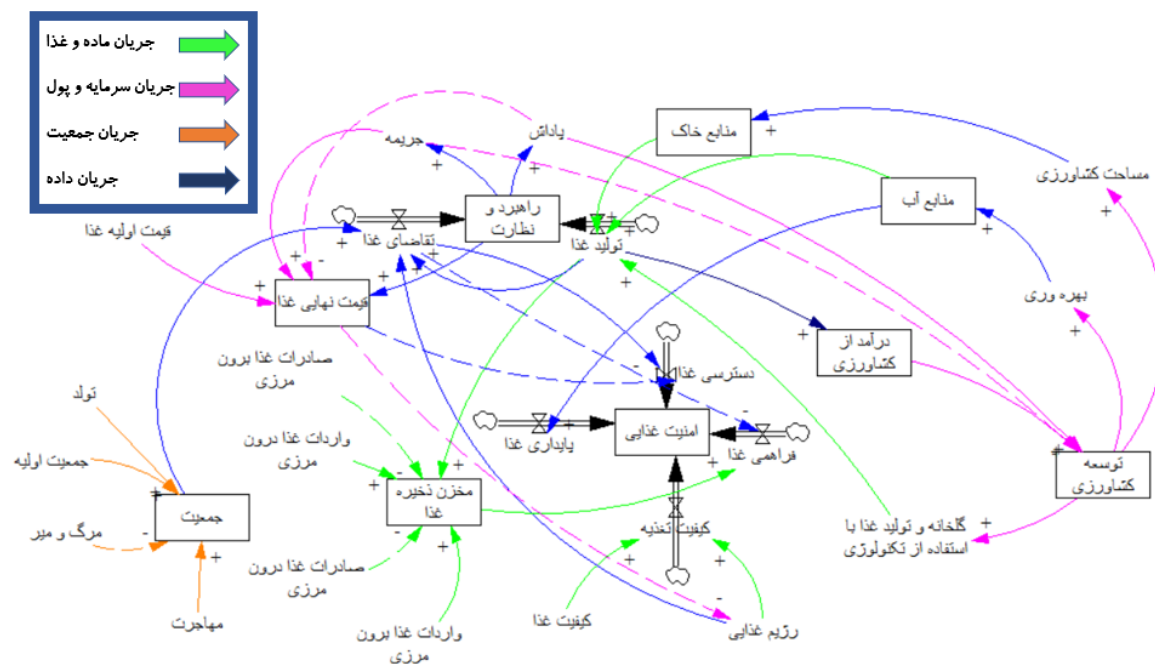
متغیرهای کمکی، پارامترهایی هستند که با هدف تسهیل در محاسبه، ساده سازی ساختار مدل، و تبیین روابط بین متغیرهای دیگر مورد استفاده قرار می گیرند. این متغیرها معمولاً نمایانگر مفاهیم ترکیبی، ضرایب وزنی، شاخص های کیفیت یا عوامل مداخله گر هستند و نقش مهمی در ایجاد ارتباط منطقی میان اجزای مدل دارند.

از جمله ویژگی های کلیدی متغیرهای کمکی، می توان به موارد زیر اشاره کرد: اغلب خود ترکیبی از چند متغیر دیگر هستند (مانند نسبت، میانگین وزنی، شاخص استاندارد شده)، امکان انعطاف پذیری مدل را افزایش می دهند و تحلیل حساسیت را ممکن می سازند، به عنوان ضرایب یا پارامترهای تعدیل کننده در روابط نرخ یا تصمیم گیری عمل می کنند، اغلب شامل شاخص هایی هستند که کیفیت، کارایی یا کفایت را توصیف می کنند.

در این پژوهش، متغیرهای کمکی هم از آمارهای رسمی (مثلاً نسبت های اقتصادی یا کشاورزی) استخراج شده اند و هم با استفاده از روابط ترکیبی و شاخص سازی مبتنی بر مطالعات معتبر جهانی تدوین شده اند. فرمول بندی این شاخص ها بیشتر برگرفته از دستورالعمل های فائو، شاخص های توسعه پایدار و مدل های ترکیبی ارائه شده در مطالعاتی چون شاخص امنیت غذایی جهانی^{۱۷}، مدل همبست آب و غذا^{۱۸} و پژوهش های علمی همچون [Molden](#) و [همکاران \(۲۰۱۰\)](#) یا [Rijsberman \(۲۰۰۶\)](#) بوده اند.

در شکل (۳) دیاگرام شارش-انباش از مدل تدوین شده، ارائه شده است.

در شکل (۳) ساختار کمی سازی شده مدل امنیت غذایی در قالب دیاگرام شارش-انباش ارائه شده است. این دیاگرام، نسخه کمی سازی شده ای از مدل مفهومی حلقه های علی و معلولی (شکل ۲) است که بر پایه منطق پویایی سیستم ها طراحی شده و رفتار دینامیکی مؤلفه های اصلی امنیت غذایی را در سطح ملی بازنمایی می کند. در این مدل، مؤلفه ها بر اساس سه دسته متغیرهای حالت، نرخ و کمکی که در بخش پیش نیز توضیح داده شد، تفکیک و سازمان دهی شده اند.



شکل ۳- مدل حالت جریان رویکرد بهبود امنیت غذایی

موجب بهبود دسترسی و افزایش عرضه غذا در جامعه می‌شود. با این حال، به دلیل اثر مستقیم مؤلفه دسترسی غذا بر رژیم غذایی، این افزایش می‌تواند منجر به رشد نمایی در تقاضا غذا شود، به گونه‌ای که سهم تولید داخلی از تأمین تقاضا کاهش یابد و در نتیجه، جریان جریمه فعال شود. جریان جریمه در مدل موجب تعدیل الگوی مصرف، اصلاح رژیم غذایی و کنترل تقاضا غذا می‌شود. این پویایی متناوب میان پاداش و جریمه، سازوکاری بازخوردی برای ایجاد تعادل میان تولید، مصرف و پایداری منابع فراهم می‌آورد. در بلندمدت، این فرایند به نهادینه‌سازی الگوی کشاورزی پایدار، بهبود اخلاق مصرف و تقویت تاب‌آوری نظام امنیت غذایی ملی منجر خواهد شد.

نتایج و بحث

پژوهش‌های متعددی در دهه‌های اخیر به بررسی ابعاد مختلف امنیت غذایی از منظر منابع پایه، فناوری، و سیاست‌گذاری پرداخته‌اند. بخش قابل توجهی از این مطالعات بر اهمیت منابع آب و خاک به عنوان زیربنای تولید پایدار تأکید داشته‌اند. برای نمونه، [Rojas و همکاران \(۲۰۱۶\)](#) و [Chen و همکاران \(۲۰۱۱\)](#) ضرورت نگرش سیستمی و ادغام مؤلفه‌های آب، خاک و مشارکت کشاورزان را در سیاست‌های کلان امنیت غذایی مورد توجه قرار داده‌اند. همچنین، [Tan و همکاران \(۲۰۱۶\)](#) و [Xia و همکاران \(۲۰۲۰\)](#) نشان دادند بهره‌گیری از شیوه‌های نوین آبیاری و بازچرخانی آب می‌تواند ضمن ارتقای بهره‌وری محصولات، کیفیت خاک را نیز حفظ نماید. از سوی دیگر، [Yadav و همکاران \(۲۰۲۳\)](#) و [Nawaz و همکاران \(۲۰۲۰\)](#) سلامت و حاصلخیزی خاک را عامل بنیادین در تضمین

در دیاگرام حالت-جریان، ارتباط بین مؤلفه‌ها دقیقاً بر مبنای روابط علی و بازخوردی ارائه شده در مدل مفهومی پیشین ترسیم شده است. متغیرهای کمکی عمدتاً از داده‌های رسمی منتشر شده توسط نهادهای معتبر نظیر وزارت نیرو، وزارت جهاد کشاورزی و مرکز آمار ایران مقداری شده‌اند. متغیرهای حالت، معرف انباشت و وضعیت تجمعی سیستم در هر مقطع زمانی‌اند و تغییرات سایر مؤلفه‌ها در آن‌ها منعکس می‌شود. در مقابل، متغیرهای نرخ نقش موتور محرک سیستم را ایفا کرده و روند تغییرات پویای مدل را در طول زمان هدایت می‌کنند.

در فرآیند طراحی دیاگرام حالت-جریان، هر مؤلفه با استفاده از روابط تأثیرگذار خود فرمول‌نویسی و مقداری شده است تا مدل بتواند رفتار سیستم را در بازه‌های زمانی مختلف به درستی شبیه‌سازی کند. همچنین، برای سنجش وضعیت کلی امنیت غذایی، هر یک از ارکان چهارگانه آن (شامل فراهمی، دسترسی، پایداری و سلامت تغذیه) بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌های وابسته، در بازه‌ای از صفر تا صد درصد ارزیابی شده‌اند. میانگین این چهار مؤلفه، شاخص ترکیبی امنیت غذایی در سطح ملی را تشکیل می‌دهد.

برخلاف الگوی حاکم بر حکمرانی بخشی و تمرکز صرف بر رکن «فراهمی» در سیاست‌گذاری‌های کنونی، این چارچوب بر تعامل هم‌زمان و متوازن چهار رکن اصلی امنیت غذایی تأکید دارد. در این مدل، براساس فرض پایه خودکفایی یا خوداتکایی ۷۰ درصدی، سازوکار پاداش و جریمه به عنوان یک حلقه بازخورد سیاستی طراحی شده است. در شرایطی که تولید داخلی بیش از ۷۰ درصد از تقاضای غذایی کشور را تأمین کند، پاداشی به مؤلفه‌های کلیدی مدل تخصیص می‌یابد که

پایداری تولید دانسته و راهکارهایی همچون کشاورزی حفاظتی و ارگانیک را پیشنهاد کردند.

در بُعد اجتماعی و انسانی، مطالعاتی مانند [Friedrichsen](#) و [همکاران \(۲۰۱۸\)](#) و [Khatrı و همکاران \(۲۰۱۶\)](#) بر نقش آموزش، آگاهی‌بخشی و مشارکت فعال کشاورزان در پذیرش فناوری‌های نوین تأکید کردند. افزون‌برآن، پژوهش‌های سیاست‌محور مانند [McConville و همکاران \(۲۰۱۵\)](#) و [Bíziková \(۲۰۲۰\)](#) به اهمیت مشوق‌های اقتصادی، عدالت در دسترسی به منابع و حمایت از کشاورزان خرد اشاره داشتند. هم‌زمان، مطالعاتی همچون [El Baroudy و همکاران \(۲۰۲۰\)](#) و [Bilali و همکاران \(۲۰۱۸\)](#) یکی کردن فناوری‌های نوآورانه و داده‌محور را به‌عنوان راهبردی برای ارتقای کارایی منابع و افزایش بهره‌وری مطرح کردند.

با وجود غنای علمی این مطالعات، اغلب آن‌ها با محدودیت‌هایی در تلفیق و تحلیل هم‌زمان ابعاد مختلف امنیت غذایی مواجه بودند. بیشتر پژوهش‌ها تنها بر یکی از مؤلفه‌های کلیدی مانند آب، خاک، یا رفتار کشاورزان تمرکز داشته و کمتر به روابط متقابل و دینامیک میان این مؤلفه‌ها پرداختند. به‌عنوان مثال، تحقیقات مرتبط با مدیریت آب (مانند [Tan و همکاران، ۲۰۱۶](#) و [Xia و همکاران، ۲۰۲۰](#)) اغلب از پیوند با نظام‌های سیاست‌گذاری یا رفتار مصرف‌کنندگان غافل ماندند؛ درحالی‌که مطالعات مربوط به سلامت خاک یا سیاست‌های حمایتی نیز به‌ندرت ساختارهای نهادی، حلقه‌های بازخورد یا پویایی میان‌بخشی را مورد توجه قرار دادند. افزون‌براین بخش عمده‌ای از ادبیات موجود فاقد چارچوبی تحلیلی در مقیاس ملی است که بتواند هم‌زمان ارکان چهارگانه امنیت غذایی و ابعاد محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی مسئله را در ارتباطی تعاملی بررسی کند.

اما پژوهش حاضر با رویکردی سیستمی و بهره‌گیری از مدل پویایی سیستم‌ها، گامی فراتر از مطالعات پیشین برداشته است. این پژوهش با تلفیق داده‌های منتشر شده در رسانه‌های رسمی، روابط علمی و تحلیل بازخوردمحور، چارچوبی مفهومی و یکپارچه ارائه می‌دهد که چهار رکن اصلی امنیت غذایی (فراهمی، دسترسی، پایداری و سلامت تغذیه) را به‌صورت پویا مدل‌سازی می‌کند. مزیت کلیدی این چارچوب در آن است که به‌جای تمرکز بر تولید یا مصرف، کل زنجیره حکمرانی غذا و آب را به‌عنوان یک نظام پیچیده با ساختار علی و حلقه‌های بازخورد در نظر می‌گیرد. همچنین، با تحلیل سناریوهای مختلف، امکان شناسایی گلوگاه‌های نهادی، ارزیابی اثربخشی سیاست‌ها و تدوین راهبردهای اصلاحی را فراهم می‌سازد.

به‌این‌ترتیب پژوهش حاضر نه‌تنها توانسته است میان دیدگاه‌های محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی پیوند برقرار

کند، بلکه با تأکید بر حکمرانی تطبیقی و پاسخ‌گو، بستر تصمیم‌سازی مبتنی بر شواهد را برای سیاست‌گذاران ملی فراهم می‌سازد. ویژگی‌های بیان شده، پژوهش را به الگویی نوآورانه در حوزه امنیت غذایی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تبدیل کرده است؛ الگویی که قابلیت تعمیم به سایر کشورها و نظام‌های غذایی مشابه را نیز دارد.

در بخش تحلیل نتایج، با دراختیارداشتن آمارهای رسمی منتشر شده و با استفاده از دیاگرام کمی سازی شده در محیط نرم‌افزار ونسیم، وضعیت امنیت غذایی کشور در سناریو وضعیت حال حاضر تحلیل و بررسی شد. این سناریو باتوجه‌به متغیرهای مختلف اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی طراحی شده است تا تأثیرات تغییرات ایجاد شده توسط مدل، بر تأمین امنیت غذایی کشور ارزیابی شود. با مدل‌سازی دقیق و شبیه‌سازی شرایط مختلف، تحلیل خروجی دیاگرام حالت-جریان می‌تواند به تصمیم‌گیران کمک کند تا خطای سیاست‌گذاری را کاهش دهند و راهکارهای مؤثری برای بهبود وضعیت امنیت غذایی کشور ارائه دهند. ورودی‌های مدل در سناریو اول به‌اختصار در جدول (۱) ارائه شده است.

در سناریو وضعیت حال حاضر، با در اختیار داشتن داده‌های رسانه‌ها و نشریه‌های معتبر و مرتبط با تولیدات غذا و امنیت غذایی، وضعیت حال حاضر امنیت غذایی در کشور در مدل شبیه‌سازی می‌شود. در ابتدای امر با داشتن آمار متولدین، میزان مرگ‌ومیر و مهاجرت سالانه میزان تغییرات جمعیت در هر سال مشخص می‌شود؛ لذا طبق پیش‌بینی نمودار جمعیت صعودی خواهد بود و در آینده نزدیک کشور از مرز جمعیت نود میلیون نفری عبور خواهد کرد. باتوجه‌به آمار ۱۶۲،۳۱۸،۰۰۰ تن تقاضای غذا در سال و جمعیت ۸۹،۳۸۵،۲۹۰ نفری در ایران، میزان غذای مورد استفاده هر نفر در شبانه‌روز حدود ۴ کیلوگرم با احتساب ضایعات مصرف، به دست می‌آید، که این مقدار به‌عنوان مینا در نظر گرفته می‌شود با افزایش دسترسی و کاهش قیمت رژیم غذایی به حالت رژیم پرخوری تغییر خواهد کرد که معادل مصرف حدود ۶ کیلوگرم غذا در روز است. کاهش قیمت غذا در مدل به‌وسیله مؤلفه نظارت و ارزیابی ایجاد می‌شود که در صورت اختصاص پاداش مقداری از هزینه غذای روزانه کسر می‌شود و در نتیجه کاهش قیمت غذا مصرف آن افزایش یافته و در سال بعد با افزایش تقاضا نسبت تولید به تقاضا کاهش یافته و با افزایش قیمت رژیم غذایی دوباره اصلاح می‌شود. لازم‌به ذکر است مقادیر مصرف روزانه با کسر میزان تلفات و ضایعات که حدود ۳۰ درصد از تولید کل کشور است، از میزان تقاضا کل، برآورد شده است.

جدول ۱- داده‌های ورودی مدل در سناریو

مقدار در سناریو	یکا	نام مؤلفه در مدل
۸۶	میلیارد مترمکعب	منابع آب مورد استفاده بخش کشاورزی در سناریو
۱۴/۵	میلیون هکتار	منابع زمین زیر کشت محصولات کشاورزی در سناریو
۲۳/۵	میلیون تن	صادرات انواع محصولات کشاورزی
۸/۸۰۳	میلیون تن	واردات انواع محصولات کشاورزی
۱۲۳۱۳۷	تومان	قیمت اولیه سبد غذایی سالم برای استفاده روزانه
۸۹۳۸۵۳۰۰	نفر	جمعیت اولیه
۱۰۵۷۹۴۸	نفر	میزان تولد سالانه
۴۴۲۲۱۳	نفر	میزان مرگ و میر سالانه
۱۳۷۲۰۰	نفر	میزان متوسط مهاجرین سالانه ورود به کشور
۶۵۰۰۰	نفر	میزان متوسط مهاجرین سالانه خروج از کشور
۶	کیلوگرم در روز به ازای هر نفر	رژیم غذایی مورد استفاده در زمان پاداش
۴	کیلوگرم در روز به ازای هر نفر	رژیم غذایی مورد استفاده در زمان جریمه
۴	میلیون تن	تولیدات گلخانه‌ای سالانه

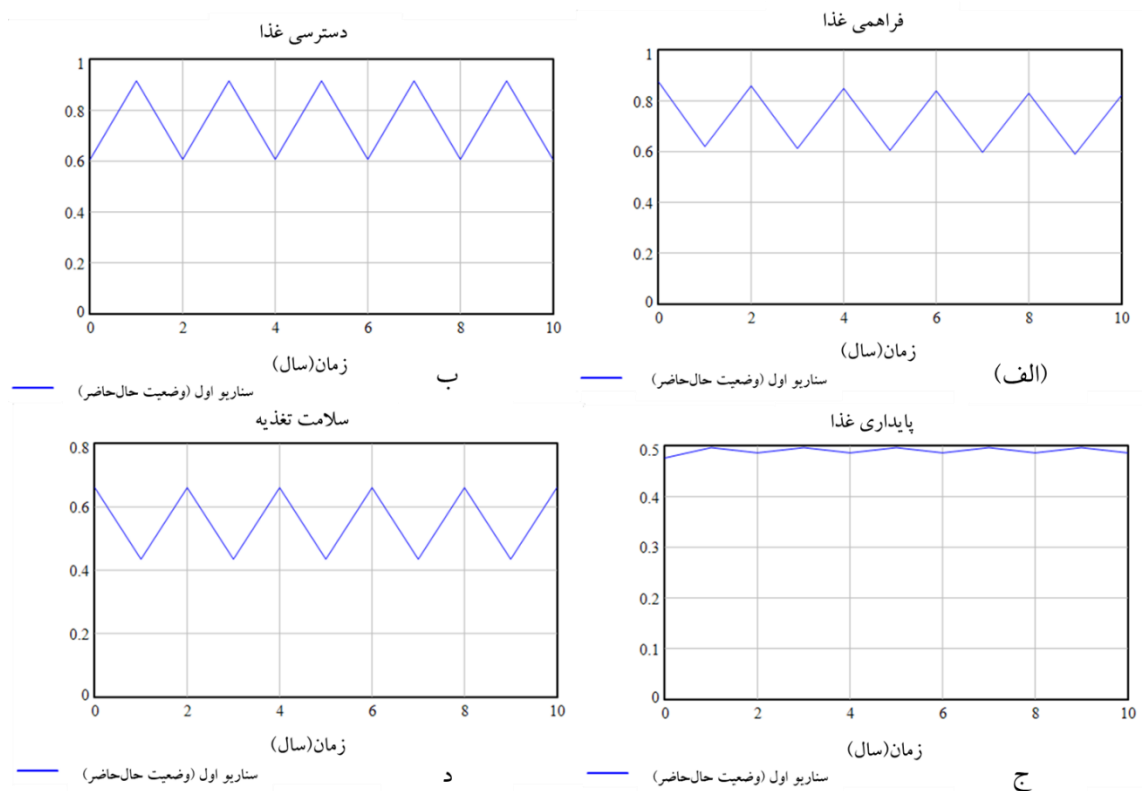
فراهمی غذا

فراهمی غذا به معنای موجودیت و تولید کافی غذا برای تأمین نیازهای جمعیت است. در این سناریو، منابع آب و زمین به عنوان دو عامل اصلی تولید غذا در نظر گرفته شده است. براساس آمار، منابع آب پایه، مورد استفاده بخش کشاورزی در کشور حدود ۸۶ میلیارد مترمکعب و اراضی تحت کشت پایه، مساحتی در حدود ۱۴/۵ میلیون هکتار در سال در نظر گرفته شده است. این میزان تولید غذا از طریق کشاورزی در کشور وابسته به این منابع است، که با درصد عملکرد میانگین حدود ۴۰ درصد در کشور حاصل می‌شود.

علاوه بر منابع داخلی، واردات و صادرات محصولات غذایی نیز تأثیر مهمی بر فراهمی غذا دارند. ایران سالانه حدود ۲۳/۵ میلیون تن واردات و ۸/۸ میلیون تن صادرات محصولات کشاورزی دارد که به طور مستقیم بر وضعیت فراهمی غذا اثر می‌گذارد. از جمله مهمترین کشورهایی که ایران انواع محصولات کشاورزی را از آن‌ها وارد می‌کند می‌توان به چین، ترکیه، هند، عمان و افغانستان اشاره کرد همچنین ایران به کشورهای عراق، پاکستان، ترکیه، روسیه، کشورهای حوزه خلیج فارس و ... صادرات غذا دارد. پس با داشتن مقادیر کمی تولید داخل و صادرات و واردات و همچنین کسر مقدار ضایعات و تلفات که در حال حاضر حدود ۳۰ درصد از تولید غذا تعیین شده است، میزان فراهمی غذا نسبت به تقاضای جمعیت تعیین شده است؛ در قسمت (الف) از شکل (۴) گراف تغییرات مؤلفه فراهمی غذا در طی سناریو اول قابل مشاهده است.

تولید غذا نیز در سال اول از حاصل ضرب ضرایب عملکرد در منابع آب و خاک به دست می‌آید؛ اما از سال دوم با ورود بخش نظارت و ارزیابی بخش توسعه کشاورزی در مدل نیز فعال می‌شود در این حالت باقیمانده درآمد حاصل از تولید غذا (با کسر هزینه‌های معیشت) علاوه بر جریمه و پاداش میزان توسعه در بخش کشاورزی را مشخص می‌سازند، در صورت اختصاص پاداش تأثیر مثبت در بهره‌وری و اراضی تحت کشت خواهد داشت که با این روند از مصرف آب حدود ۸۶۰ میلیون مترمکعب در سال صرفه جویی می‌شود. همچنین با تأثیر مثبت مدل میزان اراضی زیر کشت، افزایش خواهد یافت که پتانسیل این منبع به صورت پایدار ۲۶۰ هزار هکتار در سال در نظر گرفته شده است. بخش سوم توسعه کشاورزی مربوط به تولید غذا به وسیله تکنولوژی و گلخانه و می‌شود، باتوجه به اهمیت این بخش و تولید حدود ۴ میلیون تن در سال توسط این بخش تأثیر این بخش به طور مستقیم بر تولید غذا لحاظ شده است.

بخش نظارت و ارزیابی با تحت تأثیر قرار دادن قیمت غذا بر روی تقاضا غذا تأثیر می‌گذارد و همچنین با تحت تأثیر قرار دادن مؤلفه توسعه کشاورزی تولید غذا را کنترل می‌کند. در واقع مقدار کمی مؤلفه نظارت و ارزیابی نشان‌دهنده میزان خوداتکایی کشور در سال مورد بررسی است، در این سناریو باتوجه به تأکید حال حاضر مسئولین بر حفظ خوداتکایی در کشور در سناریو حاضر میزان خوداتکایی ۷۰ درصد تعیین شده و جریمه‌ها و پاداش‌ها بر اساس میزان خوداتکایی اختصاص می‌یابند. در ادامه چهار رکن اصلی امنیت غذایی در سناریو حال حاضر بررسی شده است.



شکل ۴- تغییرات ارکان امنیت غذایی برحسب درصد در وضعیت حال حاضر

سوبسیدهای دولتی در حفظ قیمت کالاهای ضروری وضعیت نسبتاً مناسبی دارد.

در شکل (۴-ب) میزان دسترسی غذا با اعمال جریمه و افزایش قیمت دسترسی کاهش یافته و در حدود ۰/۶ قرار می‌گیرد اما با بهبود وضعیت و اختصاص پاداش‌ها تا ۰/۹ افزایش یافته و به سطح ایده‌آل نزدیک می‌شود. درواقع در رکن دستیابی زمانی به سطح ایده‌آل خواهد رسید که دهک دهم جامعه نیز توانایی دسترسی به غذای کافی را داشته باشد.

پایداری غذا

در رویکرد ارائه شده پایداری تولید غذا مستقیماً با پایداری منابع آبی مرتبط است از این رو باتوجه به اضافه برداشت حدود ۵۰ درصدی نسبت به وضعیت پایدار برداشت از منابع آب در ایران می‌توان گفت این رکن وضعیت مناسبی در ایران ندارد. در شکل (۴-ج) میزان تغییرات شاخص پایداری غذا قابل مشاهده است، که به طور متوسط این مؤلفه مقداری کمتر از ۵۰ درصد را به خود اختصاص می‌دهد.

نسبت به سایر ارکان امنیت غذایی، پایداری غذا در وضعیت مناسبی قرار ندارد و لزوم اصلاح اضافه برداشت از منابع آب به وضوح قابل مشاهده است. در فرمول پایداری تولید غذا میزان برداشت پایدار از منابع آب با مقدار ۴۱ میلیون مترمکعب در سال به عنوان سطح مینا قرار گرفته و با افزایش اضافه برداشت، میزان پایداری تولید غذا کمتر خواهد بود.

همان‌طور که در شکل (۴-الف) قابل مشاهده است متوسط میزان فراهمی غذا براساس گزارش‌های رسمی بیش از ۸۰ درصد به دست می‌آید. تغییرات صعودی و نزولی مدل ناشی از تأثیرات جریمه و پاداش در مدل است که توسط مؤلفه نظارت و ارزیابی در مؤلفه‌های کلیدی اعمال می‌شود. در زمان جریمه مقداری از تولید کاسته شده اما رژیم غذایی در حالت متعادل است؛ با تغییر وضعیت مؤلفه نظارت و ارزیابی به اختصاص پاداش رژیم در حالت افزایش مصرف قرار گرفته و تقاضا غذا به صورت نمایی افزایش می‌یابد که باعث کاهش میزان فراهمی در کشور می‌شود. در ادامه وضعیت رکن دسترسی غذا در سناریو حال حاضر بررسی شده است.

دسترسی غذا

باتوجه به اینکه رکن دسترسی غذا به توانایی مالی افراد جامعه برای دستیابی به غذای مورد نیاز آن‌ها تأکید دارد می‌توان گفت مؤلفه اصلی در این رکن قیمت غذا هست، که تحت تأثیر مستقیم بخش نظارت و ارزیابی در مدل قرار دارد. در فرمول دسترسی غذا میزان هزینه‌ای که سطوح پایین درآمدی جامعه برای غذا پرداخت می‌کنند به عنوان سطح مینا در نظر گرفته شده است و تغییرات قیمت غذا در مدل نسبت به میزان مینا، مقدار دسترسی غذا در جامعه را معین می‌سازد. در شکل (۴-ب) میزان تغییرات دسترسی غذا در سناریو حال حاضر قابل مشاهده است. که این مؤلفه باتوجه به

سلامت تغذیه

سلامت تغذیه متناسب با میزان مصرف متعادل حدود ۲/۷ کیلوگرم (با احتساب ضایعات مصرف غذا) از انواع غذایی در طول روز تعریف می‌شود. از این رو هرچه تغییرات نسبت به رژیم معتدل افزایش داشته باشد مقدار سلامت تغذیه کاهش خواهد یافت. در شکل (۴-د) میزان تغییرات شاخص سلامت تغذیه در سناریو اول قابل مشاهده است، که باتوجه به مصرف متوسط روزانه ۴ کیلوگرم غذا در روز (با احتساب ضایعات مصرف غذا)، رژیم غذایی و به تبع آن سلامت تغذیه در وضعیت مناسبی قرار ندارد.

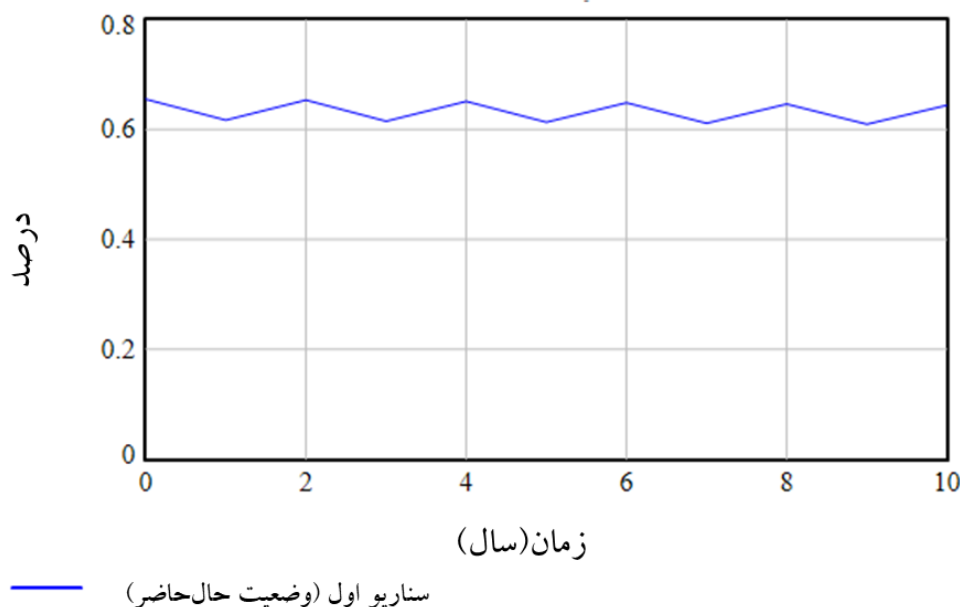
همان‌طور که در شکل (۴-د) مشاهده می‌شود؛ اختصاص جریمه و افزایش قیمت‌ها، باعث کاهش میزان مصرف غذا روزانه و نزدیک شدن به حد متعادل می‌شود و شاخص سلامت تغذیه نیز در وضعیت بهتری قرار می‌گیرد. اما با اختصاص پاداش‌ها قیمت غذا کمتر شده و میزان غذای مورد

استفاده در رژیم غذایی افراد بیشتر خواهد شد که این امر موجب فاصله بیشتر از حد متعادل رژیم غذایی است و نرخ سلامت تغذیه را دچار کاهش می‌کند.

امنیت غذایی

امنیت غذایی به عنوان شاخصی پیچیده و چند بعدی تحت تأثیر چهار رکن اصلی قرار دارد که به وسیله آن‌ها تعریف می‌شود. باین حال، در سیاست‌گذاری‌های حوزه امنیت غذایی، توجه بیشتری به برخی از این ارکان معطوف می‌شود. در وضعیت کنونی کشور، سیاست‌گذاری‌ها بیشتر بر دو بعد فراهمی و دسترسی متمرکز شده‌اند و در بسیاری از موارد، ارکان سلامت تغذیه و پایداری تولید غذا در سیاست‌گذاری امنیت غذایی به طور نسبی مغفول مانده‌اند. وضعیت کنونی امنیت غذایی در کشور باتوجه به سیاست‌گذاری‌های حال حاضر را می‌توان در شکل (۵) مشاهده کرد.

امنیت غذایی



شکل ۵- تغییرات امنیت غذایی در وضعیت حال حاضر

بلندمدت، نمی‌تواند آینده‌ای پایدار برای کشاورزی در ایران تضمین کند (دانشی و عسکری، ۱۴۰۴). بنابراین، در سناریوی کنونی، برای بهبود وضعیت امنیت غذایی، پیشنهاد می‌شود تمرکز سیاست‌ها تنها بر بعد فراهمی و تولید داخلی محدود نشود. بلکه، با بهره‌گیری از سیاست‌های تلفیقی و یکپارچه، باید بهبود در تمامی ارکان امنیت غذایی، از جمله سلامت و پایداری، مورد توجه قرار گیرد. این رویکرد به ارتقای کلی وضعیت امنیت غذایی کمک خواهد کرد.

همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است؛ با وجود وضعیت نسبتاً مناسب کشور در رکن فراهمی، شاخص امنیت غذایی به طور کلی در وضعیت مطلوبی قرار ندارد. این امر بیانگر وضعیت نامناسب شاخص‌های سلامت و پایداری تولید غذا در کشور است. از سوی دیگر، باتوجه به تأکید فراوان سیاست‌گذاران و قوانین، از جمله فصل هفتم برنامه پیشرفت جمهوری اسلامی ایران، بر حفظ خوداتکایی، فشارها بر منابع آب کشور افزایش داشته و همچنان برداشت‌های بیش‌ازحد از منابع آبی ادامه دارد؛ که این امر تهدید جدی برای پایداری منابع آبی کشور به شمار می‌رود. این روند، به‌ویژه در

در این پژوهش، براساس مطالعه پژوهش‌های داخلی انجام شده در حوزه امنیت غذایی، برای نخستین بار تلاش شده است تا امنیت غذایی به‌عنوان شاخصی کمی‌سازی شده در سطح ملی در مدل شارش انبارش بیان شود. ارائه مدل کمی‌سازی شده با قابلیت پیاده‌سازی سناریوهای متفاوت، در فرآیند تصمیم‌سازی و سیاست‌گذاری صحیح در حوزه امنیت غذایی نقش بسیار مهمی خواهد داشت. در تحلیل سناریوی اول، می‌توان گفت باتوجه‌به‌افزافه برداشت حدود ۵۰ درصدی از منابع آب کشور و تأکید سیاست‌گذاران بر حفظ و بهبود خودکفایی، تنها راه‌حل معقول برای کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین در تولید غذا به منظور کاهش مصرف بخش کشاورزی است.

همچنین، باتوجه‌به موقعیت استراتژیک ایران و همسایگی با کشورهای تولیدکننده عمده غذا، مانند: پاکستان، هند و حتی افغانستان، که اخیراً محدودیت‌هایی در انتقال آب‌های سطحی به ایران ایجاد کرده‌اند و سطح اراضی زیر کشت خود را به‌طور قابل توجهی افزایش داده‌اند. ایران می‌تواند خلأ تقاضا غذای خود را از طریق تقویت روابط تجاری و اقتصادی با این کشورها تأمین کند. علاوه‌براین، گسترش کشت فرا سرزمینی نیز، باتوجه‌به تأکیدات برنامه پیشرفت هفتم جمهوری اسلامی، به‌عنوان یک راهکار مؤثر در تأمین امنیت غذایی کشور پیشنهاد می‌شود (امینی‌زاده، ۱۴۰۱).

از منظر برخی تحلیل‌گران و صاحب‌نظران، اتکای گسترده به واردات مواد غذایی از سایر کشورها ممکن است از لحاظ راهبردی و سیاسی به‌عنوان نقطه‌ضعف تلقی شود (نخلی و باستانی، ۱۴۰۴). بااین‌حال، باید توجه داشت که بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به‌منظور تأمین بیش از ۸۰ درصد از نیازهای غذایی کشور و در پی آن، تشدید پدیده فرونشست زمین، تهدیدی به‌مراتب جدی‌تر از منظر امنیت راهبردی محسوب می‌شود. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاری‌ها به‌گونه‌ای تدوین شوند که ضمن بهبود هم‌زمان وضعیت واردات و ارتقای فناوری‌های مرتبط، تمامی ابعاد و مؤلفه‌های امنیت غذایی نیز به‌صورت جامع مورد توجه قرار گیرند تا پایداری این شاخص حیاتی در سطح ملی تقویت شود.

نتیجه‌گیری

مسئله امنیت غذایی در ایران، به‌ویژه در بستر بحران‌های فزاینده محیط‌زیستی و محدودیت منابع تولید، دیگر چالشی برای تولید یا معضلی برای توزیع نیست، بلکه به مسئله‌ای ساختاری و مفهومی در حوزه حکمرانی منابع تبدیل شده است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد امنیت غذایی در ایران تحت تأثیر مستقیم برهم‌کنش‌های پیچیده میان عوامل متعددی چون منابع آب، تغییرات اقلیم، ساختار بهره‌برداری کشاورزی، سیاست‌های حمایتی و رفتار مصرف‌کنندگان قرار دارد.

چارچوب مفهومی و مدل پویایی سیستم ارائه شده در پژوهش حاضر، امکان تحلیل نظام‌مند و بازخورد محور از وضعیت موجود امنیت غذایی در ایران را فراهم می‌سازد. بر اساس نتایج حاصل از اجرای مدل در سناریوی وضعیت حال حاضر، که بیانگر وضعیت فعلی سیاست‌گذاری در حوزه امنیت غذایی است، تمرکز اصلی نظام تصمیم‌گیری کشور بر حفظ خوداتکایی و بهبود شاخص فراهمی غذا از طریق افزایش تولید داخلی و تداوم سیاست‌های حمایتی و یارانه‌ای معطوف بوده است. رویکرد حال حاضر اگرچه در کوتاه‌مدت به ثبات نسبی قیمت و دسترسی عمومی به مواد غذایی انجامیده، اما به دلیل فقدان نظارت مؤثر بر الگوی مصرف و کیفیت تغذیه، رکن «سلامت تغذیه» را تا حد زیادی مغفول مانده است.

علاوه‌براین، برداشت‌های بیش از حد از منابع تولید، به‌ویژه منابع آب سطحی و زیرزمینی، که در حال حاضر بیش از دو برابر سطح پایدار برداشت از منابع برآورد می‌شود، نشان‌دهنده تضعیف جدی رکن «پایداری غذا» در نظام امنیت غذایی کشور است. در چنین شرایطی، اتکای صرف به سیاست‌های افزایش تولید بدون ملاحظه تعاملات میان چهار رکن اصلی امنیت غذایی، می‌تواند در بلندمدت به کاهش تاب‌آوری و بروز بحران‌های محیط‌زیستی و تغذیه‌ای بی‌انجامد. بنابراین، ضرورت دارد مطالعات و مدل‌سازی‌های آینده با رویکردی جامع و سیستمی، و بر اساس تعریف رسمی امنیت غذایی که شامل فراهمی، دسترسی، پایداری و سلامت تغذیه است، طراحی شوند تا از تمرکز بخشی سیاست‌ها بر یک مؤلفه خاص جلوگیری و زمینه تصمیم‌گیری‌های یکپارچه و پایدار فراهم شود. چارچوب مفهومی ارائه شده با بهره‌گیری از داده‌های رسمی و روابط علمی استخراج شده از پژوهش‌های بین‌المللی، چهار رکن اصلی امنیت غذایی فراهمی، دسترسی، پایداری و سلامت تغذیه را به‌صورت تعاملی و سیستماتیک مدل‌سازی می‌کند و امکان بررسی اثرات سیاست‌ها را در سناریوهای مختلف و امکان مشاهده تغییرات محیطی را به صورت بازخورد محور فراهم می‌سازد. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با تمرکز بر یکپارچه‌سازی ابعاد چهارگانه امنیت غذایی و طراحی مدل‌هایی مبتنی بر داده، به‌صورت به‌هنگام در قالب ارائه نرم‌افزار و یا وبسایتی برخط به منظور پایش به‌هنگام وضعیت امنیت غذایی در سطوح خرد مناطق مختلف کشور انجام شوند.

منابع

احسان، اسماعیل شاه. (۱۴۰۰). مدل‌سازی و ارزیابی مدیریت بهینه مصرف آب در بخش کشاورزی با استفاده از نرم‌افزار WEAP (مطالعه موردی: ولسوالی انجیل، ولایت هرات). نشریه جامی ساینتیفیک ریسرچ کوارترلی (Jami Scientific Research Quarterly Journal)، ۷(۴)، ۳۳-۵۴. <https://doi.org/10.61438/jsrqj.v7i4.12>.
افروغ، بهنوش، بابائیان، ایمان و مفیدی، عباس. (۱۴۰۴). مطالعه فرین‌های بارشی نیمه شرقی کشور در دوره ۲۰۲۴-

۱۹۷۷ و تاثیر دما بر بر حداکثر بارش یک روزه. نشریه نیوار. ۴۹ (۱۲۸-۱۲۹)، ۱۴۱-۱۵۳.

<https://doi.org/10.30467/nivar.2025.513157.132>

افشین سلطانی، اسکندر زند، سید مجید عالی مقام، علیرضا نه بندانی، حسین بارانی، الیاس سلطانی. (۱۴۰۰). تحلیل امنیت غذایی کشور تا ۲۰۵۰ با مدل سازی همبست آب، زمین، غذا و محیط زیست: چشم انداز و سیاست های لازم. هفدهمین کنگره علوم خاک ایران و چهارمین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه "تجدید حیات حکیمانه خاک و حکمروائی حکیمانه آب". دانشگاه گیلان، رشت. ایران.

<https://civilica.com/doc/1312810>

امینی زاده، میلاد. (۱۴۰۱). راهبردهای مؤثر و تعیین کننده در کشت فراسرزمینی دانه های روغنی و نهاده های دامی. ماهنامه علمی «امنیت اقتصادی»، ۱۰(۱.۲)، ۳۳-۴۸.

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17354188.1401.1>

0.1.4.3

ترابی، سارا. (۱۴۰۰). اثر بهبود دهنده میدان شعوری فرا درمانی بر *Triticum Aestivum L.* تحت تنش شوری، نشریه کازموایمنتل، ۱(۷)، ۱۱۰-۱۲۳.

<https://doi.org/10.61450/joci.fa.v1i7.136>

تیشه یار، ماندانا. (۱۴۰۰). جایگاه دیپلوماسی علمی در تأمین امنیت ملی در روابط ایران و افغانستان. فصلنامه علمی - پژوهشی غالب، ۱۰(۲)، ۵۳-۶۸.

<https://doi.org/10.58342/v10i2.47>

خیراللهی، هادی. (۱۳۹۸). طراحی مدل ارتقا نگرش مشتریان محصولات غذایی ارگانیک در ایران. مطالعات رفتار مصرف کننده، ۸(۲)، ۱۷۶-۱۹۹.

<https://doi.org/10.34785/j018.2021.945>

دانشی، نواب و عسکری، علی اصغر. (۱۴۰۴). مروری بر قانون ها و آیین نامه های کشاورزی ارگانیک در ایران. مجله پژوهش های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۰(۱)، ۶۵-۴۵.

https://srj.asnr.ias.ac.ir/article_218190_380f76

[e3b90a6cc20ec4be2fa4f5ef29.pdf](https://doi.org/10.34785/j018.2021.945)

خاتمی، سیده سمیه، بوزرجمهری، خدیجه، زرین، آذر، و فال سلیمان، محمود. (۱۴۰۱). واکاوی مطالعات مدیریت منابع آب در ایران و جهان، نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۴۲)، ۲۷۱-۲۵۱. magiran.com/p2503375

صفوی، حمید رضا، کلانتری، محمد، و حداد، امید بزرگ. (۱۳۹۹). مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از الگوریتم جفت گیری زنبور عسل. مهندسی عمران، ۳۴.۲ (۲۰۱)، ۱۳۱-۱۲۱.

<https://doi.org/10.24200/j30.2018.2188.2130>

طاهرآبادی، فائزه، معتمد، محمد، و خالدیان، محمدرضا. (۱۳۹۶). تحلیل موانع و مشکلات مدیریت آب کشاورزی

در دستیابی به توسعه پایدار مورد: شهرستان های کنگاور و صحنه در استان کرمانشاه، فصلنامه اقتصاد فضا و توسعه روستایی، ۵(۱۷)، ۵۷-۷۰. <https://doi.org/10.18869/acadpub.serid.5.17.57>

نخلی، سید رضا، و باستانی، مهدی. (۱۴۰۴). تحلیل راهبردی تامین امنیت غذایی ایران با تاکید بر تولید داخلی محصولات کشاورزی، فصلنامه اقتصاد دفاع و توسعه پایدار، ۱۰(۳۵)، ۲۹-۵۹.

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.30607531.1404.10.35.2.6>

نه بندانی، علیرضا، سعادت، مجتبی، گودرزی، مهدی، و سلطانی، افشین. (۱۴۰۰). تاثیر تغییر اقلیم بر امنیت غذایی ایران: پیش بینی پتانسیل عملکرد و تولید گیاهان زراعی استراتژیک کشور با استفاده از مدل SSM-Crop2. به زراعی کشاورزی (مجله کشاورزی پردیس ابوریحان)، ۲۳(۴)، ۸۷۱-۸۸۲.

<https://sid.ir/paper/1059236/fa>

Asaadi, M. A., Mortazavi, S. A., Zamani, O., Najafi, G., Yusaf, T., & Hoseini, S. S. (2019). The Impacts of Water Pricing and Non-Pricing Policies on Sustainable Water Resources Management: A Case of Ghorveh Plain at Kurdistan Province, Iran. *Energies*, 12(14), 2667. <https://doi.org/10.3390/en12142667>

Ball, B. C., Hargreaves, P., & Watson, C. A. (2017). A Framework of Connections Between Soil and People Can Help Improve Sustainability of the Food System and Soil Functions. *Ambio*, 47(3), 269-283. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0965-z>

Bilali, H. El, Callenius, C., Strassner, C., & Probst, L. (2018). Food and Nutrition Security and Sustainability Transitions in Food Systems. *Food and Energy Security*, 8(2), e00154. <https://doi.org/10.1002/fes3.154>

Bíziková, L., Jungcurt, S., McDougal, K., & Tyler, S. (2020). How Can Agricultural Interventions Enhance Contribution to Food Security and SDG 2.1?, *Global Food Security*, 26, 100450. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100450>

Breeman, G. E., Dijkman, J., & Termeer, C. J. A. M. (2015). Enhancing Food Security Through a Multi-Stakeholder Process: The Global Agenda for Sustainable Livestock. *Food Security*, 7(3), 597-609. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0430-4>

- Indardi, & Nugroho, R. B. (2021). Farmers' Motivation in Organic Rice Farming in Gempol Village, Karanganyar District, Klaten Regency. Paper presented at the International Conference on Agribusiness and Rural Development (IConARD 2020) at Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Yogyakarta, Indonesia, 232, 01026 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123201026>
- Iqbal, M. (2023). Member Perception of Cassava Farmer Group Performance in Sungai Buluh Utara Village, Batang Anai District, Padang Pariaman Regency. *Journal Agrisep Kajian Masalah Sosial Ekonomi Pertanian Dan Agribisnis*, 22(2), 447-466. <https://doi.org/10.31186/jagrisep.22.02.447-466>
- Jafari, L., Asadi, S., & Asgari, A. (2022). Temporal and Regional Shifts of Crop Species Diversity in Rainfed and Irrigated Cropland in Iran. *Plos One*, 17(3), e0264702. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264702>
- Jafaria, L., Asadi, S., & Asgari, A. (2021). Regional Shifts of Crop Species Diversity in Rainfed and Irrigated Cultivation in Iran. *Research Square*, 44(2), 174-182. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-520570/v1>
- Karandish, F., & Hoekstra, A. Y. (2017). Informing National Food and Water Security Policy Through Water Footprint Assessment: The Case of Iran. *Water*, 9(11), 831. <https://doi.org/10.3390/w9110831>
- Kc, B., Schultz, B., & Prasad, K. (2010). Water Management to Meet Present and Future Food Demand. *Irrigation and Drainage*, 60(3), 285-297. <https://doi.org/10.1002/ird.584>
- Khatri, D., Shrestha, K. K., Ojha, H., Paudel, G., Paudel, N. S., & Pain, A. (2016). Reframing Community Forest Governance for Food Security in Nepal. *Environmental Conservation*, 44(2), 174-182. <https://doi.org/10.1017/s0376892916000369>
- Kuchenbecker, J., Reinbott, A., Mtimuni, B., Krawinkel, M. B., & Jordan, I. (2017). Nutrition Education Improves Dietary Diversity of Children 6-23 Months at Community-Level: Results From a Cluster Randomized Controlled
- Carlile, R., Kessler, M. J., & Garnett, T. (2021). What Is Food Sovereignty?. *Tiny Beam Fund*, 24(1), 3-12. <https://doi.org/10.56661/f07b52cc>
- Chen, X., Cui, Z., Vitousek, P. M., Cassman, K. G., Matson, P. A., Bai, J., Meng, Q., Hou, P., Yue, S., Römhild, V., & Zhang, F. (2011). Integrated Soil-crop System Management for Food Security. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(16), 6399-6404. <https://doi.org/10.1073/pnas.110149108>
- Cheng, K., Fu, Q., Li, T., Jiang, Q., & Liu, W. (2015). Regional Food Security Risk Assessment Under the Coordinated Development of Water Resources. *Natural Hazards*, 78(1), 603-616. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1735-5>
- Dagunga, G. (2021). Conservation Agricultural Practices: Determinants and Effects on Soil Health for Sustainable Production in Northern Ghana. *Review of Agricultural and Applied Economics*, 24(1), 3-12. <https://doi.org/10.15414/raae.2021.24.01.03-12>
- El Baroudy, A. A., Ali, A. M., Mohamed, E. S., Moghanm, F. S., Shokr, M. S., Savin, I. Yu., Poddubsky, A., Ding, Z., S. Kheir, A. M., Aldosari, A., Elfadaly, A., Dokukin, P., & Lasaponara, R. (2020). Modeling Land Suitability for Rice Crop Using Remote Sensing and Soil Quality Indicators: The Case Study of the Nile Delta. *Sustainability*, 12(22), 9653. <https://doi.org/10.3390/su12229653>
- Fazeli-Nasab, B. (2015). The importance and role of indigenous and indigenous germplasm in food security and ways to prevent genetic erosion. *Technical Report*, 17(3), 174-182. <https://doi.org/10.13140/rg.2.1.4449.0727>
- Friedrichsen, C. N., Daroub, S. H., Monroe, M. C., Stepp, J. R., & Wani, S. P. (2018). Mental Models of Soil Management for Food Security in Peri-Urban India. *Urban Agriculture & Regional Food Systems*, 3(1), 1-9. <https://doi.org/10.2134/urbanag2017.08.0002>
- Huang, T., & Huang, Q. (2023). Research on Agricultural and Rural Public Governance and Sustainable Development: Evidence From 2350 Data. *Sustainability*, 15(10), 7876 <https://doi.org/10.3390/su15107876>

- Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(25), e2024221118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2024221118>
- Oldfield, E. E., Bradford, M. A., & Wood, S. A. (2018). Global Meta-Analysis of the Relationship Between Soil Organic Matter and Crop Yields. *SOIL Discussions*, 2(2), 1–29. <https://doi.org/10.5194/soil-2018-21>
- Pirafzali Zefrehei, A. R., Kolahi, M., & Fisher, J. (2022). Ecological-Environmental Challenges and Restoration of Aquatic Ecosystems of the Middle-Eastern. *Scientific Reports*, 12, 17150. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21465-0>
- R, M. V., Ammal, U. B., & Dey, P. (2021). Influence of Soil Test Crop Response Based Organic Manure and Inorganic Fertilizers on Yield of Okra (*Abelmoschus Esculentus* L. Moench). *Journal of Natural Resource Conservation and Management*, 2(2), 110–113. <https://doi.org/10.51396/anrcm.2.2.2021.110-113>
- Rasul, G., & Sharma, B. (2015). The Nexus Approach to Water–energy–food Security: An Option for Adaptation to Climate Change. *Climate Policy*, 16(6), 682–702. <https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1029865>
- Rijsberman, F. R. (2006). Water scarcity: fact or fiction?. *Agricultural water management*, 80(1–3), 5–22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.001>
- Ristić, L., Despotović, D., & Dimitrijević, M. (2020). Multifunctionality of Agriculture as a Significant Factor for Sustainable Rural Development of the Republic of Serbia. *Economic Themes*, 58(1), 23–38. <https://doi.org/10.2478/ethemes-2020-0002>
- Rojas, R. V., Achouri, M., Maroulis, J., & Caon, L. (2016). Healthy Soils: A Prerequisite for Sustainable Food Security. *Environmental Earth Sciences*, 75(3), 180. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5099-7>
- Seidou, O., Maiga, F., Ringler, C., Kalčić, Š., & Ferrini, L. (2020). Challenges and Opportunities in the Operationalization of the Water-Environment-Energy-Food (WE2F) Nexus: Case Study of the Upper Niger Basin and Inner Niger Delta, West Africa. Presented at the 3rd International Trial in Malawi. *PLOS ONE*, 12(4), e0175216 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175216>
- Maroufpoor, S., Bozorg-Haddad, O., Maroufpoor, E., Gerbens-Leenes, P. W., Loáiciga, H. A., Savić, D., & Singh, V. P. (2021). Optimal Virtual Water Flows for Improved Food Security in Water-Scarce Countries. *Scientific Reports*, 11, 21027. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00500-6>
- McConville, J., Drangert, J.-O., Tidåker, P., Neset, T.-S., Rauch, S., Strid, I., & Tonderski, K. (2015). Closing the Food Loops: Guidelines and Criteria for Improving Nutrient Management. *Sustainability Science Practice and Policy*, 11(1), 33–43. <https://doi.org/10.1080/15487733.2015.11908144>
- Mesgaran, M. B., Madani, K., Hashemi, H., & Azadi, P. (2017). Iran's Land Suitability for Agriculture. *Scientific Reports*, 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08066-y>
- Mitra, B. K., Sharma, D., Kuyama, T., Pham, B. N., Tarekul Islam, G. M., & Mai Thao, P. T. (2020). Water-Energy-Food Nexus Perspective: Pathway for Sustainable Development Goals (SDGs) to Country Action in India. *Apn Science Bulletin*, 10(1), 258–275. <https://doi.org/10.30852/sb.2020.1067>
- Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M. A., & Kijne, J. (2010). Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural water management*, 97(4), 528–535. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.023>
- Mugandani, R., Mwadzingeni, L., & Mafongoya, P. (2021). Contribution of Conservation Agriculture to Soil Security. *Sustainability*, 13(17), 9857. <https://doi.org/10.3390/su13179857>
- Nawaz, A., Farooq, M., Ul-Allah, S., Gogoi, N., Lal, R., & M. Siddique, K. H. (2020). Sustainable Soil Management for Food Security in South Asia. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 258–275. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00358-z>
- Noori, R., Maghrebi, M., Mirchi, A., Tang, Q., Bhattarai, R., Sadegh, M., Noury, M., Haghighi, A. T., Kløve, B., & Madani, K. (2021). Anthropogenic Depletion of Iran's Aquifers.

- Wu, Q., Guan, X., Zhang, J., & Xu, Y. (2019). The Role of Rural Infrastructure in Reducing Production Costs and Promoting Resource-Conserving Agriculture. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(18), 3493. <https://doi.org/10.3390/ijerph16183493>
- Xia, L., He, J., Zhang, F., Shen, Q., Wu, J., Young, I. M., O'Donnell, A. G., Wang, L., Wang, E., Hill, J. E., & Chen, D. (2020). Healthy Soils for Sustainable Food Production and Environmental Quality. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 7(3), 352–358. <https://doi.org/10.15302/j-fase-2020339>
- Yadav, S. L., Birla, D., Inwati, D. K., Yadav, M., Yadav, I. R., Makwana, S. N., Lakshman, & Papnai, N. (2023). Impact of Agrochemicals on Soil Biota and Ways to Mitigate It: A Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(5), 202–215. <https://doi.org/10.9734/ijeccc/2023/v13i51779>

پی‌نوشت‌ها

- 1- Food and Agriculture Organization
- 2- Water Energy and Food Nexus
- 3- WEAP
- 4- Causal Loops Diagrams
- 5- Stock & Flow
- 6- Vensim
- 7- Availability
- 8- Accessibility
- 9- Stability
- 10- Utilization
- 11- Flow parameters
- 12- Stock parameters
- 13- FAO Food Systems Model
- 14- Global Agro-ecological Zones
- 15- The Organisation for Economic Co-operation and Development
- 16- Auxiliary
- 17- Global Food Security Index
- 18- Water-Food Nexus Models

- Conference on Water-Energy-Food Nexus (WEF 2020). at Sapienza University of Rome, Rome, Italy. 183, 02001 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018302001>
- Shams, A. K., & Muhammad, N. S. (2021). Toward Sustainable Water Resources Management: Critical Assessment on the Implementation of Integrated Water Resources Management and Water-energy-food Nexus in Afghanistan. *Water Policy*, 23(4), 825–848. <https://doi.org/10.2166/wp.2021.072>
- Shojaei-Miandoragh, M., Bijani, M., & Abbasi, E. (2019). Farmers' Resilience Behaviour in the Face of Water Scarcity in the Eastern Part of Lake Urmia, Iran: An Environmental Psychological Analysis. *Water and Environment Journal*, 33(4), 613–622. <https://doi.org/10.1111/wej.12489>
- Sumsion, R. M., June, H. M., & Cope, M. R. (2023). Measuring Food Insecurity: The Problem With Semantics. *Foos*, 12(9), 1816. <https://doi.org/10.3390/foods12091816>
- Tan, W., Zhang, Y., He, X.-S., Xi, B., Gao, R., Mao, X., Huang, C., Zhang, H., Li, D., Liang, Q., Cui, D., & Alshawabkeh, A. N. (2016). Distribution Patterns of Phthalic Acid Esters in Soil Particle-Size Fractions Determine Biouptake in Soil-Cereal Crop Systems. *Scientific Reports*, (6), 31987. <https://doi.org/10.1038/srep31987>
- Upton, J., Cissé, J. D., & Barrett, C. (2016). Food Security as Resilience: Reconciling Definition and Measurement. *Agricultural Economics*, 47(S1), 135–147. <https://doi.org/10.1111/agec.12305>

Document Type

Case Study

مطالعه موردی

نوع مقاله

Assessing the Economic Value of Water in Basic Industries for Water Tariff Determination (Case Study: Zayandehroud Basin)

Sh. Ghobadi¹, A. Moridi^{2*}, R. Khalili³

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Environmental Engineering – Water and Wastewater, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Department of Water, Wastewater and Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3- Ph.D. Student, Department of Water, Wastewater and Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

* Corresponding, Author Email: a_moridi@sbu.ac.ir

Received ▶ 06-09-2025
Revised ▶ 30-11-2025
Accepted ▶ 04-12-2025
Available online ▶ 16-03-2026

بررسی ارزش اقتصادی آب در صنایع پایه به منظور تعیین تعرفه آب (مطالعه موردی: حوضه زاینده رود)

شهرام قبادی^۱، علی مریدی^{۲*}، رضا خلیلی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی محیط زیست – آب و فاضلاب، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و مهندسی محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

* رایانامه نویسنده مسئول: a_moridi@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت ▶ ۱۴۰۴/۰۶/۱۵
تاریخ بازنگری ▶ ۱۴۰۴/۰۹/۰۹
تاریخ پذیرش ▶ ۱۴۰۴/۰۹/۱۳
تاریخ انتشار ▶ ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

Abstract

Estimating the economic value of water plays a fundamental role in the efficient management of water resources and in making informed decisions for water supply planning. It is regarded as one of the main pillars in resource allocation, the design of pricing systems, and the development of sustainable water markets. In this study, the economic value of water was estimated using the Residual Value Method, based on data from the Statistical Center of Iran's Census plan for industrial enterprises with 10 or more employees during the years 2002 to 2019. The results indicate that the economic value of water varies significantly across major industrial sectors in the Zayandeh-Rud Basin, with an average value of 5,254,702 rials per cubic meter, based on the producer price index, for the year 2024. These findings can be considered in the economic assessments of water supply projects for large industries in the basin. Furthermore, according to the research results, the average cost of water in the industrial production process was less than 0.2% of total production costs, and the ratio of this cost to the economic value of water estimated to be below 0.02. These findings highlight the necessity for a review of the industrial water pricing system, the enhancement of statistical data quality in the industrial sector, and the incorporation of the true economic value of water into water allocation and investment policies in the country.

Keywords: Water Resource Management, Water Scarcity, Valuation, Zayandehroud Basin, Large Industries.

چکیده

برآورد ارزش اقتصادی آب نقش بنیادینی در مدیریت کارآمد منابع آب و تصمیم‌گیری‌های آگاهانه در برنامه‌ریزی تأمین آب ایفا می‌کند و به‌عنوان یکی از ارکان اصلی در تخصیص منابع، طراحی نظام‌های قیمت‌گذاری و توسعه بازارهای پایدار آب در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، ارزش اقتصادی آب با استفاده از روش ارزش باقیمانده بر اساس داده‌های طرح سرشماری مرکز آمار ایران برای کارگاه‌های صنعتی با ۱۰ نفر کارکن و بیشتر، در سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۸، برآورد شد. نتایج نشان می‌دهد ارزش اقتصادی آب در بخش‌های مختلف صنایع حوضه، به‌طور قابل توجهی متفاوت بوده و میانگین آن بر اساس شاخص قیمت تولید کننده، برای سال ۱۴۰۳، معادل ۵,۲۵۴,۷۰۲ ریال به ازای هر مترمکعب برآورد می‌شود. این یافته‌ها می‌تواند در ملاحظات اقتصادی طرح‌های تأمین آب صنایع بزرگ حوضه زاینده‌رود، مدنظر قرار گیرد. همچنین بر اساس نتایج پژوهش، هزینه پرداختی برای آب در فرایند تولید صنعتی به‌طور میانگین کمتر از ۰/۲ درصد کل هزینه‌های تولید بوده و نسبت آن به ارزش اقتصادی آب کمتر از ۰/۰۲ درصد برآورد شده است. این نتایج بر لزوم بازنگری در نظام قیمت‌گذاری آب صنعتی، ارتقای کیفیت داده‌های آماری بخش صنعت و لحاظ ارزش واقعی آب در سیاست‌گذاری‌های تخصیص و سرمایه‌گذاری آبی کشور تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت منابع آب، کمبود آب، ارزش‌گذاری، حوضه زاینده‌رود، صنایع بزرگ.

How to cite this article:

Ghobadi, Sh., Moridi, A., & Khalili R. (2026). Assessing the Economic Value of Water in Basic Industries for Water Tariff Determination (Case Study: Zayandehroud Basin). Journal of Water and Sustainable Development, 12(4), 141-158. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i4.2509-1456>

به خصوص از منابع غیرمتعارف آب از جمله انتقال آب از خلیج فارس و دریای عمان و طرح های استفاده مجدد از آب، معطوف شود.

استفاده از آب در صنعت سبب ایجاد ارزش افزوده در محصول نهایی یا خدمات می شود و این ارزش افزوده در واقع، ارزش آبی است که در این فرآیند استفاده می شود و نشان دهنده پرداخت مؤثر توسط مصرف کنندگان برای استفاده از منابع است. دانستن ارزش اقتصادی آب امکان مدیریت مناسب و کارآمد آب را فراهم می کند (Meran و همکاران، ۲۰۲۱)؛ زیرا ابزاری فن محور را برای سرمایه گذاری های آینده در اختیار تصمیم گیرندگان مسائل آب قرار می دهد که یکی از مؤلفه های اصلی در بودجه زیرساخت های عمومی است. همچنین، امکان تعیین اینکه جامعه (شرکت ها) از پروژه های آب رسانی منتفع می شوند را فراهم می کند و در نهایت ارزش گذاری اقتصادی آب در ارزیابی طراحی و اجرای سیاست های عمومی مفید است، نه لزوماً از نظر سرمایه گذاری در ساخت و ساز بلکه مدیریت کارآمدتر آب. در ایران، مطالعات متعددی برای بررسی ارزش اقتصادی آب در مصارف خانگی و کشاورزی انجام شده است. باین حال گسترش این پژوهش ها به بخش صنعت بسیار محدود بوده است، در حالی که ارزش گذاری اقتصادی آب در بخش صنعت، برای اتخاذ تصمیمات مدیریت منابع آب، بسیار ضروری و مهم است. اهمیت این موضوع در حوضه زاینده رود باتوجه به استقرار صنایع بزرگ استراتژیک و مسائل کمیابی منابع آب؛ دوچندان شده است. لذا هدف از این مقاله محاسبه ارزش پولی آب در تولید محصولات صنایع بزرگ حوضه زاینده رود است که همچنین امکان مقایسه ارزش های متفاوت آب در صنایع مختلف را نیز فراهم می کند. تعیین ارزش اقتصادی آب در صنایع بزرگ حوضه زاینده رود نه تنها تمام منافع بالقوه فوق را در بردارد بلکه به طور ویژه می تواند به دقت در ملاحظات اقتصادی طرح های توسعه منابع آب و همچنین استفاده از منابع غیرمتعارف در این صنایع کمک نماید. در خصوص کارهای قبلی که در زمینه ارزش گذاری اقتصادی آب در مصارف صنعتی انجام شده است می توان به مطالعات انجام شده مهندسین مشاور یکم، (۱۳۹۲) اشاره کرد که مربوط به کار مشاور یکم در سال ۱۳۹۱ است. در آن مطالعه بر اساس داده های صنعت در بازه سال های ۱۳۸۵-۱۳۸۰، میزان متوسط ارزش اقتصادی آب در بخش صنعت حوضه گاوخونی برآورد شده است. در مطالعات دیگری که تحت عنوان پروژه مدیریت یکپارچه رودخانه زاینده رود در سال های ۱۳۸۹-۱۳۹۴ انجام شده است در گزارش مهندسین مشاور اینتر ۳، (۱۳۹۲) در خصوص ارزش اقتصادی آب، برای برآورد ارزش اقتصادی آب در بخش صنعت حوضه زاینده رود از تعمیم نمونه های جهانی استفاده شده است و محاسباتی در این زمینه به شکل مختص منطقه و به تفکیک شاخه های صنعت انجام نشده است. به این ترتیب کار ارزش گذاری اقتصادی آب در مصارف

منابع جهانی آب، به دلیل افزایش تقاضا با کمبود شدید مواجه شده اند. شهرنشینی سریع در سراسر جهان نگرانی ها را در مورد کمبود آب تشدید می کند. موضوعاتی چون رشد فزاینده جمعیت (Abbas و همکاران، ۲۰۲۳)، عدم ثبات در مدیریت آب (Elmulthum و همکاران، ۲۰۲۳)، چارچوب های نظارتی ناقص (Parra-orobio و همکاران، ۲۰۲۳)، زیرساخت های ناکافی، عدم استفاده بهینه از آب و افزایش رقابت برای منابع آب در حوزه های مختلف جمعیت (Vadez و همکاران، ۲۰۲۳)، همگی نقش های حیاتی در کمبود آب دارند. از سوی دیگر، آلودگی منابع آب به تهدید دیگری برای تأمین آب تبدیل شده است (Mishra و همکاران، ۲۰۲۳). آب یکی از عمده ترین مواد مصرفی در صنعت تولید است، اما عدم آگاهی از ارزش آن می تواند مشکلات کمبود این منبع را افزایش داده و اتخاذ تصمیمات آگاهانه در مدیریت فرآیندهای اقتصادی را دچار اختلال نماید. از این رو (Irfeey و همکاران، ۲۰۲۳) نیاز فوری جهانی به حفظ منابع آب و اهمیت درک مصرف کنندگان از ارزش واقعی آب به منظور درک اهمیت و کمبود آن را مورد تأکید قرار داده است. در بیشتر کشورهای در حال توسعه، آب بهای پرداختی در بخش های مختلف مصرف آب، از جمله در فرآیندهای تولید صنعتی، لزوماً نشان دهنده کمبود آب در حوضه های آبریز و یا منعکس کننده هزینه های استحصال، انتقال و تصفیه آب نیست، بنابراین، هزینه آب به درستی محاسبه نمی شود (Revollo-Fernández و همکاران، ۲۰۱۸).

محدودیت منابع آبی در ایران و مشکلات پیش روی تأمین منابع آب جدید باعث شده است اهمیت این نهاد در تولید بیشتر مورد توجه قرار گیرد. حوضه آبریز زاینده رود یکی از مهم ترین حوضه های آبریز ایران است (Enteshari و همکاران، ۲۰۲۰). این حوضه با اهمیت اجتماعی-اقتصادی بالا در دهه های اخیر با مسائل کمیابی منابع آب مواجه بوده است. کم آبی باعث تداوم بحران در این حوضه در طی دو دهه گذشته شده است. تداوم این بحران حتی در سال های با میزان بارش نرمال یا بیش از نرمال نشان می دهد این بحران نه موقتی و نه ناشی از خشک سالی است. این یک بحران دائمی است که منطقه مرکزی کشور را از نظر اکولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی تهدید می کند (Ziaei، ۲۰۲۰). از سوی دیگر، صنعت استان اصفهان و به ویژه صنایع بزرگ حوضه زاینده رود که سهم قابل توجهی از ارزش ستانده صنعت تولید محصولات کارخانه ای کشور را به خود اختصاص داده اند؛ در زمره صنایع بزرگ آب بر قرار دارند و بخش قابل توجهی از مصرف آب حوضه به این صنایع اختصاص یافته است؛ بنابراین، تلاش ها برای حفظ و پایداری این صنایع در شرایط کمبود آب در حوضه زاینده رود سبب شده است تا توجه سیاست ها به گزینه های استحصال آب از منابع جدید و

صنعتی، در حوضه زاینده رود با استفاده از داده‌های آماری صنعت در بازه زمانی ۱۳۸۱-۱۳۹۸ با استفاده از روش باقیمانده برای کل صنعت استان اصفهان و همچنین به تفکیک چهار کد ISIC دورقمی، برای اولین بار توسط این مطالعه انجام شده است و سابقه قبلی ندارد. از سوی دیگر، باتوجه به اینکه در زمینه تعیین ارزش اقتصادی آب صنعتی، مطالعات اندکی در مناطق مختلف کشور انجام شده است و در نتیجه، داده‌های محدودی نیز در این خصوص وجود دارد؛ این امر امکان انجام مطالعات جامع باهدف بررسی زمینه‌های اصلاح ساختار تعرفه آب و افزایش بهره‌وری آب کشور را محدود یا ناممکن می‌سازد. لذا این مطالعه که به نوبه خود یکی از اولین مطالعات با این هدف بوده است و در صورت انجام مطالعات مشابه آینده برای سایر مناطق کشور، می‌توانند داده‌های لازم را برای مطالعات ملی در این زمینه که سهم مهمی در سوگیری صحیح سیاست‌های اصلاحی در مدیریت آب کشور دارد؛ را فراهم نموده و به این ترتیب خلأ موجود را کاهش داده و مرتفع نمایند. در همین راستا، این پژوهش تلاش نموده است تا با برآورد ارزش آب برای صنعت تولید در حوضه رودخانه زاینده رود به عنوان یک منطقه که تحت استرس نسبی آب به همراه توسعه اقتصادی - اجتماعی قرار دارد، شکاف مطالعاتی موجود را تا حدی پرنماید.

مرور ادبیات

در ارزش گذاری اقتصادی آب، به دلیل تنوع شرایط مکانی، نوع کاربری و هدف تصمیم‌گیری، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. Gibbons (۱۹۸۶) بر مبنای نوع کاربری، هفت گروه مصرف آب شامل شهری، آبیاری، صنعتی، جذب آلاینده، تفریحی، ناوبری و نیروگاه‌های برق‌آبی را معرفی کرده است. Loomis و Young (۲۰۱۴). نیز با رویکردی نظام‌مند، روش‌های ارزش گذاری را به دودسته کلی استقرایی^۱ و قیاسی^۲ تقسیم کرده‌اند. در روش‌های استقرایی از داده‌های مشاهداتی و تکنیک‌های آماری برای استنتاج استفاده می‌شود؛ مانند روش مشاهدات بازار^۳، توابع تولید و هزینه^۴، هزینه سفر^۵ (TCM)، ارزش هدانیک^۶ (HPM)، رفتار دفاعی^۷، هزینه خسارت^۸، ارزش گذاری مشروط^۹ (CVM)، مدل سازی انتخاب^{۱۰} (CM)، تقاضای آب شهری^{۱۱}، انتقال فایده^{۱۲} و انتقال تابع فایده/فرا تحلیل^{۱۳}. در مقابل، روش‌های قیاسی مبتنی بر مدل سازی نظری و فرضیات رفتاری (نظیر حداکثر سازی سود) هستند که شامل روش‌های باقیمانده^{۱۴}، برنامه ریزی ریاضی^{۱۵}، ارزش افزوده^{۱۶}، تعادل عمومی قابل محاسبه^{۱۷} (CGE) و هزینه جایگزین^{۱۸} می‌باشند. مطالعات بین‌المللی متعددی در زمینه ارزش گذاری اقتصادی آب در بخش صنعت انجام شده‌اند که در ادامه به برخی از نمونه‌های شاخص آن اشاره می‌شود:

در مطالعه Ktori و همکاران (۲۰۲۵) با عنوان "ارزیابی اقتصادی کارخانه‌های بازیابی آب و منابع: دیدگاهی نوین در مورد هزینه تراز شده" به بررسی و معرفی دو روش محاسبه جدید - رویکردهای تخصیص اقتصادی و تخصیص دوگانه -

و بحث در مورد ارزیابی عملکرد اقتصادی کارخانه‌های بازیابی منابع پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد در مقایسه با روش عدم تخصیص (روش رایج در ادبیات)، رویکرد تخصیص اقتصادی به‌طور قابل توجهی هزینه‌های تراز شده آب را تا ۸۱٪ و هزینه‌های NaCl را تا ۲۸٪ کاهش می‌دهد، درحالی‌که رویکرد تخصیص دوگانه هزینه‌های NaCl را بیش از ۶۰٪ کاهش می‌دهد. چنین کاهش‌هایی، مزایای عملی روش‌های هزینه‌یابی متناسب را در حمایت از اهداف اقتصاد چرخشی و پایداری بازار برجسته می‌کند.

