

آب و توسعه پایدار

سال نهم - شماره سوم (پیاپی ۲۵) - پاییز ۱۴۰۱

تبادل بخشی آب زیرزمینی: سهل ممتنع!



فهرست مقالات

- روش‌شناسی ارزیابی و بازطراحی شبکه پایش سطح آب‌زیرزمینی، بخش دوم: ارزیابی شبکه پایش توسط روش احتمال پذیرش (مطالعه موردی: آبخوان شیروان، خراسان شمالی)
شیوا قلی زاده سرابی، عطاءاله جودوی، میثم مجیدی، عباس ابراهیمی، اعظم رونقی
- مروری بر روابط مؤلفه‌های هیدرولوژیک بیلان آب در ارزیابی تلفات بارندگی
زهرا اسلامی، خدایار عبدالهی
- بررسی اثربخشی اجرای طرح احیا و تعادل بخشی و آسیب‌شناسی پروژه‌های طرح (مطالعه موردی: دشت اردستان-اصفهان)
زهرا کی همایون، میثم حاجی زاده، فرشاد علیجانی
- بررسی اثرات طرح احیا و تعادل بخشی بر آب‌های زیرزمینی دشت قلعه‌تل، شمال شرق خوزستان
فرشاد علی جانی، سیده فاطمه موسوی، هادی محمدی
- ارزیابی طرح احیاء و تعادل بخشی آب‌های زیرزمینی دشت شهریار با تأکید بر کنترهای هوشمند
ملیحه خدادادی بنییس، حمیدرضا ناصری، یاسر نیک پیمان
- آسیب‌شناسی حکمرانی آب در یزد
لیلی بنیاد، اکبر زارع شاه آبادی، مهربان پارسامهر
- ارزیابی تمایل خانوارهای شهری به پذیرش تکنولوژی‌های کارآمد آبی در منطقه ۶ شهر تهران
سمانه عابدی، فاطمه کامیاب، نسترن نصیری
- بررسی پیامدهای اجرای طرح‌های آبیاری تحت فشار و اثر آن بر رضایت و استمرار استفاده از آن در استان قزوین
محمد معصومی، حسین شعبانعلی فمی، حجت ورمزیاری، سمیه کردعلیوند
- بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم ارتقا یافته کلونی زنبور عسل مصنوعی
محمد رضا نجارزادگان، رامتین معینی
- تحلیلی بر وضعیت شوری منابع آب در حال استفاده بخش کشاورزی
محمدحسن رحیمیان، حسن غلامی
- بررسی روش مناسب آگیری لجن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب شهر تهران)
فرشاد گلپایانی کوتنائی، ناصر مهرداد، طاهره تقی زاده فیروزجایی، عطیه فهیمی بندپی، هادی والهی ریکنده
- مروری بر فناوری‌های مورد استفاده جهت پالایش آب در سیستم‌های آبی‌روری با تأکید بر الگوی توسعه پایدار در ایران
علیرضا رادخواه، سهیل ایگدری، اسماعیل صادقی نژاد ماسوله

صاحب امتیاز

مدیر مسئول

سردبیر

دانشگاه فردوسی مشهد

ناصر شاهنوشی فروشانی / استاد گروه اقتصاد کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

کامران داوری / استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

اعضای هیئت تحریریه

کاظم اسماعیلی / دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

حسین انصاری / استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

علی باقری / دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

محمد جلیلی / دانشیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی

حسین علی دادی / استاد گروه مهندسی بهداشت محیط و حرفه ای، 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

احمد سیاحی (ریاست شورا) / مدیر کل دفتر تحقیقات، توسعه فن آوری و ارتباط با صنعت شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور

حسین اسماعیلیان / مدیر عامل شرکت آب و فاضلاب مشهد

علیرضا طاهری / مدیر عامل شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی

سید یحیی موسوی / دبیر اندیشگاه آب 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

سید حسین سجادی فر / شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور

مهدی کلاهی / دانشگاه فردوسی مشهد

غلامرضا کلائی / شرکت آب و فاضلاب مشهد

ثمانه توکلی امینیان / شرکت آب و فاضلاب مشهد

کارشناس اجرایی

ویراستاری

طراحی جلد

ترتیب انتشار / ناشر

شماره شاپا

تارنما / رایانامه

آدرس

حامی مالی

پایگاه های نمایه شده

مهری شاهدی، فاطمه طالبی حسین آباد

مرجان قوچانیان، مهری شاهدی (فنی و ادبی) / مائده اسکوهی (لاتین)

محمدرضا شیخی

فصلنامه / انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

۲۴۲۳-۵۴۷۴

<https://jwsd.um.ac.ir/> Email: jwsd@um.ac.ir

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، دفتر نشریه، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۶۳

شرکت آب و فاضلاب مشهد

پایگاه استنادی علوم ایران (ISC)، پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)، بانک اطلاعات

نشریات کشور (MAGIRAN)



- الف سرمقاله: اثربخشی طرح احیا و تعادل بخشی آبهای زیرزمینی / حمیدرضا ناصری (عضو هیئت تحریریه نشریه)
- ب یادداشت‌های کوتاه: اجرای موثر طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور / جواد میبدی
تعادل بخشی آب زیرزمینی سانتاکلارا / حسین اشکتراب
- ۱ روش‌شناسی ارزیابی و بازطراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی، بخش دوم: ارزیابی شبکه پایش توسط روش احتمال پذیرش (مطالعه موردی: آبخوان شیروان)
شیوا قلی‌زاده سرابی، عطاءاله جودوی، میثم مجیدی، عباس ابراهیمی، اعظم رونقی
- ۱۱ مروری بر روابط مؤلفه‌های هیدرولوژیک بیلان آب در ارزیابی تلفات بارندگی
زهرا اسلامی، خدایار عبدالهی
- ۲۵ بررسی اثربخشی اجرای طرح احیا و تعادل بخشی و آسیب‌شناسی پروژه‌های طرح (مطالعه موردی: دشت اردستان-اصفهان)
زهرا کی همایون، میثم حاجی زاده، فرشاد علی‌جانی
- ۳۹ بررسی اثرات طرح احیا و تعادل بخشی بر آب‌های زیرزمینی دشت قلعه‌تل، شمال شرق خوزستان
فرشاد علی‌جانی، سیده فاطمه موسوی، هادی محمدی
- ۴۹ ارزیابی طرح احیاء و تعادل بخشی آب‌های زیرزمینی دشت شهریار با تأکید بر کنتورهای هوشمند
ملیحه خدادادی بنیس، حمیدرضا ناصری، یاسر نیک پیمان
- ۵۷ آسیب‌شناسی حکمرانی آب در یزد
لیلی بنیاد، اکبر زارع شاه آبادی، مهربان پارسامهر
- ۷۳ ارزیابی تمایل خانوارهای شهری به پذیرش تکنولوژی‌های کارآمد آبی در منطقه ۶ شهر تهران
سمانه عابدی، فاطمه کامیاب، نسترن نصیری
- ۸۷ بررسی پیامدهای اجرای طرح‌های آبیاری تحت فشار و اثر آن بر رضایت و استمرار استفاده از آن در استان قزوین
محمد معصومی، حسین شعبانعلی فمی، حجت ورمزیاری، سمیه کردعلیوند
- ۹۷ بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم ارتقا یافته کلونی زنبور عسل مصنوعی
محمد رضا نجارزادگان، رامتین معینی
- ۱۰۷ تحلیلی بر وضعیت شوری منابع آب در حال استفاده بخش کشاورزی
محمدحسن رحیمیان، حسن غلامی
- ۱۱۷ بررسی روش مناسب آبیگری لجن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب شهر تهران)
فرشاد گلبابائی کوتنائی، ناصر مهردادی، طاهره تقی زاده فیروزجایی، عطیه فهیمی بندپی، هادی والهی ریکنده
- ۱۲۷ مروری بر فناوری‌های مورد استفاده جهت پالایش آب در سیستم‌های آبی‌پروری با تأکید بر الگوی توسعه پایدار در ایران
علیرضا رادخواه، سهیل ایگدری، اسماعیل صادقی نژاد ماسوله
- ۱۴۱ یادداشت تحلیلی: اکتشاف منابع آب زیرزمینی ژرف در ایران: امکانات، محدودیت‌ها و راهبردها / حمیدرضا ناصری، فرشاد علی‌جانی
- ۱۴۷ یادداشت تحلیلی: چرا تعادل بخشی آب زیرزمینی سهل‌ممتنع است؟ / هاشم درخشان
- ۱۵۵ یادداشت تحلیلی: احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور از نگاهی دیگر / هادی میرابوالقاسمی



اثر بخشی طرح احیا و تعادل بخشی آب‌های زیرزمینی

از اواسط دهه ۱۳۷۰ و با تثبیت وضعیت امنیتی، اجتماعی و اقتصادی ایران، همگام با دیگر بخش‌ها، توسعه کشاورزی با بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی از طریق حفر چاه‌ها و در بخش‌هایی با استفاده از منابع آب سطحی بدون برنامه‌ریزی و آینده‌نگری در کشور، تشدید شد. این توسعه و بهره‌برداری نامتوازن از منابع آب، اثر خود را با افت سطح آب زیرزمینی در اکثر آبخوان‌های کشور، از اوایل دهه ۱۳۸۰ نشان داد. وزارت نیرو در سال ۱۳۸۴ با تعریف طرح تعادل بخشی، تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب، برنامه‌های خود را در راستای چاره‌اندیشی برای کنترل افت و کسری مخزن آبخوان‌ها، آغاز کرد. با این حال رخداد خشکسالی طولانی‌مدت در کشور از سال ۱۳۸۷ به بعد، تصویب و اجرای طرح‌های غیر کارشناسی، همچون قانون تعیین تکلیف چاه‌های آب فاقد پروانه بهره‌برداری در سال ۱۳۸۹، حفر چاه‌های غیر مجاز توسط بهره‌برداران، نبود برنامه‌ریزی لازم در اجرای طرح احیا و تعادل بخشی، مشکلات و ابعاد اجتماعی و خلاءهای قانونی اجرای طرح و عدم تخصیص اعتبار لازم، باعث شد تا طرح مذکور عملاً تا سال ۱۳۹۲ پیشرفت و نتایج مطلوبی نداشته باشد. در این فاصله زمانی، کنترل اضافه برداشت چاه‌های مجاز میسر نشد و برداشت چاه‌های غیرمجاز نیز ادامه یافت که نتیجه آن تداوم افت سطح آب زیرزمینی و کسری مخزن، افزایش شوری متوسط و کاهش توان آبدی چاه‌ها در آبخوان‌های کشور بوده است. لذا با فعال شدن شورای عالی آب، ابتدا موضوع برخورد قانونی با برداشت‌های غیر مجاز مصوب و نهایتاً تبدیل به طرحی تحت عنوان طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور مشتمل بر ۱۵ پروژه شد که در جلسه پانزدهم شورای عالی آب کشور در شهریور ۱۳۹۳، تصویب گردید. در کنار این طرح تکالیفی نیز برای وزارت‌خانه‌های نیرو، جهاد کشاورزی، کشور و صنعت، معدن و تجارت مشخص شد.

پروژه‌های طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب در سه دسته قرار گرفته‌اند: (الف) پروژه‌هایی که منجر به تولید و دقیق کردن داده‌ها و اطلاعات در خصوص منابع و مصارف آبخوان‌ها می‌شوند که شامل حفر چاه‌های پیرومتری و اکتشافی، تجهیز چاه‌های پیرومتری به ابزارهای سنجش، و تهیه بیلان و به‌هنگام‌سازی بانک اطلاعاتی محدوده‌های مطالعاتی کشور می‌باشد؛ (ب) پروژه‌هایی که نقش کنترل، نظارت و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی را بر عهده دارند و شامل تقویت و استقرار گروه‌های گشت و بازرسی،

ساماندهی شرکت‌های حفاری، مطالعه ایجاد و استقرار بازار آب، ایجاد تشکلهای آب‌بران و انجام حمایت‌های فنی و مالی از آنها (وزارت جهاد کشاورزی)، به روز نمودن سند ملی آب (وزارت جهاد کشاورزی)، مطالعات فرو نشست در دشت‌های کشور (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)، و اطلاع‌رسانی و آگاه‌سازی افکار عمومی می‌باشد؛ و (ج) پروژه‌هایی که مستقیماً منجر به ذخیره‌سازی آب در آبخوان‌ها می‌شوند که شامل خرید و انسداد چاه‌های کشاورزی، جایگزینی پساب با چاه‌های کشاورزی در دشت‌های ممنوعه، تهیه و نصب کنتورهای حجمی و هوشمند روی چاه‌ها، اجرای پروژه‌های تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب و مطالعه و اجرای طرح‌های آبخیزداری (وزارت جهاد کشاورزی) می‌باشد.

با توجه به اینکه هدف اصلی طرح احیا و تعادل بخشی، جبران کسری مخازن آب زیرزمینی و پیشگیری از برداشت بی‌رویه از این منابع است. از مهمترین پروژه‌هایی که در این طرح در اولویت اجرا قرار دارند، می‌توان به تقویت و تشکیل گروه‌های گشت و بازرسی از منابع آب، انسداد چاه‌های غیر مجاز، و نصب تجهیزات هوشمند بر روی چاه‌های بهره‌برداری، اشاره کرد. برای انجام پروژه‌های یاد شده نیاز به تأمین اعتبار و ابلاغ تخصیص اعتبارات است که تاکنون اعتبارات لازم برای پایان طرح که هدف آن تا پایان سال ۱۴۰۴ می‌باشد، فراهم نشده است. عدم تأمین اعتبار مورد نیاز باعث طولانی‌تر شدن این طرح گردیده و موجب شده که تاکنون روند تجمعی کسری مخازن آب زیرزمینی، ادامه‌دار باشد. هرچند پس از اجرای این طرح و طبق پیش‌بینی از ابتدای طرح، روند افزایش کسری مخازن کندتر شده است. لازم به توضیح است از زمان شروع طرح تا سال ۱۳۹۸، طرح به صورت نیمه‌متمرکز و برنامه‌ریزی آن در اختیار استان‌ها بوده است. پس از سال ۱۳۹۸، طرح متمرکز شده و در شرکت مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی و ابلاغ شده است. این موضوع باعث شده که اولویت استان‌ها در خصوص انجام پروژه‌های طرح با اختلال و همچنین ابلاغ اعتبارات و تخصیص آن و در نتیجه هزینه‌کرد نهایی، با تأخیر صورت گیرد. یکی از موارد قابل ذکر در این طرح، عدم توجه جامع به موضوع منابع آب سطحی است که به نظر می‌رسد با توجه به این موضوع مهم، بتوان در مناطقی که دارای منابع آب سطحی هستند، استفاده بهینه برد و از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، جلوگیری کرد.

این طرح مجموعه‌ای از فعالیت‌های متفاوت را در برمی‌گیرد و با نظر به حساسیت‌های موجود در مواجهه مستقیم آن با معیشت کشاورزان، لازم است پیشبرد طرح با هماهنگی بین ارکان مختلف دولت و سایر دستگاه‌ها، صورت پذیرد. تدوین سیاست‌های ملی و منطقه‌ای در جهت تنوع شغلی و جابه‌جایی اشتغال در بخش کشاورزی به سایر بخش‌ها و همچنین اصلاح الگوی کشت به صورت منطقه‌ای و ابلاغ آن، لازمه اجرای صحیح این طرح است. علیرغم ایجاد سازوکارهای مختلف از قبیل ایجاد شورای

یادداشت کوتاه



اجرای موثر طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور

وابستگی شدید اغلب مناطق کشور به منابع آب‌های زیرزمینی، رشد جمعیت و نیاز روزافزون به منابع آبی و همچنین وضعیت اقلیمی و جغرافیای ایران و وقوع خشکسالی‌های مکرر در سال‌های اخیر، موجب گردیده تا برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی و عدم رعایت حریم کمی و کیفی منابع آب در دهه‌های گذشته، باعث ایجاد صدمات جبران‌ناپذیری به این منابع حیاتی گردد؛ به نحوی که بسیاری از منابع آب در دسترس و استراتژیک نابود و یا در معرض خطر قرار گرفته است. در حال حاضر وزارت نیرو بر اساس مفاد ماده ۴ قانون توزیع عادلانه آب، نسبت به اعلام ممنوعیت توسعه و بهره‌برداری از آبخوان‌های حدود ۴۲۰ دشت از ۶۰۹ دشت کشور، اقدام نموده است. به دلیل خشکسالی‌ها و تغییرات اقلیم، میزان کل آب تجدیدپذیر کشور از متوسط بلندمدت ۱۳۰ میلیارد مترمکعب به حدود ۹۰ میلیارد مترمکعب رسیده است، تأمین آب برای برداشت‌های مختلف از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی به ترتیب ۴۴ میلیارد مترمکعب و ۵۴ میلیارد مترمکعب است. در نتیجه وابستگی برداشت‌های کشور به آب‌های سطحی و زیرزمینی به ترتیب برابر ۴۵ و ۵۵ درصد می‌باشد.

با توجه به وضعیت نامطلوب منابع آب‌های زیرزمینی کشور که نشان‌دهنده کسری مخزن حدود ۱۰ میلیارد مترمکعب در سال، نشست زمین در اغلب دشت‌های مهم کشور و تغییر کیفیت منابع مذکور می‌باشد، وزارت نیرو سعی نموده که ابتدا در سال ۱۳۸۴ طرحی تحت عنوان تعادل بخشی، تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب با ۱۲ پروژه طراحی، تأمین اعتبار و اجرایی نماید و تا اندازه‌ای توانست مدیریت منابع مذکور را از حالت سنتی و آمانی به حالت پروژه‌ای و کنترل پروژه تبدیل نماید و تا حدودی

در اثرات آن بر پایداری وضعیت منابع آب زیرزمینی، ضرورت ادامه طرح، و بازنگری در قوانین و دستورالعمل‌های آن، از موارد ضروری در بخش منابع آب کشور است. بر این اساس نشریه آب و توسعه پایدار در راستای اهداف و خط مشی کلی خود با ضرورت‌سنجی درباره مسائل کلان آب کشور، شماره ویژه‌ای را به مقالات در ارتباط با طرح احیا و تعادل بخشی اختصاص داده که مقالات منتخب در این شماره ارائه شده است.

هم موفق گردید؛ اما سیاست‌های غلط دولت‌های نهم و دهم باعث شد که این پروژه‌ها بعد از ۴ سال متوقف شود و به نتیجه مطلوب که کاهش کسری مخزن دشت‌های کشور بود، نرسد. لذا مجدداً در سال ۱۳۹۳ طرحی تحت عنوان احیا و تعادل بخشی منابع آب‌های زیرزمینی با ۱۵ پروژه به تصویب شورای عالی آب رسید و قرار بود در برنامه ششم، حدود ۱۱ میلیارد مترمکعب کسری مخزن دشت‌های کشور کاهش یابد، اما در عمل پروژه‌های پانزده‌گانه که ۱۱ پروژه آن مربوط به وزارت نیرو، سه پروژه مربوط به وزارت جهاد کشاورزی و یک پروژه آن مربوط به سازمان زمین‌شناسی کشور بود، در عمل به دلیل اجرای ناقص در پروژه‌های فوق، نتایج مورد انتظار بدست نیامد.

لذا لازم بود دو ارگان دولتی و خصوصی با انجام مطالعات آسیب‌شناسی مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی کشور نسبت به عوامل (علت) و مسائل (معلول) موثر در عدم تحقق طرح احیاء و تعادل بخشی اقدام نماید. بدین جهت ابتدا مرکز ملی مطالعات راهبردی کشاورزی و آب اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی ایران و سپس کمیسیون اصل نود مجلس شورای اسلامی با انعقاد قرارداد با مشاورین ذی‌صلاح نسبت به انجام مطالعات آسیب‌شناسی مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی کشور اقدام نمودند که تقریباً هر دو ارگان به یک نتیجه واحد رسیدند که مهمترین عوامل و مسائل موثر در عدم تحقق طرح احیا و تعادل بخشی به ترتیب اولویت به شرح ذیل می‌باشند:

۱. ظرفیت‌های ناکافی قانونی و عدم استفاده موثر از احکام برنامه‌های توسعه و اسناد بالادستی در سازماندهی و فعال‌سازی مشارکت بهره‌برداران و جوامع محلی
 ۲. ناکارآمدی و وجود تعارض منافع در مدیریت آب‌های زیرزمینی
 ۳. وجود تعارض در سیاست‌ها و اسناد بالادستی و منافع بین‌بخشی مغایر با اصل همگرایی در برنامه‌ریزی و اقدام
 ۴. فقدان جامع‌نگری در برنامه‌ریزی، اجرا و پایش طرح
- این چهار مورد عوامل اصلی پدیداری مسائل و مشکلات متعدد در مدیریت آب‌های زیرزمینی کشور هستند که تعدادی از مهمترین آنها به شرح زیر است:
- ۱- عدم حضور و مشارکت موثر جامعه بهره‌بردار در تدوین و

- اجرای برنامه‌ها و طرح حفاظت از آبخوان‌ها
- ۲- عدم تمایل مدیران و سیاست‌گذاران آب برای ورود به چالش‌های مدیریت آب‌های زیرزمینی
- ۳- تکیه بر سیستم مدیریتی دولتی اجرای طرح
- ۴- فقدان جایگاه مناسب آب زیرزمینی در ساختار مدیریت آب کشور
- ۵- ضعف ساختارهای هماهنگی بین‌بخشی
- ۶- عدم توازن در بودجه و اعتبارات تخصیص‌یافته به منابع آب‌های زیرزمینی
- ۷- نارسایی هماهنگی موثر بین سیاست‌های بخش آب، کشاورزی، محیط‌زیست، شهرسازی، انرژی و صنعت در برنامه‌ریزی مکانی و زمانی نیازهای جدید
- ۸- فقدان یک برنامه و بسته اقتصادی جامع برای پشتیبانی و بسترسازی طرح احیا و تعادل بخشی
- ۹- بی‌توجهی به ضرورت نگاه یکپارچه به برنامه تعادل بخشی و اجرای ناقص و انتزاعی پروژه‌های طرح مذکور
- با توجه به موارد مذکور، به نظر می‌رسد با تجربیاتی که از مدیریت و حفاظت قنوات و چشمه‌ها وجود دارد و همچنین موارد مشابهی که در کشورهای دیگر که اقلیم مشابه ایران را دارند، تعادل بخشی آب‌های زیرزمینی کشور امکان‌پذیر است، به شرط آنکه اولاً ساختار مدیریت آب کشور از حالت متمرکز خارج شده و به جای آن چهار سطح ملی، حوضه آبریز، استان و دشت

به رسمیت شناخته شود و تصمیم‌سازی، تصمیم‌گیری و اجرا به تناسب، تفویض گردد. ثانیاً کلیه تصدی‌گری‌ها از جمله تهیه و نصب کنتور، تشکیل گروه‌های گشت و بازرسی، انسداد چاه‌های غیرمجاز، آماربرداری و تهیه بیلان، اخذ و هزینه حق‌النظاره و جرائم و ... به تشکلهای آب‌بران که قدرت تقنینی داشته باشند (مانند تشکلهای صنفی) سپرده شود. در این حالت، وزارت نیرو مجال کافی می‌یابد تا به امور حاکمیتی (مانند: تخصیص کلان منابع آب، نظارت بر اجرای قوانین و ...) بپردازد. بدیهی است واگذاری تصدی‌گری‌ها به معنای تعطیلی امور حاکمیتی و عدم نظارت ارگان‌های ذی‌ربط و ذی‌مدخل به‌ویژه وزارت نیرو و دستگاه قضا و نیروی انتظامی نیست و در صورت درخواست تشکلهای و یا احیاناً وقوع هرگونه تخلف از ضوابط، این ارکان باید دخالت نمایند.

بنابراین ضروری است تا شوراهای هماهنگی حوضه‌های آبریز با مشارکت کلیه ذینفعان و ذی‌مدخلان منابع آب تشکیل و شورای فوق پس از تصویب دستورالعمل‌ها و ضوابط، بر اجرای مصوبات توسط تشکلهای حمایت و بر فعالیت‌های کلیه ذینفعان حقیقی و حقوقی به‌ویژه تشکلهای نظارت عالی‌ه داشته باشند. علاوه بر این لازم است برای هماهنگی و اجرای موثر تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی هر حوضه آبریز، ماتریس فعالیت کلیه ذینفعان و ذی‌مدخلان حقیقی و حقوقی با حضور خودشان تهیه و براساس آن کلیه مصوبات اجرایی گردد.

تعال‌بخشی آب زیرزمینی سانتا کلارا



«دستیابی به تعادل بخشی آب زیرزمینی
یک اتفاق نیست؛ بلکه یک فرآیند تحولی
کاملاً پیچیده می‌باشد»

پیش‌رانه‌های اجتماعی-اقتصادی، تعادل برقرار نماید. اساس مدیریت در سانتا کلارا بر پایه توسعه و پیاده‌سازی طرح‌های مدیریت آب زیرزمینی توسط خود سازمان‌های محلی، بنا شده است. سیاست‌ها برای پاسخ به موقع در برابر تغییرات، مطابق برنامه زمان‌بندی، تعیین تکلیف شده است. بنابراین کلیه اقدامات مطابق یک برنامه مشخص در بازه‌های زمانی ماه و هفته خرد گردیده، و البته مستمراً برای تطبیق با شرایط به روز می‌گردد. تعادل بخشی نیازمند ظرفیت‌سازی برای جلب مشارکت مردمی است، لذا امری زمان‌بر بوده که این فرآیند سابقه‌ای طولانی در سانتا کلارا دارد. اقدامات موثر برای تعادل بخشی آب زیرزمینی از اوایل سال ۱۹۶۰ شروع شده و سابقه‌ای بیش از نیم قرن برای اجرای اقدامات موثر برای تعادل بخشی آب زیرزمینی دارد. سانتا کلارا در اجرای قوانین تعادل بخشی نسبت سایر نقاط آمریکا به موفقیت بیشتری دست یافته و هم اکنون نیز از مناطق پیشگام در تعادل بخشی آب زیرزمینی می‌باشد. به بیان ساده می‌توان جمع‌بندی نمود که رشد و بلوغ برای ظرفیت‌سازی و تعادل بخشی، فرآیندی زمان‌بر است.

شروع اقدامات موثر در ایجاد تعادل بخشی آب زیرزمینی و حرکت به سمت «پایایی آب زیرزمینی»، تبدیل مدیریت داوطلبانه آب زیرزمینی به مدیریت مبتنی بر الزام قانونی، طی یک دوره طولانی مدت ۶۰ ساله (سال‌های ۱۹۶۰-۲۰۲۰) رخ داده است. بنابراین تعادل بخشی اتفاقی ناگهانی نبوده، بلکه فرآیند بسیار پیچیده بوده که مبتنی بر ظرفیت‌سازی نهادهای محلی برای مدیریت آب زیرزمینی، وقوع یافته است. اقدامات مدیریت آب زیرزمینی سانتا کلارا، مستمراً مبتنی برای چرخه دمینگ مورد ارزیابی و پایش قرار می‌گیرد، تا بهبود در وضعیت آب زیرزمینی استمرار یابد. هم اکنون حجم بسیار بزرگ از تدوین برنامه‌ها، قانون‌گذاری، ظرفیت‌سازی و آماده‌سازی بصورت تو در تو در سانتا کلارا در حال انجام است تا دستیابی به پایایی توسعه را تضمین نماید. در نهایت می‌توان جمع‌بندی نمود که تعادل بخشی آب زیرزمینی یک اتفاق نیست، بلکه یک فرآیند تحولی کاملاً پیچیده است که اولین گام آن، ظرفیت‌سازی برای تحول‌خواهی قبل از نابودی بیشتر منابع آب زیرزمینی می‌باشد.

پی‌نوشت

- 1- Manager at Santa Clara Valley Water District
- 2- DWR= Department of Water Resources
- 3- SWRCB= State Water Resources Control Board
- 4- GSA= Groundwater Sustainable Agency
- 5- Groundwater Sustainability
- 6- Deming Cycle

آب زیرزمینی مهمترین منبع تأمین آب شرب در سراسر دنیا است؛ اما این منبع حیاتی، پنهان از چشم مردم بوده و به اندازه کافی مورد توجه و اهمیت قرار نمی‌گیرد. در واقع به اندازه‌ای که منابع آب سطحی مورد توجه قرار می‌گیرند، منابع آب زیرزمینی مورد توجه نبوده و در اکثر نقاط دنیا در معرض اضافه‌برداشت و زوال روزافزون قرار گرفته است. این ساده‌انگاری و بی‌توجهی به اهمیت و جایگاه منابع آب زیرزمینی در سانتا کلارا، در حدود ۷۰ سال پیش به بیشترین حد خود رسیده بود. به گونه‌ای که در این دوره (سال‌های ۱۹۲۰ تا ۱۹۶۰)، بیش از ۶۰ متر افت تراز آب زیرزمینی را تجربه کرده است. اقدامات عملی موثر برای تعادل بخشی تراز آب زیرزمینی از سال ۱۹۶۰ در سانتا کلارا شروع شده است. این اقدامات توانسته است تا در عین رشد جمعیت و افزایش سطح رفاه عمومی، تراز آب زیرزمینی را نیز طی یک دوره ۶۰ ساله، مورد تعادل بخشی قرار دهد. این تجربه در مدیریت آب زیرزمینی حدود یک قرن به طول انجامیده است.

در دوره اول (سال‌های ۱۹۲۰-۱۹۶۰)، سانتا کلارا افت شدید تراز آب زیرزمینی را تجربه کرده است، به گونه‌ای که فرونشست زمین به بیشترین مقدار خود رسیده است. در دوره دوم (سال‌های ۱۹۶۰-۲۰۲۰) که می‌توان از آن به دوره تعادل بخشی آب زیرزمینی نیز یاد نمود؛ تراز آب زیرزمینی افزایش یافته و نرخ فرونشست زمین نزدیک به صفر شده است. قابل توجه است که این تعادل بخشی، با رشد جمعیت از حدود ۵/۰ میلیون نفر به بیش از ۲ میلیون نفر در محدوده سانتا کلارا، همراه بوده است. لذا می‌توان تجربه مدیریت آب زیرزمینی در سانتا کلارا را یک تجربه موفق در تعادل بخشی آب زیرزمینی و برگرداندن تراز آب زیرزمینی به تراز اولیه (تراز پایایی آب زیرزمینی) تلقی نمود. تعادل بخشی آب زیرزمینی با همکاری و تعاون بین سه نهاد: «دیارمان آب کالیفرنیا» با مسئولیت تدوین ضوابط و ارزیابی، «شورای آب» با مسئولیت حمایت و پشتیبانی در راستای اجرای ضوابط و «سازمان‌های محلی» با مسئولیت طرح‌ریزی و اجرا به ثمر نهشته است. به بیان دیگر این سه نهاد با ایجاد تعامل صحیح با سایر گروه‌داران حوضه، توانسته است برای دستیابی به تعادل بخشی بین ظرفیت تجدیدپذیری آب زیرزمینی با

Article Type: Applied Article

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

Methodology for Groundwater Monitoring Network Assessment and Design, Part 2: Iran Evaluation of Monitoring Network by Acceptance Probability Method; Case Study: Shirvan Aquifer, North Khorasan, Iran

Sh. Gholizadeh Sarabi¹, A. Joodavi^{2*}, M. Majidi Khalilabad², A. Ebrahimi³, A. Ronaghi⁴

1- Faculty member, Hydroinformatics Department, East Water and Environmental Research Institute (EWERI), Mashhad, Iran. 2- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Kashmar Higher Education Institute, Kashmar, Iran. 3,4- Manager and Expert of Water Resources Basic Studies, Regional Water Authority of North Khorasan, Bojnord, Iran.

* (Corresponding Author Email: atajoodavi@kashmar.ac.ir)

Received: 11-03-2022

Revised: 11-05-2022

Accepted: 30-05-2022

Available Online: 21-12-2022

روش‌شناسی ارزیابی و بازطراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی، بخش دوم: ارزیابی شبکه پایش توسط روش احتمال پذیرش (مطالعه موردی: آبخوان شیروان، خراسان شمالی)

شیوا قلی‌زاده سرابی^۱، عطاءاله جودوی^{۲*}، میثم مجیدی خلیل‌آباد^۲، عباس ابراهیمی^۳، اعظم رونقی^۴

۱- عضو هیات علمی گروه هیدروانفورماتیک، مرکز پژوهشی آب و محیط زیست شرق (EWERI)، مشهد، ایران. ۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، مرکز آموزش عالی کاشمر، کاشمر، ایران. ۳ و ۴- به ترتیب مدیر و کارشناس دفتر مطالعات پایه منابع آب، شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی، بجنورد، ایران.

* (نویسنده مسئول، E-Mail: atajoodavi@kashmar.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

Abstract

Groundwater monitoring networks provide important data which are necessary to understand the dynamics of hydrogeological systems. Since the cost of the installation and maintenance of groundwater monitoring networks is extremely high, optimal design and the assessment of the effectiveness of the monitoring networks is necessary. This paper presents the application of a newly developed geostatistical method based on the acceptance probability concept, to optimize the existing network of observation wells in the Shirvan alluvial aquifer, located in North Khorasan province. To this aim, by choosing a suitable semi-variogram and using ordinary kriging, the acceptance probability in the aquifer was calculated. Then, based on the spatial pattern of groundwater level, the acceptance probability was calculated for various parts of the aquifer and the acceptance accuracy values were analyzed at different levels of probability. The results showed that based on the existing observation wells network, 19.2% of the aquifer area has a very high acceptance accuracy. On the other hand, by modifying the network of existing observation wells and adding suggested points, 46.7% of the aquifer area will have a very high acceptance accuracy. Therefore, the installation of new observation wells in the proper locations will increase the accuracy acceptance and improve the efficiency of the observation well network.

Keywords: Acceptance Probability, Groundwater Monitoring, Acceptance Accuracy, Geostatistics, Kriging.

چکیده

شبکه‌های پایش آب زیرزمینی داده‌های مهمی را ارائه می‌دهند که برای درک دینامیک سامانه‌های هیدروژئولوژیکی ضروری هستند. از آنجاکه هزینه نصب و نگهداری شبکه‌های پایش آب زیرزمینی بسیار زیاد است، طراحی بهینه و ارزیابی اثربخشی شبکه پایش ضرورت می‌یابد. این مقاله کاربرد یک روش جدید زمین‌آماري را مبتنی بر مفهوم «احتمال پذیرش»، با هدف بهینه‌سازی شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود در آبخوان آبرفتی شیروان، واقع در استان خراسان شمالی، ارائه می‌نماید. به این منظور با انتخاب واریوگرام مناسب و با استفاده از کریجینگ معمولی، احتمال پذیرش در آبخوان محاسبه شد. سپس بر اساس الگوی مکانی سطح آب زیرزمینی، احتمال پذیرش برای بخش‌های مختلف آبخوان محاسبه و مقادیر «دقت پذیرش» در سطوح احتمالی مختلف تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد با شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود، ۱۹/۲ درصد از سطح آبخوان دقت پذیرش بسیار بالایی دارد. از سوی دیگر، با اصلاح شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود و اضافه شدن نقاط پیشنهادی، ۴۶/۷ درصد از سطح آبخوان دقت پذیرش بسیار بالایی خواهد داشت. بنابراین، به نظر می‌رسد ایجاد چاه‌های مشاهده‌ای جدید در نقاط پیشنهادی و یا جابه‌جایی چاه‌های کم اهمیت به این نقاط، باعث افزایش دقت پذیرش و بهبود کارایی شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود می‌شود. **واژه‌های کلیدی:** احتمال پذیرش، پایش آب زیرزمینی، دقت پذیرش، زمین‌آمار، کریجینگ.

زمین آماری تغییرات زمانی و مکانی نوسانات ماهانه سطح آب زیرزمینی را در ۳۹ حلقه چاه مشاهده‌ای واقع در دشت داراب در استان فارس طی ۱۲ سال مورد مطالعه قرار دادند. Chao و همکاران (۲۰۱۱) نیز برپایه روش‌های زمین آماری و با استفاده از ابزارهای هم‌پوشانی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی بهینه را در دشت بینچوان چین طراحی کردند. همچنین Chandan و Yashwant (۲۰۱۷) با استفاده از روش‌های زمین آماری در GIS، شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود در ۱۸ دشت در بخش مرکزی هندوستان را بهینه‌سازی نمودند.

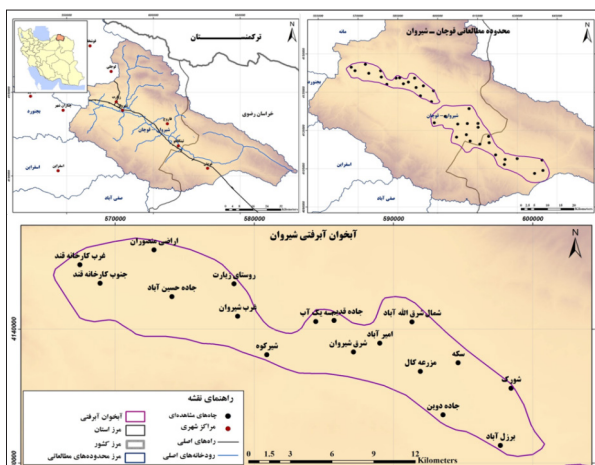
در بین روش‌های زمین آماری محبوبیت و قابلیت روش‌های مبتنی بر تخمین گر کریجینگ بیشتر بوده است و این به سبب قابلیت نااریب بودن آن در تعمیم داده‌های نقطه‌ای و ارائه ساختار تغییرات مکانی می‌باشد؛ به‌عنوان ساده‌ترین آنها، روش‌های کاهش واریانس کریجینگ با حداقل کردن واریانس تخمین کریجینگ در جستجوی مناسب‌ترین تعداد و موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای می‌باشند (Reed و Minsker، ۲۰۰۴؛ Yang و همکاران، ۲۰۰۸). در این خصوص می‌توان به مطالعات انجام شده توسط Theodossiou و Latinopoulos (۲۰۰۶)؛ Gundogdu و Raeisi (۲۰۱۳)؛ Hristopulos و Varouchakis (۲۰۰۷) و همکاران (۲۰۱۸) و Wei و همکاران (۲۰۲۱) اشاره نمود که تمام آنها با هدف بهینه‌سازی شبکه پایش کمی و کیفی آب زیرزمینی مبتنی بر کریجینگ انجام شده‌اند. از کمبودهای این مطالعات می‌توان به این مورد اشاره نمود که هدف اکثر آنها ارزیابی عملکرد شبکه مبتنی بر کاهش واریانس تخمین سطح آب زیرزمینی در سطح می‌باشد و کاهش واریانس تخمین به‌صورت نقطه‌ای مد نظر قرار نمی‌گیرد.

در این میان، روش احتمال پذیرش یکی از جدیدترین روش‌های مبتنی بر مفاهیم زمین‌آمار و بر مبنای مدل زمین آماری کریجینگ معمولی می‌باشد، مبنای تئوری این روش اولین بار توسط Cheng و همکاران (۲۰۰۸) ارائه شده است. سپس Shafiei و همکاران (۲۰۱۴) ضمن اصلاح و بهبود محاسبات روش فوق، از آن در محیط GIS برای بهینه‌یابی شبکه باران‌سنجی حوضه آبریز گرگان‌رود استفاده کردند. از قابلیت‌های این روش می‌توان به در نظر گرفتن مقدار یک پارامتر کمی نقطه‌ای (به‌جای در نظر گرفتن میانگین) در بررسی دقت تخمین توزیع مکانی، به کمیت درآوردن میزان مشارکت هر چاه مشاهده‌ای در دقت تخمین توزیع مکانی و انعطاف‌پذیری برای بهینه‌سازی در شبکه‌هایی با وسعت زیاد تا کم اشاره کرد (مقصود سنگ آتش، ۱۳۹۵)؛ از این‌رو نسبت به روش‌های قبلی از مزیت‌های بیشتری برخوردار است. مقصود سنگ آتش و همکاران (۱۳۹۷) همین روش را برای ارزیابی شبکه پایش کیفیت آب زیرزمینی (بر اساس یون کلر) در آبخوان آبرفتی مشهد به‌کار گرفته‌اند.

در شرایط کنونی نظر به نگرانی فزاینده در خصوص مدیریت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، پایش سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌های آبرفتی از طریق شبکه چاه‌های مشاهده‌ای به‌عنوان اولین ابزار برای هشدار در خصوص جلوگیری از بهره‌برداری بی‌رویه، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بدون شک، ملاحظات اقتصادی به‌شدت بر تعداد و موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای تأثیرگذار است. از این‌رو برای کاهش هزینه حفر و تجهیز چاه‌های مشاهده‌ای اضافی در شبکه‌های موجود، لازم است مناسب‌ترین مکان‌ها طی فرایند بهینه‌سازی برای داشتن بهترین ترکیب در بین چاه‌های مشاهده‌ای موجود شناسایی شوند (Yang و همکاران، ۲۰۰۸؛ Chandan و Yashwant، ۲۰۱۷). بنابراین انتخاب روشی کارآمد برای اصلاح و بهینه‌سازی شبکه‌های چاه‌های مشاهده‌ای موجود بسیار حائز اهمیت می‌باشد. از طرفی دیگر، عمر بسیاری از چاه‌های مشاهده‌ای در ایران بیشتر از ۱۵ سال است. با گذشت زمان، وضعیت آبخوان‌ها، کاربری اراضی و منابع و مصارف آب دچار دگرگونی می‌شوند. ضمن اینکه ساختمان چاه‌های مشاهده‌ای/پیزومتری که طول عمر طولانی دارند، ممکن است تخریب شده باشد یا منافذ اسکرین این چاه‌ها دچار گرفتگی شده باشد که در این صورت نیاز به احیای چاه وجود دارد. بنابراین در این پژوهش چارچوبی ارائه شد که تلفیقی از رویکرد مطالعات هیدروژئولوژیکی، عملیات میدانی و استفاده از ابزارهای زمین‌آمار برای ارزیابی و بازطراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی ارائه می‌کند. ارزیابی‌ها در این چارچوب در دو سطح انجام می‌شود. در سطح اول، وضعیت ساختمان چاه‌های مشاهده‌ای و ارتباط آنها با آبخوان بررسی می‌شود که در مقاله‌ای مجزا با عنوان «روش‌شناسی ارزیابی و بازطراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی، بخش اول: ارزیابی ساختمان چاه‌های مشاهده‌ای» ارائه شده است. سطح دیگر بررسی‌ها شامل ارزیابی عملکرد شبکه به‌عنوان یک «کل» است و بر اساس مدل‌های زمین آماری انجام می‌شود که در این مقاله به‌عنوان بخش دوم روش‌شناسی ارزیابی و بازطراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی ارائه می‌شود.

در میان رویکردهای موجود در خصوص طراحی/بازطراحی و ارزیابی وضعیت شبکه پایش سطح آب زیرزمینی، رویکرد استفاده از روش‌های زمین آماری در تحقیقات بسیاری مورد توجه قرار گرفته است. از جمله، Prakash و Singh (۲۰۰۰) به‌منظور مکان‌یابی بهینه چاه‌های مشاهده‌ای در شبکه پایش سطح آب زیرزمینی، از ابزارهای زمین آماری مبتنی بر داده‌های ۳۲ حلقه چاه مشاهده‌ای در حوضه آبریز کانگال در هندوستان استفاده کردند. Ahmadi و Sedghamiz (۲۰۰۷) با استفاده از روش‌های

مقدار تراز آب‌زیرزمینی به‌ترتیب در چاه‌های مشاهده‌ای شمال‌شرق الله‌آباد (۱۱۰۴/۶۲ متر) و مزرعه کال (۱۰۰۱/۲۳ متر) ثبت شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی شیروان - قوچان و شبکه پایش سطح آب‌زیرزمینی در آبخوان آبرفتی شیروان

• **بررسی‌های زمین آماری شبکه پایش سطح آب**
روش‌شناسی بررسی‌های زمین آماری شبکه پایش سطح آب زیرزمینی در این مطالعه به اختصار در شکل (۲) نشان داده شده و در ادامه توضیحات تکمیلی مرتبط با هر مرحله ارائه شده است.



شکل ۲- روش‌شناسی بررسی‌های زمین آماری شبکه پایش سطح آب‌زیرزمینی در آبخوان آبرفتی شیروان

مطالعه حاضر نیز با هدف ارزیابی وضعیت شبکه چاه‌های مشاهده‌ای در سطح آبخوان آبرفتی شیروان مبتنی بر روش زمین آماری احتمال پذیرش انجام شده است. طی این پژوهش با تحقق شرط‌های اولیه تحلیل زمین آماری، برازش بهترین مدل واریوگرام بر داده‌های سطح آب زیرزمینی و تعیین مشخصات آن، تقویت شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود با کاربرد الگوریتم احتمال پذیرش و ارزیابی کارایی شبکه، می‌توان گامی مؤثر در جهت تأمین داده‌های مناسب از تغییرات ذخیره آب‌زیرزمینی و به‌دنبال آن تدقیق محاسبات بیلان برداشت. نتایج این مطالعه در قالب بخش‌های تحلیل واریوگرام متوسط ارتفاع سطح آب زیرزمینی، محاسبه احتمال پذیرش و محاسبه کارایی شبکه موجود چاه‌های مشاهده‌ای، و ارزیابی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

• معرفی محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی قوچان-شیروان با مساحت ۵۵۳۹ کیلومترمربع، در حوضه آبریز درجه دو اترک و جنوب‌شرق استان خراسان شمالی واقع شده است (شکل ۱). به لحاظ اقلیم، بر اساس روش دومارتن آب‌وهوای حاکم بر این محدوده نیمه‌خشک بوده و زمستان‌های سرد و طولانی و تابستان‌های معتدل دارد (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۵). این محدوده مطالعاتی دو آبخوان آبرفتی به نام‌های «شیروان» و «قوچان- فاروج» دارد.