مطالعه Grafton و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی مجموعه‌ای از سؤالات کلیدی اقتصادی در رابطه باقیمت و ارزش آب برای عرضه و تقاضای آب پرداخته است. این بررسی تأکید دارد که چگونگی قیمت‌گذاری آب و ارزش‌گذاری آب مستلزم آن است که هم قیمت‌های تنظیم شده و هم قیمت‌های بازار ارزش آب و همچنین همه جنبه‌های آب در نظر گرفته شود. قیمت‌گذاری و ارزش‌گذاری مؤثر، کارآمد و عادلانه آب، اگر به‌طور گسترده توسط تصمیم‌گیرندگان اتخاذ شود، می‌تواند بحران جهانی آب را کاهش دهد. نحوه قیمت‌گذاری و ارزش‌گذاری آب باید با شرایط سازگار شود. قیمت‌گذاری مؤثر آب و ارزش‌گذاری مناسب، همراه با مدیریت بهبود یافته آب، در مجموع مسیری را برای تأمین آب و بهداشت برای همه ارائه می‌دهند و درعین حال پایداری اکوسیستم‌های مرتبط با آب را تضمین می‌کنند.

Revollo-Fernández و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای با عنوان "ارزش اقتصادی آب در صنایع تولیدی واقع در حوضه دره مکزیک"، ارزش نهایی آب صنعتی با استفاده از اطلاعات ۶۹/۹۸۴ واحد اقتصادی مورد بررسی در سال ۲۰۱۳ و تابع تولید ترانسلوگ، تخمین زده شده است. نتایج نشان می‌دهد ارزش نهایی آب بسته به شاخه صنعت مورد بررسی از ۲/۳ دلار آمریکا بر مترمکعب برای بخش چوب تا ۲۰/۱ دلار آمریکا بر مترمکعب برای بخش نوشیدنی و دخانیات، متغیر بوده است. همچنین، Revollo-Fernández و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای با عنوان "ارزش اقتصادی آب در صنایع تولیدی در زیر منطقه هیدرولوژیکی رودخانه سن خوان، مکزیک"، ارزش نهایی آب صنعتی با استفاده از اطلاعات مربوط به تقریباً ۱۸۰۰۰ واحد اقتصادی مورد بررسی در سال ۲۰۱۳ و دو نوع تابع تولید شامل کاب-داگلاس و ترانسلوگ، تخمین زده شده است. نتایج نشان می‌دهد ارزش نهایی آب بسته به شاخه صنعت مورد بررسی بین ۰/۹ دلار آمریکا بر مترمکعب برای صنعت تجهیزات کامپیوتری تا ۱۵/۴ دلار آمریکا بر مترمکعب برای صنعت شیمیایی، متغیر بوده است.

Ku و Yoo (۲۰۱۲) در مقاله‌ای با عنوان "ارزش اقتصادی آب در صنعت تولید کره جنوبی"، با استفاده از داده‌های ۵۳/۹۱۲ کارخانه تولیدی در سال ۲۰۰۳، به تحلیل اهمیت تأمین پایدار آب در صنعت پرداختند. در این تحقیق، با استفاده از توابع تولید کاب-داگلاس و ترانسلوگ، ارزش نهایی آب صنعتی تخمین زده شده است. نتایج نشان می‌دهد ارزش نهایی آب

در صنعت تولید کره جنوبی برابر با ۱۱۵۶ وون به ازای هر مترمکعب آب است. این مقدار بسته به نوع صنعت متغیر بوده و از ۴۲۸ وون در صنایع ابزار دقیق تا ۱۳۷۶۰ وون در صنایع تجهیزات حمل و نقل متغیر است. این تحقیق بیان می‌کند نتایج می‌توانند مبنایی برای طراحی سناریوهای قیمت‌گذاری آب توسط دولت کره باشند.

[Lall و Wang \(۲۰۰۲\)](#) در مطالعه‌ای با عنوان "ارزش‌گذاری آب برای صنایع چین: تحلیل بهره‌وری نهایی"، با استفاده از تابع هزینه کاب-داگلاس، به برآورد ارزش اقتصادی آب در صنایع مختلف چین پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد ارزش اقتصادی آب در صنایع چین بین ۰/۵ تا ۲۶/۸ یوان به ازای هر مترمکعب متغیر بوده است. این مطالعه نیز تفاوت ارزش اقتصادی آب بین صنایع مختلف را بیان می‌نماید.

در ایران نیز مطالعاتی درباره ارزش‌گذاری اقتصادی آب در بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعتی، شهری و خدمات اکوسیستمی انجام شده است. با این حال، مطالعات مربوط به بخش صنعت محدود بوده و تنها چند پژوهش محدود انجام پذیرفته است که در ذیل به آن اشاره می‌شود:

در مطالعه [محبی و همکاران \(۱۴۰۱\)](#) ارزش اقتصادی آب مصرفی در صنایع تولیدی استان یزد با استفاده از توابع تولید کاب-داگلاس، ترانسندنتال، ترانسلوگ، درجه دوم تعمیم یافته و لئونتیف و بر اساس داده‌های تابلویی برای ۱۱ صنعت در دوره ۱۳۷۵-۱۳۹۴ تخمین زده شدند. این مقادیر بسته به نوع صنعت و تابع مورد استفاده، متفاوت بوده و از ۷۶۰۹۲ ریال به ازای هر مترمکعب به وسیله تخمین تابع تولید ترانسندنتال در صنایع تولید مبلمان (کد ۳۱) تا میزان ۶۴۱۵۳۴ ریال در هر مترمکعب در صنایع تولید تجهیزات برقی (کد ۲۷) با تابع

تولید کاب-داگلاس، متغیر است. نتایج نشان دادند تعرفه آب در فعالیت صنعتی در استان یزد بسیار کمتر از ارزش تولید نهایی آب است.

در مطالعه [Mousavi و همکاران \(۲۰۲۱\)](#) برای برآورد ارزش اقتصادی آب در بخش صنعت در حوضه دریاچه ارومیه از روش باقیمانده استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد در سال ۱۳۹۷، ارزش اقتصادی آب در صنعت حوضه دریاچه ارومیه برابر ۳۳/۳۴۲ ریال به ازای هر مترمکعب بوده است.

[تهامی‌پور و همکاران \(۱۳۹۷\)](#) با استفاده از روش باقیمانده، متوسط وزنی ارزش اقتصادی آب صنعتی را طی سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۲ معادل ۸۷/۳۴۷ ریال به ازای هر مترمکعب برآورد کردند. این مقدار به‌طور قابل توجهی از تعرفه‌های پرداختی صنایع بالاتر بوده و نویسندگان پیشنهاد دادند تعرفه‌ها به‌صورت پلکانی افزایش یابد.

[تهامی‌پور \(۱۳۹۵\)](#) نیز ارزش اقتصادی آب در صنایع تولید مواد شیمیایی را با استفاده از روش اقتصادسنجی توابع تولید و هزینه و نیز روش باقیمانده برآورد کرده است. نتایج نشان دادند ارزش اقتصادی آب به ترتیب برابر با ۳۶/۶۹۷ ریال (روش تابع تولید) و ۳۵/۸۶۷ ریال (روش باقیمانده) به ازای هر مترمکعب است؛ درحالی‌که تعرفه پرداختی تنها حدود ۵/۶۸۵ ریال است.

در میان روش‌های متعددی که برای ارزش‌گذاری اقتصادی آب توسعه یافته‌اند، برخی از آن‌ها به‌طور خاص برای برآورد ارزش آب در مصارف صنعتی مناسب‌تر هستند. جدول (۱) این روش‌های قابل استفاده در ارزیابی ارزش اقتصادی آب در بخش صنعت را ارائه می‌دهد.

جدول ۱- روش‌های ارزش‌گذاری اقتصادی آب در کاربردهای صنعتی

روش	دسته‌بندی
مشاهده معاملات بازار آب	استقرایی
برآورد اقتصادسنجی تابع تولید و هزینه	استقرایی
روش باقیمانده	قیاسی
برنامه‌ریزی ریاضی	قیاسی
روش ارزش‌افزوده	قیاسی
روش هزینه جایگزین	قیاسی

مطالعه، با مرور ادبیات نظری و تجربی، شش روش پرکاربرد و قابل اتکا جهت ارزش‌گذاری اقتصادی آب در مصارف صنعتی شامل مشاهدات معاملات بازار آب، برآورد اقتصادسنجی توابع تولید و هزینه، روش باقیمانده، برنامه‌ریزی ریاضی، روش ارزش‌افزوده و روش هزینه جایگزین انتخاب و به‌صورت تطبیقی ارزیابی شدند. در جدول (۲) این شش روش از نظر مزایا، معایب، محدودیت‌ها، حوزه کاربرد و نوع داده مورد نیاز با یکدیگر مقایسه شدند.

بررسی تطبیقی روش‌های ارزش‌گذاری اقتصادی آب در مصارف صنعتی

همان‌گونه که در بخش قبل ذکر شد، در ادبیات اقتصادی، روش‌های متعددی برای برآورد ارزش اقتصادی آب توسعه یافته‌اند که هرکدام مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای خاص خود را دارند. انتخاب روش مناسب برای برآورد ارزش آب در بخش صنعت، باید با در نظر گرفتن نوع داده‌های در دسترس، ویژگی‌های ساختاری صنعت، هدف تصمیم‌گیری و سطح تحلیل صورت گیرد ([Young و همکاران، ۲۰۱۴](#)). در این

جدول ۲- روش‌های ارزش‌گذاری اقتصادی آب در کاربردهای صنعتی: مزایا، معایب، محدودیت‌ها و داده‌های موردنیاز

منابع	حوزه کاربرد	داده‌های مورد نیاز	محدودیت‌ها	معایب	مزایا	روش
Griffin (۲۰۰۶) ؛ Rosegrant و Binswanger (۱۹۹۴)	مناطق با بازار فعال آب	قیمت و حجم معاملات آب	نبود بازارهای کارآمد در بسیاری از مناطق	نیاز به بازار رقابتی و شفاف	واقع‌گرایی بالا، مبتنی بر رفتار بازار	مشاهده معاملات بازار آب
de Janvry و Sadoulet Chambers (۱۹۹۵) ؛ (۱۹۸۸)	تحلیل بهره‌وری، سیاست‌گذاری	داده‌های ورودی، خروجی، قیمت‌ها	حساس به فرم تابع و کیفیت داده	نیاز به داده‌های زیاد و دقیق	تحلیل دقیق نقش ورودی‌ها، قابلیت برآورد کشش‌ها	برآورد اقتصادسنجی تابع تولید و هزینه
Young (۲۰۰۵) ؛ تهامی یور و همکاران (۱۳۹۵)	مطالعات تجربی در صنعت	هزینه‌های ورودی، ارزش محصول نهایی	تحت تأثیر فناوری و کیفیت داده	حساس به برآورد سایر هزینه‌های ورودی	ساده، قابل استفاده با داده‌های رسمی	روش باقیمانده
Dinar و Tsur (۱۹۹۷) ؛ Howitt (۱۹۹۵)	تحلیل کلان و سیاست‌گذاری	داده‌های فنی و اقتصادی، محدودیت‌های تخصیص	برای غیرمتخصصان دشوار برای درک	مدل‌سازی پیچیده، نیاز به داده‌های کامل	قابلیت تحلیل سناریو و بهینه‌سازی	برنامه‌ریزی ریاضی
Rogers و همکاران (۱۹۹۸) ؛ Gibbons (۱۹۸۶)	تحلیل سریع اقتصاد کلان	داده‌های ورودی خروجی	نتایج تقریبی	دقت پایین، نادیده گرفتن سایر ورودی‌ها	ساده، قابل استفاده در سطح کلان	روش ارزش افزوده
Brouwer و Pearce (۲۰۰۵) ؛ de Brouwer و Briscoe (۱۹۸۸)	تحلیل سیاست و برنامه‌ریزی تأمین	قیمت و حجم معاملات آب	محدود به شرایط خاص	نادیده گرفتن بهره‌وری واقعی	مفید برای تحلیل منابع آب جایگزین	روش هزینه جایگزین

اجرا دارد، اما دقت آن پایین است و چون سهم سایر عوامل تولید را نادیده می‌گیرد، ارزش آب را تا حد زیادی اغراق‌آمیز بیان می‌کند ([Gibbons, ۱۹۸۶](#)).

روش هزینه جایگزین: این روش ارزش آب را در صورت کمبود برابر با هزینه تأمین آب جایگزین در نظر می‌گیرد. در شرایطی مناسب است که آب از منابع متعددی تأمین شود؛ اما محدودیت اصلی آن نادیده گرفتن ارزش بهره‌وری واقعی اقتصادی آب است ([Brouwer و Pearce, ۲۰۰۵](#)).

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر، باتوجه به محدودیت داده‌های آماری موجود و نبود بازار فعال آب در ایران، از روش باقیمانده استفاده شده است. این روش که پیش‌تر در مطالعات داخلی مانند [تهامی یور و همکاران \(۱۳۹۷\)](#) و [Mousavi و همکاران \(۲۰۲۱\)](#) نیز به کار رفته، باوجود ساده‌سازی‌های مفهومی، امکان برآورد مقایسه‌ای ارزش آب را در صنایع مختلف فراهم می‌سازد و می‌تواند مبنای قابل اتکایی برای سیاست‌گذاری‌های قیمتی و تخصیصی در بخش صنعت باشد. با داده‌هایی که در طرح آمارگیری از کارگاه‌های صنعتی به صورت سری زمانی برای یک دوره حداقل هجده ساله در هر شاخه صنعت در اختیار است، امکان برآورد تابع تولید به شکل صحیح وجود ندارد. ضمناً باتوجه به این موضوع که به دلیل تفاوت صنایع بزرگ حوضه زاینده‌رود به لحاظ ماهیت تولید، امکان در نظر گرفتن آن‌ها به عنوان رقیب در مصرف آب در یک الگوی برنامه‌ریزی خطی یا ریاضی وجود ندارد این روش نیز از محدوده انتخاب خارج می‌شود. در مورد سایر روش‌ها، باید یادآور شد که از روش مشاهدات معاملات بازار آب در کشورهایی که دارای بازار آزاد آب هستند استفاده می‌شود که با شرایط تحقیق حاضر

روش مشاهدات معاملات بازار آب: این روش مبتنی بر تحلیل واقعی معاملات انجام‌شده در بازارهای آب است و زمانی قابل اتکا است که بازار آب به صورت رقابتی و شفاف عمل کند ([Griffin, ۲۰۰۶](#)). مزیت اصلی این روش واقع‌گرایی بالا و استناد به رفتار بازار است؛ اما محدودیت آن عدم وجود بازارهای کارای آب در بسیاری از کشورها، به‌ویژه در کشورهای درحال توسعه، است.

برآورد اقتصادسنجی توابع تولید و هزینه: این روش با استفاده از داده‌های بنگاه‌های صنعتی، تابع تولید یا هزینه را تخمین زده و کشش قیمت نهاده‌ها از جمله آب را استخراج می‌کند ([de Janvry و Sadoulet, ۱۹۹۵](#)). از مزایای این روش می‌توان به قابلیت تفکیک تأثیر سایر نهاده‌ها اشاره کرد. با این حال، به حجم زیادی از داده‌های دقیق نیاز دارد و دقت آن به ساختار تولید واقعی نزدیک‌تر است.

روش باقیمانده: در این روش، با کسر هزینه سایر نهاده‌ها از ارزش کل تولید، سهم آب به عنوان نهاده باقی‌مانده محاسبه می‌شود ([Young, ۲۰۰۵](#)). این روش کاربرد گسترده‌ای در صنایع کشور دارد ([تهامی یور و همکاران, ۲۰۲۰](#)) و با داده‌های آماری رسمی قابل اجرا است؛ اما حساس به صحت برآورد هزینه سایر نهاده‌ها و تغییرات تکنولوژیک است.

برنامه‌ریزی ریاضی: در این رویکرد، مدل‌های بهینه‌سازی برای بیشینه‌سازی سود یا کمینه‌سازی هزینه با محدودیت منابع (از جمله آب) تدوین می‌شوند ([Dinar و Tsur, ۱۹۹۷](#)). مزیت آن انعطاف بالا در سناریوسازی سیاستی است، ولی به داده‌های کامل و مدل‌سازی پیچیده نیاز دارد و درک آن برای تصمیم‌گیران غیرتخصصی دشوار است.

روش ارزش افزوده: در این روش، کل ارزش افزوده تولیدی صنعت تقسیم بر مقدار آب مصرفی می‌شود ([Rogers و همکاران, ۱۹۹۸](#)). ساده و کاربردی بوده و در سطح کلان قابلیت

مطابقت ندارد. روش ارزش افزوده، ارزش آب را تا حد زیادی اغراق آمیز بیان می‌کند و برای این کار مناسب نیست. روش هزینه جایگزین تنها زمانی که تعیین ارزش آب با استفاده از سایر روش‌ها به راحتی قابل تخمین نیست، استفاده می‌شود؛ بنابراین در این تحقیق از روش باقیمانده استفاده شده است. این روش در مطالعات بین‌المللی مختلفی برای تعیین ارزش اقتصادی آب مورد استفاده قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به کارهای انجام شده [Lowe و همکاران \(۲۰۲۲\)](#)، [Rodrigues و همکاران \(۲۰۲۱\)](#) و [LIU و همکاران \(۲۰۱۹\)](#) اشاره کرد. روش باقیمانده برای برآورد ارزش آب در زمانی که به عنوان نهاده تولید یا کالای واسطه‌ای تولید استفاده می‌شود، اعمال می‌شود.

رویکرد ارزش باقیمانده درواقع ارزش متوسط را اندازه‌گیری می‌کند زیرا مبتنی بر معیارهای ارزش کل تولید و هزینه کل نهاده‌های غیر آب است. نظریه رانت اقتصادی یک رویکرد مفهومی برای استنتاج ارزش باقیمانده آب است. در این رابطه، درآمد کل بر اساس رابطه (۱) به شرح ذیل بیان می‌شود:

$$TR = TVC + QR + R^W + R^{nW} \quad (1)$$

که در آن (TR) درآمد کل برابر است با مجموع هزینه‌های متغیر کل (TVC)، شبه رانت‌های معمولی (QR)، رانت‌های مرتبط با آب (R^W) و رانت‌های غیر مرتبط با آب (R^{nW}) [Young \(۲۰۱۴\)](#). رابطه (۱) را می‌توان برای (R^W) به صورت رابطه (۲) و به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$R^W = TR - TVC - QR - R^{nW} \quad (2)$$

[Young و Loomis \(۲۰۱۴\)](#) بیان کردند "در زمینه‌های کاربردی، R^W باکم کردن تمام هزینه‌های غیرآبی تولید (که شامل اجاره‌های غیرآبی به عنوان پرداختی به صاحبان منابع کمیاب می‌شود) از کل درآمدهای تخمینی محاسبه می‌شود". حاصل تقسیم R^W بر کل مقدار آب مصرفی، ارزش اقتصادی هر واحد آب مصرفی را نشان می‌دهد.

روش باقیمانده بر این اصل استوار است که سهم نهاده موردنظر (در اینجا آب) به عنوان بخشی از ارزش افزوده محاسبه می‌شود که پس از کسر سهم سایر نهاده‌ها (مانند نیروی کار، سرمایه و سایر هزینه‌ها) باقی می‌ماند. به عبارت دیگر، سهم آب معادل تفاوت میان ارزش افزوده کل و مجموع هزینه‌های سایر نهاده‌ها است. در تحلیل سهم نهاده‌ها از ارزش افزوده تولید، تعیین سهم دقیق و تفکیک شده سایر نهاده‌ها (مانند نیروی کار، سرمایه و ...) به صورت کامل و بدون ابهام تقریباً غیرممکن است؛ زیرا عوامل متعددی مانند کمبود داده‌های دقیق، همپوشانی نقش نهاده‌ها و پیچیدگی ساختارهای تولیدی، دقت تفکیک را محدود می‌کنند. این عدم قطعیت به ویژه در شرایطی که بازارهای رقابتی کامل برای نهاده‌ها وجود ندارد، برجسته‌تر می‌شود. با این حال، روش باقیمانده به عنوان روشی معتبر و شناخته شده در ادبیات علمی، به دلیل توانایی آن در تفکیک سهم نهاده مورد مطالعه با کمترین ابهام و فرضیات کمتر، توصیه می‌شود. در این روش، هدف تفکیک دقیق سهم هر نهاده از ارزش افزوده تولید شده است. برای این

منظور، ابتدا باید سهم تمام نهاده‌ها و هزینه‌های مرتبط به درستی از ارزش افزوده کل جدا شود تا سهم نهاده آب به صورت دقیق و قابل دفاع به دست آید. در این چارچوب، کسر مؤلفه‌های زیر اهمیت ویژه‌ای دارد:

جبران خدمات^{۱۹}: این بخش هزینه‌های مربوط به نیروی کار را شامل می‌شود. با کسر این مقدار از ارزش افزوده، سهم نیروی انسانی به صورت مستقل و دقیق جدا می‌شود و از آنجایی که نیروی کار به عنوان یک نهاده کلیدی و مستقل شناخته می‌شود، این کسر سبب می‌شود تا از تخصیص اشتباه سهم به سایر نهاده‌ها جلوگیری شود.

مازاد عملیاتی^{۲۰}: مازاد عملیاتی نشان‌دهنده سود یا درآمد خالص بنگاه پس از پرداخت هزینه‌های مستقیم است. کسر مازاد عملیاتی به تفکیک سهم واقعی عوامل سرمایه‌ای و نهاده‌های غیرمشهود کمک می‌کند و از افزایش نادرست سهم آب یا سایر نهاده‌ها جلوگیری می‌نماید.

استهلاک^{۲۱}: استهلاک نمایانگر کاهش ارزش سرمایه فیزیکی طی دوره است. کسر این مقدار باعث می‌شود سهم هزینه سرمایه‌ای به طور دقیق از ارزش افزوده جدا شود و به اشتباه به سهم نهاده آب یا دیگر نهاده‌ها افزوده نشود.

خالص مالیات^{۲۲}: حذف این مقدار از ارزش افزوده باعث می‌شود که ارزش افزوده واقعی تولید بدون تأثیر خالص مالیات محاسبه شود و سهم نهاده‌ها باتوجه به هزینه‌های واقعی، بهتر برآورد شود.

روش باقیمانده، با کسر اجزای شناخته شده ارزش افزوده شامل جبران خدمات نیروی کار، مازاد عملیاتی، استهلاک و خالص مالیات، باعث حذف هزینه‌های مرتبط با سایر نهاده‌ها و عوامل تولید می‌شود و به تفکیک دقیق تر سهم نهاده آب کمک می‌کند. به این ترتیب، سهم آب به عنوان نهاده‌ای مستقل و واقعی تر در فرآیند تولید تعیین می‌شود و ابهامات ناشی از تخصیص نادرست هزینه‌ها کاهش می‌یابد. این فرآیند موجب می‌شود سهم باقی مانده که عمده‌تاً مربوط به نهاده مورد مطالعه (آب) است، با دقت بیشتری برآورد شود؛ بنابراین، اگرچه امکان تعیین کامل و دقیق سهم سایر نهاده‌ها محدود است، اما روش باقیمانده به عنوان یک چارچوب تحلیلی مستحکم و قابل دفاع، پایه‌ای قوی برای سیاست‌گذاری مدیریت منابع آب و بهینه‌سازی مصرف آن در بخش‌های مختلف به شمار می‌رود. بنابر توضیحات بیان شده، فرضیه‌های اصلی مطالعه برای محاسبه سهم نهاده آب و حذف هزینه‌های سایر نهاده‌ها، در روش باقیمانده به شرح زیر بیان می‌شود:

الف- فرض می‌شود که ارزش افزوده هر بخش اقتصادی می‌تواند به صورت تفکیکی به سهم عوامل تولید مختلف از جمله نیروی کار، سرمایه، آب و سایر نهاده‌ها تخصیص یابد.

ب- فرض شد که بازار نیروی کار رقابتی است و دستمزدها بازتاب‌دهنده ارزش نهایی نیروی کار در تولید هستند. داده‌ها در سطح کدهای ISIC دورقمی از داده‌های طرح آمارگیری مرکز آمار ایران استخراج شد.

ج- به منظور دقت در محاسبه اجزای ارزش افزوده، اجزای آن به جز سهم نهاده آب، شامل جبران خدمات نیروی کار (حقوق و دستمزد)، مازاد عملیاتی (سود)، استهلاک دارایی ها و خالص مالیات به طور دقیق محاسبه و از ارزش افزوده کل کسر می شود.

د- داده های رسمی هزینه انرژی شامل برق، گاز، سوخت و سایر حامل ها (از داده های آمار کارگاه های صنعتی) لحاظ شد. با وجود یارانه های بودن قیمت انرژی، فرض شد این هزینه های ثبت شده نشان دهنده بار مالی واقعی بنگاه بوده اند.

ه- فرض عدم وجود بازار رقابتی برای آب، در شرایطی که بازار رقابتی برای نهاده آب وجود ندارد و قیمت رسمی یا بازار مشخصی تعریف نشده است، سهم آب در ارزش افزوده نمی تواند مستقیماً از طریق قیمت بازار تعیین شود؛ بنابراین روش باقیمانده با حذف سایر نهاده ها، سهم آب را به صورت تقریبی و بر اساس داده های اقتصادی موجود استخراج می کند.

و- سرکوب حداقلی سهم سایر نهاده ها؛ این روش با کسر کامل جبران خدمات نیروی کار، مازاد عملیاتی، استهلاک و خالص مالیات، سهم باقی مانده را که بیشتر مربوط به آب است، مشخص می سازد. هرچند تعیین دقیق سهم سایر نهاده ها با ابهاماتی همراه است، ولی این روش نسبت به سایر مدل ها دقت و واقع گرایی بیشتری دارد و از بزرگ نمایی سهم آب جلوگیری می کند.

بر اساس این الگو، در روش باقیمانده برای برآورد ارزش آب در مصارف صنعتی، ابتدا همه ارزش نهاده های فعالیت صنعتی به غیر از هزینه آب؛ که شامل ارزش مواد خام و اولیه، لوازم بسته بندی، ابزار و وسایل کار کم دوام، مواد مصرفی غذای طبخ شده توسط کارگاه، لوازم مصرفی برای تعمیر اساسی اموال سرمایه ای، هزینه انرژی مصرف شده و همچنین پرداختی بابت خدمات صنعتی می شود؛ از ارزش ستانده کسر می شود تا ارزش افزوده که شامل هزینه آب می باشد؛ به دست آید. سپس مقادیر جبران خدمات، مازاد عملیاتی، استهلاک و خالص مالیات محاسبه می شود و مجموع آن ها از ارزش افزوده به دست آمده از مرحله قبل، کسر می شود. به این ترتیب کل ارزش آب محاسبه می شود. در نهایت با تقسیم کل ارزش آب بر میزان آب مصرفی برحسب مترمکعب، ارزش هر مترمکعب آب به دست خواهد آمد. از این رو در مطالعه حاضر که از اطلاعات موجود و داده های گرفته شده از طرح آمارگیری کارگاه های صنعتی ۱۰ نفر کارکن و بیشتر مرکز آمار ایران در دوره ۱۳۸۱-۱۳۹۸ استفاده شده است؛ این شیوه به کار گرفته شده است. اطلاعات مربوط به جبران خدمات شاغلین و خالص مالیات از داده های طرح آمارگیری کارگاه های صنعتی ۱۰ نفر کارکن و بیشتر مرکز آمار ایران در دوره ۱۳۸۱-۱۳۹۸ استخراج شد. استهلاک طبق ماده ۱۵۱ قانون مالیات های مستقیم بر اساس روش نزولی برابر ۱۲ درصد ارزش دفتری تشکیل سرمایه در سال محاسبه شده است. برای محاسبه مازاد عملیاتی در این مطالعه، ابتدا از جداول داده - ستانده آماری سال ۱۳۹۵ مرکز آمار ایران، سهم مازاد عملیاتی از

ارزش افزوده برای کل صنعت تولید و برای ۴ کد منتخب استخراج و متناسب با سهم به دست آمده، مازاد عملیاتی از ارزش افزوده فعالیت های صنعتی مندرج در داده های کارگاه های صنعتی مرکز آمار ایران، استخراج گردیده است. همچنین باتوجه به اینکه آمار میزان مصرف آب در داده های صنعتی مرکز آمار برای بازه مورد مطالعه به دلیل مشکلات متعدد در نحوه محاسبه، قابل اعتماد و استناد جهت استفاده در محاسبات نبود، از این رو در این پژوهش، میزان مصرف آب از داده های موجود در شرکت مدیریت منابع آب ایران و شرکت آب منطقه ای اصفهان استخراج شد. ضابطه شماره ۴۷۵ - الف با عنوان راهنمای برآورد ارزش اقتصادی آب در مصارف صنعتی که تحت استاندارد شماره ۲۱۱ معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی در سال ۱۴۰۱ منتشر شده و با همکاری دفتر استانداردهای معاونت امور آب و آبفای وزارت نیرو تدوین شده است، الگوی عملی شیوه به کارگیری روش باقیمانده را با استفاده از اطلاعات موجود کشور در طرح آمارگیری کارگاه های صنعتی مرکز آمار ایران، تشریح نموده است.

برای صحت سنجی این روش در کاربرد مورد نظر مقاله حاضر، به عنوان نمونه می توان به مطالعه [تهامی پور \(۱۳۹۵\)](#) اشاره کرد که از همین روش برای برآورد ارزش اقتصادی آب در بخش صنایع تولید مواد شیمیایی استفاده کرده است. در آن مطالعه، مقادیر به دست آمده از روش باقیمانده با نتایج حاصل از روش اقتصادسنجی توابع تولید و هزینه قابل مقایسه است. نتایج آن پژوهش نشان داد ارزش اقتصادی آب به ترتیب برابر با ۳۶/۶۹۷ ریال (روش تابع تولید) و ۳۵/۸۶۷ ریال (روش باقیمانده) به ازای هر مترمکعب است که انطباق نسبی آن ها را تأیید می کند. در مطالعه دیگری که توسط [Ward و Michelsen \(۲۰۰۲\)](#) انجام شده است، از همین روش برای برآورد ارزش اقتصادی آب در بخش کشاورزی ایالت نیومکزیکو استفاده کردند. در آن مطالعه، مقادیر به دست آمده با نتایج حاصل از روش های جایگزین مانند قیمت سایه ای آب و مقایسه با داده های بازار ثانویه آب مقایسه و انطباق نسبی آن ها تأیید شد. همچنین، در مطالعه ای مشابه در بخش صنعت توسط [Rogers و همکاران \(۱۹۹۸\)](#) روش باقی مانده به عنوان یک ابزار معتبر برای استخراج ارزش اقتصادی آب در فرآیندهای صنعتی معرفی شده و دقت آن در شرایط داده ای مشابه با ایران (نظام یارانه ای و اطلاعات ناقص) مورد تأیید قرار گرفته است.

موضوع دیگر که در اینجا قابل بیان است در ارتباط با داده های طرح آمارگیری کارگاه های صنعتی ۱۰ نفر کارکن و بیشتر مرکز آمار ایران می باشد که تنها داده های جامع موجود در کشور برای برآورد ارزش اقتصادی آب در فرآیندهای تولید صنعت کشور است. داده های در دسترس، به جز سال های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ یا به تفکیک استان های کشور و یا به تفکیک فعالیت (کد ISIC) در سطح ملی تدوین شده بود. با این وصف امکان بررسی روندها و تغییرات ارزش اقتصادی آب صنعتی در سال های گذشته برای هیچ فعالیت صنعتی خاص در سطح غیر ملی وجود نداشت. از این رو با پیگیری محقق و همکاری

بخش صنعت مرکز آمار ایران، داده‌های کارگاه‌های صنعتی ۱۰ نفر کارکن و بیشتر بر اساس تفکیک فعالیت استان برای کدهای ISIC دورقمی، آماده شد و در حال حاضر از طریق درگاه ملی آمار ایران قابل دسترسی شده است که داده‌های مربوط به استان اصفهان برای انجام این تحقیق، استفاده شد. در جدول (۳) طبقه‌بندی مربوط به کدهای ISIC دورقمی صنعت تولید (Manufacturing sector)، بر اساس آخرین ویرایش (rev.4) ارائه می‌شود.

بخش صنعت مرکز آمار ایران، داده‌های کارگاه‌های صنعتی ۱۰ نفر کارکن و بیشتر بر اساس تفکیک فعالیت استان برای کدهای ISIC دورقمی، آماده شد و در حال حاضر از طریق درگاه ملی آمار ایران قابل دسترسی شده است که داده‌های مربوط به استان اصفهان برای انجام این تحقیق، استفاده شد. در جدول (۳) طبقه‌بندی مربوط به کدهای ISIC دورقمی صنعت تولید (Manufacturing sector)، بر اساس آخرین ویرایش (rev.4) ارائه می‌شود.

جدول ۳ - کدهای دورقمی طبقه‌بندی استاندارد بین‌المللی صنایع (ISIC) برای بخش صنعت (ویرایش ۴)

کد ISIC	صنعت
۱۰	تولید محصولات غذایی
۱۱	تولید نوشیدنی‌ها
۱۲	تولید محصولات دختانی
۱۳	تولید منسوجات
۱۴	تولید پوشاک
۱۵	تولید چرم و محصولات وابسته
۱۶	تولید چوب و محصولات چوبی و چوب‌پنبه‌ای به جز مبلمان؛ تولید محصولات از نی و مواد حصیری
۱۷	تولید کاغذ و محصولات کاغذی
۱۸	چاپ و تکثیر رسانه‌های ضبط شده
۱۹	تولید کک و فرآورده‌های حاصل از پالایش نفت
۲۰	تولید مواد شیمیایی و محصولات شیمیایی
۲۱	تولید داروها، مواد شیمیایی دارویی و محصولات گیاهی دارویی
۲۲	تولید محصولات لاستیکی و پلاستیکی
۲۳	تولید سایر محصولات کانی غیرفلزی
۲۴	تولید فلزات پایه
۲۵	تولید محصولات فلزی ساخته شده، به جز ماشین‌آلات و تجهیزات
۲۶	تولید محصولات رایانه‌ای، الکترونیکی و نوری
۲۷	تولید تجهیزات برقی
۲۸	تولید ماشین‌آلات و تجهیزات طبقه‌بندی نشده در جای دیگر
۲۹	تولید وسایل نقلیه موتوری، یدک‌کش‌ها و نیمه‌یدک‌کش‌ها
۳۰	تولید سایر تجهیزات حمل و نقل
۳۱	تولید مبلمان
۳۲	سایر صنایع تولیدی
۳۳	تعمیر و نصب ماشین‌آلات و تجهیزات

هرچه بهتر موضوع، مقادیر مربوط به سهم آب مصرفی، کل ارزش تولیدی و ارزش افزوده کدهای چهارگانه محاسبه و ارائه شده است.

به این ترتیب در این پژوهش برای تعیین ارزش اقتصادی آب در صنایع بزرگ حوضه زاینده‌رود از روش ارزش‌گذاری باقیمانده برای کل صنعت استان اصفهان و همچنین برای ۴ کد ISIC دورقمی شامل کد ۱۹ (تولید کک و فرآورده‌های نفتی)، کد ۲۰ (مواد شیمیایی و فرآورده‌های شیمیایی)، کد ۲۳ (محصولات کانی غیرفلزی) و کد ۲۴ (فلزات اساسی)؛ استفاده شده است. تقریباً اکثر صنایع بزرگ در حوضه زاینده‌رود در این ۴ کد قرار دارند و از سوی دیگر، این ۴ کد مهم‌ترین مصرف‌کنندگان آب صنعتی در حوضه زاینده‌رود بوده و به‌تنهایی ۸۵٪ سهم مصرف آب در بخش‌های مختلف صنعتی استان اصفهان را به خود اختصاص داده‌اند. از این رو علاوه بر حضور صنایع بزرگ حوضه زاینده‌رود در کدهای بیان‌شده، یکی از دلایل انتخاب این چهار کد از میان ۲۴ کد ISIC دورقمی صنعت تولید، سهم قابل توجه آب مصرفی در این صنایع بوده است. دلیل بعدی مربوط به اهمیت اقتصادی ویژه این چهار شاخه صنعت تولید و سهم عمده آن‌ها از کل ارزش تولیدی و ارزش افزوده صنعت استان اصفهان است که در بخش بعد (نتایج) به‌منظور تبیین

نتایج و بحث

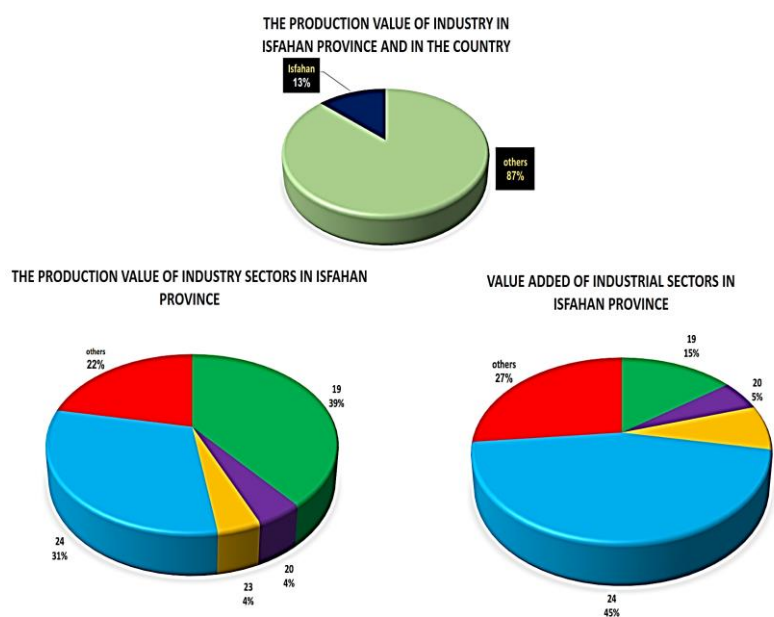
ارزش تولیدی بخش صنعت استان اصفهان در سال ۱۳۹۸ از مرز ۲۳۰۰ تریلیون ریال عبور کرده است. شکل (۱) ارزش تولیدی سهم بخش صنعت استان اصفهان را از ارزش تولیدی صنعت کشور و سهم کدهای منتخب را در تولید ارزش محصول و ارزش افزوده استان اصفهان بر اساس متوسط مقادیر در دوره ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۸ نشان می‌دهد. تولید ارزش اقتصادی سهم ۴ کد منتخب در این پژوهش حدود ۷۸ درصد کل ارزش تولیدی بخش صنعت استان اصفهان و سهم ارزش افزوده ۴ کد منتخب ۷۳ درصد کل ارزش افزوده صنعت استان اصفهان بوده است. در ضمن این چهار کد منتخب

به کل هزینه های تولید صنعت طی دوره مورد مطالعه نشان داده شده است.

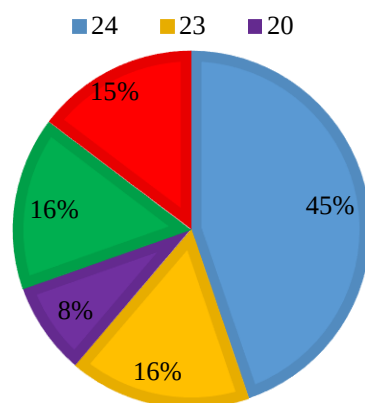
همان طور که در قبل آمد، در این کار ارزش اقتصادی آب در صنعت استان و ۴ کد منتخب در دوره ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۸ با استفاده از روش باقیمانده محاسبه شد. به منظور حذف اثر تورم و ایجاد یک دید مبتنی بر ارزش حال آب در صنایع بزرگ حوضه، مقادیر ارزش ریالی آب با استفاده از شاخص قیمت تولیدکننده بخش صنعت در محصولات کارخانه ای، برای سال ۱۴۰۳ تعدیل شد.

حدود ۸۵ درصد کل آب مصرفی بخش صنعت استان اصفهان را به خود اختصاص داده اند. شکل (۲) سهم آب مصرفی بخش های صنعت استان اصفهان را نشان می دهد. در شکل (۳) روند ارزش تولیدی کدهای منتخب در دوره ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۸ نمایش داده شده است.

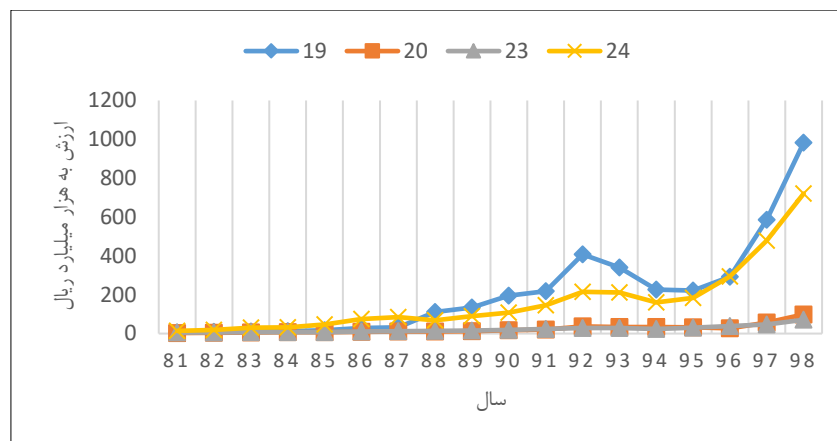
هزینه پرداختی برای آب در فرآیند تولید صنعت استان اصفهان در دوره ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۸ بین ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ درصد کل هزینه های تولید صنعت و به طور متوسط کمتر از ۰/۲ درصد کل هزینه های تولید بوده است. در جدول (۴) و شکل (۴) هزینه پرداختی برای آب و نسبت هزینه پرداختی برای آب



شکل ۱- ارزش تولید در بخش صنعت استان اصفهان و در کدهای منتخب



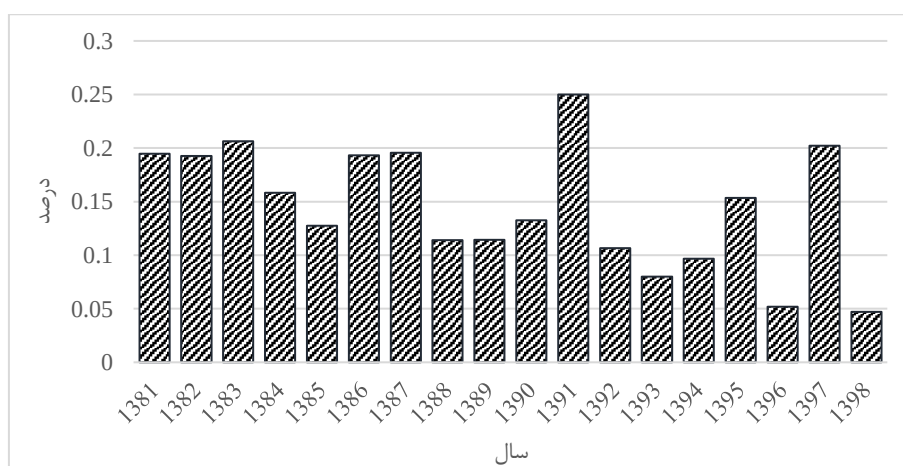
شکل ۲- سهم مصرف آب در بخش های مختلف صنعتی استان اصفهان



شکل ۳- ارزش تولید در چهار کد منتخب

جدول ۴- نسبت هزینه آب به کل هزینه تولید (بخش صنعت)

سال	هزینه‌های تولید (هزار میلیارد ریال)	هزینه پرداختی برای آب (هزار میلیارد ریال)	نسبت هزینه آب به کل هزینه (%)
۱۳۸۱	۲۵	۰/۰۴۹	۰/۱۹
۱۳۸۲	۳۲	۰/۰۶۲	۰/۱۹
۱۳۸۳	۴۱	۰/۰۸۵	۰/۲۱
۱۳۸۴	۴۵	۰/۰۷۲	۰/۱۶
۱۳۸۵	۶۹	۰/۰۸۷	۰/۱۳
۱۳۸۶	۹۹	۰/۱۹۱	۰/۱۹
۱۳۸۷	۱۱۰	۰/۲۱۵	۰/۲۰
۱۳۸۸	۱۹۷	۰/۲۲۵	۰/۱۱
۱۳۸۹	۲۴۵	۰/۲۸۰	۰/۱۱
۱۳۹۰	۳۲۰	۰/۴۲۵	۰/۱۳
۱۳۹۱	۳۹۸	۰/۹۹۵	۰/۲۵
۱۳۹۲	۶۴۳	۰/۶۸۴	۰/۱۱
۱۳۹۳	۵۸۹	۰/۴۷۸	۰/۰۸
۱۳۹۴	۴۵۳	۰/۴۳۸	۰/۱۰
۱۳۹۵	۴۶۳	۰/۷۱۰	۰/۱۵
۱۳۹۶	۶۰۸	۰/۳۱۶	۰/۰۵
۱۳۹۷	۱۰۷۶	۲/۱۷۶	۰/۲۰
۱۳۹۸	۱۸۱۱	۰/۸۵۵	۰/۰۵

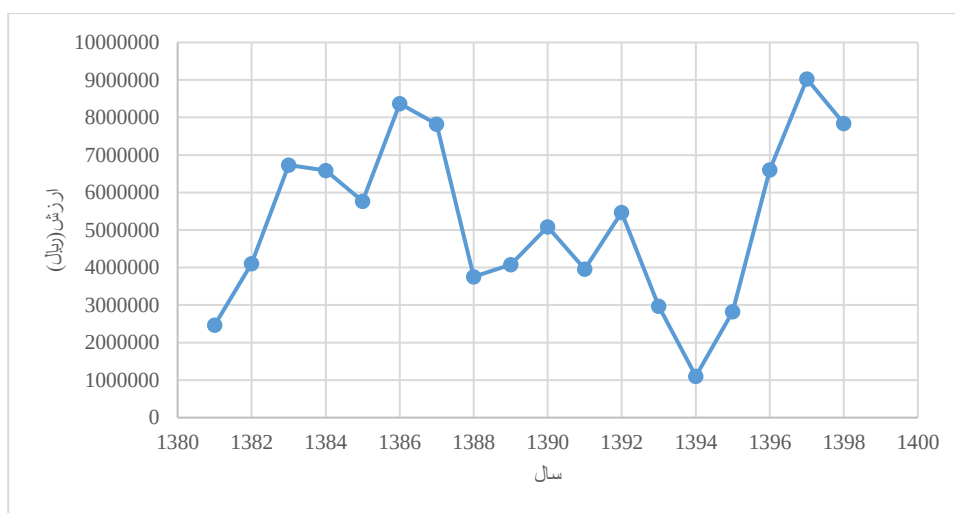


شکل ۴- نسبت هزینه آب به کل هزینه تولید در صنعت استان اصفهان (به درصد)

برای تعدیل نتایج به سال ۱۴۰۳، با استفاده از جداول آماری شاخص قیمت تولید کننده محصولات صنعتی کشور به تفکیک سال و بخش‌های اصلی بر مبنای سال پایه ۱۳۹۵ برابر با ۱۰۰، تهیه شده توسط مرکز آمار ایران، شاخص قیمت تولید کننده هر بخش صنعت برای تمام سال‌های دوره محاسبه ارزش اقتصادی آب شامل ۱۳۸۱-۱۳۹۸ استخراج شد. شاخص قیمت تولیدکننده هر بخش در سال ۱۴۰۳ نیز از همین جدول‌ها استخراج شد. برای هر سال در هر بخش صنعت با ضرب ارزش اقتصادی آب محاسبه شده، در حاصل تقسیم شاخص قیمت تولیدکننده بخش مربوط به آن در سال ۱۴۰۳ بر متناظر آن در سال موردنظر، ارزش تعدیل شده برای سال ۱۴۰۳ به دست آمد. رابطه (۳) نحوه محاسبه ارزش‌های اقتصادی تعدیل شده آب برای سال ۱۴۰۳ را نشان می‌دهد:

$$AV_{1403} = \left(\frac{PPI_{1403}}{PPI_n} \right) * EV_n \quad (3)$$

که در آن (AV_{1403}) ارزش اقتصادی تعدیل شده آب برای سال ۱۴۰۳، برابر است با حاصل ضرب ارزش اقتصادی آب محاسبه شده در سال n (EV_n)، در نسبت شاخص قیمت تولید کننده در سال ۱۴۰۳ (PPI_{1403})، به شاخص قیمت تولید کننده متناظر در سال PPI_n می‌گویند. سال n شامل هر یک از سال‌های دوره ۱۳۸۱-۱۳۹۸ بوده است. نتایج مربوط به آن در جدول (۵) و شکل (۵) آورده شده است. بر این اساس در دوره مورد مطالعه، ارزش متوسط به حال شده آب برای هر مترمکعب آب در کل صنعت استان اصفهان برابر $۵/۲۵۴/۷۰۲$ ریال، در کد ۱۹ (تولید کک و فرآورده‌های نفتی تصفیه شده) برابر $۵/۴۷۲/۳۴۲$ ریال، در کد ۲۰ (تولید مواد شیمیایی و فرآورده‌های شیمیایی) برابر $۲/۳۸۳/۰۶۷$ ریال، در کد ۲۳ (ساخت سایر محصولات کانی غیرفلزی) برابر $۲/۳۷۷/۸۳۸$ ریال و در کد ۲۴ (ساخت فلزات اساسی) برابر $۶/۹۴۷/۱۹۰$ ریال بوده است.



شکل ۵- ارزش جاری آب در بخش صنعت (ریال)

در این پژوهش ارزش اقتصادی آب در صنایع با هزینه پرداختی برای آب نیز در دوره مورد مطالعه، بررسی و مقایسه شد که نتایج مربوط به آن در جدول (۶) و شکل (۶) آورده شده است. بر این اساس نسبت هزینه پرداختی برای آب در فرآیند

تولید صنعت استان اصفهان به ارزش آب در دوره مورد مطالعه بین کمتر از ۰/۶ درصد تا ۵/۳۵ درصد بوده است و متوسط نسبت پرداختی برای آب به ارزش آب در دوره برابر ۱/۸۷ درصد بوده است.

جدول ۵- میانگین ارزش جاری آب در بخش صنعت و چهار کد منتخب (ارزش‌ها به ده هزار ریال)

صنعت	کد ۱۹	کد ۲۰	کد ۲۳	کد ۲۴
۵۲۵/۵	۵۴۷/۲	۲۳۸/۳	۲۳۷/۸	۶۹۴/۷

جدول ۶- هزینه پرداختی برای آب نسبت به ارزش آب در بخش صنعت

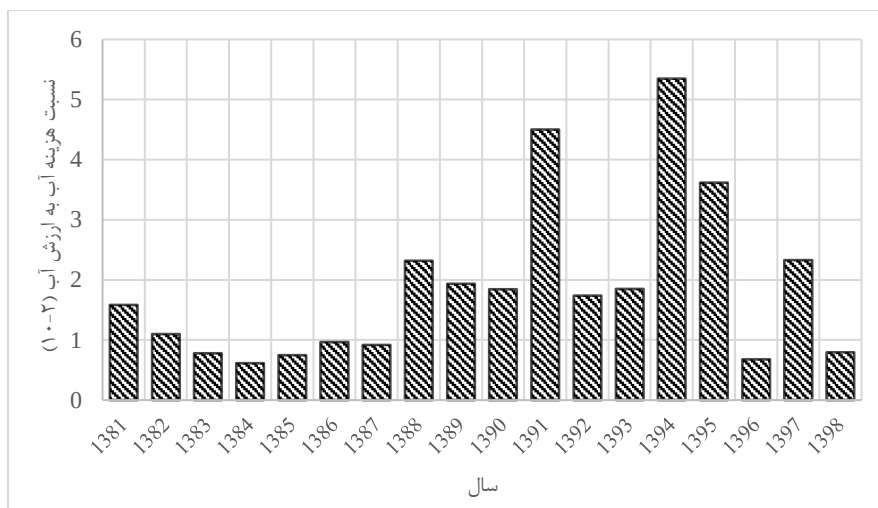
سال	ارزش کل آب (میلیون ریال)	هزینه پرداختی برای آب (میلیون ریال)	نسبت هزینه آب به ارزش آب (۱۰ ^{-۲})
۱۳۸۱	۳/۰۷۵/۸۶۶	۴۸/۶۳۰	۱/۵۸
۱۳۸۲	۵/۶۷۶/۸۴۱	۶۲/۳۳۷	۱/۱۰
۱۳۸۳	۱۰/۹۰۹/۷۲۳	۸۴/۸۵۴	۰/۷۸
۱۳۸۴	۱۱/۷۲۱/۷۱۷	۷۱/۸۶۳	۰/۶۱
۱۳۸۵	۱۱/۷۱۸/۶۹۶	۸۷/۲۹۷	۰/۷۴
۱۳۸۶	۱۹/۸۰۲/۷۷۵	۱۹۰/۶۹۹	۰/۹۶
۱۳۸۷	۲۳/۵۳۰/۴۷۷	۲۱۵/۳۹۹	۰/۹۲
۱۳۸۸	۹/۶۹۵/۵۳۱	۲۲۴/۵۵۵	۲/۳۲
۱۳۸۹	۱۴/۴۴۴/۶۷۹	۲۷۹/۶۹۹	۱/۹۴
۱۳۹۰	۲۳/۰۱۱/۹۱۲	۴۲۴/۸۴۸	۱/۸۵
۱۳۹۱	۲۲/۱۰۱/۶۰۸	۹۹۴/۸۲۵	۴/۵۰
۱۳۹۲	۳۹/۳۹۵/۳۷۶	۶۸۴/۴۶۰	۱/۷۴
۱۳۹۳	۲۵/۸۳۲/۹۲۴	۴۷۷/۶۵۴	۱/۸۵
۱۳۹۴	۸/۱۹۱/۰۲۴	۴۳۷/۸۶۶	۵/۳۵
۱۳۹۵	۱۹/۶۴۲/۴۶۴	۷۱۰/۴۶۲	۳/۶۲
۱۳۹۶	۴۶/۴۵۹/۹۸۳	۳۱۶/۰۰۹	۰/۶۸
۱۳۹۷	۹۳/۴۶۶/۹۶۵	۲/۱۷۵/۹۴۵	۲/۳۳
۱۳۹۸	۱۰۷/۶۹۹/۴۳۴	۸۵۴/۹۸۵	۰/۷۹

بیان شده محاسبه و با مقادیر متناظر در سال های دوره مقایسه شد. رابطه (۴) نحوه محاسبه میزان افزایش در کل هزینه تولید صنعت را نشان می دهد:

$$\% \text{ increase in TMC} = \left(\frac{TMC_v - TMC_p}{TMC_p} \right) * 100 \quad (4)$$

که در آن (TMC_v) کل هزینه تولید تحت سناریوی اعمال ارزش اقتصادی واقعی آب به عنوان تعرفه و (TMC_p) کل هزینه تولید با تعرفه های جاری آب است. نتایج نشان داد سناریوی تغییر قیمت آب از تعرفه معمول به ارزش اقتصادی واقعی آب، منجر به افزایش متوسط ۵/۶ درصدی در هزینه های تولید در دوره ده ساله از ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸ می شود. جدول (۷) میزان تغییرات در هزینه تولید ناشی از تغییر تعرفه آب از تعرفه های جاری به ارزش اقتصادی واقعی آب را در سال های ۱۳۸۹-۱۳۹۸ را نشان می دهد.

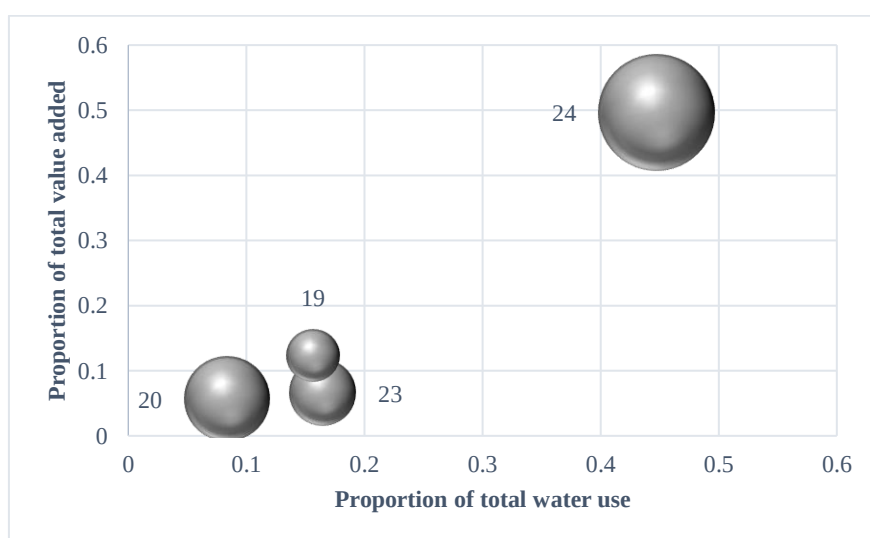
برای تحلیل تأثیر این سناریو که اگر ارزش اقتصادی واقعی آب به عنوان تعرفه از صنایع دریافت شود، سهم هزینه آب در ساختار هزینه های صنایع چند درصد خواهد شد و بررسی این موضوع که تحت این سناریو که اعمال ارزش اقتصادی واقعی آب به عنوان تعرفه را جایگزین تعرفه های جاری می نماید، کل هزینه تولید در صنعت استان اصفهان در مقایسه با وضعیت موجود تا چه میزان افزایش خواهد یافت؛ یک دوره ده ساله از ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸، بررسی و مطالعه شد. بر اساس نتایج، سهم هزینه پرداختی برای آب در ساختار هزینه تولید صنعت استان اصفهان با تعرفه های جاری در دوره ده ساله از ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸، به طور متوسط ۱/۲ درصد بوده است در حالی که سهم هزینه آب در ساختار هزینه تولید در صورت اعمال ارزش اقتصادی واقعی آب به عنوان تعرفه در همین دوره به طور متوسط برابر ۵/۴ درصد خواهد شد. همچنین برای بررسی تحلیل تأثیر اجرای این سناریو بر افزایش کل هزینه تولید در صنعت استان اصفهان، کل هزینه تولید تحت سناریوی



شکل ۶- نسبت هزینه آب به ارزش آب در بخش صنعت

جدول ۷- میزان تغییرات در هزینه تولید ناشی از تغییر تعرفه آب در بخش صنعت

سال	تغییر در هزینه تولید (۱۰ ^{-۲})
۱۳۸۹	۵/۸
۱۳۹۰	۷/۱
۱۳۹۱	۵/۳
۱۳۹۲	۶
۱۳۹۳	۴/۲
۱۳۹۴	۱/۷
۱۳۹۵	۴/۱
۱۳۹۶	۷/۶
۱۳۹۷	۸/۵
۱۳۹۸	۵/۹



شکل ۷- ارزش آب در کدهای منتخب بر اساس سهم مصرف آب و سهم تولید ارزش افزوده

به علاوه در این کار، ارزش آب باتوجه به سهم هر بخش از تولید ارزش افزوده و از کل آب مصرفی در فرآیند تولید برای سال ۱۳۹۸، مقایسه شد نتایج آن در شکل (۷) آمده است. بر این اساس مشخص شد از نظر نسبت تولید ارزش افزوده به مصرف آب، کد ۲۴ (تولید فلزات اساسی) بالاترین عملکرد را در میان ۴ کد منتخب، داشته است.

همان گونه که نتایج نشان داد ارزش اقتصادی آب در صنایع مختلف منطقه با بیشترین ارزش در صنعت فلزات اساسی (۶۹۵ هزار ریال) و کمترین در صنعت مواد شیمیایی (۲۳۸ هزار ریال) در هر مترمکعب آب به طور قابل توجهی متفاوت است. ارزش اقتصادی آب به دلیل عوامل مختلفی از جمله نقشی که آب در فرآیندهای تولید ایفا می کند، هزینه های منابع جایگزین و ماهیت خاص وابستگی هر صنعت به آب، در صنایع مختلف به طور قابل توجهی متفاوت است. در مجموع ارزش اقتصادی آب توسط تعامل پیچیده ای از عواملی مانند میزان آب بر بودن صنعت، جایگزینی، کمبود، مقررات، موقعیت مکانی، میزان و نحوه وابستگی صنعت به آب، سهم اقتصادی کلی و حاشیه سود صنعت و همچنین نوآوری های فناورانه شکل می گیرد.

همان گونه که در بخش مرور ادبیات آمد، نتایج برآورد ارزش اقتصادی آب در ادبیات مورد بررسی، مقادیر متفاوتی را نشان می دهد. در اینجا، برای انجام یک مقایسه بین ارزش های تخمین زده شده، نتایج بر مبنای دلار بیان می شود. به عنوان مثال [Lall و Wang \(۲۰۰۲\)](#)، ارزش اقتصادی آب در صنایع چین را در محدوده ۰/۰۰۷ تا ۳/۹۵ دلار در هر مترمکعب، برآورد نموده اند. [Yoo و Ku \(۲۰۱۲\)](#) ارزش اقتصادی آب در صنعت تولید کره جنوبی را در بازه ۰/۳۴ تا ۱۱/۰۱ دلار بر مترمکعب، تخمین زده اند. [Revollo-Fernández و همکاران \(۲۰۲۰\)](#)، ارزش اقتصادی آب در صنایع تولیدی واقع در حوضه دره مکزیک را در محدوده ۲/۳ تا ۲۰/۱ دلار در هر مترمکعب برآورد کرده اند. همچنین [Revollo-Fernández و همکاران \(۲۰۱۸\)](#)، ارزش اقتصادی آب در صنایع تولیدی در حوضه رودخانه سن خوان را بین ۰/۹ تا ۱۵/۴ دلار بر مترمکعب، تخمین زده اند. در ایران نیز کارهای مطالعاتی [تهامی پور و همکاران \(۱۳۹۷\)](#) و [تهامی پور \(۱۳۹۵\)](#)، ارزش اقتصادی آب صنعتی را در بازه ۳/۱ تا ۱۰/۸ دلار برای هر مترمکعب آب، نشان می دهند. [Mousavi و همکاران \(۲۰۲۱\)](#)، ارزش اقتصادی آب در بخش صنعت در حوضه دریاچه ارومیه را ۰/۳ دلار به ازای هر مترمکعب برآورد کرده است و مطالعه [محبی و همکاران \(۲۰۲۲\)](#)، ارزش اقتصادی آب در صنایع تولیدی استان یزد را از ۱/۹ تا ۱۶ دلار در هر مترمکعب نشان داده است. مطالعه حاضر، ارزش اقتصادی آب در صنایع حوضه زاینده رود را در سال ۱۴۰۳ برای هر مترمکعب آب برای کل صنعت استان حدود ۵۲۵ هزار تومان (معادل ۷/۵ دلار) و برای صنایع مختلف در بازه ای بین ۲۳۸ هزار تومان تا ۶۹۵ هزار تومان معادل ۳/۴ تا ۹/۹ دلار، برآورد کرده است که در

مقایسه با سایر مطالعات مشابه داخلی و بین المللی بیان شده در این پژوهش، مقادیر منطقی و متعارفی را نشان می دهد.

نتیجه گیری

در سال های اخیر، ارزش گذاری اقتصادی منابع طبیعی، به ویژه آب، به عنوان ابزاری کلیدی برای بهبود حکمرانی و پایداری در مدیریت منابع مطرح شده است ([Garrick و همکاران، ۲۰۲۰](#)). درک صحیح از ارزش اقتصادی آب می تواند تخصیص بهینه آن در بخش های مختلف اقتصادی را تسهیل کرده و در طراحی سیاست های حمایتی، قیمت گذاری کارا و ارزیابی پروژه های تأمین و بازیافت آب مؤثر باشد ([Grafton و همکاران، ۲۰۲۱](#)). همچنین، ارزش گذاری آب می تواند به تشکیل بازارهای آب و افزایش بهره وری آن کمک کند و دید مناسبی برای صنایع و مشاغل در مورد منافع بلندمدت و پایداری فراهم آورد. این پژوهش با استفاده از روش باقیمانده برای برآورد ارزش اقتصادی آب در صنایع بزرگ حوضه زاینده رود انجام شده است ([Ward و Michelsen، ۲۰۰۲](#)).

یافته ها نشان داد در سال ۱۴۰۳، ارزش اقتصادی آب در کل صنعت استان اصفهان برابر ۵/۲۵۴/۷۰۲ ریال، در کد ۱۹ (تولید کک و فرآورده های نفتی تصفیه شده) برابر ۵/۴۷۲/۳۴۲ ریال، در کد ۲۰ (تولید مواد شیمیایی و فرآورده های شیمیایی) برابر ۲/۳۸۳/۰۶۷ ریال، در کد ۲۳ (ساخت سایر محصولات کانی غیرفلزی) برابر ۲/۳۷۷/۸۳۸ ریال و در کد ۲۴ (ساخت فلزات اساسی) برابر ۶/۹۴۷/۱۹۰ ریال بوده است.

در دوره مورد بررسی، سهم هزینه پرداختی برای آب در هزینه کل تولید کمتر از ۰/۲ درصد بوده است، در حالی که صنایع به طور متوسط تنها ۰/۰۲ از ارزش اقتصادی آب را به عنوان هزینه پرداخت کرده اند. این نشان دهنده بهای پایین آب در صنایع استان و نیاز به اصلاح در نظام قیمت گذاری آب است. مطالعات نشان می دهند واقعی سازی قیمت ها می تواند موجب صرفه جویی و بهبود بهره وری آب شود. [قیادی و مریدی \(۱۴۰۲\)](#) مطالعات بین المللی نیز نشان می دهند قیمت گذاری ناکافی آب صنعتی باعث بروز استفاده غیر کارآمد، تخریب منابع و تشدید بحران های آبی می شود. تجربیات کشورهای مانند استرالیا و اسرائیل نشان می دهند قیمت گذاری واقعی همراه با مشوق های فناورانه می تواند بهره وری را افزایش دهد ([Garrick و همکاران، ۲۰۱۷](#)).

در تحلیل بهره وری، صنعت فلزات اساسی بهترین عملکرد را در مصرف آب داشته است، اما برای ارزیابی بهره وری آبی باید به عوامل اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی نیز توجه شود. به طور کلی، توجه به کارایی فنی بدون در نظر گرفتن ارزش اقتصادی و اثرات اجتماعی ممکن است به تخصیص غیر بهینه منابع منجر شود ([Grafton و همکاران، ۲۰۱۸](#))؛ [Lankford و همکاران \(۲۰۱۳\)](#)؛ [Molle و Berkoff \(۲۰۰۷\)](#). برای بهره وری بهتر آب در صنایع، سیاست گذاران باید شاخص های

مختلفی مانند ارزش اجتماعی آب، اشتغال‌زایی و اثرات محیط‌زیستی را در نظر بگیرند.

در این پژوهش، برخی محدودیت‌ها وجود دارد که یکی از مهمترین چالش‌های اصلی در این پژوهش، محدودیت در دسترسی به داده‌های دقیق و جامع اطلاعات آمار اقتصادی صنایع مختلف و اطلاعات مرتبط با مصرف آب در این صنایع بود. مورد دیگر مربوط به محدودیت بازه زمانی موردبررسی است، این پژوهش تنها به دوره زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۸ پرداخته است، وجود آمار در بازه‌های طولانی‌تر می‌توانست تغییرات بلندمدت‌تر در سیاست‌گذاری‌های آبی و تأثیرات آن‌ها را بهتر آشکار سازد. باتوجه به محدودیت‌های ذکرشده و همچنین نیاز به پژوهش‌های تکمیلی در این حوزه، برخی از پیشنهادها برای مطالعات آتی به شرح زیر بیان می‌شود:

برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، نیاز به جمع‌آوری و تدوین آمار و اطلاعات صنعت کشور برای ایجاد داده‌های جزئی‌تر، دقیق‌تر و بهنگام در سطح استانی و صنعتی وجود دارد. سیاست‌های تبعیض قیمت بر اساس نوع صنعت در این پژوهش پیشنهادشده است، مطالعات آینده می‌توانند به‌طور دقیق‌تر تأثیرات این سیاست‌ها را بر روی صنایع کوچک و صنایع مصرف بالای آب بررسی کنند. بررسی امکان پیاده‌سازی بازار آب برای خریدوفروش منابع آبی میان صنایع و بخش‌های مختلف اقتصادی می‌تواند موضوعی ارزشمند برای پژوهش‌های آینده باشد. پژوهش‌های آینده باید به‌طور خاص به تحلیل تأثیرات اجتماعی و محیط‌زیستی تغییرات قیمت آب بپردازند. انجام تحقیقات گسترده‌تر در این زمینه می‌تواند به سیاست‌گذاران و مدیران منابع آبی کمک کند.

سناریوهای سیاستی برای تعرفه‌گذاری آب صنعتی

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد در صورت تغییر قیمت آب صنعتی به سطح واقعی آن، هزینه تولید در صنایع بزرگ حوضه زاینده‌رود حدود ۵/۶ درصد افزایش می‌یابد. این تغییر قیمت، در بلندمدت می‌تواند به بهبود بهره‌وری آب و استفاده بهینه از منابع آبی منجر شود، اما برای پذیرش این تغییرات در کوتاه‌مدت، نیاز به یک دوره زمانی مناسب و سیاست‌های حمایتی برای تطبیق صنایع با تغییرات جدید خواهد بود. در این زمینه، سه سناریوی سیاستی مختلف پیشنهاد می‌شود.

سناریو نخست، اصلاح تدریجی تعرفه گذاری آب به‌صورت پلکانی است. در این سناریو، تعرفه‌های آب به‌طور تدریجی افزایش می‌یابند تا صنایع با ظرفیت‌های مختلف، زمان لازم برای تطبیق خود با قیمت‌های جدید را داشته باشند. بر اساس یافته‌های این پژوهش، افزایش ۵/۶ درصدی در هزینه تولید نشان می‌دهد که صنایع در کوتاه‌مدت قادر به پذیرش این تغییرات نیستند و ازاین‌رو باید به‌طور پلکانی و با افزایش تدریجی تعرفه‌ها این سیاست اجرایی شود. در خصوص مزایای سناریوی پیشنهادی می‌توان به امکان پذیرش تدریجی تغییرات قیمت برای صنایع، حفظ پایداری اقتصادی در کوتاه‌مدت و افزایش انگیزه‌ها برای بهبود بهره‌وری و استفاده از

تکنولوژی‌های کم‌آب‌بر اشاره کرد و در مقابل می‌توان معایبی چون افزایش هزینه‌های تولید که ممکن است به‌طور موقت فشارهایی را بر صنایع وارد کند و نیاز به نظارت دقیق بر روند اجرای این سیاست؛ را مترتب دانست.

سناریوی دوم بر ایجاد یک نظام تعرفه‌گذاری تبعیضی بین صنایع مختلف تأکید دارد. در این سناریو، قیمت آب برای صنایع بزرگ و باارزش اقتصادی بالا، به‌طور قابل‌توجهی افزایش خواهد یافت، درحالی‌که برای صنایع کوچک‌تر و نیازمند حمایت، تعرفه‌های پایین‌تر در نظر گرفته می‌شود. این سیاست به‌ویژه برای صنایعی که نیاز به حمایت و تکنولوژی‌های نوین دارند، می‌تواند مؤثر واقع شود. این سیاست، همان‌طور که در بسیاری از کشورهای پیشرفته مشاهده می‌شود، می‌تواند به افزایش بهره‌وری آب، حفظ اشتغال و توسعه صنایع نوین کمک کند. از مزایای این سیاست می‌توان به مواردی چون حمایت از صنایع نوآور و کم‌آب‌بر، کاهش خطر تعطیلی صنایع کوچک‌تر، تشویق به استفاده از فناوری‌های تصفیه پساب و کاهش فشار بر منابع آبی اشاره نمود. البته اتخاذ این سیاست می‌تواند معایبی ازجمله پیچیدگی در پیاده‌سازی و نظارت بر اجرای تبعیض قیمت و احتمال ایجاد نابرابری‌های جدید در بخش‌های صنعتی را هم به همراه داشته باشد.

در سناریوی سوم، تعرفه‌های آب برای صنایع آب‌بر و بزرگ، به‌ویژه صنایعی که قادر به سرمایه‌گذاری در سیستم‌های تصفیه پساب هستند، افزایش می‌یابد. این صنایع می‌توانند بخشی از آب موردنیاز خود را از منابع غیرمتعارف مانند سیستم‌های تصفیه فاضلاب تأمین کنند. درعین‌حال، صنایع کوچک‌تر که وابستگی کمتری به آب دارند یا از فناوری‌های کم‌آب‌بر استفاده می‌کنند، می‌توانند از تعرفه‌های پایین‌تر بهره‌مند شوند. این سیاست همچنین می‌تواند صنایع بزرگ را تشویق کند تا در زمینه فناوری‌های بازچرخانی آب و تصفیه پساب سرمایه‌گذاری کنند. مزایای این سیاست شامل افزایش بهره‌وری آب در صنایع بزرگ، تشویق به استفاده از فناوری‌های نوین و کاهش مصرف آب و کاهش فشار بر منابع آبی از طریق استفاده از پساب خواهد بود و می‌تواند معایبی نیز چون نیاز به سرمایه‌گذاری بالا برای صنایع در بخش فناوری‌های تصفیه پساب و احتمال ایجاد نابرابری در تأمین منابع آب برای صنایع مختلف را در پی داشته باشد.

درمجموع، تغییر تعرفه‌های آب به ارزش اقتصادی واقعی باعث افزایش هزینه‌های تولید می‌شود، اما در بلندمدت موجب بهبود بهره‌وری و کاهش هدر رفت آب خواهد شد. صنایع بزرگ‌تر قادر به تحمل هزینه‌های بیشتر هستند، اما صنایع کوچک نیاز به حمایت دولتی دارند. ایجاد تفاوت در تعرفه‌ها می‌تواند عدالت در تخصیص منابع آب را افزایش دهد و فشار بر صنایع کوچک‌تر را کاهش دهد. این سیاست‌ها باید طوری طراحی شوند که موجب نابرابری‌های اجتماعی و اقتصادی نشوند. اصلاح تدریجی تعرفه‌ها و سیاست تبعیض

- Enteshari, S., Safavi, H. R., & van der Zaag, P. (2020). Simulating the interactions between the water and the socio-economic system in a stressed endorheic basin. *Hydrological Sciences Journal*, 65(13), 2159–2174, <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1802027>.
- FAO. (2021). The value of water: Valuing water and water-related ecosystem services. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome, Italy.
- Garrick, D., O'Donnell, E., & Moore, B. (2017). Water markets in the Global South: Trends, drivers and impacts. *Environmental Research Letters*, 12(4), 044008, <https://doi.org/10.4337/9781788976930.00010>.
- Gibbons, D. C. (1986). The economic value of water. Resources for the Future. RFF Press. New York, USA.
- Grafton, R. Q., Sarah Ann Wheeler (2018). Economics of Water Recovery in the Murray-Darling Basin, Australia. *Annual Review of Resource Economics*, 10, 487–510. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100517-023039>.
- Grafton, R. Q., Chu, H. L., & Wyrwoll, P. (2021). The paradox of water pricing: dichotomies, dilemmas, and decisions. *Oxford Review of Economic Policy*, 36(1), 86–107. <https://doi.org/10.1093/oxrep/grz030>.
- Grafton, R. Q., Manero, A., Chu, L., & Wyrwoll, P. (2023). The price and value of water: An economic review. Cambridge Prisms: Water. Cambridge University Press. Cambridge, UK, <https://doi.org/10.1017/wat.2023.2>.
- Grafton, R. C. (2006). Water resource economics: The analysis of scarcity, policies, and projects. MIT Press. Cambridge, Massachusetts, USA.
- Howitt, R. E. (1995). Positive mathematical programming. *American Journal of Agricultural Economics*, 77(2), 329–342. <https://doi.org/10.2307/1243543>
- Irfeey, A. M. M., Alotaibi, B. A., Najim, M. M., & Shah, A. A. (2023). Water valuation in urban settings for sustainable water management. *Water*, 15(17), 3105. <https://doi.org/10.3390/w15173105>
- Ktori, R., van Loosdrecht, M. C., & Xevgenos, D. (2025). Economic evaluation of water and resource recovery plants: A novel perspective on levelized cost. *Desalination*, 599, 118475. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118475>
- Ku, S. J., & Yoo, S. H. (2012). Economic value of water in the Korean manufacturing industry. *Water Resources Management*, 26(1), 81–88. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-011-9905-z>
- قیمت، می‌تواند به بهره‌وری بیشتر آب و کاهش هدررفت منابع کمک کند.
- تهامی‌پور زرنندی، مرتضی. (۱۳۹۵). ارزش اقتصادی، رویکردی برای مدیریت تقاضای آب در مصارف صنعتی مطالعه موردی: صنایع تولید مواد شیمیایی. نشریه آب و فاضلاب، ۲۸(۱)، ۷۴–۸۳. <https://doi.org/10.22093/wwj.2017.39476>
- تهامی‌پور زرنندی، مرتضی، خزایی، علیرضا، و کولیوند، فتنه. (۱۳۹۸). تحلیل نظام تعرفه و ارزش اقتصادی آب در بخش صنعت ایران، فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۶(۳)، ۳۰–۱۹. <https://doi.org/76788i6v.jwsd10.22067>
- قبادی، شهرام، و مریدی، علی. (۱۴۰۲). ارزش‌گذاری اقتصادی آب. مدیریت آب و آبیاری، ۱۳(۱)، ۱–۱۶. <https://doi.org/10.22059/jwim.2022.342815.992>
- محبی، حسن، انصاری سامانی، حبیب، حاج‌امینی، مهدی، و مرادی، غلامحسین. (۱۴۰۱). برآورد ارزش اقتصادی آب در صنایع استان یزد: رهیافت ارزش تولید نهایی آب. فصلنامه سیاست‌های مالی و اقتصادی، ۱۰(۳۹)، ۱۱۷–۱۴۱. <http://qjefp.ir/article-1-1427-fa.html>
- مهندسین مشاور اینتر ۳. (۱۳۹۲). مطالعات طرح جامع منابع آب حوضه آبریز زاینده رود، شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، اصفهان، ایران.
- مهندسین مشاور یکم. (۱۳۹۲). بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور (حوضه آبریز گاوخونی)، گزارش نهایی مطالعات اقتصادی، وزارت نیرو، تهران، ایران.
- Abbas, F., Al-Naemi, S., Farooque, A. A., & Phillips, M. (2023). A review on the water dimensions, security, and governance for two distinct regions. *Water*, 15(1), 208. <https://doi.org/10.3390/w15010208>.
- Briscoe, J., & de Ferranti, D. (1988). Water for rural communities: Helping people help themselves. International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank. 121, Washington, DC 20433.
- Brouwer, R., & Pearce, D. (2005). Cost-benefit analysis and water resources management, Edward Elgar Publishing. London, UK.
- Chambers, R. G. (1988). Applied production analysis: A dual approach, Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Elmulthum, N. A., Zeineldin, F. I., Al-Khateeb, S. A., Al-Barrak, K. M., Mohammed, T. A., Sattar, M. N., & Mohmand, A. S. (2023). Water use efficiency and economic evaluation of the hydroponic versus conventional cultivation systems for green fodder production in Saudi Arabia. *Sustainability*, 15(1), 822. <https://doi.org/10.3390/su15010822>.

- Valley of Mexico Basin, Mexico. *Water Resources and Economics*, 30, 100138. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2019.01.004>
- Rodrigues, G. C., da Silva, F. G., & Coelho, J. C. (2021). Determining farmers' willingness to pay for irrigation water in the Alentejo Region (Southern Portugal) by the residual value method. *Agronomy*, 11(1), 142. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010142>
- Rogers, P., Bhatia, R., & Huber, A. (1998). *Water as a social and economic good: How to put the principle into practice*. Stockholm, Sweden. PP 40.
- Rosegrant, M. W., & Binswanger, H. P. (1994). Markets in tradable water rights: Potential for efficiency gains in developing country water resource allocation. *World Development*, Elsevier, 22(11), 1613-1625. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(94\)00075-1](https://doi.org/10.1016/0305-750X(94)00075-1)
- Sadoulet, E., & de Janvry, A. (1995). *Quantitative development policy analysis*. Johns Hopkins University Press. Baltimore, USA. PP 397.
- Tsur, Y., & Dinar, A. (1997). On the relative efficiency of alternative methods for pricing irrigation water and their implementation. *World Bank Economic Review*, 11(2), 243-262. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.232800>
- Vadez, V., Pilloni, R., Grondin, A., Hajjarpoor, A., Belhoucette, H., Brouziyne, Y., Chehbouni, G., Kharrou, M.H., Zitouna-Chebbi, R., Mekki, I., & Molénat, J., & Bossuet, J. (2023). Water use efficiency across scales: From genes to landscapes. *Journal of Experimental Botany*, 74(16), 4770-4788. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad052>
- Wang, H., & Lall, S. (2002). Valuing water for Chinese industries: A marginal productivity analysis. *Applied Economics*, 34(6), 759-765. <https://doi.org/10.1080/00036840110054044>
- Ward, F. A., & Michelsen, A. M. (2002). The economic value of water in agriculture: Concepts and policy applications. *Water Policy*, 4(5), 423-446. [https://doi.org/10.1016/S1366-7017\(02\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S1366-7017(02)00039-9)
- Young, R. A. (2005). *Determining the economic value of water: Concepts and methods (2nd Edition)*. Resources for the Future. Washington DC, USA.
- Young, R. A., & Loomis, J. B. (2014). *Determining the economic value of water: Concepts and methods (2nd Edition)*. Routledge, New York. <https://doi.org/10.4324/9780203784112>
- Ziaei, L. (2020). Zayandeh Rud River basin: A region of economic and social relevance in the central plateau of Iran. In *Standing up to climate change: Creating prospects for a sustainable future in Rural Iran* (pp. 91-105). https://doi.org/10.1007/978-3-030-50684-1_5
- Lankford, B. (2013). Does improved irrigation efficiency save water? , PP. 40, Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. Cairo, Egypt.
- LIU, W. Z., Tang, L., Wang, X. Q., & Wang, J. H. (2019). Estimating economic value of irrigation water and analysis of influencing factors: A case study based on residual value method and farmers' data in Guanzhong area of Shaanxi. *Journal of Natural Resources*, 34(3), 553-562. <https://doi.org/10.31497/zrzyxb.20190309>
- Lowe, B. H., Zimmer, Y., & Oglethorpe, D. R. (2022). Estimating the economic value of green water as an approach to foster the virtual green-water trade. *Ecological Indicators*, 136, 108632. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108632>
- Meran, G., Siehlow, M., & von Hirschhausen, C. (2021). Integrated water resource management: Principles and applications. In G. Meran et al., *The economics of water: Rules and institutions*. Springer, 23-121. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-48485-9_3
- Mishra, R. K. (2023). Fresh water availability and its global challenge. *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, 4(3), 1-78. <https://doi.org/10.37745/bjmas.2022.0208>
- Molle, F., & Berkoff, J. (2007). *Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement*. International Water Management Institute. Sri Lanka, PP 342.
- Mousavi, S. M., Sarai Tabrizi, H., & Talachi Langroudi, H. (2021). Investigation of economic value of water in environmental, agricultural and industrial uses (Case study: Urmia Lake catchment). *Man and the Environment*, 19(3), 79-95. <https://doi.org/10.30495/wej.2022.27984.2314>
- Parra-Orobio, B. A., Soto-Paz, J., Ramos-Santos, A., Sanjuan-Quintero, K. F., Saldaña-Escorcia, R., Dominguez-Rivera, I. C., & Sánchez, A. (2023). Assessment of the water footprint in low-income urban neighborhoods from developing countries: Case study Fátima (Gamarra, Colombia). *Sustainability*, 15(9), 7115. <https://doi.org/10.3390/su15097115>
- Revollo-Fernández, D. A., Rodríguez-Tapia, L., & Morales-Novelo, J. A. (2018). Economic value of the water in the manufacturing industry in the San Juan River hydrological sub-region, Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(5), 218-245. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-05-09>
- Revollo-Fernández, D. A., Rodríguez-Tapia, L., & Morales-Novelo, J. A. (2020). Economic value of water in the manufacturing industry located in the

1. Benefit transfer
2. Benefit function transfer/meta-analysis
3. Residual method
4. Mathematical programming
5. Value-added approach
6. Computable general equilibrium models (CGE)
7. Alternative cost method
8. Compensation of Employees
9. Operating Surplus
10. Depreciation
11. Net Taxes
12. Inductive methods
13. Deductive methods
14. Observed water market transactions
15. Production and Cost functions
16. Travel cost method (TCM)
17. Hedonic pricing method (HPM)
18. Averting behavior
19. Damage cost approach
20. Contingent valuation method (CVM)
21. Choice modeling (CM)
22. Urban water demand estimation

Document Type

Applied Article

پژوهش کاربردی

نوع مقاله

Meta-Analysis of the Role of the Internet of Things in the Future of Urban Water Systems in Tehran Metropolis

L. Bakhtiari^{1*}, N. Ahangari²

1- Assistant Professor, Department of Geography, Payame Noor University, Tehran, Iran.

2- Ph.D. in Geography and Urban Planning, Kharazmi University, Tehran, Iran.

* Corresponding, Author Email: Leily.bakhtiari@pun.ac.ir

Received 23-09-2025
Revised 05-11-2025
Accepted 27-12-2025
Available online 16-03-2026

Abstract

The Internet of Things (IoT), through real-time monitoring and data analysis, enhances the sustainability of urban water systems and guides cities towards smart management and sustainable water supply. In this regard, the present research study has been prepared with the aim of meta-analyzing the role of the Internet of Things in the future of urban water systems in Tehran metropolis. The research approach is a systematic and structural meta-analysis, which is applied in terms of objective and descriptive-analytical in terms of methodology, based on bibliometrics and Delphi. In the first part, through systematic analysis, 388 articles retrieved from the Scopus database were identified and analyzed using VOSviewer software. In the second, structural part, 14 key indicators were analyzed using the MICMAC technique, and future scenarios were identified with the Scenario Wizard software. The statistical population comprises experts in the fields of water and urban planning, from whom 60 individuals were selected as the statistical sample using purposive sampling. The results indicate the dominance of research output from India (30.9%), China (8.5%), and the United States (7.2%). The primary research areas investigated include water quality monitoring, leak detection, smart metering, and demand management, while future challenges encompass data security, privacy, and interoperability between systems. The results of the structural analysis showed that smart irrigation has the highest influence and water infrastructure monitoring has the highest susceptibility, highlighting the key role of technology and infrastructure in urban water management. The scenarios indicated that only through the synergy of smart technologies, data analysis, and cybersecurity can high efficiency and equitable access to water be achieved in Tehran metropolis. Therefore, future predictive analyses, increased connectivity, and IoT integration are essential for optimizing water resource management and ensuring its long-term sustainability.

Keywords: Meta-Analysis; Foresight, Internet of Things (IoT), Urban Water Systems, Tehran Metropolis.

فرا تحلیل نقش اینترنت اشیا در آینده سیستم‌های آب شهری کلان‌شهر تهران

لیلی بختیاری^{۱*}، نوید آهنگری^۲

۱- استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

۲- دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

* راینامه نویسنده مسئول: Leily.bakhtiari@pun.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۷/۰۱
تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۸/۱۴
تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۱۰/۰۶
تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

چکیده

اینترنت اشیا با پایش و تحلیل داده‌ها، پایداری سیستم‌های آب شهری را افزایش می‌دهد و شهرها را به سمت مدیریت هوشمند آب هدایت می‌کند. در این راستا، پژوهش با هدف فرا تحلیل نقش اینترنت اشیا در آینده سیستم‌های آب شهری کلان‌شهر تهران تهیه شده است. رویکرد پژوهش، فرا تحلیل نظام‌مند و ساختاری است که از نظر هدف کاربردی و از نظر نوع روش توصیفی-تحلیلی مبتنی بر کتاب‌سنجی و دلفی بوده است. در بخش تحلیل نظام‌مند، ۳۸۸ مقاله بازیابی شده از پایگاه Scopus شناسایی شده و با استفاده از نرم‌افزار VOSviewer تحلیل شدند. در بخش ساختاری، ۱۴ شاخص کلیدی با تکنیک MICMAC تحلیل و سناریوهای آینده با نرم‌افزار Scenario Wizard شناسایی شد. جامعه آماری خبرگان حوزه آب و برنامه‌ریزی شهری می‌باشد که با روش نمونه‌گیری هدفمند ۶۰ نفر نمونه آماری انتخاب شدند. نتایج نشان‌دهنده تسلط تولیدات پژوهشی هند (۳۰/۹ درصد)، چین (۸/۵) و ایالات متحده (۷/۲ درصد) است. حوزه‌های پژوهشی شامل پایش کیفیت آب، تشخیص نشت، اندازه‌گیری هوشمند و مدیریت تقاضا هستند، درحالی‌که چالش‌های آینده شامل امنیت داده‌ها، حفظ حریم خصوصی و قابلیت تعامل بین سامانه‌ها می‌باشد. نتایج ساختاری نشان داد آبیاری هوشمند بیشترین تأثیرگذاری و پایش زیرساخت‌های آبی بیشترین تأثیرپذیری را دارند و نقش کلیدی فناوری و زیرساخت در مدیریت آب شهری را برجسته می‌کند. سناریوها نشان داد که با هم‌افزایی فناوری‌های هوشمند، تحلیل داده و امنیت سایبری می‌توان به بهره‌وری و عدالت در دسترسی به آب در کلان‌شهر تهران رسید؛ بنابراین در آینده تحلیل‌های پیش‌بینی، افزایش اتصال و یکپارچه‌سازی اینترنت اشیا برای بهینه‌سازی مدیریت منابع آب و تضمین پایداری بلندمدت آن ضروری است.

واژه‌های کلیدی: فرا تحلیل، آینده پژوهی، اینترنت اشیا، سیستم‌های

آب شهری، کلان‌شهر تهران.

How to cite this article:

Bakhtiari, L., & Ahangari, N. (2026). Meta-Analysis of the Role of the Internet of Things in the Future of Urban Water Systems in Tehran Metropolis. Journal of Water and Sustainable Development, 12(4), 159-176.
<https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i4.2509-1457>

بسیاری از شرکت‌های آب در مراحل اولیه پذیرش پلتفرم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء قرار دارند و انتظار می‌رود بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۰ تعداد شبکه‌های هوشمند تقریباً شش برابر شود و به ۱۵۲ میلیون اتصال برسد که حدود ۴/۳۴ درصد از اتصالات جهانی پیش‌بینی شده را تشکیل می‌دهد ([Obunga و همکاران، ۲۰۲۵a](#)). باتوجه به اهمیت پایش مستمر و بهره‌برداری مؤثر از شبکه‌های توزیع آب، سرمایه‌گذاری در راهکارهای مبتنی بر اینترنت اشیاء و دیجیتال‌سازی، به ویژه در محیط‌های شهری در حال توسعه، برای تضمین ارائه خدمات آب مطمئن و پایدار به مصرف‌کنندگان حیاتی است. این روند نشان می‌دهد آینده مدیریت آب شهری مبتنی بر ادغام فناوری‌های هوشمند و شبکه‌های دیجیتال، مسیر دستیابی به شهرهای هوشمند و پایدار را هموار می‌کند ([Adedeji و همکاران، ۲۰۲۲؛ Boyle و همکاران، ۲۰۲۲](#)).

در سال‌های اخیر، ادغام فناوری‌های اینترنت اشیاء در مدیریت و پایش آب تحولی بنیادین ایجاد کرده است ([Alshami و همکاران، ۲۰۲۴](#)) و به‌عنوان یک پیشرفت قابل توجه در مدیریت سیستم‌های آب شهری مطرح شده است و با بهره‌گیری از قابلیت‌های پیشرفته حسگرها، جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای و تحلیل‌های هوشمند، امکان بهبود کارکرد این سامانه‌ها را فراهم می‌کند ([Jan و همکاران، ۲۰۲۱](#)). با استقرار دستگاه‌ها، حسگرها و عملگرهای متصل به یکدیگر، اینترنت اشیاء امکان نظارت، مدیریت و بهینه‌سازی اجزای مختلف سیستم‌های آب شهری را فراهم می‌آورد ([Kulangara Velayudhan و همکاران، ۲۰۲۲](#)). این دستگاه‌ها مجموعه‌ای گسترده از اطلاعات را شامل کیفیت آب، الگوهای مصرف، اندازه‌گیری فشار، نرخ جریان و عملکرد سامانه جمع‌آوری و منتقل می‌کنند ([Ramadhan و همکاران، ۲۰۲۰](#)). داده‌های گردآوری شده، تحت تحلیل و پردازش دقیق قرار می‌گیرند تا بینش‌های ارزشمندی فراهم کنند، به‌ذی‌نفعان امکان تصمیم‌گیری آگاهانه دهند، مشکلات را به‌صورت پیشگیرانه مدیریت کنند و برنامه‌های مؤثر مدیریت آب را به اجرا گذارند ([Dharmarathne و همکاران، ۲۰۲۵](#)).

علاوه‌براین هوشمندی و مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر اینترنت اشیاء این امکان را برای شرکت‌ها و نهادهای مسئول آب فراهم می‌آورد که کارایی کلی سیستم را بهبود بخشند، توزیع آب را بهینه کنند و برآورد تقاضا را با دقت بیشتری انجام دهند. الگوریتم‌های پیش‌بینی با ترکیب داده‌های لحظه‌ای مربوط به وضعیت هوا، تراکم جمعیت و روندهای مصرف گذشته، برآوردهای دقیقی از تقاضا ارائه می‌کنند ([Kulangara Velayudhan و همکاران، ۲۰۲۲](#)). این امر امکان تخصیص منابع به‌صورت پیشگیرانه و بهینه‌سازی عملیات تصفیه و توزیع را فراهم می‌سازد. با سازگاری با شرایط متغیر و کاهش ریسک‌های ناشی از خشکسالی،

با رشد جمعیت و توسعه زیرساخت‌ها در شهرهای سراسر جهان، فشار بر منابع آب افزایش یافته ([Das، ۲۰۲۴](#)) و سیستم‌های آب شهری با چالش‌های بی‌سابقه ناشی از زیرساخت‌های فرسوده، رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی مواجه شده‌اند ([Infant و همکاران، ۲۰۲۵](#)). این سیستم‌ها که در گذشته بیشتر برای تأمین آب آشامیدنی سالم، دفع فاضلاب و کاهش خطر سیلاب طراحی شده بودند، امروزه در پاسخگویی به نیازها و عدم قطعیت‌های فزاینده قرن بیست‌ویکم با مسائل قابل توجهی روبه‌رو هستند ([Doorn، ۲۰۲۱](#)). در حال حاضر، چالش‌های جهانی متنوعی در زمینه آب وجود دارد که شامل دسترسی محدود، ناپایداری و ناکافی بودن آب سالم و پاک است؛ در حالی که در سال ۲۰۲۰ تنها ۷۴ درصد از جمعیت جهان به این منابع دسترسی داشتند ([WHO، ۲۰۲۲](#)). علاوه‌براین دسترسی به آب و کیفیت آن در سطح جهانی تغییرات چشمگیری را تجربه می‌کند و انتظار می‌رود که فشار آب تا سال ۲۰۲۵ بیش از ۵۰ درصد جمعیت جهان را تحت تأثیر قرار دهد ([Adu-Manu و همکاران، ۲۰۱۷](#)). علاوه‌براین، بیش از دو میلیارد نفر در حال تجربه فشار شدید آب هستند که ناشی از مصرف بیش از حد و استفاده از بیش از ۸۰ درصد منابع آب در دسترس آن‌ها می‌باشد ([Kulangara Velayudhan و همکاران، ۲۰۲۲](#)). در این زمینه، یکپارچه‌سازی فناوری اینترنت اشیاء در سیستم‌های آب شهری، فرصت‌های بی‌نظیری برای بهبود بهره‌وری، پایداری و تاب‌آوری فراهم می‌کند؛ بنابراین، انتظار می‌رود که آینده سیستم‌های آب شهری به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر اینترنت اشیاء به عنوان مجموعه‌ای نوظهور از فناوری‌ها قرار گیرد ([Yuan و همکاران، ۲۰۱۹](#)).

شرکت‌های آب در سراسر جهان با چالش‌های مستمر در تأمین پایدار، کافی و پیوسته آب برای مصرف‌کنندگان مواجه هستند، زیرا افزایش جمعیت، فشارهای ناشی از شهرنشینی و تغییرات اقلیمی بر منابع آب فشار وارد می‌کنند ([Adedeji و همکاران، ۲۰۲۲](#)). دستیابی به ششمین هدف توسعه پایدار سازمان ملل^۱ که بر تأمین آب سالم و پایدار برای همه تأکید دارد، نیازمند به‌کارگیری فناوری‌های نوین و هوشمند در شبکه‌های توزیع آب است ([Dharmarathne و همکاران، ۲۰۲۵](#)). اینترنت اشیاء به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در دیجیتال‌سازی این شبکه‌ها، امکان پایش لحظه‌ای، مدیریت تقاضا و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های آب را فراهم می‌کند و پیش‌بینی می‌شود تعداد اتصالات آن تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۴ میلیارد برسد، درحالی‌که این رقم در سال ۲۰۲۱ تقریباً ۲ میلیارد بود ([Boyle و همکاران، ۲۰۲۲](#)). این رشد چشمگیر به ویژه در کشورهای در حال توسعه محسوس است، جایی که

سیلاب یا خرابی زیرساخت‌ها، این قابلیت‌ها نه تنها موجب کاهش هدررفت آب می‌شوند، بلکه تاب‌آوری سیستم‌های آب شهری را نیز افزایش می‌دهند. اینترنت اشیا به‌ویژه برای سیستم‌های آب شهری تحول‌آفرین است، زیرا امکان نگهداری پیش‌بینانه، کاهش هدررفت منابع و انطباق با مقررات را از طریق نظارت مستمر فراهم می‌کند ([Alshami و همکاران، ۲۰۲۴](#)).

با وجود فرصت‌های فراوان، یکپارچه‌سازی اینترنت اشیا در سیستم‌های آب شهری با چالش‌های منحصربه‌فردی مواجه است که برخلاف اکثر کاربردهای اینترنت اشیا ناشی از ماهیت پیچیده شبکه‌های توزیع آب، اهمیت راهبردی مدیریت منابع آب و آسیب‌پذیری بیشتر در برابر خطرات محیطی است ([Alshami و همکاران، ۲۰۲۴](#)). برخلاف پیاده‌سازی‌های اینترنت اشیا در حوزه‌هایی مانند خانه‌های هوشمند یا خرده‌فروشی، سیستم‌های آب شهری نیازمند نظارت لحظه‌ای بر متغیرهای پیچیده‌ای همچون کیفیت آب، فشار و نشت در زیرساخت‌های غالباً قدیمی و غیرمتمرکز هستند. ضروری است که فناوری‌های حسگر پیشرفته، دستگاه‌های کم‌مصرف و چارچوب‌های ارتباطی مقاوم مستقر شوند تا بتوانند در سخت‌ترین شرایط و محیط‌های دورافتاده عملکرد مؤثر داشته باشند ([Zyoud، ۲۰۲۵](#)).

شواهد فزاینده‌ای در قالب اطلاعات مربوط به راهکارهای مبتنی بر اینترنت اشیا در حوزه‌های متنوع وجود دارد. پژوهشگران توسعه و اثرات پذیرش اینترنت اشیا را در بسیاری از حوزه‌های علمی از جمله مدیریت زمین ([Patel و همکاران، ۲۰۲۳](#))، کشاورزی هوشمند ([Mengash و همکاران، ۲۰۲۵](#))، بهداشت و درمان ([Patil، ۲۰۲۳](#))، انرژی هوشمند ([Rao و همکاران، ۲۰۲۵](#))، شهر هوشمند ([Cerasi و Akturk، ۲۰۲۳](#))؛ [He و همکاران، ۲۰۲۲](#))، طراحی منظر ([Yang و Li، ۲۰۲۴](#))، صنعت ۴.۰ ([Zhang و همکاران، ۲۰۲۴](#))، ایمنی کار ([Zorzenon و همکاران، ۲۰۲۵](#))، تولید پایدار ([Vadruccio و همکاران، ۲۰۲۵](#))، شبکه‌های هوشمند ([Nasrinasrabadi و همکاران، ۲۰۲۵](#))، آموزش ([Dai و همکاران، ۲۰۲۱](#)) و اقتصاد دایره‌ای ([Mehmood و همکاران، ۲۰۲۵](#))، بررسی کردند. اگرچه پیاده‌سازی اینترنت اشیا در سیستم‌های آب شهری با کاربردهای رایج آن در این حوزه‌ها همسو است، تحلیل نظام‌مند و ساختاری جامع در زمینه خاص سیستم‌های آب شهری محدود است. این خلأ، انگیزه‌ای برای پژوهش حاضر شد تا روندهای پژوهشی، موضوعات نوظهور و آینده پژوهی در کاربرد اینترنت اشیا برای مدیریت آب شهری را بررسی نمایند.

نقش اینترنت اشیا در آینده سیستم‌های آب شهری باتوجه‌به پژوهش‌های اخیر به‌عنوان چارچوبی یکپارچه و هوشمند برای مدیریت منابع آب به‌وضوح قابل مشاهده است. در این راستا، مطالعه [Amador-Castro و همکاران \(۲۰۲۴\)](#)، نشان داد که

اینترنت اشیا پایش کیفیت آب شهری را سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر می‌کند و علم شهروندی وضوح مکانی-زمانی داده‌ها را افزایش می‌دهد. [Sheeba و همکاران \(۲۰۲۵\)](#)، نشان دادند با ترکیب اینترنت اشیا و بلاکچین پیش‌بینی تقاضای آب محیط‌های شهری با دقت زیاد انجام می‌شود و باعث هم‌افزایی فناوری‌های نوظهور در مدیریت منابع آب شهری می‌شود. پژوهش‌های [Hamel و همکاران \(۲۰۲۴\)](#) و [Alshami و همکاران \(۲۰۲۴\)](#)، ضرورت استقرار اینترنت اشیا، استفاده برای ارتقای دقت داده‌ها و بهینه‌سازی مدیریت سیستم‌های آب و فاضلاب را تایید کردند. [Dharmarathne و همکاران \(۲۰۲۵\)](#) و [Infant و همکاران \(۲۰۲۵\)](#)، نشان دادند ترکیب اینترنت اشیا با یادگیری ماشین و هوش مصنوعی قابل توضیح تحلیل پیش‌بینانه کیفیت آب، شناسایی نشت و بهینه‌سازی مصرف انرژی را ممکن کرده و شفافیت و اعتماد ذی‌نفعان را افزایش می‌دهد؛ موضوعی که با نتایج [Naith و Mancy \(۲۰۲۵\)](#)، همسو است، زیرا با اینترنت اشیا، بهره‌وری انرژی و پایداری فشار سیستم آب در شبکه‌های شهری بهبود یافته و قابلیت اعتماد اپراتورها تقویت می‌شود. [Pagano و همکاران \(۲۰۲۵\)](#)، نشان دادند استقرار گسترده اینترنت اشیا در سامانه‌های توزیع آب، وابستگی به فضای ابری را کاهش داده و پایداری سیستم آب شهری افزایش یافته است. مطالعات [Obunga و همکاران \(۲۰۲۵b\)](#) و [Chundru و همکاران \(۲۰۲۵\)](#)، نشان داد اینترنت اشیا موجب کاهش آب غیر درآمدی، بهینه‌سازی فرآیندهای مدیریت آب، کاهش زمان پاسخ به بحران‌ها و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود، یافته‌ای که در مطالعات [Kulangara Velayudhan و همکاران \(۲۰۲۲\)](#)، [Adeleke و همکاران \(۲۰۲۳\)](#) و [Das \(۲۰۲۴\)](#) نیز مشاهده شد، زیرا ترکیب اینترنت اشیا و هوش مصنوعی امکان پیش‌بینی نگهداری، شناسایی نشت و تحلیل داده‌های گسترده شبکه را فراهم کرده و کارایی توزیع آب شهری را بهبود می‌بخشد. [Mondal \(۲۰۲۴\)](#)، [Okoli و Kabaso \(۲۰۲۴\)](#) و [Kalyanam \(۲۰۲۳\)](#)، نشان دادند استفاده از هوش مصنوعی و اینترنت اشیا موجب کاهش هدررفت آب، بهبود توزیع و کیفیت آب، شناسایی سریع نشت‌ها، پیش‌بینی مصرف آینده و افزایش پایداری و مقاومت سیستم‌های آب شهری می‌شود. در نهایت مرور جامع [نورمند \(۱۴۰۱\)](#) و [ایزدی‌فر \(۱۴۰۳\)](#)، نشان داد اینترنت اشیا و هوش مصنوعی با هم‌افزایی یکدیگر، سیستم‌های آب شهری را به صورت چارچوبی هوشمند، پیش‌بینانه و مقاوم توسعه می‌دهند، به گونه‌ای که آینده مدیریت آب شهری بر پایه اینترنت اشیا و تحلیل هوشمند داده‌ها شکل گرفته و امکان تصمیم‌گیری بهینه و کارآمد در سطح کلان شهری فراهم می‌شود؛ بنابراین، مرور ادبیات نشان می‌دهد که اینترنت اشیا با ادغام هوش مصنوعی و فناوری‌های نوظهور مانند بلاکچین، حسگرهای کم‌هزینه و

پروتکل‌های پیشرفته، قابلیت پایش لحظه‌ای، پایش‌بینی تقاضا، شناسایی نشت، بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش شفافیت و اعتماد ذی‌نفعان را دارد و به کاهش هدررفت آب، افزایش بهره‌وری انرژی و ارتقای توسعه پایدار شهری کمک می‌کند، به گونه‌ای که مسیر تحقق شهرهای هوشمند، مقاوم و کارآمد را هموار می‌سازد.

کلان‌شهر تهران با افزایش بی‌سابقه جمعیت و تغییرات اقلیمی، زیرساخت‌های آبرسانی خود را با فشار شدیدی مواجه کرده است. فرسودگی و ناکارآمدی شبکه‌های انتقال و توزیع آب باعث نشت گسترده و هدررفت مقادیر قابل توجهی از آب تصفیه شده (۲۲/۹ درصد) شده است، درحالی‌که نبود برنامه‌های هدفمند و ساختارمند برای مدیریت این شبکه، کنترل کارآمد منابع آب را با محدودیت مواجه کرده است (Mohammadi و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه‌براین تفاوت ماهیت هدررفت آب در تهران، که عمدتاً ناشی از مصرف غیرمجاز و خطاهای اندازه‌گیری است، بر پیچیدگی مدیریت شبکه افزوده و نشان می‌دهد که فقدان برنامه‌ریزی راهبردی و نظام مستندسازی داده‌ها باعث تصمیم‌گیری‌های ناکارآمد و عدم تعادل میان نیازها و عملکرد شبکه شده است (Kiyani و همکاران، ۲۰۲۳). بر این اساس، پژوهش حاضر با تلفیق رویکرد نظام‌مند و تحلیل ساختاری، به بررسی ظرفیت‌ها و چالش‌های آینده به‌کارگیری اینترنت اشیا در مدیریت شبکه آب شهری تهران می‌پردازد و تأثیرات آن را بر بهبود بهبود کارایی و پایداری سیستم‌های آب این کلان‌شهر بررسی می‌نماید.

مواد و روش‌ها

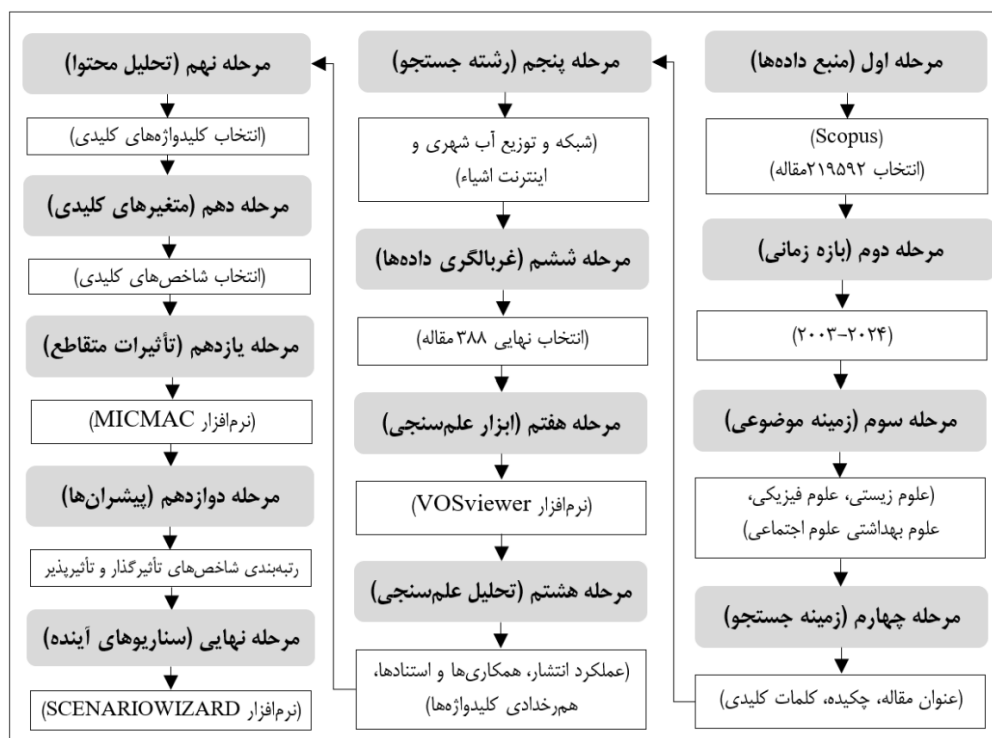
پژوهش حاضر مبتنی بر رویکرد فراترکیب نظام‌مند و تحلیل ساختاری است و روش پژوهش از نظر هدف کاربردی، و از لحاظ نوع توصیفی - تحلیلی بر اساس روش کتاب‌سنجی و دلفی بوده است. در این پژوهش، به منظور گردآوری داده‌های علمی، جستجویی نظام‌مند در پایگاه اسکوپوس^۲ انجام شد که تمامی حوزه‌های مرتبط با اینترنت اشیا و سیستم‌های آب شهری را از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۴ پوشش می‌داد. این فرایند شامل چند مرحله اصلی بود: ابتدا تعیین واژگان کلیدی مرتبط با اینترنت اشیا و سیستم‌های آب شهری (سیستم‌های توزیع آب، شبکه‌های توزیع آب، سیستم‌های تأمین آب، شبکه‌های تأمین آب، شبکه‌های انتقال آب، سیستم‌های انتقال آب، سیستم‌های آب شهری، شبکه‌های آب شهری و اینترنت اشیا) مورد بررسی قرار گرفت، سپس طراحی و اجرای رشته جستجو (علوم زیستی، علوم فیزیکی، علوم بهداشتی و علوم اجتماعی) با استفاده از عملگرهای منطقی برای دستیابی به جامع‌ترین مجموعه اسناد انجام شد. جستجو در زمینه‌های عنوان مقاله، چکیده و کلمات کلیدی صورت گرفت و تعداد ۲۱۹۵۹۲ استخراج شد. در ادامه، داده‌های بازیابی شده به‌طور دستی غربالگری شدند و حاصل این فرایند دستیابی به ۳۸۸

مقاله علمی بود که شامل ۲۳۱ مقاله کنفرانسی (۵۹/۵ درصد)، ۱۱۷ مقاله مجله (۳۰/۲ درصد)، ۱۵ فصل کتاب (۳/۹ درصد)، ۱۲ مرور کنفرانس (۳/۱ درصد) و ۱۳ مرور مقاله (۳/۳ درصد) می‌باشد. پس از مرحله گردآوری، داده‌ها با رویکرد کتاب‌سنجی و به کمک نرم‌افزار VOSviewer تحلیل شدند.

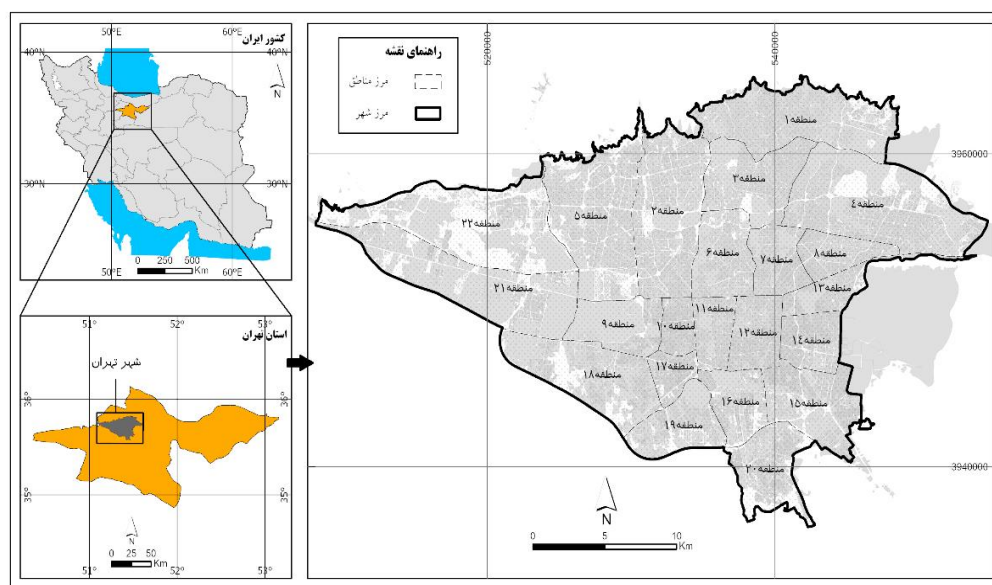
در بخش دوم، ابتدا ۱۴۶ کلیدواژه مرتبط با نقش اینترنت اشیا در آینده سیستم‌های آب شهری شناسایی شد. این کلیدواژه‌ها برای اعتبارسنجی و کنترل بیشتر در اختیار خبرگان قرار گرفت که در نهایت، ۱۴ شاخص کلیدی مؤثر استخراج شد (جدول ۵). جامعه آماری پژوهش شامل خبرگان (متخصصان حوزه آب شهری، فناوری اطلاعات و اینترنت اشیا، مدیران و کارشناسان شرکت آب و فاضلاب تهران، اساتید و پژوهشگران دانشگاهی مرتبط با مدیریت شهری و سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری) می‌باشد که باتوجه‌به نبود پایگاه داده جامع برای فهرست افراد حرفه‌ای، از روش نمونه‌گیری گلوله‌برفی استفاده شده و ۶۰ نفر به عنوان حجم نمونه انتخاب شدند. پرسش‌نامه نیمه‌ساختاریافته بین این کارشناسان توزیع شد و از آنان خواسته شد تا در چارچوب ماتریس اثرات متقاطع، شاخص‌ها را بر اساس میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری در طیف ۰ تا ۳ ارزیابی کنند؛ به‌طوری‌که «۰» بدون تأثیر، «۱» تأثیر ضعیف، «۲» تأثیر متوسط، «۳» تأثیر زیاد و «P» تأثیر بالقوه است. داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از نرم‌افزار MICMAC تحلیل شد و برای تدوین سناریوهای نهایی از ابزار Scenario Wizard بهره گرفته شد. شکل (۱) فرایند مرور نظام‌مند و تحلیل ساختاری پژوهش را نمایش می‌دهد.

محدوده مورد مطالعه

شهر تهران، پایتخت سیاسی، اقتصادی و ارتباطی ایران، پرجمعیت‌ترین شهر کشور است و با تراکم جمعیتی ۱۰۵۵۰ نفر در کیلومتر مربع در رده پانزدهم شهرهای متراکم جهان قرار دارد (کورکی‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۲). کلان‌شهر تهران با بیشترین رشد جمعیت در دهه‌های اخیر به دلیل مهاجریزی، سبب فشار به منابع آب شده و وضعیت آب را بحرانی کرده است. درحال حاضر، ۲۲ درصد از آب تهران از سدها، ۲۰ درصد از روان‌آب‌ها و ۵۸ درصد از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۸). سیستم‌های تأمین و توزیع آب شرب کلان‌شهر تهران شامل سدهای مخزنی، ۶۱۰ حلقه چاه، ۶ تصفیه‌خانه آب، ۲۷ مخزن هوایی، ۱۲۰ مخزن مدفون و نیمه‌مدفون، ۱۲۲ ایستگاه پمپاژ است که نگهداری و بهره‌برداری بهینه از مجموع این تأسیسات، به همراه ایستگاه‌های فشارشکن و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، هم در شرایط عادی و هم در شرایط اضطرار، ضرورت دارد (بشیری و همکاران، ۱۴۰۰) و همین امر، اهمیت استفاده از اینترنت اشیا در مدیریت سیستم‌های آب شهری آن را برجسته می‌کند (شکل ۲).



شکل ۱- فرایند مرور نظام مند و تحلیل ساختاری پژوهش



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی کلان شهر تهران

پژوهش شامل علوم رایانه ۲۵۹ (۶۶/۸ درصد)، مهندسی ۲۰۳ (۵۲/۳ درصد)، علوم تصمیم‌گیری ۷۵ (۱۹/۳ درصد)، ریاضیات ۶۹ (۱۷/۸ درصد)، فیزیک ۶۵ (۱۶/۸ درصد)، علوم محیط‌زیست ۶۲ (۱۶/۵ درصد) و انرژی ۴۳ (۱۱/۱ درصد) است که مجموع درصدها بیش از ۱۰۰ درصد است؛ زیرا هر پژوهش می‌تواند به چند حوزه تعلق داشته باشد.

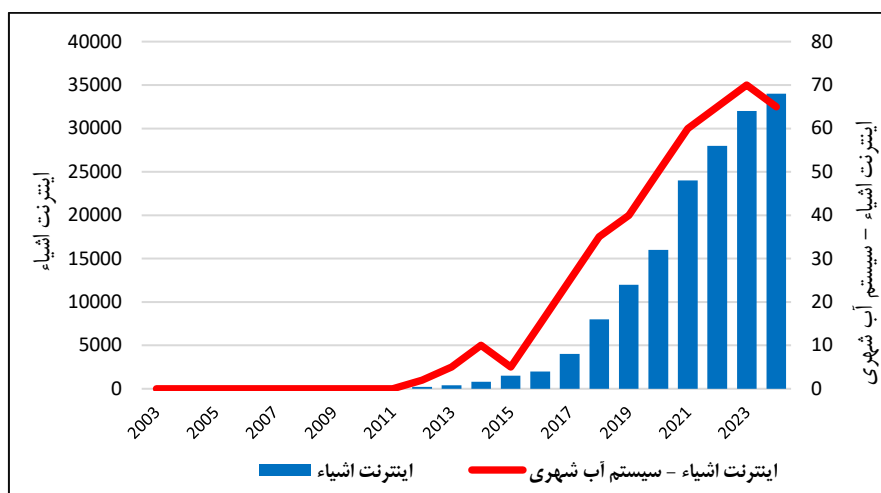
روند زمانی انتشارات: نتایج روند زمانی انتشارات نشان می‌دهد پژوهش‌های مرتبط با اینترنت اشياء از سال ۲۰۱۱ با

یافته‌ها

مرور انتشارات بازایی شده: نتایج نشان داد بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۴، ۳۸۸ مقاله مرتبط با اینترنت اشياء در سیستم‌های آب شهری شناسایی شد که حدود ۰/۱۸ درصد از کل ۲۱۹۵۹۲ انتشارات این حوزه را تشکیل می‌دهد. به‌عنوان حوزه‌ای نوظهور، ۲۳۱ مقاله (۵۹/۵ درصد) به‌صورت کنفرانسی منتشر شده و ۱۱۷ مقاله (۳۰/۲ درصد) شامل پژوهش‌های تجربی، آزمایشی یا مطالعات موردی هستند. حوزه‌های اصلی

۲۰۲۴ به ترتیب به ۱۲۰ و ۱۸۰ مقاله افزایش یافته است. این مقایسه بیانگر آن است که اگرچه این حوزه تخصصی در سال‌های اخیر، به‌ویژه پس از ۲۰۱۸، رشد قابل توجهی داشته، اما همچنان سهم اندکی از کل پژوهش‌های اینترنت اشیا را به خود اختصاص داده و در مرحله نوظهور قرار دارد (شکل ۳).

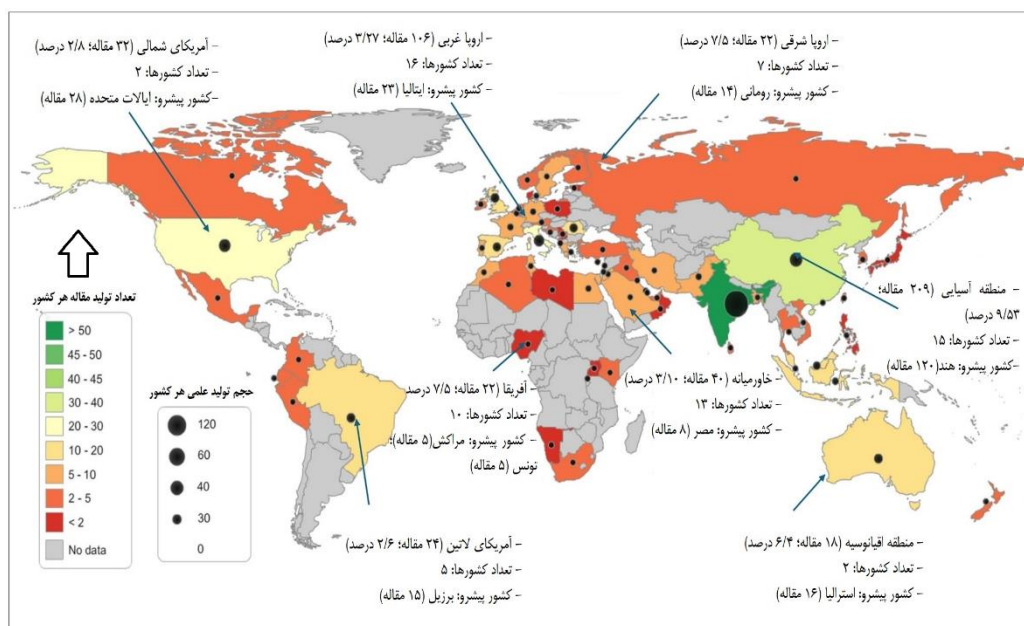
شتابی فزاینده آغاز شده و از ۱۰۰ مقاله در این سال به بیش از ۲۸ هزار مقاله در سال ۲۰۲۲ رسیده است، درحالی‌که مطالعات اینترنت اشیا در سیستم‌های آب شهری با تأخیری نزدیک به یک دهه از سال ۲۰۱۲ شروع شده و تنها به ۶۵ مقاله در سال ۲۰۲۲ رسیده است. با ادامه این روند، تعداد مقالات مطالعات اینترنت اشیا در سیستم‌های آب شهری در سال‌های ۲۰۲۳ و



شکل ۳- نمودار روند زمانی انتشارات (۲۰۲۴-۲۰۰۳)

عملکرد کشوری انتشارات: نتایج تولید علمی مرتبط با اینترنت اشیا در سیستم‌های آب شهری نشان می‌دهد هند با ۱۲۰ مقاله (۳۰/۹ درصد) پیش‌تاز این حوزه است و فاصله چشمگیری با سایر کشورها دارد. چین با ۳۳ مقاله (۸/۵ درصد) و ایالات متحده با ۲۸ مقاله (۷/۲ درصد) در رتبه‌های بعدی قرار دارند. کشورهای اروپای غربی مانند ایتالیا (۹/۵ درصد)، بریتانیا (۴/۱ درصد) و اسپانیا (۳/۶ درصد) نیز سهم قابل توجهی در تولید دانش این حوزه ایفا کرده‌اند. علاوه بر کشورهای توسعه‌یافته، کشورهای مانند مالزی، اندونزی، پاکستان، مصر، ایران و عربستان سعودی نقش موثری در گسترش این حوزه نوظهور دارند. در میان ۲۰ کشور برتر، ترکیبی از ۱۱ کشور توسعه‌یافته و ۱۳ کشور درحال توسعه نشان‌دهنده ماهیت جهانی و چندمرکزی این حوزه پژوهشی است (جدول ۱).

عملکرد منطقه‌ای انتشارات: نتایج تولید علمی مرتبط با اینترنت اشیا در سیستم‌های آب شهری نشان می‌دهد ۷۰ کشور در این حوزه فعال هستند. از نظر تعداد مقاله، آسیا با ۲۰۹ مقاله (۵۳/۹ درصد) بیشترین سهم را دارد. پس از آن اروپای غربی با ۱۰۶ مقاله (۳/۲۷ درصد)، خاورمیانه با ۴۰ مقاله (۳/۱۰ درصد)، آمریکای شمالی با ۳۲ مقاله (۲/۸ درصد)، آمریکای لاتین با ۲۴ مقاله (۲/۶ درصد)، آفریقا و اروپای شرقی هر کدام با ۲۲ مقاله (۷/۵ درصد) و اقیانوسیه با ۱۸ مقاله (۶/۴ درصد) قرار دارند. از نظر تعداد کشورهای مشارکت‌کننده، اروپای غربی با ۱۶ کشور در صدر است. پس از آن آسیا با ۱۵ کشور، خاورمیانه با ۱۳ کشور، آفریقا با ۱۰ کشور، اروپای شرقی با ۷ کشور، آمریکای لاتین با ۵ کشور و آمریکای شمالی و اقیانوسیه هر کدام با ۲ کشور دنبال می‌شوند. مجموع درصدها بیش از ۱۰۰ درصد است، زیرا هم‌نویسندگی میان نویسندگان و کشورها باعث همپوشانی مطالعات شده است (شکل ۴).



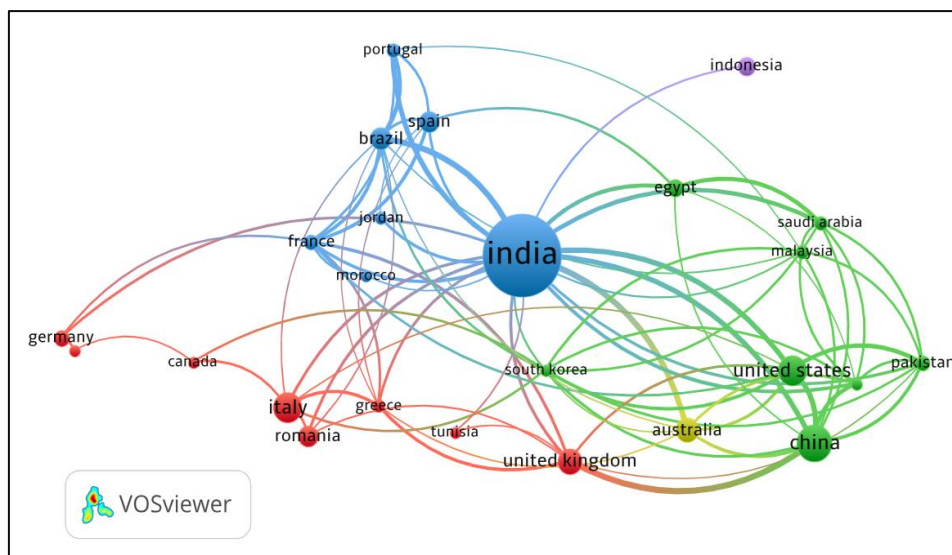
شکل ۴- تولید پژوهشی در سطح ملی درباره سیستم‌های آب شهری مبتنی بر اینترنت اشیاء

جدول ۱- کشورهای برتر با بیشترین مشارکت در پژوهش‌های اینترنت اشیاء - سیستم‌های آب شهری

رتبه	کشور	تعداد مقاله‌ها	درصد	رتبه	کشور	تعداد مقاله‌ها	درصد
۱	هند	۱۲۰	۳۰/۹	۱۲	پاکستان	۹	۲/۳
۲	چین	۳۳	۸/۵	۱۴	مصر	۸	۲/۱
۳	آمریکا	۲۸	۷/۲	۱۴	آلمان	۸	۲/۱
۴	ایتالیا	۲۳	۵/۹	۱۶	پرتغال	۷	۱/۸
۵	استرالیا	۱۶	۴/۱	۱۷	اردن	۶	۱/۵
۵	بریتانیا	۱۶	۴/۱	۱۸	بنگلادش	۵	۱/۳
۷	برزیل	۱۵	۳/۹	۱۸	یونان	۵	۱/۳
۸	رومانی	۱۴	۳/۶	۱۸	ایران	۵	۱/۳
۸	اسپانیا	۱۴	۳/۶	۱۸	مراکش	۵	۱/۳
۱۰	مالزی	۱۲	۳/۱	۱۸	عربستان	۵	۱/۳
۱۱	اندونزی	۱۰	۲/۶	۱۸	سوئد	۵	۱/۳
۱۲	فرانسه	۹	۲/۳	۱۸	تونس	۵	۱/۳

پیشرو در تولید پژوهش از طریق همکاری‌های بین‌المللی معرفی می‌شود. خوشه سوم (قرمز) شامل کشورهای اروپایی و آمریکای شمالی مانند ایتالیا، رومانی، یونان، بریتانیا، کانادا و آلمان است که بریتانیا و ایتالیا بیشترین میزان همکاری را نشان می‌دهند. خوشه چهارم (بنفش) تنها شامل اندونزی است و خوشه پنجم (زرد) شامل استرالیا است که با کشورهای مختلف خوشه‌های دیگر تعامل دارد. قوی‌ترین پیوندهای هم‌نویسندگی در این شبکه میان هند و چین، چین و بریتانیا، و ایالات متحده و بریتانیا مشاهده می‌شود و با خطوط ضخیم‌تر بر روی نقشه مشخص شده‌اند (شکل ۵).

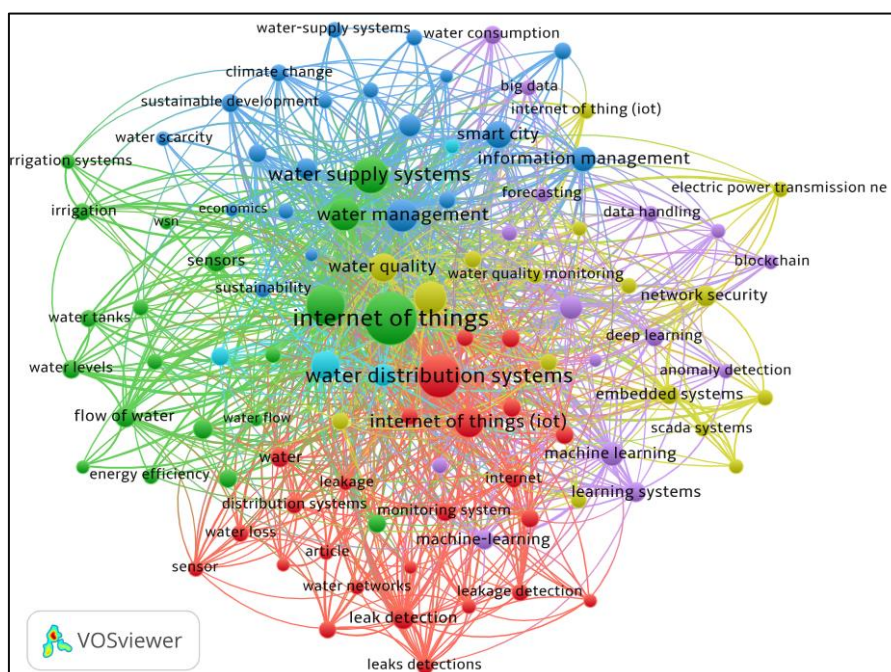
خوشه‌بندی کشورها در نقشه همکاری‌های هم‌تألیفی: نتایج
بصری‌سازی شبکه همکاری‌های پژوهشی بین‌المللی در حوزه اینترنت اشیاء و سیستم‌های آب شهری نشان می‌دهد کشورها در پنج خوشه اصلی با رنگ‌های متفاوت سازماندهی شده‌اند. خوشه اول (سبز) شامل کشورهایی مانند چین، ایالات متحده، پاکستان، مالزی، عربستان و مصر است که چین با بیشترین تعداد پیوندها و ضخامت خطوط ارتباطی، نقش محوری دارد. خوشه دوم (آبی) شامل هند، برزیل، اسپانیا، پرتغال و چند کشور دیگر است که هند با بیشترین پیوندها و قدرت همکاری (۲۰ از مجموع ۷۲) به‌عنوان کشور



شکل ۵- نقشه خوشه‌بندی کشورها در همکاری‌های هم‌تألیفی حوزه اینترنت اشیاء در سیستم‌های آب شهری

خوشه سوم (آبی) بر مفاهیمی همچون تأمین آب، مدیریت مصرف، تغییرات اقلیمی و توسعه پایدار تأکید می‌کند؛ خوشه چهارم (زرد) به امنیت شبکه، سیستم‌های تعبیه‌شده، یادگیری عمیق، زنجیره بلوکی و سامانه‌های کنترل و نظارت خودکار اختصاص دارد؛ و خوشه پنجم (بنفش) نیز شامل واژه‌هایی مانند شهر هوشمند، داده‌های کلان و مدیریت اطلاعات است. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد کلیدواژه‌های اینترنت اشیاء، سامانه‌های توزیع آب و سامانه‌های تأمین آب بیشترین وزن و مرکزیت را در شبکه داشته و به‌عنوان محورهای اصلی پژوهش‌های علمی در این حوزه محسوب می‌شوند (شکل ۶).

شبکه هم‌رخدادی واژه‌ها: نتایج تحلیل شبکه هم‌رخدادی واژه‌ها نشان داد از میان ۹۴۹۷ واژه استخراج شده از مقالات مرتبط با اینترنت اشیاء در سیستم‌های آب شهری، ۲۴۴ واژه حداقل آستانه تکرار مورد نظر را داشتند و پس از اعمال معیار امتیاز مرتبط بودن با مقدار ۶۰ درصد، در نهایت ۱۴۶ واژه کلیدی به‌عنوان مفاهیم اصلی شناسایی شدند. این واژه‌ها در پنج خوشه اصلی سازمان‌دهی شده‌اند: خوشه نخست (قرمز) شامل موضوعاتی مانند تشخیص نشتی، شبکه‌های توزیع آب، حسگرها، سیستم‌های نظارت و یادگیری ماشین است؛ خوشه دوم (سبز) به مقوله‌هایی نظیر مدیریت آب، کیفیت آب، آبیاری هوشمند، پایداری و بهره‌وری انرژی اختصاص دارد؛



شکل ۶- نقشه شبکه هم‌رخدادی واژه‌ها در حوزه اینترنت اشیاء در سیستم‌های آب شهری

تحلیل ساختاری-آینده‌پژوهی

شناسایی متغیرهای کلیدی: در این بخش، ۱۴ شاخص کلیدی با رویکردی مروری-نظام‌مند در حوزه نقش اینترنت اشیاء

درآینده سیستم‌های آب شهری شناسایی شده‌اند. این شاخص‌ها به‌منظور تحلیل ساختاری با استفاده از نرم‌افزار MICMAC در مسیر برنامه‌ریزی آینده کلان‌شهر تهران انتخاب شده‌اند (جدول ۲).

جدول ۲- شاخص کلیدی جامعه‌شناختی زیرساخت سبز شهری

شماره	شاخص	تعریف عملیاتی
۱	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب	فرآیندهای مدیریت و توزیع آب با استفاده از کنترل خودکار کنترل می‌شوند
۲	امنیت سایبری سامانه‌های آب هوشمند	شبکه‌های هوشمند آب شهری در برابر حملات سایبری و تهدیدات دیجیتال محافظت می‌شوند
۳	هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری	الگوریتم‌ها برای پیش‌بینی، بهینه‌سازی و تصمیم‌گیری در مدیریت آب بهره‌گیری می‌شوند
۴	تحلیل‌های پیشرفته داده‌های آب شهری	داده‌های حجیم و بلادرنگ شبکه پردازش و تحلیل می‌شوند
۵	تشخیص نشت در شبکه‌های توزیع آب	نشت‌ها با کمک حسگرهای اینترنت اشیاء کشف و مکان‌یابی می‌شوند
۶	پایش وضعیت زیرساخت‌های آبی	وضعیت لوله‌ها، پمپ‌ها و تجهیزات شهری به‌صورت هوشمند پایش می‌شود
۷	پایش کیفیت آب به‌صورت هوشمند	شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی آب به‌صورت مستمر سنجش می‌شوند
۸	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر	مصرف آب فضای سبز شهری با سامانه‌های هوشمند بهینه‌سازی می‌شود
۹	دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری	توزیع آب در مناطق مختلف شهر با سامانه‌های هوشمند مدیریت و عدالت آن بهبود می‌یابد
۱۰	پایش هوشمند الگوهای مصرف آب	الگوهای مصرف خانگی، تجاری و صنعتی با کنتورهای هوشمند پایش و تحلیل می‌شوند
۱۱	مدیریت محیط‌زیستی در سامانه‌های آبی	اثرات منفی محیط‌زیستی با استفاده از اینترنت اشیاء کاهش می‌یابند
۱۲	تقویت پایداری شبکه آب شهری	تاب‌آوری و مدیریت پایدار منابع با به‌کارگیری فناوری تقویت می‌شوند
۱۳	بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری	جریان و فشار در شبکه بهبود و تلفات با داده‌های اینترنت اشیاء کاهش می‌یابند
۱۴	ارتقای بهره‌وری سامانه‌های آب شهری	کارایی کل سیستم با کاهش هدررفت و بهبود خدمات افزایش می‌یابد

تحلیل الگوی تأثیرگذاری و تأثیرپذیری شاخص‌ها: نتایج نشان

داد در میان شاخص‌ها، کاربرد آبیاری هوشمند در شهر (۲۵۶۴۵) بیشترین تأثیرگذاری غیرمستقیم را دارد، درحالی‌که پایش وضعیت زیرساخت‌های آبی (۱۸۰۲۹) کمترین میزان را نشان می‌دهد. از منظر تأثیرپذیری غیرمستقیم، پایش وضعیت زیرساخت‌های آبی (۲۵۵۶۹) در جایگاه نخست قرار گرفته و بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری (۱۸۸۷۹) کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. در بعد تأثیرگذاری مستقیم، شاخص‌های کاربرد آبیاری هوشمند در شهر و پایش کیفیت آب به‌صورت هوشمند هر دو (۳۳) را ثبت کرده‌اند، درحالی‌که پایش وضعیت زیرساخت‌های آبی (۲۲) در کمترین سطح قرار گرفته است. همچنین در

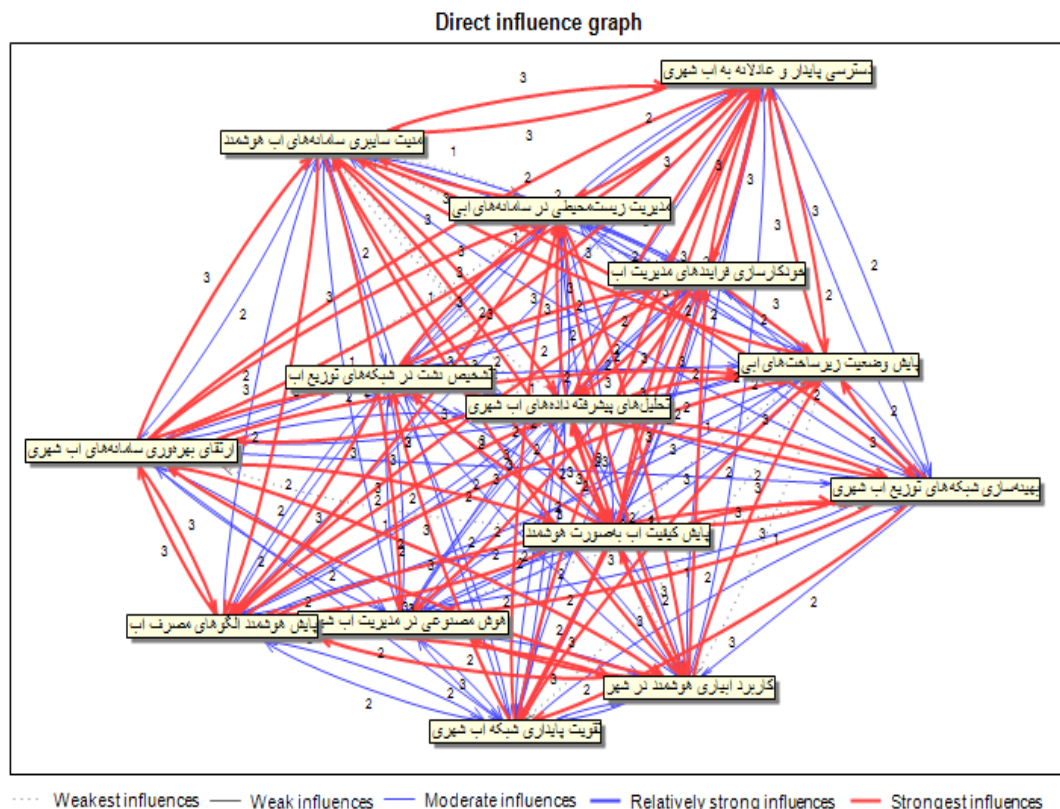
تأثیرپذیری مستقیم، زیادترین مقدار به پایش وضعیت زیرساخت‌های آبی (۳۳) و کمترین آن به بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری (۲۳) تعلق دارد (جدول ۳). باتوجه‌به جدول (۴)، نمودار تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم نشان‌دهنده روابط پیچیده شاخص‌ها و شدت تأثیر آن‌ها با خطوط رنگی است؛ خطوط نقطه‌چین کم‌اثر، مشکی ضعیف، آبی متوسط، آبی پررنگ نسبتاً قوی و قرمز قوی‌ترین تأثیرات غیرمستقیم را نمایش می‌دهند. این نمودار شاخص‌های کلیدی با بیشترین تأثیر را مشخص کرده و به تحلیل جامعه‌شناختی زیرساخت سبز شهری در مسیر توسعه آینده کلان‌شهر تهران کمک می‌کند (شکل‌های ۷ و ۸).

جدول ۳- میزان تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم شاخص ها بر همدیگر

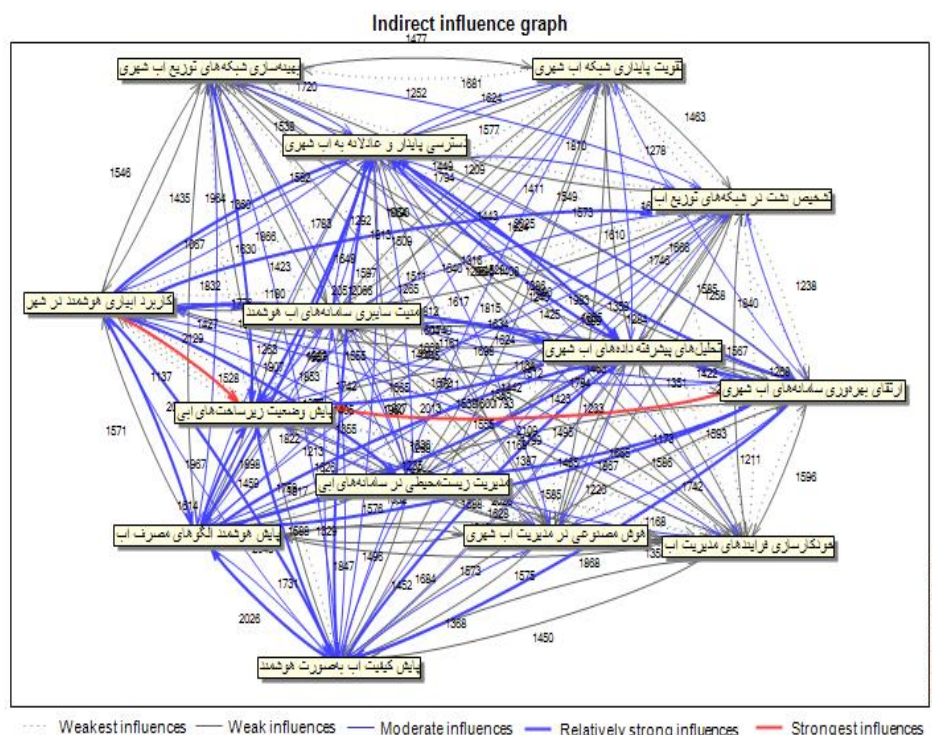
ردیف	شاخص	میزان تأثیرات غیرمستقیم	میزان تأثیرات مستقیم	میزان تأثیرپذیری	میزان تأثیرگذاری
۱	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب	۱۹۵۰۹	۱۹۸۲۲	۲۵	۲۵
۲	امنیت سایبری سامانه های آب هوشمند	۲۲۳۶۷	۲۲۰۶۹	۲۸	۲۸
۳	هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری	۱۸۵۱۲	۲۰۹۷۲	۲۷	۲۳
۴	تحلیل های پیشرفته داده های آب شهری	۲۴۳۲۱	۲۵۰۰۷	۳۲	۳۱
۵	تشخیص نشت در شبکه های توزیع آب	۱۹۶۹۷	۲۲۳۹۷	۲۹	۲۵
۶	پایش وضعیت زیرساخت های آبی	۱۸۰۲۹	۲۵۵۶۹	۳۳	۲۲
۷	پایش کیفیت آب به صورت هوشمند	۲۵۰۰۷	۲۲۷۲۸	۲۹	۳۲
۸	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر	۲۵۶۴۵	۱۹۹۰۰	۲۵	۳۳
۹	دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری	۲۴۹۴۳	۲۴۰۸۳	۳۱	۳۲
۱۰	پایش هوشمند الگوهای مصرف آب	۲۴۰۱۲	۲۴۸۷۶	۳۲	۳۱
۱۱	مدیریت محیط زیست محیطی در سامانه های آبی	۱۹۵۸۵	۲۲۸۱۶	۲۹	۲۴
۱۲	تقویت پایداری شبکه آب شهری	۱۹۹۶۴	۲۰۴۳۸	۲۶	۲۶
۱۳	بهینه سازی شبکه های توزیع آب شهری	۲۲۲۶۴	۱۸۸۷۹	۲۳	۲۹
۱۴	ارتقای بهره وری سامانه های آب شهری	۲۵۲۴۷	۱۹۵۴۶	۲۴	۳۰
	کل	۳۹۳	۳۹۳	۳۹۳	۳۹۳

آبی زیادتیرین رتبه را در شاخص های تأثیرپذیر مستقیم و غیرمستقیم به خود اختصاص داده است و جایگاه برجسته این دو شاخص در هر چهار بعد نشان دهنده نقش محوری آن ها در سیستم آب شهری تهران است (جدول ۴).