مساحت آبخوان آبرفتی شیروان که محدوده مورد مطالعه در این مطالعه می‌باشد برابر ۱۸۶/۴ کیلومتر مربع است. در این آبخوان آبرفتی که یک‌لایه و از نوع آزاد می‌باشد، تعداد ۲۹۷ حلقه چاه و ۶ رشته قنات با حجم برداشت به‌ترتیب ۴۱/۸۵ و ۱ میلیون متر مکعب در سال در دست بهره‌برداری می‌باشند (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۵). همچنین در این آبخوان، ۱۷ حلقه چاه مشاهده‌ای فعال است که موقعیت آنها در شکل (۱) نشان داده شده است. بر اساس داده‌های ثبت شده در این چاه‌های مشاهده‌ای، سطح آب‌زیرزمینی به‌طور میانگین در حدود ۹ متر در ۲۰ سال گذشته پایین آمده است. همچنین، به‌طور کلی عمق سطح آب‌زیرزمینی از سمت نواحی میانی آبخوان به سمت نواحی شمال‌غربی و جنوب‌شرقی افزایش می‌یابد. بیشترین عمق آب‌زیرزمینی در حوالی چاه مشاهده‌ای مزرعه کال (۱۰۱/۴۵ متر) و کمترین عمق در حوالی چاه مشاهده‌ای جنوب کارخانه قند (۶ متر) مشاهده شده است (ثبت شده در اسفندماه ۱۳۹۹). تراز سطح آب‌زیرزمینی نشان می‌دهد، جهت کلی جریان از نواحی شمالی در حاشیه ارتفاعات به سمت مناطق مرکزی می‌باشد. بیشترین و کمترین

۱- بررسی تغییرات مکانی یک متغیر تصادفی و تحلیل واریوگرام و روش کریجینگ

زمین آمار مبتنی بر «تئوری متغیرهای ناحیه‌ای» است. هر متغیری که در فضای سه‌بعدی توزیع شده باشد و دارای وابستگی مکانی باشد، متغیر ناحیه‌ای نامیده می‌شود. مقدار متغیر ناحیه‌ای $Z(x)$ در هر نقطه را می‌توان به دو مؤلفه قطعی $m(x)$ و تصادفی $L(x)$ تجزیه کرد، بنابراین:

$$Z(x) = m(x) + L(x) \quad (1)$$

تخمین زمین‌آمار شامل دو مرحله شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی متغیر به وسیله آنالیز نیم‌تغییرها (Semivariogram) و تخمین متغیر مورد نظر می‌باشد. ساختار تغییرات مکانی متغیر تصادفی $Z(x)$ با میانگین ایستا را می‌توان توسط واریوگرام آن به این صورت تعریف کرد (حسنی پاک، ۱۳۹۲؛ Sarma، ۲۰۰۹):

$$\gamma(x_i - x_j) = \frac{1}{2} Var[Z(x_i) - Z(x_j)] = \frac{1}{2} E[Z(x_i) - Z(x_j)]^2 \quad (2)$$

در این رابطه $E(Z)$ و $Var(Z)$ به ترتیب بیانگر مقدار مورد انتظار و واریانس متغیر تصادفی Z هستند. در این مطالعه برای درونیابی و کاربرد مفهوم واریانس تخمین از روش کریجینگ معمولی به‌خاطر سادگی محاسبات و در دسترس بودن داده‌های مرتبط با آن استفاده شده است. کریجینگ یک روش تخمین مبتنی بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار است و می‌توان گفت بهترین تخمین‌گر خطی ناریب است. اگر $Z(x)$ متغیر تصادفی در موقعیت x تعریف شود و $\{Z(x), x \in \Omega\}$ در شرایط ایستایی مرتبه دوم در محدوده مکانی Ω باشد، می‌توانیم مقدار مجهول Z را در x_0 توسط معادله خطی ذیل به دست آورد، که λ_i وزن‌های در نظر گرفته شده برای تخمین‌هاست:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (3)$$

واریانس خطای تخمین به عنوان واریانس کریجینگ معمولی به صورت رابطه ذیل تعریف شده است:

$$\sigma_k^2(x_0) = \mu + \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{i0} \quad (4)$$

که μ ضریب لاگرانژ و γ_{i0} مقدار واریوگرام بین نقطه معلوم $Z(x_i)$ و نقطه مجهول $Z(x_0)$ است (Oliver و Webster، ۲۰۰۱). در این مطالعه برای برازش واریوگرام و کاربرد روش کریجینگ از نرم‌افزار ArcGIS 10.2.2 استفاده شد.

۲- تعریف و محاسبه احتمال پذیرش

دقت تخمین ارتفاع سطح آب زیرزمینی در هر نقطه از آبخوان متفاوت است و به تعداد و موقعیت قرارگیری چاه‌های مشاهده‌ای بستگی دارد. از نظر کاربردی، یک شبکه چاه‌های مشاهده‌ای خوب باید منجر به دقت قابل قبول برای اکثر نقاط شود. برآورد در نقطه x_0 قابل قبول خواهد بود اگر مقدار برآورد شده در دامنه‌ای از مقدار واقعی قرار گیرد، به عبارتی:

$$|\hat{z}(x_0) - z(x_0)| < r \quad (5)$$

که در آن $r > 0$ است. هر چند در نقطه مشخص x_0 دقت برآورد واقعه به واقعه تغییر می‌کند؛ از این رو ارزیابی باید بر مبنای یک مفهوم دربرگیرنده تمامی وقایع صورت پذیرد. همچنین تعیین دامنه (r) باید با در نظر گرفتن واریانس تغییرات سطح آب زیرزمینی $Z(x)$ صورت پذیرد. بنابراین معیار تجدید نظر شده و دقیق‌تر با رابطه ذیل را می‌توان بیان کرد:

$$P[|\hat{z}(x_0) - z(x_0)| < k\sigma_z] \geq \alpha \quad (6)$$

در این معادله دامنه قابل قبول برای خطای برآورد برحسب انحراف معیار متغیر تصادفی $Z(x)$ است، ضریب k و حداقل احتمال α بر اساس عواملی مانند بودجه در دسترس برای تأسیس و نگهداری چاه مشاهده‌ای و دقت برآورد مورد نظر انتخاب می‌شوند. در صورتی که محدودیتی وجود نداشته باشد، $k=1$ و α برابر 0.95 در نظر گرفته می‌شود (Cheng و همکاران، ۲۰۰۸). در روش کریجینگ معمولی واریانس خطای تخمین از معادله (۴) به دست می‌آید. چون تخمین‌گر کریجینگ معمولی نااریب است، میانگین خطای برآورد در x_0 صفر و واریانس آن $\sigma_k^2(x_0)$ است. اگر فرض شود، توزیع خطای برآورد نرمال باشد، احتمال اینکه خطای برآورد $\hat{z}(x_0)$ در دامنه مورد نظر $(-\sigma_z, \sigma_z)$ قرار گیرد را می‌توان به سادگی با استفاده از احتمال تجمعی توزیع نرمال استاندارد تعیین کرد:

$$P[|\hat{z}(x_0) - z(x_0)| < \sigma_z] = P\left[\frac{|\hat{z}(x_0) - z(x_0)|}{\sigma_k(x_0)} < \frac{\sigma_z}{\sigma_k(x_0)}\right] \quad (7)$$

$$= P\left[|\hat{z}^*(x_0) - z(x_0)| < \frac{\sigma_z}{\sigma_k(x_0)}\right] = P_A(x_0)$$

که در آن $\hat{z}^*(x_0)$ خطای تخمین استاندارد می‌باشد و از توزیع نرمال استاندارد پیروی می‌کند، σ_z انحراف معیار داده‌های ارتفاع سطح آب زیرزمینی مقیاس شده می‌باشد و معادل سقف واریوگرام بدون بعد در نظر گرفته می‌شود، $\sigma_k(x_0)$ جذر واریانس تخمین کریجینگ می‌باشد و $P_A(x_0)$ احتمال پذیرش در نقطه x_0 نامیده می‌شود که نشان دهنده احتمال آن است خطای تخمین در x_0 کمتر از σ_z است. بنابراین می‌توان گفت دقت برآورد در یک نقطه در نبود آمار، وقتی قابل قبول است که احتمال پذیرش مربوط به آن بزرگتر یا مساوی α باشد. به بیان دیگر نقاطی که واریانس‌های کریجینگ بزرگتر دارند احتمال‌های پذیرش در آنها کمتر است (Cheng و همکاران، ۲۰۰۸). از آنجایی که در محاسبه $P_A(x_0)$ نیاز به مراجعه به جدول توزیع نرمال استاندارد می‌باشد، لذا ساده سازی‌هایی انجام شده است که در نهایت منجر به رابطه‌ای ساده و با دقت مناسب برای محاسبه $P_A(x_0)$ شده است (Shafiei و همکاران، ۲۰۱۴):

$$P_A(x_0) = 1 - \left[1 - \exp\left(-\tau^2 \frac{4 + 0.14\tau^2}{1 + 0.14\tau^2}\right) \right]^{1/2}, \quad \tau = \frac{\sigma_z}{\sqrt{2}\sigma_k(x_0)} \quad (8)$$

۳- ارزیابی کارایی و تقویت شبکه موجود چاه‌های مشاهده‌ای

ارزیابی کارایی یک شبکه چاه‌های مشاهده‌ای را می‌توان بر اساس درصدی از مساحت منطقه با دقت پذیرش (A_p) انجام داد. بنابراین احتمال پذیرش را می‌توان در هر نقطه درون منطقه مورد مطالعه محاسبه کرد. یک شبکه موجود چاه‌های مشاهده‌ای را می‌توان برحسب درصد مساحتی با دقت پذیرش از طریق جابه‌جایی چاه‌ها یا اضافه کردن چاه‌های جدید تقویت کرد. از الگوریتم ارائه شده توسط Cheng و همکاران (۲۰۰۸) می‌توان جهت ارزیابی کارایی مجموعه‌ای از چاه‌های مشاهده‌ای به شرح ذیل استفاده کرد:

۱. محاسبه A_p برای شبکه با حذف یک چاه مشاهده‌ای از شبکه موجود در یک سطح دقت مورد نظر (α).
۲. برگرداندن چاه مشاهده‌ای حذف شده در مرحله قبل به شبکه، انتخاب چاه مشاهده‌ای دیگر و محاسبه مجدد A_p . این مرحله تا آنجایی ادامه می‌یابد که همه چاه‌های مشاهده‌ای مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین مجموعه‌ای از مقادیر A_p به ازای حذف هر چاه مشاهده‌ای از شبکه به دست می‌آید.

۳. در این مرحله چاه مشاهده‌ای که بیشترین مقدار A_p را در مرحله ۲ داشته از محاسبات کنار گذاشته می‌شود. سپس از تعداد چاه‌های مشاهده‌ای باقی‌مانده یکی کم می‌شود و مراحل ۱ و ۲ تکرار می‌شوند. مرحله ۳ تا زمانی اجرا می‌شود که تنها دو چاه مشاهده‌ای باقی بماند.

بعد از اتمام این الگوریتم، تمامی چاه مشاهده‌ای بر اساس نوبت (رتبه) حذف شدنشان در گام سوم اولویت‌بندی می‌شوند. علاوه بر این، در هر بار که در گام سوم یک چاه حذف می‌شود، نقشه مقادیر احتمال پذیرش و مقادیر A_p متناظر با آن با استفاده از چاه‌های باقی‌مانده به دست می‌آید. با استفاده از مقادیر A_p مربوط به حذف تک تک چاه‌ها، یا معادل آن مجموعه‌ای از چاه‌های باقیمانده، نمودارهایی برای نشان دادن اهمیت چاه‌های مشاهده‌ای برای کل شبکه پایش استخراج می‌شود.

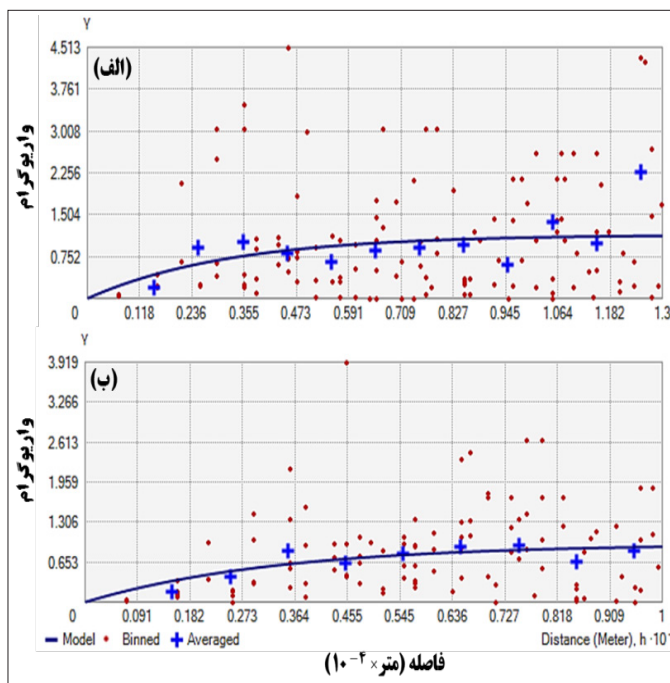
یافته‌ها و بحث

در این مطالعه به منظور انجام تحلیل‌های زمین‌آماري دو دسته از داده‌ها مد نظر قرار گرفته است. یک دسته از داده‌ها مرتبط با متوسط ۱۰ ساله ارتفاع سطح آب زیرزمینی در شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود می‌باشد. لازم به ذکر است باتوجه به اینکه مطالعات هیدروژئولوژیکی نشان داد چاه مشاهده‌ای «جنوب کارخانه قند» نماینده آبخوان نیست، برای انجام تحلیل‌های زمین‌آماري از ارتفاع سطح آب چاه‌های بهره‌برداری اطراف آن استفاده شده است تا ارتفاع صحیح سطح آب در آبخوان

در محاسبات در نظر گرفته شود. پس از تحلیل شبکه فعلی، باتوجه به اینه در برخی از نقاط آبخوان پراکنش چاه‌های مشاهده‌ای مناسب نیست، پنج نقطه کمکی (پیشنهادی برای حفر چاه مشاهده‌ای جدید) نیز در نقاط فاقد چاه مشاهده‌ای مد نظر قرار گرفت و تحلیل‌های زمین‌آماري با اضافه شدن این نقاط تکرار شد.

• تحلیل واریوگرام متوسط ارتفاع سطح آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه

در این مطالعه برازش واریوگرام بر اساس دو دسته داده انجام شد. بررسی همسان‌گردی توسط واریوگرام رویه نشان داد واریوگرام همه‌جهته است و در جهت خاصی همسان‌گرد نیست. به منظور تحلیل ساختار مکانی ارتفاع سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای، ابتدا واریوگرام تجربی آن ساخته شد و سپس بهترین برازش واریوگرام نظری روی آن انجام شد (شکل ۳).



شکل ۳- بهترین واریوگرام برازش شده بر الف) داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای موجود، ب) داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای موجود و نقاط کمکی

برای برازش واریوگرام تجربی از انواع متداول واریوگرام مانند خطی، توانی، نمایی و گوسی استفاده شد و در نهایت مدل واریوگرام نمایی بهترین برازش را نشان داد. برازش واریوگرام بر اساس ترکیب‌های مختلفی از تعداد جفت نقاط و زمان تأخیر انجام شد که واریوگرام مناسب مبتنی بر ناگت صفر و کمترین مقدار نسبت ناگت به سقف و ریشه میانگین مربعات خطا، انتخاب شد (جدول ۱).

جدول ۱- مشخصات واریوگرام‌های برازش شده بر اساس الف) چاه‌های مشاهده‌ای موجود، ب) چاه‌های مشاهده‌ای موجود به همراه نقاط کمکی (چاه‌های پیشنهادی جدید)

(الف) چاه‌های مشاهده‌ای موجود							
ردیف	زمان تأخیر (متر)	تعداد جفت نقاط	ناگت	سقف	دامنه (متر)	نسبت ناگت به سقف	ریشه میانگین خطا
۱	۲۲۱۹	۱۲	۰/ ۲۳۴	۱/۲	۱۲۴۶۴	۰/ ۲	۰/۸۸
۲	۲۲۱۹	۱۳	۰	۱/۱	۸۵۳۷	۰	۰/۸۸
۳	۲۰۰۰	۱۲	۰/ ۲۰۳	۱/۱	۱۱۷۳۲	۰/ ۱۸	۰/۸۸
۴	۲۰۰۰	۱۴	۰	۱/۱	۸۸۰۶	۰	۰/۸۵
۵	۲۰۰۰	۱۱	۰	۱/۱	۸۶۹۵	۰	۰/۸۵
۶	۱۵۰۰	۱۲	۰	۱/۱	۸۵۷۶	۰	۰/۸۸
۷	۱۵۰۰	۹	۰	۱/۱	۸۹۵۵	۰	۰/۸۵
۸	۱۵۰۰	۱۵	۰	۱/۱	۸۷۰۳	۰	۰/۸۵
۹	۲۵۰۰	۱۲	۰	۱/۱	۸۵۴۲	۰	۰/۸۸
۱۰	۲۵۰۰	۱۳	۰	۱/۱	۸۳۷۳	۰	۰/۸۸
۱۱	۲۵۰۰	۹	۰	۱/۱	۸۷۰۳	۰	۰/۸۵
۱۲	۳۰۰۰	۱۰	۰	۱/۱	۸۵۴۲	۰	۰/۸۸
۱۳	۳۰۰۰	۱۲	۰	۱/۱	۸۴۲۱	۰	۰/۸۸
*۱۴	۱۰۰۰	۱۳	۰	۱/۱	۹۶۵۸	۰	۰/۸۵
(ب) چاه‌های مشاهده‌ای موجود به همراه نقاط کمکی (چاه‌های پیشنهادی جدید)							
۱	۱۷۱۵	۱۲	۰	۱/۵	۲۰۵۸۸	۰	۰/۷۷
۲	۱۷۱۵	۱۳	۰	۱/۳	۱۷۷۴۶	۰	۰/۷۷
۳	۱۷۱۵	۱۱	۰	۱/۴	۱۸۸۷۲	۰	۰/۷۷
۴	۱۵۰۰	۱۲	۰	۱/۳	۱۸۰۰۰	۰	۰/۷۷
۵	۱۵۰۰	۱۵	۰	۱/۳	۱۷۶۸۵	۰	۰/۷۷
۶	۲۰۰۰	۱۰	۰	۱/۲	۱۵۰۰۰	۰	۰/۷۶
۷	۲۰۰۰	۱۲	۰	۱/۳	۱۷۰۵۲	۰	۰/۷۷
۸	۲۰۰۰	۲۰	۰	۱/۲	۱۵۵۹۲	۰	۰/۷۷
۹	۱۰۰۰	۱۲	۰	۱/۱	۱۲۰۰۰	۰	۰/۷۶
۱۰	۱۰۰۰	۲۰	۰	۱/۴	۲۰۰۰۰	۰	۰/۷۷
*۱۱	۱۰۰۰	۱۰	۰	۰/۹۵	۱۰۰۰۰	۰	۰/۷۳

* بهترین واریوگرام برازش شده (منتخب)

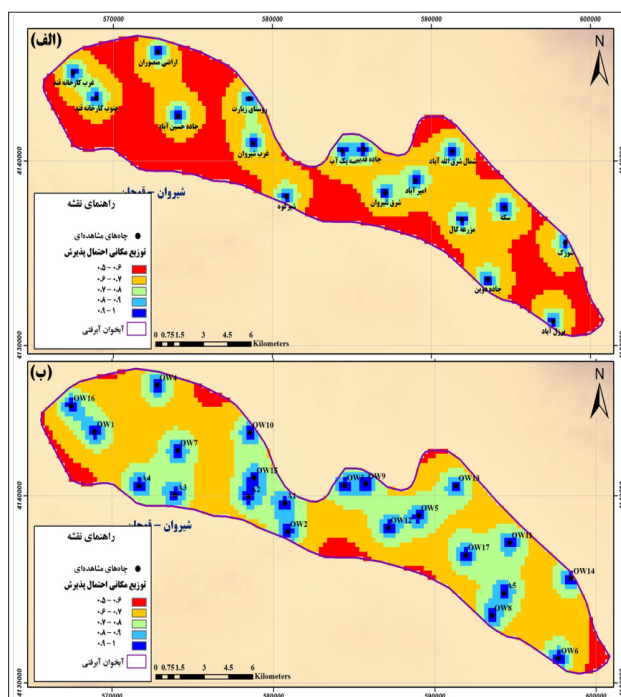
• محاسبه احتمال پذیرش و محاسبه کارایی شبکه موجود چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان آبرفتی شیروان

در این بخش بر اساس ساختار مکانی تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه و روابط ارائه شده در محاسبه احتمال پذیرش، احتمال پذیرش (P_A) در نقاط مختلف آبخوان محاسبه و سپس دقت پذیرش (A_p) در سطوح احتمال مختلف تحلیل و بررسی شد. در این مطالعه از متوسط ۱۰ ساله سطح آب زیرزمینی برای ترسیم نقشه‌های هم مقدار احتمال پذیرش و ارزیابی شبکه چاه‌های مشاهده‌ای (به عبارتی محاسبه دقت پذیرش) منطقه استفاده شده است. بر اساس

رابطه محاسبه احتمال پذیرش و الگوریتم ارائه شده جهت ارزیابی شبکه چاه‌های مشاهده‌ای، یک برنامه جانبی در نرم‌افزار ArcGIS و در محیط ModelBuilder تهیه شد که به صورت یک ابزار مستقل در ArcGIS قابل استفاده است (Manegold, ۲۰۰۳).

با در نظر گرفتن یک شبکه سلولی ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر و با استفاده از روابط و ابزار توسعه داده شده، احتمال پذیرش در شبکه موجود چاه‌های مشاهده‌ای و همچنین شبکه چاه‌های مشاهده‌ای و نقاط کمکی محاسبه شد و نتیجه مقادیر هم مقدار آن در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج نشان داد

نتایج حاصل از اولین تکرار از الگوریتم نشان می‌دهد، چاه مشاهده‌ای برزل‌آباد کمترین نقش و چاه مشاهده‌ای شرق شیروان بیشترین نقش را در تأمین دقت شبکه پایش موجود دارد. به این ترتیب، هر چاهی که بیشترین احتمال پذیرش (کمترین رتبه حذف) را دارد، در شبکه پایش دارای اهمیت کمتری است؛ در واقع با حذف آن چاه، احتمال پذیرش شبکه عدد بزرگتری خواهد بود که نشان دهنده اهمیت کمتر آن چاه مشاهده‌ای می‌باشد.



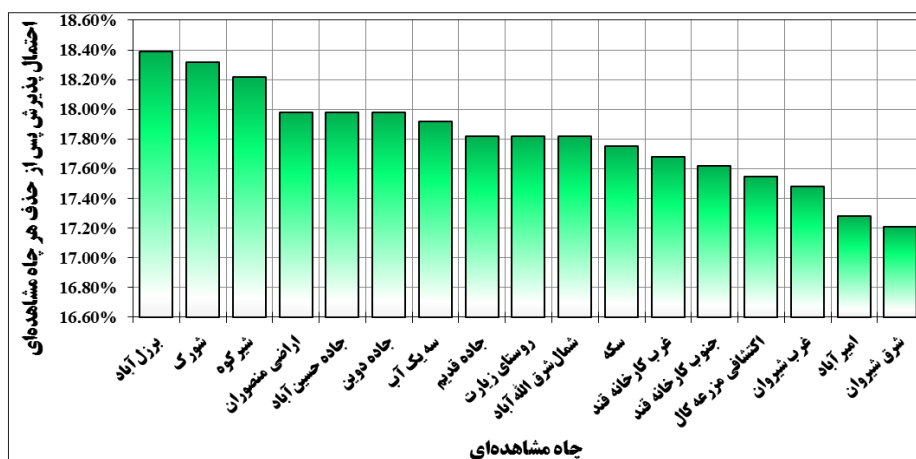
شکل ۴- توزیع مکانی مقادیر احتمال پذیرش در (الف) شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود، (ب) شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود و نقاط پیشنهادی (کمکی) در آبخوان آبرفتی شیروان

بازه تغییرات احتمال پذیرش بین ۰/۵ تا ۱ است. در محل هر چاه مشاهده‌ای مقدار احتمال پذیرش برابر یک می‌باشد؛ زیرا تخمین‌گر کریجینگ معمولی دقیق است و خطای تخمین در محل‌هایی که داده اندازه‌گیری شده دارند صفر می‌باشد و همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، در نزدیکی مرزهای آبخوان و مناطقی که چاه مشاهده‌ای وجود ندارد احتمال پذیرش کمتر از سایر نقاط است. باتوجه به توزیع مکانی $P_A(x_0)$ در آبخوان آبرفتی شیروان، بر اساس شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود، برای ضریب ثابت $\alpha = 0.7$ حدود 19.2% درصد از سطح آبخوان آبرفتی شیروان از دقت پذیرش بسیار بالا برخوردار می‌باشد. از طرفی با اضافه شدن نقاط کمکی به شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود، برای ضریب ثابت $\alpha = 0.7$ حدود 46.7% درصد از سطح آبخوان آبرفتی شیروان دقت پذیرش بسیار بالایی دارد. به این ترتیب مشاهده می‌شود در صورتی که هدف تقویت شبکه چاه‌های مشاهده‌ای براساس معیار 70% درصد باشد، به تعداد چاه‌های مشاهده‌ای بیشتری نیاز است و افزایش تعداد چاه‌ها، دقت پذیرش را افزایش خواهد داد.

• ارزیابی و بهینه‌یابی شبکه پایش سطح آب در آبخوان آبرفتی شیروان

۱- ارزیابی شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود در سطح احتمال پذیرش 70%

در این بخش، نتایج انجام الگوریتم در اولین تکرار بر اساس داده‌های شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود انجام شده است. هدف از انجام این مرحله یک ارزیابی کلی و ابتدایی از نقش هر چاه مشاهده‌ای در تأمین دقت شبکه پایش موجود می‌باشد. نتایج اولین تکرار از این الگوریتم در شکل (۵) ارائه شده است.



شکل ۵- اولویت‌بندی اهمیت هر چاه مشاهده‌ای در تأمین دقت شبکه پایش موجود

۲- ارزیابی شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود و نقاط کمکی در سطح احتمال پذیرش ۷۰ درصد

در این بخش، نتایج انجام الگوریتم در اولین تکرار بر اساس داده‌های شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود و نقاط کمکی انجام شده است. با انجام الگوریتم و بعد از اتمام آن، تمامی چاه‌های مشاهده‌ای بر اساس نوبت (رتبه) حذف شدنشان اولویت‌بندی شدند و با استفاده از مقادیر A_p مربوط به حذف تک چاه مشاهده‌ای یا معادل آن مجموعه‌ای از چاه‌های مشاهده‌ای باقیمانده، نموداری براساس A_p و شماره چاه مشاهده‌ای حذف شده متناظر با آن برای نشان دادن ترتیب اولویت چاه‌های مشاهده‌ای (جدول ۳) و کارایی مجموعه چاه‌های مشاهده‌ای در شکل (۶) ترسیم شده است. نتایج تکرارهای مختلف و کامل الگوریتم نشان می‌دهد که چاه مشاهده‌ای برزل آباد کمترین نقش و چاه مشاهده‌ای شمال شرق الله آباد بیشترین نقش را در تأمین دقت شبکه پایش موجود دارد. به این ترتیب، هر چاهی که بیشترین احتمال پذیرش را دارد، در شبکه پایش اهمیت کمتری دارد؛ در واقع با حذف آن چاه، احتمال پذیرش شبکه عدد بزرگتری خواهد بود که نشان دهنده اهمیت کمتر آن چاه مشاهده‌ای می‌باشد. بدون شک، کم‌اهمیت بودن نقش این چاه‌ها به معنای الزام حذف این چاه‌ها از شبکه پایش نمی‌باشد، بلکه جابه‌جایی آنها و همچنین پیشنهاد تأسیس چاه‌های مشاهده‌ای جدید در ترکیب با چاه‌های قبلی می‌تواند نقش این چاه‌ها را در تأمین دقت شبکه پایش افزایش دهد. از طرف دیگر، در میان نقاط پیشنهادی، تمام نقاط به جز A_1 در تأمین دقت شبکه پایش موجود نقش قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند. از این رو حفر چاه‌های مشاهده‌ای جدید در این نقاط و یا

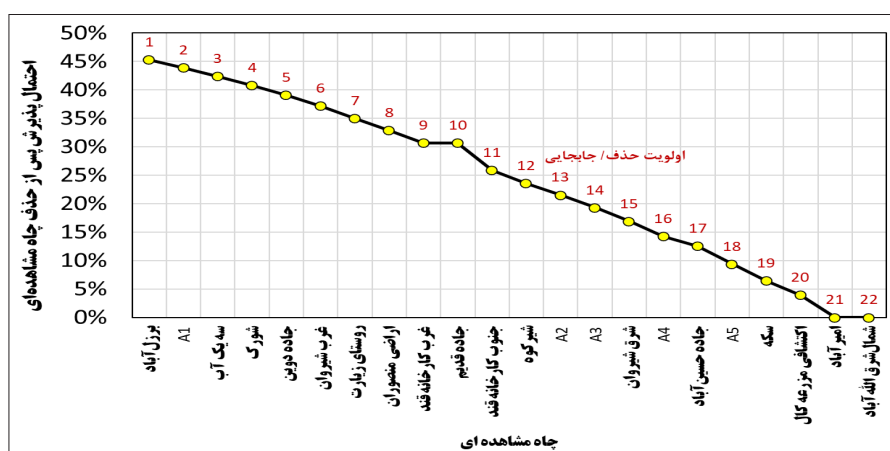
جابه‌جایی چاه‌های کم‌اهمیت‌تر به این نقاط منجر به بهبود کارایی شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود خواهد شد.

در نهایت بر اساس تلفیق نتایج ارزیابی ساختمان چاه‌های مشاهده‌ای و تحلیل زمین آمار شبکه پایش در دشت شیروان و اقدامات لازم برای چاه‌های مشاهده‌ای موجود در جدول (۲) پیشنهاد شده است.

شبکه پایش سطح آب در آبخوان آبرفتی شیروان با مساحت حدود ۱۸۶/۵ کیلومتر مربع و تعداد ۱۷ حلقه چاه مشاهده‌ای، با وجود ۹ حلقه چاه در هر ۱۰۰ کیلومتر مربع آبخوان دارای شبکه با تراکم زیاد می‌باشد (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، ۱۳۹۳). بنابراین از لحاظ عملیاتی، اولویت با اصلاح و احیای شبکه موجود می‌باشد و نیازی به حفر چاه جدید نیست. اما در صورت از کار افتادن بعضی از چاه‌های مشاهده‌ای مانند شورک و سه یک آب، باتوجه به اهمیت پایین آنها در عملکرد شبکه پایش، می‌توان از نقاط پیشنهادی موجود در جدول (۳) برای جایگزینی آنها استفاده کرد.

جدول ۳- مختصات محل و اولویت حفر چاه‌های مشاهده‌ای جدید به منظور تکمیل شبکه پایش سطح آب در آبخوان آبرفتی شیروان

اولویت حفر	نام اختصاری	X	Y
۱	A۵	۵۹۴۳۲۰	۴۱۳۴۵۹۸
۲	A۴	۵۷۱۶۷۵	۴۱۴۰۵۳۵
۳	A۳	۵۷۳۹۱۰	۴۱۴۰۰۴۸
۴	A۲	۵۷۸۴۷۹	۴۱۳۹۷۴۸



شکل ۶ - اولویت‌بندی چاه‌های مشاهده‌ای و مقدار A_p متناظر آنها در سطح $\alpha=0/7$

جدول ۲- اقدامات اصلاحی لازم برای چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان آبرفتی شیروان

Y	X	نام چاه مشاهده‌ای	اهمیت برای شبکه پایش از نظر زمین‌آماری	اقدام اصلاحی لازم
۴۱۳۸۲۸۸	۵۸۷۱۳۴	شرق شیروان	زیاد	بدون نیاز به اقدام اصلاحی
۴۱۴۰۶۴۴	۵۸۵۷۳۹	جاده قدیم	متوسط	
۴۱۴۵۹۱۲	۵۷۲۸۰۸	اراضی منصوران	کم	
۴۱۳۳۵۹۱	۵۹۳۵۶۶	جاده دویین	کم	
۴۱۴۰۹۵۷	۵۷۸۸۱۱	غرب شیروان	کم	
۴۱۳۱۳۰۲	۵۹۷۶۹۴	برزل‌آباد	خیلی کم	
۴۱۳۷۴۷۶	۵۹۴۶۵۵	سکه	خیلی زیاد	پاکسازی اسکرین
۴۱۴۰۵۳۲	۵۹۱۳۳۹	شمال‌شرق الله‌آباد	خیلی زیاد	
۴۱۳۸۹۳۷	۵۸۹۰۱۹	امیرآباد	خیلی زیاد	
۴۱۳۶۸۳۳	۵۹۱۹۴۴	مزرعه کال	خیلی زیاد	
۴۱۳۸۰۸۳	۵۸۰۹۰۶	شیرکوه	متوسط	
۴۱۴۳۳۸۳	۵۷۸۵۵۷	روستای زیارت	کم	
۴۱۴۲۴۲۵	۵۷۴۰۸۸	جاده حسین‌آباد	زیاد	نو کنی در صورت خشک شدن
۴۱۴۴۸۰۳	۵۶۷۴۷۹	غرب کارخانه قند	متوسط	
۴۱۴۰۵۵۱	۵۸۴۴۱۸	سه یک آب	خیلی کم	جابه‌جایی با چاه جدید
۴۱۳۵۵۷۱	۵۹۸۴۶۱	شورک	خیلی کم	
۴۱۴۳۴۱۵	۵۶۸۹۳۱	جنوب کارخانه قند	متوسط	نیاز به نو کنی در حال حاضر

نتیجه‌گیری

حفر چاه‌های مشاهده‌ای جدید در نقاط پیشنهادی و یا جابه‌جایی چاه‌های کم‌اهمیت‌تر به این نقاط منجر به افزایش دقت پذیرش و بهبود کارایی شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود خواهد شد. به‌طورکلی از مزیت‌های بسیار مهم کاربرد روش احتمال پذیرش می‌توان به در نظر گرفتن خطای تخمین سطح آب زیرزمینی در محل هر چاه مشاهده‌ای به‌طور نقطه‌ای و کمی‌سازی میزان مشارکت هر چاه مشاهده‌ای در دقت تخمین توزیع مکانی سطح آب زیرزمینی اشاره نمود. از این‌رو کاربرد این روش به‌منظور ارزیابی کارایی شبکه موجود چاه‌های مشاهده‌ای در آبخوان‌های مختلف در کشور، به‌عنوان یک روش ساده و کاربردی می‌تواند تصویری مناسب از وضعیت شبکه‌های پایش سطح آب زیرزمینی به‌عنوان ابزاری کلیدی در مدیریت منابع آب زیرزمینی به‌دست دهد.

سپاسگزاری

این پژوهش با سفارش و حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی (دفتر مطالعات پایه منابع آب) در راستای حل مسائل و چالش‌های کشور در زمینه داده و اطلاعات پایه منابع آب انجام گرفته است. به‌این‌وسیله از حسن توجه و اعتماد آن شرکت قدردانی می‌شود. همچنین از پشتیبانی و همیاری شرکت مهندسی مشاور تاوآب توسعه فلات شرق در انجام این پژوهش، سپاسگزاری می‌شود.

در این مطالعه از روش زمین‌آماری احتمال پذیرش مبتنی بر مدل کریجینگ معمولی برای ارزیابی شبکه چاه‌های مشاهده‌ای در سطح آبخوان آبرفتی شیروان استفاده شد. با در نظر گرفتن یک شبکه سلولی ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر، احتمال پذیرش در شبکه موجود چاه‌های مشاهده‌ای و همچنین شبکه چاه‌های مشاهده‌ای و نقاط کمکی (شامل ۱۷ چاه مشاهده‌ای و ۵ نقطه کمکی) محاسبه شد. نتایج نشان داد بازه تغییرات احتمال پذیرش بین ۰/۵ تا ۱ است. باتوجه‌به توزیع مکانی احتمال پذیرش در آبخوان، بر اساس شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود و برای ضریب ثابت $\alpha = 0/7$ حدود ۱۹/۲ درصد از سطح آبخوان دقت پذیرش بسیار بالایی دارد. از طرفی بر اساس شبکه چاه‌های مشاهده‌ای موجود و نقاط کمکی، برای ضریب ثابت $\alpha = 0/7$ حدود ۴۶/۷ درصد از سطح آبخوان دقت پذیرش بسیار بالایی دارد. همچنین، نتایج تکرارهای مختلف الگوریتم نشان داد، چاه‌های مشاهده‌ای برزل‌آباد و شمال‌شرق الله‌آباد به‌ترتیب کمترین و بیشترین نقش را در تأمین دقت شبکه پایش موجود دارند. از طرف دیگر، در میان نقاط پیشنهادی، چهار نقطه در تأمین دقت شبکه پایش موجود نقش قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند. به‌این‌ترتیب مشاهده می‌شود در صورتی‌که هدف تقویت شبکه چاه‌های مشاهده‌ای بر اساس معیار ۷۰ درصد باشد،

- Program in Landscape Architecture. Anhalt University of Applied Sciences, Heidelberg, Germany.
- Prakash M. R. and Singh V. S. 2000. Network design for groundwater monitoring – A case study. *Environmental Geology*, 39: 628–632.
- Raeisi A., Ghafouri H.R. and Moslemzadeh M. 2018. Minimization of Groundwater Observation Wells Using Geostatistics and Optimization Technique (Case study: Dezful-Andimeshk plain). *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(3): 79-96.
- Reed P. and Minsker B.S. 2004. Striking the balance: long-term groundwater monitoring design for conflicting objectives. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2): 140-149.
- Sarma D.D. 2009. *Geostatistics with Applications in Earth Sciences*. Capital publishing company. India.
- Shafiei M., Ghahraman B., Saghaian B., Pande S., Gharari S. and Davary K. 2014. Assessment of rain-gauge networks using a probabilistic GIS based approach. *Hydrology Research*, 45(4-5): 551-56.
- Theodossiou N. and Latinopoulos P. 2006. Evaluation and optimisation of groundwater observation networks using the kriging methodology. *Environmental Modeling and Software*, 21(7): 991–1000.
- Varouchakis A. and Hristopulos D.T. 2013. Comparison of stochastic and deterministic methods for mapping groundwater level spatial variability in sparsely monitored basins. *Environmental Monitoring Assessment*, 185(1): 1–19.
- Webster R. and Oliver M.A. 2001. *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley and Sons. Ltd. Chichester, England.
- Wei F., Yuexiao J., Yin L., Wei L., Zhiyu C. and Cheng HU. 2021. Study on the Optimization of Groundwater Monitoring Network in Key Areas of Jiangnan Plain in Hubei Province. *Northwestern Geology*, 54(3): 222-228.
- Yang F. Cao S. Liu X. and Yang K. 2008. Design of groundwater level monitoring network with ordinary kriging. *Journal of Hydrodynamics*, 20(3): 339–346.
- حسنی پاک، ع.ا. ۱۳۹۲. زمین‌آمار (ژئواستاتستیک). دانشگاه تهران. چاپ پنجم. تهران. ایران.
- شرکت مدیریت منابع آب ایران. ۱۳۹۵. گزارش تمدید ممنوعیت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی دشت قوچان - شیروان، تهران.
- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور. ۱۳۹۳. نشریه شماره ۶۶۵- دستورالعمل رفتارسنجی کمی آب‌های زیرزمینی، تهران.
- مقصود سنگ آتش، س.، خاشعی سیوکی، ع.، پوررضا بیلندی، م. و شفیعی، م. ۱۳۹۵. طراحی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی با استفاده از روش زمین‌آمار (مطالعه موردی آبخوان مشهد). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. بیرجند، ایران.
- مقصود سنگ آتش، س.، خاشعی سیوکی، ع.، پوررضا بیلندی، م. و شفیعی، م. ۱۳۹۷. کاربرد روش احتمال پذیرش در ارزیابی شبکه پایش کیفی کلر آب زیرزمینی (مطالعه موردی آبخوان مشهد). تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۱): ۲۵۳-۲۵۶.
- Ahmadi S.H. and Sedghamiz A. 2007. Geostatistical analysis of spatial and temporal variations of groundwater level. *Environmental Monitoring Assessment*, 129(1): 277–294.
- Chandan K.S. and Yashwant B.K. 2017. A GIS Based Design of Groundwater Level Monitoring Network Using Multi-Criteria Analysis and Geostatistical Method. *Water Resources Management*, 31(13): 4149-4163.
- Chao Y., Qian H., Fang Y. and Wang H. 2011. Optimum design of groundwater level monitoring network in Yinchuan plain. *Water Resource and Environmental Protection*, 1: 278–281.
- Cheng K.S., Wei C., Cheng Y.B., Yeh H.C. and Liou J.J. 2008. Rain-gauge network evaluation and augmentation using geostatistics. *Hydrological Processes*, 22(14): 2555–2564.
- Gundogdu K.S. and Guney I. 2007. Spatial analyses of groundwater levels using universal kriging. *Journal of Earth System Science*, 116(1): 49–55.
- Manegold J. 2003. Using the Model Builder of ArcGIS 9 for Landscape Modeling. In: Buchmann E. & Ervin S. (Eds.): *Proceedings of International Seminar on New Technologies of the International Master*

A Review of the Relationships Between the Hydrological Components of the Water Balance in the Assessment of Rainfall Losses

Z. Eslami^{1*}, Kh. Abdollahi²

1,2- PhD Student of Watershed Management and Assistant Professor, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Iran.

*(Corresponding Author Email: z.eslami@stu.sku.ac.ir)

Received: 02-06-2022

Revised: 24-07-2022

Accepted: 25-07-2022

Available Online: 21-12-2022

مروری بر روابط مؤلفه‌های هیدرولوژیک بیلان آب در ارزیابی تلفات بارندگی

زهرا اسلامی^{۱*}، خدایار عبدللهی^۲

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری آبخیزداری و استادیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: z.eslami@stu.sku.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۳

Abstract

In arid and semi-arid regions, a major share of rainfall never reaches streams or groundwater. This part which is known as rainfall loss can play a decisive role in river flow or groundwater recharge. Rainfall losses are used in many hydrological models as one of the basic forecasting components. In this study, the components of the hydrological losses including interception, evapotranspiration, infiltration, and soil moisture have been reviewed, as well as the characteristics of the mentioned components, general concepts, conducted studies, and also the comparison of the useful calculation methods of these components of hydrological losses was reviewed. The review of the studies shows that due to the complex and stochastic nature of the rainfall process and the many factors affecting it, rainfall losses have not yet been comprehensively understood and in many simulations, it is enough to simplify the systems by considering infiltration as a loss function. As a result, in practical applications, fixed values for losses are often used and this simplification leads to a sort of inaccurate runoff simulation. Therefore, firstly, it is recommended to pay attention to the time and place format in the existing rainfall loss models and even their concepts and secondly, more consideration should be paid to the interrelationships among components, because, for example, in the daily time scale, a component such as transpiration may become less important than in long-term time periods, or in an urban watershed due to human manipulation, the loss processes may not be similar to natural watersheds.

Keywords: Hydrological Modeling, Rainfall-Runoff, Infiltration, Initial Losses, Excess Rainfall.

چکیده

در مناطق خشک و نیمه‌خشک سهم قابل‌توجهی از بارندگی هرگز به نهرها یا آب‌های زیرزمینی نمی‌رسد که این بخش به نام تلفات بارندگی شناخته می‌شود و می‌تواند در میزان جریان رودخانه‌ای یا تغذیه آب‌های زیرزمینی نقش تعیین‌کننده‌ای داشته باشد. تلفات بارندگی در بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیک به عنوان یکی از اجزای اساسی پیش‌بینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه مؤلفه‌های تلفات هیدرولوژیک برگاب، ذخیره چالابی، تبخیر-تعرق، نفوذ و رطوبت خاک مرور شده و همچنین مشخصات مؤلفه‌های مذکور، مفاهیم کلی، مطالعات انجام‌شده و همچنین مقایسه روش‌های مفید محاسباتی این اجزاء تلفات هیدرولوژیک، بیان شده‌اند. بررسی مطالعات نشان می‌دهد که با توجه به ماهیت پیچیده و تصادفی فرآیند بارندگی و عوامل متعدد مؤثر بر آن، هنوز از تلفات بارندگی درک جامعی نشده و در بسیاری از شبیه‌سازی‌ها به ساده‌سازی سامانه‌ها از طریق لحاظ نمودن نفوذ به عنوان تابع تلفات، بسنده شده است. در نتیجه، غالباً در کاربردهای عملی از مقادیر ثابتی برای تلفات در مدل‌سازی بارندگی استفاده می‌کنند که به لحاظ در نظر نگرفتن تغییرات زمانی و مکانی تلفات، منجر به برآورد نادرستی از کمیت رواناب می‌شود. بنابراین اولاً توجه به قالب زمان و مکان در مدل‌های تلفات بارندگی موجود و حتی مفاهیم آن توصیه می‌شود، ثانیاً باید توجه بیشتری به روابط بین اجزاء شود، زیرا مثلاً در مقیاس زمانی روزانه ممکن است یک مؤلفه نظیر تبخیر-تعرق اهمیت کمتری نسبت به بازه‌های زمانی درازمدت پیدا کند یا در یک حوضه آبخیز شهری به علت دست‌کاری انسانی، فرآیندهای تلفات مشابه حوضه‌های طبیعی نباشد.

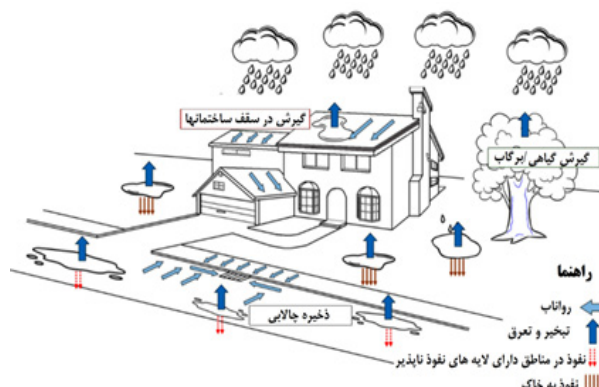
واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی هیدرولوژیک، بارندگی-رواناب، نفوذ، تلفات اولیه، بارندگی مازاد.