رتبه بندی شاخص های تأثیرگذار و تأثیرپذیر مستقیم و غیرمستقیم: نتایج نشان می دهد کاربرد آبیاری هوشمند در شهر بیشترین رتبه را در شاخص های تأثیرگذار مستقیم و غیرمستقیم دارد، درحالی که پایش وضعیت زیرساخت های



شکل ۷- نمودار تأثیر مستقیم با پوشش ۱۰۰ درصد



شکل ۸- نمودار تأثیر غیرمستقیم با پوشش ۱۰۰ درصد

جدول ۴- میزان تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم شاخص‌ها بر همدیگر

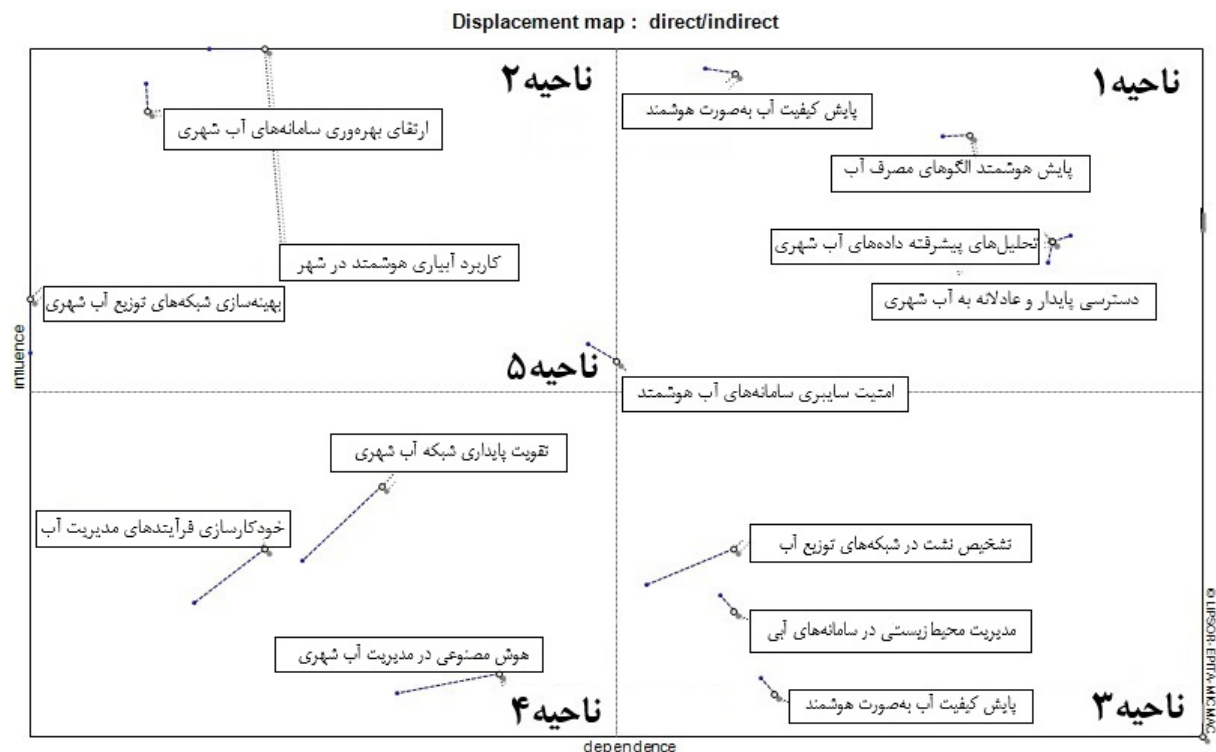
رتبه	شاخص‌های تأثیرگذار مستقیم	شاخص‌های تأثیرگذار غیرمستقیم	شاخص‌های تأثیر پذیر مستقیم	شاخص‌های تأثیر پذیر غیرمستقیم
۱	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر	پایش وضعیت زیرساخت‌های آبی	پایش وضعیت زیرساخت‌های آبی
۲	پایش کیفیت آب به صورت هوشمند	ارتقای بهره‌وری سامانه‌های آب شهری	تحلیل‌های پیشرفته داده‌های آب شهری	تحلیل‌های پیشرفته داده‌های آب شهری
۳	دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری	پایش کیفیت آب به صورت هوشمند	پایش هوشمند الگوهای مصرف آب	پایش هوشمند الگوهای مصرف آب
۴	ارتقای بهره‌وری سامانه‌های آب شهری	دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری	دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری	دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری
۵	تحلیل‌های پیشرفته داده‌های آب شهری	تحلیل‌های پیشرفته داده‌های آب شهری	مدیریت محیط‌زیستی در سامانه‌های آبی	مدیریت محیط‌زیستی در سامانه‌های آبی
۶	پایش هوشمند الگوهای مصرف آب	تشخیص نشت در شبکه‌های توزیع آب	پایش وضعیت زیرساخت‌های آبی	پایش وضعیت زیرساخت‌های آبی
۷	بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری	پایش هوشمند الگوهای مصرف آب	تشخیص نشت در شبکه‌های توزیع آب	تشخیص نشت در شبکه‌های توزیع آب
۸	امنیت سایبری سامانه‌های آب هوشمند	امنیت سایبری سامانه‌های آب هوشمند	امنیت سایبری سامانه‌های آب هوشمند	امنیت سایبری سامانه‌های آب هوشمند
۹	تقویت پایداری شبکه آب شهری	بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری	هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری	هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری
۱۰	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب	تقویت پایداری شبکه آب شهری	تقویت پایداری شبکه آب شهری	تقویت پایداری شبکه آب شهری
۱۱	تشخیص نشت در شبکه‌های توزیع آب	مدیریت محیط‌زیستی در سامانه‌های آبی	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر
۱۲	مدیریت محیط‌زیستی در سامانه‌های آبی	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب
۱۳	هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری	هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری	ارتقای بهره‌وری سامانه‌های آب شهری	ارتقای بهره‌وری سامانه‌های آب شهری
۱۴	پایش وضعیت زیرساخت‌های آبی	پایش وضعیت زیرساخت‌های آبی	بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری	بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری

طبقه‌بندی شاخص‌های پیشران در تأثیرگذاری و تأثیرپذیری: طبقه‌بندی شاخص‌های پیشران در تأثیرگذاری و تأثیرپذیری، بر اساس جدول (۵) نشان می‌دهد که شاخص‌ها در پنج ناحیه تحلیلی با درجات مختلف تأثیرگذاری و تأثیرپذیری قرار دارند. نواحی دووجهی و تأثیرگذار نقش حیاتی در جهت‌دهی سیستم ایفا می‌کنند، درحالی‌که نواحی وابسته و مستقل

بیشتر منعکس‌کننده عملکرد سامانه‌ها هستند و ناحیه تنظیمی به تعادل بخشی و پایدارسازی روند توسعه کمک می‌کند. این طبقه‌بندی، چارچوبی راهبردی برای اولویت‌بندی اقدامات و هموارسازی مسیر توسعه آینده بهره‌گیری از اینترنت اشیاء در پایش و مدیریت هوشمند آب شهری کلان‌شهر تهران را تسهیل می‌کند (شکل ۹).

جدول ۵- طبقه‌بندی نیروهای پیشران

ناحیه	نوع شاخص‌ها	ویژگی	سمت تأثیرگذاری و تأثیرپذیری	شاخص‌ها
ناحیه ۱	دو وجهی	تأثیرگذاری و تأثیرپذیری زیاد	تأثیرگذاری بر نواحی ۳ و ۴، تأثیرپذیری از ناحیه ۱ و تا حدی ۴	پایش کیفیت آب به‌صورت هوشمند، پایش هوشمند الگوهای مصرف آب، تحلیل‌های پیشرفته داده‌های آب شهری، دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری
ناحیه ۲	تأثیرگذار	تأثیرگذاری زیاد، تأثیرپذیری کم	تأثیرگذاری بر نواحی ۲ و ۳، بدون تأثیرپذیری	ارتقای بهره‌وری سامانه‌های آب شهری، بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری
ناحیه ۳	وابسته	تأثیرگذاری کم، تأثیرپذیری زیاد	تأثیرگذاری بر ناحیه ۴، تأثیرپذیری از نواحی ۱ و ۲	تشخیص نشت در شبکه‌های توزیع آب، مدیریت محیط‌زیستی در سامانه‌های آبی، پایش وضعیت زیرساخت‌های آبی
ناحیه ۴	مستقل	تأثیرگذاری و تأثیرپذیری کم	تأثیرگذاری بر ناحیه ۳، تأثیرپذیری تا حدی از ناحیه ۲	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب، هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری، تقویت پایداری شبکه آب شهری
ناحیه ۵	تنظیمی	تأثیرگذاری و تأثیرپذیری زیاد	تأثیرگذاری و تأثیرپذیری نسبتاً زیاد و متعادل	امنیت سایبری سامانه‌های آب هوشمند



شکل ۹- نمودار پراکنش شاخص‌ها در پلان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری

تدوین سناریوهای احتمالی آینده: در چارچوب سناریونویسی ویزارد مبتنی بر تحلیل ساختاری میک مک، آینده مدیریت آب شهری در کلان شهر تهران بر اساس شدت و نوع تأثیر نیروها و پیشران ها در پنج ناحیه تحلیلی قابل ترسیم است. در سناریوی مطلوب، نیروها فعال و تأثیرگذار هستند و پایش کیفیت آب هوشمند، تحلیل پیشرفته داده ها، آبیاری هوشمند، مدیریت نشت و زیرساخت ها، خودکارسازی و هوش مصنوعی و امنیت سایبری به طور کامل و هماهنگ اجرا می شوند. در سناریوی محتاط، نیروها فعال محدود عمل

می کنند و عملکرد سامانه ها کنترل شده و مرحله ای است. سناریوی رکود با نیروهای کم اثر مشخص شده و منجر به پایش ناقص، بهره وری کم، شبکه های ناکارآمد و مدیریت محیط زیست محیط زیستی کم اثر می شود. در سناریوی ناهماهنگ، نیروها ناسازگار عمل کرده و عملکرد نواحی پراکنده، غیرمنسجم و ناسازگار است و در سناریوی وابسته منفعل، نیروها منفعل و کم اثر هستند که پایش و تحلیل حداقلی، شبکه های ناکارآمد، بهره وری کم، هوش مصنوعی ناکافی و امنیت سایبری محدود را به همراه دارد (جدول ۶).

جدول ۶- سناریوهای احتمالی آینده

نیروها / پیشران ها	سناریوی مطلوب فعال و تأثیرگذار	سناریوی محتاط فعال محدود	سناریوی رکود کم اثر	سناریوی ناهماهنگ ناسازگار	سناریوی وابسته منفعل
ناحیه ۱ - دووجهی	پایش کیفیت آب به صورت هوشمند، پایش هوشمند الگوهای مصرف آب، تحلیل های پیشرفته داده های آب شهری و دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری	پایش کیفیت آب به صورت هوشمند محدود و مرحله ای، پایش هوشمند الگوهای مصرف آب محدود و مرحله ای، تحلیل های پیشرفته داده های آب شهری محدود و دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری کنترل شده	پایش کیفیت آب به صورت ناقص، پایش هوشمند الگوهای مصرف آب ناقص، تحلیل های پیشرفته داده های آب شهری ناقص و دسترسی محدود	پایش کیفیت آب به صورت هوشمند الگوهای مصرف آب ناسازگار، تحلیل های پیشرفته داده های آب شهری ناسازگار و دسترسی غیرمنسجم	پایش کیفیت آب به صورت حداقلی، پایش هوشمند الگوهای مصرف آب حداقلی، تحلیل های پیشرفته داده های آب شهری حداقلی و دسترسی ناکافی
ناحیه ۲ - تأثیرگذار	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر، ارتقای بهره وری سامانه های آب شهری و بهینه سازی شبکه های توزیع آب شهری	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر محدود، ارتقای بهره وری سامانه های آب شهری محدود و بهینه سازی شبکه های توزیع آب شهری جزئی	کاربرد ناکافی آبیاری هوشمند در شهر، بهره وری کم سامانه های آب شهری و شبکه توزیع آب شهری ناکارآمد	آبیاری هوشمند در شهر پراکنده، بهره وری سامانه های آب شهری ناسازگار و شبکه توزیع آب شهری غیرمنسجم	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر حداقلی، بهره وری سامانه های آب شهری کم و شبکه توزیع آب شهری ناکارآمد و غیرمنسجم
ناحیه ۳ - وابسته	تشخیص نشت در شبکه های توزیع آب، مدیریت محیط زیستی در سامانه های آبی و پایش وضعیت زیرساخت های آبی	تشخیص نشت در شبکه های توزیع آب محدود، مدیریت محیط زیستی کنترل شده و پایش جزئی وضعیت زیرساخت های آبی	تشخیص نشت در شبکه های توزیع آب ناقص، مدیریت محیط زیستی محیط زیستی ناقص کم اثر و پایش وضعیت زیرساخت های آبی	تشخیص نشت در شبکه های توزیع آب پراکنده، مدیریت محیط زیستی ناسازگار و پایش وضعیت زیرساخت های آبی	تشخیص نشت در شبکه های توزیع آب حداقلی، مدیریت محیط زیستی محیط زیستی ضعیف و پایش حداقلی وضعیت زیرساخت های آبی
ناحیه ۴ - مستقل	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب، هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری و تقویت پایداری شبکه آب شهری	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب محدود، هوش مصنوعی جزئی در مدیریت آب شهری و تقویت محدود پایداری شبکه آب شهری	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب ناکامل، هوش مصنوعی کم اثر در مدیریت آب شهری و پایداری شبکه آب شهری ضعیف	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب پراکنده، هوش مصنوعی ناسازگار در مدیریت آب شهری و پایداری شبکه آب شهری غیرمنسجم	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب حداقلی، هوش مصنوعی ناکافی در مدیریت آب شهری و پایداری شبکه آب شهری ضعیف و غیرقابل پیش بینی
ناحیه ۵ - تنظیمی	امنیت سایبری سامانه های آب هوشمند و هماهنگی و تنظیم متعادل	امنیت سایبری سامانه های آب هوشمند محدود، هماهنگی و تنظیم محدود و کنترل محافظه کارانه	امنیت سایبری سامانه های آب هوشمند ناکافی و هماهنگی و تنظیم ناکارآمد	امنیت سایبری سامانه های آب هوشمند پراکنده و هماهنگی و تنظیم ناکام	امنیت سایبری سامانه های آب هوشمند حداقلی، هماهنگی و تنظیم مانیتورینگ محدود و واکنش کند

تحولات اخیر در حوزه مدیریت آب شهری نشان‌دهنده نقش رو به رشد اینترنت اشیاء در بهبود کارایی و پایداری سیستم‌های آب شهری است. در این پژوهش، بیش از ۳۰۰ مقاله بین‌المللی منتشرشده در بازه‌های زمانی اخیر بررسی شد تا روندهای جهانی، پیشرفت‌های فناورانه و مرزهای پژوهشی در کاربرد اینترنت اشیاء در شبکه‌های آب شهری شناسایی شود. نتایج نشان داد توجه پژوهشگران به کاربرد اینترنت اشیاء در مدیریت آب شهری به‌طور پیوسته در حال افزایش است و کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه بسته به ظرفیت‌های اقتصادی، زیرساختی و علمی خود، مسیرهای متفاوتی برای پذیرش این فناوری اتخاذ کرده‌اند. یافته‌ها کاربردهای متنوع اینترنت اشیاء در این حوزه را از جمله پایش کیفیت آب به‌صورت هوشمند، تشخیص نشت و اتلاف آب، اندازه‌گیری هوشمند مصرف، مدیریت تقاضا و یکپارچه‌سازی داده‌ها برای بهینه‌سازی تخصیص منابع برجسته می‌کند. این کاربردها به‌طور ملموسی منجر به کاهش اتلاف آب، افزایش بهره‌وری شبکه‌های توزیع و ارتقای کیفیت خدمات شده‌اند. بااین‌حال، چالش‌هایی مانند کمبود زیرساخت‌های مدرن، محدودیت‌های انرژی، امنیت داده‌ها، قابلیت تعامل و آموزش ناکافی نیروهای متخصص، مانع بهره‌برداری کامل از پتانسیل اینترنت اشیاء هستند. بررسی روندهای آینده نیز نشان می‌دهد ادغام فناوری‌های نوین همچون هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، بلاک‌چین و شبکه‌های کم‌مصرف و تقویت سیاست‌ها و استانداردهای دولتی، می‌تواند به توسعه پایدار و مقاوم سیستم‌های آب شهری کمک کند. در مجموع، این تحلیل نشان می‌دهد اینترنت اشیاء نه تنها فرصت‌های عملیاتی و مدیریتی را افزایش می‌دهد، بلکه زمینه‌ساز سیاست‌گذاری راهبردی و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده در مدیریت آب شهری خواهد بود.

در بخش دوم پژوهش، نتایج با استفاده از روش آینده‌پژوهی نشان داد شاخص‌های فناورانه و عملیاتی مانند کاربرد آبیاری هوشمند در شهر و پایش کیفیت آب به‌صورت هوشمند بیشترین تأثیرگذاری مستقیم و غیرمستقیم را دارند و شاخص پایش وضعیت زیرساخت‌های آبی بیشترین تأثیرپذیری را نشان می‌دهد. این نتایج با مطالعات [Amador-Castro و همکاران \(۲۰۲۴\)](#) و [Sheeba و همکاران \(۲۰۲۵\)](#)، همسو است و اهمیت پایش دقیق و پیش‌بینی مصرف آب در کلان‌شهر تهران را تأیید می‌کند. بااین‌حال، نتایج نشان داد فناوری بدون زیرساخت‌های پایدار نمی‌تواند اثرگذاری کامل داشته باشد و شاخص‌هایی مانند تحلیل‌های پیشرفته داده‌های آب شهری و دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری نیز در تمامی ابعاد اثرگذاری و تأثیرپذیری رتبه بالاتری دارند

که اهمیت هم‌افزایی فناوری، داده و عدالت دسترسی را برجسته می‌کند. این یافته‌ها با مطالعات [Hamel و همکاران \(۲۰۲۴\)](#)، [Alshami و همکاران \(۲۰۲۴\)](#) و [Pagano و همکاران \(۲۰۲۵\)](#)، همسو است و نشان می‌دهد که بهره‌گیری از اینترنت اشیاء و داده‌های هوشمند می‌تواند علاوه بر بهینه‌سازی مصرف، پایداری و عدالت شبکه را نیز ارتقاء دهد. طبقه‌بندی شاخص‌ها در پنج ناحیه تحلیلی نشان داد که شاخص‌های دوجبهی و تأثیرگذار نقش هدایت‌کننده سیستم را ایفا می‌کنند، شاخص‌های وابسته و مستقل بازتاب‌دهنده عملکرد عملیاتی و حساسیت سیستم هستند و شاخص‌های تنظیمی مانند امنیت سایبری سامانه‌های آب هوشمند فرآیند تعادل‌بخشی و پایداری سیستم را تضمین می‌کنند. این یافته‌ها با نتایج [Dharmarathne و همکاران، ۲۰۲۵](#) و [نورمند \(۱۴۰۱\)](#)، همخوانی دارد و نشان می‌دهد که شاخص‌های تنظیمی باوجود توجه کمتر در مطالعات پیشین، در مدیریت کلان‌شهری اهمیت ویژه‌ای دارند. تحلیل سناریوهای آینده نیز بیانگر آن است که هماهنگی کامل میان پایش هوشمند، تحلیل داده‌ها، آبیاری هوشمند، هوش مصنوعی و امنیت سایبری مسیر تحقق مدیریت آب شهری هوشمند، مقاوم و پایدار را فراهم می‌کند. در مقایسه با سناریوهای محتاط و رکود، شدت و کیفیت عملکرد شاخص‌ها تعیین‌کننده سطح بهره‌وری، کاهش هدررفت آب و ارتقای عدالت دسترسی است که با یافته‌های [Sheeba و همکاران \(۲۰۲۵\)](#) و [Mondal \(۲۰۲۴\)](#)، همسوست و ضرورت هماهنگی فناوری و مدیریت زیرساخت را تقویت می‌کند.

تحولات اخیر در مدیریت آب شهری نشان می‌دهد بهره‌گیری از اینترنت اشیاء و فناوری‌های هوشمند، ظرفیت قابل توجهی برای بهبود کارایی، پایداری و عدالت در دسترسی به آب در کلان‌شهر تهران ایجاد کرده است. این فناوری‌ها امکان پایش دقیق کیفیت و مصرف آب، تشخیص اتلاف و نشت، و بهینه‌سازی تخصیص منابع را فراهم می‌کنند و می‌توانند تصمیم‌گیری مدیریتی مبتنی بر داده را تقویت کنند. بااین‌حال، محدودیت‌هایی مانند کمبود زیرساخت‌های مدرن، چالش‌های امنیت داده‌ها، عدم هماهنگی سامانه‌ها و نیاز به آموزش نیروی متخصص، مانع بهره‌برداری کامل از پتانسیل فناوری هستند. پژوهش‌های آینده می‌توانند بر توسعه زیرساخت‌های مقاوم، افزایش هماهنگی میان سامانه‌ها، تقویت سیاست‌ها و استانداردهای مدیریت آب و توانمندسازی نیروی انسانی تمرکز کنند. در پایان باتوجه‌به نتایج، پیشنهادهای کاربردی به صورت زیر ارائه شده است:

- راه‌اندازی و گسترش سامانه‌های پایش هوشمند کیفیت و مصرف آب در کلان‌شهر تهران
- ارتقای زیرساخت‌های شبکه آب برای کاهش هدررفت و بهبود بهره‌وری

- networks: Current trends and future research directions. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 13(1), Article 4, 1-41. <https://doi.org/1145/10/3005719>.
- Alshami, A., Ali, E., Elsayed, M., Eltoukhy, A. E. E., & Zayed, T. (2024). IoT innovations in sustainable water and wastewater management and water quality monitoring: A comprehensive review of advancements, implications, and future directions. *IEEE Access*, 12, 58427-58453. <https://doi.org/1109/10/ACCESS.3392573/2024>.
- Amador-Castro, F., González-López, M. E., Lopez-Gonzalez, G., Garcia-Gonzalez, A., Díaz-Torres, O., Carbajal-Espinosa, O., & Gradilla-Hernández, M. S. (2024). Internet of Things and citizen science as alternative water quality monitoring approaches and the importance of effective water quality communication. *Journal of Environmental Management*, 352, 119959. <https://doi.org/1016/10/j.jenvman.119959/2023>.
- Boyle, C., Ryan, G., Bhandari, P., Law, K. M. Y., Gong, J., & Creighton, D. (2022). Digital transformation in water organizations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(7), 03122001. [https://doi.org/1061/10/\(ASCE\)WR.1943-0001555/5452](https://doi.org/1061/10/(ASCE)WR.1943-0001555/5452).
- Cerasi, C. C., & Akturk, C. (2023). A bibliometric analysis of smart cities and the internet of things. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 20(1), 49-66. <https://doi.org/2298/10/SJEE2301049C>.
- Chundru, S., Thirunagalingam, A., Maraju, P., Dutta, P. K., Yadav, H., & Whig, P. (2025). Internet of water: Quantifying Internet of Things' impact on urban water management and resource optimization in smart cities. *IET Conference Proceedings*, 2024(37). <https://doi.org/1049/10/icp.0968/2025>.
- Dai, Z., Zhang, Q., Zhu, X., & Zhao, L. (2021). A comparative study of Chinese and foreign research on the internet of things in education: Bibliometric analysis and visualization. *IEEE Access*, 9, 130127-130140. <https://doi.org/1109/10/ACCESS.3113805/2021>.
- تقویت امنیت سایبری و قابلیت تعامل بین سامانه‌های مدیریت آب
- آموزش و توانمندسازی کارشناسان و نیروهای عملیاتی در استفاده از فناوری‌های نوین آب
- تدوین سیاست‌ها و چارچوب‌های راهبردی برای مدیریت پایدار و عادلانه منابع آب
- منابع**
- ایزدی فر، محمدرضا. (۱۴۰۳). کاربرد هوش مصنوعی و اینترنت اشیا در نظارت و مدیریت منابع آب شهری. همایش بین‌المللی مدیریت محیط‌زیست شهری، شیراز. <https://civilica.com/doc/2151651>.
- بشیری، سعید، بیات، بهرام، جمشیدی، شروین، و صالح‌زاده، رضا. (۱۴۰۰). تبیین ابعاد و مولفه‌های تاب‌آوری در مدیریت بحران آب (مورد مطالعه: شهر تهران). *مطالعات بین‌رشته‌ای دانش راهبردی*، ۱۱(۴۴)، ۶۱-۹۶. <https://doi.org/20.1001.1.24234621.1400.11.44.3.2۹۶>.
- کورکی‌نژاد، محمدحسن، شمسی‌پور، علی‌اکبر، و حبیبی، کیومرث. (۱۴۰۲). رویکردی نوین در نگاشت نقشه‌های تحلیلی آب و هوای شهری: مطالعه موردی شهر تهران. *فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»*، ۳۲(۱۲۷)، ۷۷-۹۴. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2023.552685.2865>.
- میرزایی، عزت‌الله، جلالی، عبداللّه، جودکی، حمیدرضا، و اربابی سبزواری، آزاده. (۱۳۹۸). تحلیل میزان تاب‌آوری شهری در برابر بحران آب: مطالعه موردی شهر تهران. *نشریه علمی شهر ایمن*، ۲(۵)، ۹۳-۱۰۴. https://www.ispdrc.ir/article_705486.htm.
- نورمند، بهرّضا. (۱۴۰۱). مروری بر کاربردها و چالش‌های اینترنت اشیا در مهندسی عمران (آب و سازه هیدرولیکی). *نشریه آنالیز سازه - زلزله*، ۱۹(۲)، ۸۹-۹۶. <https://doi.org/30495/10/civil.694268/2022>.
- Adedeji, K. B., Ponnle, A. A., Abu-Mahfouz, A. M., & Kurien, A. M. (2022). Towards digitalization of water supply systems for sustainable smart city development-Water 4.0. *Applied Sciences*, 12(18), 9174. <https://doi.org/10.3390/app12189174>.
- Adeleke, I. A., Nwulu, N. I., & Ogbolumani, O. A. (2023). A hybrid machine learning and embedded IoT-based water quality monitoring system. *Internet of Things*, 22, 100774. <https://doi.org/1016/10/j.iot.100774/2023>.
- Adu-Manu, K. S., Tapparello, C., Heinzelman, W., Katsriku, F. A., & Abdulai, J.-D. (2017). Water quality monitoring using wireless sensor

- [kumarkumaran/436](#).
- Kiyan, A., Gheibi, M., Moezzi, R., & Behzadian, K. (2023). Smart dashboard of water distribution network operation: A case study of Tehran. *Environmental Industry Letters*, 1(1), 46–63. <https://doi.org/15157/10/eil.1/2023.46/1-63>.
- Kulangara Velayudhan, N., Pradeep, P., Rao, S. N., Devidas, A. R., & Ramesh, M. V. (2022). IoT-Enabled Water Distribution Systems–A Comparative Technological Review. *IEEE Access*, 10, 101042–101070. <https://doi.org/1109/10/ACCESS.3208142/2022>.
- Li, W., & Yang, Z. (2024). Landscape design of urban culture transmission based on the regional information security of Internet of Things. *Heliyon*, 10(15), e35042. <https://doi.org/1016/10/j.heliyon.2024.e35042>.
- Mehmood, K., Kautish, P., Rashid, M., Joshi, Y., & Iftikhar, Y. (2025). Digitalization in the circular economy: Synergistic impact of big data analytics, green Internet of Things, and ambidextrous green innovation. *Journal of Cleaner Production*, 509, 145610. <https://doi.org/1016/10/j.jclepro.145610/2025>.
- Mengash, H. A., Mahgoub, H., Alshuhail, A., Darem, A. A., Majdoubi, J., Yafoz, A., Alsini, R., & Alghushairy, O. (2025). Agricultural consumer Internet of Things devices: Methods for optimizing data aggregation. *Alexandria Engineering Journal*, 125, 692–699. <https://doi.org/1016/10/j.aej.03/2025.134>.
- Mohammadi, S., Najafzadeh, M., Gheibi, M., Kian, Z., Takhtavan, A., & Aghlmand, R. (2021). Presenting a conceptual model of leakage management system in urban water supply network from two preventive and operational perspectives (Case study of Tokyo and Tehran metropolises). *Annals of Environmental Science and Toxicology*, 5(1), 051–058. <https://doi.org/17352/10/aest.000037agriscigroup.us+2agriscigroup.us+2>.
- Mondal, P. (2024). AI and IoT in smart water management for urban sustainability. *Uncertainty Discourse and Applications*, 1(2), 151–157. <https://doi.org/10.48313/uda.v1i2.36>.
- Naith, Q. H., & Mancy, H. (2025). An IoT-Enabled Hybrid DRL-XAI Framework for Transparent
- Das, R. (2024). Smart urban water management: Integrating AI and IoT for optimization and waste reduction. *OPT*, 1(2). <https://doi.org/22105/10/opt.v1i62/2>.
- Dharmarathne, G., Abekoon, A. M. S. R., Bogahawaththa, M., Alawatugoda, J., & Meddage, D. P. P. (2025). A review of machine learning and internet-of-things on the water quality assessment: Methods, applications and future trends. *Results in Engineering*, 26, 105182. <https://doi.org/1016/10/j.rineng.105182/2025>.
- Doorn, N. (2021). Artificial intelligence in the water domain: Opportunities for responsible use. *Science of the Total Environment*, 755, 142561. <https://doi.org/1016/10/j.scitotenv.142561/2020>.
- Hamel, P., Ding, N., Cherqui, F., Zhu, Q., Walcker, N., Bertrand-Krajewski, J.-L., Champrasert, P., Fletcher, T. D., McCarthy, D. T., Navratil, O., & Shi, B. (2024). Low-cost monitoring systems for urban water management: Lessons from the field. *Water Research X*, 22, 100212. <https://doi.org/1016/10/j.wroa.100212/2024>.
- He, P., Almasifar, N., Mehbodniya, A., Javaheri, D., & Webber, J. L. (2022). Towards green smart cities using Internet of Things and optimization algorithms: A systematic and bibliometric review. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 36, 100822. <https://doi.org/1016/10/j.suscom.100822/2022>.
- Infant, S. S., Vickram, S., Saravanan, A., Muthu, C. M. M., & Yuarajan, D. (2025). Explainable artificial intelligence for sustainable urban water systems engineering. *Results in Engineering*, 25, 104349. <https://doi.org/1016/10/j.rineng.104349/2025>.
- Jan, F., Min-Allah, N., & Düşteğör, D. (2021). IoT based smart water quality monitoring: Recent techniques, trends and challenges for domestic applications. *Water*, 13(13), 1729. <https://doi.org/3390/10/w13131729>.
- Kalyanam, A. K. (2023). Water management and its industrial impact (A comprehensive overview of water management and the role of IoT). *Journal of Artificial Intelligence, Machine Learning and Data Science*, 1(2), 1984–1989. <https://doi.org/51219/10/JAIMLD/ashok->

- 43(2), 126–133.
<https://doi.org/10.14429/djlit.43.2.18710>.
- Ramadhan, A. J. (2020). Smart water-quality monitoring system based on enabled real-time Internet of Things. *Journal of Engineering Science and Technology*, 15(6), 3514–3527.
<https://www.researchgate.net/publication/347443470>.
- Rao, C. K., Sahoo, S. K., & Yanine, F. F. (2025). A comprehensive review of smart energy management systems for photovoltaic power generation utilizing the Internet of Things. *Unconventional Resources*, 7, 100197.
<https://doi.org/10.16/10/j.uncres.100197/2025>.
- Sheeba, R., Alsolai, H., Allafi, R., Nithya, K., Arasi, M. A., Karthikeyan, B., Sudarvizhi, D., & Vivek, S. (2025). A comprehensive IoT and blockchain-integrated framework for autonomous water management in sustainable urban ecosystems. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 47, 101171.
<https://doi.org/10.16/10/j.suscom.101171/2025>.
- Vadruccio, R., Scarpino, C., & Tumino, A. (2025). Unveiling Industrial Internet of Things potential for sustainable manufacturing: A Triple Bottom Line approach. *Procedia Computer Science*, 253, 1083–1092.
<https://doi.org/10.16/10/j.procs.01/2025.170>.
- World Health Organization (WHO). (2022). State of the world's drinking water: An urgent call to action to accelerate progress on ensuring safe drinking water for all. World Health Organization. Geneva, Switzerland.
- Yuan, Z., Olsson, G., Cardell-Oliver, R., van Schagen, K., Marchi, A., Deletic, A., Urich, C., Rauch, W., Liu, Y., & Jiang, G. (2019). Sweating the assets – The role of instrumentation, control and automation in urban water systems. *Water Research*, 155, 381–402.
<https://doi.org/10.16/10/j.watres.02/2019.034>.
- Zhang, J., Wang, Y., Yang, Y., Ma, Y., & Dai, Z. (2024). Fault diagnosis and intelligent maintenance of Industry 0/4 power system based on Internet of Things technology and thermal energy optimization. *Thermal Science and Engineering Progress*, 55, 102902.
- Urban Water Management. CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences, 144(1), 387–405.
<https://doi.org/32604/10/cmcs.066917/2025>.
- Nasrinasrabadi, M., Hejazi, M. A., Chaharmahali, E., & Hussein, M. (2025). A comprehensive review of blockchain integration in smart grid with a special focus on Internet of Things. *Energy Conversion and Management: X*, 27, 101196.
<https://doi.org/10.16/10/j.ecmx.101196/2025>.
- Obunga, P. O., Rwanga, S. S., & Dinka, M. O. (2025a). Comparative analysis on deployment of Internet of Things in management of non-revenue water in water distribution networks. *Digital Water: Knowledge Application & Hydroinformatics*, 3(1), 1–30.
<https://doi.org/10.80/10/2025/28375807.2517573>.
- Obunga, P. O., Rwanga, S. S., Dinka, M. O., & Otieno, B. O. (2025b). Review of the emerging technologies in the water sector with a focus on the deployment of Internet of Things solutions. *npj Clean Water*, 8, 53.
<https://doi.org/10.38/10/s41545-025-00487-x>.
- Okoli, N. J., & Kabaso, B. (2024). Building a smart water city: IoT smart water technologies, applications, and future directions. *Water*, 16(4), 557. <https://doi.org/3390/10/w16040557>.
- Pagano, A., Garlisi, D., Tinnirello, I., Giuliano, F., Garbo, G., Falco, M., & Cuomo, F. (2025). A survey on massive Internet of Things for water distribution systems: Challenges, simulation tools, and guidelines for large-scale deployment. *Ad Hoc Networks*, 168, 103714.
<https://doi.org/10.16/10/j.adhoc.103714/2024>.
- Patel, A., Kethavath, A., Kushwaha, N. L., Naorem, A., Jagdale, M., K. R., S., & P. S., R. (2023). Review of artificial intelligence and Internet of Things technologies in land and water management research during 1991–2021: A bibliometric analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123(Part B), 106335.
<https://doi.org/10.16/10/j.engappai.106335/2023>.
- Patil, K. (2023). Integration of internet of things and blockchain technologies in healthcare: A bibliometric and network analysis. *DESIDOC Journal of Library & Information Technology*,

comprehensive global analysis of insights, trends, and research priorities. Discover Internet of Things, 5, 31. <https://doi.org/1007/10/s43926-025-00129-1>.

پی‌نوشت‌ها

- 1- SDG6
- 2- Scopus

<https://doi.org/1016/10/j.tsep.102902/2024>.

Zorzenon, R., Lizarelli, F. L., & Braatz, D. (2025). The impact of the Internet of Things on health and safety performance at work: An empirical study of Brazilian companies. Safety Science, 187, 106866. <https://doi.org/1016/10/j.ssci.106866/2025>.

Zyoud, S. (2025). Exploring the promising role of Internet of Things in urban water systems: A

Document Type

Applied Article

پژوهش کاربردی

نوع مقاله

Analysis of Drought Dynamics Using the SPEI Index and the Markov Chain Model (Case Study: Mashhad Synoptic Weather Station)

H. Jahangiri^{1*}, M. Jabbari Nooghabi², N. Seyednejad Gol Khatmi³

1- M.Sc. Student in Water Science and Engineering, Water Resources, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Associate Professor, Department of Statistics, Faculty of Mathematical Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3- Ph.D. Graduate in Water Science and Engineering, Agricultural Meteorology, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.

* Corresponding Author Email: hosein.jahangiri@mail.um.ac.ir

Received 26-09-2025

Revised 29-10-2025

Accepted 20-11-2025

Available online 16-03-2026

تحلیل پویایی خشکسالی با استفاده از شاخص SPEI و مدل زنجیره مارکوف (مطالعه موردی: ایستگاه هواشناسی همدید مشهد)

حسین جهانگیری^{۱*}، مهدی جباری نوقایی^۲، نفیسه سیدنژاد گل خطمی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب - گرایش منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- دانشیار، گروه آمار، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۳- دانش آموخته دکتری رشته علوم و مهندسی آب، گرایش هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

* رایانامه نویسنده مسئول: hosein.jahangiri@mail.um.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۸/۰۷

تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۸/۲۹

تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

Abstract

Drought, as a natural and creeping phenomenon, is considered one of the most important climate challenges in arid and semi-arid regions, including Iran. Given the context of climate change and the increased severity of drought events, a dynamical analysis is crucial for effective water resource management. This study aimed to investigate the probabilistic behavior and drought dynamics within the Mashhad Plain. To achieve this, the Markov Chain model was applied to a 127-year time series of precipitation and mean temperature data. The core innovation lies in employing the Twelve-Fold Hydrologic Time Series method. By analyzing the data across twelve annual time scales, this approach facilitated a more comprehensive and precise characterization of drought features, effectively revealing long-duration events often masked in conventional annual analyses. The results derived from the transition probability matrix indicated that extreme climatic states (severe drought and extreme wet periods) exhibit significant persistence, whereas intermediate states (moderate drought and moderate wet periods) are inherently more transient. Furthermore, the calculation of the steady-state distribution provided a clear perspective on the long-term behavior of the climatic system. The findings reveal that, in the long run, the combined probability of residing in drought states (severe and moderate), totaling 42%, is higher than the probability of residing in wet states (38%). These results yield invaluable insights for strategic, long-term planning in water resource management and facilitate effective adaptation strategies against future climatic conditions in arid and semi-arid regions.

Keywords: Drought, Stationary Distribution, Transition Probability Matrix, SPEI Index, Markov Chain.

چکیده

خشکسالی به عنوان یک پدیده طبیعی و خزنده، یکی از مهم‌ترین چالش‌های اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله ایران، محسوب می‌شود. با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش شدت خشکسالی‌ها، تحلیل پویایی‌های آن برای مدیریت مؤثر منابع آب امری ضروری است. این پژوهش با هدف بررسی رفتار احتمالاتی و پویایی خشکسالی در دشت مشهد، از مدل زنجیره مارکوف بر روی یک سری زمانی ۱۲۷ ساله از داده‌های بارش و دمای میانگین استفاده کرده است. نوآوری اصلی این مطالعه در به‌کارگیری روش سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه است که با تحلیل داده‌ها بر اساس دوازده سری زمانی با مقیاس سالانه به درک جامع‌تر و دقیق‌تری از ویژگی‌های خشکسالی دست یافت و رویدادهای طولانی‌مدتی را که ممکن بود در تحلیل مرسوم سالانه پنهان بمانند، آشکار ساخت. نتایج تحلیل ماتریس احتمال انتقال نشان داد که وضعیت‌های اقلیمی شدید (خشکسالی و ترسالی شدید) پایداری قابل‌توجهی دارند، در حالی که وضعیت‌های میانی (خشکسالی و ترسالی متوسط) بیشتر گذرا هستند. همچنین، محاسبه توزیع مانای وضعیت‌های اقلیمی، تصویر روشنی از رفتار بلندمدت سیستم اقلیمی ارائه داد. یافته‌ها حاکی از آن است که در درازمدت، احتمال حضور در وضعیت‌های خشکسالی شدید و متوسط، با مجموع ۴۲ درصد، از احتمال حضور در وضعیت‌های ترسالی (۳۸ درصد) بیشتر است. این نتایج بینش‌های ارزشمندی برای برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و استراتژیک در مدیریت منابع آب و سازگاری با شرایط اقلیمی آینده در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی، توزیع مانا، ماتریس احتمال انتقال، شاخص SPEI، زنجیره مارکف.

How to cite this article:

Jahangiri, H., Jabbari Nooghabi, M., & Seyednejad Gol Khatmi, N. (2026). Analysis of Drought Dynamics Using the SPEI Index and the Markov Chain Model (Case Study: Mashhad Synoptic Weather Station). Journal of Water and Sustainable Development, 12(4), 177-189. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i4.2509-1459>

خشکسالی هواشناسی پدیده‌ای طبیعی، موقتی و بازگشت‌پذیر است که در تمامی اقلیم‌ها رخ می‌دهد و به کاهش چشمگیر دسترسی به منابع آب منجر می‌شود. این پدیده که با کمبود بارش و افزایش دما آغاز می‌شود، برخلاف سایر بلایای طبیعی، ماهیتی خزنده و طولانی‌مدت دارد و می‌تواند از چند هفته تا چندین سال ادامه یابد. پیامدهای گسترده اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی خشکسالی، شامل آسیب به کشاورزی، قحطی و مهاجرت اهمیت بررسی علمی و مدیریت مؤثر آن را برجسته می‌سازد. ایران نیز به عنوان کشوری در منطقه خشک و نیمه‌خشک، همواره با چالش خشکسالی‌های مکرر و شدید مواجه بوده است.

نوسانات اقلیمی و تغییرات آب‌وهوایی جهانی، تشکیل جزیره حرارتی در کلانشهرها، تغییر کاربری اراضی، به ویژه افزایش دمای ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، به طور فزاینده‌ای به تشدید خشکسالی‌ها از نظر سرعت، شدت و تداوم دامن زده است (Trenberth و همکاران، ۲۰۱۴؛ Wood و Sheffield، ۲۰۰۸). شواهد حاکی از آن است که این روند جهانی به سمت وقوع خشکسالی‌های شدیدتر و طولانی‌تر سوق پیدا می‌کند (Yan-Jun و همکاران، ۲۰۱۲؛ Spinoni و همکاران، ۲۰۱۷). در ایران نیز، قربانی و همکاران (۱۳۹۷) با تحلیل روند تغییرات شدت خشکسالی هواشناسی به وضوح مشاهده کردند که تغییرات اقلیمی باعث شده تا کشور در سال‌های اخیر به سمت دوره‌های خشک‌تر متمایل شود. این روند صعودی در فراوانی و شدت خشکسالی‌ها، اهمیت بررسی و تحلیل پویایی‌های زمانی خشکسالی‌ها را دو چندان می‌کند.

مطالعات متعددی در ایران و در کشورهای دیگر به ارزیابی و مقایسه شاخص‌های خشکسالی پرداخته‌اند تا کارایی آن‌ها را در اقلیم‌های مختلف بررسی کنند. این مطالعات نشان داده است که برای تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تر خشکسالی، نیاز است که شاخص‌هایی به کار گرفته شوند که تبخیر و تعرق را نیز در نظر بگیرند، زیرا دما تأثیر قابل‌توجهی بر تبخیر و تعرق دارد (مصطفی‌زاده و ذبیحی، ۱۳۹۵؛ بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۸). با توجه به اهمیت تأثیر دما بر میزان تبخیر و تعرق، در این مقاله از شاخص SPEI به منظور کمی‌سازی پدیده خشکسالی استفاده شده است.

مدل‌های زنجیره مارکوف در میان روش‌های آماری و احتمالاتی، به دلیل توانایی در مدل‌سازی وابستگی‌های زمانی بین وضعیت‌های مختلف پدیده‌ها، به‌ویژه در تحلیل خشکسالی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. برای مثال، Azimi و همکاران (۲۰۲۰) از یک مدل زنجیره مارکوف وضعیت پایدار برای پیش‌بینی احتمال بلندمدت خشکسالی در ایران استفاده کردند و به درون‌یابی فضایی احتمالات وضعیت پایدار خشکسالی پرداختند. همچنین، Zarei (۲۰۱۸) و مقیمی و همکاران

(۱۳۹۷) نیز با بهره‌گیری از زنجیره مارکوف، به ترتیب در مناطق جنوب و استان فارس ایران، وقایع خشکسالی را پایش و پیش‌بینی نموده و نتایج مثبتی در تخمین فراوانی طبقات خشکسالی به دست آوردند. Alam و همکاران (۲۰۱۷) و سلاجقه و همکاران (۱۳۸۸) نیز از زنجیره مارکوف برای پایش خشکسالی در هند و ایران استفاده کرده و احتمال انتقال بین وضعیت‌های خشکسالی و مرطوب را بررسی کردند. علاوه بر این، Avilés و همکاران (۲۰۱۶) به مقایسه زنجیره مارکوف با شبکه‌های بیزین برای پیش‌بینی خشکسالی‌های ماهانه پرداختند و نشان دادند که مدل‌های زنجیره مارکوف در پیش‌بینی دوره‌های مرطوب و خشک عملکرد بهتری دارند. با این حال، تاکنون مطالعه‌ای با تمرکز بر تحلیل پویایی گذار از وضعیت‌های خشکسالی، ترسالی و نرمال در شهر مشهد که نماینده مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است، صورت نگرفته است. مزیت اصلی این رویکرد، در قابلیت آن برای استخراج آماره‌های مهم مدیریت ریسک مانند احتمالات شرطی رخداد و متوسط دوره‌های بازگشت خشکسالی‌های با شدت‌های مختلف است که ابزاری کارآمد برای برنامه‌ریزی منابع آب فراهم می‌آورد. به منظور محاسبه ماتریس احتمال انتقال، از یک روش نوآورانه در این پژوهش استفاده شده است که مبتنی بر سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه با مقیاس سالانه است. منظور از این رویکرد، بررسی داده‌ها بر اساس دوازده سری زمانی سالانه متفاوت است که هر کدام از یکی از ماه‌های فروردین تا اسفند آغاز می‌شود و تأثیر ماه شروع سال بر خصوصیات خشکسالی را به صورت جامع ارزیابی می‌کند.

هدف اصلی این مقاله، تحلیل پویایی خشکسالی با استفاده از مدل زنجیره مارکوف و ماتریس احتمال انتقال است. در نهایت، با محاسبه توزیع مانای وضعیت‌های مختلف آب‌وهوایی شامل ترسالی، نرمال و خشکسالی، احتمال رخداد هر وضعیت در درازمدت برای منطقه خشک و نیمه‌خشک مشهد مشخص شده است.

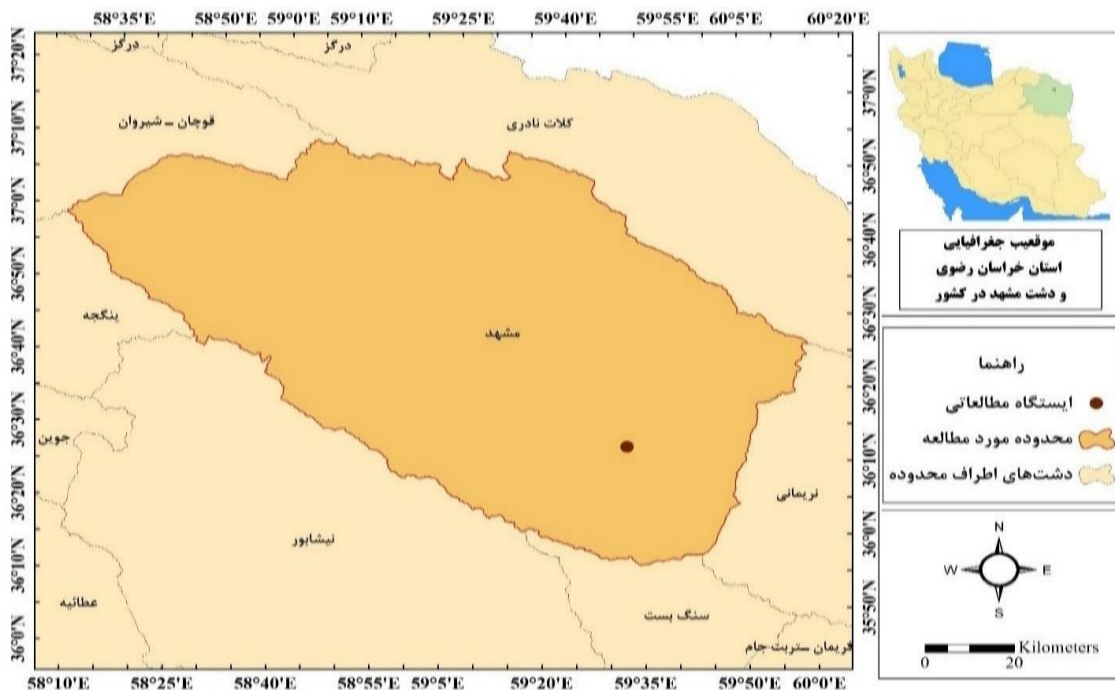
مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه و داده‌های مورد مطالعه

پژوهش حاضر براساس داده‌های ایستگاه همدید شهر مشهد، واقع در شمال شرق ایران، انجام شده است. این شهر به دلیل قرارگیری در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک، همواره با پدیده خشکسالی‌های متناوب روبرو است. دشت مشهد با مساحت تقریبی ۳۴۴۸ کیلومترمربع، دارای میانگین دمای سالانه ۱۴/۵ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارش سالانه ۲۴۷/۵ میلی‌متر است (فرزندی و همکاران، ۱۳۹۸؛ فرزندی و رضائی‌پزند، ۱۴۰۰). موقعیت مکانی ایستگاه در استان خراسان رضوی و ایران در شکل (۱) نمایش داده شده است. داده‌های به‌کاررفته در این پژوهش شامل ۱۲۷ سال اطلاعات (۱۴۰۰-

۱۲۷۳ شمسی) دمای میانگین و بارش ماهانه ایستگاه هواشناسی همدید مشهد (کد ۴۰۷۴۵) است. این ایستگاه در شرق مشهد، مجاور فرودگاه شهید هاشمی نژاد، در موقعیت جغرافیایی ۵۹ درجه ۳۸ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه عرض شمالی، با ارتفاع ۹۹۹ متر از سطح دریا قرار دارد. ایستگاه سینوپتیک مشهد در سال ۱۹۵۱ افتتاح شده است و قبل از آن سفارت امریکا واقع در مشهد از سال ۱۸۹۰ میلادی

(۱۲۶۸ هجری شمسی، دوره سلطنت ناصرالدین شاه) آمار دما و بارش ماهانه مشهد را اندازه‌گیری کرده است. این اطلاعات و چند شهر دیگر در کتب World Weather Record ثبت شده است. [فرزندی و همکاران](#) (۱۳۹۸) و [فرزندی و رضایی‌پژند](#) (۱۴۰۰) این اطلاعات را جمع‌آوری و بازسازی نمودند. با توجه به همگنی دو سری داده می‌توان آن‌ها را به عنوان یک سری زمانی تحلیل نمود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه و ایستگاه مورد مطالعه

روش‌ها

این پژوهش با هدف تحلیل پویایی خشکسالی‌ها و محاسبه توزیع پایدار خشکسالی، ترسالی و نرمال در درازمدت شامل مراحل: آزمون‌های آماری پایه، شاخص خشکسالی بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده، خصوصیات خشکسالی براساس تئوری گشت، زنجیره مارکف (محاسبه ماتریس احتمال انتقال) و در نهایت محاسبه توزیع پایدار خشکسالی، ترسالی و نرمال در درازمدت است که شرح مختصر هر بخش در ادامه آورده شده است.

آزمون‌های پایه آماری

پیش از تحلیل‌های آماری بر روی داده‌ها به عنوان متغیر تصادفی، اطمینان از صحت، کفایت و مرتبط بودن داده‌ها ضروری است. متغیر تصادفی از نظر آماری باید ویژگی‌های اصلی شامل تصادفی بودن، استقلال، همگنی و ایستایی را داشته باشند تا بتوان توابع چگالی را بر آن‌ها برازش داد. پژوهش حاضر به منظور بررسی همگنی داده‌ها از آزمون من-وینتی (یا ویلکاکسون)، تصادفی بودن داده‌ها از آزمون گشت‌ها (یا آزمون تغییرات حول میانگین)، استقلال داده‌ها از آزمون

والد-ولفویتز و بررسی روند داده‌ها از آزمون ناپارامتری من-کندال استفاده می‌کند ([فرزندی و همکاران](#)، ۱۳۹۸؛ [فرزندی و رضایی‌پژند](#)، ۱۴۰۰؛ [Wald و Wolfowitz](#)، ۱۹۴۰؛ [Mondal و همکاران](#)، ۲۰۱۲؛ [Vivekanandan](#)، ۲۰۲۴).

شاخص خشکسالی بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)

شاخص‌های متعددی برای ارزیابی پدیده خشکسالی توسعه یافته‌اند. انتخاب شاخص مناسب به نوع خشکسالی، ویژگی‌های منطقه‌ای و داده‌های در دسترس بستگی دارد. شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) به دلیل جامعیت و در نظر گرفتن هم‌زمان بارش و تبخیر و تعرق، برای پایش خشکسالی در این پژوهش، استفاده شد. شاخص SPEI، یک شاخص چندمتغیره است که داده‌های بارش و دما را ترکیب می‌کند. به دلیل عدم دسترسی به تمامی داده‌های لازم (مانند ساعات آفتابی، تابش و رطوبت نسبی) برای روش‌های دقیق‌تر (مانند فائو-پنمن-مانتیت) در دوره آماری مورد بررسی (۱۲۷۳-۱۴۰۰ هجری شمسی)، معادله تجربی تورنت‌وایت برای برآورد PET انتخاب شد. تحقیقات نشان داده که تفاوت معناداری بین روش‌های ساده و پیچیده برای

برآورد PET وجود ندارد (Vicente-Serrano و همکاران، ۲۰۱۰).

خصوصیات خشکسالی براساس تئوری گشت

تئوری گشت یک روش آماری برای شناسایی و توصیف دوره‌های پیوسته از مقادیر پایین‌تر یا بالاتر از یک آستانه خاص در سری‌های زمانی است. یک دوره خشکسالی (گشت منفی) زمانی آغاز می‌شود که مقدار شاخص SPEI از حد آستانه (معمولاً صفر یا یک مقدار منفی مشخص) پایین‌تر رود و تا زمانی که به بالای این حد بازگردد، ادامه می‌یابد. ویژگی‌های کلیدی خشکسالی بر اساس این تئوری شامل: مدت خشکسالی (DL)^۲، شدت خشکسالی (DS)^۳، بزرگی خشکسالی (DM)^۴ و فراوانی خشکسالی (DN)^۵ بررسی شده‌اند (Wang و همکاران، ۲۰۲۰؛ Ansori و همکاران، ۲۰۲۴).

روش زنجیره مارکوف (MC)

زنجیره مارکوف، یک مفهوم بنیادین با کاربردهای وسیع در علوم مختلف می‌باشد. زنجیره مارکوف که توسط آندری مارکوف (۱۹۰۶) معرفی شد، مدلی ریاضی برای توصیف دنباله‌ای از رویدادها است؛ زنجیره مارکوف یک فرایند تصادفی بدون حافظه است، بدین معنی که توزیع احتمال شرطی وضعیت بعد تنها به وضعیت فعلی بستگی دارد و مستقل از گذشته آن است. این خاصیت به این معناست که احتمال وقوع وضعیت اقلیمی بعدی (مانند گذار به وضعیت خشکسالی شدید) تنها به وضعیت کنونی سیستم (مثلاً خشکسالی متوسط سال قبل) وابسته است و کاملاً مستقل از تاریخچه گذشته می‌باشد. به عنوان مثال، در مدل مارکوف مرتبه یک (Order 1) که در این پژوهش استفاده شده، احتمال اینکه امسال وضعیت "ترمال" به "خشکسالی متوسط" منتقل شود، صرفاً به وضعیت سال قبل بستگی دارد. اگر میزان حافظه زنجیره مارکوف به m مرحله یا زمان قبل محدود شود، به آن زنجیره مارکوف با مرتبه m گفته می‌شود. در این حالت، احتمال وقوع وضعیت بعدی (مانند ورود به خشکسالی) وابسته به m وضعیت اخیر خواهد بود.

مدل‌های زنجیره مارکوف در میان روش‌های آماری و احتمالاتی، به دلیل توانایی در مدل‌سازی وابستگی‌های زمانی بین وضعیت‌های مختلف پدیده‌ها، به‌ویژه در تحلیل خشکسالی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مدل با بررسی احتمالات گذار از یک وضعیت اقلیمی (مانند خشکسالی) به وضعیت دیگر، پویایی‌های سیستم را در طول زمان تحلیل می‌کند. نتیجه این تحلیل، ماتریس احتمال انتقال است که ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی رفتارهای آینده و بررسی احتمال وقوع شرایط خاص در درازمدت به شمار می‌آید (Peres و Levin، ۲۰۱۷).

ماتریس احتمال انتقال

زنجیره مارکوف مرتبه یک ابزاری برای تحلیل رفتارهای احتمالی فرایندهای تصادفی است که در آن، احتمال وقوع هر رویداد در وضعیت بعد تنها به وضعیت فعلی سیستم وابسته است (خاصیت مارکوف) (Grimmett و Stirzaker، ۲۰۲۰). ماتریس احتمال انتقال^۶ ابزار اصلی در بررسی زنجیره‌های مارکوف است که نحوه تغییر وضعیت یک سیستم از یک حالت به حالت دیگر را در طول زمان نشان می‌دهد (Norris، ۱۹۹۸). هر عنصر (i,j) در این ماتریس، نشان‌دهنده احتمال شرطی حرکت سیستم از حالت i به حالت j در یک گام زمانی معین است، یعنی $P(X_{t+1} = j | X_t = i)$. ویژگی‌های اصلی ماتریس احتمال انتقال در منابع ذکر شده آمده است (Levin و Peres، ۲۰۱۷).

مطالعه حاضر، از ماتریس احتمال انتقال یک مرحله‌ای زنجیره مارکوف برای تحلیل وضعیت رطوبتی استفاده می‌کند. این ماتریس اطلاعات ارزشمندی در مورد رفتار سیستم در طول زمان ارائه می‌دهد. تعداد سطرها و ستون‌های ماتریس در این پژوهش پنج عدد است که متناسب با پنج کلاس وضعیت رطوبتی طبقه‌بندی شده‌اند. برای اطمینان از عدم صفر بودن درایه‌های ماتریس احتمال انتقال و به دلیل محدودیت داده‌های آماری، طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص SPEI به ۵ دسته هم‌احتمال (جدول ۱) صورت گرفت، تا احتمال انتقال از هر حالت به حالت دیگر وجود داشته باشد.

جدول ۱- طبقه‌بندی شدت خشکسالی براساس شاخص SPEI به کاررفته در این پژوهش

طبقه‌بندی	علامت اختصاری	مقادیر SPEI
ترسالی شدید	VW^1	۰/۸۶ یا بیشتر
ترسالی متوسط	MW^2	۰/۲۶ تا ۰/۸۶
نرمال	N^3	۰/۲۶ تا -۰/۲۶
خشکسالی متوسط	MD^{11}	-۰/۲۶ تا -۰/۸۶
خشکسالی شدید	SD^{12}	-۰/۸۶ یا کمتر

احتمال ماندگاری سیستم در همان وضعیت در گام زمانی بعدی، به عنوان شاخصی از پایداری آن وضعیت بررسی شده‌اند. در مقابل، عناصر خارج از قطر اصلی (p_{ij}) ، احتمال

تحلیل ماتریس احتمال انتقال برای درک رفتار و پایداری وضعیت‌های مختلف خشکسالی، ترسالی و نرمال در طول زمان انجام شد. عناصر قطر اصلی (p_{ii}) ، در این تحلیل، بیانگر

تغییر وضعیت از i به j را نشان می‌دهد که به کشف الگوهای غالب انتقال کمک می‌کند. علاوه بر این، بررسی هر سطر از ماتریس، توزیع احتمالی وضعیت‌های بعدی را از یک وضعیت معین مشخص می‌کند.

ماتریس احتمال انتقال، علاوه بر نمایش احتمالات شرطی انتقال بین وضعیت‌های اقلیمی، اطلاعات ارزشمندی درباره رفتار بلندمدت سیستم را فراهم می‌کند. یکی از این اطلاعات، مفهوم توزیع مانا یا پایدار است. بر اساس نظریه زنجیره مارکوف، در صورتی که ماتریس احتمال انتقال دارای ویژگی‌های ارگودیک باشد، با توان‌رساندن آن به سمت بی‌نهایت، به یک بردار احتمال ثابت همگرا می‌شود. این بردار، توزیع مانا نامیده می‌شود و نشان‌دهنده احتمال بلندمدت حضور سیستم در هر یک از وضعیت‌های مختلف، مستقل از وضعیت اولیه آن است (Levin و Peres, ۲۰۱۷).

به منظور محاسبه ماتریس احتمال انتقال، سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه با مقیاس سالانه که هر سری با ماه متفاوتی (فروردین تا اسفند) شروع می‌شد در نظر گرفته شد و شاخص خشکسالی SPEI سالانه برای هر ۱۲ سری محاسبه و فراوانی انتقالات در تمام این ۱۲ سری در نظر گرفته شد. تمام این انتقالات در ماتریس فراوانی انتقالات نهایی تجمیع و سپس ماتریس احتمال انتقال نهایی محاسبه شد. هدف از این تجمیع، در نظر گرفتن این واقعیت است که شروع سال یک امر قراردادی است و پدیده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی

لزوماً با یک تاریخ ثابت در تقویم هماهنگ نیستند. هر یک از ۱۲ سری، به عنوان یک سناریوی محتمل از نحوه وقوع انتقالات در سیستم اقلیمی در نظر گرفته شد. با تجمیع فراوانی انتقالات در تمام ۱۲ سری زمانی، ماتریس فراوانی انتقال نهایی، شمارش کلی دفعات انتقال از هر وضعیت پایه به سایر وضعیت‌ها را در طول دوره آماری و با در نظر گرفتن تمام تعاریف ممکن برای سال هیدرولوژیک، ارائه می‌دهد. این ماتریس تجمیع‌شده، مبنایی قوی‌تر و جامع‌تر برای محاسبه ماتریس احتمال انتقال نهایی فراهم می‌کند، زیرا تمام الگوهای انتقالی که با در نظر گرفتن ماه شروع سال‌های مختلف آشکار شده بود را در بر می‌گیرد.

این رویکرد ابتکاری، با در نظر گرفتن تعاریف متفاوت سال هیدرولوژیک با شروع از ماه‌های مختلف و پوشش کامل تغییرات احتمالی در الگوهای خشکسالی سالانه، امکان بررسی انتقالات بین وضعیت‌های مختلف خشکسالی (شامل خشکسالی شدید، متوسط، نرمال، ترسالی متوسط و شدید) را در طول سال‌های متوالی فراهم آورد. این رویکرد اطمینان حاصل کرد که رویدادهای شدید و بلندمدت خشکسالی که ممکن بود در یک تعریف خاص از سری زمانی هیدرولوژیک بهتر نمایان شوند، در تحلیل‌ها لحاظ گردند. توضیحات تکمیلی راجع به این سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه با مقیاس سالانه

عنوان سری زمانی	ماه شروع سال	ماه خاتمه سال
سری زمانی فروردین	فروردین	اسفند
سری زمانی اردیبهشت	اردیبهشت	فروردین
سری زمانی خرداد	خرداد	اردیبهشت
سری زمانی تیر	تیر	خرداد
سری زمانی مرداد	مرداد	تیر
سری زمانی شهریور	شهریور	مرداد
سری زمانی مهر	مهر	شهریور
سری زمانی آبان	آبان	مهر
سری زمانی آذر	آذر	آبان
سری زمانی دی	دی	آذر
سری زمانی بهمن	بهمن	دی
سری زمانی اسفند	اسفند	بهمن

فرزندگی و رضایی‌پژند (۱۴۰۰) جمع آوری و به صورت ماهانه و با روش‌های صحیح آماری و ریاضی بازسازی شده است. طول دوره ۱۲۷ ساله این مجموعه داده، برای تحلیل بلندمدت خشکسالی کفایت لازم را دارد؛ زیرا داده‌ها با طول دوره آماری بلندتر امکان شناسایی الگوهای اقلیمی با دوره تناوب طولانی و برآورد دقیق‌تر پارامترهای توزیع‌های آماری را فراهم می‌آورد (فرزندگی و همکاران، ۱۳۹۸؛ فرزندگی و رضایی‌پژند، ۱۴۰۰).

نتایج و بحث

پژوهش حاضر از سری زمانی ۱۲۷ ساله (۱۴۰۰-۱۲۷۳ شمسی)^{۱۳} بارش و دمای میانگین ماهانه ایستگاه همدید مشهد استفاده کرده است. این سری دارای داده‌های گمشده عمدتاً در طول جنگ جهانی دوم (۱۹۴۹-۱۹۴۱) و به‌طور پراکنده در طول دوره آماری است. این داده‌ها توسط **فرزندگی و همکاران** (۱۳۹۸) و

نتایج آزمون‌های پایه آماری

آزمون‌های پایه آماری به منظور بررسی همگنی، تصادفی بودن، استقلال و ایستایی (روند) داده‌ها در این بخش پیاده‌سازی شدند. معیار پذیرش یا رد فرضیه‌ها، بر اساس مقایسه P -Value با سطح معنی‌داری (α) آزمون بود؛ در صورتی که P -Value کمتر از α باشد، فرضیه صفر رد شده و فرضیه مقابل پذیرفته می‌شود. نتایج آزمون‌های من-ویتنی، گشت، والد-ولفوویتز و من-کندال که برای بررسی همگنی، تصادفی بودن،

استقلال و تشخیص روند داده‌های بارش ایستگاه مشهد انجام شدند، نشان دادند که مقادیر P -Value در تمامی آزمون‌ها بزرگ‌تر از ۰/۰۵ بود (جدول ۳). این موضوع به معنای پذیرش فرضیه صفر و در نتیجه، تأیید همگنی، تصادفی، مستقل و ایستا بودن داده‌های بارش طی دوره ۱۲۷ ساله مورد مطالعه است. این آزمون‌ها برای داده‌های دمای ایستگاه مشهد توسط **فرزندی و همکاران** (۱۳۹۸) پیاده‌سازی شده که نتایج آن بیانگر همگنی، استقلال و تصادفی بودن این داده‌ها است.

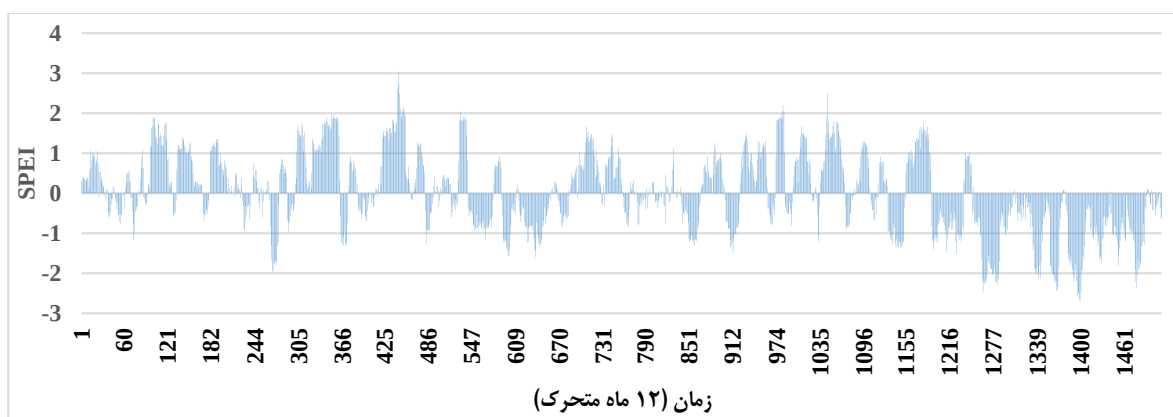
جدول ۳- نتایج آزمون‌های آماری پایه بر روی داده‌های بارش ایستگاه مشهد

آزمون آماری	P_Value	آماره آزمون	فرضیه صفر (H_0)
آزمون من - ویتنی	۰/۴۸۵۸	۰/۹۸۹	پذیرش همگنی داده‌ها
آزمون گشت	۰/۲۸۲۶	۱/۱۶۶۴	پذیرش تصادفی بودن داده‌ها
آزمون والد - ولفوویتز	۰/۶۸۳۵	۰/۴۰۷۶	پذیرش استقلال داده‌ها
آزمون من - کندال	۰/۶۲۳۵	۰/۴۹۰۸	پذیرش ایستایی داده‌ها

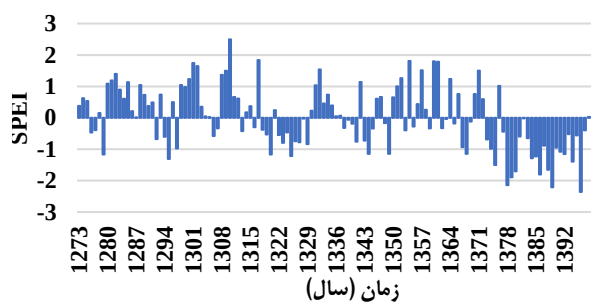
شاخص خشکسالی بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)

پس از اطمینان از اینکه نمونه اخذ شده یعنی داده‌های بارش و دما خصوصیات لازم برای تعمیم به جامعه را دارد، شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در مقیاس سالانه محاسبه شد. روش تورنت وایت برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) تعیین شد. ابتدا، نتایج SPEI در مقیاس ۱۲ ماهه (پنجره متحرک) به صورت یک سری زمانی در شکل (۲) ارائه شد که نوسانات خشکسالی و ترسالی را در طول دوره آماری (۱۴۰۰-۱۲۷۳ شمسی) نشان داد. برای تحلیل جامع‌تر وضعیت خشکسالی در مقیاس سالانه و با هدف آماده‌سازی بستر برای محاسبه ماتریس احتمال انتقال وضعیت‌ها، شاخص SPEI در سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه با

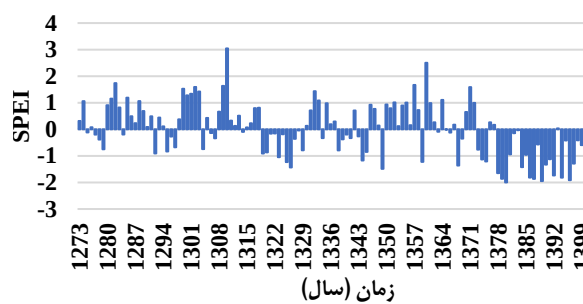
مقیاس سالانه محاسبه شد. به عنوان نمونه، سری زمانی SPEI سالانه با شروع از فروردین (شکل ۳)، که شامل ۱۲۷ سال داده بود، مبنای تحلیل‌های آتی قرار گرفت و نوسانات وضعیت رطوبتی در طول دوره آماری را نشان داد. سایر وضعیت‌های SPEI سالانه با شروع از ماه‌های بعدی نیز (ارائه شده در شکل ۳ و شامل ۱۲۶ سال داده) محاسبه شدند (دو مورد به عنوان نمونه آورده شده است) و نتایج آن‌ها در محاسبه ماتریس احتمال انتقال که در بخش‌های آتی به آن پرداخته خواهد شد به کار گرفته شدند. این رویکرد چندگانه در تعریف سال هیدرولوژیک، با ارائه دیدگاهی جامع‌تر از تغییرات وضعیت خشکسالی، به درک بهتر احتمال وقوع و تداوم خشکسالی‌ها کمک شایانی کرد.



شکل ۲- نمودار مقادیر شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) ۱۲ ماهه به صورت پنجره لغزنده



ب- سری زمانی اردیبهشت

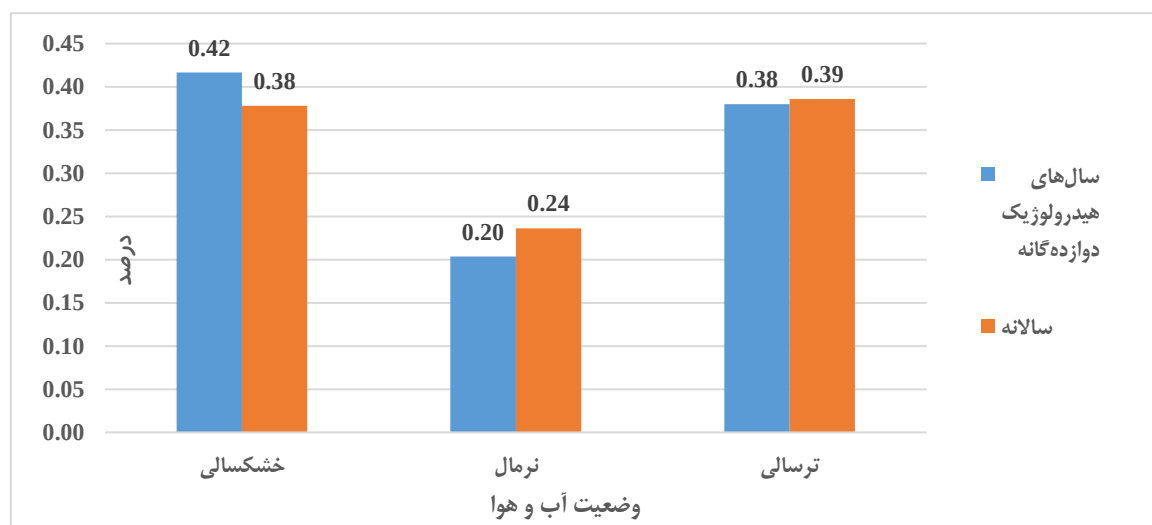


الف- سری زمانی فروردین

شکل ۳- نمودار مقادیر شاخص بارش و تبخیر و تعرق (SPEI) سالانه (الف و ب)

احتمال پنهان شدن شدت و مدت واقعی خشکسالی‌های در حال وقوع توسط دوره‌های کوتاه ترسالی یا بارش‌های فصلی وجود دارد. بررسی خشکسالی به صورت سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه، این امکان را فراهم آورد تا خشکسالی‌هایی با مدت زمان طولانی‌تر و شدت بیشتر به صورت کامل‌تری نمایان شوند. این روش، حساسیت بیشتری به دوره‌های کمبود مستمر بارش در طول سال نشان داد و توانست آغاز، اوج و پایان خشکسالی‌ها را با دقت بیشتری مشخص کند.

مقایسه فراوانی وقوع طبقات مختلف اقلیمی، شامل خشکسالی، ترسالی و نرمال در دو مقیاس زمانی متفاوت در شکل (۴) آمده است؛ حالت سالانه (بر اساس سال شمسی) و حالت پنجره متحرک ۱۲ ماهه. حالت پنجره متحرک، که نماینده سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه با مقیاس سالانه با شروع از ماه‌های مختلف سال است، امکان بررسی تغییرات اقلیمی را با جزئیات بیشتری در طول چرخه‌های سالانه فراهم آورد. نتایج نشان داد که خشکسالی‌ها در سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه نسبت به حالت سالانه، نمود بارزتر و مشخص‌تری داشتند. در مقیاس سالانه،



شکل ۴- نمودار مقایسه درصد وضعیت‌های خشکسالی، ترسالی و نرمال به صورت سالانه و سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه با مقیاس سالانه با شروع از ماه‌های متفاوت

ارائه شدند (دو مورد به عنوان نمونه آورده شده است). برخی از آماره‌های مهم شدت، مدت و بزرگی خشکسالی نیز در جدول (۵) آورده شدند. نتایج نشان داد سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه خصوصیات آماری متفاوتی دارند (جدول ۵). با وجود اشتراک ۱۱ ماه در حالت‌های متوالی، تفاوت‌های چشمگیری در خصوصیات خشکسالی بین آن‌ها وجود داشت. این رویکرد امکان نمایان ساختن بدترین وضعیت‌های ممکن خشکسالی را فراهم آورد. به عنوان مثال،

خصوصیات خشکسالی با استفاده از تئوری گشت (مدت، شدت، بزرگی و فراوانی)

پس از محاسبه شاخص خشکسالی SPEI، خصوصیات خشکسالی شامل شدت، مدت، بزرگی و فراوانی با استفاده از تئوری گشت محاسبه شد. حد شروع و خاتمه خشکسالی برای شاخص SPEI برابر با -0.26 در نظر گرفته شد. متغیرهای خشکسالی شامل شدت، مدت، بزرگی و فراوانی برای سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه در جدول (۴)

در سری‌های زمانی مربوط به شروع از ماه‌های آبان، بهمن و اسفند، خشکسالی با تداوم ۸ سال شناسایی شد که بیشترین تداوم در میان سایر حالات بود. این تفاوت‌ها اهمیت در نظر گرفتن پویایی‌های زمانی در طول سال را نشان می‌دهند و بیانگر آن هستند که تحلیل سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه، دیدگاهی جامع‌تر از بررسی سالانه ارائه می‌دهد و امکان بررسی حساسیت خصوصیات خشکسالی به تغییرات

فصلی را فراهم می‌آورد. به عنوان مثال، فراوانی دوره‌های خشکسالی در سری زمانی با شروع از ماه‌هایی مانند مرداد، آذر و دی بیشتر بود که احتمالاً ناشی از حساسیت این تنظیمات به نوسانات کوتاه‌مدت بارش است. همچنین، شدت و بزرگی خشکسالی نیز بسته به شروع سال تغییر کرد، به طوری که شروع از فروردین و آبان به طور متوسط خشکسالی‌های شدیدتری را نشان دادند.

جدول ۴- خصوصیات خشکسالی برای سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه با مقیاس سالانه برای داده‌های تاریخی (شروع سال از ماه‌های فروردین و اردیبهشت)

شروع سال	مدت	میانگین شدت	میانگین بزرگی	فراوانی	شروع سال	مدت	میانگین شدت	میانگین بزرگی	فراوانی
۱	۱	-۰/۸۰۱	-۰/۷۰۱	۱۵	۱	۱	-۰/۷۰۱	-۰/۷۰۱	۱۵
۲	۲	-۱/۴۵۰	-۲/۰۰۴	۴	۲	۲	-۱/۴۵۰	-۱/۰۰۲	۶
۳	۳	-۲/۵۵۱	-۳/۳۵۶	۴	۳	۳	-۲/۵۵۱	-۱/۱۱۹	۲
۴	۴	-۶/۲۲۰	-۳/۴۱۹	۳	۴	۴	-۶/۲۲۰	-۰/۸۵۵	۱
۵	۵	-	-	-	۵	۵	-	-	-
۶	۶	-۶/۴۵۲	-۵/۸۱۰	۱	۶	۶	-۶/۴۵۲	-۰/۹۶۸	۳
۷	۷	-	-	-	۷	۷	-	-	-
۸	۸	-	-	-	۸	۸	-	-	-

شناسایی خشکسالی ۸ ساله در سری‌های زمانی با شروع از آبان، بهمن و اسفند یافته مهمی است که برتری رویکرد سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه را در شناسایی رویدادهای طولانی‌مدت خشکسالی نشان می‌دهد. رویدادی که ممکن بود در تحلیل سالانه به طور کامل آشکار نشود. بررسی آماره‌های SPEI سالانه (جدول ۵) نیز این تفاوت‌ها را تأیید کرد و نشان داد که تغییر شروع سال می‌تواند بر میانگین، انحراف معیار و چولگی SPEI و در نتیجه بر خصوصیات خشکسالی تأثیر بگذارد. این تنوع در خصوصیات خشکسالی در سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه، داده‌های ارزشمندتری را برای مرحله بعد، یعنی محاسبه دقیق‌تر ماتریس احتمال انتقال وضعیت‌های خشکسالی فراهم کرد و به درک بهتر پویایی‌های فصلی و احتمالات تغییر وضعیت، کمک شایانی نمود. در نهایت، رویکرد سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه امکان درک جامع‌تری از رفتار خشکسالی در منطقه مورد مطالعه را فراهم ساخت و از محدودیت‌های روش سالانه کاست.

پیاده‌سازی روش زنجیره مارکف

محاسبه ماتریس احتمال انتقال

به منظور بررسی پویایی تغییر وضعیت خشکسالی در مقیاس سالانه، ماتریس فراوانی انتقالات برای سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه محاسبه شده است. این محاسبات

بر اساس داده‌های شاخص SPEI سالانه و با استفاده از تقسیم‌بندی طبقات خشکسالی که در جدول (۱) ارائه شده صورت گرفته است. هر یک از این ماتریس‌ها (شکل ۵ که دو مورد به عنوان نمونه آورده شده است) نشان‌دهنده تعداد دفعات انتقال از یک وضعیت پایه (سطر) به وضعیت دیگر (ستون) در طول دوره آماری است. برای تسهیل در تفسیر، از رنگ‌بندی استفاده شده است. رنگ قرمز نمایانگر انتقال سیستم به یکی از وضعیت‌های خشکسالی (شدید یا متوسط) است که نشان‌دهنده تشدید یا تداوم شرایط خشک است. رنگ آبی نشان‌دهنده انتقال به یکی از وضعیت‌های ترسالی (شدید یا متوسط) است که بیانگر بهبود شرایط رطوبتی است. رنگ خاکستری نیز نشان‌دهنده انتقال به وضعیت نرمال است. شدت رنگ هر درایه، فراوانی وقوع آن انتقال خاص را نشان می‌دهد؛ به این ترتیب که درایه‌های پررنگ‌تر بیانگر تعداد دفعات بیشتر و درایه‌های کم‌رنگ‌تر نشان‌دهنده تعداد دفعات کمتر انتقال هستند.

همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، ماتریس‌های فراوانی انتقالات سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه محاسبه شد. برای ارائه یک دیدگاه کلی و جامع از فراوانی انتقالات بین وضعیت‌های خشکسالی، ترسالی و نرمال در طول دوره آماری، فراوانی‌های به‌دست‌آمده از هر یک از این ۱۲ سری زمانی در یک ماتریس فراوانی انتقال نهایی (شکل ۶) تجمیع شد. این ماتریس بیانگر میانگین انتقالات در این ۱۲ سری زمانی است.

جدول ۵- برخی از آماره‌های مهم متغیرهای خشکسالی تاریخی برای سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه با مقیاس سالانه براساس زمان شروع دوره
(مدت خشکسالی برحسب سال می‌باشد)

شروع سال	متغیر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	ضریب چولگی
فروردین	مدت	۱	۶	۲/۲۳۸	۱/۴۱۱	۰/۶۳۰	۱/۰۶۸
	شدت	-۰/۳۳۰	-۶/۴۵۴	-۲/۳۰۱	۲/۱۱۸	۰/۹۲۰	-۱/۲۴۴
	بزرگی	-۰/۳۳۰	-۱/۶۱۳	-۰/۹۱۷	۰/۳۹۶	۰/۴۳۳	-۰/۲۶۳
اردیبهشت	مدت	۱	۷	۲/۲۹۲	۱/۹۶۷	۰/۸۵۸	۱/۵۷۵
	شدت	-۰/۲۷۹	-۹/۷۲۷	-۲/۰۷۳	۲/۵۴۷	۱/۲۲۹	-۱/۹۴۵
	بزرگی	-۰/۲۷۹	-۱/۳۹۰	-۰/۷۴۷	۰/۳۵۳	۰/۴۷۳	-۰/۲۲۰
خرداد	مدت	۱	۷	۲/۰۳۸	۱/۸۲۲	۰/۸۹۴	۱/۷۴۵
	شدت	-۰/۳۰۵	-۱۰/۰۲۰	-۱/۸۸۷	۲/۲۹۹	۱/۲۱۸	-۲/۳۶۴
	بزرگی	-۰/۳۰۵	-۱/۶۷۱	-۰/۸۰۵	۰/۳۵۴	۰/۴۳۹	-۰/۵۷۰
تیر	مدت	۱	۶	۲/۰۳۷	۰/۴۶۳	۰/۲۲۷	۱/۷۲۴
	شدت	-۰/۳۴۹	-۶/۶۸۳	-۱/۰۷۳	۱/۸۴۴	۱/۷۱۸	-۱/۴۴۳
	بزرگی	-۰/۳۴۹	-۲/۱۰۹	-۰/۷۸۷	۰/۴۳۸	۰/۵۵۶	-۱/۶۷۴
مرداد	مدت	۱	۷	۲	۱/۷۲۱	۰/۸۶۱	۱/۹۲۴
	شدت	-۰/۲۶۷	-۸/۰۶۷	-۱/۷۶۱	۱/۹۷۴	۱/۱۲۱	-۱/۹۴۹
	بزرگی	-۰/۲۶۷	-۱/۹۷۰	-۰/۷۹۴	۰/۴۴۹	۰/۵۶۵	-۱/۲۸۶
شهریور	مدت	۱	۶	۲/۰۷۷	۱/۶۴۷	۰/۷۹۳	۱/۶۷۰
	شدت	-۰/۳۰۱	-۶/۴۱۹	-۱/۸۷۵	۱/۸۵۶	۰/۹۹۰	-۱/۳۱۵
	بزرگی	-۰/۳۰۱	-۲/۱۲۲	-۰/۸۲۷	۰/۴۵۷	۰/۵۵۳	-۱/۲۴۱
مهر	مدت	۱	۶	۲/۰۳۸	۱/۵۸۷	۰/۷۷۹	۱/۵۵۸
	شدت	-۰/۲۹۲	-۶/۵۶۶	-۱/۸۴۷	۱/۸۵۷	۱/۰۰۵	-۱/۴۳۰
	بزرگی	-۰/۲۹۲	-۱/۷۱۲	-۰/۸۱۲	۰/۳۸۹	۰/۴۸۰	-۰/۵۵۰
آبان	مدت	۱	۸	۲/۱۳۶	۱/۹۳۵	۰/۹۰۶	۱/۹۵۹
	شدت	-۰/۴۰۸	-۸/۹۰۳	-۲/۱۴۴	۲/۱۹۰	۱/۰۲۲	-۱/۸۴۹
	بزرگی	-۰/۴۰۸	-۲/۲۳۴	-۰/۹۶۲	۰/۴۹۸	۰/۵۱۷	-۱/۵۵۶
آذر	مدت	۱	۷	۱/۷۴۱	۱/۴۰۳	۰/۸۰۶	۲/۴۸۶
	شدت	-۰/۲۷۵	-۸/۸۷۱	-۱/۷۲۴	۱/۸۸۲	۱/۰۹۲	-۲/۵۶۳
	بزرگی	۰/۲۷۵	-۲/۲۱۵	-۰/۹۲۶	۰/۵۳۱	۰/۵۷۳	-۱/۰۶۱
دی	مدت	۱	۷	۱/۸۸۹	۱/۵۲۸	۰/۸۰۹	۲/۰۱۹
	شدت	-۰/۲۷۹	-۷/۳۲۱	-۱/۷۸۵	۱/۹۲۶	۱/۰۷۹	-۱/۶۲۵
	بزرگی	-۰/۲۷۹	-۲/۰۶۷	-۰/۸۲۹	۰/۴۷۱	۰/۵۶۹	-۰/۹۸۶
بهمن	مدت	۱	۸	۲	۱/۸۴۲	۰/۹۲۱	۲/۱۴۲
	شدت	-۰/۲۶۲	-۹/۹۵۹	-۱/۹۷۲	۲/۴۴۶	۱/۲۴۰	-۲/۱۵۷
	بزرگی	-۰/۲۶۲	-۱/۵۶۸	-۰/۸۳۳	۰/۴۱۶	۰/۵۰۰	-۰/۱۸۴
اسفند	مدت	۱	۸	۲/۱۹۰	۱/۷۷۸	۰/۸۱۲	۲/۰۴۲
	شدت	-۰/۲۶۶	-۱۰/۷۸۹	-۲/۲۴۵	۲/۴۵۱	۰/۹۲۰	-۲/۴۶۸
	بزرگی	-۰/۲۶۶	-۱/۳۹۴	-۰/۹۱۵	۰/۳۵۶	۰/۳۸۹	۰/۵۶۹

وضعیت	SD	MD	N	MW	VW	مجموع
SD	۱۲	۶	۲	۲	۳	۲۵
MD	۹	۶	۸	۳	۵	۳۱
N	۲	۷	۴	۳	۳	۱۹
MW	۲	۶	۳	۸	۴	۲۳
VW	۰	۶	۳	۶	۱۲	۲۷

ب - شروع سال اردیبهشت

وضعیت	SD	MD	N	MW	VW	مجموع
SD	۱۳	۶	۴	۲	۲	۲۷
MD	۴	۵	۳	۵	۳	۲۰
N	۷	۵	۸	۵	۵	۳۰
MW	۳	۲	۱۰	۱	۶	۲۲
VW	۰	۳	۵	۸	۱۱	۲۷

الف - شروع سال فروردین

شکل ۵- ماتریس فراوانی انتقالات برای سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه

با تجمیع فراوانی انتقالات در تمام ۱۲ سری زمانی، ماتریس فراوانی انتقال نهایی، شمارش کلی دفعات انتقال از هر وضعیت پایه به سایر وضعیت‌ها را در طول دوره آماری و با در نظر گرفتن سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه، ارائه داد.

این ماتریس تجمیع‌شده، مبنایی قوی‌تر و جامع‌تر برای محاسبه ماتریس احتمال انتقال نهایی (شکل ۷) فراهم کرد، زیرا تمام الگوهای انتقالی که با در نظر گرفتن شروع سال‌های با ماه مختلف آشکار شده بود را در بر گرفت.

وضعیت	SD	MD	N	MW	VW	مجموع
SD	۹۱	۸۵	۴۳	۴۰	۲۴	۲۸۳
MD	۹۷	۷۵	۶۰	۵۴	۵۴	۳۴۰
N	۳۴	۶۲	۹۸	۴۲	۶۷	۳۰۳
MW	۲۸	۶۲	۵۴	۳۹	۶۵	۲۴۸
VW	۳۳	۶۳	۵۲	۶۲	۱۱۷	۳۲۷

شکل ۶- ماتریس فراوانی انتقالات نهایی

وضعیت	SD	MD	N	MW	VW	مجموع
SD	۰/۳۲۲	۰/۳۰۰	۰/۱۵۲	۰/۱۴۱	۰/۰۸۵	۱
MD	۰/۲۸۵	۰/۲۲۱	۰/۱۷۶	۰/۱۵۹	۰/۱۵۹	۱
N	۰/۱۱۲	۰/۲۰۵	۰/۳۲۳	۰/۱۳۹	۰/۲۲۱	۱
MW	۰/۱۱۳	۰/۲۵۰	۰/۲۱۸	۰/۱۵۷	۰/۲۶۲	۱
VW	۰/۱۰۱	۰/۱۹۳	۰/۱۵۹	۰/۱۹۰	۰/۳۵۸	۱

شکل ۷- ماتریس احتمال انتقال نهایی

شکل (۷) مربوط به ماتریس احتمال انتقال نهایی و نشان‌دهنده احتمال انتقال از یک وضعیت خشکسالی یا ترسالی در یک سال به وضعیت دیگر در سال بعد، با در نظر گرفتن سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه است. سطرها نشان‌دهنده وضعیت فعلی (سال t) و ستون‌ها نشان‌دهنده وضعیت سال بعد ($t+1$) در این شکل هستند.

تحلیل ماتریس احتمال انتقال نهایی

تحلیل ماتریس احتمال انتقال، اطلاعات کلیدی در مورد پویایی و رفتارهای غالب سیستم اقلیمی را آشکار کرد. مهم‌ترین یافته‌ها به شرح زیر است:

- **پایداری وضعیت‌های شدید و نرمال:** نتایج نشان داد وضعیت‌های شدید اقلیمی، یعنی خشکسالی شدید (SD) با احتمال ۰/۳۲۲ و ترسالی شدید (VW) با احتمال ۰/۳۵۸، پایداری قابل‌توجهی دارند. این بدان معناست که در صورت وقوع یک سال شدید، احتمال زیادی وجود دارد که شرایط در سال بعد نیز به همان شکل باقی بماند. پایداری وضعیت نرمال (N) نیز با احتمال ۰/۳۲۳ بسیار بالا و نشان‌دهنده تمایل سیستم به ماندن در شرایط تعادلی است.

- **گذرا بودن وضعیت‌های میانی:** برخلاف وضعیت‌های شدید، وضعیت‌های میانی خشکسالی متوسط (MD) و ترسالی متوسط (MW) به عنوان وضعیت‌های گذرا عمل می‌کنند. احتمال پایداری در این وضعیت‌ها (به ترتیب ۰/۲۲۱ و ۰/۱۵۷) به طور محسوسی کمتر از احتمال خروج از آن‌ها به سمت وضعیت‌ها شدیدتر یا نرمال است. این یافته نشان می‌دهد که سیستم تمایل کمتری به توقف در شرایط میانی دارد و پس از ورود به این وضعیت‌ها، احتمالاً به سمت شرایط وخیم‌تر یا بهبود یافته حرکت می‌کند.
- **عدم تقارن در انتقال‌ها:** تحلیل دقیق‌تر نشان داد که الگوهای انتقال بین وضعیت‌ها خشکسالی و ترسالی کاملاً متقارن نیستند. برای مثال، احتمال انتقال از ترسالی شدید (VW) به خشکسالی متوسط (MD) با احتمال ۰/۱۹، بالاتر از احتمال انتقال از خشکسالی شدید (SD) به ترسالی متوسط (MW) با احتمال ۰/۱۴ است (۵ درصد تفاوت دارند).
- **کاربردها و محدودیت‌ها:** ماتریس احتمال انتقال، به عنوان یک ابزار ارزشمند برای تحلیل پویایی سیستم اقلیمی منطقه عمل می‌کند و می‌تواند برای پیش‌بینی احتمالی وضعیت‌های خشکسالی یا ترسالی در آینده

استفاده شود. با در نظر گرفتن وضعیت فعلی، می‌توان احتمال قرار گرفتن در هر یک از وضعیت‌ها را در سال‌های آتی تخمین زد که مفید برای برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب و اتخاذ استراتژی‌های سازگاری است.

توزیع پایدار خشکسالی، ترسالی و نرمال در درازمدت

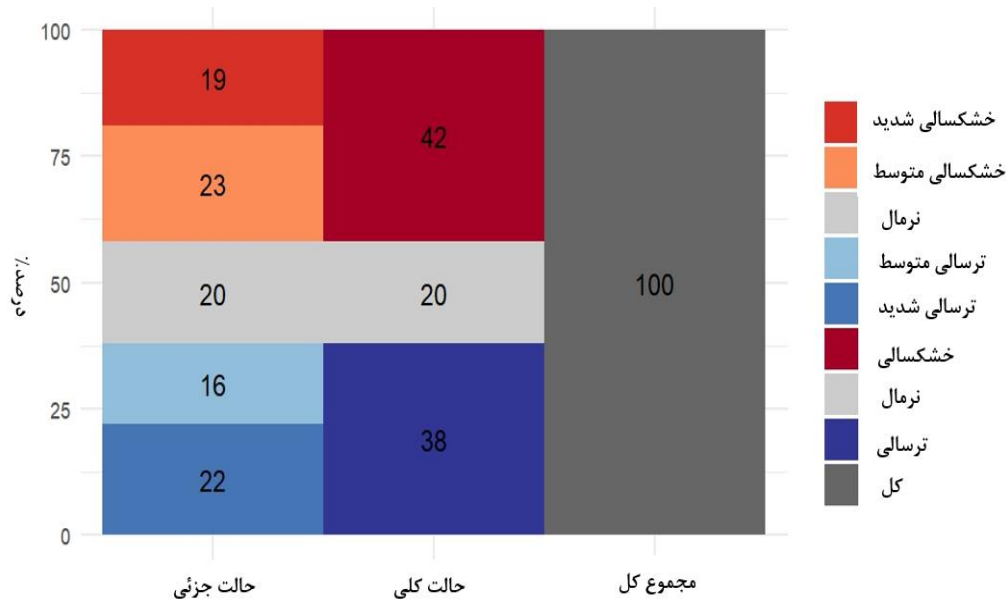
ماتریس احتمال انتقال، علاوه بر نمایش احتمالات شرطی انتقال بین وضعیت‌های اقلیمی، اطلاعات ارزشمندی را درباره رفتار بلندمدت سیستم فراهم می‌کند. یکی از این اطلاعات، مفهوم توزیع مانا یا پایدار است. بر اساس نظریه زنجیره مارکوف، در صورتی که ماتریس احتمال انتقال دارای ویژگی‌های ارگودیک (بنابر این خصوصیت ماتریس، سیستم می‌تواند از هر وضعیت به وضعیت دیگر در تعداد گام محدودی برسد) باشد، با توان رساندن آن به سمت بی‌نهایت، به یک بردار احتمال ثابت همگرا می‌شود. این بردار، توزیع مانا نامیده می‌شود و نشان‌دهنده احتمال بلندمدت حضور سیستم در هر یک از وضعیت‌های مختلف، مستقل از وضعیت اولیه آن است (Levin و Peres، ۲۰۱۷).

شکل (۸)، توزیع مانای محاسبه‌شده برای وضعیت‌های مختلف اقلیمی را نشان می‌دهد. بر اساس این توزیع، انتظار می‌رود که در درازمدت:

- حدود ۱۹٪ از سال‌ها در وضعیت خشکسالی شدید (SD) سپری شود.
- حدود ۲۳٪ از سال‌ها در وضعیت خشکسالی متوسط (MD) سپری شود.
- حدود ۲۰٪ از سال‌ها در وضعیت نرمال (N) سپری شود.
- حدود ۱۶٪ از سال‌ها در وضعیت ترسالی متوسط (MW) سپری شود.
- حدود ۲۲٪ از سال‌ها در وضعیت ترسالی شدید (VW) سپری شود.

این توزیع مانا، اطلاعات ارزشمندی برای برنامه‌ریزی‌های بلندمدت سازگاری با خشکسالی و مدیریت منابع آب فراهم می‌کند. با آگاهی از احتمال بلندمدت حضور در هر یک از وضعیت‌های خشکسالی، ترسالی و نرمال، می‌توان برنامه‌های پیشگیرانه و سازگارانه‌تری را برای مواجهه با شرایط خشک و مرطوب در آینده تدوین کرد.

به عنوان مثال، احتمال بالای حضور در وضعیت‌های ترسالی شدید و متوسط در درازمدت، فرصت‌هایی را برای ذخیره‌سازی آب فراهم می‌کند، در حالی که احتمال وقوع خشکسالی‌های متوسط و شدید نیز ضرورت برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات منفی آن‌ها را گوشزد می‌کند.



شکل ۸- توزیع پایدار وضعیت‌های خشکسالی، ترسالی و نرمال در درازمدت

توانست خصوصیات خشکسالی را با دقت زیادی آشکار سازد. این رویکرد، محدودیت‌های تحلیل سالانه مرسوم را برطرف کرد و رویدادهای مهمی همچون خشکسالی ۸ ساله را که ممکن بود در روش‌های سنتی پنهان بماند، نمایان ساخت. نتایج تحلیل ماتریس احتمال انتقال نشان داد که سیستم اقلیمی مشهد پایدار بالایی در وضعیت‌های شدید (خشکسالی شدید و ترسالی شدید) دارد. این یافته بیانگر آن

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تحلیل پویایی‌های خشکسالی در منطقه مشهد با استفاده از مدل زنجیره مارکوف، به درک عمیق‌تری از رفتار بلندمدت اقلیم این منطقه دست یافت. نوآوری اصلی این مطالعه در به‌کارگیری روش سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه بود که با تحلیل داده‌ها از ۱۲ مبدأ زمانی متفاوت،

است که در صورت ورود به یکی از این وضعیت‌ها، احتمال تداوم آن در سال بعد بسیار زیاد است. در مقابل، وضعیت‌های میانی (خشکسالی متوسط و ترسالی متوسط) به عنوان وضعیت‌های گذرا عمل می‌کنند و احتمال خروج از آن‌ها به سمت وضعیت‌های شدیدتر یا نرمال، بیشتر است. تحلیل توزیع مانای وضعیت‌های مختلف نیز مهم‌ترین نتیجه این پژوهش بود که تصویر روشنی از آینده اقلیمی منطقه ارائه می‌دهد. این نتایج نشان داد که در درازمدت، احتمال حضور در وضعیت‌های خشکسالی شدید و متوسط (با مجموع ۴۲٪) بیشتر از وضعیت‌های ترسالی شدید و متوسط (با مجموع ۳۸٪) است که بیانگر تمایل بلندمدت سیستم به سمت شرایط خشک‌تر است.

نتایج این پژوهش ابزاری ارزشمند برای مدیریت منابع آب در منطقه مشهد فراهم می‌آورد. با توجه به اینکه توزیع مانای محاسبه‌شده، احتمال بلندمدت وقوع خشکسالی را با ۴۲ درصد بیشتر از ترسالی نشان می‌دهد، برنامه‌ریزی‌های کلان توسعه، به‌ویژه در بخش‌های کشاورزی، باید بر پایه سناریوهای خشکسالی تدوین شوند. علاوه بر این، ماتریس احتمال انتقال نشان می‌دهد که وضعیت‌های میانی (خشکسالی و ترسالی متوسط) گذرا هستند؛ بنابراین، مدیران باید آمادگی لازم برای واکنش سریع به تشدید یا بهبود وضعیت را داشته باشند. نتایج این پژوهش با نتایج [سلاجقه و همکاران \(۱۳۸۸\)](#) و [Spinoni و همکاران \(۲۰۱۷\)](#) مطابقت داشت.

منابع

بذرافشان، ام‌البین، محمودزاده، فوزیه، عسگری‌نژاد، امین، و بذرافشان، جواد. (۱۳۹۸). مقایسه تطبیقی شاخص‌های SPI، RDI و SPEI در تحلیل روند شدت، مدت و فراوانی خشکسالی در مناطق خشک و نیمه خشک ایران. علوم مهندسی و آبیاری، ۴۲(۳)، ۱۱۷-۱۳۱. <https://doi.org/10.22055/jise.2017.22113.1585>

سلاجقه، علی، نجفی حاجی‌ور، منصور، و فتح‌آبادی، ابوالحسن. (۱۳۸۸). تحلیل خشکسالی با استفاده از شاخص SPI و زنجیره مارکوف (مطالعه موردی: استان چهارمحال و بختیاری). همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران (مدیریت پایدار بلایای طبیعی). دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. <https://sid.ir/paper/817138/fa>

فرزندی، محبوبه، ثنایی‌نژاد، سیدحسین، قهرمان، بیژن، و سرمد، مجید. (۱۳۹۸). ترمیم داده‌های مفقود هواشناسی با روش‌های تکاملی و یادگیری ماشین مطالعه موردی: بارش و دمای ماهانه درازمدت مشهد. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۳(۲)، ۳۶۱-۳۷۷. <https://doi.org/10.22067/jsw.v33i2.74125>

فرزندی، محبوبه، و رضایی‌پژند، حجت. (۱۴۰۰). معرفی روش MICE در ترمیم داده‌های گمشده هواشناسی و مقایسه با رگرسیون؛ مطالعه موردی: ۱۳۰ سال دمای ماهانه مشهد،

جاسک و بوشهر. آب و توسعه پایدار، ۸(۳)، ۳۱-۴۲. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v8i3.2104.1038>

قربانی، خلیل، ولی‌زاده، اسماعیل، و برارخان‌پور، صدیقه. (۱۳۹۷). بررسی روند تغییرات مکانی-زمانی شاخص دومتغیره خشکسالی هواشناسی SPEI در ایران. مدیریت بیابان، ۱۱(۶)، ۲۵-۳۸. <https://doi.org/10.30488/ccr.2023.375498.1107>

مقیم، محمدمهدی، کوهی، امیر، و زارعی، عبدالرسول. (۱۳۹۷). پایش و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی در استان فارس با استفاده از شاخص RDI و مدل ریاضی زنجیره مارکوف. فصلنامه علمی و پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۸(۳)، ۱۶۵-۱۵۳.

مصطفی‌زاده، رئوف، و ذبیحی، محسن. (۱۳۹۵). تحلیل و مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI در ارزیابی خشکسالی هواشناسی با استفاده از نرم‌افزار R (بررسی موردی: استان کردستان). مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۳)، ۶۳۳-۶۴۳. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2016.57881>

Alam, N. M., Sharma, G. C., Moreira, E., Jana, C., Mishra, P. K., Sharma, N. K., & Mandal, D. (2017). Evaluation of drought using SPEI drought class transitions and log-linear models for different agro-ecological regions of India. Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c, 100, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.02.008>

Ansori, A., Sulistiyono, H., & Yasa, I. W. (2024). Study of drought using the theory of run and hydrological drought index and its relationship to reservoir storage at the Batujai Dam and Pengga Dam. RESEARCH REVIEW International Journal of Multidisciplinary, 9(7), 116-127. <https://doi.org/10.31305/rrijm.2024.v09.n07.016>

Avilés, A., Céleri, R., Solera, A., & Paredes, J. (2016). Probabilistic forecasting of drought events using Markov chain-and Bayesian network-based models: A case study of an Andean regulated river basin. Water, 8(2), 37. <https://doi.org/10.3390/w8020037>

Azimi, S., Hassannayebi, E., Boroun, M., & Tahmoures, M. (2020). Probabilistic analysis of long-term climate drought using steady-state Markov chain approach. Water Resources Management, 34(15), 4703-4724. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02683-5>

Grimmett, G., & Stirzaker, D. (2020). Probability and random processes. Oxford university press, NewYork, USA.

- Wald, A., & Wolfowitz, J. (1940). On a test whether two samples are from the same population. The Annals of Mathematical Statistics, 11(2), 147-162.
- Wang, L., Zhang, X., Wang, S., Salahou, M. K., & Fang, Y. (2020). Analysis and application of drought characteristics based on theory of runs and copulas in Yunnan, Southwest China International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(13), 4654. <https://doi.org/10.3390/ijerph17134654>
- Yan-Jun, L. I., Xiao-dong, Z. H. E. N. G., Fan, L. U., & Jing, M. A. (2012). Analysis of drought evolvment characteristics based on standardized precipitation index in the Huaihe River basin. Procedia Engineering, 28, 434-437. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.746>
- Zarei, A. R. (2018). Evaluation of drought condition in arid and semi-arid regions, using RDI index. Water Resources Management, 32(5), 1689-1711. <https://doi.org/10.1007/s11269-017>
- Levin, D. A., & Peres, Y. (2017). Markov chains and mixing times (Vol. 107). USA. <https://doi.org/10.1090/mbk/107>
- Mondal, A., Kundu, S., & Mukhopadhyay, A. (2012). Rainfall trend analysis by Mann-Kendall test: A case study of north-eastern part of Cuttack district, Orissa. International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences, 2(1), 70-78. 13USGS.
- Norris, J. R. (1998). Markov chains (No. 2). Cambridge university press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810633>
- Sheffield, J., & Wood, E. F. (2008). Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. Climate dynamics, 31(1), 79-105.
- Spinoni, J., Naumann, G., & Vogt, J. V. (2017). Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity. Global and Planetary Change, 148, 113-130. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.013>
- Trenberth, K. E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. Nature Climate Change, 4(1), 17-22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of climate, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vivekanandan, N. (2024). Trend analysis of rainfall data using mann-kendall test and sen's slope estimator. i-Manager's Journal on Civil Engineering, 14(2), 18. <https://doi.org/10.26634/jce.14.2.21074>

پی‌نوشت‌ها

- 1- Run Theory
- 2- Drought Length
- 3- Drought Severity
- 4- Drought Magnitude
- 5- Drought Number
- 6- Markov Chain
- 7- Transition Matrix
- 8- Very Wet
- 9- Moderate Wet
- 10- Normal
- 11- Moderate Drought
- 12- Severe Drought
- 13- 1895-2022 AD

Document Type

Applied Article

پژوهش کاربردی

نوع مقاله

Enhancing Meteorological Drought Monitoring in Arid Regions: A Machine Learning-Based Fusion of Satellite Precipitation Data

M. Hajiani^{1*}, M. Mardani², M. Tosan^{3,4}

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

2- Ph.D. Candidate in Water Resources Engineering and Management, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

3- Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.

4- Center of Excellence in Hydroinformatics, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* Corresponding, Author Email: hajiani@birjand.ac.ir

Received ▶ 28-11-2025
Revised ▶ 28-12-2025
Accepted ▶ 28-01-2026
Available online ▶ 16-03-2026

Abstract

The accurate monitoring of drought and the management of water resources in arid and semi-arid regions consistently face the challenge of insufficient and unevenly distributed ground-based stations, the potential of gridded precipitation products (GPPs) to fill data gaps is significant. However, systematic errors and inherent uncertainties in estimating extreme values limit their efficacy in hydrological modeling. The present research aims to enhance the accuracy of meteorological drought monitoring in South Khorasan Province by developing an integrated model based on a machine learning algorithm. To this end, four widely used products, including TRMM, CHIRPS, GSMaP, and ERA5, along with spatio-temporal auxiliary variables, were considered as inputs for a Random Forest model. This model was trained and validated using daily precipitation data from synoptic stations over a 10-year period (2010-2019). The evaluation of the model's performance on a daily scale demonstrated that the merged product achieved a median correlation coefficient of 0.87, a root mean square error of 0.78 mm/day, and a critical success index of 0.545, exhibiting a statistically significant superiority over all raw products. In addition to improving quantitative accuracy, the hydrological evaluation based on the Standardized Precipitation Index indicated a high agreement between the corrected product and the ground reality at both short-term and long-term scales (with $R^2 > 0.81$ and $RMSE < 0.40$). The findings of this research prove that the intelligent fusion approach is capable of providing reliable climate data for the development of early warning systems for drought in data-scarce regions by effectively reducing the uncertainties of precipitation products.

Keywords: Random Forest, Standardized Precipitation Index, Bias Correction, Gridded Precipitation Products.

How to cite this article:

Hajiani, M., Mardani, M., & Tosan, M. (2026). Enhancing Meteorological Drought Monitoring in Arid Regions: A Machine Learning-Based Fusion of Satellite Precipitation Data. Journal of Water and Sustainable Development, 12(4), 190-203.
<https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i4.2511-1474>

ارتقاء پایش خشکسالی هواشناسی در مناطق خشک: ادغام داده‌های بارش ماهواره‌ای مبتنی بر یادگیری ماشین

محمود حاجیانی^{۱*}، مهسا مردانی^۲، معین توسان^{۳،۴}

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۲- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۳- گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۴- قطب هیدروانفورماتیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

* رایانامه نویسنده مسئول: hajiani@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت ▶ ۱۴۰۴/۰۹/۰۷
تاریخ بازنگری ▶ ۱۴۰۴/۱۰/۰۷
تاریخ پذیرش ▶ ۱۴۰۴/۱۱/۰۸
تاریخ انتشار ▶ ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

چکیده

پایش دقیق خشکسالی و مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، همواره با چالش کمبود و توزیع نامناسب ایستگاه‌های زمینی مواجه است. اگرچه محصولات بارش شبکه‌بندی شده پتانسیل بالایی برای پر کردن خلأهای داده‌ای دارند، اما وجود خطاهای سیستماتیک و عدم قطعیت‌های ذاتی در برآورد مقادیر حدی، کارایی آن‌ها را در مدل‌سازی هیدرولوژیکی محدود می‌سازد. پژوهش حاضر با هدف ارتقای دقت پایش خشکسالی هواشناسی در استان خراسان جنوبی، به توسعه یک مدل ادغام شده مبتنی بر الگوریتم یادگیری ماشین پرداخته است. به این منظور چهار محصول پرکاربرد شامل TRMM، CHIRPS، GSMaP و ERA5 به همراه متغیرهای کمکی مکانی-زمانی، به عنوان ورودی‌های مدل جنگل تصادفی در نظر گرفته شدند و با استفاده از داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک طی دوره ۱۰ ساله (۲۰۱۰-۲۰۱۹) آموزش و اعتبارسنجی شدند. ارزیابی عملکرد مدل در مقیاس روزانه نشان داد محصول ادغام شده با دستیابی به ضریب همبستگی میانه ۰/۸۷، ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۷۸ میلی‌متر در روز و شاخص موفقیت بحرانی ۰/۵۴۵، برتری آماری معناداری نسبت به تمامی محصولات خام دارد. علاوه بر بهبود دقت کمی، ارزیابی هیدرولوژیکی بر اساس شاخص استاندارد بارش بیانگر انطباق بالای محصول اصلاح شده با واقعیت زمینی در هر دو مقیاس کوتاه‌مدت و بلندمدت بود (با $R^2 > 0.81$ و $RMSE < 0.40$). یافته‌های این پژوهش اثبات می‌کند که رویکرد همجوشی هوشمند قادر است با کاهش مؤثر عدم قطعیت‌های محصولات بارشی، داده‌های اقلیمی قابل‌اتکایی را جهت توسعه سیستم‌های هشدار زودهنگام خشکسالی در مناطق فاقد داده فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی: جنگل تصادفی، شاخص استاندارد بارش، اصلاح خطا، محصولات بارش شبکه‌بندی شده.

دارند، خطاهای به ظاهر کوچک در تخمین شدت بارش یا تشخیص نادرست روزهای بارانی (اثر تورم صفر)، می تواند منجر به تغییرات فاحش در پارامترهای توزیع آماری و در نتیجه جابه جایی طبقات خشکسالی (مثلاً نمایش ترسالی کاذب در دوره خشک) شود (توسن و همکاران، ۲۰۲۴؛ Negri و همکاران، ۲۰۲۵). افزون بر این، هر یک از محصولات ماهواره ای و بازتحلیل، بسته به نوع حسگرهای فعال/غیرفعال و الگوریتم های پردازشی، نقاط قوت و ضعف منحصربه فردی دارند؛ به عنوان مثال، ممکن است یک محصول در تشخیص بارش های همرفتی تابستانه قوی تر باشد و دیگری در برآورد بارش های جبهه ای زمستانه عملکرد بهتری ارائه دهد (Batista و همکاران، ۲۰۲۵؛ Shiru و همکاران، ۲۰۲۵). بنابراین، تکیه بر یک محصول واحد یا استفاده از روش های اصلاح خطای خطی ساده، نمی تواند پیچیدگی های رفتار مکانی-زمانی بارش را در حوضه های ناهمگون پوشش دهد و رویکرد همجوشی چندمنبعی^۳ به عنوان راهکاری کارآمد برای بهره گیری هم زمان از نقاط قوت محصولات مختلف و کاهش عدم قطعیت ساختاری ضروری به نظر می رسد.

در سال های اخیر، استفاده از روش های یادگیری ماشین (ML)^۴ به عنوان جایگزینی توانمند برای روش های آماری سنتی در اصلاح خطای محصولات ماهواره ای مطرح شده است (Oyarzabal و همکاران، ۲۰۲۵). الگوریتم هایی مانند جنگل تصادفی (RF)^۵، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و روش های بوستینگ (XGBoost) به دلیل قابلیت بالا در مدل سازی روابط غیرخطی، قدرت تفکیک ویژگی ها و کاهش بیش برآزش، در بسیاری از مطالعات بارش سازی و همجوشی چندمنبعی عملکرد موفقی داشته اند (Kossieris و همکاران، ۲۰۲۴؛ Zhang و همکاران، ۲۰۲۴). این روش ها با استفاده هم زمان از چند محصول شبکه بندی شده و متغیرهای کمکی مکانی-زمانی، می توانند الگوهای خطای وابسته به توپوگرافی و فصلی را شناسایی کرده و محصول بارشی دقیق تر ارائه دهند. به عنوان نمونه نشان داده شده است که ترکیب داده های سنجش اذدور با ML موجب بهبود چشمگیر دقت پایش خشکسالی در مناطق نیمه خشک می شود (Zhang و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین بر اهمیت بهره گیری از الگوریتم های داده کاوی برای پایش مخاطرات اقلیمی در سرزمین های خشک ایران تأکید شده است (Hashemi و همکاران، ۲۰۲۴).

با وجود این پیشرفت ها، خلأ علمی ارزیابی جامع تأثیر مدل های همجوشی ML بر پایش مستقیم خشکسالی (به ویژه SPI) در مناطق فراخشک و کوهستانی همچنان باقی است. اغلب پژوهش های پیشین صرفاً به سنجش دقت کمی بارش پرداخته اند و میزان اثرگذاری اصلاحات انجام شده بر شاخص های خشکسالی را بررسی نکرده اند. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که حتی خطاهای کوچک در داده های روزانه بارش می تواند موجب خطای انباشته در زمان محاسبه

خشکسالی یکی از پیچیده ترین و مخرب ترین مخاطرات اقلیمی در جهان است که آثار عمیقی بر سامانه های هیدرولوژیکی، تولیدات کشاورزی، امنیت غذایی و پایداری اقتصادی-اجتماعی جوامع انسانی بر جای می گذارد (Panu و Sharma، ۲۰۲۴). اهمیت این پدیده در مناطق خشک و نیمه خشک چند برابر است؛ زیرا کوچک ترین تغییر در بارش می تواند پیامدهای قابل توجهی بر بیلان آب، تغذیه آب زیرزمینی و وابستگی شدید به منابع آب محدود ایجاد نماید (Lalmuanzuala و همکاران، ۲۰۲۵). مدیریت پایدار این مناطق نیازمند دسترسی به داده های بارش دقیق، پیوسته، درازمدت و با وضوح مکانی بالا است؛ اما در بسیاری از کشورهای درحال توسعه، شبکه های پایش زمینی هم از نظر تعداد ایستگاه و هم از نظر پراکنش مکانی، با کمبودهای جدی مواجه می باشند (Bhaga و همکاران، ۲۰۲۰). این مشکل در ایران و به ویژه در نواحی شرقی مانند استان خراسان جنوبی، به صورت بارزی مشاهده می شود، جایی که شرایط فراخشک، ارتفاعات ناهمگون و گستردگی جغرافیایی باعث شده داده های زمینی نتوانند نماینده واقعی تغییرات مکانی بارش باشند (Nikoo و همکاران، ۲۰۲۶).

در چنین شرایطی، محصولات بارش شبکه بندی شده (GPPs)^۶ حاصل از سنجش اذدور، مانند CHIRPS، TRMM، GSMaP و محصولات بازتحلیل جوی مانند ERA5، به عنوان منابع مکمل ارزشمند جهت پر کردن خلأ داده های مشاهداتی مطرح شده اند (Mahmud و Osawa، ۲۰۲۵). این داده ها با پوشش مکانی یکنواخت و دسترسی طولانی مدت، ابزار مهمی برای ارزیابی خشکسالی، مدل سازی هیدرولوژیکی و توسعه سامانه های هشدار زود هنگام به شمار می روند (Nourani و همکاران، ۲۰۲۵). با این حال، مطالعات متعدد نشان داده اند که این محصولات با وجود مزایای فراوان، دارای خطاهای سیستماتیک ناشی از محدودیت های سنجنده ها، الگوریتم های بازیابی بارش، تأثیر توپوگرافی پیچیده و شرایط اقلیمی خاص مناطق خشک می باشند (Michibata، ۲۰۲۴؛ Tong و همکاران، ۲۰۲۴). وجود روزهای بدون بارش، شدت پایین بارش ها، رخداد های حدی و اثر بادهای منطقه ای، باعث تشدید عدم قطعیت این داده ها در مناطق بیابانی می شود (Rahat و همکاران، ۲۰۲۴). این ضعف ها به طور مستقیم بر دقت شاخص های خشکسالی مانند SPI^۲ تأثیر می گذارند و لزوم انجام فرایندهای اصلاح خطا و ادغام داده ها را آشکار می سازند (Tosan و همکاران، ۲۰۲۶).

از سوی دیگر، محاسبه نمایه های خشکسالی استاندارد شده مانند SPI که مبتنی بر برآزش تابع توزیع احتمالاتی بر سری های زمانی بارش هستند، حساسیت بسیار بالایی به کیفیت داده های ورودی دارد (Mwinjuma و همکاران، ۲۰۲۶). در مناطق فراخشک که بارش ها ماهیت رگباری و نامنظم

اقلیمی قابل اعتماد برای سیستم‌های پایش و هشدار خشکسالی فراهم کنند؛ موضوعی که برای مدیریت منابع آب در شرق ایران اهمیت حیاتی دارد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان خراسان جنوبی با مساحتی بالغ بر ۱۵۱,۰۰۰ کیلومتر مربع با مختصات جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۳ دقیقه شمالی و ۵۷ درجه و ۳ دقیقه تا ۶۱ درجه شرقی در شرق فلات ایران واقع شده است (شکل ۱). این منطقه دارای توپوگرافی پیچیده‌ای شامل رشته‌کوه‌های شمالی-جنوبی (با حداکثر ارتفاع ۳۶۱۵ متر) و دشت‌های پست نظیر دشت لوت (با حداقل ارتفاع ۶۵۰ متر) است که منجر به تغییرات مکانی شدید در رژیم بارش می‌شود (رضوانی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵). اقلیم منطقه عمدتاً از نوع خشک و بیابانی بوده و متأثر از بادهای ۱۲۰ روزه سیستان می‌باشد. کمبود و توزیع نامناسب ایستگاه‌های باران‌سنجی در این پهنه وسیع، پایش دقیق هیدرولوژیکی را با چالش مواجه ساخته است (Feizi و Tosan, ۲۰۱۷).

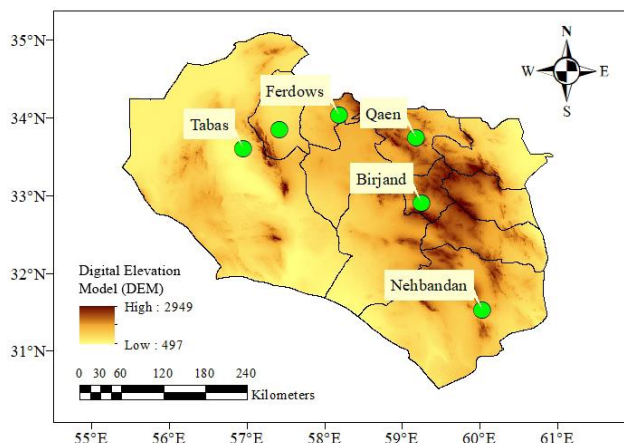
SPI شود و تصمیم‌گیری مدیران منابع آب را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد. استان خراسان جنوبی، با اقلیم بیابانی، تنوع ارتفاعی و فقر ایستگاه‌های زمینی، نمونه‌ای شاخص از مناطقی است که بررسی این خلأ در آن ضرورت ویژه دارد. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف علمی، یک چارچوب همجوشی مبتنی بر یادگیری ماشین را برای تولید یک محصول بارش اصلاح‌شده با قابلیت اعتماد بالا توسعه می‌دهد. اهداف اصلی این مطالعه عبارت‌اند از:

۱. توسعه مدل جنگل تصادفی برای ادغام چهار محصول کمکی مکانی-زمانی، جهت تولید سری زمانی بارش روزانه دقیق‌تر.

۲. ارزیابی جامع محصول ادغام شده با بهره‌گیری از شاخص‌های آماری پیوسته و طبقه‌بندی شده و مقایسه آن با محصولات خام.

۳. سنجش کارایی محصول اصلاح شده در پایش خشکسالی هواشناسی از طریق محاسبه شاخص SPI در مقیاس‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت و مقایسه آن با مقادیر زمینی.

این پژوهش علاوه بر ارائه یک چارچوب کاربردی برای مناطق کم‌داده، نشان می‌دهد که رویکردهای ML-Fusion قادرند با کاهش عدم قطعیت محصولات شبکه‌بندی شده، داده‌های



شکل ۱- نقشه منطقه مورد مطالعه (استان خراسان جنوبی) و موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک زمینی

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده در پژوهش

شناسه ایستگاه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی (°E)	عرض جغرافیایی (°N)	ارتفاع (متر)	میانگین بارش سالانه (mm/year)
۴۰۸۰۹	بیرجند	۵۹/۲۵	۳۲/۹	۱۴۹۱	۱۲
۹۹۴۰۷	بشروییه	۵۷/۴۲	۳۳/۸۵	۸۷۹	۷۳
۴۰۷۹۲	فردوس	۵۸/۱۸	۳۴/۰۳	۱۲۹۳	۱۱۸
۴۰۸۲۷	نهبندان	۶۰/۰۳	۳۱/۵۳	۱۱۸۸	۸۹
۴۰۷۹۳	قائن	۵۹/۱۸	۳۳/۷۴	۱۴۳۲	۱۵۰
۴۰۷۹۱	طبس	۵۹/۹۵	۳۳/۶	۷۱۱	۶۶

مجموعه داده‌ها

داده‌های بارش روزانه ۶ ایستگاه سینوپتیک (جدول ۱) طی بازه زمانی ۱۰ ساله (۲۰۱۹-۲۰۱۰) از سازمان هواشناسی کشور دریافت و پس از اعمال کنترل کیفی، به‌عنوان متغیر هدف جهت آموزش و اعتبارسنجی مدل استفاده شد. به‌منظور فراهم‌سازی داده‌های بارش قابل اعتماد برای تحلیل هیدرولوژیک، چهار مجموعه داده گسترده‌کاربرد شامل TRMM 3B42 نسخه ۷، CHIRPS نسخه ۲، GSMaP نسخه ۸ و ERA5 به‌عنوان ورودی مدل استفاده شدند. این محصولات نماینده طیفی از رویکردهای ماهواره‌ای و بازتحلیل بوده و از نظر سازوکار برآورد بارش، پوشش مکانی، وضوح زمانی و بازه زمانی موجود تفاوت‌های قابل توجهی دارند. مشخصات کلیدی هر محصول در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات فنی و آماری محصولات بارش شبکه‌بندی شده و متغیرهای ورودی مورد استفاده در پژوهش

محصول	نسخه	نوع داده	وضوح زمانی	وضوح مکانی	دوره آماری مورد استفاده	منبع / سنجنده‌ها	منبع
TRMM 3B42	نسخه ۷ (نهایی)	ماهواره‌ای (Merged Microwave-IR)	روزانه	۰/۲۵°	۲۰۱۹-۲۰۱۰	ماهواره + TRMM سنجنده‌های مایکروویو چندمنبعه	(Maggion و همکاران، ۲۰۱۶)
CHIRPS	نسخه ۲	شبه‌ماهواره‌ای (Satellite + Gauge Blended)	روزانه	۰/۰۵°	۲۰۱۹-۲۰۱۰	داده‌های ماهواره‌ای IR به‌همراه باران‌سنج‌ها	(Bouaziz و همکاران، ۲۰۲۱)
GSMaP	نسخه ۸	ماهواره‌ای مایکروویو با اصلاح باران‌سنج	روزانه	۰/۱°	۲۰۱۹-۲۰۱۰	چندین سنجنده مایکروویو + کالیبراسیون محلی	(Bui و همکاران، ۲۰۱۹)
ERA5	آخرین نسخه عملیاتی	بازتحلیل	روزانه	۰/۲۵°	۲۰۱۹-۲۰۱۰	مدل اقلیمی ECMWF (IFS) با ادغام مشاهدات زمین، ماهواره و جو	(Hersbach و همکاران، ۲۰۲۰)

روش‌شناسی

جهت همگام‌سازی مکانی-زمانی، استخراج داده‌های پیکسل-به-نقطه برای موقعیت ایستگاه‌ها انجام شد. داده‌های کمتر از روزانه به مقیاس روزانه گردآوری شدند. همچنین، به‌منظور حذف اثر نویزهای پس‌زمینه و تمرکز بر رخداد‌های بارش مؤثر، آستانه بارش ۱ میلی‌متر در روز اعمال گردید.

جنگل تصادفی یک الگوریتم یادگیری گروهی قدرتمند است که بر پایه گردآوری نتایج تعداد زیادی درخت تصمیم^۶ عمل می‌کند. در این پژوهش، از تکنیک بگینگ^۷ استفاده شد؛ به‌این‌صورت که هر درخت با استفاده از یک زیرمجموعه تصادفی از داده‌های آموزشی و زیرمجموعه‌ای تصادفی از ویژگی‌ها (GPPs و متغیرهای مکانی-زمانی) آموزش می‌بیند. این فرآیند باعث کاهش واریانس مدل و جلوگیری از بیش‌برازش می‌شود، مشکلی که اغلب در مدل‌های شبکه‌عصبی منفرد دیده می‌شود (Tosan و همکاران، ۲۰۲۶). در نهایت خروجی مدل از طریق میانگین‌گیری خروجی تمام

لازم به ذکر است اگرچه مأموریت ماهواره TRMM در سال ۲۰۱۵ پایان یافته است، اما محصول استاندارد پژوهشی آن (TMPA 3B42 V7) تا اواخر سال ۲۰۱۹ کالیبره و منتشر شده است. در این پژوهش، از داده‌های TRMM به‌عنوان یک مرجع تاریخی و بنچ‌مارک برای توسعه متدولوژی در دوره پایه (۲۰۱۹-۲۰۱۰) استفاده شده است. ساختار مدل پیشنهادی کاملاً آنعطاف‌پذیر بوده و برای دوره‌های پس از ۲۰۱۹، محصول GPM IMERG می‌تواند بدون تغییر در ساختار مدل، جایگزین TRMM شود. همچنین به‌منظور بهبود عملکرد مدل در شرایط توپوگرافی پیچیده و در نظر گرفتن تغییرات فصلی، چهار متغیر کمکی شامل مؤلفه‌های مکانی (طول و عرض جغرافیایی) و زمانی (ماه و روز سال) به‌عنوان ورودی‌های تکمیلی به مدل معرفی شدند.

درخت‌ها به‌دست می‌آید. تقسیم داده‌ها به صورت تصادفی با نسبت ۷۰ درصد برای آموزش جهت یادگیری الگوهای خطا و ۳۰ درصد برای آزمون جهت ارزیابی تعمیم‌پذیری مدل بر روی داده‌های دیده نشده انجام پذیرفت. مدل RF با هدف یادگیری تابع f_{RF} جهت برآورد بارش مشاهداتی (R_{obs}) بر اساس بردار ویژگی‌های ورودی (X) توسعه یافت (رابطه ۱):

$$R_{pred} = f_{RF}(TRMM, CHIRPS, GSMaP, ERA5, Lat, Lon, Time) \quad (1)$$

که در آن؛ R_{pred} ، مقدار بارش برآورد شده توسط مدل، f_{RF} تابع برازش‌یافته توسط الگوریتم جنگل تصادفی، ERA5، GSMaP، CHIRPS، TRMM، محصولات بارش شبکه‌ای ماهواره‌ای و بازتحلیل (به‌عنوان ویژگی‌های ورودی)، Lat و Lon موقعیت مکانی (به‌ترتیب عرض و طول جغرافیایی) و Time متغیر زمان است.

برای ارزیابی کارایی محصول تولیدی در پایش خشکسالی، شاخص SPI در مقیاس‌های ۳ و ۱۲ ماهه محاسبه شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2} \quad (7)$$

میانگین خطای مطلق (MAE^{۱۲}): متوسط قدرمطلق خطاها را نمایش می‌دهد (رابطه ۸).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - O_i| \quad (8)$$

جهت ارزیابی توانایی مدل در تشخیص رخدادهای بارانی (با آستانه $T=1.0$ میلی‌متر)، جدول توافقی تشکیل شد که در آن H تعداد رخدادهای صحیح، M بارش‌های از دست رفته و F هشدارهای کاذب می‌باشند. بر این اساس شاخص‌های احتمال تشخیص (POD^{۱۳})، نسبت هشدار کاذب (FAR^{۱۴}) و شاخص موفقیت بحرانی (CSI^{۱۵}) محاسبه شد (روابط ۹ تا ۱۱):

$$POD = \frac{H}{H + F} \quad (9)$$

$$FAR = \frac{F}{H + F} \quad (10)$$

$$CSI = \frac{H}{H + M + F} \quad (11)$$

که در این روابط، H، تعداد رخدادهای بارانی که به‌درستی توسط مدل تشخیص داده شده‌اند، M، تعداد بارش‌های مشاهده‌ای که مدل در تشخیص آن‌ها ناکام بوده است (خطای از دست‌رفته)، F، تعداد هشدارهای کاذب (مدل بارش پیش‌بینی کرده اما در واقعیت بارشی رخ نداده است).

دقت شاخص SPI حاصل از مدل (SPI_{est}) در مقایسه با مقدار مشاهده‌ای (SPI_{obs}) با استفاده از ضریب تعیین (R^2) و خطای RMSE ویژه SPI سنجیده شد (روابط ۱۲ و ۱۳):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (SPI_{est} - SPI_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (SPI_{obs} - \overline{SPI_{obs}})^2} \quad (12)$$

$$RMSE_{SPI} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SPI_{est} - SPI_{obs})^2} \quad (13)$$

که در آن:

SPI_{est}: مقدار شاخص خشکسالی برآورد شده توسط مدل.
SPI_{obs}: مقدار شاخص خشکسالی محاسبه‌شده از داده‌های مشاهده‌ای (ایستگاه).

SPI_{obs}: میانگین مقادیر شاخص خشکسالی مشاهده‌ای.

نتایج و بحث

تحلیل ویژگی‌های آماری و ساختار داده‌های ورودی

پیش از ارزیابی عملکرد مدل همجوشی، شناخت ماهیت آماری داده‌های ورودی برای درک چالش‌های مدل‌سازی در مناطق خشک ضروری است. جدول (۳) آماره‌های توصیفی داده‌های بارش مشاهده‌ای (ایستگاهی) و محصولات شبکه‌بندی شده را در طول دوره مطالعه نشان می‌دهد.

بررسی داده‌های زمینی نشان‌دهنده میانگین بارش روزانه بسیار پایین (۰/۲۸ میلی‌متر) و انحراف معیار بالا (۱/۶۹ میلی‌متر) است که بیانگر ناهمگنی شدید زمانی و مکانی بارش در منطقه خراسان جنوبی می‌باشد. نکته حائز اهمیت،

باتوجه به اقلیم فراخشک منطقه و کثرت روزهای بدون بارش، برازش توزیع گاما با خطا مواجه می‌شود (Wu و همکاران، ۲۰۲۵). ازاین‌رو، در این پژوهش از روش ناپارامتری مبتنی بر احتمال تجربی استفاده شد. در این روش، ابتدا احتمال رخداد بارش صفر (P_0) با استفاده از موقعیت ترسیمی گرینگورت^{۱۸} (Raziei و Pereira، ۲۰۲۴) محاسبه می‌شود (رابطه ۲):

$$P_0 = \frac{m_{zero} - 0.44}{n + 0.12} \quad (2)$$

که در آن n تعداد کل مشاهدات، mzero تعداد مشاهدات با بارش صفر و P_0 احتمال رخداد بارش صفر است. سپس برای مقادیر بارش غیرصفر، رتبه‌بندی انجام شده و احتمال تجمعی آن‌ها F_{pos} با استفاده از موقعیت ترسیمی کینین^۹ محاسبه می‌شود (رابطه ۳):

$$F_{pos} = \frac{R_i - 0.4}{n_{pos} + 0.2} \quad (3)$$

که در آن، F_{pos} ، احتمال تجمعی برای مقادیر بارش غیرصفر، R_i رتبه مقدار بارش در بین داده‌های غیر صفر (به‌ترتیب صعودی) و n_{pos} تعداد مشاهدات با بارش غیرصفر است. درنهایت، تابع توزیع تجمعی نهایی ($F(x)$) از رابطه (۴) به دست آمده و درنهایت مقادیر نهایی SPI از طریق تبدیل معکوس توزیع نرمال استاندارد ϕ^{-1} استخراج می‌شود (رابطه ۵):

$$F(x) = P_0 + (1 - P_0) \times F_{pos} \quad (4)$$

$$SPI = \phi^{-1}(F(x)) = Z \quad (5)$$

که در آن: $F(x)$ ، تابع توزیع تجمعی بارش، x، مقدار بارش SPI مقدار شاخص استاندارد بارش (نرمال‌شده) و ϕ^{-1} تابع وارون توزیع نرمال استاندارد می‌باشند.

۲-۴- معیارهای ارزیابی

عملکرد مدل در دو سطح برآورد کمی بارش و تشخیص رخداد، با استفاده از معیارهای آماری ارزیابی شد. پارامترهای مشترک در ارزیابی‌های کمی (روابط ۶ تا ۸) عبارتند از:

n: تعداد کل داده‌های مورد ارزیابی.

O_i: مقدار بارش مشاهده‌ای در گام i.

E_i: مقدار بارش برآوردی (مدل) در گام i.

$\bar{O}$: میانگین مقادیر بارش مشاهده‌ای.

$\bar{E}$: میانگین مقادیر بارش برآوردی.

معیارهای پیوسته دقت کمی مقادیر بارش برآوردی (E_i) را نسبت به مقادیر مشاهده‌ای O_i می‌سنجند:

ضریب همبستگی پیرسون ($CC^{۱۰}$): بیانگر میزان همبستگی خطی است (رابطه ۶).

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}} \quad (6)$$

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE^{۱۱}): حساسیت مدل به خطاهای بزرگ را نشان می‌دهد (رابطه ۷).

پدیده تورم صفر در داده‌ها است؛ به‌طوری‌که مقادیر میانه و صدک هفتاد و پنجم برابر با صفر می‌باشد. این ساختار نامتوازن داده‌ای که ویژگی ذاتی مناطق فراخشک است، چالش اصلی الگوریتم‌های رگرسیونی محسوب می‌شود، زیرا مدل‌ها تمایل دارند به سمت کلاس اکثریت (روزهای خشک) بایاس پیدا کنند (Li و همکاران، ۲۰۲۳). مقایسه آماره‌های محصولات ماهواره‌ای با داده‌های مشاهداتی، وجود خطای سیستماتیک در تمام GPP ها را آشکار می‌سازد. محصولات TRMM و ERA5 با میانگین بارش روزانه به ترتیب ۰/۳۵ و

۰/۳۳ میلی‌متر، تمایل آشکاری به بیش‌برآورد بارش دارند. در مقابل، عدم تطابق مقادیر حداکثر بارش ثبت‌شده (به‌عنوان مثال ۶۵/۳ میلی‌متر در TRMM در برابر ۴۲/۶ میلی‌متر مشاهداتی) حاکی از عدم قطعیت بالای این محصولات در برآورد رخدادهای حدی^{۱۶} است. این یافته‌ها با نتایج سایر پژوهشگران که بر لزوم اصلاح خطای محصولات ماهواره‌ای پیش از استفاده در مطالعات هیدرولوژیکی تأکید داشتند، همخوانی دارد (Iqbal و همکاران، ۲۰۲۲).

جدول ۳- آماره‌های توصیفی متغیرهای ورودی (GPPs، مکانی و زمانی) و متغیر هدف (بارش مشاهداتی) مورد استفاده در مدل

متغیر	میانگین	انحراف معیار	حداکثر	صدک ۷۵	صدک ۵۰ (میانه)	صدک ۲۵	حداقل
	Mm	Mm	Mm	Mm	Mm	mm	mm
بارش مشاهداتی	۰/۲۸	۱/۶۹	۴۲/۶	۰	۰	۰	۰
TRMM	۰/۳۵	۲/۲۳	۶۵/۳	۰	۰	۰	۰
CHIRPS	۰/۳۲	۱/۴۳	۳۰	۰	۰	۰	۰
GSMaP	۰/۲۵	۱/۳۳	۳۵	۰	۰	۰	۰
ERA	۰/۳۳	۱/۶۲	۳۴/۳	۰	۰	۰	۰
Latitude	۳۳/۲۸	۰/۸۶	۳۴	۳۳/۹	۳۳/۶	۳۲/۹	۳۱/۵
Longitude	۵۸/۵	۱/۰۸	۶۰	۵۹/۳	۵۹/۲	۵۷/۵	۵۷
Month	۶/۵۲	۳/۴۵	۱۲	۱۰	۷	۴	۱
روز از سال	۱/۱۸۳	۱۰۵/۴۳	۳۶۶	۲۷۴	۱۸۳	۹۲	۱

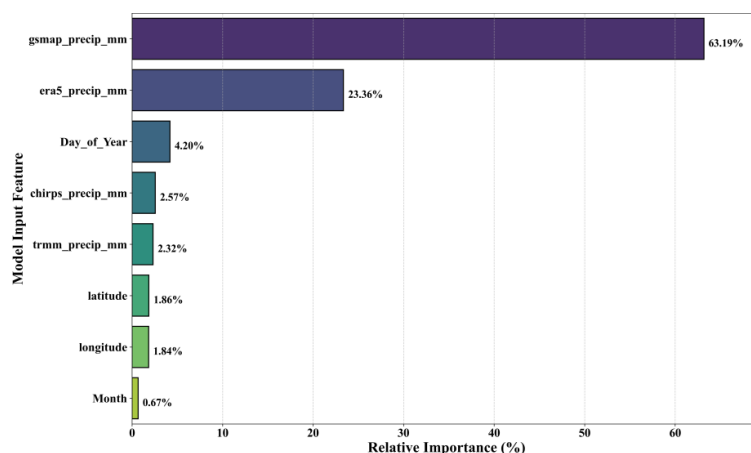
ارزیابی عملکرد مدل و واکاوی اهمیت ویژگی‌ها

عملکرد مدل RF بر روی مجموعه داده آزمون (۳۰٪ داده‌های دیده نشده)، توانایی این الگوریتم را در استخراج الگوهای غیرخطی بارش تأیید می‌کند. جدول (۴) معیارهای ارزیابی مدل را ارائه می‌دهد.

جدول ۴- معیارهای ارزیابی عملکرد مدل بر روی مجموعه داده آزمون (۳۰ درصد)

معیار	مقدار	واحد
R ²	۰/۵۱	-
RMSE	۱/۱۹۴	میلیمتر در روز
MAE	۰/۲۶۳	میلیمتر در روز

مدل پیشنهادی با ضریب تبیین R² برابر با ۰/۵۱ و خطای میانگین مطلق (MAE) پایین (۰/۲۶۳ میلی‌متر)، عملکرد قابل‌قبولی در برآورد بارش روزانه داشته است. اگرچه مقدار RMSE (۱/۱۹۴ میلی‌متر) به دلیل حساسیت به خطاهای بزرگ در مقادیر حدی، بالاتر به نظر می‌رسد، اما اختلاف قابل‌توجه آن با MAE نشان‌دهنده دقت بالای مدل در برآورد رخدادهای نرمال و روزهای بدون بارش است. این رفتار مدل RF که ناشی از میانگین‌گیری روی درخت‌های تصمیم است، منجر به کاهش واریانس خطا می‌شود (Feng و همکاران، ۲۰۱۹). یکی از مزایای الگوریتم RF، قابلیت تعیین اهمیت نسبی ویژگی‌ها^{۱۷} است که در شکل (۲) نمایش داده شده است.

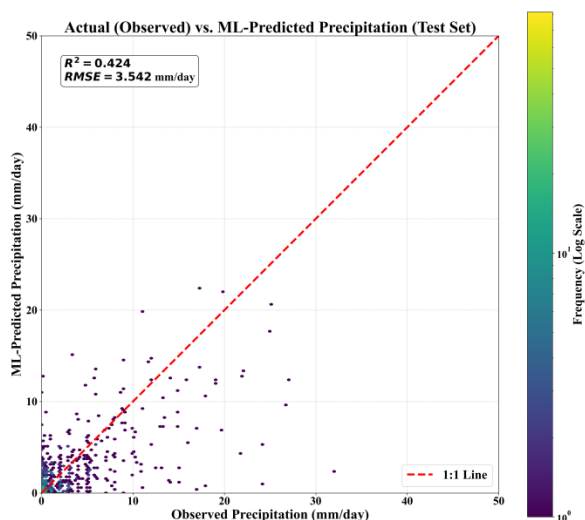


شکل ۲- نمودار اهمیت نسبی ویژگی‌های ورودی در مدل جنگل تصادفی.

۳-۳- تحلیل پراکندگی و رفتار مدل در رژیم‌های مختلف بارش

برای بررسی دقیق‌تر عملکرد مدل در بازه‌های مختلف بارش، نمودار پراکندگی چگال^{۱۸} در شکل (۳) نشان داده شده است. تراکم بالای داده‌ها در نزدیکی مبدأ مختصات (لکه زرد رنگ) نشان‌دهنده توانایی مدل در بازتولید صحیح فراوانی بالای روزهای خشک است که برای پایش دقیق خشکسالی در مناطق خشک بسیار حیاتی است. توزیع داده‌ها حول خط ۱:۱ بیانگر همبستگی مناسب مدل است؛ با این حال، با افزایش شدت بارش، پراکندگی نقاط افزایش می‌یابد. تمایل نقاط به قرارگیری در زیر خط برازش در بارش‌های سنگین (کم‌برآورد) و بالای خط در بارش‌های خفیف (بیش‌برآورد)، یک رفتار رایج در مدل‌های رگرسیونی یادگیری ماشین است که ناشی از ماهیت میانگین‌گیر توابع هدف (مانند MSE) می‌باشد (Chen و همکاران، ۲۰۲۵). با وجود این محدودیت ذاتی، مدل توانسته است تعادل مناسبی میان تشخیص رخداد و برآورد مقدار برقرار نماید که برای مطالعات بیلان آب بلندمدت کافی به نظر می‌رسد.

شکل (۲) نشان می‌دهد که محصول GSMap با سهم ۶۳/۱۹٪، مؤثرترین متغیر ورودی در مدل بوده است. این یافته با نتایج سایر محققان که عملکرد بهتر محصولات مایکروویو غیرفعال (مانند GSMap) را در مناطق خشک گزارش کرده‌اند، مطابقت دارد (Zhang و همکاران، ۲۰۲۱). پس از آن، محصول بازتحلیل ERA5 با سهم ۲۳/۳۶٪ در رتبه دوم قرار دارد. نکته کلیدی و متمایز این پژوهش، نقش متغیرهای کمکی مکانی و زمانی (طول و عرض جغرافیایی، روز سال و ماه) با مجموع سهم حدود ۸ درصد است. اگرچه این سهم در ظاهر اندک به نظر می‌رسد، اما نقش حیاتی در تصحیح خطاهای محلی ناشی از توپوگرافی پیچیده منطقه و خطاهای فصلی ایفا می‌کند. این نتیجه مؤید یافته‌های موجود است که نشان دادند ادغام متغیرهای محیطی نظیر مختصات جغرافیایی در مدل‌های یادگیری ماشین، دقت ریزمقیاس‌نمایی بارش را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد (Zhu و همکاران، ۲۰۲۳).

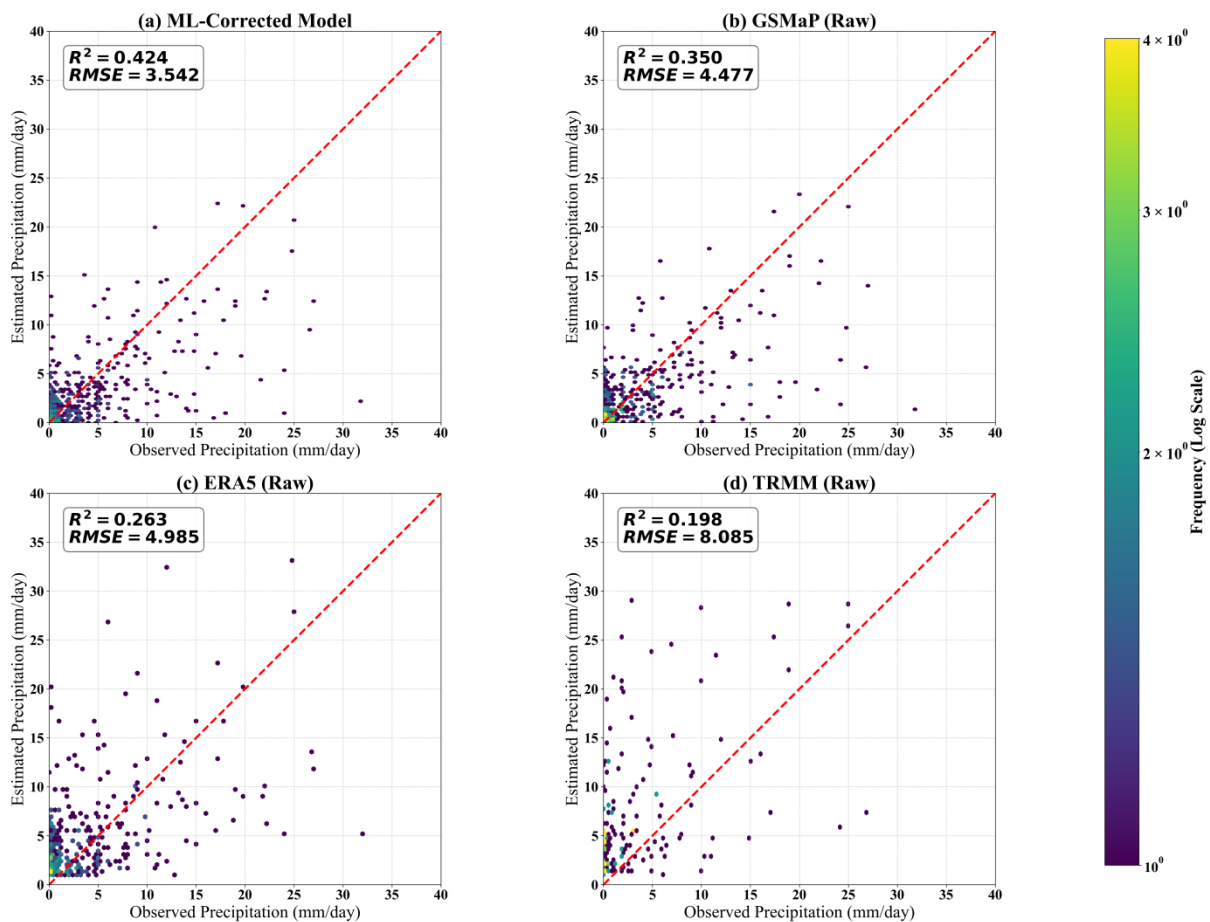


شکل ۳- نمودار پراکندگی چگال مقایسه بارش مشاهداتی (محور افقی) و بارش پیش‌بینی شده توسط مدل

تحلیل تطبیقی: اثربخشی مدل ادغام‌شده در برابر محصولات خام

برای درک بهتر ارزش افزوده مدل پیشنهادی و اثبات فرضیه اصلی پژوهش مبنی بر برتری روش‌های همجوشی، عملکرد مدل در مقایسه با محصولات ورودی خام در شکل (۴) ارائه شده است. شکل (۴) نشان‌دهنده بهبود چشمگیر دقت برآورد بارش در محصول ML-Corrected (پانل a) نسبت به تمامی محصولات خام است. مدل پیشنهادی با $R^2=0.63$ و $RMSE=1/34$ میلی‌متر، عملکرد بهتری نسبت به بهترین محصول خام (GSMaP با $R^2=0.51$) و ضعیف‌ترین محصول (TRMM با $R^2=0.28$) ارائه داده است. کاهش پراکندگی نقاط

حول خط ۱:۱ در محصول اصلاح شده نشان می‌دهد که مدل همجوشی صرفاً یک میانگین‌گیری وزنی نیست، بلکه با شناسایی و یادگیری الگوهای خطای غیرخطی محصولات مختلف، ترکیبی بهینه با کمترین واریانس خطا تولید کرده است. این نتیجه همسو با یافته‌های سایر پژوهشگران است که نشان دادند الگوریتم‌های یادگیری ماشین در تلفیق داده‌های چندمنبعی بارش، برتری آماری معناداری نسبت به تک‌محصول‌ها دارند و قادر به کاهش عدم قطعیت‌های ذاتی محصولات ماهواره‌ای می‌باشند (Ghosh و همکاران ۲۰۲۴؛ Das و همکاران، ۲۰۲۴).