در مباحث بارندگی-رواناب توافق برآنست که همه بارندگی در تولید رواناب مشارکت ندارد، بلکه بخشی از بارندگی منجر به ایجاد رواناب می‌گردد که به آن بارندگی مازاد یا مؤثر اطلاق می‌شود و آن بخش دیگری از بارندگی کل که به‌طور مستقیم منجر به رواناب نمی‌شود، اصطلاحاً تلفات بارندگی^۱ نامیده می‌شود. تخمین میزان تلفات بارندگی به نظر بسیاری از افراد پیچیده‌ترین مؤلفه فرآیند بارندگی است که احتمالاً کمتر مورد توجه مطالعات واقع شده است (Knapp و همکاران، ۱۹۹۱). تلفات بارندگی می‌تواند از خصوصیات نظیر بارندگی، خصوصیات فیزیکی-جغرافیایی حوضه (به‌عنوان مثال شیب حوضه آبخیز و پوشش گیاهی) (Hill و Mein، ۱۹۹۶) و رطوبت خاک تأثیر بپذیرد. خصوصیات بارندگی تحت تأثیر پارامترهایی از قبیل میزان بارندگی، مدت زمان، شدت و متوسط دوره بازگشت هست. به‌عنوان مثال، رابطه بین تلفات و بارندگی سالانه با رابطه بین تلفات و شدت بارندگی طراحی، متفاوت است (Hill و Mein، ۱۹۹۶؛ Nandakumar و همکاران، ۱۹۹۴). تلفات همچنین می‌تواند مربوط به جریان پایه پیش از رگبار باشد (Hill و Mein، ۱۹۹۶؛ Mein و O'Loughlin، ۱۹۹۱؛ Mein و همکاران، ۱۹۹۵؛ Nathan و همکاران، ۲۰۰۳؛ Siriwardena و Mein، ۱۹۹۶). با این حال مطالعات پیشین گزارش نموده‌اند که جریان پایه، یک ویژگی مستقیم حوضه آبریز نیست، بلکه ترکیبی از دیگر خصوصیات فیزیکی مانند نوع خاک و نوع پوشش گیاهی می‌باشد (Hill و Mein، ۱۹۹۶؛ Gamage و همکاران، ۲۰۱۵). یکی از عوامل مؤثر در تعیین ضریب رواناب، تلفات اولیه بارندگی است. سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS، ۱۹۵۶؛ SCS، ۱۹۷۲) روابطی را برای تخمین ارتفاع رواناب ارائه کرده است که در آن میزان رواناب به بارندگی و حجم نگهداشت آب در خاک بستگی دارد. در روش SCS، رواناب در لحظه اولیه رخ نمی‌دهد، بلکه زمانی شکل می‌گیرد که مقدار مشخصی از بارندگی منجر به تلفات برگاب، ذخیره چالابی و نفوذ شده باشد. به مجموع بارندگی که منجر به این تلفات شود، تلفات اولیه بارندگی گفته می‌شود (SCS، ۱۹۷۲؛ پرهمت و همکاران، ۱۳۹۴). مجموعه مؤلفه‌های تلفات، تلفات کل را به دست می‌دهند. مدل‌های تلفات موجود برای برآورد تلفات هیدرولوژیکی را می‌توان به‌طور کلی به مدل‌های مفهومی و نظری طبقه‌بندی کرد. مدل‌های مفهومی شامل مدل تلفات اولیه-پیوسته (IL-CL)^۲ و مدل تلفات اولیه-نسبی (IL-PL)^۳ می‌باشد که بر اساس واکنش یکپارچه مکانی حوضه می‌باشند (Nandakumar و همکاران، ۱۹۹۴). مدل‌های نظری معمولاً مبتنی بر معادلات نفوذ هستند و سایر عناصر مانند برگاب، ذخیره چالابی و تبخیر/تعرق، نقش اندکی به‌عنوان تلفات نسبتاً جزئی دارند. در برخی موارد، تلفات نفوذ تنها می‌تواند ۳۰٪ از کل بارندگی باشد (Chow و همکاران، ۲۰۱۳؛ Gamage و همکاران،

۲۰۱۴). با این حال، تبخیر یا تبخیر تعرق ممکن است تا ۷۵ درصد از کل بارندگی سالانه را تشکیل دهد (Gray، ۱۹۷۳؛ Brutsaert، ۲۰۰۵). Ullah و Dickinson (۱۹۷۹) دریافتند که ذخیره چالابی نیز نقش مهمی در واکنش هیدرولوژیکی یک حوضه آبریز ایفا می‌کند. گاهی اوقات همه عناصر تلفات هیدرولوژیکی را نمی‌توان به‌صورت عنصر به عنصر مدل کرد. گاهی نیز محدودیت کاربرد روش داریم؛ همان‌گونه که معادلات نفوذ (مدل‌های نظری) برای برآورد تلفات حوضه‌های آبخیز مناسب نیستند، زیرا آن‌ها فقط تخمین نقطه‌ای ارائه می‌دهند (Ilahee، ۲۰۰۵). در مقابل، مدل‌های مفهومی یکپارچه می‌توانند تلفات را در مقیاس حوضه تعریف کنند (Nandakumar و همکاران، ۱۹۹۴) و تلفات گستره را در نظر بگیرند. مدل‌های هیدرولوژیکی یکپارچه، مقادیر تلفات را در یک رویداد بارندگی در حوضه به‌صورت جداگانه برآورد می‌کنند. در یک رویداد بارندگی این تلفات تغییرات زمانی و مکانی دارد، بنابراین واکنش تجمعی رواناب به بارندگی به‌شدت غیرخطی و تابع این تلفات است. با این حال، برای ساده‌سازی گاهی هنگام ترکیب تلفات در مدل‌های هیدرولوژیکی، این تغییرات اغلب نادیده گرفته می‌شوند و از مقادیر ثابت مانند میانگین یا میانه تلفات استفاده می‌نمایند.

با توجه به اهمیت مدل‌سازی هیدرولوژیکی در کاربردهایی نظیر تبیین دبی طراحی در امور سازه‌ای به نظر می‌رسد به بررسی بیشتر روش‌های محاسبه تلفات بارندگی و مفاهیم آن نیاز باشد (Gamage و همکاران، ۲۰۱۴)؛ گرچه این توجه به‌صورت کلی از قبل به تلفات وجود داشته است اما ارتباط بین عوامل به‌خوبی دیده نشده است، به‌عنوان مثال McPherson (۱۹۷۸) و Aron (۱۹۸۲) عامل برآورد نادرست بارندگی-رواناب در بسیاری از موارد را عدم انتخاب تابع تلفات مناسب دانسته‌اند و برخی دیگر مانند Yen (۱۹۸۲) و Pilgrim (۱۹۸۶) تأکید کرده‌اند که باید به مطالعه تلفات بارندگی توجه بیشتری نشان داد؛ اما هنوز هم عدم تخمین صحیح تلفات اغلب به‌عنوان یک مشکل اصلی برای مدل‌سازی بارندگی-رواناب خاصه برای حوضه‌های آبخیز شهری و مناطق خشک و نیمه‌خشک شناخته می‌شود. با توجه به موقعیت جغرافیایی و اقلیمی ایران از نظر قرار گرفتن در کمربند خشک و نیمه‌خشک و اهمیت تلفات در مدل‌های هیدرولوژیکی، در این مطالعه انواع تلفات هیدرولوژیکی به شکل برگاب، ذخیره چالابی، تبخیر/تعرق، نفوذ و رطوبت خاک بررسی شده است و به بیان مفاهیم کلی و همچنین مطالعات پیشین انجام‌گرفته در هر بخش و مقایسه روش‌های محاسباتی تلفات پرداخته شده است. نکته دیگری که در این نوع مطالعات بایستی لحاظ کرد، فیزیک مسئله است. فیزیک مسائل وابستگی زیادی به خصوصیات مکانی و مقیاس مطالعه دارد. برای روشن شدن اثر مکان به‌عنوان نمونه در یک حوضه آبخیز شهری (شکل ۱)، مناطق غیرقابل نفوذ نقش کلیدی در ارتباط با تلفات بارندگی ایفا می‌کنند (Rammal و Berthier، ۲۰۲۰). لذا بررسی ارتباط بین مؤلفه‌ها و

دقت در مقیاس‌های مکانی و زمانی، می‌تواند به شناخت بیشتر تلفات هیدرولوژیکی و محاسبه دقیق‌تر آن‌ها بینجامد.



شکل ۱- نمودار فرآیندهای فیزیکی حاکم بر تولید رواناب در مناطق شهری

انواع تلفات بارندگی

چند مؤلفه‌ای بودن عوامل مؤثر بر تلفات بارندگی نکته‌ای است که شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی را پیچیده می‌کند و این مؤلفه‌ها علاوه بر آنکه از نظر فرآیندی، عملکردهای متفاوتی دارند، تقدم و تأخرهای بین معادلات حاکم بر آن‌ها می‌تواند نتایج شبیه‌سازی‌ها را بسیار متفاوت سازد. در اینجا خلاصه فهرستی از این اجزای مؤثر، مرور شده‌اند.

• **برگاب:** از نظر فیزیکی اولین مؤلفه تلفات بارندگی که پس از نزول بارندگی ظاهر می‌شود، برگاب است. آن قسمتی از باران که به دلیل وجود پوشش گیاهی (درخت، درختچه، چمن و لاش برگ) در ساختار پوششی گیاه ذخیره می‌شود را برگاب^۱ گویند. برگاب به عوامل متعددی از جمله شدت، زمان بارندگی، ساختار پوشش گیاهی، نوع پوشش (سوزنی یا پهن برگ) و تبخیر در طول بارندگی و بعد از آن بستگی دارد (Rutter و همکاران، ۱۹۷۵). همچنین اگر به مقیاس‌های زمانی درازمدت توجه شود، به‌طور گسترده‌ای بر اساس فصل متفاوت است، به‌عنوان مثال درختان برگ‌ریز در طول ماه‌های زمستان، پتانسیل ذخیره تاج پوشش خود را از دست می‌دهند (Xiao و McPherson، ۲۰۰۲). تلفات انجام‌شده به شکل برگاب بر اساس نوع پوشش زمین و نوع شیوه‌های مدیریتی مورد استفاده در آن به‌طور قابل‌توجهی تغییر می‌کند. در همین ارتباط مقادیر برآوردی برگاب برای انواع پوشش در جدول (۱) نشان داده شده است. در مقیاس‌های رخدادی، مقدار آب ذخیره‌شده به‌صورت برگاب در ابتدای بارندگی زیاد هست و حتی گاهی اگر تراکم پوشش گیاهی زیاد باشد، می‌تواند تا ۱۰۰ درصد بارندگی را شامل شود، ولی به‌تدریج با اشباع شدن سطوح گیاهی، آب به سطح زمین می‌چکد یا آنکه به‌صورت جریان از شاخ و برگ و تنه به سمت زمین

جریان می‌یابد که این شکل جریان آب را جریان ساقه‌ای یا ساقاب^۲ گویند و بخشی هم از بین فضای خالی درختان به زمین می‌رسد که اصطلاحاً میان بارندگی^۳ نامیده می‌شود. حالتی دیگر آب ذخیره‌شده بر روی تاج پوشش ممکن است تبخیر و وارد جو شده و هیچ‌گاه به سطح زمین نرسد (David و همکاران، ۲۰۰۶؛ Muzylo و همکاران، ۲۰۰۹؛ علیزاده، ۱۳۹۱). اگر میزان مجموع بارندگی اندازه‌گیری شده در بالای پوشش گیاهی از میزان جریان ساقاب و میان بارندگی کم شود، می‌توان سهم ناشی از برگاب را در تلفات محاسبه کرد. در صورت لحاظ تبخیر می‌توان تلفات را از رابطه زیر محاسبه کرد (Lewis و Viessman، ۱۹۹۶):

$$L = S + K E t \quad (1)$$

در این رابطه، L تلفات ناشی از برگاب (برحسب میلی‌متر)، S ذخیره برگابی که بسته به نوع پوشش گیاهی بین ۰/۲۵ تا ۱/۲۵ میلی‌متر متغیر است. K درصد پوشش گیاهی نسبت به سطح کل زمین، E سرعت تبخیر برحسب میلی‌متر در ساعت (در روزی که بارندگی صورت گرفته) و t مدت بارندگی (ساعت) است. باوجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در علم هیدرولوژی، برگاب فرآیندی است که در مطالعات هیدرولوژی کمتر به آن توجه شده است، بخشی از دلایل این مهم می‌تواند به علت سختی اندازه‌گیری و تخمین آن باشد. در خصوص اهمیت این مؤلفه تلفات همین بس که گاهی از مقدار کل ریزش بارندگی در طول سال تا ۲۵ درصد آن به دلیل برگاب تلف‌شده و به رواناب تبدیل نمی‌شود (علیزاده، ۱۳۹۱). جهت محاسبه برگاب مدل‌های زیادی به کار گرفته شده است. Muzylo و همکاران (۲۰۰۹) مروری بر مدل‌سازی پایه فیزیکی برگاب بارندگی انجام دادند و متداول‌ترین مدل‌های مورد استفاده، مدل‌های اصلی و پراکنده Gash (۶۹ مورد) و مدل‌های اصلی و پراکنده Rutter (۴۲ مورد) را ذکر کرده‌اند. نامبرندگان عنوان نموده‌اند که در مطالعات برگاب عدم اعتبارسنجی مدل‌ها، مطالعات مقایسه‌ای محدود و توجه نکردن به عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌ها و پارامترها، از برجسته‌ترین اشکالات این مدل‌ها بوده است. لذا می‌توان گفت عدم قطعیت موجود در داده‌های ورودی مدل به‌ندرت در مدل‌سازی برگاب باران، مورد توجه قرار گرفته است. برخی از ویژگی‌های فهرست شده در مدل‌های مورد استفاده برای محاسبه برگاب در جدول (۲) نشان شده است.

جدول ۱- میزان برگاب انواع پوشش گیاهی

منبع	میزان برگاب (اینچ)	نوع پوشش گیاهی
Link و همکاران، ۲۰۰۴	۰/۱۱-۰/۱۷	درختان مخروطی شکل
Xiao و همکاران، ۲۰۰۰	۰/۰۹-۰/۱۴	درختان برگ‌ریز
Linsley و همکاران، ۱۹۸۲	۰/۰۸	مراعات
Linsley و همکاران، ۱۹۸۲	۰/۰۳	زمین زراعی-ذرت
Linsley و همکاران، ۱۹۸۲	۰/۱۶	زمین زراعی-تمام غلات

جدول ۲- ویژگی مدل‌های مورد استفاده برای محاسبه برگاب (برگرفته از Muzylo و همکاران، ۲۰۰۹)

نام مدل	متغیرهای خروجی			مقیاس زمانی	مرجع
	ساقاب	میان بارندگی	برگاب		
Rutter-type Rutter	*	*	*	ساعتی	Rutter و همکاران، ۱۹۷۱
Sellers and lockwood	*	*	*	ساعتی	Sellers و Lockwood، ۱۹۸۱
Massman	*	*	*	۱۰ دقیقه	Massman، ۱۹۸۳
Liu.j			*	روزانه	Liu، ۱۹۸۸
Liu.s			*	ساعتی	Liu، ۱۹۹۷
Xiao	*	*	*	ساعتی	Xiao و همکاران، ۲۰۰۰
Ruter sparse	*	*	*	ساعتی	Valente و همکاران، ۱۹۹۷
Gash type Gash	*	*	*	ساعتی	Gash، ۱۹۷۹
Mulder			*	روزانه	Mulder، ۱۹۸۵
Gash sparse	*	*	*	ساعتی	Gash و همکاران، ۱۹۹۵
Zeng			*	ساعتی	Zeng و همکاران، ۲۰۰۰
Van Digc and Bruijnzeel	*	*	*	روزانه	Bruijnzeel و van Dijk، ۲۰۰۱
Murakami			*	ساعتی	Murakami، ۲۰۰۷
Calder Stochastic			*	ساعتی	Calder، ۱۹۸۶
Calder two-layer			*	ساعتی	Calder، ۱۹۹۶

در جدول (۳)، میزان ذخیره چالابی در کاربری‌های مختلف و انواع خاک با شیب‌های مختلف نشان داده شده است. در مفهوم‌سازی ذخیره چالابی فرض بر آن است که تمام آب فرصتی برای نفوذ یا تبخیر داشته است. Viessman و Lewis (۱۹۹۶) نشان دادند زمانی که بارندگی پیشین وجود دارد، شدت ذخیره تقریباً به نصف کاهش می‌یابد. همچنین رابطه‌ای را بین شیب روی سطح غیرقابل نفوذ و ذخیره چالابی تعیین کردند که با افزایش شیب و نزدیک شدن به مقدار چهار درصد، ذخیره چالابی ممکن است به صفر نزدیک شود.

Viessman و همکاران (۱۹۷۷) با استفاده از داده‌های غیرقابل نفوذ مناطق کوچک رابطه (۲) را برای ذخیره چالابی (d) براساس درصد شیب (s) به صورت تقریبی برحسب سانتی‌متر ارائه نمودند.

$$d = 0.341 - 0.076 S \quad (2)$$

رابطه تجربی ساده دیگری توسط Linsley و همکاران (۱۹۸۲) ارائه شده است که ذخیره چالابی را تابعی از بارندگی مؤثر می‌داند.

(۳) $SD_i(t) = SD_{i,0} [1 - e^{-pci/SD_{i,0}}]$

که در آن $SD_i(t)$ ذخیره چالابی در زمان (mm)، $SD_{i,0}$ ظرفیت ذخیره چالابی (mm) و pci بارندگی مازاد تجمعی روی خاک (mm) است.

• **ذخیره چالابی:** پس از رسیدن باران به زمین، بخشی از بارندگی در قسمت‌هایی از سطح زمین ذخیره می‌شود که به آن ذخیره چالابی^۷ گفته می‌شود. آب ذخیره شده در چاله‌ها بعداً داخل زمین نفوذ می‌کند یا نهایتاً تبخیر می‌شود. کمی‌سازی این بخش از بارندگی از آن جهت مهم تلقی شده که در مشاهدات ملاحظه شده که ذخیره چالابی نقش مهمی در رواناب سطحی و رسوب زمین‌های کشاورزی دارد (Dunne و همکاران، ۱۹۹۱؛ Hairsine و همکاران، ۱۹۹۲؛ Huang و Bradford، ۱۹۹۰؛ Govers و همکاران، ۲۰۰۰؛ Takken و Govers، ۲۰۰۰؛ Darboux و همکاران، ۲۰۰۲؛ Abd Elbasit و همکاران، ۲۰۱۹). نکته مهم دیگری که در مناطق شهری اهمیت می‌یابد، این است که ذخیره چالابی هم در سطوح نفوذپذیر و هم نفوذناپذیر وجود دارد، هرچند که به طور نسبی در سطوح دست‌نخورده و نفوذپذیر بیشتر هست. اهمیت این اثر ذخیره‌ای در سطح در اینجاست که رواناب تولیدی در مقیاس کوچک به حجم چاله‌ها یا پستی‌وبلندی‌های کوچک سطح زمین بستگی دارد. حجم ذخایر در شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی با استفاده از عبارتی تحت عنوان «ذخیره چالابی حداکثر»^۸ محاسبه می‌شود. برخی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ذخیره چالابی شیب، نوع خاک سطحی، کاربری اراضی، بارندگی پیشین و زمان هست (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۲).

جدول ۳- مقادیر ذخیره چالابی بر اساس کاربری اراضی، خاک و شیب (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۲).

کاربری اراضی	شیب (درصد)	شن	لومی	لومی رسی	لوم	سیلت	سیلت لوم	شنی رسی	رسی لومی	رسی لومی	سیلی رسی	شنی رسی	سیلی رسی	رسی
جنگل	>۰/۵	۸	۷/۵	۷	۶/۵	۶	۵/۵	۵	۴/۵	۴	۳/۵	۳	۲/۵	
	۰/۵-۵	۶/۳۱	۵/۹۱	۵/۵۲	۵/۱۳	۴/۷۳	۴/۳۴	۳/۹۴	۳/۵۵	۳/۱۵	۲/۷۶	۲/۳۷	۱/۹۷	
	۵-۱۰	۳/۹۲	۳/۶۸	۳/۴۳	۳/۱۹	۲/۹۴	۲/۷	۲/۴۵	۲/۲۱	۱/۹۶	۱/۷۲	۱/۴۷	۱/۲۳	
	<۱۰	۱/۹۲	۱/۸	۱/۶۸	۱/۵۶	۱/۴۴	۱/۳۲	۱/۲	۱/۰۸	۰/۹۶	۰/۸۴	۰/۷۲	۰/۶	
مرتع	>۰/۵	۵	۴/۷۳	۴/۴۵	۴/۱۸	۳/۹۱	۳/۶۴	۳/۳۶	۳/۰۹	۲/۸۲	۲/۵۵	۲/۲۷	۲	
	۰/۵-۵	۳/۹۴	۳/۷۳	۳/۵۱	۳/۳	۳/۰۸	۲/۸۷	۲/۶۵	۲/۴۴	۲/۲۲	۲/۰۱	۱/۷۹	۱/۵۸	
	۵-۱۰	۲/۴۵	۲/۳۲	۲/۱۸	۲/۰۵	۱/۹۲	۱/۷۸	۱/۶۵	۱/۵۲	۱/۳۸	۱/۲۵	۱/۱۱	۰/۹۸	
	<۱۰	۱/۲	۱/۱۴	۱/۰۷	۱/۰۱	۰/۹۴	۰/۸۷	۰/۸۱	۰/۷۴	۰/۶۸	۰/۶۱	۰/۵۵	۰/۴۸	
زراعت	>۰/۵	۳	۲/۸۶	۲/۷۳	۲/۵۹	۲/۴۵	۲/۳۲	۲/۱۸	۲/۰۵	۱/۹۱	۱/۷۷	۱/۶۴	۱/۵	
	۰/۵-۵	۲/۳۷	۲/۲۶	۲/۱۵	۲/۰۴	۱/۱۹	۱/۸۳	۱/۷۲	۱/۶۱	۱/۵۱	۱/۴	۱/۲۹	۱/۱۸	
	۵-۱۰	۱/۴۷	۱/۴	۱/۳۴	۱/۲۷	۱/۲	۱/۱۴	۱/۰۷	۱	۰/۹۴	۰/۸۷	۰/۸	۰/۷۴	
	<۱۰	۰/۷۲	۰/۶۹	۰/۶۶	۰/۶۲	۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۳۶	
زمین بایر	>۰/۵	۱/۵	۱/۴۵	۱/۴۱	۱/۳۶	۱/۳۲	۱/۲۷	۱/۲۳	۱/۱۸	۱/۱۴	۱/۰۹	۱/۰۵	۱	
	۰/۵-۵	۱/۱۲	۱/۰۹	۱/۰۵	۱/۰۲	۰/۹۹	۹۵	۰/۹۲	۰/۸۸	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۷۸	۰/۷۵	
	۵-۱۰	۰/۷۴	۷۲	۰/۷	۰/۶۷	۰/۶۵	۰/۶۳	۰/۶۱	۰/۵۸	۰/۵۶	۰/۵۴	۰/۵۲	۰/۴۹	
	<۱۰	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۳	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲۴	

و همکاران، ۱۹۷۴؛ Allen و Pruitt، ۱۹۸۶). ارزیابی دقیق تر انجام شده توسط Jensen و همکاران (۱۹۹۰) نشان می دهد که معادلات پایه فیزیکی به طور کلی دقیق تر هستند. دستیابی داده های تشت تبخیر نسبتاً آسان است، لذا در صورت ثبات محل و برداشت داده های تبخیر به روش مناسب و مداوم می توانند منبع داده ای مناسبی برای تبخیر پتانسیل باشند. این موضوع حتی در فرآورده ای نیاز آبی در کشاورزی نیز اهمیت دارد، به دلیل اینکه برنامه ریزی و مدیریت آبیاری به برآورد دقیق نیازهای آبی محصول بستگی دارد (Michalopoulou و Papaioannou، ۱۹۹۱). نرخ تبخیر تعرق از سطح مرجع که در واقع سطحی فرضی پوشیده شده از چمن هست تحت عنوان تبخیر تعرق مرجع به جای پتانسیل عنوان می شود (Allen و همکاران، ۱۹۹۸). تفاوت بین برخی از مدل های تجربی تبخیر تعرق از نظر داده های ورودی، سری زمانی و نوع کاربرد آن در جداول (۴) و (۵) ارائه شده است.