شکل ۴- مقایسه نمودارهای پراکندگی چگال بارش مشاهداتی در برابر (a) محصول ML-Corrected، (b) محصول خام GSmAP، (c) محصول خام ERA5، و (d) محصول خام TRMM

مدل RF به‌صورت دینامیک و بر اساس شرایط مکانی، وزن بیشتری به محصولات دقیق‌تر (GSMaP) اختصاص داده و نویز محصولات ضعیف‌تر را فیلتر کرده است.

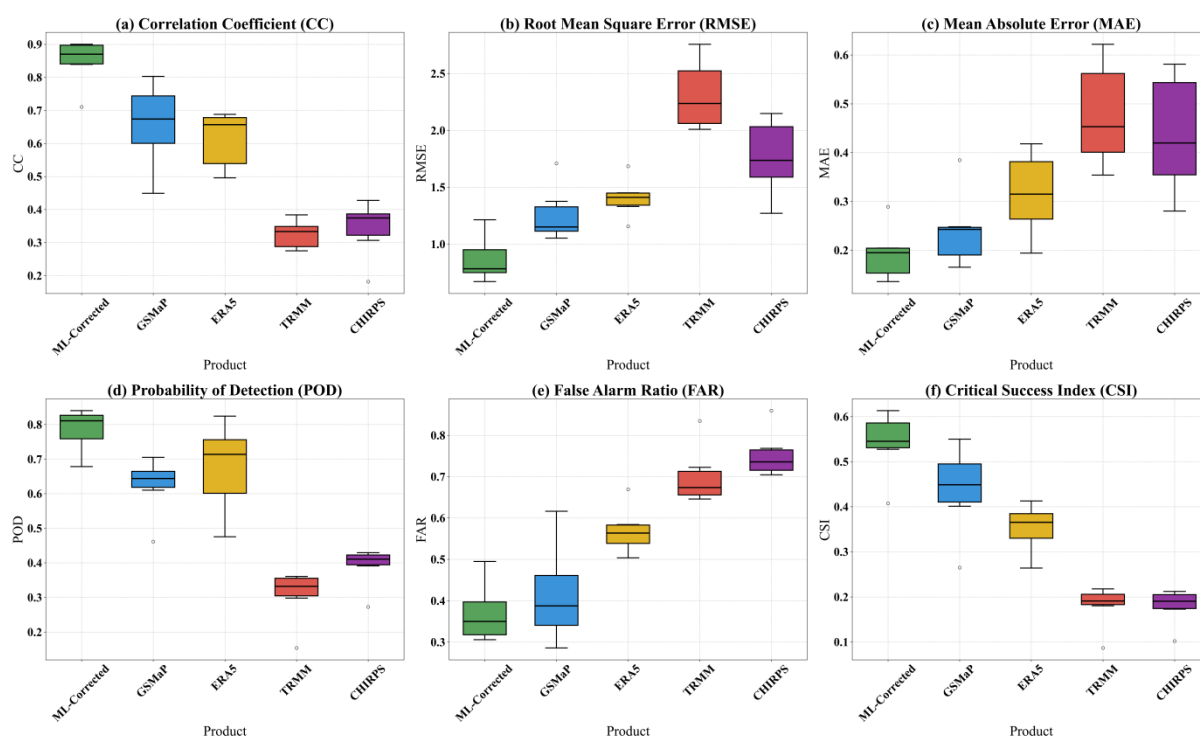
ارزیابی جامع آماری و قابلیت اعتماد مکانی

به‌منظور بررسی پایداری^{۱۹} عملکرد مدل در شرایط مختلف جغرافیایی و اطمینان از اینکه بهبود عملکرد محدود به نقاط خاصی نیست، توزیع شاخص‌های آماری در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل (۵) و جدول (۵) خلاصه شده است.

تحلیل کمی نتایج نشان‌دهنده نرخ بهبود قابل‌توجهی در مدل ادغام شده است. مدل پیشنهادی توانسته است خطای $RMSE$ را نسبت به دقیق‌ترین محصول خام (GSMaP) حدود ۳۲ درصد و نسبت به ضعیف‌ترین محصول (TRMM) بیش از ۶۰ درصد کاهش دهد. دلیل اصلی این اختلاف عملکرد و برتری مدل همجوشی، توانایی یادگیری ماشین در شناسایی روابط غیرخطی بین متغیرهای کمکی (مانند ارتفاع و فصل) و خطای محصولات است. درحالی‌که روش‌های سنتی (مانند میانگین‌گیری ساده) وزن یکسانی به محصولات می‌دهند،

یافته است. پژوهشگران در مطالعه‌ای بر اهمیت کاهش هشدارهای کاذب در کاربردهای هواشناسی تأکید کرده‌اند (Liu و همکاران، ۲۰۱۹). این بهبود همزمان در معیارهای تشخیص^{۲۰} و تخمین مقدار بارش، نشان‌دهنده کارایی بالای مدل در تفکیک روزهای تر و خشک و حذف نویزهای ناشی از خطاهای حسگرهای ماهواره‌ای است. این ویژگی برای پایش خشکسالی در مناطق خشک که وقوع بارش‌های کاذب می‌تواند منجر به خطای فاحش در محاسبه شاخص‌های تجمعی نظیر SPI شود، بسیار حائز اهمیت است.

تحلیل نمودارهای جعبه‌ای نشان می‌دهد که محصول ML-Corrected در تمامی معیارهای پیوسته (CC, RMSE, MAE) بهبود قابل توجهی داشته و توزیع خطای فشرده‌تری را نسبت به محصولات خام نشان می‌دهد (میان‌ه همبستگی ۰/۸۷). علاوه بر دقت کمی، یکی از دستاوردهای مهم این پژوهش، بهبود توانایی تشخیص رخداد بارش است. شاخص CSI برای محصول اصلاح‌شده به ۰/۵۴۵ افزایش یافته است که نسبت به GSMaP (۰/۴۴۹) و ERA5 (۰/۳۶۶) برتری مطلق دارد. همچنین، نرخ هشدار کاذب (FAR) به ۰/۳۵ کاهش



شکل ۵- مقایسه آماری توزیع خطا محصول ML-Corrected در برابر GPP‌های خام در تمام ایستگاه‌ها برای (a) CC، (b) RMSE، (c) MAE، (d) POD، (e) FAR و (f) CSI

جدول ۵- خلاصه میانه معیارهای آماری ارزیابی بارش روزانه در تمام ایستگاه‌ها

محصول	CC	RMSE (mm/day)	MAE (mm/day)	CSI	FAR	POD
ML-Corrected	۰/۸۷	۰/۷۸	۰/۱۹	۰/۵۴	۰/۳۵	۰/۸۱
GSMaP	۰/۶۷	۱/۱۵	۰/۲۴	۰/۴۵	۰/۳۹	۰/۶۴
ERA5	۰/۶۵	۱/۴۱	۰/۳۱	۰/۳۷	۰/۵۶	۰/۷۱
TRMM	۰/۳۳	۲/۲۳	۰/۴۵	۰/۱۹	۰/۶۷	۰/۳۳
CHIRPS	۰/۳۷	۱/۷۳	۰/۴۲	۰/۱۹	۰/۷۴	۰/۴۱

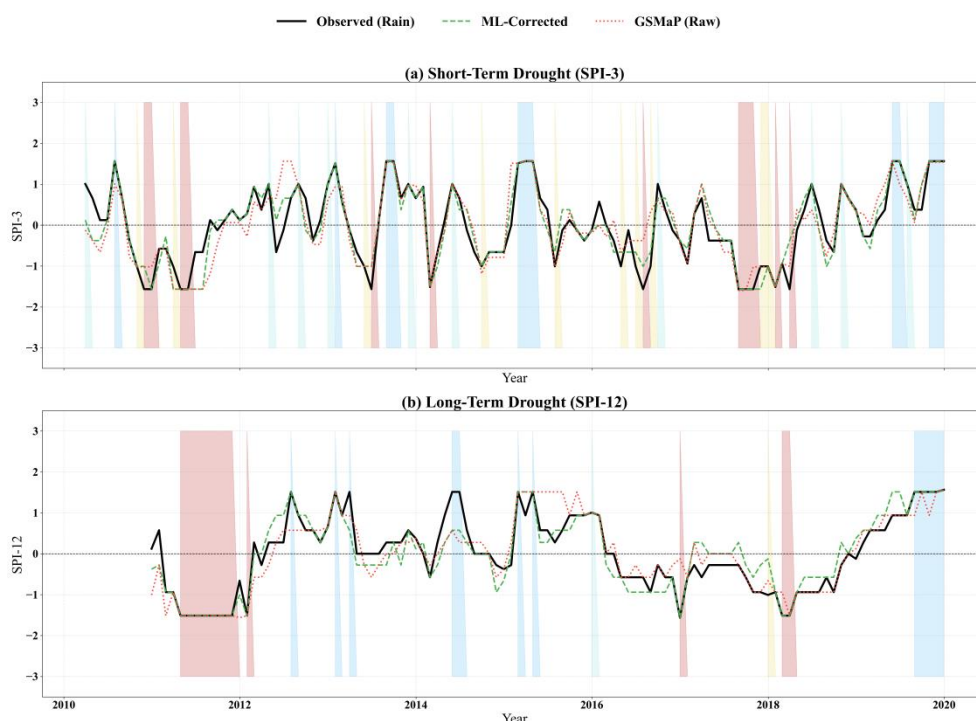
Corrected انطباق بسیار بالایی با مقادیر مشاهداتی دارد. مدل پیشنهادی توانسته است نوسانات زمانی، شدت و مدت زمان رخداد‌های خشکسالی و ترسالی را با دقت بالا بازتولید کند. به‌عنوان مثال در دوره خشکسالی شدید سال ۲۰۱۱، محصول اصلاح شده دقیقاً هم‌فاز با داده‌های زمینی عمل کرده است، درحالی‌که محصول خام GSMaP دچار تأخیر زمانی و بیش‌برآورد شدت خشکسالی بوده است. این

ارزیابی هیدرولوژیکی: پایش خشکسالی (SPI)

هدف نهایی این پژوهش، ارزیابی قابلیت محصول اصلاح شده در کاربردهای واقعی هیدرولوژیکی، به‌ویژه پایش خشکسالی است. شکل (۶) سری زمانی شاخص SPI را برای یک ایستگاه نمونه در دو مقیاس زمانی کوتاه‌مدت (SPI-3) و بلندمدت (SPI-12) نمایش می‌دهد. تحلیل بصری شکل (۶) نشان می‌دهد که سری زمانی SPI حاصل از محصول ML-

همجوشی پیشنهادی موفق به رفع آن شده است. ارزیابی آماری شاخص SPI در تمام ایستگاه‌ها در شکل (۷) و جدول (۶) ارائه شده است.

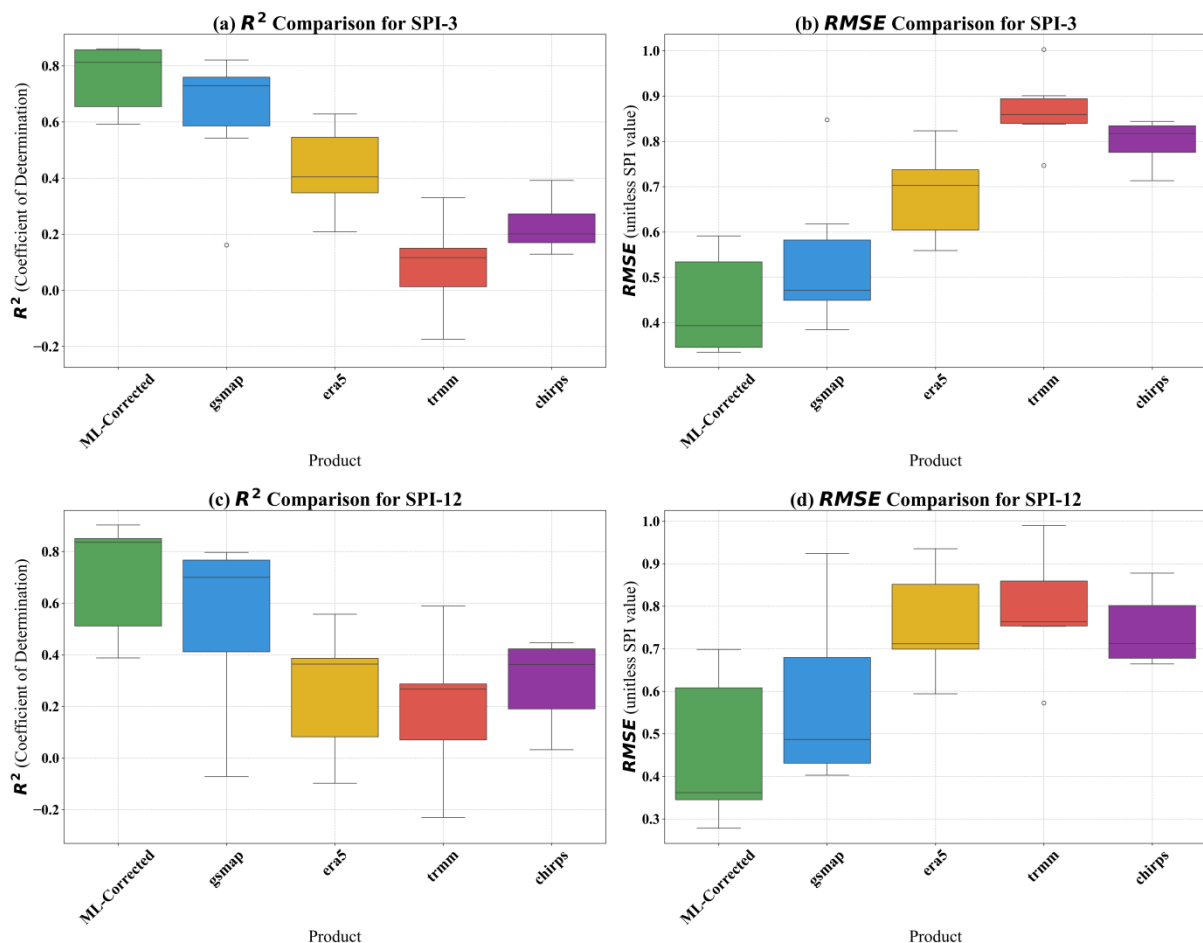
تأخیر زمانی در محصولات ماهواره‌ای که توسط کاشانی و صفوی (Kashani و Safavi, ۲۰۲۵) نیز در پایش خشکسالی‌های آب زیرزمینی گزارش شده است، می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی نادرست شود که مدل



شکل ۶- مقایسه سری زمانی SPI در ایستگاه نماینده برای (a) خشکسالی کوتاه‌مدت (SPI-3) و (b) خشکسالی بلندمدت (SPI-12)

جدول ۶- خلاصه میانه معیارهای ارزیابی SPI در تمام ایستگاه‌ها

مقیاس	محصول	RMSE (خطای SPI)	R ²
SPI-3	ML-Corrected	۰/۳۹۳	۰/۸۱۲
	Gsmap	۰/۴۷۱	۰/۷۲۸
	era5	۰/۷۰۳	۰/۴۰۴
	Trmm	۰/۸۶	۰/۱۱۶
	Chirps	۰/۸۱۷	۰/۲۰۱
SPI-12	ML-Corrected	۰/۳۶۲	۰/۸۳۶
	Gsmap	۰/۴۸۷	۰/۷
	era5	۰/۷۱۲	۰/۳۶۴
	Trmm	۰/۷۶۴	۰/۲۶۷
	Chirps	۰/۷۱۳	۰/۳۶۲



شکل ۷- مقایسه آماری عملکرد SPI محصولات مختلف در برابر SPI مشاهداتی در تمام ایستگاه‌ها. (a) R^2 برای SPI-3، (b) RMSE برای SPI-3، (c) R^2 برای SPI-12، (d) RMSE برای SPI-12.

استراتژی یادگیری گروهی^{۲۱} برای ارزیابی فضایی-زمانی خشکسالی استفاده کردند، همخوانی دارد (Rezaie-Balf & Chua, ۲۰۲۵). آن‌ها نیز نشان دادند که تلفیق داده‌های چندمنبعی می‌تواند خطاهای ساختاری در سری‌های زمانی بارش را کاهش داده و پایش دقیق‌تری از خشکسالی ارائه دهد. بنابراین، مدل پیشنهادی در این پژوهش نه تنها یک ابزار آماری، بلکه یک راهکار عملیاتی برای غلبه بر محدودیت‌های ذاتی داده‌های ماهواره‌ای در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف غلبه بر چالش‌های پایش هیدرولوژیکی در مناطق فراخشک و فاقد داده، کارایی یک مدل همجوشی مبتنی بر یادگیری ماشین را برای تلفیق محصولات بارش ماهواره‌ای و بازتحلیل (TRMM, CHIRPS, GSMaP, ERA5) ارزیابی کردند. نتایج حاصل از این مطالعه منجر به استنتاج‌های کلیدی زیر شد:

۱. مدل پیشنهادی با بهره‌گیری از متغیرهای کمکی مکانی-زمانی، توانست خطاهای سیستماتیک موجود در محصولات

نتایج کمی نشان می‌دهد که محصول اصلاح شده در شاخص R^2 برای SPI-3 و SPI-12 به مقادیر ۰/۸۱۲ و ۰/۸۳۶ دست یافته است، درحالی‌که این مقادیر برای بهترین محصول خام (GSMaP) کمتر از ۰/۷۳ بوده است. نکته قابل توجه، عملکرد بسیار ضعیف محصولاتمانند TRMM و CHIRPS در پایش خشکسالی این منطقه است (با R^2 کمتر از ۰/۲۷)، که لزوم استفاده از روش‌های اصلاحی را دوچندان می‌کند. همچنین خطای RMSE شاخص SPI برای محصول پیشنهادی به کمتر از ۰/۴ واحد کاهش یافته است. این سطح از دقت، قابلیت اعتماد به این محصول را برای سیستم‌های هشدار زودهنگام خشکسالی و مدیریت منابع آب در مناطق فاقد داده تأیید می‌کند. دقت مدل در شاخص SPI-12 (بلندمدت) بالاتر از SPI-3 (کوتاه‌مدت) است. دلیل فیزیکی این امر، ماهیت «فیلتر پایین‌گذر» در مقیاس‌های زمانی طولانی است. در محاسبه SPI دوازده ماه، خطاهای تصادفی و نوسانات شدید بارش‌های روزانه یا ماهانه در یک بازه زمانی طولانی‌تر مستهلک می‌شوند و روند کلی دقیق‌تری باقی می‌ماند. در مقابل، SPI سه ماهه حساسیت بالایی به هرگونه خطا در تک‌رخدادهای بارش دارد که منجر به نوسانات بیشتر در همبستگی می‌شود. این نتایج با یافته‌های اخیر که از

Bhaga, T. D., Dube, T., Shekede, M. D., & Shoko, C. (2020). Impacts of Climate Variability and Drought on Surface Water Resources in Sub-Saharan Africa Using Remote Sensing: A Review. *Remote Sensing*, 12(24), 4184. <https://doi.org/10.3390/rs12244184>

Bouaziz, M., Medhioub, E., & Csaplovics, E. (2021). A machine learning model for drought tracking and forecasting using remote precipitation data and a standardized precipitation index from arid regions. *Journal of Arid Environments*, 189, 104478. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104478>

Bui, H. T., Ishidaira, H., & Shaowei, N. (2019). Evaluation of the use of global satellite-gauge and satellite-only precipitation products in stream flow simulations. *Applied Water Science*, 9(3), 53. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0931-y>

Chen, J., Chen, K., & Zhu, Y. (2025). Hybrid CNN-LSTM-Attention Model for Enhanced Reference Crop Evapotranspiration Estimation toward Optimized Irrigation Scheduling. *Journal of Agriculture and Food Research*, 102545. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102545>

Das, P., Zhang, Z., Ghosh, S., & Hang, R. (2024). A hybrid ensemble learning merging approach for enhancing the super drought computation over Lake Victoria Basin. *Scientific Reports*, 14(1), 13870. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61520-6>

Feizi, H., & Tosan, M. (2017). Saffron yield variability by climatic factors in the northeast of Iran. *Acta Horticulturae*, 1184, 109-114. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1184.15>

Feng, P., Wang, B., Liu, D. L., & Yu, Q. (2019). Machine learning-based integration of remotely-sensed drought factors can improve the estimation of agricultural drought in South-Eastern Australia. *Agricultural Systems*, 173, 303-316. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.015>

Ghosh, S., Lu, J., Das, P., & Zhang, Z. (2024). Machine learning algorithms for merging satellite-based precipitation products and their application on meteorological drought monitoring over Kenya. *Climate Dynamics*, 62(1), 141-163. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06893-6>

Hashemi, Z., Sodaeezadeh, H., Mokhtari, M. H., Ardakani, M. A. H., & Aliabadi, K. K. (2024). Monitoring and forecasting desertification and land degradation using remote sensing and machine learning techniques in Sistan plain, Iran.

خام را به‌طور مؤثر شناسایی و اصلاح نماید. دستیابی به محصول اصلاح شده (ML-Corrected) با ضریب همبستگی میانه ۰/۸۷ و کاهش خطای RMSE، نشان‌دهنده برتری مطلق این رویکرد نسبت به استفاده منفرد از دقیق‌ترین محصول خام (GSMap) است. همچنین، بهبود شاخص‌های تشخیص (CSI و POD) بیانگر توانایی مدل در تفکیک صحیح روزهای تر و خشک و حذف نویزهای ناشی از خطاهای حسگر است.

۲. مهمترین دستاورد این پژوهش، ترجمه بهبود دقت کمی بارش به ارتقای شاخص‌های پایش خشکسالی است. انطباق بالای سری زمانی SPI محصول اصلاح شده با داده‌های مشاهداتی ($R^2 > 0.81$) در هر دو مقیاس کوتاه‌مدت و بلندمدت، ثابت کرد که روش همجوشی قادر به رفع چالش‌های تأخیر زمانی و بیش‌برآورد شدت در محصولات ماهواره‌ای است.

۳. یافته‌ها نشان می‌دهد مدل توسعه‌یافته فراتر از یک ابزار آماری، به‌عنوان یک سامانه اصلاح‌گر هوشمند عمل می‌کند. وزن‌دهی دینامیک به ورودی‌ها بر اساس دقت آن‌ها (مانند سهم بیشتر GSMap و ERA5)، این مدل را به ابزاری قابل اتکا برای تولید داده‌های بارش در مناطق با شبکه پایش زمینی ضعیف تبدیل کرده است.

در مجموع، محصول تولیدی این پژوهش پتانسیل بالایی جهت به‌کارگیری در سیستم‌های هشدار زودبهنگام خشکسالی و مدل‌سازی بیلان آب در استان خراسان جنوبی و مناطق مشابه دارد. برای پژوهش‌های آینده، استفاده از معماری‌های یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی بازگشتی جهت درک بهتر وابستگی‌های زمانی سری‌های بارش و همچنین توسعه نقشه‌های بارش شبکه‌بندی شده با وضوح مکانی بالا در سطح حوضه پیشنهاد می‌شود.

منابع

رضوانی مقدم، پ، کرباسی، ع، توسن، م، قراری، ف، فیضی، ح، و محتشمی، ت. (۱۳۹۵). *زراعت و فناوری زعفران* (Book of Abstracts: 2013-2016). زراعت و فناوری زعفران، ۴(ویژه‌نامه)، ۷۸-۱. <https://doi.org/10.22048/jsat.2016.39250>

توسن، م، خاشعی سیوکی، ع، سنگری، م، و رضوانی مقدم، پ. (۱۴۰۳). *آنالیز روند جهانی تحقیقات زعفران* (Crocus sativus L) در بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳. زراعت و فناوری زعفران، ۱۲ (۲)، ۱۱۵-۱۳۸. <https://doi.org/10.22048/jsat.2024.443037.1524>

Batista, F. F., Rodrigues, D. T., Santos e Silva, C. M., Andrade, L. d. M. B., Mutti, P. R., Potes, M., & Costa, M. J. (2025). Performance Assessment of IMERG V07 Versus V06 for Precipitation Estimation in the Parnaíba River Basin. *Remote Sensing*, 17(21), 3613. <https://doi.org/10.3390/rs17213613>

- Mahmud, H. B., & Osawa, T. (2025). Analysis of the social impact of meteorological drought on Peninsular Malaysia based on the integration of precipitation satellites and sentiment analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 119, 105314. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105314>
- Michibata, T. (2024). Radiative effects of precipitation on the global energy budget and Arctic amplification. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7(1), 136. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00684-4>
- Mwinjuma, M., Wang, R., Mtupili, M., & Twaha, M. (2026). Comparisons of SPI and SPEI in capturing drought dynamics: A Global assessment across arid and humid regions. *Atmospheric Research*, 329, 108475. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108475>
- Negri, P., Acevedo, D., Ruiz, J., Gonzalez, S., Vidal, L., Silvarrey, A., & Nicora, M. G. (2025). Enhancing precipitation detection: A multi-sensor approach using conditional GANs and recurrent networks. *Pattern Recognition Letters*, <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2025.05.022>
- Nikoo, M. R., Tosan, M., Nazari, R., Vahabzadeh, M., Karimi, M., & Zarrinabadi, E. (2026). Assessing the fidelity of multi-satellite precipitation estimates for drought monitoring in a mountain water tower to arid basin system. *Journal of Arid Environments*, 232, 105519. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2025.105519>
- Nourani, V., Tosan, M., Huang, J. J., Gebremichael, M., Kantoush, S. A., & Dastourani, M. (2025). Advances in multi-source data fusion for precipitation estimation :remote sensing and machine learning perspectives. *Earth-Science Reviews*, 270, 105253. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2025.105253>
- Oyarzabal, R. S., Santos, L. B. L., Cunningham, C., Broedel, E., de Lima, G. R. T., Cunha-Zeri, G., Peixoto, J. S., Anochi, J. A., Garcia, K., Costa, L. C. O., Pampuch, L. A., Cuartas, L. A., Zeri, M., Guedes, M. R. G., Negri, R. G., Muñoz, V. A., & Cunha, A. P. M. A. (2025). Forecasting drought using machine learning: a systematic literature review. *Natural Hazards*, 121, (8). 9823-9851. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07195-2>
- Rahat, S. H., Saki, S., Khaira, U., Biswas, N. K., Dollan, I. J., Wasti, A., Miura, Y., Bhuiyan, M. A. E., & Ray, P. (2024). Bracing for impact: how shifting precipitation extremes may influence physical Journal of African Earth Sciences, 218, 105375. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105375>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., & Schepers, D. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Iqbal, Z., Shahid, S., Ahmed, K., Wang, X., Ismail, T., & Gabriel, H. F. (2022). Bias correction method of high-resolution satellite-based precipitation product for Peninsular Malaysia. *Theoretical and Applied Climatology*, 148(3), 1429-1446. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04007-6>
- Kashani, A., & Safavi, H. R. (2025). Assessing groundwater drought in Iran using GRACE data and machine learning. *Scientific Reports*, 15(1), 14671. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99342-9>
- Kossieris, P., Tsoukalas, I., Brocca, L., Mosaffa, H., Makropoulos, C., & Anghelea, A. (2024). Precipitation data merging via machine learning: Revisiting conceptual and technical aspects. *Journal of Hydrology*, 637, 131424. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131424>
- Lalmuanzuala, B., Sathyamoorthy, N., Dheebakaran, G., Jagadeeswaran, R., Ravikumar, R., & Sumathi, C. (2025). A comprehensive review of meteorological and remote sensing indices for drought monitoring and their in situ application in India. *Environmental Reviews*, 33, 1-15. <https://doi.org/10.1139/er-2025-0077>
- Li, X., Jia, H., & Wang, L. (2023). Remote Sensing Monitoring of Drought in Southwest China Using Random Forest and eXtreme Gradient Boosting Methods. *Remote Sensing*, 15(19), 4840. <https://doi.org/10.3390/rs15194840>
- Liu, Q., Li, Y., Yu, M., Chiu, L. S., Hao, X., Duffy, D. Q., & Yang, C. (2019). Daytime Rainy Cloud Detection and Convective Precipitation Delineation Based on a Deep Neural Network Method Using GOES-16 ABI Images. *Remote Sensing*, 11(21), 2555. <https://doi.org/10.3390/rs11212555>
- Maggioni, V., Meyers, P. C., & Robinson, M. D. (2016). A Review of Merged High-Resolution Satellite Precipitation Product Accuracy during the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Era. *Journal of Hydrometeorology*, 17(4), 1101-1117. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0190.1>

Zhang, Z., Wang, D., Qiu, J., Zhu, J., & Wang, T. (2021). Machine learning approaches for improving near-real-time IMERG rainfall estimates by integrating cloud properties from NOAA CDR PATMOS-x. *Journal of Hydrometeorology*, 22(10), 2767-2781. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0019.1>

Zhang, J., Ding, J., Wang, J., Lin, H., Han, L., Li, X., & Liu, J. (2023). Remote sensing drought factor integration based on machine learning can improve the estimation of drought in arid and semi-arid regions. *Theoretical and Applied Climatology*, 151(3), 1753-1770. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04305-z>

Zhang, X., Song, Y., Nam, W.-H., Huang, T., Gu, X., Zeng, J., Huang, S., Chen, N., Yan, Z & ,Niyogi, D. (2024). Data fusion of satellite imagery and downscaling for generating highly fine-scale precipitation. *Journal of Hydrology*, 631, 130665. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130665>

Zhu, H., Zhou, Q., & Cui ,A. (2023). Comparison and evaluation of machine-learning-based spatial downscaling approaches on satellite-derived precipitation data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.*, X-1/W1-2023, 919-924. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-1-W1-2023-919-2023>

پی‌نوشت‌ها

- 1- Gridded precipitation products
- 2- Standardized Precipitation Index
- 3- Multi-source fusion
- 4- Machine learning
- 5- Random forest
- 6- Decision Trees
- 7- Bagging
- 8- Gringorten
- 9- Cunnane
- 10- Correlation coefficient
- 11- Root mean square error
- 12- Mean absolute error
- 13- Probability of detection
- 14- False-alarm rate
- 15- Critical success index
- 16- Extreme events
- 17- Feature importance
- 18- Density scatter plot
- 19- Stability
- 20- Detection capability
- 21- Ensemble learning

climate risks in an uncertain future. *Scientific Reports*, 14(1), 17398. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65618-9>

Raziei, T., & Pereira, L. S. (2024). Relating the Drought Precipitation Percentiles Index to the Standardized Precipitation Index (SPI) under Influence of Aridity and Timescale. *Water Resources Management*, 38(14), 5739-5758. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03932-7>

Rezaie-Balf, M., & Chua, L. H. C. (2025). An ensemble learning strategy for spatiotemporal drought assessment through the fusion of multi-satellite and atmospheric reanalysis precipitation products. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 39(9), 3875-3901. <https://doi.org/10.1007/s00477-025-03041-w>

Sharma, T. C., & Panu, U. S. (2024). Current State of Advances in Quantification and Modeling of Hydrological Droughts. *Water*, 16(5), 729. <https://doi.org/10.3390/w16050729>

Shiru, M. S., Chung, E.-S., & Sa'adi, Z. (2025). Performance assessment of satellite precipitation products over Nigeria: A compromise programming approach. *Earth Systems and Environment*, 9(4), 3289-3310. <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00563-1>

Tong, X., Zhou, W., & Xia, J. (2024). Improving Boreal Summer Precipitation Predictions From the Global NMME Through Res34-Unet. *Geophysical Research Letters*, 51(2), e2023GL106391. <https://doi.org/10.1029/2023GL106391>

Tosan, M., Gharib, M. R., Mardani, M., & Sabbagh, A. (2026). Spatiotemporal performance and error analysis of satellite precipitation products over a topographically complex semi-arid region in Iran. *Journal of Mountain Science*, 23(1), 118-138. <https://doi.org/10.1007/s11629-025-9984-6>

Tosan, M., Nourani, V., Kisi, O., Zhang, Y., Kantoush, S.A. et al. (2026). The Transparency Revolution in Geohazard Science: A Systematic Review and Research Roadmap for Explainable Artificial Intelligence. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 146(1), 3. <https://doi.org/10.32604/cmescs.2025.074768>

Wu, X., Liu, Y., & Wang, R. (2025). Assessment of non-parametric method for evapotranspiration estimation across extreme conditions. *Atmospheric Research*, 326, 108279. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108279>

یادداشت تحلیلی

کژباوری و کژفهمی در مدیریت آب کشاورزی: زمان برای بازبینی، تأمل و تجدید نظر فرا رسیده است!

این مقاله از متن اصلی زیر ترجمه؛ و توسط آقایان دکتر پویا شیرازی و دکتر سید محمدرضا ناقدی فراز از نظر نگارشی و ادبی، بازبینی شده است.
Ragab, R. (2024). Misconceptions and misunderstandings in agricultural water management: Time for revisiting, reflection and rethinking. Irrigation and Drainage, 1–23. Available from: <https://doi.org/10.1002/ird.2947>

پویا شیرازی^۱، سید محمدرضا ناقدی^۲

۱- مدیر پژوهشی پژوهشکده آب و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

*ایانامه: p.shirazi.a@gmail.com

چکیده

تصور غلط (Misconception) یا «کژباوری» اساساً یک باور یا ایده نادرست است که دقیق یا درست نیست. کژباوری ممکن است ناشی از کمبود/ نبود اطلاعات و یا تفسیر نادرست اطلاعات باشد. کژباوری ممکن است منجر به تصمیمات یا اقدامات نادرست شود. در حالی که سوءتفاهم (Misunderstanding) یا «کژفهمی» به عدم درک یا تفسیر صحیح معنای مورد نظر از یک موقعیت اشاره دارد. کژفهمی ممکن است ناشی از تعبیر اشتباه یا موانع زبانی باشد. با این حال بین این دو مفهوم، تا حدودی همپوشانی وجود دارد و در برخی موارد هر دو ممکن است هم معنا شوند. بخش‌های زیر برخی از کژفهمی‌ها و کژباوری‌ها را که در حال حاضر در مدیریت آب کشاورزی اعمال می‌شود، تبیین می‌کند. در طول دهه‌های گذشته و همچنین در سال‌های اخیر، برخی مفاهیم توسعه یافته‌اند که برای بهبود مدیریت آبیاری و صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی در نظر گرفته شده بودند؛ مانند: راندمان مصرف آب (WUE)، بهره‌وری آب (WP)، حسابداری آب، کم‌آبیاری، مدیریت پایا، آبشویی شوری و موارد دیگر. با این حال، کاربرد این مفاهیم دچار کژفهمی شده و مفاهیم گاهی اوقات بدون توجه به معنای فیزیکی واقعی و محدودیت کاربرد آنها بکار رفته‌اند؛ زیرا: ۱- برخی از این مفاهیم با دانش ناکافی از هیدرولوژی توسعه یافته‌اند؛ ۲- مقیاس کاربرد و محدودیت‌های برخی از مفاهیم به وضوح بیان نشده است؛ و ۳- نحوه بدست آوردن دقیق و درست پارامترهای موجود در برخی از این مفاهیم توصیف نشده است. در بخش‌های بعدی، تعدادی از این مفاهیم، کژفهمی‌های رایج و کاربردهای نادرست این مفاهیم توسط متخصصان، ارائه خواهد شد. همچنین، شواهد و شیوه‌هایی برای استفاده صحیح و دقیق از مفاهیم با توجه به معنای فیزیکی واقعی، مقیاس کاربرد، و نیز میزان عدم قطعیت در کاربردهای آنها ارائه خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: کم‌آبیاری، طراحی سدها و مخازن، کژباوری در مدیریت آب، عدم دقت و عدم قطعیت مدل‌ها، سنجش از دور تبخیر و تعرق و رطوبت خاک، کنترل شوری، پایداری، درشت مقیاس‌سازی، سیستم حسابداری آب، کارایی و بهره‌وری مصرف آب

مسئله ۱- کژفهمی: معنای واقعی کم آبیاری

منابع فعلی نشان می‌دهد که بسیاری از مقالات منتشرشده در نشریات برای صرفه‌جویی در مصرف آب، مبتنی بر کاربرد کم آبیاری بوده‌اند. محققان گزارش داده‌اند که در کم آبیاری (مثلاً در ۵۰٪، ۶۰٪ یا ۷۰٪ نیاز آبیاری کامل) عملکردی برابر با عملکرد حاصل از اعمال ۱۰۰٪ نیاز آبیاری کامل به دست آمده است. اگرچه این نتایج درست هستند، اما جای تعجب است که چرا کم آبیاری همان عملکرد آبیاری کامل را به همراه داشته است. سوال اینجاست: آیا کم آبیاری واقعاً کمبود آب است یا فقط نیاز واقعی است و این نیاز آبیاری کامل تخمینی است که به دلیل بیش‌برآورد روش مورد استفاده برای تعیین نیاز آبی محصول (CWR)^۱ اغراق آمیز بوده است؟ برای بررسی این موضوع، باید ابتدا نحوه محاسبه CWR را بررسی کرد. این موضوع در ادامه توضیح داده خواهد شد.

روش‌های تعیین CWR

۱. معادلات مبتنی بر داده‌های هواشناسی: دما، تابش یا ترکیبی از آنها، سرعت باد، رطوبت نسبی و معادلات تجربی (با محدودیت روایی مکانی)؛
 ۲. اندازه‌گیری‌های خاک: میزان رطوبت، کمبود رطوبت خاک^۲، صفحه شار صفر، پروفیل‌های رطوبت خاک، بیلان آب خاک و غیره؛
 ۳. اندازه‌گیری‌های گیاهی: جریان شیره گیاهی؛
 ۴. لایسیمتر: لایسیمتر وسیله‌ای برای اندازه‌گیری مقدار تبخیرتغرق واقعی از سطوح کشت گیاهان است؛
 ۵. اندازه‌گیری‌های مستقیم و غیرمستقیم شار تبخیر: تشت تبخیر (کلاس A یا ...)، نسبت بوون^۳، اِدی کوواریانس^۴، سنتیلومترها^۵ (سوسوزن).
- بدیهی است که «کاربران باید از دقت قابل دستیابی، مقیاس برازنده، و محدودیت‌های این روش‌ها آگاهی داشته باشند».

تعریف کم آبیاری

کم آبیاری معمولاً به عنوان کاهش مقدار آب آبیاری تعریف می‌شود که کسری از کل CWR یا درصدی کمتر از ۱۰۰ درصد CWR را نشان می‌دهد. همانطور که در بالا ذکر شد، نیاز آبی گیاهان را می‌توان اندازه‌گیری یا برآورد کرد (به عنوان مثال با استفاده از لایسیمترها، اندازه‌گیری SMD^۶ یا اندازه‌گیری‌های مستقیم/غیرمستقیم توسط نسبت بوون، اِدی کوواریانس و یا سنتیلومترها) یا از معادلاتی مانند معادله اصلاح‌شده پنمن-مانتیت سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد «FAO-56» (Allen) و همکاران، (۱۹۹۸) که تاکنون به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است، محاسبه کرد.

$$ET_c = ET_0 (K_{cb} + K_e) \quad (1)$$

که در آن ET_c تبخیرتغرق گیاه (CWR)، ET_0 تبخیرتغرق مرجع، K_{cb} ضریب گیاهی بیانگر تعرق گیاه و K_e ضریب تبخیر از سطح خاک لخت است. در بخش زیر نحوه تعیین CWR، مقایسه CWR محاسبه شده از معادلات با CWR اندازه‌گیری شده و مقایسه مقاومت تاج (Canopy) فرض شده توسط معادله اصلاح شده پنمن-مانتیت فائو با مقادیر اندازه‌گیری شده، تشریح شده است. درک این موضوع، کمک می‌کند که چرا کم آبیاری در برخی موارد، حتی تا ۵۰٪ از CWR کامل، همان عملکرد ۱۰۰٪ CWR را می‌دهد. در چنین حالتی احتمالاً CWR بیش برآورد شده است؛ و اگر چنین است، چرا؟

معادله پنمن-مانتیت ET برای تخمین CWR

در صورت وجود داده‌های مقاومت سطح روزنه/پوشش گیاهی، می‌توان از معادله معروف پنمن-مانتیت (Monteith، ۱۹۶۵) به شکل زیر استفاده کرد:

$$\lambda ET_p = \frac{\Delta(R_n - G) - \rho_a c_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (2)$$

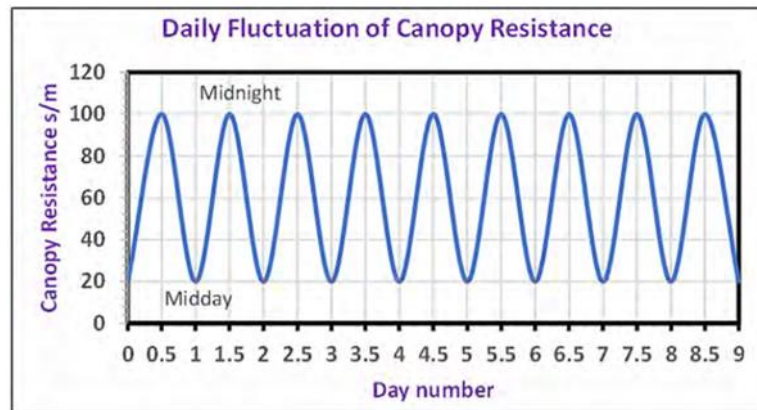
اما بدلیل دشواری در ارائه مقادیر مقاومت تاج پوشش، معادله فوق توسط Allen و همکاران (۱۹۹۸) اصلاح شد (FAO-56):

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma U_2 (1 + 0.34 U_2)} \quad (3)$$

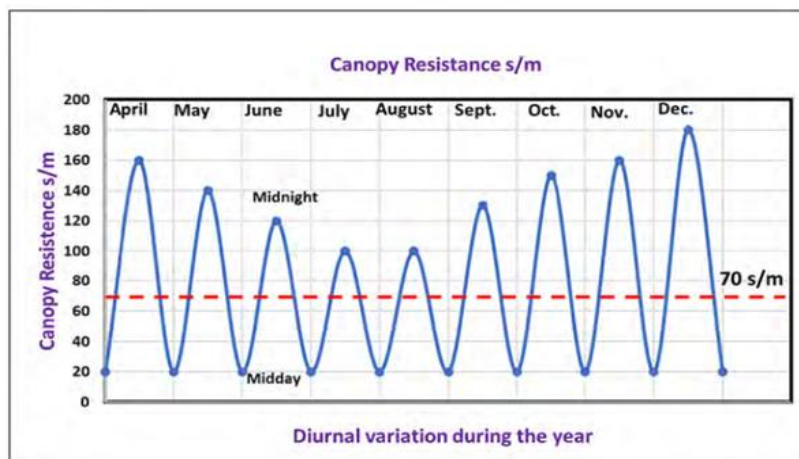
که در آن $ET_0 (= \lambda ET_p)$ تبخیرتغرق مرجع (میلی‌متر در روز)، r_a و r_s مقاومت سطح توده و مقاومت آیرودینامیکی (s/m)، R_n تابش خالص (MJ/m².day)، G شار حرارتی خاک (MJ/m².day)، T میانگین دمای روزانه هوا در ارتفاع ۲ متری (درجه سانتیگراد)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع (kPa بر درجه سانتیگراد)، γ ثابت سایکرومتریک (معادل ۶۶ Pa بر درجه سانتیگراد)، e_s فشار بخار اشباع در دمای هوا (kPa)، e_a فشار بخار واقعی (kPa)، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (m/s). ET_0 محاسبه شده در اینجا برای چمن سبز کوتاه و بخوبی آبیاری شده است (یک چمن با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر و آلبيدو ۰/۲۳). معادله پنمن-مانتیت یک معادله منحصر به فرد بود زیرا به جای تمرکز صرف بر داده‌های آب و هوایی (تابش و دما) برای تعیین ET ، حضور گیاه را نیز در نظر می‌گرفت. با این حال، دشواری در بدست آوردن پارامتر گیاه (مقاومت تاج) آن را در کاربرد عمدتاً محدود به پژوهشگران دانشگاهی کرد. Allen و همکاران (۱۹۹۸) با همکاری فائو و کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی (ICID)، تلاش کردند معادله پنمن-مانتیت را با فرض مقاومت تاج پوشش گیاهی $r_s = 70 \text{ s/m}$ ، به عنوان میانگین مقدار فصلی برای محصولات کشاورزی، ساده کنند. این ساده‌سازی منجر به معادله اصلاح‌شده پنمن-مانتیت شد. با این حال، استفاده از میانگین حسابی مقاومت فصلی تاج یا روزنه که شکل تابع موج سینوسی به خود می‌گیرد، احتمالاً باعث عدم دقت در

تخمین ET_c می‌شود. مقاومت تاج پوشش گیاهی (و روزنه)، r_s در نیمه شب حداکثر است (تا تلفات آب از گیاه در طول شب به حداقل برسد)؛ و این مقاومت در ظهر کمترین مقدار را دارد (تا جذب CO_2 و تابش برای فتوسنتز و تولید زیست توده به حداکثر برسد). این وضعیت در شکل (a-1) نشان داده شده است. همچنین مشخص شد که r_s در طول فصول

تغییر می‌کند (شکل b-1)، که در آن طول روز و دوره نوری بر مقاومت تاج پوشش تأثیر می‌گذارد. هرچه طول روز و دوره نوری طولانی‌تر باشد، مقاومت تاج پوشش کمتر است، یعنی مقاومت در تابستان کم است و از پاییز تا زمستان که طول روز و دوره نوری کوتاه‌تر می‌شوند، مقاومت افزایش می‌یابد.



(a)



(b)

شکل ۱- (a) تغییرات روزانه مقاومت تاج پوشش. (b) تغییرات روزانه و فصلی مقاومت تاج پوشش (در نیمکره شمالی). خط چین قرمز نشان‌دهنده میانگین مقاومت فصلی تاج پوشش (۷۰ ثانیه بر متر مربع) است که در معادله اصلاح شده فائو پنمن-مانتیت استفاده شده است.

(۲۰۲۰) اندازه‌گیری‌های شار ایدی کوواریانس دو ساله را در بالای یک جنگل درختان سرو تجزیه و تحلیل کردند. آنها مقاومت تاج گیاهی را در حدود ۱۹۰ ثانیه بر متر مربع برای دو فصل گرم و مقاومت تاج پوشش گیاهی را در حدود ۶۷۰ و ۳۲۰ ثانیه بر متر مربع برای دو فصل سرد مشاهده کردند. Hsieh و همکاران (۲۰۲۳) اندازه‌گیری‌های ET را با استفاده از روش ایدی کوواریانس در سه مکان انجام دادند: یک علفزار در ایرلند جنوبی، یک جنگل سرو در شمال تایوان و یک جنگل کرپتومریا در مرکز تایوان. آنها دریافتند که میانگین مقاومت تاج پوشش گیاهی برای علفزار، جنگل سرو و جنگل کرپتومریا به ترتیب ۱۶۳، ۳۴۶ و ۳۲۱ ثانیه بر متر مربع بود. آنها متوجه شدند که برای علفزار، مقاومت تاج پوشش گیاهی

روندهای مشابهی با آنچه در شکل (۱) ارائه شده است، توسط Han و همکاران (۲۰۲۲) گزارش شده است. تغییرات روزانه در رسانایی روزنه، صرف نظر از دوره رشد، معمولاً به دلیل وابستگی به تابش خورشیدی، مقادیر کمتری را در صبح و عصر و مقادیر بیشتری را در ظهر نشان می‌دهد. نتایج Zheng و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که مقاومت روزانه تاج تاکستان‌ها در طول دو فصل رشد بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ ثانیه بر متر مربع حفظ شده است. آنها همچنین دریافتند که معادله اصلاح شده پنمن-مانتیت، تعرق را در مرحله اولیه رشد بیش از حد و در مراحل میانی و پایانی رشد، کمتر از حد تخمین زده است. مقاومت تاج در مرحله اولیه رشد به طور قابل توجهی بالاتر از مرحله میانی و پایانی رشد بود. Lin و همکاران

گیاهی Kc کمتر از مقادیر گزارش شده توسط Allen و همکاران (۱۹۹۸) بود. مقادیر بالای ETo و Kc محاسبه شده منجر به بیش‌برآورد CWR محصول سیب‌زمینی در هند در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده گردید. همچنین Amayreh و AlAbed (۲۰۰۵) از اِدی کوواریانس برای تخمین Kc و ETo گوجه‌فرنگی آبیاری قطره‌ای در دره اردن استفاده کردند. سپس Kc به عنوان نسبتی بین ETo و ETo حاصل از نسخه اصلاح‌شده پنمن-مانتیت محاسبه شد. آنها دریافتند که مقادیر Kc بدست آمده با استفاده از اِدی کوواریانس بطور متوسط ۳۶٪ کمتر از مقادیر گزارش شده توسط پنمن-مانتیت اصلاح شده بود. بدیهی است مقادیر بالاتر Kc منجر به تخمین بیش از حد CWR محصول گوجه‌فرنگی می‌شود. در پرتغال Paço و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از اِدی کوواریانس، تبخیر-تعرق را در یک باغ ۳-۴ ساله اندازه‌گیری کردند. آنها گزارش دادند که معادله پنمن-مانتیت اصلاح شده در مقایسه با اِدی کوواریانس، ETo را بیش از حد تخمین می‌زند.

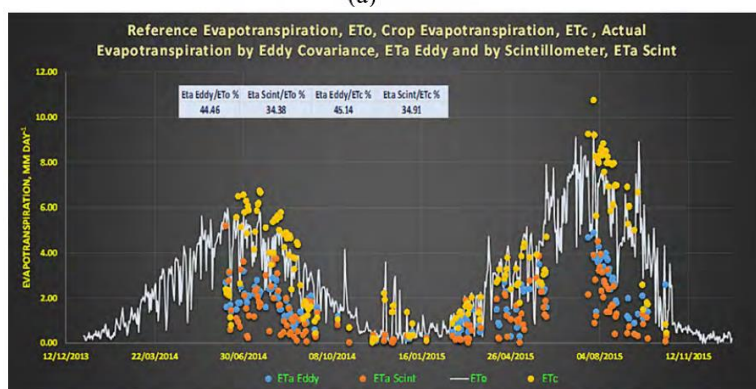
در اوایل صبح بیشتر بود و سپس در ساعت ۱۲:۰۰ به کمترین مقدار خود یعنی حدود ۱۵۰ ثانیه بر متر مربع کاهش یافت و سپس این مقدار را تا ساعت ۱۸:۰۰ حفظ کرد.

از شکل (۱-ب) مشخص است که مقدار ثابت فرض شده برای مقاومت تاج پوشش گیاهی ۷۰ ثانیه بر متر مربع، تقریبی غیرواقعی از روند روزانه و فصلی مقاومت تاج پوشش است. بدیهی است که بهتر بود مقاومت با معادله موج سینوسی نشان داده می‌شد. لذا انتظار می‌رود این تقریب خام، عدم دقت زیادی در محاسبات ET ایجاد کند. بطور کلی می‌توان موج سینوسی را با استفاده از تابع $y = a * \sin(bx)$ توصیف کرد، که در آن a به عنوان دامنه موج سینوسی و b به عنوان تناوب شناخته می‌شود.

Panda و Kashyap (۲۰۰۱) دریافتند که ETo به دست آمده با روش‌های مختلف از جمله Penman-Monteith، FAO، Turc و Blaney-Criddle، Hargreaves، Penman بالاتر از ETo به دست آمده از لایسیمترها بود. علاوه بر این، آنها همچنین گزارش دادند که مقادیر اندازه‌گیری شده ضریب



(a)



(b)

شکل ۲- (a) ابزار دقیق میدانی برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق واقعی (ETa) اندازه‌گیری شده توسط اِدی کوواریانس و سنتیلومتر SMD اندازه‌گیری شده توسط COSMOS^۲ در مزرعه آزمایشی نزدیک بولونیا، ایتالیا. (b) مقایسه بین ETa اندازه‌گیری شده توسط اِدی کوواریانس و سنتیلومتر، تبخیر و تعرق مرجع (ETo) تخمین زده شده از معادله پنمن-مانتیت و تبخیر و تعرق محصول (ETc) محاسبه شده از ETo و میانگین وزنی ضریب گیاهی Kc (Ragab و همکاران، ۲۰۱۷)

در مطالعه Ragab و همکاران (۲۰۱۷a, ۲۰۱۷b)، با استفاده از اِدی کوواریانس و یک سنتیلومتر (شکل ۲-ا) در یک سایت آزمایشی در شمال ایتالیا، مشخص شد که ETo و ETc بدست آمده با معادله اصلاح شده پنمن-مانتیت، مقادیر بالاتری نسبت به ET واقعی بدست آمده با اِدی کوواریانس و سنتیلومتر دارد. نتایج (شکل ۲-ب) نشان می‌دهد که بطور متوسط، ET واقعی اِدی کوواریانس و سنتیلومترها برای فصل‌های زراعی ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ به ترتیب برابر با ۴۵٪ و ۳۵٪ مقادیر بدست آمده از معادله اصلاح شده پنمن-مانتیت را نشان می‌دهد؛ که تفاوتی فاحش است!

نتیجه‌گیری

استفاده از کم‌آبیری به عنوان درصدی از ET پتانسیل صحیح نیست. برخی از روش‌ها و معادلات منجر به تخمین بیش از حد CWR می‌شوند؛ و به همین دلیل است که برخی از محققان توانسته‌اند با درصد کاهش یافته قابل توجهی از آبیاری کامل (مثلاً ۵۰٪) به عملکردی مشابه آبیاری کامل دست یابند. کم‌آبیری واقعی باید کسری یا درصدی از ET واقعی را نشان دهد که به طور قابل اعتمادی اندازه‌گیری یا محاسبه شده باشد؛ و البته در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها کالیبره شده باشد. معادلاتی که فقط بر اساس داده‌های هواشناسی برای برآورد مقادیر ET هستند، باید در مقایسه با مقادیر ET اندازه‌گیری شده کالیبره شوند. معادله اصلاح‌شده پنمن-موننتیت (Allen و همکاران، ۱۹۹۸)، همانطور که توسط چندین دانشمند گزارش شده است، ET را به دلیل مقدار کم فرض شده برای مقاومت تاج (۷۰ ثانیه بر متر مربع) بسیار بیش از حد تخمین می‌زند. همچنین باید توجه داشت که این مقدار فرضی ثابت، منعکس کننده تغییرات روزانه یا فصلی نیست. حتی به نظر نمی‌رسد میانگین حسابی مقاومت تاج در طول فصل، نماینده خوبی از روند موج سینوسی مقاومت تاج باشد. با توجه به اینکه معادله اصلاح‌شده پنمن-موننتیت فائو ۲۵ سال قدمت دارد و در سال‌های گذشته چندین ارزیابی روی آن انجام شده است که

ثابت کرده این معادله تبخیر و تعرق را به طور دقیق تخمین نمی‌زند، زمان آن رسیده است که راهکار تخمین خام مقاومت تاج دوباره بررسی گردد. این مقدار باید توسط FAO و ICID اصلاح شود تا با مقادیر پویاتر، واقع‌بینانه‌تر و از نظر فیزیکی صحیح‌تر که نشان‌دهنده تغییرات روزانه و فصلی هستند، جایگزین شود. از آنجایی که این پارامتر بخشی از اندازه‌گیری‌های میدانی معمول نیست و بیشتر توسط محققان اندازه‌گیری می‌شود، باید یک پایگاه داده که این مقادیر را برای گونه‌های مختلف فهرست می‌کند، ایجاد گردد تا لاقل بعنوان یک جدول برای میانمایی استفاده شود. یک «تابع دینامیکی ساده» یا «مقدار مقاومت تاج مبتنی بر مرحله رشد» (مشابه منحنی KC) بعنوان تقریب خام به همراه یک جدول مرجع، می‌تواند اولین قدم به جلو باشد. علاوه بر این و از طرف دیگر، باید در نظر داشت که محاسبه ETo یا ETc صرفاً بر اساس داده‌های هواشناسی، بدون در نظر گرفتن گیاه، می‌تواند ET پتانسیل بدست دهد که نشان‌دهنده تقاضای جوی برای آب باشد، نه تقاضای گیاه برای آب. بدیهی است که CWR دقیق (ETa) بر اساس شرایط و نیاز گیاه بدست می‌آید، و نه بر اساس تقاضای جوی برای آب.

مسئله ۲- کژفهمی: تفاوت بین WUE و WP

برخی از متخصصان هنوز از «بازده کاربرد آب» (WUE)^۸ و «بهره‌وری آب» (WP)^۹ بجای یکدیگر استفاده می‌کنند. این یک تصور غلط است. نباید بین معانی مختلف این دو اصطلاح سردرگمی وجود داشته باشد. در دهه ۱۹۶۰، نویسندگان تمایل داشتند از «بازده کاربرد آب» برای توصیف «بهره‌وری آب» استفاده کنند. از اوایل دهه ۱۹۸۰، مجلات معتبر، دیگر مقالاتی که در آنها «بازده کاربرد آب» و «بهره‌وری آب» به درستی استفاده نشده باشند را نمی‌پذیرند. در بخش بعدی تعریف WUE و WP و نحوه استفاده از آنها برای عدم اشتباه گرفتن بین دو عبارت، آمده است.

بازده آبیاری

بازده (راندمان) آبیاری اجزای مختلفی دارد:

نسبت بین حجم آب منتقل شده برای آبیاری (Vd) و حجم آب ورودی به مخزن ذخیره (Ve) برای همان هدف	$Es = Vd / Ve$	۱: بازده ذخیره‌سازی
نسبت بین حجم آب تحویل داده شده به قطعات آبیاری (Vp) و حجم آب منتقل شده از منبع تأمین (Vd)	$Ec = Vp / Vd$	۲: بازده انتقال
نسبت بین حجم آب استفاده شده توسط گیاهان در طول فرآیند تبخیر و تعرق (Vu) و حجمی که به قطعه آبیاری می‌رسد (Vp)	$Eu = Vu / Vp$	۳: بازده مصرف آبیاری
$efficiency\ of\ any\ process = (useful\ output / total\ input) * 100$		
توجه: Vu برابر است با حجم تبخیر و تعرق توسط گیاهان منهای حجم بارندگی مؤثر؛ و همچنین توجه داشته باشید که بازده واحد ندارد (بدون بعد است)، زیرا نسبت دو عدد با واحدهای یکسان است.		

برعکس. بنابراین افزایش WP به دنبال افزایش WUE و سایر انواع کارایی (performance)، مانند کنترل آفات و بیماری‌ها، کنترل علف‌های هرز، کوددهی مناسب و ... رخ می‌دهد.

مسئله ۳- کژفهمی: نیازی به بهبود بازده آبیاری نیست زیرا آنچه در بالادست از دست می‌رود، در پایین دست به دست می‌آید

مفهومی که ادعا می‌کند «نیازی به بهبود کارایی آبیاری نیست، زیرا آنچه در بالادست از دست می‌رود در پایین دست جبران خواهد شد»، هیدرولوژی، شرایط محیطی و زمین‌شناسی لایه‌های زیرسطحی حوضه‌های آبریز را نادیده می‌گیرد. همچنین این موضوع را نادیده می‌گیرد که آیا حوضه در منطقه خشک، نیمه‌خشک یا مرطوب قرار دارد یا خیر. بعلاوه، تا حد زیادی ناپیوستگی احتمالی جریان‌های زیرسطحی بین بالادست و پایین دست را به دلیل تغییرات زمین‌شناسی و وجود شکستگی‌ها نادیده می‌گیرد.

همچنین این مفهوم با توسعه سیستم‌ها و استراتژی‌های آبیاری کارآمد برای صرفه‌جویی در آب مانند نانو آبیاری، آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، نیم‌آبیاری^۱، آبیاری با متغیر نرخ^۱ و سنتریپوت با نازل کم-ارتفاع، خشک-کاشتی برنج و یا آبیاری قطره‌ای برنج، همخوانی ندارد.

این دیدگاه فرض می‌کند که لایه‌های زیرسطحی همگن هستند و هیچ مانع، شکستگی یا تغییری در زمین‌شناسی وجود ندارد. با این حال، آنچه در بالادست از دست می‌رود ممکن است در پایین دست ظاهر نشود. حتی اگر در پایین دست جبران شود، این جبران یا به صورت فوری نبوده یا با همان مقدار معادل نیست و یا به دلیل شست‌وشوی نمک‌ها و مواد شیمیایی کشاورزی از بالادست به پایین دست، از همان کیفیت برخوردار نخواهد بود.

از نظر هیدرولوژی، جریان زیرسطحی معمولاً فقط زمانی ایجاد می‌شود که لایه خاک زیرسطحی اشباع شده باشد. اشباع لایه‌های زیرسطحی در مناطق خشک یا نیمه‌خشک ممکن است اتفاق نیفتد، مگر در مواقع بارش زیاد. در مناطقی با آب‌های زیرزمینی عمیق، آب از دست رفته در اثر آبیاری ناکارآمد، ممکن است به دلایل متعدد در نیمه‌راه آبخوان، به مصرف دیگری رسیده باشد و هرگز به آبخوان ملحق نشود.

علاوه بر این، ناپیوستگی جریان زیرسطحی به دلیل شکستگی‌ها و زمین‌شناسی ناهمگن می‌تواند جریان زیرسطحی را مختل کرده و مانعی برای حرکت افقی آب به پایین دست ایجاد کند (شکل ۳-۱). آزمایش‌های هیدرولیکی (آزمایش‌های پمپاژ) در چندین گمانه از یک حوضه رودخانه (در فلات بنگلور) در حوضه کاور، جنوب هند انجام شد. آزمایش‌های پمپاژ ۱۸ ساعته، مرزهای «بدون جریان» را نشان دادند، زیرا سطح آب زیرزمینی در چاه مشاهده‌ای در نزدیکی

بازده کاربرد آب (WUE) در کشاورزی یعنی چه درصدی از آبی که به گیاه داده می‌شود، بطور مؤثر توسط گیاه جذب و تعرق می‌شود (یا به عبارت دیگر یعنی آبی که به دلیل زهکشی، نفوذ عمقی، تبخیر از خاک لخت یا هرزآب از دست نمی‌رود). اگر، به عنوان مثال، ۱۰ میلی‌متر آب به گیاه داده شود و گیاه فقط ۸ میلی‌متر را از طریق جذب آب توسط ریشه استفاده کند (این مقدار صرف تعرق شود)؛ و ۲ میلی‌متر آب باقیمانده از طریق زهکشی زیر ناحیه ریشه یا از طریق تبخیر از سطح خاک لخت از دست می‌رود، آنگاه بازده کاربرد آب ۸۰٪ خواهد بود.

بهره‌وری آب

بهره‌وری یعنی «چه مقدار ستانده به ازای یک واحد نهاده، تولید می‌شود» (Molden و همکاران، ۲۰۱۰). توجه داشته باشید که ورودی و خروجی نیازی به واحدهای یکسان ندارند. بهره‌وری آب کشاورزی بعنوان عملکرد (محصول تولید شده: حاصل مفید برای منظور کشاورز از کاشت گیاه) به ازای هر واحد آب داده شده تعریف می‌شود؛ به عنوان مثال، ۵۰ کیلوگرم غلات به ازای هر ۱ متر مکعب آب. با برجسته شدن محدودیت منابع آب در دهه‌های اخیر، کشاورزی مدرن به دنبال افزایش «عملکرد تولید به ازای هر واحد آب مصرفی»، چه در شرایط دیم و چه در شرایط آبی، بوده است.

برخلاف WUE، بهره‌وری می‌تواند به مزایای کاربرد چند منظوره آب نیز اشاره داشته باشد. بعنوان مثال، افرادی که از آب هم برای آبیاری و هم برای شیلات استفاده می‌کنند، مانند مزارع تولید ترکیبی برنج و میگو، به وضوح با افزایش بهره‌وری آب، نه لزوماً با افزایش WUE، به معیشت خود و اقتصاد منطقه کمک می‌کنند. در واقع بهره‌وری به تمامی مزایای حاصل از کاربرد آب (درآمد، شغل، تولید محصول) به نسبت حجم آب استفاده شده اشاره دارد. بهره‌وری بیانگر خروجی «زیستی-اقتصادی» حاصل از مقدار ناخالص آب مصرفی است. لذا برخلاف کارایی مصرف آب (WUE)، بهره‌وری آب (WP) را می‌توان به روش‌های مختلفی مانند عملکرد بر حسب تن بر متر مکعب، درآمد بر حسب دلار بر متر مکعب، مقدار پروتئین بر حسب گرم بر متر مکعب، کالری‌های غذا بر متر مکعب نیز بیان کرد. جزئیات بیشتر را در یادداشتی که به صورت آنلاین (Ragab 2014) بعنوان بخشی از پروژه Water4Crops منتشر شده است، بخوانید. متن مزبور را می‌توانید در این آدرس زیر بیابید: <https://www.google.com/search?q=Ragab++A+note+on+water+use+efficiency+and+productivity>

نتیجه‌گیری

واضح است که هر دو اصطلاح WUE و WP در واقعیت وجود دارند؛ و علی‌رغم معانی متفاوت، به هم مرتبط هستند. بعنوان نمونه، برای افزایش WP، WUE باید افزایش یابد؛ و نه

دست رفته است، در دسترس نخواهد بود؛ علاوه بر اینکه مقدار و کیفیت آب بالادست در پایین دست نخواهد شد. در هر حال باید «سیاست افزایش کارایی کاربرد آب و صرفه‌جویی در کاربرد آب در هر مقیاسی، از مزرعه تا حوضه» اتخاذ گردد. بدیهی است از منظر هیدرولوژیک و در مقیاس حوضه، باید به تعارض تخصیص‌های بالادست و پایین‌دست توجه گردد.

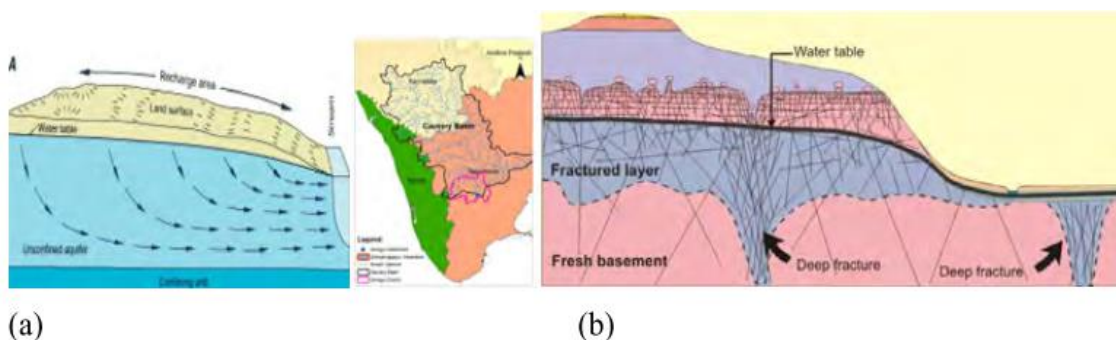
مسئله ۴- کژفهمی: معنای واقعی عناصر حسابداری آب

ایده حسابداری آب، ابتدا برای برنامه‌ریزی منابع آب مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، حسابداری آب در چرخه هیدرولوژیکی می‌تواند با مشکلات متعددی روبرو شود، بویژه که برخی از اجزاء و مولفه‌های حسابداری آب، توسط متخصصان غیر هیدرولوژی، به اشتباه درک می‌شوند. شکل (۴) عناصر بیلان آب را نشان می‌دهد.

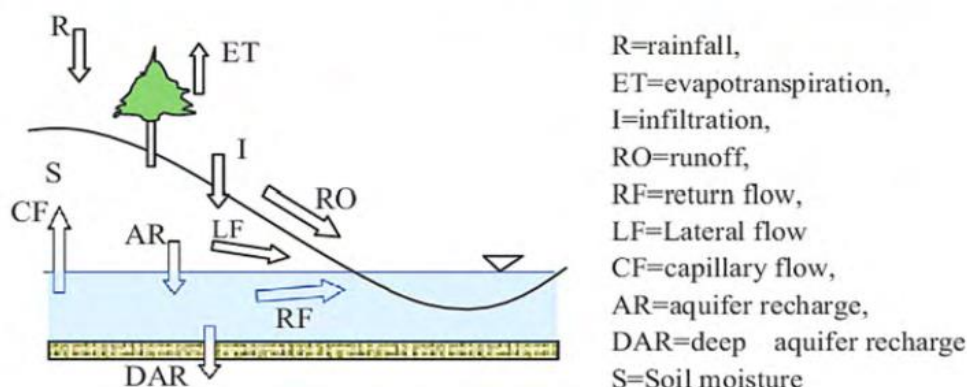
گمانه آزمایش پمپاژ، تغییر نکرد (Maréchal و همکاران، ۲۰۰۹). آنها همچنین دریافتند که سطح ایستابی همیشه از رودخانه جدا است. این امر با مشاهدات مبتنی بر عدم وجود چشمه‌ها در حوضه رودخانه و عدم وجود جریان پایه قابل اندازه‌گیری، تأیید می‌شود. در چنین سیستم دارای شکستگی، تغذیه موضعی از طریق شکستگی‌ها را نمی‌توان نادیده گرفت. وجود شکستگی‌ها (شکل ۳-ب) به عنوان یک مانع زیرزمینی عمل می‌کند. با قطع شدن سفره آب زیرزمینی، هیچ برگشتی به پایین دست از طریق جریان پایه رودخانه وجود ندارد (Maréchal و همکاران، ۲۰۰۹).

نتیجه‌گیری

بطور کلی، کارایی مصرف آب در مقیاس مزرعه و حوضه رودخانه باید بدون توجه به فرض «آنچه در بالادست از دست می‌رود در پایین دست به دست می‌آید»، بهبود یابد؛ زیرا ممکن است این فرض اصلاً رخ ندهد. حتی اگر این اتفاق بیفتد، آب از دست رفته در پایین دست در همان زمانی که از



شکل ۳- (a) موقعیت فرضی که در آن زمین‌شناسی زیرسطحی همگن ایده‌آل، جریان زیرسطحی از بالادست به پایین دست را تسهیل می‌کند. (b) موقعیت واقعی در حوضه کآوری هند، با لایه‌های زیرسطحی دارای شکستگی که مانع انتقال نفوذ عمقی از بالادست به پایین دست می‌شوند (Maréchal و همکاران، ۲۰۰۹).



شکل ۴- اجزاء بیلان آب حوضه

محدوده و مدت دوره بیلان، باید دقت اجزاء معادله بیلان افزایش یابد در مقیاس حوضه و سال، دقت کمتر؛ و در مقیاس منطقه ریشه گیاه و روز، دقت بسیار بیشتر مورد نیاز

بیلان آب یعنی: «نرخ تغییر در ذخایر آب حوضه (ΔS)»، برابر است با «نرخ جریان ورودی آب به حوضه (I)» منهای «نرخ جریان خروجی آب از حوضه (O)». با خردتر شدن وسعت

مسئله ۵- کژباوری: با سنجش از دور می‌توان مستقیماً CWR را اندازه‌گیری نمود

در حال حاضر، تصاویر ماهواره‌ای به طور گسترده برای کاربردهای مختلفی در دسترس هستند. برخی از این تصاویر برای فعالیت‌های کشاورزی مفید هستند و برای به دست آوردن توزیع مکانی ET، رطوبت خاک، شاخص سطح برگ (LAI)، زیست توده، پوشش زمین و سطح تنش آبی گیاهان استفاده می‌شوند. با این حال، باید توجه نمود که این پارامترهای حاصل از سنجش از دور، مبتنی بر اندازه‌گیری مستقیم نیستند. بعنوان مثال، ET یا رطوبت خاک از تبدیل/پردازش سایر پارامترهای سنجش از دور (مانند دما) بدست می‌آید. فرآیند تبدیل شامل الگوریتم‌ها، مدل‌ها و معادلات تجربی است.

در طول این فرآیند تبدیل/پردازش، از برخی تقریب‌ها و فرضیات برای به دست آوردن نتایج معنادار استفاده می‌شود. این فرآیند می‌تواند منجر به درجه خاصی از بی‌دقتی و رشد عدم قطعیت در نتایج شود؛ لذا لازم است در برابر داده‌های واقعی زمینی کالیبره شود. همچنین، این کالیبراسیون اغلب در مقیاس کوچکتری انجام می‌شود؛ که خود این عدم تطابق بین مقیاس‌ها موجب رشد بیشتر بی‌دقتی و عدم قطعیت در اینگونه داده‌ها (حاصل از سنجش از دور) می‌شود. در این بخش علت عدم دقت برآوردهای تبخیرتعرق (ET) و کمبود رطوبت خاک (SMD) حاصل از سنجش از دور بررسی می‌شود.

برآورد تبخیرتعرق از تصاویر ماهواره‌ای

دمای سطح زمین (LST) و طول زبری^{۱۲} (Z_0) در تصاویر ماهواره (سنجش از دور) برای محاسبه شار گرمای محسوس و نهان لحظه‌ای استفاده می‌شوند. تخمین مقاومت سطح، مسئله مهمی در اکثر مدل‌های برآورد سنجش از دور ET، به ویژه برای تخمین مقاومت‌های تاج گیاهان و آیرودینامیکی است. همچنین در بسیاری از روش‌های تجربی، داده‌های سنجش از دور مستقیماً در مدل‌های نیمه تجربی برای تخمین ET با استفاده از داده‌های مادون قرمز حرارتی (TIR) استفاده می‌شود. بعلاوه، میزان مصرف آب گیاه با استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی و داده‌های ماهواره‌ای براساس محاسبه اختلاف دمای تجمعی ($T_s - T_a$) برآورد می‌گردد (T_s بدست آمده از LST و T_a دمای هوا بدست آمده از اندازه‌گیری‌های زمینی).

است.}. معادله زیر بیان بیلان محدوده ریشه گیاه است؛ که در آن P بارندگی {یا آبیاری}، R رواناب، G تغذیه آب‌های زیرزمینی (نفوذ عمقی) و ET تبخیرتعرق می‌باشند:

$$\Delta S = P - R - G - ET \quad (4)$$

عوامل نادرستی حسابداری آب (در محدوده ریشه گیاهان)

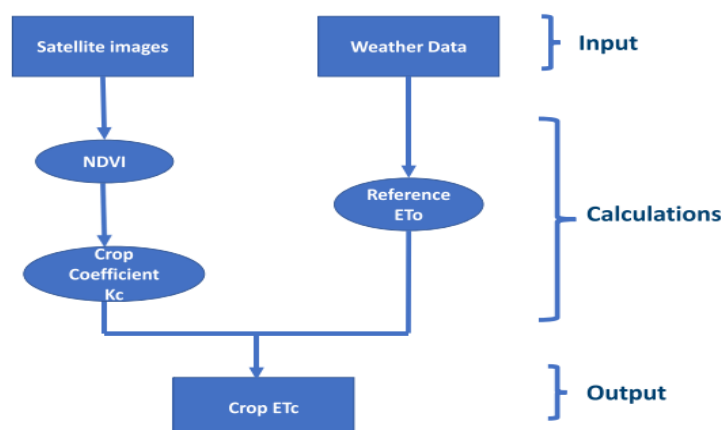
P: بارشی که معمولاً در حسابداری آب استفاده می‌شود، کل بارش است؛ که شامل برگاب (خیس‌شدگی تاج گیاهان از بارش) نیز هست. برگاب می‌تواند قابل توجه باشد، به خصوص در مزارع با کشت متراکم و یا در جنگل‌ها. اما آنچه در بیلان باید استفاده شود، سهمی از بارش است که در سطح خاک برای نفوذ و/یا رواناب فراهم می‌شود؛ یعنی «بارش خالص» ($P_{net} = P$) که معادل است با «بارش کل منهای برگاب». با این حال، اکثر متخصصان از کل بارندگی به جای بارندگی خالص استفاده می‌کنند. این امر منجر به تخمین بیش از حد ورودی اصلی به معادله تعادل آب/محاسبه آب می‌شود.

G: تعیین کمیت تغذیه آب‌های زیرزمینی (نفوذ عمقی بدون بازگشت) دشوار است. اکثر متخصصان، تغذیه آب‌های زیرزمینی را بعنوان پارامتر مجهول معادله تعادل آب یا به عنوان تفاوت بین بارندگی ناخالص و تبخیر و تعرق پتانسیل در نظر می‌گیرند، که نادرست است. روش‌های درست برای تعیین کمیت تغذیه شامل تعادل جرم کلرید، نوسانات آب‌های زیرزمینی، تحقیقات ژئوفیزیکی، آزمایش‌های پمپاژ و مدل‌های جریان آب‌های زیرزمینی است. اینها اندازه‌گیری‌های مستقیم نیستند؛ زیرا هیچ دستگاهی برای اندازه‌گیری تغذیه آب‌های زیرزمینی در دسترس نیست. تخمین نادرست تغذیه، تأثیر منفی بر دقت بیلان دارد.

ET: اغلب تبخیرتعرق برای معادله بیلان و حسابداری آب بر اساس تبخیرتعرق پتانسیل (PET) برآورد می‌شود؛ اما، آنچه باید استفاده شود ET واقعی است نه پتانسیل. در بیشتر مناطق خشک و نیمه‌خشک، تبخیرتعرق واقعی (ET_a) بسیار پایین‌تر از PET است. حتی در مناطق مرطوب هم بین این دو تفاوت قابل توجه وجود دارد.

نتیجه‌گیری

درک اشتباه و برآورد نادقیق از سه عنصر بارش، تبخیرتعرق و تغذیه آب‌های زیرزمینی، بویژه توسط غیر هیدرولوژیست‌ها، اشتباه در محاسبات حسابداری آب را در پی دارد. برآورد درست بارش خالص، تبخیرتعرق واقعی (نه پتانسیل) و نیز نفوذ عمقی در محدوده ریشه گیاه برای برنامه‌ریزی صحیح آبیاری (بر اساس حسابداری آب در منطقه ریشه) مورد نیاز است.



شکل ۵- مثالی از محاسبه غیرمستقیم تبخیرتعرق گیاهان با استفاده از داده‌های آب‌وهوا و داده‌های ماهواره‌ای (شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده) (NDVI)

رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه (θ_{FC}) بعنوان SMD (کمبود رطوبت خاک) شناخته می‌شود.

مقدار آبیاری که SMD را به صفر می‌رساند، محاسبه و بعنوان CWR معرفی می‌شود. اما، آیا می‌توان علی‌رغم عدم قطعیت پارامترهای آب و خاک (ناشی از تغییرات مکانی طبیعی: ناهمگنی‌های خاک، رطوبت خاک، توپوگرافی، پوشش زمین و بارندگی)، یک مقدار SMD را بعنوان نماینده مزرعه/منطقه معلوم و معرفی نمود؟

اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک، به ترتیب از مقیاس نقطه‌ای تا مقیاس بزرگتر شامل موارد مندرج در جدول (۱) و شکل (۶) است.

داده‌های ماهواره‌ای توزیع مکانی آلبیدو، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده تفاضلی (NDVI) و دمای سطح برای تخمین ET روزانه استفاده می‌شوند (شکل ۵)؛ اما برای کنترل صحت، نتایج باید با اندازه‌گیری‌های زمینی اعتبارسنجی متقابل شوند. نقش سرعت باد و تأثیر آن بر مقادیر ET باید به طور کامل بررسی شود، زیرا ممکن است بیشترین تأثیر را بر ET و قابلیت اطمینان روش‌های مبتنی بر ورودی‌های سنجنش از دور داشته باشد.

بدست آوردن SMD از داده‌های سنجنش از دور

گاهی اوقات از رطوبت خاک برای تخمین CWR استفاده می‌شود. اختلاف بین رطوبت موجود/واقعی خاک (θ_i) و

جدول ۱- روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک، در مقیاس نقطه‌ای تا مقیاس بزرگتر

نمونه‌برداری خاک	اندازه‌گیری نقطه‌ای، مستقیم، با تفاضل وزن خاک تر و خشک نیازمند نمونه‌برداری از خاک (دست‌خورده و یا نمونه استوانه‌ای دست‌نخورده)
TDR	
پروپ نوترون	اندازه‌گیری نقطه‌ای، غیرمستقیم، در محل، دست‌نخورده، نیازمند واسنجی
انواع محیط متخلخل (بلوک گچی، پروپ پروفیل)	
توموگرافی مقاومت الکترومغناطیسی (ERT)	اندازه‌گیری، غیرمستقیم، در آزمایشگاه (کمی بزرگتر از نقطه‌ای) نمونه با حجم بزرگ و دست‌نخورده، نیازمند واسنجی
پرتوهای کیهانی (شعاع اندازه‌گیری ≈ 500 متر)	اندازه‌گیری، غیرمستقیم، محدوده‌ای، نیازمند واسنجی
از تصاویر ماهواره	اندازه‌گیری، غیرمستقیم، محدوده‌ای تا منطقه‌ای، نیازمند واسنجی مقیاس وابسته به قدرت تفکیک تصویر، و مقیاس‌های خردتر نیازمند واسنجی دقیق‌تر

بالای خاک (و برعکس) است. باید افزود که COSMOS غیرمخرب و کاملاً غیرفعال است. رطوبت خاک با این روش نقطه‌ای نیست؛ بلکه نماینده یک مساحت حدوداً ۱۰۰ هکتاری است ($\approx$ یک کیلومتر مربع؛ محدوده‌ای با شعاع بین ۳۰۰ تا ۷۰۰ متر). برآورد رطوبت خاک برای چنین مساحتی، البته نیاز به اندازه‌گیری‌ها در مقیاس نقطه‌ای را (به دلیل وجود ناهمگنی‌های احتمالی) برطرف نمی‌کند. تاکنون روش COSMOS با موفقیت بکار گرفته شده است که برای مثال

نمونه‌ای از نتایج بدست آمده توسط COSMOS در ادامه آمده است. در این سیستم، سرعت نوترون‌هایی که توسط پرتوهای کیهانی در هوا تولید می‌شوند، اندازه‌گیری می‌شود. نوترون‌های پرنرژی تولید شده توسط پرتوهای کیهانی توسط اتم‌های هیدروژن موجود در آب خاک کند و تا حدی جذب می‌شوند، در حالی که برخی از نوترون‌ها از خاک پراکنده شده و توسط سنجنده‌ها شمارش می‌شوند. تعداد کمتر نوترون‌های سریع شناسایی شده توسط کاوشگر، نشان‌دهنده رطوبت

علاوه بر این، رویکردهای دیگری مانند روش‌های «وارونه‌سازی» برای محاسبه رطوبت سطحی خاک از اندازه‌گیری‌های دمای سطح زمین (LST) و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) توسعه یافته‌اند. با این حال، این روش‌ها دارای ضعف‌ها و خطاهایی بوده‌اند، زیرا با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری نقطه‌ای رطوبت خاک مانند نوترون‌متر، PR2، TDR، نمونه‌گیری از خاک یا سایر روش‌های مقیاس نقطه‌ای کالیبره شده‌اند. این موضوع نمونه‌ای روشن از عدم تطابق بین مقیاس‌های سنجش از دور و اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای است.

می‌توان به پژوهش Ragab و همکاران (2017b) اشاره نمود. این سامانه اکنون سراسر بریتانیا را پوشش می‌دهد و ایستگاه‌هایی نیز در بخش‌هایی از هند و چین مستقر شده‌اند که اخیراً در ۱۶ نوامبر ۲۰۲۳ توسط شبکه خبری بین‌المللی CNN گزارش شده است (لینک: <https://edition.cnn.com/world/cosmic-radiation-monitor-floods-droughtscn-spc/index.html>). همچنین پژوهشی که توسط انتشارات wiley به چاپ رسید، از COSMOS و سنتیلومتر استفاده شده است^{۱۳}.



شکل ۶- روش‌های تعیین رطوبت در خاک

حرارتی است و نشان دهنده پایداری زمانی دمای مواد است. اینرسی حرارتی برای تخمین رطوبت خاک لایه زیرسطحی استفاده شده است، زیرا مقدار اینرسی حرارتی آب و سایر مواد به اندازه کافی با یکدیگر متفاوت است و از نظر تئوری می‌توان نشان داد که اینرسی حرارتی و محتوای آب خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری دارند. اینرسی حرارتی را می‌توان از یک مدل بیلان حرارتی با LST اندازه‌گیری شده توسط ماهواره‌های مدار قطبی و داده‌های هواشناسی، برآورد نمود.

سنجش از دور با امواج میکرو (Microwave)

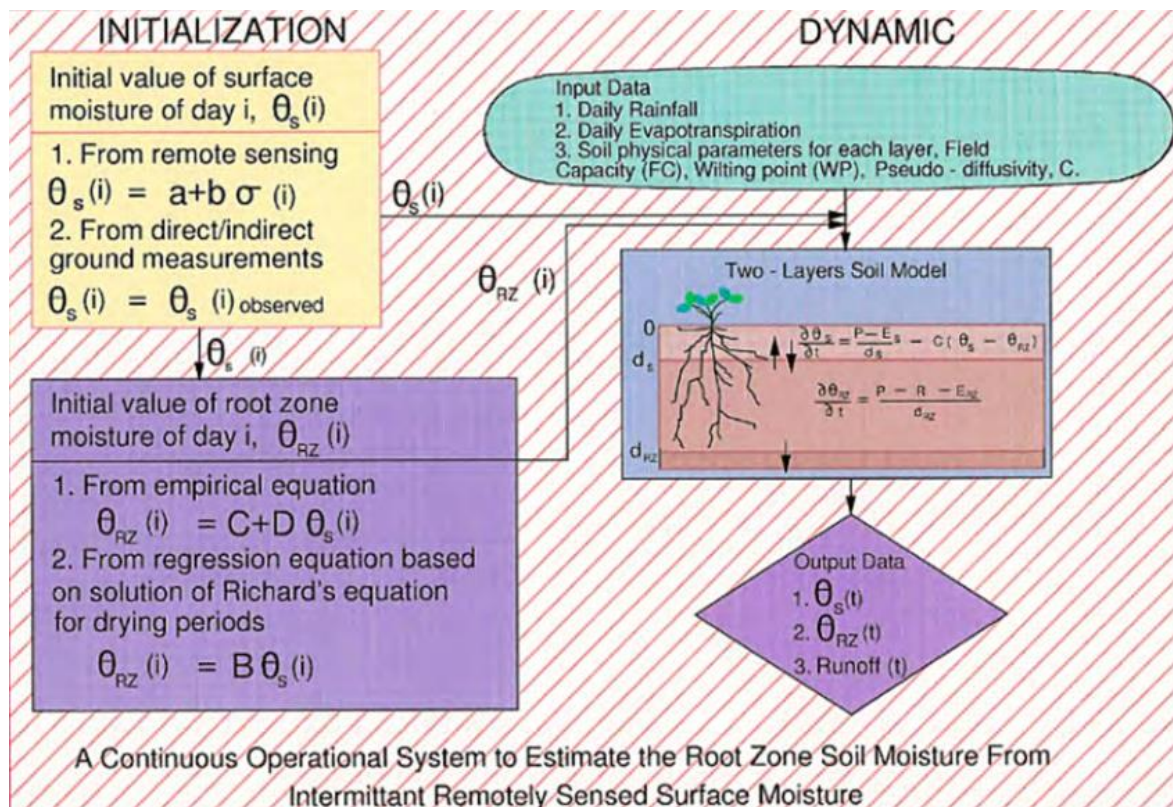
طول موج‌های معمول، فقط چند سانتی‌متر بالایی آب خاک و آب تاج گیاهان را مشاهده می‌کنند (و نه تمامی پروفیل خاک را). در رویکردهای برآورد رطوبت خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های رادیومتری مایکروویو، مهم‌ترین عاملی که بر دقت تأثیر می‌گذارد، پوشش گیاهی (بویژه پوشش گیاهی متراکم مانند ذرت و جنگل) است. مایکروویوهای فعال به امواج برگشتی وابسته هستند و این به مقدار ثابت دی‌الکتریک خاک مربوط می‌شود. در مقابل، مایکروویوهای غیرفعال به تابش یا دمای روشنایی وابسته هستند. مورد دوم به قابلیت انتشار و دمای فیزیکی بستگی دارد. اینرسی حرارتی، جذر حاصل ضرب ظرفیت گرمایی حجمی و رسانایی

مشکلات و محدودیت‌های مقیاس ET و SMD در سنجش از دور

عدم تطابق مقیاس بین داده‌های سنجش از دور در مقیاس بزرگ، و اندازه‌گیری‌های میدانی تبخیرتعرق یا رطوبت خاک در مقیاس نقطه‌ای، یک چالش جدی در کالیبراسیون محصولات سنجش از دور است. محصولات سنجش از دور (مانند تبخیرتعرق یا رطوبت خاک) در مقیاس بزرگ، معمولاً با کاربرد الگوریتم‌ها، معادلات تجربی و مدل‌ها بدست می‌آیند. در طول این فرآیند، تقریب‌ها و فرضیاتی وجود دارد که سطح دیگری از عدم قطعیت و بی‌دقتی را ایجاد می‌کند. محدودیت دیگر، رطوبت خاک سنجش از دور است که حداکثر به عمق ۱۰ تا ۱۲ سانتی‌متر بالایی خاک محدود می‌شود. در حالیکه برآورد SMD/CWR برای آبیاری به رطوبت خاک منطقه ریشه نیاز دارد. به منظور تخمین رطوبت خاک زیرسطحی (منطقه ریشه) مدلی با استفاده از رطوبت خاک سنجش از دور (در لایه بالایی) توسعه یافته است (شکل ۸) که در بریتانیا و ایالات متحده واسنجی و اعتبارسنجی شده است.

نتیجه‌گیری

محصولات سنجش از دور رطوبت خاک یا ET در مقیاس بزرگ، مبتنی بر اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم هستند و نیاز به کالیبره شدن دارند. معمولاً داده‌های دما به ET تبدیل می‌شوند و داده‌های ضرایب پراکندگی برگشتی/ثابت دی‌الکتریک (مبتنی بر مایکروویو) به رطوبت خاک تبدیل می‌شوند. روش‌ها/مدل‌ها/آلگوریتم‌های تولید محصولات سنجش از دور (ET و SMD)، سهم عمده‌ای در بی‌دقتی و عدم قطعیت نتایج بدست آمده از فناوری سنجش از دور دارند. استفاده از اندازه‌گیری‌های واقعی ET در مقیاس بزرگ با استفاده از سنتیلومترها (تا ۱۰ کیلومتر) و COSMOS (منطقه شعاع ۳۰۰-۷۰۰) به ترتیب برای واسنجی ET و رطوبت خاک می‌تواند عدم قطعیت و بی‌دقتی این محصولات سنجش از دور را کاهش دهد. لذا نتایج حاصل را برای برنامه‌ریزی آبیاری بطور کلی نامناسب سازد. روش ارائه شده در شکل ۸، تا حدودی برخی از این ایرادها را تعدیل می‌کند.



شکل ۸- پیش‌بینی رطوبت خاک لایه زیرسطحی با استفاده از داده‌های سنجش از دور لایه بالایی (Ragab, ۱۹۹۵)

این حال، شوری مزرعه را نمی‌توان به طور دقیق با این روش‌ها (بویژه روش‌های آزمایشگاهی) اندازه‌گیری کرد. شوری بیان شده به عنوان رسانایی الکتریکی (EC) که در آزمایشگاه با استفاده از عصاخمه خمیر اشباع (ECe) اندازه‌گیری می‌شود، نشان دهنده شوری مزرعه نیست؛ زیرا رطوبت خاک مزرعه در آزمایشگاه تغییر می‌کند. شوری مزرعه با رطوبت خاک که

مسئله ۶ الف- کژباوری: شوری مزرعه در آزمایشگاه قابل اندازه‌گیری دقیق است

شوری خاک در مزرعه، با استفاده از روش‌های مختلف (از جمله حسگرهای شوری درجا، یا با نمونه‌گیری از خاک و سپس تعیین شوری در آزمایشگاه) قابل اندازه‌گیری است. با

مسئله ۶ ب- کژفهمی: آبتشویی ثابت در هر آبیاری

بطور کلاسیک، و در متون درسی، کسر آبتشویی باید به هر آبیاری افزوده شود. بسیاری از متخصصان آبیاری هم بطور خودکار کسر آبتشویی را در کل نیاز آبیاری اضافه لحاظ می کنند. حتی از آن هم ضعیف تر اینکه برخی از متخصصان مقدار ثابتی، مانند ۱۵٪ آب اضافی در هر آبیاری به عنوان کسر آبتشویی، صرف نظر از سطح شوری خاک یا سطح تحمل محصول و بدون نظارت بر شوری خاک، اضافه می کنند. ظاهراً منظور ایشان، اقدام پیشگیرانه است! با این حال، راه های بهتری برای جلوگیری از تجمع نمک در منطقه ریشه و مهار شوری خاک وجود دارد. این موضوع در زیر مورد کنکاش قرار گرفته است.

کسر آبتشویی معمولاً براساس نسبت شوری آب آبیاری به شوری آب زهکشی یا شوری خاک منطقه ریشه محاسبه می شود. با این حال همانطور که قبلاً توضیح داده شد، شوری منطقه ریشه اگر در آزمایشگاه اندازه گیری شود، ممکن است نماینده شوری مزرعه نباشد و می تواند منجر به برآورد نادرست کسر آبتشویی شود. رایج ترین معادله برای CWR که شامل کسر آبتشویی نیز هست، عبارت است از:

$$IR = [K_c \times ET_0] / E_i - R + LR \quad (6)$$

که در آن IR نیاز آبیاری، میلی متر؛ ET_0 تبخیر و تعرق مرجع، میلی متر؛ K_c ضریب گیاهی (Allen و همکاران، ۱۹۹۸)؛ E_i راندمان آبیاری، اعشار؛ R آب دریافتی گیاه از منابعی غیر از آبیاری (بعنوان نمونه: بارندگی)، میلی متر؛ و LR مقدار آب مورد نیاز برای آبتشویی نمک ها، میلی متر، هستند.

کژفهمی در مورد زمان، چگونگی و میزان آبتشویی

چه زمانی؟ آبتشویی تنها زمانی لازم است که شوری خاک از حد تحمل گیاه فراتر رود. در واقع، آبتشویی باید کمی قبل از وقوع این وضعیت انجام گیرد تا به گیاه تنش وارد نگردد.

چگونه؟ در شرایطی که بازده (راندمان) آبیاری ضعیف باشد و در منطقه ای که وقوع گاهگاه بارش ها معمول است، استفاده از آب آبتشویی فقط بصورت فصلی توصیه می شود؛ و آبتشویی پس از هر آبیاری توصیه نمی شود، مگر اینکه در صورت عدم آبتشویی، شوری خاک از حد تحمل گیاه فراتر رود.

در شرایطی که آب آبیاری لب شور و آبیاری بی دقت باشد، افزودن آب بیشتر (بازده ضعیف، کاربرد نایجای آبتشویی) به معنای افزودن نمک بیشتر است؛ کاربرد مواد مغذی و کودها این وضعیت را پیچیده تر می کند. همچنین، افزودن آب بیشتر WP و WUE را کاهش می دهد. علاوه بر این، استفاده از آب برای آبتشویی، به معنای: آب کمتر برای آبیاری در محدودیت منابع آب؛ هدررفت منابع آب، نیروی کار، انرژی و پول و نیز افزایش حجم زهاب است. بنابراین برآورد دقیق CWR، بویژه هنگام آبیاری با آب های لب شور/شور، بسیار مهم است.

معمولاً کمتر از رطوبت اشباع است، مرتبط است. شوری خاک در مزرعه به تناسب کاهش رطوبت خاک، افزایش می یابد و لذا از آنچه در عصاره خمیر خاک اشباع اندازه گیری می شود، بیشتر است. به همین دلیل است که متخصصان دریافتند گیاهانی که در مزرعه رشد می کنند می توانند سطوح شوری بالاتری را نسبت به آنچه در چندین دستورالعمل گزارش شده است، تحمل کنند. دلیل این امر این است که دستورالعمل ها عمدتاً بر اساس مقدار « E_{ce} » که به عنوان شوری عصاره خمیر خاک اشباع شناخته می شود، تدوین شده اند؛ که شوری رقیق شده و کمتر از شوری واقعی مزرعه در رطوبت های واقعی خاک مزرعه (پایین تر از اشباع) است.

شوری و رطوبت خاک باید همزمان و در عمق یکسان اندازه گیری شوند. تلاش هایی برای معرفی یک ضریب اصلاحی بر اساس نسبت رطوبت خاک مزرعه به رطوبت اشباع خاک برای اصلاح مقادیر E_{ce} انجام یافته است. باید در نظر داشت که گیاهان در دامنه رطوبتی بین رطوبت خاک در حال پژمردگی (θ_{wp}) و نزدیک به رطوبت خاک اشباع (θ_{fc}) رشد می کنند. در این محدوده، شوری از کم در نقطه اشباع به زیاد در نقطه پژمردگی می رسد. نمایش این مقادیر با اندازه گیری های آزمایشگاهی دشوار است. دقیق ترین اندازه گیری های شوری مزرعه باید با استفاده از حسگرهای شوری همراه با حسگرهای رطوبت خاک انجام شود تا اندازه گیری های مداوم شوری و رطوبت خاک در اعماق مختلف فراهم شود. با این حال، تغییرپذیری مکانی و ناهمگنی خاک، اندازه گیری های بزرگ مقیاس را مطلوب تر می کند. بنابراین، مقادیر شوری خاک با مقدار رطوبت خاک درهم تنیده است. کاربران مدل ها اغلب در مقایسه شوری خاک مدل با شوری آزمایشگاهی اندازه گیری شده از عصاره خمیر اشباع، دچار اشتباه می شوند. علاوه بر این، رابطه شوری با عملکرد یا سایر پارامترهای محصول با استفاده از روابط تناسبی بهتر توصیف می شود (بعنوان نمونه: عملکرد نسبی در مقابل شوری به جای عملکرد مطلق در مقابل شوری).

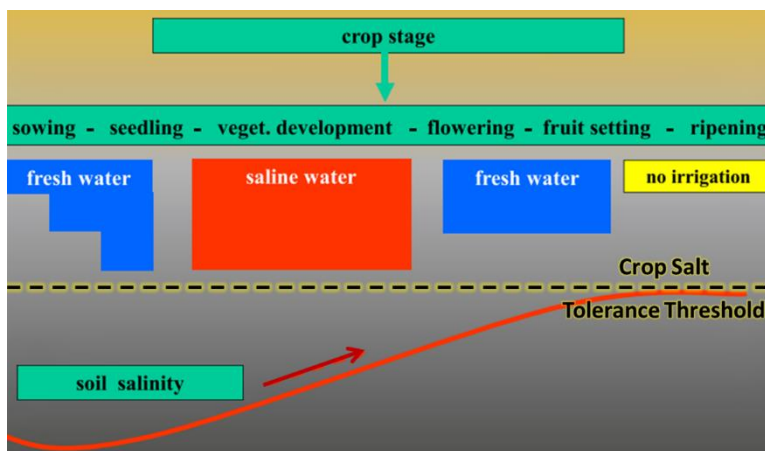
نتیجه گیری

اندازه گیری های پیوسته و درجا از رطوبت و شوری خاک به طور همزمان، دقیق تر از روش های آزمایشگاهی هستند. دقیق ترین اندازه گیری های شوری میدانی با استفاده از حسگرهای شوری همراه با حسگرهای رطوبت خاک انجام می شود تا اندازه گیری های پیوسته شوری و رطوبت خاک را در عمق یکسان فراهم کند. با این حال، تغییرپذیری مکانی و ناهمگنی خاک، اندازه گیری های بزرگ مقیاس برای شوری میدانی را مطلوب تر می سازد (بعنوان مثال: استفاده از دستگاه القای الکترومغناطیسی (EMI) نصب شده روی وسیله نقلیه همراه با GPS، برای اندازه گیری شوری میدانی در پهنه مزرعه).

وقتی دو منبع آب (آب شیرین و آب شور) در دسترس باشند، استفاده از آب شیرین در ابتدای فصل رشد، وقتی جوانه‌ها حساس به شوری هستند؛ و سپس آبیاری با آب شور در مرحله بعدی، زمانی که گیاه حساسیت کمتری دارد، توصیه می‌شود (شکل ۹). همچنین (وقتی دو منبع آب شیرین و آب شور در دسترس باشند) با آبیاری تحت فشار، برای جلوگیری از تجمع نمک در سطح خاک، در هر آبیاری ابتدا کاربرد آب شور و در انتهای آن کاربرد آب شیرین توصیه می‌شود. با این روش، جریان پیستونی^{۱۴} شکل می‌گیرد که موجب انتقال آب شور به عمق بیشتر خاک، و لذا کاهش خطر تجمع نمک‌ها در سطح خاک، می‌شود.

برای کاهش تجمع نمک در خاک و در عین حال کاهش آبشویی، بکارگیری برخی رویکردهای دیگر در مدیریت مزرعه و مدیریت آبیاری ضروری است؛ مانند انتخاب مناسب‌ترین سیستم آبیاری و نیز مدیریت صحیح خاک. استفاده از آب شور نیاز به یک سیستم آبیاری مناسب دارد. در آبیاری بارانی کاربرد آبپاش‌های نزدیک سطح خاک (زیر تاج گیاهان) و در آبیاری قطره‌ای استفاده از نوارهای زیرسطحی توصیه می‌شوند. با این حال، آبیاری زیرسطحی نانو قطره‌ای (بسیار کم جریان؛ حدود ۰/۱ تا ۰/۳ لیتر در ساعت) با جریان مداوم، گزینه خوبی برای حفظ رطوبت خاک (رقیق کردن نمک‌ها و کاهش خطر تنش شوری) و حتی صرفه‌جویی در آب آبیاری است.

Crop stage دوره رشد گیاه
Sowing کاشت
Seedling نشاء کاری
veget. Development توسعه سبزینه
Flowering گلدهی
Ripening رسیدن میوه
Fresh water آب با کیفیت
آب شور saline water
شوری خاک soil salinity
Crop salt tolerance threshold حد آستانه شوری قابل تحمل گیاه



شکل ۹ - مدیریت (کاربرد توأم آب شیرین و آب شور) برای آبیاری طی دوره رشد گیاه نسبتاً متحمل به شوری

می‌توانند به عنوان یک ابزار مدیریتی خوب برای پیش‌بینی تأثیر شوری بلندمدت بر خاک، گیاه، آب‌های زیرزمینی و نیاز به آبشویی بدون نیاز به انجام آزمایش‌های میدانی استفاده شوند.

مسئله ۷ الف- کژفهمی: نتایج مدل‌های بخوبی واسنجی و اعتبارسنجی شده، بی‌دقتی و عدم قطعیت ذاتی ندارند!

برخی از کاربران مدل‌ها، بر این باورند که نتایج مدل‌های خوب واسنجی‌شده و معتبر فاقد عدم قطعیت هستند. اگرچه مدل‌ها در سالیان اخیر بدلیل افزایش دسترسی به داده‌ها و بهبود دقت اندازه‌گیری (با فناوری‌های جدید) بهبود یافته‌اند، اما باید توجه نمود که حتی با وجود کارایی خوب آن‌ها طی فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی، این مدل‌ها دارای منابع «خطای ذاتی» هستند. بنابراین، نتایج شبیه‌سازی‌ها توسط این مدل‌ها همچنان دارای عدم قطعیت هستند. عدم قطعیت و دقت مدل ممکن است با توجه به مقیاس مکانی، گام زمانی و دقت داده‌ها تغییر کند. لذا، بهترین شیوه آن است که در کنار نتایج شبیه‌سازی شده، عدم قطعیت آنها نیز گزارش گردد.

مدیریت خاک نیز هنگام استفاده از آب شور برای آبیاری مهم است. آماده‌سازی زمین برای اطمینان از توزیع یکنواخت آب آبیاری، و نفوذپذیری، در جهت کنترل بهتر شوری ضروری است. زیرشکنی و شخم زدن، فشردگی را از بین می‌برد و نفوذپذیری و آبشویی آب را بهبود می‌بخشد. عملیات ویژه مانند شخم عمیق، افزودن و مخلوط کردن شن و ماسه با لایه خاک و افزودن مواد آلی، گچ یا کود سبز، نفوذپذیری خاک را بهبود می‌بخشد. خاک‌ورزی حفاظتی (بدون خاک‌ورزی یا حداقل خاک‌ورزی) مزایایی دارد، زیرا تبخیر خاک را کاهش می‌دهد، دسترسی به آب را افزایش می‌دهد، شوری سطح را کاهش می‌دهد، مواد آلی را افزایش می‌دهد، فرسایش خاک را کاهش می‌دهد، دسترسی به مواد مغذی را افزایش می‌دهد، استفاده از مواد شیمیایی کشاورزی و ماشین‌آلات را کاهش می‌دهد و نهایتاً موجب کاهش نیاز به نیروی کار می‌شود. همچنین وجود یک سیستم زهکشی کارآمد برای کنترل سطح آب زیرزمینی، ضروری است. شور شدن یک فرآیند آهسته است و لذا خطر آن ممکن است دست کم گرفته شود. اما، مدل‌ها برای پیش‌بینی‌های بلندمدت مفید هستند و به کمک آنها می‌توان عواقب این مخاطره را آشکار نمود. مدل‌های کالیبره شده و اعتبارسنجی شده (مانند SALTMED)

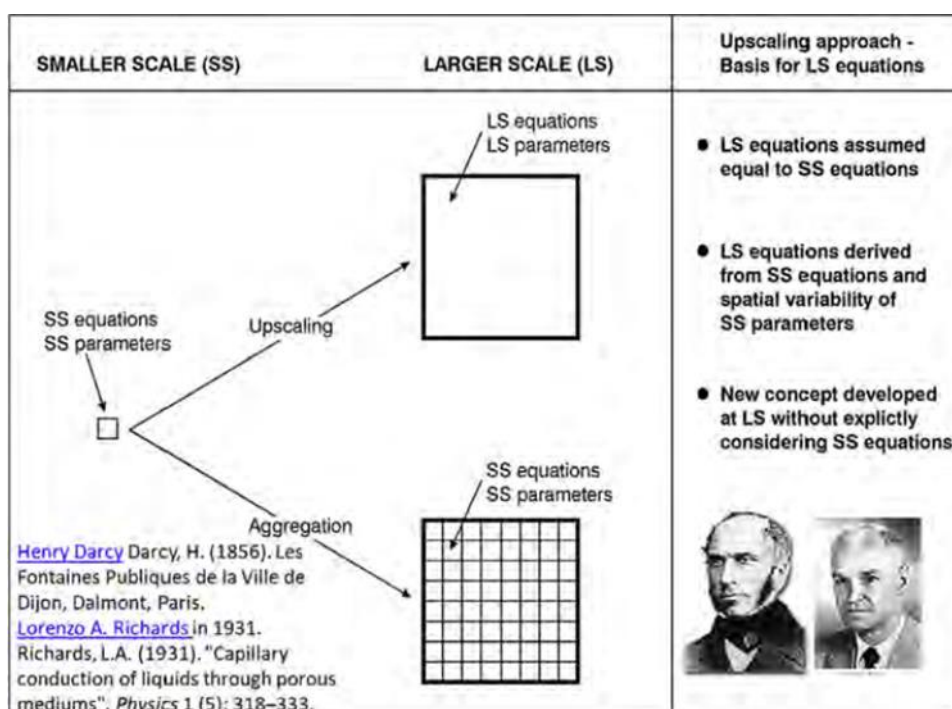
فرآیندهای فعال در مقیاس حوضه رودخانه داشته باشد (شکل ۱۰ را ببینید).

۳. عدم قطعیت نتایج را می توان به فرضیات مدل سازی، صورت بندی فرآیندها در مدل (سازوکار)، فرمول های ریاضی و حتی طرح عددی حل مسئله نسبت داد. علاوه بر این، در واقعیت تمامی فرآیندها بطور یکپارچه و همزمان عمل می کنند. اما مدل ها چنین نیستند؛ آن ها از ترتیب برنامه کامپیوتری پیروی می کنند. اینکه تبخیر بعد از نفوذ محاسبه شود یا قبل از آن، احتمالاً نتایج متفاوتی به بار می آورد. در نهایت اغلب با ساده سازی، فرآیندهای مدل خطی فرض می شوند؛ در حالیکه در طبیعت هیچ چیز خطی نیست.

در هر حال، عدم قطعیت و بی دقتی در نتایج مدل می تواند به دلایل متعددی نسبت داده شود:

۱. شبیه سازی فرآیندهای فیزیکی در مقیاس مزرعه: اغلب مدل ها براساس معادلاتی با مقیاس نقطه ای کار می کنند. لذا، «چگونگی نمایش ناهمگنی های خاک و پوشش گیاهی»، اغلب یک چالش جدی در بکارگیری این مدل ها است. این مشکل در واسنجی مدل ها نیز رخ می نماید؛ بخصوص بدلیل وجود یا عدم وجود داده کافی و ناسازگاری مقیاس ها (بین خروجی مدل با اندازه گیری ها یا مشاهدات).

۲. فرآیندهای هیدرولوژیکی با مقیاس های زمانی و مکانی مختلف مرتبط هستند. توصیف این فرآیندها در مقیاس نقطه ای ممکن است تفسیر متفاوتی از



شکل ۱۰- مسئله مقیاس در هیدرولوژی. Adapted from Refsgaard and Butts (1999).

- درشت مقیاس سازی- انتقال اطلاعات / پارامترها از سلول (های) داده شده به سلولی بزرگتر (خُرد به کلان) است. برای نمونه از یک قطعه زمین به حوضه رودخانه، یا از یک برگ به تاج گیاه.

- ریزمقیاس سازی- انتقال اطلاعات از یک سلول داده شده به سلول های کوچکتر (کلان به خُرد) { Digital Zoom}.

- برچینش- حل مسئله با معادلات در سلول های کوچک (با معادلات برازنده همان مقیاس) و سپس تجمیع نتایج (مجموع، میانگین، ...) و انتقال به سلول بزرگتر. بر این اساس، پارامترهای سلول های خُرد (میدانی) به درستی بکار گرفته می شوند {مثال: مدل SWAT}.

مسئله ۷ ب- کژفهمی: «معنای واقعی درشت مقیاس سازی» و سردرگمی در «تفاوت درشت مقیاس سازی با برچینش»

در برخی از کاربردهای مدل، در مورد استفاده از عبارت «درشت مقیاس سازی» برای توصیف فرایندی که در واقع افزایش مقیاس نیست بلکه یک فرآیند تجمیع اجزا خُردتر در یک کل است، سردرگمی وجود دارد. این تصور غلط عمدتاً ناشی از یک کژفهمی است. برای وضوح بیشتر، شرح اصطلاحات مربوط به مقیاس سازی در زیر آمده است:

- **مقیاس سازی**- استفاده از اطلاعات در یک مقیاس مکانی یا زمانی، برای استنباط خصوصیات در مقیاسی دیگر.

در فرآیند درشت‌مقیاس‌سازی، پارامترها و معادلات فرآیند در انتقال از مقیاس کوچکتر به مقیاس بزرگتر اصلاح یا جایگزین می‌شوند. این فرآیند به سه روش انجام می‌یابد:

۱. معادلات خرد قابل کاربرد در سلول‌های کوچکتر، بدون تغییر برای سلول‌های بزرگتر معتبر فرض می‌شوند. در این حالت، فقط «پارامترهای موثر» (بر اساس خصوصیات محیط ناهمگن و رفتار توده خردمقیاس) برآورد می‌شوند. در چنین حالتی باید برای تجویز مقادیر پارامترهای کلیدی (متناظر با سلول محاسباتی در مقیاس بزرگتر)، واسنجی انجام گیرد.
۲. معادلات مقیاس کوچک در چارچوب نظری بسط داده می‌شوند؛ تا به گونه‌ای دربرگیرنده «تغییرپذیری مکانی» پارامترهای خردمقیاس باشند. این کار اغلب با توسعه یک چارچوب تصادفی انجام می‌شود. در این حالت،

امکان برآورد مستقیم پارامترهای سلول‌های بزرگ از داده‌های میدانی وجود دارد. با این حال بهتر است، روایی پارامترهای موثر با واسنجی ارزیابی شود.

۳. معادلات جدیدی برای مقیاس سلول‌های بزرگتر توسعه داده می‌شوند؛ با پارامترهای جدید.

مسئله مقیاس‌سازی نه تنها یک چالش علمی، بلکه یک مشکل عملی در مدیریت منابع آب و مدل‌سازی هیدرولوژیکی است. از آنجا که فرآیندها دارای مقیاس‌های مختلفی هستند، مدل‌های کاربردی عموماً برای مقیاسی مشخص توسعه می‌یابند؛ که مدل‌سازی هیدرولوژیکی برای آن مورد نیاز است. امروزه اهمیت اثرات مقیاس توسط کارشناسان هیدرولوژی، مدیران منابع آب و سایر متخصصان شناخته شده است (در مقیاس‌های مکانی نقطه‌ای تا دنیا؛ جدول ۲ را ببینید).

جدول ۲- مقیاس‌های مکانی در هیدرولوژی براساس Butts و Refsgaard (۱۹۹۹)

مقیاس مکانی	طول	مساحت
مقیاس نقطه‌ای	< 10 cm	
مزرعه یا کوهپایه	100 m	
مقیاس حوزه آبریز رودخانه	3-100 km	$10 - 10^4 \text{ km}^2$
مقیاس منطقه‌ای	100-1000 km	$10^4 - 10^6 \text{ km}^2$
مقیاس قاره‌ای یا جهانی	> 1000 km	$> 10^6 \text{ km}^2$

شبکه (با توصیف احتمالاتی پارامترها) و نیز تلاش‌هایی برای بدست آوردن پارامترهای موثر بعنوان نماینده هر ناحیه (در مقیاس درشت‌تر) انجام شده است. اغلب معادلات برای مقیاس حوضه رودخانه (مانند مدل‌های مفهومی بارش - رواناب) تجربی هستند؛ این مدل‌ها مختص منطقه مورد مطالعه هستند. هیدرولوژیست‌ها روش‌های مختلف انتقال آب را نیز توسعه داده‌اند و پارامترهای معرف (مشتق شده از ناهمگنی خاک و پوشش اراضی در سلول‌ها) را محاسبه کردند (Ragab و همکاران، ۲۰۱۰؛ Ragab و Bromley، ۲۰۱۰).

مسئله ۸- کژباوری: استفاده از جریان متوسط بلندمدت برای طراحی سدها و مخازن

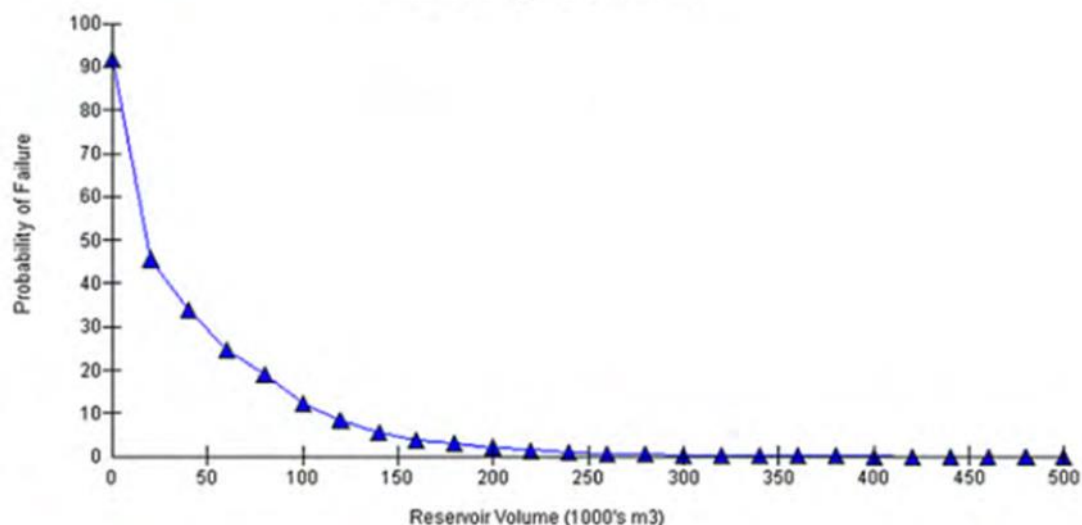
مهندسان سد و مخزن بر این باور بوده‌اند که یک جریان متوسط بلندمدت، معتبرترین عنصر در طراحی ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن است؛ و هرچه طول آمار بیشتر باشد، نتایج بیشتر قابل اعتماد است. این امر جریان‌های اوج سیلابی و شدید را نادیده می‌گیرد که در حال حاضر بدلیل تغییرات آب و هوایی، بیشتر تکرار می‌شوند. برخی از سدها که در طراحی آنها ظرفیت ذخیره‌سازی برای وقایع حدی در نظر گرفته نشده، به تازگی در رخدادهای سیلابی شدید (ناشی از تغییر اقلیم) دچار سررفتگی (overtop) شده و از بین رفته‌اند (شکل ۱۱).

پرسش‌های مباحثه برانگیز عبارتند از:

۱. آیا معادلات ریاضی هیدرولوژیک برازنده اندازه‌های خرد (که اغلب بر اساس تجارب آزمایشگاهی یا مشاهدات در مقیاس قطعه زمین به دست آمده‌اند)، قابل بکارگیری در مقیاس حوضه رودخانه هستند؟
۲. چگونه می‌توان ویژگی‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده در نقاط ایزوله (مانند هدایت هیدرولیکی یا نفوذ نهایی) را در مدل‌سازی جریان‌های آب در مقیاس حوضه رودخانه (مانند تغذیه آب زیرزمینی یا جریان‌های آلاینده‌ها، مانند جریان‌های نیترات) استفاده نمود؟
۳. چگونه می‌توان تغییرپذیری مکانی این ویژگی‌ها را در شبکه‌بندی حوضه گنجانند، تا توسط مدل با سلول‌های بزرگ، به درستی استفاده شود؟ به عبارت دیگر، دقت مکانی اندازه‌گیری شده داده‌ها، چه نسبتی با اندازه تفکیک شبکه دارد؟

برخی معادلات توسعه یافته برای مقیاس نقطه‌ای (ریز)، در مقیاس‌های درشت‌تر نیز به کار می‌روند؛ با این فرض که در مقیاس‌های درشت‌تر روایی دارند. معادلات معروف Darcy (۱۸۵۶) و Richards (۱۹۳۱) نمونه‌هایی از این دست هستند. این معادلات در مقیاس‌های ریزتر (در هر سلول شبکه‌بندی حوضه رودخانه) با پارامترهای همان مقیاس بکار گرفته می‌شوند، سپس از تجمیع یا برچینش نتایج، مقادیر میانگین یا مجموع برای حوضه رودخانه مشخص می‌شوند (شکل ۱۰). تلاش‌هایی برای بهبود نتایج، با لحاظ نمودن ناهمگنی درون

Probability of Failure



شکل ۱۱- احتمال تخریب سد بدلیل سرفرتگی، با افزایش حجم مخزن کاهش می‌یابد.

۱. برآورد دقیق حجم مخزن با هدف «حداقل ریسک و احتمال شکست» با تحلیل و آزمون شکست صورت پذیرد (Ragab و همکاران، ۲۰۰۱a؛ Ragab و همکاران، ۲۰۰۱b؛ Ragab و همکاران، ۲۰۰۱). البته طراحان سعی می‌کنند هزینه‌ها را به حداقل برسانند، اما این کار با ریسک همراه است (همانطور که در شکل ۱۱ مشهود است).

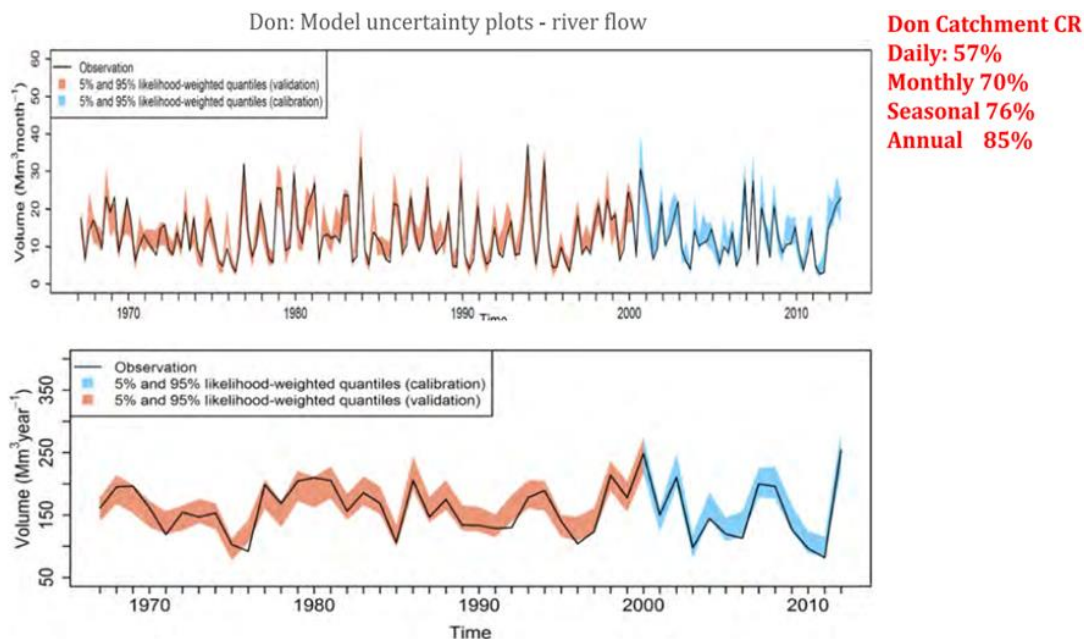
۲. انجام تجزیه و تحلیل عدم قطعیت برای جریان رودخانه؛ زیرا سطح عدم قطعیت از روزانه تا ماهانه تا فصلی تا سالانه متغیر است (Ragab و همکاران، ۲۰۲۰).

شکل (۱۲) نشان می‌دهد که چگونه تغییرات شدید مقدار آلاینده کروم در جریان‌های ماهانه با فرآیند میانگین‌گیری ناپدید می‌شوند و منحنی صاف‌تری برای سالانه ایجاد می‌شود. جزئیات گزارش شده در مقاله Ragab و همکاران (۲۰۲۰) نشان می‌دهد که سطح عدم قطعیت در نتایج در جابجایی از «روزانه به ماهانه به فصلی به سالانه»، به تدریج کاهش می‌یابد. پارامتر CR نشان داده شده در شکل (۱۲)، نشان‌دهنده آن است که چه درصدی از جریان‌های مشاهده شده رودخانه، در دامنه نتایج پیش‌برآورد (prediction) با حدود اطمینان ۵٪ و ۹۵٪ (Q5 % - Q95 %) احاطه شده‌اند. بنابراین مقدار CR بالا، نشان دهنده یک پیش‌برآورد موفق است. تحلیل جریان رودخانه دن (انگلستان) نشان داد که کاهش سطح عدم قطعیت ناشی از میانگین‌گیری، موجب بهبود تدریجی پیش‌برآورد «مقدار کروم در جریان رودخانه»، برای جریان‌های روزانه (۵۷٪)، ماهانه (۷۰٪)، فصلی (۷۶٪) و سالانه (۸۵٪) می‌گردد.

آبیاری برای تولید غذا نیازمند جریان مداوم طی فصل کشت است؛ سدها با تنظیم جریان طبیعی در مخازن خود، این نیاز را برآورده می‌سازند. اگرچه ساخت سدها، عمدتاً یک فعالیت حوزه مهندسی عمران است؛ اما طراحی مخازن سدها، نیازمند متخصصین هیدرولوژی، اقتصاد، محیط‌زیست و حتی اجتماعی است. در طراحی مخازن، ظرفیت ذخیره‌سازی باید تعیین و مشخص گردد؛ که معمولاً با استفاده از «جریان متوسط سالانه» بلندمدت صورت می‌پذیرد. سدها همچنین یک سرریز برای آزاد کردن آب مازاد (بیش از پیش‌بینی)، دارند. در سال‌های اخیر، تحت شرایط تغییر اقلیم، حوادث شدید سیل و تخریب برخی سدها بدلیل سرفرتگی مشاهده شده است.

مسئله چیست؟

آیا استفاده از «جریان متوسط بلندمدت» برای ایمنی سدها و طراحی مخازن بسنده و قابل اعتماد است؟ اگر چه جریان متوسط بلندمدت یک شاخص مفید است، اما جریان‌های اوج وقایع شدید را نمایندگی نمی‌کند. آمار جریان رودخانه برای بازه‌های روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه، به ترتیب میل به مقادیر متوسط می‌کنند (مقادیر اوج را پنهان می‌کنند). از نظر هیدرولوژی، اگر چه سوابق تاریخی طولانی‌مدت باید در نظر گرفته شوند اما در حال حاضر، بیش از پیش، به دلیل تغییر اقلیم باید به رخداد های فرین (وقایع شدید حدی) توجه شود. توجه به وقایع حدی و جریان‌های بیشینه برای ایمنی سدها و جلوگیری از مخاطره سرفرتگی (overtopping) ضروری است. در مجموع، برای امنیت سدها باید:



شکل ۱۲- تحلیل عدم قطعیت جریان ماهانه و سالانه؛ مثال: رودخانه دن انگلستان (Ragab و همکاران، ۲۰۲۰)

CR: Containment Ratio

کمپسیون بین‌المللی سدهای بزرگ با ثبت جهانی سدها، چندین گزارش در مورد ایمنی و شکست سدها با ارایه موارد گزارش شده در دنیا منتشر کرده است (ICOLD، ۲۰۲۳). برخی کشورها نیز ثبت سدها را در سطح ملی ایجاد کرده‌اند، که فهرستی از رویدادهای شکست سد را ارایه می‌نماید (بعنوان نمونه انجمن مسئولین ایالتی ایمنی سد در آمریکا). بر اساس گزارش این نهادها، شایع‌ترین علت شکست سدها، ناکافی بودن ارتفاع سد در مواجهه با حوادث سیل شدید، بوده است.

نتیجه‌گیری

طراحی ایمن سد و مخزن مستلزم توجه به جنبه‌های هیدرولوژیکی، بویژه جریان اوج در وقایع سیلابی شدید (تحت شرایط تغییر اقلیم) است. در طراحی سدها و مخازن، پیشنهاد می‌شود که تنها به تحلیل بر اساس جریان‌های متوسط سالانه بلندمدت بسنده نشود؛ بلکه حتماً تجزیه و تحلیل شکست سد برای وقایع حدی نیز انجام گیرد. در طراحی و ساخت سد، به حداقل رساندن هزینه‌ها نباید اولیوی بیش از ایمنی سد داشته باشد.

مسئله ۹- کژباوری: پایایی مترادف با ابدیت است، یعنی زمان نامحدود است!

مدیریت منابع آب با واژه پایایی (sustainability) آمیختگی ذاتی دارد. نکته این است که «پایایی، یک باید برای مدیریت منابع آب است؛ نه خود منابع آب». تردیدهایی در مورد پایایی منابع آب (یا منابع آب ابدی) وجود دارد! تاریخ نشان

این معضلی برای طراحان سد و مخزن است که چگونه ضمن در نظر گرفتن میانگین جریان سالانه (با عدم قطعیت کمتر)، به جریان‌های روزانه یا ماهانه (با اوج‌ها و وقایع حدی مشهود، دارای عدم قطعیت نسبتاً بیشتر) بپردازند؛ در حالیکه معیارهای توجیه‌پذیری فنی-اقتصادی-اجتماعی را باید رعایت کنند. به نظر می‌آید، ایمنی سدها نیازمند توجه بیشتر به جریان‌های اوج و رخداد‌های فرین (با عدم قطعیت‌های بالا) است؛ و نادیده گرفتن این موارد معمولاً منجر به وقوع فجایع می‌شود. چند نمونه از شکست و تخریب سدها ناشی از سررفتگی (overtopping) عبارتند از:

۱. شکست سد یرنا (لیبی)، در شب ۱۰ سپتامبر ۲۰۲۳ (پس از طوفان دانیل) و مرگ و میر فراوان!
۲. سررفتگی سد پائو برانکو (برزیل) بلافاصله در پایین‌دست یک زمین لغزش، در ۸ ژانویه ۲۰۲۲!
۳. شکست «سد ۱» در یک معدن سنگ آهن (برزیل)، در سال ۲۰۱۹ بدلیل روان‌گرایی استاتیک!
۴. زمین‌لغزش به دریاچه سد واجونت (شمال ایتالیا) و سپس سررفتگی و فروریزش سد، ۹ اکتبر ۱۹۶۳، موجب پدیداری موجی شد که منجر به ویرانی چندین روستا و حدود ۲۰۰۰ نفر کشته گردید!
۵. شکست سد اِدنویل (میشیگان، آمریکا)، و سپس انتقال حجم بزرگ به دریاچه سد سنفورد (بلافاصله در پایین‌دست)، باعث شد سد سنفورد در ۱۹ می ۲۰۲۰ تخریب شود!
۶. سد بانکیائو در چین که در سال ۱۹۷۵ فرو ریخت و موجب مرگ و میر حدود ۱۷۱،۰۰۰ نفر شد (بدترین شکست سد در تاریخ)!

می‌دهد که تعداد زیادی از رودخانه‌ها ناپدید شده‌اند و تعدادی از رودخانه‌ها ممکن است در دهه‌های بعدی ناپدید شوند. در گزارشی با عنوان «۱۰ رودخانه که در سال ۲۰۲۳ خشک شده‌اند!» (۲۰۲۳، Haase)، به ده رودخانه مهم دنیا اشاره شده و آمده است که این ۱۰ رودخانه می‌توانند در چند دهه آینده کاملاً بی‌آب شوند. این رودخانه‌ها عبارتند از:

۱. رودخانه کلرادو که به سرعت و با ناپایایی در حال خشک شدن است؛
۲. ریو گرانده، که برای اولین بار در چهار دهه در تابستان ۲۰۲۲ موقتاً بی‌آب شد؛
۳. رودخانه ایندوس که در چند سال گذشته بارش کمتر از میانگین را تجربه کرده است، و اکنون خشک‌ترین وضعیت در ۶۰ سال اخیر را دارد - جریان رودخانه در پاکستان در حال حاضر بیش از ۵۰ درصد کاهش یافته است؛
۴. جریان رودخانه تیستا که بدلیل کاهش بارندگی در منطقه طی سال‌های اخیر، بطور چشمگیری کاهش یافته است؛
۵. آبدهی رودخانه آرکانزاس بدلیل خشکسالی شدید و استفاده بیش از حد، در حال کاهش است؛
۶. رودخانه سرخ، نیز بدلیل تغییر اقلیم و استفاده بیش از حد از منابع آب رودخانه، خشک می‌شود؛
۷. رودخانه موراوی که بدلیل بارندگی ناکافی در معرض خطر است و در سال ۲۰۰۶ به دلیل خشکسالی بی‌امان بسیار کم آب شده بود، در سال ۲۰۰۷ بطور کلی از جریان باز ایستاد؛ همچنین در سال ۲۰۲۲ حوضه موراوی-دارلینگ نیز در معرض خطر شدید خشک شدن دائمی قرار گرفت.
۸. جریان رودخانه آمودریا در آسیای میانه، بدلیل تغییر اقلیم و افزایش تقاضا برای آبیاری به شدت کاهش یافته است؛
۹. رودخانه زرد در آسیای میانه، اخیراً بدلیل تغییر اقلیم و استفاده بیش از حد از رودخانه به خشکی گراییده است؛ و
۱۰. رودخانه کانادایی که بدلیل خشکسالی چندین ساله (که هنوز ادامه دارد)، تغییر اقلیم، و نیز افت آبخوان اگالالا در حال خشک شدن است.

در مجموع، در این حوضه‌ها، تغییر اقلیم موجب افزایش تبخیر و کاهش بارش شده، که در کنار نبود چابکی کافی در مدیریت منابع آب (برای رصد تغییرات و سازگاری با آن)، منجر به کاهش جریان در رودخانه‌ها شده است. زمانی بود که رودخانه‌ها به دریا می‌رسیدند؛ اما اکنون دیگر تضمینی برای رسیدن آنها به دریا وجود ندارد (حتی دیگر نمی‌توان از رسیدن بزرگترین رودخانه‌های دنیا به دریا اطمینان حاصل نمود!). برای نمونه، جریان آب در رودخانه ریو گرانده / ریو براوو اغلب نمی‌تواند به خلیج مکزیک برسد؛ زیرا توان آن توسط سدها، انحراف آب به مزارع کشاورزان، و تأمین آب

شهری به شدت تضعیف شده است. ایندوس، نیل، موراوی-دارلینگ و کلرادو چند رودخانه قدرتمندی هستند که هنوز جریان آنها دریا/ اقیانوس را لمس می‌کند (Wong و همکاران، ۲۰۰۷). نویسندگان همچنین گزارش دادند که ۱۰ رودخانه دنیا که برترین‌ها در معرض خشکیدن هستند، عبارتند از: سلوین، لاپلاتا، دانوب، ریوگرانده، گنگ، موراوی-دارلینگ، ایندوس، نیل، یانگ تسه و مکونگ. اطلاعات بالا نشان می‌دهد که شناسایی یک منبع آب با پایایی نامحدود، بسیار دشوار است.

شواهد تاریخی گویای آن است که حدود ۱۰۰,۰۰۰ سال پیش، سه رودخانه بزرگ وجود داشت که از میان صحرای شمال آفریقا (بیابان خشک امروزی) عبور می‌کردند؛ که قابل مقایسه با میسوری، راین یا حتی نیل بودند (Ghose، ۲۰۱۳). یک مطالعه اخیر نشان داد که حدود ۵۵٪ از ۶۴ میلیون کیلومتر رودخانه‌ها و جریان‌های روی زمین، بصورت دوره‌ای/ فصلی جریان ندارند و یا برای بخشی از سال خشک می‌شوند. این نشان می‌دهد که اغلب رودخانه‌ها گاهی خشک می‌شوند (Messenger و همکاران، ۲۰۲۱). این اطلاعات به‌وضوح نشان می‌دهد که کاربرد واژه پایایی، به ویژه برای منابع آب سطحی و زیرزمینی، نامناسب است؛ زیرا پیش‌بینی دوام و ثبات وضعیت کنونی رواناب‌های سطحی و تغذیه آب‌های زیرزمینی (که هر دو به بارندگی وابسته هستند)، برای یک دوره زمانی طولانی، تقریباً ناممکن است. معمولاً بارندگی را می‌توان با دقت منطقی برای یک دوره زمانی کوتاه پیش‌بینی کرد؛ با این حال، برای یک دوره زمانی طولانی پیش‌بینی بارندگی ممکن نیست. حتی برای دوره زمانی کوتاه، پیش‌بینی با عدم قطعیت همراه است (که معمولاً شدت آن برای پیش‌بینی‌های بیشتر از ۱۴ روزه، غیرقابل قبول است). به همین دلیل، پایایی نباید مترادف با ابدیت در نظر گرفته شود! بلکه باید برای یک طول زمان معین و محدود تعریف شود.

نتیجه‌گیری

پایایی در فرهنگ لغت مدیریت آب، همواره با یک بازه زمانی مرتبط است؛ که نشان می‌دهد تا دامنه‌ای از آینده مد نظر است (۵، ۱۰، یا ۵۰ سال)؟ از آنجا که منابع آب با پیش‌بینی بارندگی مرتبط هستند، دقت برآوردها نیز تابع عدم قطعیت بارش‌ها خواهد بود؛ که مقدار عدم قطعیت‌ها برای بازه‌های زمانی کوتاه‌تر، کمتر است (= دقت بیشتر در کتی‌کردن برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب). البته این به معنای نفی پیش‌نگری‌های بلندمدت نیست؛ اما باید دانست روش کار با نتایج این نوع پیش‌نگری و آینده‌پژوهی در مدیریت آب، بسیار متفاوت از شیوه‌های مرسوم هیدرولوژیکی است.

نتیجه‌گیری کلی

در طول سال‌ها مفاهیم متعددی برای مدیریت آب کشاورزی پیشنهاد شده است. با این حال، برخی از این مفاهیم دچار

- cigb.org/GB/dams/dams_safety.asp [Accessed 7th December 2023].
- Kashyap, P.S. & Panda, R.K. (2001) Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agricultural Water Management*, 50(1), 9–25. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(01\)00102-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00102-0)
- Lin, B., Lei, H., Hu, M., Visessri, S. & Hsieh, C. (2020) Canopy resistance and estimation of evapotranspiration above a humid cypress forest. *Advances in Meteorology*, 2020, 4232138, 16 pages. Available from: <https://doi.org/10.1155/2020/4232138>
- Maréchal, J.C., Murari, R.R.V., Riotte, J., Vouillamoz, J.M., Kumar, M.S.M., Ruiz, L., et al. (2009) Indirect and direct recharges in a tropical forested watershed: Mule Hole India. *Journal of Hydrology*, 369(3–4), 272–284. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.006>
- Maruyama, A. & Kuwagata, T. (2008) Diurnal and seasonal variation in bulk stomatal conductance of the rice canopy and its dependence on developmental stage. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(6–7), 1161–1173. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.03.001>
- Messenger, M.L., Lehner, B., Cockburn, C., Lamouroux, N., Pella, H., Snelder, T., et al. (2021) Global prevalence of nonperennial rivers and streams. *Nature*, 594(7863), 391–397. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03565-5> PMID: 34135525.
- Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Munir, A., Hanjra, M.A., et al. (2010) Improving agricultural water productivity: between optimism and caution. *Agricultural Water Management*, 97(4), 528–535. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.023>
- Monteith, J.L. (1965) Evaporation and the environment. XIXth symposia of the Society for Experimental Biology. In: *The state and movement of water in living organisms*. Swansea, Cambridge, United Kingdom: University Press, pp. 205–234.
- Paço, T.A., Ferreira, M.I. & Conceição, N. (2006) Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: comparison between eddy covariance measurements and estimates by the FAO 56 approach. *Agricultural Water Management*, 85(3), 305–313. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.05.014>
- Ragab, R. (1995) Towards a continuous operational system to estimate the root zone soil moisture from کُزفهمی و برخی دچار کاربرد نابجا بوده‌اند. مهم‌ترین مفاهیم مورد کُزفهمی شامل کم‌آبیاری، بهره‌وری آب (WP) در برابر کارایی کاربرد آب (WUE)، حسابداری آب (در منطقه ریشه)، پایایی، آبشویی برای کنترل شوری خاک، درشت‌مقیاس‌سازی در برابر برچینش، و نهایتاً طبیعت زمان‌مند جریان رودخانه و مخاطره استفاده از جریان متوسط بلندمدت برای طراحی سدها و مخازن می‌باشد. این مقاله بر این مفاهیم، استفاده نابجا، و کُزفهمی آن‌ها تاکید کرده و معنای واقعی و کاربرد هر یک را توضیح داده است. این مقاله نه تنها توضیح می‌دهد که چرا این مفاهیم دچار کُزفهمی شده‌اند؛ بلکه رویکردهایی برای بهبود درک این مفاهیم و چگونگی کاربرد دقیق آن‌ها، پیشنهاد کرده است.
- منابع (برگرفته از متن مقاله اصلی)**
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements*. FAO irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: FAO.
- Amayreh, J. & Al-Abed, N. (2005). Developing crop coefficients for field-grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under drip irrigation with black plastic mulch. *Agricultural Water Management*, 73(3), 247–254.
- Association of State Dam Safety Officials (ASDSO). (2023) The ASDSO dam incident database provides. Available from: <https://damsafety.org/Incidents> [Accessed 7th December 2023].
- Ghose, T. (2013) Buried Saharan rivers may have led humans out of Africa. Available from: <https://www.livescience.com/39575-ancient-saharan-rivers-existed.html> [Accessed 9th December 2023].
- Haase, J. (2023) 10 rivers that are running dry in 2023. Available from: <https://a-z-animals.com/blog/10-rivers-that-arerunning-dry/>
- Han, H., Feng, Q., Yu, T., Yang, X., Zhang, X. & Li, K. (2022) Characteristic of stomatal conductance and optimal stomatal behaviour in an arid oasis of Northwestern China. *Sustainability*, 14(2), 968. Available from: <https://doi.org/10.3390/su14020968>
- Hsieh, C.-I., Huang, I.-H. & Lu, C.-T. (2023) Estimating canopy resistance using machine learning and analytical approaches. *Watermark*, 15(21), 3839. Available from: <https://doi.org/10.3390/w15213839>
- International Commission on Large Dams (ICOLD). (2023) Dams' safety is at the very origin of the foundation of ICOLD. Available from: <https://www.icold->

- Ragab, R., Evans, J.G., Battilani, A. & Solimando, D. (2017b) The cosmic-ray soil moisture observation system (Cosmos) for estimating the crop water requirement: new approach. *Irrigation and Drainage*, 66(4), 456-468. Available from: <https://doi.org/10.1002/ird.2152>
- Ragab, R., Kaelin, A., Afzal, M. & Panagea, I. (2020) Application of generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) at different temporal scales to reduce the uncertainty level in modelled river flows. *Hydrological Sciences Journal*, 65(11), 1856-1871. Available from: <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1764961>
- Ragab, R., Moidinis, D., Albergel, J., Khouri, J., Drubi, A. & Nasri, S. (2001) The HYDROMED model and its application to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs. 2-rainfall-runoff model application to three Mediterranean hill reservoirs. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 5(4), 554-562. Available from: <https://doi.org/10.5194/hess-5-554-2001>
- Refsgaard, J.C. & Butts, M.B. (1999) Determination of grid scale parameters in catchment modeling by upscaling local scale parameters. In: Feyen, J. & Wiyono, K. (Eds.) *Modeling of transport processes in soils: at various scales in time and space*. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Academic Publishers, pp. 650-665.
- Wong, C.M., Williams, C.E., Pittock, J., Collier, U. & Schelle, P. (2007) World's top 10 rivers at risk. WWF International. Gland, Switzerland. Pp. 1-53. Available from: <https://www.awsassets.panda.org/downloads/worldstop10riversatriskfinalmarch13.pdf> [Accessed 9th December 2023].
- Zheng, S., Wang, T. & Wei, X. (2022) Estimating grapevine transpiration in greenhouse with three different methods in a Penman-Monteith model in Northeast China. *Irrigation Science*, 40(2022), 13-27. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00271-021-00753-z>
- intermittent remotely sensed surface moisture. *Journal of Hydrology*, 173(1-4), 1-25. Available from: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02749-F](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02749-F)
- Ragab, R. (2014) A note on water use efficiency and water productivity. Available from: http://www.water4crops.org/wpcontent/uploads/2014/08/RR_Water-use-efficiency-and-waterproductivity.pdf [Accessed 9th December 2023].
- Ragab, R. (2015) Integrated management tool for water, crop, soil and N-fertilizers: the SALTMED model. *Irrigation and Drainage*, 64(1), 1-12. Available from: <https://doi.org/10.1002/ird.1907>
- Ragab, R. (2023). Report on new advances in water saving in irrigation, International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), New Delhi, India. pp. 93-125. Available from: https://icid-ciid.org/icid_data_web/25CongWorkshopReportNewAdvances.pdf [Accessed 9th December 2023].
- Ragab, R., Austin, B. & Moidinis, D. (2001a) The HYDROMED model and its application to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs. 1-the rainfall-runoff model using a genetic algorithm for optimisation. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 5(4), 543-553. Available from: <https://doi.org/10.5194/hess-5-554-2001>
- Ragab, R., Austin, B. & Moidinis, D. (2001b) The HYDROMED model and its application to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs. c-reservoir storage capacity and probability of failure model. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 5: (4)(4), 563-568. Available from: <https://doi.org/10.5194/hess-5-563-2001>
- Ragab, R. & Bromley, J. (2010) IHMS-Integrated Hydrological Modelling System. Part 1. The hydrological processes and general structure. *Hydrological Processes*, 24(19), 2663-2680. Available from: <https://doi.org/10.1002/hyp.7681>
- Ragab, R., Bromley, J., Dörflinger, G. & Katsikides, S. (2010) IHMS-Integrated Hydrological Modelling System. Part 2. Application of linked unsaturated, DiCaSM and saturated zone, MODFLOW models on Kouris and Akrotiri catchments in Cyprus. *Hydrological Processes*, 24(19), 2681-2692. Available from: <https://doi.org/10.1002/hyp.7682>
- Ragab, R., Evans, J.G., Battilani, A. & Solimando, D. (2017a) Towards accurate estimation of crop water requirement without the crop coefficient Kc: new approach using modern technologies. *Irrigation and Drainage*, 66(4), 469-477. Available from: <https://doi.org/10.1002/ird.2153>

پی‌نوشت‌ها

1. Crop Water Requirement: CWR
2. Soil Moisture Deficit: SMD
3. Bowen Ratio
4. Eddy Covariance
5. Scintillometers
6. Soil Moisture Deficit
7. Cosmic Ray Soil Moisture Observing System
8. Water Use Efficiency

ess-release-details/2017/Research-May-Lead-to-Improvements-in-Water-Use-for-Crop-Irrigation/default.aspx

۱۴. جریان پیستونی (Piston Flow): یک مدل حرکت آب در خاک که در آن آب جدیدی که وارد خاک می‌شود (آب شیرین)، آب قبلی (آب شور) را به صورت دسته‌ای و یکنواخت به سمت پایین می‌راند.

9. Water Productivity

10. Partial Root Drying (PRD)

11. Variable Irrigation Rate (VIR)

۱۲. بیانگر ارتفاع عمودی عوارض سطحی (مانند گیاهان و درختان و ساختمان‌ها) است که باد را کند کرده و بر انتقال جرم و حرارت تأثیر دارد.

13.