روش های مختلفی برای تعیین یا تخمین تبخیر ارائه شده است. در این ارتباط می توان با استفاده از رویکردهای مستقیم هیدرولوژیک مانند بیلان آب و خاک-لایسیمتر و یا روش های میکرو-هواشناسی مانند بیلان انرژی، نسبت باونز، آئروپنمیک، همبستگی گردابی و روش های فیزیولوژیکی گیاهی، تبخیر تعرق را تخمین زد (Rana و Katerji، ۲۰۰۰؛ Ngongondo و همکاران، ۲۰۱۳)، یا جهت اندازه گیری تبخیر تعرق واقعی از روش های اندازه گیری خاصی مانند سنجش از دور استفاده شود. داده های سنجش از دور از

• **تبخیر تعرق:** بخشی از بارندگی که از روی سطوح مختلف زمین یا پوشش گیاهی تبدیل به بخار آب یا تعرق می شود و به جو بازمی گردد، تبخیر تعرق^۱ نامیده می شود. به دلیل عملکرد پیوسته فرایند در حضور آب، تبخیر از سطوح آزاد آب، خاک و تعرق توسط گیاهان در طراحی پروژه های منابع آب، پیش بینی جریان سیل و تعیین نیازهای آبرسانی پروژه های آبیاری دارای اهمیت است. میزان تبخیر بسته به عوامل هواشناسی و ماهیت سطحی که از آن تبخیر انجام می شود، متفاوت است. برخی عوامل هواشناسی مؤثر بر تبخیر عبارتند از: تابش خورشید، اختلاف فشار بخار بین سطح آب و هوای اطراف، رطوبت نسبی، دما، باد، فشار اتمسفر و غیره. به علاوه تبخیر به خصوصیات سطح نیز وابسته است، برای سطوح بزرگ، به دلیل وجود سطوح گسترده تبخیر شونده، اندازه گیری مستقیم تبخیر امکان پذیر نیست. در محاسبات تلفات ناشی از تبخیر به دلیل پیچیدگی در تعیین کمیت تبخیر تعرق واقعی، تبخیر تعرق پتانسیل (ETp) مبنای نظری برای تخمین فراهم می کند که می توان به عنوان حداکثر مقدار آبی که در یک زمان مشخص از یک پوشش گیاهی کامل در صورت عدم محدودیت آبی تبخیر تعرق شود، تعریف کرد (Hulme و Chattopadhyay، ۱۹۹۷). مقادیر روزانه تبخیر تعرق بالقوه معمولاً با استفاده از داده های تشت تبخیر روزانه با یک ضریب تعدیل ماهانه یا با معادلات فیزیکی یا تجربی مبتنی بر متغیرهای هواشناسی، تخمین زده می شود. به نظر می رسد استفاده از هر یک از این رویکردها منطقی باشد (Saxton

فناوری‌های ماهواره‌ای قابل بازیابی هستند و به ارائه اطلاعات در مورد پارامترهای بیوفیزیکی از قبیل نوع و تراکم پوشش گیاهی و آلیبدو سطح می‌پردازند که می‌تواند تبخیرتعرق را ارزیابی نماید. دو رویکرد دمای سطحی رادیومتری جهت جداسازی گرمای نهان محسوس و رویکردهای پوشش گیاهی برگرفته از بازتاب سطحی مانند LAI^۱ و NDVI^۱، به صورت گسترده در کشاورزی جهت

تخمین تبخیرتعرق مورد استفاده قرار می‌گیرد. تخمین تبخیرتعرق از داده‌های سنجش‌ازدور برآوردی از توزیع مکانی و زمانی را در مقیاس بزرگ فراهم می‌کند (Talsma و همکاران، ۲۰۱۸؛ Ghai و همکاران، ۲۰۲۱)، ازاین‌رو در مقیاس‌های بزرگ، سنجش‌ازدور می‌تواند کارایی مناسب خود را نسبت به سایر روش‌ها در تخمین تبخیر تعرق نشان دهد (Zhang و همکاران، ۲۰۱۶).

جدول ۴- مقایسه انواع روش‌های برآورد تبخیرتعرق واقعی (جوادیان و همکاران، ۱۳۹۷)

روش	پایه فیزیکی و فرضیات	تفکیک مکانی	پوشش زمانی	دسترسی به ورودی‌ها	سهولت در اجرا	عدم وابستگی به اقلیمی خاص	دقت در توزیع مکانی	دقت از نظر مقداری
بیلان انرژی	SEBAL	متوسط	-	متوسط	خوب	ضعیف	متوسط	خوب
سطح	SEBS	ضعیف	-	متوسط	ضعیف	ضعیف	-	-
	S-SEBI	ضعیف	-	متوسط	متوسط	ضعیف	-	-
گیاه مرجع	ETLook	خوب	-	خوب	خوب	خوب	-	-
	ETr	ضعیف	ضعیف	متوسط	خوب	ضعیف	ضعیف	ضعیف
محصولات آماده	MOD16	متوسط	متوسط	متوسط	-	ضعیف	ضعیف	ضعیف
	ECMWF	خوب	ضعیف	خوب	-	ضعیف	ضعیف	متوسط
	WaPOR	خوب	خوب	ضعیف	-	خوب	خوب	ضعیف
	GLEAM	متوسط	ضعیف	خوب	-	متوسط	ضعیف	ضعیف

جدول ۵- خلاصه‌ای از پرکاربردترین روابط تبخیرتعرق

مدل تبخیر و تعرق	سری زمانی	نوع تبخیر و تعرق	داده‌های ورودی	مرجع
Penman-Monteith	روزانه و ساعتی	پتانسیل-مرجع	تابش خورشیدی، دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد	Penman، ۱۹۴۸؛ Monteith و همکاران، ۱۹۶۵؛ Allen و همکاران، ۱۹۹۸
Thornthwaite	ماهانه	پتانسیل-مرجع	دمای هوا	Thornthwaite، ۱۹۴۸؛ Michalopoulou و Papaioannou، ۱۹۹۱
Lowry-Johnson	روزانه	پتانسیل	دمای هوا	Lowry و Johnson، ۱۹۴۲
Blaney-Criddle	روزانه	پتانسیل و مرجع	دمای هوا، رطوبت نسبی، تعداد ساعات آفتابی، سرعت باد	Blaney و Criddle، ۱۹۵۰
Priestley-Taylor	روزانه	پتانسیل-مرجع	دمای هوا، تابش خورشیدی	Priestley و Taylor، ۱۹۷۲؛ Michalopoulou و Papaioannou، ۱۹۹۱
Stanghellini	ساعتی	مرجع (محیط گلخانه)	تابش خورشیدی، دمای هوا، رطوبت نسبی	Stanghellini، ۱۹۸۷
Hargreaves and Samani	روزانه	مرجع	دمای هوا	Samani و Hargreaves، ۱۹۸۵
Turc	سالانه	واقعی	بارندگی، دمای هوا	Turc، ۱۹۵۱

• **نفوذ:** گرچه ممکن است از دیدگاه لغوی تلف شدن آب در اثر نفوذ در تخصص‌های خارج از هیدرولوژی، نامتعارف به نظر بیاید، اما هیدرولوژیست‌ها فرآیند نفوذ^{۱۱} که طی آن بخشی از باران از سطح زمین وارد خاک می‌گردد را بخشی از تلفات بارندگی

می‌دانند. این فرآیند نفوذ آب به خاک نقش اساسی در هیدرولوژی، خاک‌شناسی، هیدروژئولوژی، آبیاری و دستگاه‌های زهکشی دارد (Kale و Sahoo، ۲۰۱۱؛ Ghumman و همکاران، ۲۰۱۸؛ Mahapatra و همکاران، ۲۰۲۰؛ Panahi و همکاران، ۲۰۲۱). نفوذ

ابتدا کمبود رطوبت خاک را تکمیل می‌کند. سپس آب اضافی تحت تأثیر نیروی گرانش به سمت پایین حرکت می‌کند. این حرکت رو به پایین، حرکت عمقی آب نامیده می‌شود؛ چنانچه حرکت آن جانبی باشد، نشت نامیده می‌شود. میزان نفوذ آب داخل خاک به عوامل زیادی از جمله خصوصیات خاک، شرایط سطح خاک و پوشش گیاهی روی آن، رطوبت پیشین خاک، شرایط اقلیمی، مدت و شدت بارندگی، فعالیت‌های انسانی، کیفیت آب و سطح آب زیرزمینی بستگی دارد. برای تعیین چگونگی نفوذ آب به خاک، معادله‌های مختلف وجود دارد که برخی از آن‌ها بر مبنای خصوصیات فیزیکی خاک هستند و برخی دیگر بر اساس ترسیم و تحلیل منحنی بین سرعت نفوذ و زمان بنا شده‌اند و خصوصیات فیزیکی بخصوصی از خاک را در بر می‌گیرند. به کارگیری این معادله‌ها از اتلاف وقت و هزینه زیاد اندازه‌گیری نفوذ در مزرعه بخصوص در سطح وسیع، جلوگیری می‌کند (نشاط و پاره‌کار، ۱۳۸۶).

روش‌های اندازه‌گیری تخمین نفوذ آب در خاک را می‌توان پنج دسته تقسیم کرد: روش‌های اندازه‌گیری درجا، تجربی، مدل‌های گرین آمپ، معادله ریچارد و دستگاه‌های اطلاعاتی (Sonaje، ۲۰۱۳). میزان نفوذ آب در خاک را می‌توان به صورت مستقیم با استفاده از نفوذسنج اندازه‌گیری کرد، مانند استفاده از استوانه‌های دوتایی. از جمله معایب روش نفوذسنج کاهش نرخ نفوذ با افزایش عمق و قطر نفوذسنج، تأثیر شرایط اطراف نفوذسنج بر میزان نفوذ، اختلال خاک در اثر راندن حلقه یا لوله نفوذسنج است. همچنین دقت کم و پیچیدگی این روش از جمله محدودیت‌های استفاده از آن می‌باشد. برخلاف پیچیدگی مربوط به روش‌های درجا، مدل‌های تجربی معمولاً به شکل معادلات ساده هستند. آن‌ها تخمینی از نفوذ و نفوذ تجمعی ارائه می‌دهد، مانند معادلات کوستیاکوف، فیلیپ، هورتون، هولتان و SCS. تغییرپذیری مکانی پارامترهای خاک در مدل‌های ریاضی گنجانده شده است. با این حال، آن‌ها قادر به تهیه اطلاعات مربوط به توزیع سطح آب نیستند. مدل‌های گرین-آمپ به حوضچه‌های سطحی و حرکت جبهه مرطوب می‌پردازند. اهمیت اصلی در این روش‌ها ارزیابی پروفیل فشار رطوبتی خاک است و همچنین سادگی در استفاده، سازگاری با سناریوهای مختلف و متغیرهایی که به راحتی قابل اندازه‌گیری هستند. روش‌های گرین-آمپ-فیلیپ بر اساس ساده‌سازی معادله ریچاردز است. معادله ریچاردز که برای حرکت آب در خاک است، بر اساس قانون داریسی باکینگهام می‌باشد. مهم‌ترین شرط برای تجزیه و تحلیل، حرکت عمودی خاک هست. در اینجا مشکل، اساساً یک بعدی بودن هست. این معادله فقط مربوط به نفوذ تجمعی نسبت به زمان هست و اطلاعاتی در مورد مشخصات رطوبت یا توزیع جریان ارائه نمی‌دهد (Philip، ۱۹۹۱). فرض اساسی مورد استفاده در هر دو روش این است که نفوذ زمانی رخ می‌دهد که آب در بالای خاک قرار می‌گیرد. روش SCS برای استفاده با مقادیر بارندگی روزانه طراحی شده است

و هیچ مبنای مفهومی برای استفاده در توصیف تلفات بارندگی درون رویداد بارندگی، وجود ندارد. در پژوهش Tracy و Marino (۱۹۸۷) نشان داده شده است که روش SCS بر اساس شدت بارندگی زمانی که برای رویدادهای بزرگ استفاده می‌شود، تا حدی ممکن است غیرقابل اعتماد باشد. این روش باید در زمانی اعمال شود که شدت‌های بارندگی مورد استفاده برای پیش‌بینی، در همان محدوده‌ای هستند که برای کالیبراسیون استفاده می‌شود. اگر میزان کالیبراسیون و پیش‌بینی متفاوت باشد، استفاده از این معادلات ممکن است معتبر نباشد. در آزمون اعتبارسنجی نشان داده شده است که افزایش ۵۰ درصدی در شدت بارندگی بالاتر از مقادیر کالیبره شده، منجر به پیش‌بینی ضعیف نفوذ می‌شود.

به دلیل اینکه معادلات گرین آمپ و فیلیپ دارای مبنای فیزیکی بیشتر هستند، اغلب اعتقاد بر این است که آن‌ها به طور واقعی‌تری فرآیند نفوذ را توصیف می‌کنند (Wilcox و همکاران، ۱۹۹۰). با این حال، این ارتباطی با بهبود دقت مدل ندارد. دلیل اینکه بیشتر این رویکردهای مبتنی بر پایه فیزیکی، معمولاً دقت بهتری ندارند، ممکن است به دلیل سه عامل باشد (Knapp و همکاران، ۱۹۹۱): ۱- هر دو برای تخمین نفوذ در شرایط آبیگر طراحی شده‌اند. این روش‌ها تمایل دارند که نفوذ را در اوایل رویداد و قبل از آبیگری، بیش از حد تخمین بزنند (Rawls و همکاران، ۱۹۷۶؛ Tracy و Marino، ۱۹۸۷). چندین اصلاح در رویکرد گرین آمپ برای تخمین نفوذ قبل از آبیگری توسعه داده شده است (Mein و Larson، ۱۹۷۳؛ Smith و Parlange، ۱۹۷۸).

۲- در روش‌های با مبنای فیزیکی، بخش بزرگی از مفهوم فیزیکی خود را در حین کالیبره شدن برای خاک‌های دارای کانال‌های بزرگ (نظیر خاک‌های دارای کانال‌های حاصل از حفره‌های ایجاد شده توسط جانداران یا ریشه گیاهان و سایر موارد) از دست می‌دهند (Gish و Starr، ۱۹۸۳).

۳- مقادیر پارامتر تنظیم شده در طول فرآیند کالیبراسیون می‌تواند تا حد زیادی تحت تأثیر تنوع مکانی بارندگی و نفوذ باشد و گاهی نیز ممکن است تحت خطاهای موجود در اندازه‌گیری بارندگی و جریان قرار گیرد (Tracy و Marino، ۱۹۸۷). بنابراین، به دست آوردن مقادیر خوب و ثابت برای پارامترهای نفوذ دشوار است. حتی پارامترهای روش‌های طراحی شده برای استفاده از ویژگی‌های خاک قابل اندازه‌گیری، معمولاً در فرآیند کالیبراسیون تغییر می‌کند. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که محققین زیادی روش‌های مختلف نفوذ را بررسی کردند و به بیان مزیت‌ها و معایب آن‌ها پرداختند. در جدول (۶) شرح مختصری از پرکاربردترین معادلات نفوذ نشان داده شده است. نفوذ تجمعی ماهیتی متفاوت از شدت نفوذ است. طی پژوهشی توسط نشاط و پاره‌کار (۱۳۸۶) جهت بررسی سرعت نفوذ، مدل کوستیاکوف را مناسب‌ترین مدل برای برآورد سرعت نفوذ و نفوذ تجمعی دانستند. بر این اساس با افزایش

طول مدت زمان آزمایش نفوذ، ضرایب مدل کوستیاکوف تغییرات بیشتری نسبت به بقیه مدل‌ها دارد؛ بنابراین می‌توان گفت استفاده از ضرایب مدل‌های کوستیاکوف و هورتون به دلیل اینکه مبنای

داده‌های تجربی در کوتاه‌مدت به دست آمده‌اند، برای برآورد نفوذ تجمعی در زمان طولانی، دارای خطای قابل‌ملاحظه‌ای است. همچنین مدل‌های SCS و فیلپ را در درازمدت مناسب‌تر دانستند.

جدول ۶- معادلات پرکاربرد برآورد نفوذ در مدل‌های مختلف

نام مدل	مرجع	معادله نفوذ	ضرایب	مدل	متغیرهای مستقل
کوستیاکوف	Kostiakov (۱۹۳۲)	$I = ct^a$	c, a	-	زمان
گرین آمپ	Ampt و Green (۱۹۱۱)	$f_p = k_s(L+S)/L$ $I = A/i + B$	k_s	PRMS, HEC	ذخیره، زمان
هورتون	Horton (۱۹۴۰)	$f_p = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$	k	SWMM	زمان
هولتان	Holtan (۱۹۶۱)	$f = aF_p^n + f_c$	n, a	USDAHL-74, ANSWERS, HEC	ذخیره
SCS	SCS (۱۹۷۲)	$i = at^b + c$	A, b, c	HEC, TR-20	
فیلپ	Philip (۱۹۵۴)	$i = St^{0.5} + kt$	S, K		زمان، ذخیره

در پژوهشی دیگر توسط سلیمانی و همکاران (۱۳۹۵) در بررسی مدل‌های فیلپ، هورتون، گرین-آمپ، کوستیاکوف و سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS)، اهمیت کاربری در این میان مشخص شد و بنابر نتایج آنان در کاربری مرتع، مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا و در کاربری‌های جنگل و زراعت، مدل فیلپ، به‌عنوان برترین مدل برآورد نفوذ بدست آمده است. همچنین مدل هورتون، ضعیف‌ترین مدل شناخته شد.

به دلیل ماهیت پیچیده، فرآیندهای نرم‌افزاری نقشی کلیدی در محاسبات و شبیه‌سازی نفوذ، ایفا می‌کند. به دلیل تغییرات مکانی، روش دیگر برآورد نفوذ، استفاده از روش‌های مبتنی بر سیستم اطلاعاتی هست که نمونه آن توسط Sonaje (۲۰۱۱) مطرح شد که می‌تواند برای مطالعه اثرات تغییرات در پوشش زمین، اقلیم و مدیریت آب از قابلیت‌های آن استفاده شود و به دودسته کلی نرم‌افزارهای محاسبات عددی و نرم‌افزارهای هیدرولوژیکی تقسیم می‌شود. نرم‌افزارهای محاسبات عددی مانند MATLAB، MathView، Mathematica، Mathcad و Maple، نرم‌افزارهای تحلیل‌گر قوی با قابلیت‌های محاسبات عددی، توابع جبری، مثلثاتی و ماتریسی هستند و دارای دسترسی آسان می‌باشند. از طرفی نرم‌افزارهای هیدرولوژیکی پیچیده هستند و نیاز به جزئیات ورودی زیاد دارند، باین‌حال دقت پیش‌بینی این مدل‌ها در مقایسه با ورودی‌های دقیق، پایین است. از جمله نرم‌افزارهای هیدرولوژیکی می‌توان HYMOS، WEHY، USGS PRMS، SWAT و SWAP را نام برد.

• **رطوبت خاک:** بخشی از آب نفوذ یافته در خاک به رطوبت تبدیل می‌شود. رطوبت خاک^{۱۳}، یکی از مهم‌ترین متغیرهای خاک در مطالعات بارندگی-رواناب، پیش‌بینی سیل، زمین‌لغزش، تولیدات کشاورزی و سایر خدمات اکوسیستم است و به همین دلیل، یکی از

اجزای مهم مدل‌های هیدرولوژی، اکولوژی و آب‌وهوایی محسوب می‌شود (Clothier و همکاران، ۲۰۱۱؛ Babaeian و همکاران، ۲۰۱۹؛ Hardie، ۲۰۲۰). رطوبت خاک، در حجم بارندگی که در داخل رودخانه‌ها و جویبارهای نزدیک می‌ریزد دخیل هست. در سراسر جهان، تناوب الگوی های خشک یا مرطوب مشاهده شده می‌تواند بیانگر واکنش الگوهای بارندگی بعدی باشد (Civeira، ۲۰۱۹). روش‌های مختلفی برای این منظور وجود دارد که می‌توان به‌صورت کلی به دودسته روش‌های نظارت مستقیم و غیرمستقیم طبقه‌بندی نمود. روش مستقیم از اندازه‌گیری وزن برای تعیین مقدار آب موجود در خاک استفاده می‌کند. در این حالت یک نمونه خاک پس از جمع‌آوری، وزن می‌شود، در آون خشک می‌شود و دوباره جهت تعیین مقدار آب برحسب جرم یا حجم، وزن‌گیری می‌شود. تعیین رطوبت خاک به‌صورت وزنی استاندارد است برای روش‌های غیرمستقیم که بر اساس آن کالیبره می‌شوند (Hunduma و Kebede، ۲۰۲۰). در روش غیرمستقیم، اندازه‌گیری‌های صورت گرفته با سایر متغیرهای قابل‌اندازه‌گیری، کالیبره می‌شود. بیشتر روش‌های عملی برای پایش آب‌وخاک، غیرمستقیم هستند. از انواع روش‌های اندازه‌گیری غیرمستقیم رطوبت خاک، می‌توان به روش امواج گاما، فناوری کاوش نوترون، روش‌های دی‌الکتریک (FDR^{14} ، TDR^{15} ، SWR^{16})، تانسیومتر، روش‌های نوری، سنسور مقاومتی (بلوک گچی)، سانسورهای خازنی، به‌کارگیری سنجش‌ازدور و شاخص سطح برگ اشاره کرد (SU و همکاران، ۲۰۱۴؛ داوودی، ۱۳۹۷؛ Hardie، ۲۰۲۰). همه این روش‌ها مزایا و معایب خود را دارند و باید با احتیاط، بسته به نیازها و خواسته‌های کاربران استفاده شوند. مناسب بودن هر روش به مسائل مختلفی مانند هزینه، دقت، زمان پاسخگویی، نصب و راه‌اندازی بستگی دارد (Hunduma و Kebede، ۲۰۲۰).

گرچه در ساختار مدل‌های هیدرولوژیکی، ساده‌سازی امری متداول است، اما حذف سایر مؤلفه‌های تلفات نیز بایستی با دقت صورت بگیرد. به‌عنوان مثال در حوضه‌های آبخیز با کاربری کشاورزی، ذخیره چالابی می‌تواند قابل‌توجه باشد، به‌نحوی که ذخیره چالابی تا ۴۰٪ اینچ (۱ میلی‌متر) در مزارع با شخم عمیق گزارش شده است (Goldman و همکاران، ۱۹۹۰). به‌طورکلی در حوضه‌های جنگلی، با افزایش مقدار بارندگی، نسبت برگاب و ذخیره چالابی در قیاس بانفوذ به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین، می‌توان گفت خطاهای ناشی از مدل‌سازی ناقص برای رگبارهای شدید، نسبت به وقایع دیگر، کوچک‌تر است. این خطاهای ساختاری ممکن است دقت کالیبراسیون را برای برآورد واقع‌گرایانه از فرآیند نفوذ در حوضه آبخیز کاهش دهند (Knapp و همکاران، ۱۹۹۱).

مطالعات محققین نشان داده که تلفات بارندگی به شرایط رطوبت خاک قبل از وقوع بارندگی نیز وابسته است. تبخیرتقرق در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بزرگ‌ترین عامل مؤثر در برآورد مقادیر رطوبت خاک است. تبخیرتقرق واقعی با پتانسیل متفاوت است، لذا در برآورد رطوبت خاک مبتنی بر بیلان آب در خاک، استفاده از مقادیر میانگین ماهانه تبخیرتقرق پتانسیل یا مقادیر متوسط سالانه، می‌تواند خطاهای بزرگی را در رطوبت خاک تخمین زده‌شده، ایجاد کند. در باب اهمیت ارتباط بین مؤلفه‌ها، کافی است به این نکته توجه شود که از آنجایی که این اطلاعات برای برآورد نفوذ نیز استفاده می‌شود، این تخمین‌های دارای عدم اطمینان، می‌تواند به‌صورت غیرمستقیم منجر به خطا در تخمین نفوذ شود. معمولاً رطوبت خاک هنگام استفاده از مدل‌های بر پایه رویداد، استفاده نشده و به‌جای آن، عموماً شرایط اولیه، واسنجی و یا به‌صورت دستی توسط کاربر تعیین می‌شود. گاهی نیز وضعیت رطوبت خاک با شاخص بارندگی پیشین (API) از طریق ارتباط دادن مقدار بارندگی تجمعی ماقبل از رویداد رگبار (به‌طورمعمول برای یک دوره ۱ تا ۱۵ روز قبل از وقوع رگبار) مشخص می‌شود. درنهایت می‌توان گفت که بررسی انواع تلفات هیدرولوژیکی و کاربرد آن‌ها، نوعی بینش جدید در مورد بهبود خروجی هیدرولوژیکی به همراه خواهد داشت و دانش علمی موردنیاز برای مدیریت بهتر منابع آب را فراهم می‌کند.

پی‌نوشت

- 1-Rainfall Losses
- 2-Initial losses- continuous losses
- 3-Initial Loss-Proportional Loss
- 4-Interception
- 5-Stemflow
- 6-Throughfall

ساختار مؤلفه‌های فرآیندهای مؤثر بر تبدیل بارندگی به رواناب، منجر به ایجاد تنوع در شبیه‌سازی می‌شود که این موضوع نیز به‌تبع خود ساختار مدل‌ها و نوع داده‌های ورودی و نهایتاً خروجی آن زیر بخش را تغییر می‌دهد. از آنجایی که تلفات بارندگی در مدل‌سازی بارندگی رواناب و پیش‌بینی سیل، خاصه در دبی طراحی، بسیار حائز اهمیت است، در این مطالعه انواع تلفات هیدرولوژیکی و روش‌های محاسبه آن‌ها، مورد بررسی مقایسه‌ای قرارگرفته‌اند. تحلیل عمومی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد در پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه تلفات بارندگی، عموماً تنها به تعداد محدودی از عوامل تلفات مانند برگاب، ذخیره چالابی، تبخیرتقرق و نفوذ و رطوبت خاک پرداخته‌اند و برای مابقی مؤلفه‌هایی که لحاظ نشده‌اند، نگرشی سازمان‌یافته در نظر گرفته نشده است.

در بین انواع مؤلفه‌های تلفات، نفوذ تنها فرآیندی است که در روند محاسبات اغلب مدل‌های بارندگی-رواناب، خصوصاً در مدل‌های بر پایه رویداد، در نظر گرفته می‌شود. دو دلیل توجیهی این تمایز عبارت‌اند از:

۱- نفوذ عمده‌ترین تلفات بارندگی در هنگام بارندگی‌های سنگین تجمعی است.

۲- جداسازی فعل و انفعالات بین فرآیندهای مختلف ریزش باران دشوار است، مگر آنکه مطالعات دقیق میدانی انجام‌شده باشد (McPherson, ۱۹۷۸).

این نوع گزینش مؤلفه‌های عملگر در ساختار تابع تلفات مدل‌های هیدرولوژیکی، ایجاد رفتارهای خاصی در خروجی‌های پیش‌بینی رواناب می‌کنند؛ زیرا نوع و مقدار تلفات هیدرولوژیکی بر تابع عملکرد مدل تأثیر مستقیم دارد و اختلافات خود را در حجم رواناب شبیه‌سازی‌شده ظاهر می‌کند. به‌عنوان نمونه برگاب و ذخیره چالابی از عوامل مهم در بیلان کلی آب هستند که به گفته Goldman و همکاران، (۱۹۹۰) می‌تواند به‌عنوان بیشترین تلفات در ۸۰٪ از وقایع بارندگی به‌حساب آید. تلفات برگاب و ذخیره چالابی را می‌توان در مدل‌سازی هیدرولوژیکی برای پیش‌بینی رواناب برای رویدادها و پوشش زمین مختلف استفاده کرد، به‌خصوص هنگام مدل‌سازی بارندگی‌های سبک تا متوسط، عدم استفاده از تلفات برگاب و ذخیره چالابی به‌عنوان فرآیندهای موجود در مدل‌های هیدرولوژیکی، می‌تواند خطاهای قابل‌توجهی ایجاد کند. تغییرات مؤلفه‌های مؤثر بر تلفات بارندگی از نظر مکانی تغییرات زیادی بر روی تغییرات مکانی تلفات بارندگی می‌گذارند. در خصوص مقیاس زمانی نیز برخی مؤلفه‌ها در یک مقیاس زمانی خاص یا شرایط خاص (مثلاً بارندگی‌های سنگین) با اهمیت هستند ولی در سایر مقیاس‌های زمانی هیچ‌گونه اهمیتی پیدا نمی‌کنند.

the FAO BlaneyCriddle Method. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 112(IR2): 139-155.

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9): D05109.

Aron G. 1982. Rainfall Abstractions in Urban storm water hydrology. American geophysical union, Washington, D.C. water resources, 7: 69-86.

Babaeian E., Sadeghi M., Jones S.B., Montzka C., Ver-eecken H. and Tuller M. 2019. Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture. Reviews of Geophysics, 57(2): 530-616.

Blaney H.F. and Criddle W.D. 1950. Determining Requirements Water in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data. Washington Soil Conservation Service, 48.

Brutsaert W. 2005. Hydrology: an introduction, Cambridge University Press, New York.

Calder I. 1986. A stochastic model of rainfall interception. Journal of Hydrology, 89: 65-71.

Calder I. 1996. Dependence of rainfall interception on drop size: 1. Development of the two-layer stochastic model. Journal of Hydrology, 185: 363-378.

Chattopadhyay N. and Hulme M. 1997. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. Agricultural and Forest Meteorology, 87(1): 55-73.

Chow V.T., Maidment D.R. and Mays L.W. 2013. Applied hydrology; 2 edition, McGraw- Hill New York.

Civeira G. 2019. Introductory Chapter: Soil Moisture. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73742>.

Clothier B.E.; Hall A.J.; Deurer M.; Green S.R. and Mackay A.D. 2011. Soil Ecosystem Services: Sustaining Returns on Investment into Natural Capital. In Sustaining Soil Productivity in Response to Global Climate Change: Science, Policy, and Ethics; John Wiley & Sons, Inc.: West Sussex, UK. (p. 117-139).

Darboux F., Davy P., Gascuel-Oudoux C. and Huang C. 2002. Evolution of soil surface roughness and

- 7-Depression storage
- 8-Maximum depression storage
- 9-Evapotranspiration
- 10-Laef Area Index
- 11-Normalized Difference Vegetation Index
- 12-Infiltration
- 13-Soil moisture
- 14-Frequency Domain Reflectometry
- 15-Time-Domain Reflectometry
- 16-Standing Wave Ratio

منابع

پرهمت، ج.، عباسی، ع.ا. و نظری پویا، ه. ۱۳۹۴. بررسی و مقایسه تلفات اولیه بارندگی و آستانه رواناب بر اساس داده‌های بارندگی و رواناب مشاهده‌ای در سه حوضه نمونه. چهارمین همایش ملی سامانه‌های سطوح آبگیر باران، مشهد مقدس. جوادیان، م.، کردی، ف. و تجریشی، م. ۱۳۹۷. مقایسه روش‌های برآورد تبخیر و تعرق. مجله اکوهیدرولوژی، ۶(۱): ۱۲۵-۱۳۶. داوودی، ا. ۱۳۹۷. ارزیابی ارتباط شاخص سطح برگ با تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بهشت‌آباد). پایان‌نامه مقطع دکتری، دانشگاه کاشان.

سلیمانی، ل.، حق‌زاده، ع. و زینی‌وند، ح. ۱۳۹۵. تعیین بهترین مدل‌های برآورد نفوذ در کاربری‌های مختلف، به‌منظور مدیریت بهینه حوزه‌های آبخیز (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کاکا شرف، استان لرستان). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۷(۱۳): ۳۳-۴۱.

علیزاده، ا. ۱۳۹۱. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا. مشهد.

میرزایی، س.، زینی‌وند، ح. و حق‌زاده، ع. ۱۳۹۲. تهیه نقشه ظرفیت ذخیره چالابی با استفاده از نرم‌افزار Wetspa در محیط GIS. بیستمین همایش ملی ژئوماتیک.

نشاط، ع. و پاره‌کار، م. ۱۳۸۶. مقایسه روش‌های تعیین سرعت نفوذ عمودی آب در خاک. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۴(۳): ۱۸۶-۱۹۵.

Abd Elbasit M. A., Ojha C. S., Abu-Zerig M. M., Yasuda H., Gang L., and Ahmed F. 2019. Estimation of surface depression storage capacity from surface roughness. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, [preprint], <https://doi.org/10.5194/hess-2019-74>.

Allen R.G. and Pruitt W.O. 1986. Rational Use of

- Drainage Engineering, 116(IR6): 752-768.
- Govers G., Takken I. and Helming K. 2000. Soil roughness and overland flow. *Agronomie*, 20(2): 131-146.
- Gray D. M. 1973. Handbook on the principles of hydrology: A General Text with Special Emphasis on Canadian conditions, Water Information Center, Inc, Port Washington, N.Y.
- Green W.H. and Ampt G.A. 1911. Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(01): 1-24.
- Hairsine P. B., Moran C. J. and Rose C. W. 1992. Recent developments regarding the influence of soil surface characteristics on overland flow and erosion. *Soil Research*, 30(3):249-264.
- Hardie M. 2020. Review of novel and emerging proximal soil moisture sensors for use in agriculture. *Sensors*, 20(23): 6934.
- Hargreaves G.H. and Samani Z.A. 1985. Reference Crop Evapotranspiration From Ambient Air Temperature. *Pap. Am. Soc. Agric. Eng.* (p. 96-99).
- Hill P.I. and Mein R.G. 1996. Incompatibilities between storm temporal patterns and losses for design flood estimation. In: *Hydrology and Water Resources Symposium*. Institution of Engineers, Hobart, Australia. (p. 445-451).
- Holtan H.N. 1961. Concept for infiltration estimates in watershed engineering. *U.S. Dept. Agr., Agr. Res. Serv., ARS* (p.41-51).
- Horton R.E. 1940. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 5: 399-417.
- Huang C. H. and Bradford J. M. 1990. Depression storage for Markov-Gaussian surfaces. *Water resources research*, 26(9): 2235-2242.
- Hunduma S. and Kebede G. 2020. Indirect Methods of Measuring Soil Moisture Content Using Different Sensors. *African Journal of Basic & Applied Sciences*, 12(3): 37-55.
- Ilahee M. 2005. Modelling Losses in Flood Estimation, Queensland University of Technology, Queensland.
- Jensen M.E., Burman R.D. and Allen R.G. (eds.). 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering flowpath connectivity in overland flow experiments. *Catena*, 46(2-3): 125-139.
- David J.S., Valente F., and Gash J.H. 2006. Evaporation of intercepted rainfall. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa046>.
- Dunne T., Zhang W., and Aubry B.F. 1991. Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resources Research*, 27(9): 2271-2285.
- Gamage S.H.P.W., Hewa G.A. and Beecham S. 2014. Distribution of Hydrological Losses for Varying Rainfall and Antecedent Wetness Conditions, 11th International Conference on Hydroinformatics, New York City, USA.
- Gamage S.H.P.W., Hewa G.A. and Beecham S. 2015. Modelling hydrological losses for varying rainfall and moisture conditions in South Australian catchments. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4(PB): 1-21.
- Gash J., Lloyd C. and Lachaud G. 1995. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 170: 79-86.
- Gash J. 1979. An analytical model of rainfall interception by forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105: 43-55.
- Ghiat I., Mackey H. R. and Al-Ansari T. 2021. A Review of Evapotranspiration Measurement Models, Techniques and Methods for Open and Closed Agricultural Field Applications. *Water*, 13(18): 2523.
- Ghumman A.R., Iqbal M., Ahmad S. and Hashmi H.N. 2018. Experimental and numerical investigations for optimal emitter spacing in drip irrigation. *Irrig. Drain*, 67: 724-737.
- Gish T.J. and Starr J.L. 1983. Temporal Variability of Infiltration under Field Conditions. In *Advances in Infiltration*, Proceedings of the ASAE National Conference on Advances in Infiltration, ASAE Publication. (p. 102-112).
- Goldman D.M., Marino M.A. and Feldman A.D. 1990. Runoff Prediction Uncertainty for Ungauged Agricultural Watersheds. *ASCE Journal of Irrigation and*

- during a Steady Rain. *Water Resources Research*, 9 (2): 384-394.
- Mein R.G., Nandakumar N. and Siriwardena L. 1995. Estimation of Initial Loss from Soil Moisture Indices: Pilot Study. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology.
- Michalopoulou H. and Papaioannou G. 1991. Reference crop evapotranspiration over Greece. *Agricultural water management*, 20(3): 209-221.
- Monteith J.L., Szeicz G. and Waggoner P.E. 1965. The measurement and control of stomatal resistance in the field. *Journal of Applied Ecology*, 2(2): 345-355.
- Mulder J. 1985. Simulating interception loss using standard meteorological data. In: Hutchison, B., Hicks, B. (Eds.), *The Forest-Atmosphere Interaction*. Reidel Publishing Company, Dordrecht. (p. 77-196).
- Murakami S. 2007. Application of three canopy interception models to a young stand of Japanese cypress and interpretation in terms of interception mechanism. *Journal of Hydrology*, 342: 305-319.
- Muzylo A., Llorens P., Valente F., Keizer J., Domingo F. and Gash J. 2009. A review of rainfall interception modelling. *Journal of hydrology*, 370: 191-206.
- Nandakumar N., Mein R. and Siriwardena L. 1994. Loss modeling for flood estimation - a review. Clayton, Vic: Cooperative Reserch Center for Catchment Hydrology.
- Nathan R. J., Weinmann P. E. and Hill P. I. 2003. Use of Monte Carlo simulation to estimate the expected probability of large to extreme floods. In M. J. Boyd, J. E. Ball, M. K. Babister, & J. Green (Eds.), *Proceedings of the 28th International Hydrology and Water Resources Symposium* (Vol. 1, pp. 105 - 112). Institution of Engineers Australia.
- Ngongondo C., Xu C.Y., Tallaksen L.M. and Alemaw B. 2013. Evaluation of the FAO Penman-Monteith, Priestley-Taylor and Hargreaves models for estimating reference evapotranspiration in southern Malawi. *Hydrology Research*, 44(4): 706-722.
- Panahi M., Khosravi K., Ahmad S., Panahi S., Heddam S., Melesse A.M., and Lee C.W. 2021. Cumulative Practices No. 70, New York, 332 pp.
- Kale R.V. and Sahoo B. 2011. Green-Ampt infiltration models for varied field conditions: a revisit. *Water Resources Management*, 25(14): 3505-3536.
- Knapp H.V., Durgunoğlu A. and Ortel T.W. 1991. A review of rainfall-runoff modeling for stormwater management. ISWS Contract Report CR 516.
- Kostiakov A.N. 1932. The dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Society of Soil Science*, 14: 17-21.
- Lowry R. L. and Johnson A.F. 1942. Consumptive use of water for Agriculture. *A.S.c.E.*, v. 107, p. 1252.
- Link T.E., Unsworth M. and Marks D. 2004. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124: 171 - 191.
- Linsley R.K., Kohler M.A. and Paulhus J.L.H. 1982. *Hydrology for Engineers*, 3rd Edition, New York.
- Liu J. 1988. A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy. *Ecological Modelling*, 42: 111-123.
- Liu S. 1997. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. *Ecological Modelling*, 99: 151-159.
- Mahapatra S., Jha M.K., Biswal S. and Senapati D. 2020. Assessing variability of infiltration characteristics and reliability of infiltration models in a tropical sub-humid region of India. *Sci. Rep*, 10 (1): 1-18.
- Massman W. 1983. The derivation and validation of a new model for the interception of rainfall by forest. *Agricultural Meteorology*, 28: 261-286.
- McPherson M.B. 1978. *Urban Runoff Control Planning*, U.S. Environmental Protection Agency Report EPA-600/9-78-035, mechanism. *Journal of Hydrology*, 342: 305-319.
- Mein R.G. and O'Loughlin E.M. 1991. A new approach for flood forecasting. In: *Hydrology and Water Resources Symposium*. Australian Institution of Engineers, Perth, WA. (p. 219-224).
- Mein R.G. and Larson C.L. 1973. *Modeling Infiltration*

- Combination Method. Transactions of the ASAE 17: 668-672.
- Sellers P. and Lockwood J. 1981. A computer simulation of the effects of differing crop types on the water balance of small catchments over a long time periods. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 107: 395-414.
- Siriwardena L. and Mein R.G. 1996. Development and Testing of a Variable Proportional Loss Model. Hydrology and Water Resources Symposium 1996: Water and the Environment; Preprints of Papers. Institution of Engineers, Hobart, Tasmania, Australia, 709-710.
- Smith R.E. and Parlange J.Y. 1978. A Parameter-Efficient Hydrologic Infiltration Model. Water Resources Research, 14 (3): 533-538.
- Soil Conservation Service (SCS). 1956. Hydrology, National Engineering Handbook, Supplement A, Sect. 4, Chapt. 10, Soil Conservation Service, USDA, Washington, D.C.
- Soil Conservation Service (SCS). 1972. Hydrology. National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Chapter 10, Soil Conservation Service, USDA, Washington, D.C.
- Sonaje N. 2011. Mathcad a tool for infiltration modeling. Saarbrücken: Lambert academic publishing, Germany.
- Sonaje N. 2013. Modeling of Infiltration Process – A Review. Indian journal of applied research, 3(9): 226-230.
- Stanghellini C. 1987. Transpiration of Greenhouse Crops: An Aid to Climate Management. Ph.D. Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- SU S.L., Singh D.N. and Baghini M.S. 2014. A critical review of soil moisture measurement. Measurement, 54: 92-105.
- Takken I. and Govers G. 2000. Hydraulics of interrill overland flow on rough, bare soil surfaces. Earth Surface Processes and Landforms, 25(13): 1387-1402.
- Talsma C.J., Good S.P., Jimenez C., Martens B., Fisher infiltration and infiltration rate prediction using optimized deep learning algorithms: A study in Western Iran. Journal of Hydrology: Regional Studies, 35: 100825.
- Penman H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London, 193: 120-145.
- Philip J.R. 1954. An infiltration equation with physical significance. Soil Science, 77(2): 153-158.
- Philip J.R. 1991. Horizontal redistribution with capillary hysteresis. Water resources research, 27 (7): 1459-1469.
- Pilgrim D.H. 1986. Bridging the Gap between Flood Research and Design Practice. Water Resources Research, 22 (9): 165-176.
- Priestley C.H. and Taylor R. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. Monthly Weather Review, 100: 81-92.
- Rammal M. and Berthier E. 2020. Runoff losses on urban surfaces during frequent rainfall events: a review of observations and modeling attempts. Water, 12(10): 2777.
- Rana G. and Katerji N. 2000. Measurements and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. European Journal of Agronomy, 13(2-3): 125-153.
- Rawls W.J., Yates P. and Asmussen L. 1976. Calibration of Selected Infiltration Equations for the Georgia Coastal Plain. Agricultural Research Service Report ARS-S-113, Beltsville MD.
- Rutter A., Kershaw K., Robins P. and Morton A. 1971. A predictive model of rainfall interception in forest. I. Derivation of the model from observation in a plantation of Corsican pine. Agricultural Meteorology, 9: 367-384.
- Rutter A., Morton A. and Robins P. 1975. A predictive model of rainfall interception in forests. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. Journal of Applied Ecology, 12(1): 367-380.
- Saxton K.E., Johnson H.P. and Shaw R.H. 1974. Watershed Evapotranspiration Estimated by the

- T.E. 1977. Introduction to Hydrology, Harper and Row: New York.
- Viessman W. and Lewis G.L. 1996. Introduction to Hydrology. Chapter 3: Interception and Depression Storage. New York. (p. 40 – 51).
- Wilcox B.P., Rawls W.J., Brakensiek D.L., and Wight J.R. 1990. Predicting Runoff from Rangeland Catchments: A Comparison of Two Models. Water Resources Research, 26(10): 2401-2410.
- Xiao Q., McPherson E.G., Ustin S.L. and Grismer M.E. 2000. A new approach to modeling tree rainfall interception. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 105(D23): 29173-29188.
- Xiao Q. and McPherson E.G. 2002. Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest. Urban ecosystems, 6(4): 291-302.
- Yen B.C. 1982. Some Measures for Evaluation and Comparison of Simulation Models. In Urban Stormwater Hydraulics and Hydrology, B.C. Yen (ed.), Proceedings of the Second Conference on Urban Storm Drainage, Urbana, IL. 341-349.
- Zeng N., Shuttleworth J. and Gash J. 2000. Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. Part 1. Point analysis. Journal of Hydrology, 228: 228-241.
- Zhang K., Kimball J.S. and Running S.W. 2016. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 3(6): 834-853.
- J.B., Miralles D.G. and Purdy A.J. 2018. Partitioning of evapotranspiration in remote sensing-based models. Agricultural and Forest Meteorology, 260: 131-143.
- Thornthwaite C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev., 38: 55-94.
- Tracy J.C. and Marino M.A. 1987. Evaluation of Empirical Infiltration Models in SingleEvent Rainfall-Runoff Models. In Infiltration Development and Application, Y.-S. Fok (ed.), Proceedings of the International Conference on Infiltration Development and Application, Honolulu, HI. 526-539.
- Turc L. 1951. New formulas for the estimation of runoff, using the average annual values of temperature and precipitation: Proceedings of the academy sciences, Paris, 233: 633-635((in French).
- Ullah W. and Dickinson W.T. 1979. Quantitative description of depression storage using a digital surface model: I. Determination of depression storage. Journal of Hydrology, 42(1-2): 63-75.
- Valente F., David J. and Gash J. 1997. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. Journal of Hydrology, 190(1-2): 141-162.
- Van Dijk A. and Bruijnzeel L. 2001. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model, part 1. Model description. Journal of Hydrology, 247(3-4): 230-238.
- Viessman J.W., Knapp J.W., Lewis G.L. and Harbaugh

Investigating the Effectiveness of the Implementation of the Reclamation and Balancing Plan and the Vulnerability of the Plan Projects (Case Study: Ardestan Plain- Isfahan Province)

Z. Keyhomayoon^{1*}, M. Hajizade², F. Alijani³

1- Assistant Professor, Geology Department, Payame Noor University, Tehran, Iran. 2, 3- Ph.D. Student and Assistant Professor, Hydrogeology, Shahid Beheshti University, Tehran.

*(Corresponding Author Email: Zkayhomayoon@pnu.ac.ir)

Received: 23-11-2022

Revised: 17-12-2022

Accepted: 26-12-2022

Available Online: 29-12-2022

بررسی اثربخشی اجرای طرح احیا و تعادل بخشی و آسیب شناسی پروژه های طرح (مطالعه موردی: دشت اردستان- اصفهان)

زهرا کی همایون^{۱*}، میثم حاجی زاده^۲، فرشاد علیجانی^۳

۱- استادیار گروه زمین شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادیار هیدروژئولوژی دانشگاه شهید بهشتی تهران، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: Zkayhomayoon@pnu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۰/۰۸

Abstract

The aquifer reclamation project has been developed and implemented by the Ministry of Energy with the aim of stopping the overdraft of groundwater resources. It is not possible to evaluate the effectiveness of the implementation of this project in many Iranian aquifers due to the lack of complete implementation of the project or the lack of sufficient information. The study area of the Ardestan is one of the pilot plains for the implementation of the aquifer reclamation in Isfahan province, in which, according to the available data, it is possible to evaluate the effectiveness of the implementation of this project. For this purpose, the quantitative data of the Ardestan aquifer between 2001 and 2021 were used to evaluate the effectiveness of the reclamation project. The results show that the slope of the water table curve has improved relatively in the years after reclamation, and natural factors have had the greatest impact on this improvement. In other words, the amount of groundwater saved due to reclamation shows a negligible effect on the quantity of groundwater in terms of quantity, time, and place. The review of the implementation of the reclamation projects in the Ardestan shows that the performance in some projects was zero and in other cases, the projects were implemented incompletely. Finally, the implementation of each of the projects has been analyzed based on the available data, and the reasons for the failure of the rehabilitation and balancing plan's effectiveness have been investigated.