<https://johnwiley2020news.q4web.com/pressreleases/pr>

یادداشت تحلیلی

صنایع خلاق، شهر دوستدار آب و شهر حساس به آب: عبور از مهندسی محور به سوی حکمرانی مشارکتی

محمد جواد سمیعی^۱، محمد فشایی^۲، محمد طلعتی^۳

۱- کارشناس ارشد مدیریت سوانح طبیعی، گروه مهندسی اجتماعی آبانگاه، مشهد، ایران

۲- دانش‌آموخته دکتری هواشناسی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

رایانامه نویسنده مسئول: mjsamiee@yahoo.com

چکیده

چالش آب در شهرهای ایران، به‌ویژه در کلان‌شهرهای واقع در اقلیم خشک و نیمه‌خشک، به یکی از مهم‌ترین مسئله‌های مدیریتی تبدیل شده است. در این میان، مفاهیمی چون «شهر دوستدار آب» و «شهر حساس به آب» به‌عنوان رویکردهای نوین مدیریت شهری مطرح شده‌اند که بر هماهنگی شهر با چرخه‌های طبیعی آب، مشارکت شهروندان، تغییر چارچوب ذهنی تصمیم‌گیران و اصلاح الگوهای مصرف تأکید دارند. از سوی دیگر، صنایع خلاق به‌عنوان یکی از پیشران‌های اقتصاد دانش‌بنیان و نوآوری اجتماعی، می‌توانند نقش مهمی در تغییر رفتارهای مصرف آب، مطالبه‌گری مؤثر و ارتقای آگاهی عمومی ایفا کنند. این یادداشت تحلیلی با رویکردی مفهومی و سیاستی، به بررسی پیوند میان صنایع خلاق، رفتارهای ناظر به مصرف مناسب آب، نوآوری اجتماعی و رویکرد شهر حساس به آب در ایران پرداخته و با تمرکز بر تجربه کلان‌شهر مشهد، ظرفیت‌های این شهر برای حرکت به سوی الگوی شهر دوستدار آب را تحلیل می‌کند. تجربه‌های انجام گرفته در شهر مشهد، به عنوان الگویی برای تعمیم به سایر شهرها و بستری برای تثبیت و توسعه در سال‌های پیش رو نیز مرور می‌شود تا در میانه اولویت‌های فوری این ماه‌های کشور، ضرورت‌های آبی امروز و فردا، فراموش نشود.

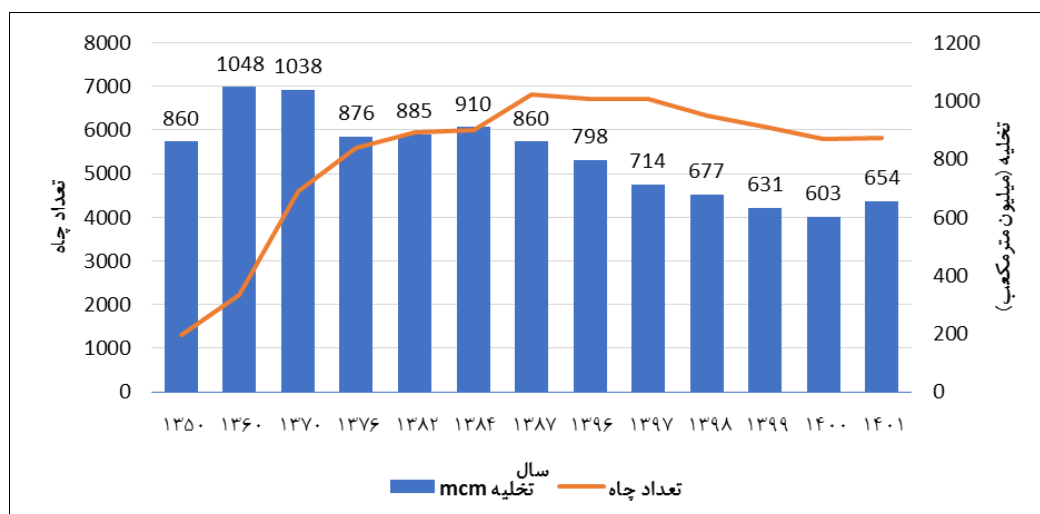
واژه‌های کلیدی: صنایع خلاق، شهر دوستدار آب، شهر حساس به آب، مشهد، آب‌های زیرزمینی

۱-۱- عرضه و تقاضای آب

بحران آب عبارتی پرتکرار است که در سال‌های اخیر به ویژه در دو دهه گذشته در متون و محافل علمی، مدیریتی و عمومی در سطح کشور بسیار به کار برده می‌شود. به طور کلی بحران (ناترازی) در منابع، زمانی رخ می‌دهد که توازن بین عرضه (تأمین) و تقاضای آن متزلزل شده یا از بین رفته باشد. بسته به میزان اختلاف ایجاد شده بین عرضه و تقاضا، بحران شدت می‌یابد. پیشگیری از برهم خوردن توازن و یا بازگشت توازن به منابع، مهم‌ترین انتظار از حکمرانی خوب است. حکمرانی آب به طیف وسیعی از دستگاه‌های سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و اداری که به منظور توسعه منابع آب، مدیریت و ارائه خدمات مربوط به آب در سطوح مختلف جامعه ایجاد شده‌اند، اطلاق می‌گردد (OECD, ۲۰۱۱). این مفهوم به معنای سیاست‌گذاری و مدیریت منابع آبی به نحوی است که از نظر اجتماعی پذیرفته شده باشد و هدف آن توسعه پایدار، استفاده صحیح از منابع آبی و همچنین اجرای این سیاست‌ها با همکاری مؤثر ذینفعان و کنشگران درگیر در این فرآیند است (Rogers, ۲۰۰۰; Hall و Rogers, ۲۰۰۳).

با در نظر داشتن این تعریف، شکل (۱) را مرور کنیم. این شکل، سری زمانی تعداد چاه‌ها و تخلیه آبخوان دشت مشهد-چناران در استان خراسان رضوی در بازه سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۴۰۱ را نشان می‌دهد. این نمودار به وضوح بیان می‌کند که علیرغم ممنوعه شدن محدوده مطالعاتی مشهد-نریمانی در سال ۱۳۴۸، تعداد چاه‌های حفر شده با سرعت زیادی افزایش پیدا کرده، به طوری که آبخوان به حداکثر توان آبدهی خود رسیده و پس از آن علیرغم افزایش تعداد چاه‌ها، میزان کل تخلیه سالانه نه تنها افزایش پیدا نکرده، بلکه با کاهش مواجه شده است.

بررسی وضعیت منابع آبی استان خراسان رضوی نشان می‌دهد که کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، صرفاً ناشی از خشکسالی نبوده بلکه برداشت بی‌رویه منجر به این وضعیت شده است، به طوری که در ترسالی‌ها نیز کاهش سطح آب‌های زیرزمینی رخ داده که پیامدهایی از قبیل مهاجرت به شهرها، بالا رفتن هزینه پمپاژ آب، شور شدن آب‌های زیرزمینی، فرونشست زمین، ایجاد شکاف در سطح دشت‌ها و مشکلات زیست محیطی را در پی داشته است (ولایتی، ۱۳۸۵).



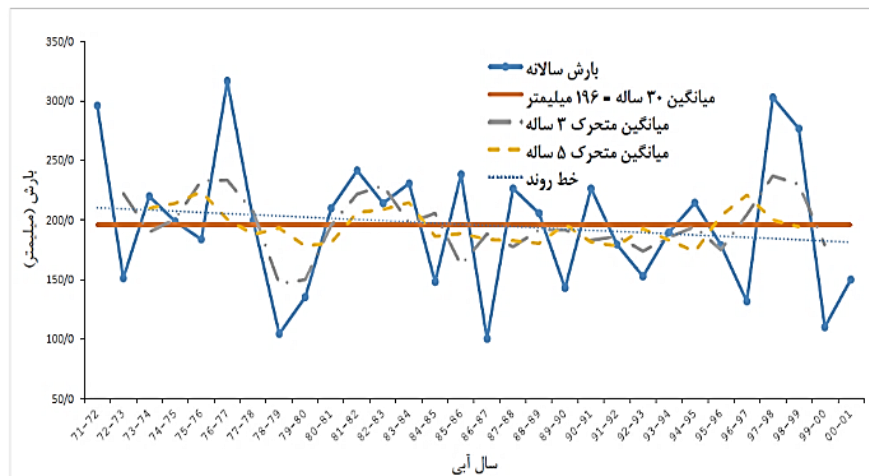
شکل ۱- سری زمانی تعداد چاه‌ها و تخلیه آبخوان دشت مشهد-چناران در استان خراسان رضوی، سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۴۰۱ (گزارش تدبیر آب مشهد، ۱۳۹۴؛ نمودار بروزرسانی شده است)

در چنین شرایطی که تقاضای آب همواره در حال افزایش است، رویکرد تأمین و عرضه محور، نه تنها قادر به کاهش ابعاد بحران نیست، بلکه ممکن است این توقع را ایجاد نماید که می‌توان برای هر میزان تقاضایی، آب تأمین کرد. گواهی بر این مدعا وضعیت ناترازی بیلان آب در دشت مشهد در سال آبی جاری (۱۴۰۴-۱۴۰۵) است که طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای و حفر چاه‌ها بیش از پیش نتوانسته از میزان ناترازی بکاهد.

افزایش بهره‌برداری از آبخوان دشت مشهد در شرایطی رخ داده که مطابق نمودار شکل (۲)، طی سه دهه اخیر، مقدار بارش تجمعی سالانه کاهش و از سوی دیگر میانگین سالانه دمای هوا نیز در همین مدت افزایش یافته است. نتایج سری‌های زمانی تغییرات بارش، دمای هوا، تعداد چاه‌ها و تخلیه آبخوان نشان می‌دهد که توان تأمین منابع آب (عرضه) در حال کاهش و میزان تقاضا نیز در حال افزایش است. چنین وضعیتی به وخامت بیش از پیش بحران (ناترازی) آب منجر می‌شود.

از این رو راه حل پایدار برای کاهش ابعاد بحران آب، تمرکز بر مدیریت تقاضا برای میان و بلندمدت و پرداختن به

راهکارهای تأمین آب برای کوتاه‌مدت به منظور گذر از شرایط اضطرار است.



شکل ۲) سری زمانی تغییرات بارش تجمعی سالانه در محدوده مطالعاتی مشهد-نریمان
(گزارش تدبیر آب مشهد، ۱۳۹۴؛ نمودار بروزرسانی شده است)

۲-۱- سرمایه اجتماعی

اعتماد عامل اصلی توسعه و یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های سرمایه اجتماعی است. بین سطح اعتماد با پیشرفت جوامع، ارتباط معنی‌داری وجود دارد و جوامع توسعه‌یافته در مقایسه با جوامع دیگر از سطح اعتماد بالاتری برخوردارند (Fukuyama, ۲۰۰۱). در واقع اعتماد پیش شرط مشارکت و همکاری بوده و بقا و پایداری روابط بین کنشگران به اعتماد افراد به یکدیگر وابسته است. همچنین اعتماد می‌تواند در حل اختلافات و درگیری‌ها در بین بهره‌برداران در فرآیند حکمرانی منابع آب نقش بسیار تأثیرگذاری داشته باشد (قربانی، ۱۳۹۱؛ Bodin و Prell، ۲۰۱۱). مشارکت نیز بیان دیگری برای سرمایه اجتماعی است و وجه اساسی و در عین حال گم شده توسعه پایدار است. هدف مشارکت به عنوان یک فرایند اجتماعی، کشاندن همه مردم به ایفای نقش در همه مراحل مدیریت منابع است (Gaotri، ۱۹۸۶).

یکی از مهم‌ترین دلایل شکست طرح‌های توسعه‌ای، وجود درگیری‌ها و تنش‌های فردی و جمعی، عدم مشارکت جمعی، بالا بودن هزینه‌های کنترل اجتماعی، پایین بودن کارایی اجتماعی و به طور کلی از هم گسیختگی اجتماعی است (Woolcock، ۲۰۱۱). به همین جهت انسجام اجتماعی نیز از عوامل مهم و تأثیرگذار بر روی سرمایه اجتماعی و میزان مشارکت افراد در طرح‌های توسعه‌ای تلقی می‌گردد. به طور کلی بین سه مؤلفه اجتماعی اعتماد، مشارکت و انسجام رابطه تنگاتنگی وجود دارد؛ به این معنی که هرچه تعداد روابط بین کنشگران بیشتر باشد، سطح اعتماد در بین آن‌ها افزایش یافته و فرصت‌های بیشتری برای انجام اقدامات جمعی و همکاری و مشارکت در بین کنشگران به وجود می‌آید، بنابراین سرمایه اجتماعی و به دنبال آن انسجام نیز

افزایش می‌یابد و مدیریت مشارکتی موفق‌تر و با هزینه کمتری عملی خواهد بود (Hahn، ۲۰۰۶).

۳-۱- تراژدی منابع مشترک

سال‌های پس از جنگ جهانی دوم تا اواسط دهه ۱۹۷۰، دوره استقرار و تحکیم دولت رفاه در اروپای غربی و آمریکایی شمالی و در نهایت افول آن است. در «سی سال باشکوه»، جوامع مورد اشاره از سطح بی سابقه‌ای از رفاه و امنیت و رونق اقتصادی بهره‌مند بودند و برنامه‌های اجتماعی گسترده دولت‌های رفاه نیز به بهره‌مندی آنان می‌افزود. در عرصه عمل این دوره را می‌توان سال‌های رونق تکنوکراسی و سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های متمرکز و گسترده دانست. نظریه لیبرالیسم جدید یا ترقی‌خواهان که خواهان ابتکار عمل دولت در ارائه خدمات اجتماعی، آموزشی و بهداشتی بود، همراه با رویکرد کینزی به اقتصاد و سیاست عموم که مجوز علمی برنامه‌ریزی‌ها و مخارج گسترده دولتی را می‌داد، پایه‌های سامان جدیدی از جامعه و سیاست را در فردای جنگ جهانی دوم گذاشتند. رونق سی سال شکوهمند، از اواخر دهه ۱۹۶۰ رو به افول نهاد و به تدریج بحران درونی دولت رفاه آشکار شد (عطارزاده، ۱۴۰۱).

یک سال پیش از اعلام شکست رفتارگرایی توسط David Easton، مقاله مهم و جریان ساز Garrett Hardin با عنوان «تراژدی منابع مشترک» در سال ۱۹۶۸ منتشر شد که نسبتی با تحولات جدید نظری و عینی داشت. مقاله Hardin کوششی بود برای بازنگری نظری و درک و تحلیل مسائل عمومی از دیدگاهی نو. Hardin به عنوان یک بوم‌شناس که دغدغه مسائل زیستی داشت، سخت متوجه مسائل عمومی و اقتصادی نیز بود. موضوع پرآوازه‌ترین اثر او هم در واقع توضیحی از منطق کنش جمعی بود؛ توضیحی انتقادی از

سرشت رفتار عقلانی بشر و پیامدهای ویرانگری که می‌تواند بر منافع و منابع مشترک داشته باشد. او از چشم‌انداز تحلیل رفتار عقلایی افراد در بهره‌برداری از یک منبع مشترک پایان‌پذیر، منطق کنش جمعی را بررسی کرد. مصادیق این منابع مشترک، یا به تعبیری مشاعات را می‌توان در صید از منابع آب، چوب جنگل‌ها، جو زمین که در آن گازهایی گلخانه‌ای توسط صنایع هر کشوری رها می‌شود، فضای سکونت یک شهر، ترافیک و مانند این‌ها دانست. Hardin برای توضیح نظریه‌اش از یک قیاس شروع کرد، بدین سان که رفتار عقلانی انسانی در مورد رقابت بر سر منابع کمیاب را از رفتار چند چوپان یا گله‌دار در مرتعی مشترک قیاس گرفت.

پیش از Hardin اقتصاددانی به نام William Forster lioyed انگلیسی در سال ۱۸۳۳ از مفهوم تراژدی منابع مشترک برای توضیح رفتار گله‌داران در مرتعی مشترک در شرایط فقدان اقتدار و مقررات بیرون استفاده کرده بود. حالا Hardin از این استعاره برای توضیح مسائل پیچیده‌تری که در نیمه دوم قرن بیستم پدیدار شده بود، استفاده می‌کرد. تصور کنید مرتعی مشترک وجود دارد و تعدادی گله‌دار، احشام خود را در آن مرتع می‌چرانند. هر چوپانی بنا به مفروض کنش عقلانی، می‌کوشد بیشترین بهره ممکن از منبع محدود مرتع را ببرد و بنابراین احشام بیشتری را وارد مرتع می‌کند، اما این رقابت که برای کسب منفعت شخصی است در نهایت موجب پایان یافتن منابع مرتع و زیان همگی در اثر مصرف بیش از اندازه می‌شود. بنابراین هر گله‌داری از افزودن به احشام خود در مرتع، نفع شخصی (یا خصوصی) می‌برد، اما همزمان زبانی به همه می‌رساند (عطارزاده، ۱۴۰۱).

به گفته Hardin، توسل به وجدان فردی نمی‌تواند جلوی تراژدی منابع مشترک را بگیرد. زیرا این توسل به وجدان فردی برای اقناع فرد نسبت به خودداری از بهره‌کشی یا مصرف بیش از اندازه منابع مشترک به خاطر خیر عمومی، در تعارض با منطق انتخاب عقلانی فردی است. Hardin می‌گوید تصور کنید از فردی بخواهیم که به خاطر وجدان خودش هم که شده دست از بهره‌کشی از منابع مشترک بکشد. هنگامی که فرد با خود خلوت می‌کند و روی مضمون درخواست ما فکر می‌کند، آگاهانه یا ناآگاهانه دو پیام دریافت می‌کند: ۱) «اگر چیزی را که ما از تو خواسته‌ایم انجام ندهی، تو را علناً به عنوان یک شهروند مسئولیت‌ناپذیر سرزنش می‌کنیم». این همان پیامی است که ما می‌خواستیم او بگیرد. اما پیام دیگری نیز وجود دارد: ۲) «اگر جز آنچه از تو خواسته‌ایم رفتار کنی، ما تو را به طور غیرعلنی به عنوان فردی ساده‌لوح سرزنش می‌کنیم که ابلهانه به کناری ایستاده‌ای تا بقیه از منابع مشترک بهره‌کشی کنند». بنابراین در موضوع تراژدی منابع مشترک، نمی‌شود روی وجدان حساب کرد. منطق محاسبه عقلانی هزینه و فایده بر وجدان غلبه می‌کند (عطارزاده، ۱۴۰۱).

بنا بر نظر Hardin در چنین شرایطی افزایش قوانین اداری نیز نمی‌تواند پاسخگوی شرایط پیچیده موجود باشد. پیامد

منطقی افزودن قوانین چنین خواهد بود: «از آن رو که شرح جزئیات تمام شرایطی که می‌تواند محیط زیست را آلوده کند، از سوزاندن زباله در حیاط خلوت، خودروهای فاقد استاندارد آلایندگی تا مسائل کلان، ناممکن است، در عمل اختیار تعیین جزئیات به مدیران و کارمندان اداری محول می‌شود. در این جا باز پرسش دیگری پیش می‌آید که چه کسی بر خود نگهبانان نظارت کند؟» بنا بر اصل اخلاقی، پیروی از وضعیت موجود نظام، مدیران و کارمندان توجیه اخلاقی هر کنشی را با توجه به وضعیت موجود و کلیت نظام می‌سنجند و این خود می‌تواند راه بر فساد بگشاید. وقتی کلیت سیستم بر مدار کنش عقلانی بهره‌برداری فردی از منابع مشترک باشد، مدیران و کارمندان هم می‌توانند بر همین مبنای بسیاری از موارد آلودن یا مصرف بیش از اندازه از منابع مشترک چشم‌پوشی کنند. «چالش بزرگ در اینجا ابداع یک سیستم بازخوردی است که بر صداقت حافظان مصالح عمومی نظارت کند» (عطارزاده، ۱۴۰۱).

۴-۱- نقش آفرین جامعه مدنی

کمبود منابع آب و تشدید ناترازی آبی در ایران طی دهه‌های اخیر، ضرورت بازاندیشی در الگوهای مدیریت شهری و حکمرانی منابع آب را آشکار ساخته است. شهرهای بزرگ ایران به دلیل رشد سریع جمعیت، توسعه کالبدی و افزایش تقاضای آب، با فشار فزاینده‌ای بر منابع محدود آب مواجه‌اند. کلان‌شهر مشهد به‌عنوان دومین شهر پرجمعیت کشور و یکی از مهم‌ترین مقاصد گردشگری و زیارتی، نمونه‌ای برجسته از این وضعیت به شمار می‌رود. درگیری مشهد با کم‌آبی مزمن و افت شدید سفره‌های آب زیرزمینی و همچنین مواجهه با کاهش قابل توجه میزان ذخیره منابع اصلی سطحی تأمین آب شرب در این شهر در سال‌های اخیر، بسیار حائز اهمیت بوده است.

در چنین شرایطی، رویکردهای نوین برنامه‌ریزی شهری مانند «شهر حساس به آب» و «شهر دوستدار آب» در پی آن هستند که مدیریت آب را از یک موضوع صرفاً فنی به یک موضوع اجتماعی، فرهنگی و نهادی تبدیل کنند. در این میان، صنایع خلاق می‌توانند به‌عنوان بستری برای شکل‌گیری نوآوری اجتماعی، تغییر نگرش‌های عمومی و ترویج فرهنگ مصرف پایدار آب، ایفای نقش کنند. تجربه‌های جهانی (از چین تا اروپا) نشان داده که اتکای صرف به راهکارهای مهندسی سنتی (مانند کانال‌کشی، سدسازی و انتقال آب) نه تنها پاسخگوی چالش‌های فزاینده آبی نیست، بلکه به دلیل نادیده گرفتن ابعاد فرهنگی، اجتماعی و رفتاری، با ناکارآمدی روبه‌رو می‌شود. اما پرسش کلیدی این است که چگونه می‌توان زیرساخت‌های فنی را به بخشی پویا و پذیرفته‌شده از زندگی روزمره شهری تبدیل کرد؟ بخشی از پاسخ به این پرسش در پیوند سامانه‌های فنی و مهندسی با رویکردهای صنایع خلاق نهفته است؛ رویکردی که در این یادداشت، در چارچوب شهر حساس به آب و شهر دوستدار آب مورد تحلیل

و بررسی قرار گرفته و نمودهای عینی آن در تجربه شهر مشهد، تشریح می‌شود.

با وجود چنین چارچوب نظری و عملی، بررسی روندهای گذشته نشان می‌دهد که مسئله آب، علیرغم تأکیدها، برای مدت طولانی در حاشیه قرار داشته است. در دوره‌های پیشین، دلایلی همچون وفور نسبی منابع در برخی مناطق، هزینه‌های بالای اصلاح زیرساخت‌ها، جذابیت سیاسی و اقتصادی پروژه‌های توسعه‌ای کوتاه‌مدت و نیز ماهیت تدریجی و نامحسوس بحران آب، موجب شد که این مسئله در میان سایر اولویت‌های حاکمیتی کم‌رنگ شود. به بیان دیگر، چون عمده چالش‌های آبی به‌ویژه کاهش منابع آب زیرزمینی به‌صورت ناگهانی و شوک‌آور بروز نمی‌کرد، حساسیت لازم نسبت به آن شکل نگرفت و تمرکز اصلی بر پاسخ‌های فوری و قابل مشاهده باقی ماند (پنهان‌رسولی و همکاران، ۱۳۹۷).

این وضعیت در شرایط کنونی نیز، با وجود تشدید فشارها بر منابع آب، به‌طور کامل تغییر نکرده است. در فضای ناپایدار و متأثر از بحران‌های کلان در کشور (بعد از دو دوره جنگ در طول سال ۱۴۰۴ و ابتدای ۱۴۰۵)، توجه سیاست‌گذاران و جامعه عمدتاً به مسائل فوری‌تر معطوف می‌شود و آب همچنان در رقابت با این اولویت‌ها، جایگاه شایسته خود را نمی‌یابد. حال آنکه تداوم این نگاه، می‌تواند به بروز پیامدهایی گسترده‌تر و عمیق‌تر منجر شود؛ چرا که آب، زیربنای پنهان بسیاری از ابعاد حیات شهری، از سلامت و بهداشت گرفته تا اقتصاد و ثبات اجتماعی است.

در چنین شرایطی، اهمیت ایده شهر دوستدار آب و شهر حساس به آب بیش از پیش آشکار می‌شود. این رویکرد، با تأکید بر تغییر همزمان در ساختارهای حکمرانی و رفتارهای اجتماعی، تلاش می‌کند تا آب را از حاشیه به متن تصمیم‌گیری‌ها بازگرداند و آن را به یک اولویت واقعی تبدیل کند. به بیان دیگر، اگر در گذشته بی‌توجهی به آب ناشی از درک ناکافی از پیامدهای آن بوده است، امروز ادامه این بی‌توجهی دیگر قابل توجیه نیست. حرکت به‌سوی شهرهای دوستدار آب، نه یک انتخاب لوکس یا بلندمدت، بلکه ضرورتی فوری برای تضمین تاب‌آوری، پایداری و حتی بقا در نظام‌های شهری است. ضرورتی که تحقق آن، در گرو بازتعریف رابطه انسان، شهر و آب و پذیرش مسئولیت مشترک در قبال این منبع حیاتی خواهد بود.

۲- چارچوب مفهومی

۲-۱- مفاهیم شهر دوستدار آب و شهر حساس به آب

مفاهیم «شهر حساس به آب» و «شهر دوستدار آب» بر رویکردی در طراحی شهری تأکید دارند که در آن مدیریت آب با طراحی شهری همراستا شده و هدف آن افزایش تاب‌آوری شهر در برابر کم‌آبی و سیلاب است. مطالعات مرتبط با طراحی شهری در این رویکرد، چند اصل کلیدی را مطرح می‌کنند (ملک‌مرزبان و ارتفاعی، ۱۳۹۸).

۱. هماهنگی توسعه شهری با چرخه‌های طبیعی آب

۲. افزایش نفوذپذیری سطوح شهری

۳. کاهش آلودگی منابع آب

۴. استفاده از سامانه‌های جمع‌آوری و بهره‌برداری از آب باران

۵. تقویت فضاهای سبز شهری

در چنین شهری، شهروندان، نهادهای مدنی و مدیریت شهری در راستای مصرف مسئولانه آب و حفاظت از منابع آبی، مشارکت فعال دارند. از منظر سیاست‌گذاری شهری نیز مفهوم «حق به شهر» اهمیت زیادی دارد. این مفهوم بر مشارکت شهروندان در تصمیم‌گیری‌های شهری و توزیع عادلانه منابع، از جمله آب، تأکید می‌کند (اشتیاقی و شارع‌پور، ۱۳۹۹).

در این رویکردهای جامع و تحول‌گرا در عرصه حکمرانی شهری، آب نه صرفاً یک منبع فیزیکی برای تأمین نیازهای روزمره، بلکه به‌مثابه یک سرمایه حیاتی و محدود در نظر گرفته می‌شود که حفظ، بهره‌برداری خردمندانه و بازتولید آن، نیازمند هم‌راستایی ارکان‌های مختلف شهری است. در این شهر، ابعاد مختلف فنی، مدیریتی، اجتماعی و فرهنگی به‌گونه‌ای تنظیم می‌شوند که حداکثر پایداری در چرخه آب شهری حاصل شود و اساس آن، بر پایه اجتماعی‌کردن مسئله آب استوار است؛ بدین معنا که آب از یک موضوع تخصصی و محدود به نهادهای فنی خارج شده و به یک دغدغه عمومی در میان تمامی ذی‌نفعان تبدیل می‌شود، به‌گونه‌ای که تغییر در دانش، نگرش و در نهایت رفتار مصرف‌کنندگان، به‌عنوان هدفی بنیادین دنبال می‌گردد (سمیعی و همکاران، ۱۴۰۴).

چهار بعد کلیدی در این چارچوب عبارتند از:

- وجود شهروندانی آگاه، مسئول و توانمند که ارزش آب را درک کرده و در مصرف آن، رفتار سنجیده‌ای دارند؛
 - استقرار نظام حکمرانی یکپارچه که در آن سیاست‌ها، قوانین و تصمیمات توسعه‌ای با در نظر گرفتن محدودیت‌های آبی اتخاذ می‌شوند؛
 - بهره‌گیری از زیرساخت‌ها و فناوری‌های کارآمد برای کاهش هدررفت و افزایش بهره‌وری؛
 - و در نهایت استفاده از ظرفیت‌های فرهنگی، آموزشی و هنری برای نهادینه‌سازی الگوهای پایدار مصرف.
- بر این اساس، اهداف چنین شهری فراتر از تأمین کمی آب بوده و شامل ارتقای فرهنگ زیست‌محیطی، تحقق عدالت در دسترسی، افزایش تاب‌آوری در برابر شوک‌های طبیعی و اجتماعی و در نهایت، تضمین پایداری بلندمدت حیات شهری است.

در این میان، یکی از مهم‌ترین بنیان‌های تحلیلی این رویکرد، بازتعریف رابطه میان عرضه، تقاضا و مصرف آب است. در دهه‌های گذشته، سیاست‌گذاری آب عمدتاً بر محور افزایش عرضه استوار بوده است؛ یعنی تلاش برای تأمین آب بیشتر، از طریق توسعه زیرساخت‌ها، انتقال منابع و بهره‌برداری گسترده‌تر. این رویکرد، اگرچه در مقاطعی پاسخگوی نیازهای رو به رشد بوده، اما به دلیل بی‌توجهی به ظرفیت‌های طبیعی و

رشد افسارگسیخته تقاضا، به تشدید بحران انجامیده است. در مقابل، شهر دوستدار آب بر ضرورت تغییر تمرکز از مدیریت عرضه به مدیریت تقاضا و مصرف تأکید دارد. مدیریت تقاضا به دنبال تنظیم و کنترل میزان مصرف متناسب با توان سرزمینی است و مدیریت مصرف، با هدف اصلاح الگوهای رفتاری و فکری شهروندان، تلاش می‌کند بهره‌وری استفاده از آب را افزایش دهد. بدین ترتیب، پایداری واقعی زمانی حاصل می‌شود که این سه حوزه در قالب یک نظام یکپارچه و متوازن عمل کنند، اما نقطه ثقل آن بر مدیریت مصرف و تغییر رفتار اجتماعی قرار گیرد.

تحقق این رویکرد، مستلزم مشارکت و ایفای نقش سه گروه اصلی از کنشگران است که هر یک در سطحی متفاوت اما مکمل، در این فرآیند تأثیرگذارند. نخست، مسئولین و سیاست‌گذاران که وظیفه دارند با اتخاذ رویکردی مبتنی بر توسعه پایدار، چارچوب‌های قانونی، نهادی و برنامه‌ریزی لازم را برای حفاظت از منابع آب فراهم کنند. تصمیمات این گروه باید به سمت سازگاری با کم‌آبی، کنترل رشد تقاضا، کاهش تلفات زیرساختی و ایجاد مشوق‌ها و محدودیت‌های مؤثر در مصرف هدایت شود. دوم، ذی‌نفعان و کنشگران میانی شامل بخش خصوصی، نهادهای مدنی و سازمان‌های تخصصی که با توسعه فناوری‌های نوآورانه، صنایع خلاق و اجرای پروژه‌های مشارکتی و ترویج مسئولیت اجتماعی، نقش پیونددهنده میان سیاست و جامعه را ایفا می‌کنند. در نهایت، عموم شهروندان که مهم‌ترین حلقه این زنجیره محسوب می‌شوند؛ چرا که بخش قابل توجهی از مصرف آب در سطح رفتارهای روزمره آن‌ها شکل می‌گیرد و نیز مطالبه‌گری آن‌ها، محرک کافی برای دو بند قبل به ویژه تصمیم‌گیری و مدیریت پایدار است. تغییر در الگوی مصرف، پذیرش مسئولیت فردی و مشارکت در تصمیم‌سازی‌ها، از جمله اقداماتی است که این گروه را به بازیگری فعال در تحقق شهر دوستدار آب و شهر حساس به آب تبدیل می‌کند.

۲-۲- صنایع خلاق و توسعه شهری پایدار

۱. صنایع خلاق مجموعه‌ای از فعالیت‌های اقتصادی مبتنی بر خلاقیت، دانش، فرهنگ و فناوری هستند که در

حوزه‌هایی مانند هنر، طراحی، رسانه‌های دیجیتال، صنایع دستی و تولید محتوای فرهنگی شکل می‌گیرند. مطالعه‌ای درباره «طراحی الگوی توسعه صنایع فرهنگی و صنایع خلاق در ایران» با استفاده از روش نظریه زمینه‌ای نشان می‌دهد که توسعه این صنایع نیازمند تعامل میان عوامل محیطی، سیاست‌های حمایتی، زیرساخت‌های نوآوری و مشارکت اجتماعی است (ابتهاج و همکاران، ۱۴۰۲). همچنین پژوهش «توسعه فرهنگی پایدار شهری و مدل شهرهای خلاق در ایران» تأکید می‌کند که شهرهای خلاق می‌توانند از طریق نوآوری‌های فناورانه، مشارکت مردمی و بهره‌گیری از ظرفیت‌های فرهنگی به توسعه پایدار شهری کمک کنند (عباسی سارنگ و آذرکیش، ۱۴۰۴).

۲. بنابراین در این چارچوب، صنایع خلاق سه کارکرد مهم در مدیریت پایدار منابع آب دارند:

۳. تولید روایت‌ها و پیام‌های فرهنگی برای ترویج فرهنگ مصرف صحیح آب

۴. طراحی راهکارهای نوآورانه برای آموزش، آگاهی‌بخشی و مطالبه‌گری عمومی

۵. ایجاد بسترهای مشارکتی برای شکل‌گیری نوآوری اجتماعی

تحقق شهر حساس به آب نیازمند هم‌تکاملی سه سطح فعالیت در تعامل سه‌لایه (یعنی زیرساخت فنی، ابزار خلاق، تجربه مکان‌محور) بر اساس تلفیق مدل «گذار در حکمرانی آب» (Pahl-Wostl و Xia، ۲۰۱۲) و «چارچوب تعاملی صنایع خلاق و سطوح آبگیر باران» (طلعتی و همکاران، ۱۴۰۴) است (جدول ۱).

در این میان، صنایع خلاق نقش «لایه نرم افزاری» را ایفا می‌کنند که کاربرد شهروندی لایه سخت زیرساختی (مخازن، کف‌های نفوذپذیر، بام‌های سبز) را فعال می‌سازند. بدون این لایه، اهمیت کارکردی زیرساخت‌های مدیریت آب شهری در رویه فرهنگی مردم، همانند بسیاری از پروژه‌های قبلی در ایران، به سرعت رها خواهد شد.

جدول ۱- سطوح سه‌گانه برنامه‌ریزی و اقدام در مدیریت بهره‌ور آبگیرهای شهری

سطح	کارکرد	مثال در زمینه مدیریت رواناب شهری
راهبردی	تدوین چشم‌انداز و تغییر پارادایم	پذیرش «رواناب به عنوان منبع ارزشمند» به جای روایت «بحران مزاحم»
فنی	طراحی برنامه‌ها و آیین‌نامه‌های تشویقی	الزام ساختمان‌ها به نصب سامانه آبگیر باران در ازای دریافت پاداش شهری
عملیاتی	اجرای آزمایشی و نوآوری محلی	احداث باغچه‌های بارانی مشارکتی در مدارس و پارک‌ها با المان‌های تعاملی

۳- نقش عوامل اجتماعی - روانی در رفتارهای مصرف صحیح آب، شکاف بین «گفتار و کردار»؛ چرا آگاهی به تنهایی کافی نیست؟

مطالعات رفتاری نشان می‌دهند که تغییر الگوهای مصرف آب تنها از طریق سیاست‌های فنی یا اقتصادی امکان‌پذیر نیست، بلکه عوامل اجتماعی و روانی نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. مهم‌ترین این عوامل عبارت‌اند از هنجارهای اجتماعی، نگرش‌های محیط‌زیستی، احساس مسئولیت جمعی، آگاهی و دانش محیط‌زیستی و اعتماد به نهادهای مدیریتی. بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه رفتارهای صرفه‌جویی آب، مداخلات اجتماعی مانند آموزش عمومی، کمپین‌های فرهنگی و برنامه‌های مشارکتی می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر کاهش مصرف آب داشته باشند. در این میان، صنایع خلاق به دلیل توانایی در تولید پیام‌های جذاب و خلاقانه، ظرفیت بالایی برای اثرگذاری بر این متغیرهای اجتماعی - روانی دارند. مطالعه میدانی Parker و همکاران (۲۰۱۸) در خوابگاه‌های دانشگاهی آمریکا نشان داد که نگرش مثبت به محیط‌زیست، تضمین‌کننده رفتار صرفه‌جویانه نیست. در آن پژوهش، ۹۰٪ دانشجویان ادعای علاقه به صرفه‌جویی داشتند، اما مصرف آب آنها پس از نصب ابزارها و تبلیغات نه تنها کاهش نیافت، بلکه افزایش هم یافت! این یافته با نتایج مطالعه Singha و همکاران (۲۰۲۲) در ژاپن همخوانی دارد: آگاهی از بحران آب (با ضریب ۰/۲۹) تنها زمانی به رفتار منجر می‌شود که با هیجان مثبت (ضریب ۰/۱۷)، عادت (ضریب ۰/۲۳) و فرهنگ خانوار (ضریب ۰/۱۶) همراه باشد. به عبارت دیگر، بازی‌وارسازی و طراحی تجربه می‌توانند حلقه مفقوده بین آگاهی و عمل را پر کنند. در بررسی نقش عوامل اجتماعی - روانی در رفتارهای صرفه‌جویی آب و واکاوی شکاف میان «گفتار و کردار»، مشخص می‌شود که آگاهی‌بخشی صرف برای تغییر بنیادین رفتار مصرف‌کنندگان کافی نیست. برای مدیریت موثر منابع آب، شهر باید به مثابه یک «سامانه اجتماعی - اکولوژیکی» در نظر گرفته شود؛ سیستمی که در آن نوآوری‌های فنی و زیرساختی تنها زمانی اثربخش خواهند بود که با تغییرات رفتاری و فرهنگی شهروندان پیوند بخورند. این پژوهش با مدل‌سازی و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف

سیاستی نشان می‌دهد که تکیه بر انتقال آگاهی یا راهکارهای صرفاً کنترلی نمی‌تواند دانش ذهنی افراد را به عمل تبدیل کند. برای پر کردن شکاف موجود میان تمایل ابرازشده به صرفه‌جویی (گفتار) و رفتار واقعی خانوارها (کردار)، نیازمند مداخلات ترکیبی نظیر «تقویت هنجارهای اجتماعی»، «ایجاد تعهد» و «تجربه عملی و هم‌آفرینی» است. در واقع، عادی‌سازی رفتارهای محافظت از آب از طریق ایجاد این باور اجتماعی که دیگران نیز رفتار مشابهی دارند، در کنار محرک‌های رفتاری و کاهش هزینه‌ها، می‌تواند نرخ پذیرش تجهیزات کاهنده مصرف آب را ارتقا دهد و نشان دهد که گذار به یک شهر حساس به آب، پیش از فناوری، در گرو نوآوری‌های اجتماعی و روان‌شناختی است (شکری و همکاران، ۱۴۰۴).

۴- نوآوری اجتماعی و پیوند آن با صنایع خلاق در مدیریت آب

نوآوری اجتماعی به راهکارهای نوینی اطلاق می‌شود که با مشارکت جامعه برای حل مسائل اجتماعی شکل می‌گیرند. مدیریت پایدار آب در شهرهای کم‌آب نیز به‌طور فزاینده‌ای نیازمند چنین نوآوری‌هایی است. صنایع خلاق می‌توانند در چند سطح متفاوت به شکل‌گیری نوآوری اجتماعی در حوزه آب کمک کنند:

۱. طراحی کمپین‌های فرهنگی و رسانه‌ای برای تغییر رفتار مصرفی
 ۲. تولید محصولات و خدمات خلاقانه مرتبط با مدیریت آب
 ۳. ایجاد فضاهای مشارکتی میان شهروندان، هنرمندان و متخصصان محیط‌زیست
 ۴. استفاده از هنر شهری، بازی‌های دیجیتال و رسانه‌های تعاملی برای آموزش عمومی
- این رویکردها می‌توانند به شکل‌گیری فرهنگ «مسئولیت‌پذیری آبی» در جامعه شهری کمک نمایند. بر اساس مدل تحلیل (Pahl-Wostl و Xia، ۲۰۱۲)، موفقیت چنین پیوندی نیازمند پایش سه عامل کلیدی است (جدول ۲).

جدول ۲- عوامل کلیدی و شاخص‌های پیشنهادی در توسعه همکاری‌های میان‌بخشی آب و صنایع خلاق

عامل	شاخص پیشنهادی
حاکمیت چندمرکزی	تعداد جلسات مشترک ماهانه بین آبفا، شهرداری و شرکت‌های زیست بوم صنایع خلاق
یادگیری و پایش	درصد اصلاح دستورالعمل‌های اولیه بر اساس بازخورد مردمی
منابع در دسترس	میزان رشد یا تخصیص بودجه اختصاصی مشترک نهادی برای «تسهیلات نوآوری خلاق آب»

۵- چارچوب تعاملی پیوند طراحی فضاهای شهری با صنایع خلاق

یکی از ابزارهای مهم در شهرهای حساس به آب، سامانه‌های جمع‌آوری، مدیریت و بهره‌برداری از آب در شهر است. این سامانه‌ها علاوه بر نقش فنی در مدیریت منابع آب، می‌توانند به بستری برای نوآوری اجتماعی و فعالیت صنایع خلاق تبدیل شوند. در یک چارچوب تعاملی، این پیوند می‌تواند شامل عناصر طراحی هنری و خلاقانه زیرساخت‌های جمع‌آوری آب باران در فضاهای عمومی، استفاده از هنر شهری برای نمایش چرخه آب و اهمیت صرفه‌جویی، توسعه محصولات آموزشی و رسانه‌ای درباره مدیریت آب، ایجاد پروژه‌های مشارکتی میان هنرمندان، طراحان شهری و مهندسان آب باشد. البته چنین رویکردی موجب می‌شود زیرساخت‌های آبی شهری نه تنها کارکرد فنی بلکه کارکرد فرهنگی و آموزشی نیز پیدا کنند. مطالعه Xia و Pahl-Wostl (۲۰۱۲)، درباره گذار به «جامعه صرفه‌جویی آب» در چین نشان داده است که برنامه‌های محلی با حمایت دولت مرکزی، کلید تحول پایدار بوده است. در شهری مشابه مشهد از نظر کم‌آبی، دولت محلی مجبور شده است ظرف ۳ سال، ۴۰ هزار هکتار از اراضی کشاورزی را کاهش دهد و نظام حقوق آب را اجرا کند. موفقیت این آزمایش به سه عامل وابسته بود:

۱. ارتباط عملکرد محلی با ارتقای مقام مدیران (انگیزه سیاسی قوی)
۲. ایجاد فضای محافظت‌شده برای نوآوری (معافیت موقت از قوانین موجود)
۳. یادگیری از شکست‌ها (اصلاح شاخص‌های ارزیابی در فاز دوم)

در مقابل، در تیانجین که چنین فوریتی وجود نداشت، پیشرفت نهادی کندتر بود. این درس برای مشهد حیاتی است؛ شهرداری و آبفا باید با هماهنگی یکدیگر، پایلوت‌هایی را در محلات خاص (مثلاً منطقه ثامن یا اطراف کوهسنگی) تعریف کنند که در آنها برنامه‌های مدیریت آب شهری به عنوان شاخص ارزیابی عملکرد مدیران منطقه لحاظ شود؛ برای ساختمان‌های مشارکت‌کننده، مشوق‌های ملموس در نظر گرفته شود و از صنایع خلاق بومی برای تولید محتوای تعاملی استفاده گردد.

۶- تجربه کلان‌شهر مشهد

مشهد به عنوان یکی از بزرگ‌ترین شهرهای ایران با چند ویژگی مهم در حوزه مدیریت آب از جمله رشد سریع جمعیت و افزایش تقاضای آب، وابستگی قابل توجه به منابع آب سطحی و زیرزمینی، کاهش ذخایر سدهای تأمین‌کننده آب و فشار مضاعف ناشی از حضور سالانه میلیون‌ها گردشگر و زائر مواجه است. گزارش‌های رسانه‌ای و پژوهشی نشان می‌دهند

که کاهش منابع آب تجدیدپذیر و برداشت بی‌رویه از منابع زیرزمینی، وضعیت منابع آبی مشهد را در معرض افت و سقوط اساسی قرار داده است. در چنین شرایطی مشهد ظرفیت‌های قابل توجهی برای حرکت به سوی الگوی شهر دوستدار آب دارد؛ از جمله وجود نهادهای فرهنگی و مذهبی با نفوذ اجتماعی بالا، ظرفیت‌های گسترده گردشگری و فرهنگی، حضور فعال صنایع فرهنگی و هنری و امکان استفاده از رسانه‌های شهری برای آموزش عمومی که استفاده از این ظرفیت‌ها در قالب برنامه‌های خلاقانه می‌تواند به ارتقای فرهنگ مصرف پایدار آب در شهر کمک کند. بنابراین کمپین‌های اطلاع‌رسانی و خطاب‌های هشدار عمومی مانند پیام‌های انبوه به تنهایی ناکارآمدند. باید از ابزارهای خلاقانه و تعاملی شهری استفاده نمود.

کلان‌شهر مشهد با درک ضرورت چرخش پارادایمی در عرصه مدیریت آب و با هدف انطباق نظام مدیریت شهری با استانداردهای نوین بین‌المللی، پیشگام پیاده‌سازی این الگو در سطح ملی شد و با توجه به پیشینه اقدامات انجام شده در حوزه‌های زیرساختی، آموزشی و فرهنگی، کمیسیون ملی یونسکو- ایران با بررسی استانداردهای جهانی، کلان‌شهر مشهد را به عنوان اولین پایلوت «شهر دوستدار آب» در ایران برگزید. این انتخاب که در سال ۱۳۹۸ و پس از ارزیابی شاخص‌های فنی صورت گرفت، منجر به ایجاد ساختار در بدنه شهرداری مشهد شد. تشکیل «مدیریت شهر دوستدار آب» در شهرداری، نقطه عطفی در تمرکز بر محورهای اجتماعی و فرهنگی آب بود. طبق چارچوب تدوین شده توسط یونسکو، این برند در بازه‌های زمانی معین ارزیابی شده و تداوم آن منوط به ارائه گزارش‌های پیشرفت شش‌ماهه و پایش مستمر فعالیت‌های اجرایی منطبق با معیارهای جهانی است تا اطمینان حاصل شود که مدیریت یکپارچه آب با مشارکت همه‌جانبه دستگاه‌ها در حال تحقق است (صدافت و صفایی، ۱۴۰۱).

۱-۶- محورهای عملیاتی

در طرح شهر دوستدار آب نیاز است نهادها با هم متحد شوند تا حساسیت لازم در ساکنین شهر، شامل مصرف‌کنندگان و مدیران دولتی و تشکلهای غیردولتی و خصوصی شکل گیرد. این اقدام منجر به تغییر دانش، نگرش و در نهایت تغییر رفتار آنها در مصرف آب می‌شود. پرداختن به مدیریت مصرف برای این شهر از طریق بسترها و سازوکارهای زیرساختی، اجتماعی و فرهنگی موضوع اصلی این طرح است که با در نظر گرفتن وظایف زیر برای این طرح مدیریتی که همه نهادهای شهری را دربرمی‌گیرد، در ادامه مطرح شده است (صدافت و صفایی، ۱۴۰۱):

- استمرار امور و فعالیت در چهار محور کلی زیرساخت، حقوق شهروندی، فرهنگ، هنر و آموزش توسط کلیه نهادهای مرتبط

- پایش، نظارت و اجرای استانداردهای شهرهای دوستدار آب
- تلاش در راستای تغییر رفتار مصرف‌کنندگان آب شهری و استمرار آن
- توجه به محدودیت‌های سرزمینی در استقرار و توسعه شهر
- تعریف دقیق مسئله و شکل‌دهی بینش مسلط اجتماعی درست در حوزه آب در شهر
- در نظر گرفتن همه زیرسیستم‌های فنی، اداری، اجتماعی، حکمرانی و سیاسی آب در شهر با نگاه یکپارچه
- ایجاد بستر مناسب برای اجتماعی شدن آب و مشارکت گسترده شهروندان

۶-۲- تشریح اقدامات فرهنگی، آموزشی شهر دوستدار آب

- سند جامع اقدامات آموزشی و فرهنگی
- زیربنای تحقق پارادایم نجات آب که مدیریت تقاضا و مصرف، هسته مرکزی آن را تشکیل می‌دهد؛ بازطراحی الگوهای رفتاری از طریق اقدامات آموزشی و فرهنگی است تا شهروندانی مسئولیت‌پذیر، مدیرانی دغدغه‌مند و زائرانی همراه در کالبد یک «شهر دوستدار آب» پرورش یابند.
- مطالعات صورت گرفته در شهر مشهد نشان داد اگرچه تاکنون طرح‌های فرهنگی متعددی اجرا شده، اما دو ضرورت حیاتی شناسایی شد: نخست، عبور از رویکردهای جزیره‌ای به سوی هم‌سوسازی کلیه اقدامات و دوم، جایگزینی فعالیت‌های مقطعی و سلیقه‌ای با افق‌گذاری‌های بلندمدت. بر این اساس، تدوین «سند جامع آموزشی و فرهنگی حوزه آب» با محوریت شهر دوستدار آب در شهرداری مشهد و با مشارکت کلیه نهادهای کلیدی در دستور کار قرار گرفت.
- در گام نخست تدوین سند، به منظور گذار از رویکردهای صرفاً سازه‌ای و مهندسی به سمت کنش‌های اجتماعی، آسیب‌شناسی دقیقی از تجربه‌های پیشین صورت گرفت. نتایج این واکاوی، چالش‌های اصلی حوزه فرهنگ‌سازی آب در مشهد را در چهار محور کلان دسته‌بندی کرد. تدوین این سند طی یک فرآیند تعاملی و با مشارکت ۲۶ دستگاه اجرایی و نظارتی صورت گرفت. در گام نخست، با استفاده از فرم‌های سنجش ظرفیت و برگزاری نشست‌های هم‌اندیشی، افق‌های مدنظر هر دستگاه ترسیم شد. نوآوری اصلی این سند، بهره‌گیری از ماتریس سه‌بعدی MAC (مخاطب، ابزار، روش) است (پنهان‌رسولی و همکاران، ۱۳۹۷). بر اساس این مدل، برنامه‌های ترویجی نه به صورت کلی، بلکه با تفکیک دقیق گروه‌های هدف (شامل مخاطبان عمومی و گروه‌های خاص نظیر کودکان، روحانیون، زائران، بانوان و اصناف) طراحی شده‌اند. برای تحقق چشم‌انداز شهر دوستدار آب در یک بازه زمانی ۱۰ ساله، سه هدف بنیادین و شاخص‌های متناظر برای سنجش آن‌ها تعریف شده است:
- ۱. توسعه بینش و آگاهی (سواد آبی): ایجاد درک عمیق نسبت به ارزش آب در میان شهروندان، مدیران و زائران

- شاخص ارزیابی: سنجش میزان سواد آبی از طریق پیمایش‌های علمی و مصاحبه‌های عمیق
- ۲. تغییر رفتار کنشگران: اصلاح الگوهای مصرف در بخش شرب و خدمات شهری
- شاخص ارزیابی: میزان کاهش سرانه مصرف آب شرب شهری
- ۳. نهادینه‌سازی مسئولیت‌پذیری و مطالبه‌گری: ارتقای فرهنگ حفاظت از منابع آب و نظارت اجتماعی بر عملکرد مدیران.
- شاخص ارزیابی: تحلیل محتوای سامانه‌های تعاملی و میزان مشارکت مردم در پایش منابع.
- این سند فراتر از یک طرح تبلیغاتی یک‌سویه است. به منظور تضمین اجرای مفاد سند، جداول تفصیلی شرح وظایف برای هر ۲۶ نهاد ذی‌ربط تنظیم و پس از تصویب در شورای فرهنگ عمومی استان، توسط فرمانداری مشهد به تمامی دستگاه‌ها ابلاغ گردید.
- سند جامع آموزشی و فرهنگی حوزه آب، نه به عنوان یک طرح ایستا، بلکه در قالب یک فرآیند پویا و چرخه‌ای متشکل از برنامه‌ریزی، اجرا، پایش و بازبینی تعریف شده است. هدف اصلی در این ساختار، اجتناب از بوروکراسی اداری و جلوگیری از تکرار رویکردهای کلیشه‌ای، از طریق انطباق‌پذیری مستمر با واقعیت‌های موجود است. بر این اساس، مقرر گردید جهت تضمین پایداری بستر اجتماعی «نجات آب»، برنامه انطباق دوره‌ای در پایان هر سال کمیته فرهنگی شهر دوستدار آب اجرا و نتایج آن در قالب گزارش‌های مدون و شفاف منتشر گردد. همزمان با این فرآیند، ارزیابی عملکرد دستگاه‌ها انجام می‌گیرد. این ارزیابی مبتنی بر جدول اقدامات سند و همچنین تکالیف ابلاغی فرمانداری در رابطه با کاهش مصرف آب بوده و گزارش نهایی آن در اختیار عالی‌ترین مدیران شهری و استانی قرار می‌گیرد. به منظور تمرکز بر ابعاد فنی و اجرایی، ذیل «کمیته آموزش، فرهنگ و حقوق شهروندی»، سه کارگروه تخصصی با وظایف معین تشکیل شده است:
- ۱. کارگروه محتوایی و تخصصی: تدوین سرفصل‌های آموزشی و تولید محتوای علمی.
- ۲. کارگروه رسانه‌ای و کمپین‌سازی: طراحی پویش‌های اجتماعی و مدیریت جریان اطلاع‌رسانی.
- ۳. کارگروه ارزیابی و اثربخشی: سنجش میزان تغییر رفتار در مخاطبان و پایش خروجی اقدامات.
- در نهایت، در پایان هر سال، فرآیند ارزیابی جامع از روند اجرای سند صورت می‌پذیرد. طی این مرحله، گزارش عملکرد تمامی نهادهای مسئول بر اساس وظایف محوله دریافت می‌گردد که نتایج آن مبنای اصلاح رویکردها برای سال آتی قرار گرفته است.
- پوشش شبکه‌های اجتماعی
- اقدام راهبردی بعدی در این مسیر، بر ایجاد و توسعه زیرساخت‌های ارتباطی در فضای مجازی تمرکز داشت که از طریق راه‌اندازی وب‌سایت اختصاصی و کانال‌های «شهر دوستدار آب» در بسترهای پرمخاطبی نظیر اینستاگرام،

تلگرام، شاد و ایستا محقق گردید. این شبکه‌های اجتماعی و درگاه‌های دیجیتال، بستری یکپارچه را برای ارائه آموزش‌های تخصصی و عمومی به گروه‌های مختلف جامعه فراهم آوردند و به مرجعی برای آگاهی‌رسانی در خصوص وضعیت منابع آبی کلان‌شهر مشهد و کلان‌روندهای حوزه آب در ایران تبدیل شدند. در این فرآیند، محتوای آموزشی و خبری متنوعی در قالب کلیپ‌های ویدئویی، موشن‌گرافیک، آمار و اطلاعات دقیق منابع آب مشهد، کتب و مقالات تخصصی و همچنین اینفوگرافیک‌ها و پوسترهای ترویجی به صورت روزانه و هفتگی در اختیار مخاطبان قرار گرفت. علاوه بر این، با هدف ارتقای سطح مشارکت و تعامل شهروندان، بخش‌های دیگری همچون مسابقات آنلاین و پیام‌های بصری مرتبط با اخبار روز آب نیز در این فضا منتشر گردید.

- برگزاری مسابقات و جشنواره‌ها

در کنار توسعه فعالیت‌های مجازی، برگزاری جشنواره‌ها و مسابقات فرهنگی نیز به عنوان یکی دیگر از محورهای اجرایی در دستور کار قرار گرفت. در این راستا، «جشنواره فرهنگی و هنری شهر دوستدار آب» با هدف جلب مشارکت عموم شهروندان برگزار گردید. همچنین با نگاه ویژه به آموزش نسل آینده و نهادینه‌سازی فرهنگ حفظ منابع آبی در میان کودکان و دانش‌آموزان، مسابقات نقاشی با موضوع آب، طراحی و اجرا شد.

- تمرکز ویژه بر گروه هدف دانش‌آموزان

یکی از اقدامات بنیادین در این حوزه، اجرای طرح «همیاران آب» در مقطع ابتدایی با هدف نهادینه‌سازی فرهنگ مدیریت مصرف در میان دانش‌آموزان بود. این طرح با مشارکت فعال معلمان بر انتقال مفاهیم کلیدی و حساس‌سازی نسل آینده نسبت به صیانت از منابع آبی تمرکز داشت.

در ادامه این مسیر، فرآیند شناسایی و انتخاب «مدارس دوستدار آب» به عنوان یکی از اهداف بنیادین پروژه شهر دوستدار آب در دستور کار قرار گرفت. با توجه به اینکه کودکان و نوجوانان مستعدترین گروه برای تغییر نگرش هستند، شبکه مدارس به عنوان اصلی‌ترین بستر ارتباطی انتخاب گردید. بدین منظور، کارگاه‌های آموزشی متعددی در نواحی مختلف شهر برگزار شد که در آن‌ها علاوه بر تشریح بحران آب، شاخص‌های مدارس دوستدار آب نیز تبیین گردید. فرآیند انتخاب این مدارس در گام نخست با تدوین شاخص‌های دقیق در دو حوزه زیرساختی و آموزشی و فرهنگی آغاز شد. سپس بر اساس این شاخص‌ها، پرسشنامه‌ای جهت امتیازدهی به اقدامات مدارس طراحی و بصورت آنلاین در اختیار مدیران قرار گرفت.

پس از ارزیابی نتایج آزمون، تعدادی مدرسه که بالاترین امتیاز را کسب کرده بودند به نشست‌های هم‌اندیشی دعوت شدند. در مرحله نهایی، به منظور صحت‌سنجی اطلاعات، بازدیدهای میدانی از مدارس منتخب صورت گرفت و تمامی مستندات مربوط به اقدامات زیرساختی و فرهنگی دریافت و بررسی شد. در نهایت، مدرسه‌ای که در زمینه‌هایی همچون بهینه‌سازی

سیستم‌های سرمایشی (استفاده از سایبان کولر)، نصب پوسترهای آموزشی در آشپزخانه‌ها، دیوارنویسی با مضامین آبی، مشارکت در طرح همیاران آب و استفاده از روش‌های آبیاری نوین (قطره‌ای) در فضای سبز مدرسه پیشرو بودند، به عنوان «مدارس دوستدار آب» برگزیده شدند.

- شبکه‌سازی و ایجاد تعاملات گسترده

در بعدی دیگر از اقدامات، نشست‌های هم‌اندیشی با اداره مشارکت‌های اجتماعی و دبیران شورای اجتماعی محلات شهرداری مشهد با هدف بهره‌گیری از ظرفیت مساجد و محلات در آموزش عموم افراد برگزار گردید. محور اصلی این جلسات، ترویج فرهنگ مدیریت مصرف در سطح محلات و جلب مشارکت شهروندان بود که با توزیع اقلام آموزشی تخصصی نظیر بروشور و پوستر در مناطق مختلف شهر همراه گشت.

- فضا سازی شهری تبلیغات محیطی مؤثر

یکی دیگر از اقدامات اجرایی در این پروژه، بهره‌گیری از ظرفیت تبلیغات محیطی با تمرکز بر بیلборدهای شهری به عنوان یکی از مؤثرترین ابزارهای بصری بود. در این راستا، مکان‌نمایی تابلوهای آموزشی بر اساس تحلیل میزان توقف و تردد مخاطبان صورت گرفت؛ به طوری که در نقاط پرتردد نظیر تقاطع‌ها و بزرگراه‌ها، از ترکیب بیلبوردهای ثابت و نمایشگرهای دیجیتال برای انتقال مفاهیم مدیریت مصرف آب استفاده گردید تا بیشترین میزان مواجهه و اثربخشی در سطح شهر محقق شود.

- تدوین محتوای آموزشی و اطلاع‌رسانی

همزمان با سایر اقدامات، فرآیند تدوین محتوای آموزشی و اطلاع‌رسانی با هدف غنای علمی وبسایت اختصاصی پروژه در دستور کار قرار گرفت. در این راستا، مجموعه‌ای متنوع از اقلام فرهنگی شامل کلیپ‌های آموزشی، پادکست‌ها، خبرنامه‌های دوره‌ای، کتب و مقالات تخصصی تهیه و بارگذاری گردید.

۷- چالش‌ها و خلأهای موجود

بررسی ادبیات پژوهشی نشان می‌دهد که در ایران هنوز پیوند نظام‌مند میان صنایع خلاق و مدیریت آب شهری به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار نگرفته است که به مهم‌ترین چالش‌ها در جدول (۳) اشاره شده است.

این وضعیت نشان‌دهنده ضرورت توسعه رویکردهای نوآورانه و میان‌رشته‌ای در برنامه‌ریزی شهری ایران است. راهبردها نشان می‌دهند که برای عبور از نگاه تک‌بعدی مهندسی به بحران آب (به‌ویژه در کلان‌شهری مثل مشهد)، ضروری است سیاست‌گذاران به صنایع خلاق نه به عنوان ابزاری صرفاً تزئینی، بلکه به عنوان یک اهرم قدرتمند رفتارشناختی و اجتماعی نگاه کنند.

جدول ۳- راهکارهای کاربردی مناسب چالش‌های پیوند نظام‌مند حکمرانی آب شهری و صنایع خلاق

ردیف	چالش	راهکار راهبردی
۱	محدود بودن پژوهش‌های میان‌رشته‌ای در حوزه آب و صنایع خلاق	ایجاد شبکه‌های پژوهشی هم‌گرا، تعریف پایان‌نامه‌ها و حمایت‌های مالی پژوهشی مشترک میان گروه‌های علمی مهندسی آب، شهرسازی، هنر، روان‌شناسی و علوم اجتماعی؛ همچنین تشویق زیست‌بوم نوآوری به پذیرش ایده‌های فناوری نرم و صنایع خلاق مرتبط با آب شهری
۲	ضعف در مشارکت اجتماعی در سیاست‌گذاری‌های آبی	توسعه بسترهای تعاملی و بازی‌وارسازی، استفاده از ظرفیت بازی‌سازی و رسانه‌های تعاملی جهت درگیر کردن شهروندان (از کودک تا بزرگسال) در فرآیند پایش مصرف و ارائه بازخورد. طراحی کمپین‌های هنری محله‌محور که در آن شهروندان، طراحان و مدیران شهری حول موضوع «حقابه و مسئولیت شهروندی» با هم به گفت‌وگو بپردازند.
۳	تمرکز سیاست‌های مدیریت آب بر راهکارهای فنی	تغییر پارادایم به رویکرد اجتماعی-فنی که گذار به مفهوم «شهر حساس به آب» و «شهر دوستدار آب». در این رویکرد، در کنار ساخت سازه‌ای، بودجه‌هایی برای مداخلات رفتارشناسانه، هنرهای شهری و معماری اختصاص می‌یابد تا زیرساخت‌ها با فرهنگ عمومی پیوند بخورند.
۴	نبود چارچوب‌های سیاستی مشخص برای بهره‌گیری از صنایع خلاق در مدیریت منابع طبیعی	تدوین چارچوب‌های تعاملی نهادی به منظور ایجاد کارگروه‌های مشترک میان وزارت نیرو، شهرداری‌ها، آبفاها و نهادهای متولی اقتصاد دانش‌بنیان. ارائه مشوق‌های مالی، مالیاتی و تسهیلات ویژه به شرکت‌های خلاق و دانش‌بنیانی که محصولات و خدمات ملموس در جهت ترویج فرهنگ صرفه‌جویی آب و نوآوری اجتماعی ارائه می‌دهند.

۸- جمع‌بندی و پیشنهاد‌های سیاستی

راهکار برون‌رفت از بحران آب مشهد، یک مسئله صرفاً هیدرولوژیکی نیست، بلکه چالشی در هماهنگی بین لایه‌های فنی، نهادی و فرهنگی را نیز شامل می‌شود. صنایع خلاق می‌توانند به عنوان «تسهیلگر اجتماعی» عمل کرده و زیرساخت‌های فنی را از یک عنصر پنهان و بی‌جان به یک فضای شهری زنده و مشارکتی تبدیل کنند. گذار به «جامعه و مدیران مراقب آب»، حداقل یک دهه زمان نیاز دارد. اما اگر امروز، مشهد این پیوند میان آب، هنر و فناوری را آغاز کند، نه تنها از چالش عمیق آب تا حدی عبور خواهد کرد، بلکه به الگویی برای شهرهای نیمه‌خشک تبدیل می‌شود. بررسی مبانی نظری و تجربه شهرهای کم‌آب نشان می‌دهد که تحقق شهر دوستدار آب و شهر حساس به آب نیازمند ترکیبی از اقدامات فنی، اجتماعی و فرهنگی است. در این میان، صنایع خلاق می‌توانند به عنوان یک پیشران مهم در تغییر الگوهای مصرف و شکل‌گیری نوآوری اجتماعی ایفای نقش کنند. مهم‌ترین پیشنهاد‌های سیاستی عبارت‌اند از:

۱. ادغام سیاست‌های توسعه صنایع خلاق با برنامه‌های مدیریت آب شهری
۲. حمایت از پروژه‌های هنری و فرهنگی با موضوع آب در فضاهای عمومی
۳. توسعه برنامه‌های آموزشی و رسانه‌ای خلاقانه برای ترویج فرهنگ حفاظت از آب
۴. ایجاد همکاری میان شهرداری‌ها، آبفا، دانشگاه‌ها، هنرمندان و سازمان‌های مردم‌نهاد
۵. طراحی زیرساخت‌های شهری آبی با رویکرد فرهنگی و مشارکتی

در نهایت، حرکت به سوی شهر دوستدار و حساس به آب در ایران مستلزم تغییر نگرش از مدیریت صرفاً مهندسی آب به حکمرانی اجتماعی- فرهنگی منابع آب است؛ رویکردی که در آن صنایع خلاق می‌توانند نقشی کلیدی در شکل‌دهی به رفتارهای پایدار شهروندان ایفا کنند.

سپاسگزاری

از همراهی و همکاری خانم مهدیه قدیمی و ارائه دیدگاه‌های ارزشمند ایشان در مراحل مختلف تدوین این یادداشت، تشکر می‌نماییم.

منابع

ابتهاج، س.، عزیزآبادی فراهانی، ف.، صالحی امیری، س.ر. و قیومی، ع.ع. (۱۴۰۲). طراحی الگوی توسعه صنایع فرهنگی و صنایع خلاق (مورد مطالعه: تعاونی‌های صنایع خلاق و نوآور ایران). فصلنامه تعاون و کشاورزی، ۴ (۱۲)، ۱۲۹۰-۱۲۷۶. doi:10.22034/ajcoop.2023.311176.1741

اشتیاقي، م و شارع پور، م. (۱۳۹۹). بررسی مفهوم حق به شهر در سیاست‌گذاری شهری. مطالعات توسعه اجتماعی و منطقه‌ای، (۲)، ۶۵-۸۲، شاپا: ۰۷۶۴-۲۷۸۳.

بهنام رسولی، م.، سمیعی، م.ج. و زینلی، م. (۱۳۹۷). راهنمای برنامه‌ریزی برای افزایش سواد آبی و محیط‌زیستی؛ درآمدی بر مفاهیم و رویکردها. انتشارات شایسته گستر. مشهد، ایران.

- Bodin, O. and Prell, C. (2011). Social network in natural resources management. Cambridge University Press. England. doi.org/10.1017/CBO9780511894985.
- Fukuyama, F. (2001). Social capital, civil society and development, *Third World Quarterly*, 22(1), 7-20.
- Gaotri, H. (1986). *Popular Participation in Development*, Paris: Unesco.
- Hahn, T., Olsson, P., Folke, C. and Johnsson, k. (2006). Trust - building, Knowledge Generation and Organization Innovations: The Role of a Bridging Organization for Adaptive Co-Management of a Wetland Landscape around Kristianstad, Sweden. *Human Ecology*. 34(4). 573-592.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). (2011). *Water governance in OECD countries, A multi-level approach*, OECD Studies on water. Paris, France: OECD.
- Parker, JM., Sams, D., Poddar, A., Manoylov, K. (2018). Water conservation behavior: is what we say what we do?. *Journal of Consumer Marketing*, 35(6), 644-652. doi:10.1108/JCM-09-2017-2345.
- Rogers, P. (2002). *Water governance in Latin America and the Caribbean*, Inter-American Development Bank. doi.org/10.18235/0011381.
- Rogers, P. and Hall, A.W. (2003). *Effective water governance*, Stockholm, Sweden: Global Water Partnership (Technical Advisory Committee). Sweden.
- Singha, B., Eljamal, O., Karmaker, S. C., Maamoun, I., & Sugihara, Y. (2022). Water conservation behavior: Exploring the role of social, psychological, and behavioral determinants. *Journal of Environmental Management*, 317, 115484. doi:10.1016/j.jenvman.2022.115484.
- Woolcock, M. (2011). *What Distinctive Contribution Can Social Cohesion Make to Development Theory, Research and Policy*. World Bank, OECD Conference, Paris.
- Xia, C., & Pahl-Wostl, C. (2012). The process of innovation during transition to a water saving society in China. *Water Policy*, 14(2), 185-197. doi:10.2166/wp.2011.140.
- داوری، ک.، عمرانیان خراسانی، ح. و قنبری، ف. (۱۳۹۴). گزارش فرآیند تدبیر آب مشهد. گزارش تهیه شده توسط دانشگاه فردوسی مشهد. مشهد، ایران.
- سمیعی، م.ج.، بهنام رسولی، م. و زینلی، م. (۱۴۰۴). دیباچه‌ای به برنامه‌ریزی برای حرکت به سوی استقرار مدیریت مشارکتی در حوزه آب؛ رویکردها و درس‌آموخته‌های مسیر طی شده در خراسان رضوی. انتشارات ژیکان. مشهد، ایران.
- شکری، ل.، سلامی کوچه باغ، ع.، طلعتی، م. و توکلی امینیان، ث. (۱۴۰۴). از نوآوری فناورانه تا نوآوری اجتماعی؛ تحلیل گذارهای رفتاری شهر حساس به آب (مطالعه موردی مشهد). سومین همایش ملی مدیریت کیفیت آب و پنجمین همایش ملی مدیریت مصرف آب با رویکرد کاهش هدررفت و بازیافت. دانشگاه شهید بهشتی. تهران، ایران.
- صداقت، ن و صفایی، و. (۱۴۰۱). مشهد شهر دوستدار آب ۱۴۰۱-۱۳۹۹. انتشارات بوی شهر بهشت. مشهد، ایران.
- طلعتی، م.، شکری، ل. و سلامی کوچه باغ، ع. (۱۴۰۴). ارائه چارچوب تعاملی پیوند سامانه‌های سطوح آبگیر باران با صنایع خلاق در ایران. چهاردهمین همایش ملی سامانه‌های سطوح آبگیر باران، پردیس منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس. نور، ایران.
- عطارزاده، ب. (۱۴۰۱). شرحی از نظریه ترازدی منابع مشاع در اندیشه گِرت هاردین و درس‌های آن برای ما. فصلنامه سیاستگذاری عمومی، ۸(۳)، ۱۴۷-۱۶۱. doi:10.22059/jppolicy.2022.89548.
- عباسی سارنگ، ه. و آذرکیش، ا. (۱۴۰۴). توسعه فرهنگی پایدار شهری و مدل شهرهای خلاق در ایران. اولین کنفرانس ملی چشم‌انداز آینده شهرها با محوریت توسعه پایدار فرهنگی و شهر خلاق. شیراز، ایران.
- قربانی، م. (۱۳۹۱). نقش شبکه‌های اجتماعی در سازوکارهای بهره‌برداری از مرتع (مطالعه موردی: منطقه طالقان). رساله دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران. تهران، ایران.
- ملک مرزبان، آ و ارتفاعی، ف. (۱۳۹۸). تبیین رویکرد طراحی شهری حساس به آب در حوزه طراحی و مدیریت منابع آب شهری. اولین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، معماری و بازآفرینی شهری. تهران، ایران.
- ولایتی، س. (۱۳۸۵). بررسی بحران آب استان خراسان. ویژه‌نامه جغرافیا. ۱۰(۴۸)، ۲۱۳-۲۳۴.

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. 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 Beheshti 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
Dehghanisani, 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.
Editor: Quchanian, M. Shahedi, M. Talebi Hossein Abad, F. Oskouhi, M.
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

Journal of Water and Sustainable Development

Volume 12 - Issue 4 (serial No.38) - March 2026

Articles in issue:

- **The Future of Smart Irrigation: Global Market Analysis, Trends, and Opportunities**
I. Hajirad, Kh. Ahmadaali, A.M. Liaghat
- **Application of Bacteriophages as Biological Agents in Water and Wastewater Treatment: A Review**
A.R. Radkhah, S. Atash Afrazah
- **Analysis of the Social Conflict in the Persian Gulf Water Transfer Project and the Proposal of a Participatory Governance Model Based on Sustainable Development**
N. Anjomshoa, S. A. M. Jalaei, M. Nejati
- **Design and Validation of a Comprehensive Checklist for Assessing the Quality of Non-Formal Water Education: A Localized Tool for Evaluating Environmental NGOs' Activities**
A. Boroumand, M. J. Amiri
- **Evaluating the Feasibility of Implementing a Wastewater Project Considering Various Technical, Social, and Environmental Approaches (Case Study of Mazandaran Province)**
J. Vejjahat, Sh. Saraf
- **Hydrodynamic Analysis of Flow and Discharge Coefficient in Weirs with Porous Media under Free Overtopping Conditions**
S. A. R. Esmaili, M. Heydari, S. Gohari
- **Alignment Framework for Urban Water Management Strategies with Circular Economy Approach: A Qualitative Research**
Z. Mousavi, M. Hosseini Shakib, S. J. Iranbanfard
- **A Framework for Improving Water and Food Security Governance: Developing a Systemic Tool at the National Level**
M. Hosseini
- **Assessing the Economic Value of Water in Basic Industries for Water Tariff Determination (Case Study: Zayandehroud Basin)**
Sh. Ghobadi, A. Moridi, R. Khalili
- **Meta-Analysis of the Role of the Internet of Things in the Future of Urban Water Systems in Tehran Metropolis**
L. Bakhtiari, N. Ahangari
- **Analysis of Drought Dynamics Using the SPEI Index and the Markov Chain Model (Case Study: Mashhad Synoptic Weather Station)**
H. Jahangiri, M. Jabbari Nooghabi, N. Seyednejad Gol Khatmi
- **Enhancing Meteorological Drought Monitoring in Arid Regions: A Machine Learning-Based Fusion of Satellite Precipitation Data**
M. Hajiani, M. Mardani, M. Tosan

ISSN (Print): 2423-5474