Keywords: Reclamation and Balancing, Groundwater Resources, Representative Hydrograph, Ardestan Aquifer.

چکیده

طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور با هدف بازایستادن روند اضافه برداشت و جبران کسری مخازن آب زیرزمینی توسط وزارت نیرو اجرایی شده است. ارزیابی اثربخشی اجرای این طرح در بسیاری از آبخوان های کشور به دلیل اجرا نشدن کامل طرح و یا نبود اطلاعات کافی انجام پذیر نیست. محدوده مطالعاتی اردستان یکی از دشت های پایلوت اجرای طرح احیا و تعادل بخشی آبخوان در استان اصفهان است که باتوجه به داده های موجود امکان ارزیابی اثربخشی اجرای این طرح در آن وجود دارد. به این منظور، در پژوهش حاضر از داده های کمی آبخوان اردستان در بازه سال های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ به منظور ارزیابی اثربخشی اجرای طرح احیا و تعادل بخشی در این محدوده مطالعاتی استفاده شده است. پس از بررسی موبه مو کارهای تعادل بخشی انجام شده در محدوده، شامل تولید داده ها، نظارت و کنترل بهره برداری و ذخیره سازی مستقیم آب در آبخوان، تأثیر این کارها بر هیدروگراف معرف آبخوان ارزیابی شده است. نتایج نشان داد شیب منحنی تراز سطح ایستابی در سال های پس از تعادل بخشی بهبود نسبی داشته و عوامل طبیعی بیشترین تأثیر را بر این بهبود داشته است. به عبارت دیگر، حجم صرفه جویی شده آب زیرزمینی برآمده از کارهای طرح تعادل بخشی از نظر کمی، زمانی و مکانی تأثیر ناچیزی بر کمیت آب زیرزمینی نشان داد. بررسی اجرای پروژه های طرح احیا و تعادل بخشی در محدوده اردستان نشان داد، عملکرد در برخی از پروژه ها صفر بوده و در سایر موارد نیز طرح ها به طور نیمه کاره اجرا شدند. در پایان، اجرای هر یک از پروژه ها براساس داده های موجود آسیب شناسی شده و دلایل موفق نشدن اثربخشی طرح احیا بررسی شد.

واژه های کلیدی: احیا و تعادل بخشی، منابع آب زیرزمینی، هیدروگراف معرف، آبخوان اردستان.

میرحاجی (۱۳۹۹) در پژوهشی، میزان تأثیرگذاری کارهای انجام شده در راستای احیای آبخوان و همسو با آن، اثر پارامترهای بارندگی سالیانه و کاهش برداشت از آب زیرزمینی بر روی تغییرات تراز آبخوان دشت خوی را با استفاده از تکنیک تحلیل عاملی و تجزیه و تحلیل داده‌های تراز سطح ایستابی ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد افزایش بارندگی و پس از آن کاهش برداشت از آب زیرزمینی همچنان کاراترین عامل در بهبود نسبی وضعیت کمی آبخوان در سال‌های اخیر بوده است.

خدادادی (۱۴۰۰) در پژوهشی تفصیلی طرح احیا و تعادل بخشی آب‌های زیرزمینی دشت شهریار با تأکید بر کنتورهای هوشمند و تغذیه مصنوعی را ارزیابی کرد. در این پژوهش، محدوده مورد مطالعه از نظر شمار کنتورهای هوشمند، به سه گستره با تعداد کنتورهای نصب شده زیاد، متوسط و کم تقسیم شد. نتایج نشان داد شیب و روند نوسانات سطح آب زیرزمینی در گستره‌های با تراکم زیاد و کم کنتور هوشمند یکسان است که نشان از کارایی ناچیز کارگذاشتن کنتور هوشمند در تعادل سطح آب زیرزمینی دارد. افزایش تراز سطح ایستابی از پایان سال ۱۳۹۷ در هر سه گستره مشاهده شد. این بهبود در گستره با شمار متوسط کارگذاشتن کنتور هوشمند به دلیل نزدیکی بیشتر با منطقه اجرای طرح تغذیه مصنوعی بیشتر رخ داد که نشان از اولویت بالای طرح‌های تغذیه مصنوعی در مقابل کنتورهای هوشمند دارد.

زنگنه و همکاران (۱۴۰۰) ارتباط بین نشست زمین به‌عنوان یک پدیده طبیعی با کاهش سطح آب زیرزمینی را بررسی کردند و یک رابطه مستقیم به‌دست آوردند. این پژوهش با هدف نگارش یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره بر پایه ذی‌نفعان و ذی‌مدخلان محدوده مطالعاتی دشت ورامین با رویکرد کنترل فرونشست آبخوان و با استفاده از مدل‌های عددی و ارزیابی سناریوهای مختلف در این مدل‌ها انجام شد. راهکارهای چاره‌جویی ارائه شده در این پژوهش، ترکیبی از کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی و تغذیه مصنوعی آبخوان بودند. در پایان، پژوهشگران پیشنهاد کردند به‌کار بردن راهکارهای سخت‌گیرانه برای بهره‌برداران اگرچه موجب نارضایتی است اما باتوجه‌به برگشت‌ناپذیری فرآیند فرونشست در آبخوان، باید راهکارهای چاره‌جویی به‌طور جدی استفاده شود.

Hassan و همکاران (۲۰۱۸) تأثیرات برداشت بیش از اندازه آب زیرزمینی در محدوده‌ای در شمال غربی بنگلادش را ارزیابی کردند و پیامدهای محیط‌زیستی برآمده از آن را بررسی کردند. نتایج این پژوهش با استفاده از واکاوی آماری داده‌های سطح آب زیرزمینی و بارش انجام شد و نشان داد ارتباط مستقیمی بین میزان بارش و نوسانات سطح آب زیرزمینی وجود دارد. مهمترین عامل افت تراز سطح ایستابی در این ناحیه، برداشت آب کشاورزی برای آبیاری بیان شد. در پایان، کمبود چاه‌های مشاهده‌ای برای پایش سطح آب

در سال‌های اخیر تنش بر منابع آب زیرزمینی کشور جهت تامین آب مورد نیاز بخش‌های مختلف فزونی یافته است، به‌طوری‌که آب برداشت شده از چاه‌ها بسیار بیشتر از ظرفیت آب تجدیدپذیر آبخوان‌ها می‌باشد و پیامدهای محیط‌زیستی و اقتصادی-اجتماعی آن بر کسی پوشیده نیست؛ به‌طوری‌که در حال حاضر از ۶۰۹ دشت کشور بیش از ۳۰۰ دشت که بیشتر مناطق جمعیتی کشور در آن‌ها واقع شده‌اند، وضعیت ممنوعه و ممنوعه بحرانی دارند. به‌این‌ترتیب، از ۳۵ دشت استان اصفهان، ۲۷ دشت که بیشتر در مناطق پرجمعیت و قطب‌های کشاورزی و صنعت استان واقع شده‌اند، وضعیت ممنوعه و ممنوعه بحرانی پیدا کرده‌اند و این استان با متوسط حدود ۴۰۸ میلیون متر مکعب کسری مخزن آبخوان در سال، رتبه پنجم استان‌های کشور را دارد (معاونت حفاظت و بهره‌برداری شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۵).

در سال ۱۳۹۳ طرح ملی احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور در شورای عالی آب پذیرش شد که در آن وزارت نیرو با همکاری سایر سازمان‌های وابسته وظیفه احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور را بر عهده گرفت (آب و آبفا وزارت نیرو، ۱۳۹۴). هدف این پژوهش به‌طور اختصاصی، ارزیابی کارایی طرح احیا و تعادل بخشی بر سطح آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی اردستان به‌صورت پایلوت جهت ارزیابی حجم صرفه‌جویی شده در برداشت از منابع آب و تأثیر آن بر سطح آب زیرزمینی آبخوان و تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی‌های آینده می‌باشد.

تحلیل کمی و مباحث مربوط به تعادل بخشی آبخوان پیشینه مطالعاتی سرشار در داخل و خارج از کشور دارد؛ در ادامه به مهمترین مطالعات انجام شده داخلی و خارجی از نظر نزدیکی موضوع پرداخته می‌شود.

عمیدپور و غلامی سفیدکوهی (۱۳۹۹) در پژوهشی مروری پیاده‌سازی پروژه‌های آبیاری نوین بر تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی را بررسی کردند. نتایج نشان داد، می‌توان با حفاظت آب در کشاورزی از طریق بهبود روش‌های آبیاری همراه با انجام کارهای دیگر تعادل بخشی آبخوان، میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی و پیامدهای برآمده از آن را به حداقل رساند.

بیات و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی به‌منظور احیای آبخوان‌ها و اجرای کاهش برداشت در آبخوان‌های کشور به‌عنوان یکی از پروژه‌های تعادل بخشی، بهینه‌سازی الگوی کشت با رویکرد اقتصادی را انجام دادند و تغییرات سود کشاورزان در سال ۱۳۹۵ با سناریوهای کاهش برداشت به اندازه ۱، ۳ و ۵ درصد با دو دیدگاه رایج تغییر الگوی کشت و کاهش سطح زیرکشت را بررسی کردند. اعمال این سناریوها در نهایت تا ۳۰ درصد کاهش کسری مخزن آبخوان قزوین را نشان داد.

زیرزمینی به عنوان مهمترین بازدارنده ارزیابی های درست معرفی شد. Lall و همکاران (۲۰۲۰) در یک پژوهش مروری به چالش های آب زیرزمینی در جهان پرداختند. در این مطالعه، پژوهشگران به این جمع بندی رسیدند که کمبود داده های قابل اطمینان مهمترین چالش در زمینه مدیریت منابع آب زیرزمینی به شمار می رود. هر گونه استراتژی مدیریتی بر پایه فهم وضعیت موجود سیستم اتفاق می افتد و نقش مدل سازی آب های زیرزمینی در این میان اهمیت دارد. نکته مهم دیگر، مدیریت تغذیه آبخوان ها است که در کنار مدیریت برداشت باید توجه شود.

Dangar و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی دلایل و پیامدهای کاهش منابع آب زیرزمینی در هند را بررسی کردند. در این پژوهش، خودکفایی در محصولات کشاورزی مهمترین عامل اعمال تنش بر منابع آب زیرزمینی هند تعیین شد. نتایج کلی این پژوهش بیانگر تهدید امنیت آبی و غذایی هند و ناپایداری اکوسیستم و جریان های سطحی به دلیل کاهش منابع آب زیرزمینی می باشد.

Senthilkumar و Gnanasundar (۲۰۲۲) در پژوهشی با مطالعه دقیق ویژگی های آبخوان، تعادل بخشی آبخوان های جنوب هند را مطالعه کردند. آب های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر تنش های زیادی برآمده از مصارف کشاورزی، خانگی و توسعه شهری قرار گرفته است. بررسی های انجام شده شامل تعیین هندسه آبخوان، رفتار هیدرولیکی و مدل سازی آبخوان های گسترده می شود. به منظور تعادل بخشی آبخوان، دو سناریو شامل جریان مداوم آب در رودخانه های منطقه به مدت ۱۲۰ روز در سال و احداث کانال های نشی در مدل آب زیرزمینی انجام شد که هر دو سناریو بیانگر جبران کسری آبخوان این مناطق بودند.

به طور کلی، راهکارهای موجود به منظور تعادل بخشی آبخوان ها بر دو جنبه توسعه منابع جدید و مدیریت منابع موجود استوار می باشند. کارهای مدیریتی شامل رویکردی است که طرح جامع تعادل بخشی درپیش گرفته است و در این پژوهش نیز ارزیابی خواهد شد؛ چراکه می توان با مدیریت منابع موجود، با صرف هزینه کمتر به تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی دست پیدا کرد. نکات جامانده در مطالعات انجام شده را می توان شامل نبود جامعیت زمانی، مکانی و داده های دانست؛ به این صورت که پژوهش های انجام شده بیشتر برای یک بازه زمانی کوتاه و با در نظر گرفتن چند عامل محدود در محاسبات و ارزیابی ها انجام شده است. بسیاری از موارد موجود نیز ارتباط کافی میان تغییرات کمی آبخوان و طرح های تعادل بخشی برقرار نکرده اند و تنها تغییرات کمی آبخوان براساس یک یا چند طرح تعادل بخشی را ارزیابی کردند (برای نمونه: حسینی جلفان و همکاران، ۱۳۹۹) (عملکرد توزیع آب سطحی کشاورزی)؛ رضایی و همکاران، ۱۳۹۹ (تغذیه مصنوعی)؛ خدادادی، ۱۴۰۰ (کنترل های هوشمند)؛ عدالت و همکاران، ۱۴۰۰ (فرونشست زمین)؛ Turner و همکاران، ۲۰۱۸

(اقتصاد آب)؛ Boni و همکاران، ۲۰۲۲ (مشارکت ذی نفعان)). این درحالی است که در این پژوهش، همه ۱۵ پروژه طرح جامع تعادل بخشی به دقت ارزیابی شد.

مواد و روش ها

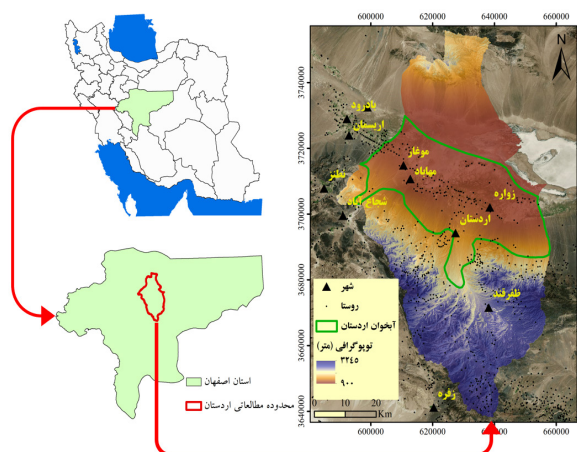
به منظور ارزیابی اثربخشی اجرای طرح احیا و تعادل بخشی آبخوان در محدوده مطالعاتی اردستان، داده ها و اطلاعات مربوط به هریک از پروژه های تعریف شده در طرح، از سازمان های موظف دربرگیرنده شرکت آب منطقه ای، سازمان جهاد کشاورزی و سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی دریافت شده است (جدول ۱). داده های دریافتی، صحت سنجی شده و کاستی های برآمده از همخوانی نداشتن داده های دریافت شده از بخش های مختلف برطرف شده است. نقشه های هم تراز، جهت جریان، هم عمق و تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت اردستان در محیط نرم افزارهای ArcGIS 10.8.1 و Surfer 21 در دو مقطع پیش از شروع طرح تعادل بخشی در سال ۱۳۹۳ و پس از گذشت ۷ سال از اجرای طرح، تا سال ۱۴۰۰ تهیه شده است. به منظور ارزیابی کمی آبخوان اردستان جهت تعیین اثرگذاری تعادل بخشی، هیدروگراف معرف آبخوان همراه با بارش در بازه سال های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ با استفاده از روش درونیابی کریجینگ و به صورت خودکار در محیط نرم افزارهای ArcGIS 10.8.1 و Surfer 21 استخراج شده و در محیط نرم افزار Excel رسم شده است (شکل ۱). پس از تحلیل داده ها، میزان اثربخشی اجرای طرح احیا و تعادل بخشی در آبخوان اردستان بررسی و پروژه های طرح، آسیب شناسی شده است.



شکل ۱- روش کار ارزیابی اثربخشی اجرای طرح احیا و تعادل بخشی در محدوده مطالعاتی اردستان

جدول ۱- منبع و بازه زمانی داده‌های دریافت شده مربوط به هر یک از پروژه‌های طرح تعادل بخشی محدوده مطالعاتی اردستان

داده‌های مورد نیاز	سازمان ارائه‌دهنده داده	بازه زمانی داده‌های دریافتی
حفر و تکمیل شبکه چاه‌های مشاهده‌ای سطح آب زیرزمینی (شبکه پیزومتری) و چاه‌های اکتشافی	شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان	۱۴۰۰-۱۳۸۰
تهیه بیلان و به‌روزرسانی بانک اطلاعاتی محدوده‌های مطالعاتی	مدیریت مطالعات پایه منابع آب	۱۴۰۰-۱۳۸۰
کارگذاشتن تجهیزات اندازه‌گیری الکترونیکی (On-line) بر روی ایستگاه‌ها، چاه‌های پیزومتری و منابع آب انتخابی	مدیریت مطالعات پایه منابع آب	۱۴۰۰-۱۳۸۰
خرید و انسداد چاه‌های کم‌بازده کشاورزی	مدیریت مطالعات پایه منابع آب	۱۴۰۰-۱۳۸۰
کارگذاشتن کنتورهای حجمی و هوشمند آب و برق کنترل برداشت از چاه‌ها	مدیریت مطالعات پایه منابع آب	۱۴۰۰-۱۳۸۰
کنترل، نظارت و مسلوب‌المنفعه کردن چاه‌های فاقد پروانه و مضر به مصالح عمومی	مدیریت مطالعات پایه منابع آب	۱۴۰۰-۱۳۸۰
جایگزینی پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با چاه‌های کشاورزی در دشت‌های ممنوعه و بحرانی	مدیریت مطالعات پایه منابع آب	۱۴۰۰-۱۳۸۰
ساماندهی شرکت‌های حفار و نصب GPS بر روی دستگاه‌های حفاری موجود در استان	مدیریت مطالعات پایه منابع آب	۱۴۰۰-۱۳۸۰
تقویت و استقرار گروه گشت و بازرسی دشت‌ها و منابع آب	مدیریت مطالعات پایه منابع آب	۱۴۰۰-۱۳۸۰
اطلاع‌رسانی و آگاه‌سازی افکار عمومی	مدیریت روابط عمومی	۱۴۰۰-۱۳۸۰
ایجاد و استقرار بازار محلی آب در محدوده‌های مطالعاتی	مدیریت روابط عمومی	۱۴۰۰-۱۳۸۰
پهنه‌بندی و بررسی مخاطرات ناشی از فرونشست زمین در محدوده مطالعاتی	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی	۱۳۹۹
اجرای پروژه‌های تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب در دشت‌های ممنوعه و مطالعه و اجرای پروژه‌های آبخیزداری	سازمان جهاد کشاورزی استان اصفهان	۱۴۰۰-۱۳۸۰
به‌روز نمودن سند ملی آب در محدوده‌های مطالعاتی	مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی	۱۳۹۸
ایجاد تشکلهای آب‌بران در محدوده‌های مطالعاتی و انجام حمایت‌های فنی و مالی از آنها	و منابع طبیعی استان اصفهان	۱۴۰۰-۱۳۸۰



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی اردستان

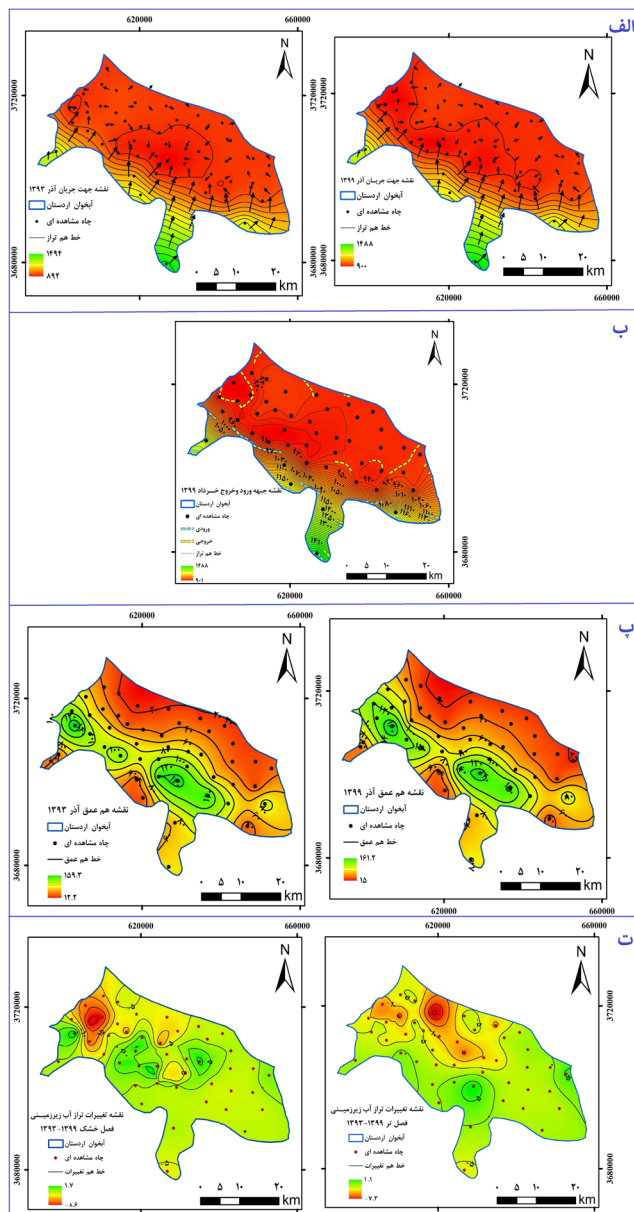
• گستره مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی اردستان با کد ۴۸۰۱ و وسعت ۴۳۷۶ کیلومتر مربع در شمال غرب حوضه آبریز کویر سیاه کوه واقع شده است. وسعت دشت در این محدوده ۲۱۹۲ کیلومتر مربع و وسعت ارتفاعات آن ۲۱۸۴ کیلومتر مربع است. شهرهای اردستان، زواره و مهاباد در این محدوده مطالعاتی واقع شده اند (شکل ۲). آبخوان آبرفتی اردستان با مساحت ۱۳۹۱ کیلومتر مربع بیشتر از سمت ارتفاعات جنوبی و مخروط‌های افکنه دامنه ارتفاعات تغذیه شده و در پایان به مرداب دق سرخ تخلیه می‌شود.

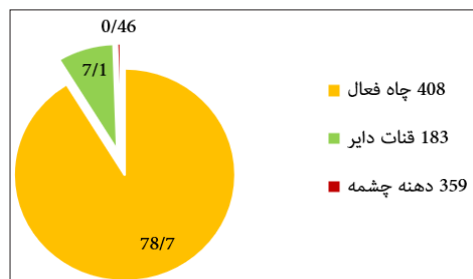
• هیدروژئولوژی آبخوان اردستان

نقشه‌های هم‌تراز آب زیرزمینی تفاوت قابل توجهی در آغاز و پایان دوره تعادل بخشی، هم در اندازه‌های آستانه و هم در نحوه توزیع خطوط تراز و پراکنش مناطق دارای کمترین و بیشترین تراز سطح ایستابی، نشان می‌دهند (شکل ۳-الف). به‌طور کلی، حداکثر تراز سطح ایستابی در سال ۱۳۹۹ کاهش یافته است و منحنی بسته حداقل تراز آب زیرزمینی، گستره‌ای بسیار وسیع‌تر، از غرب تا شرق آبخوان را در بر گرفته است؛ درحالی‌که مناطقی با حداقل تراز سطح ایستابی در سال ۱۳۹۳ تنها در مرکز آبخوان وجود داشته است. جهت عمومی جریان آب زیرزمینی از جنوب غرب به سمت شمال شرق (کفه دق سرخ) می‌باشد. درحالی‌که گسترش منحنی بسته حداقل تراز آب زیرزمینی باعث شده است، جهت‌های فرعی آب به سمت میدان‌های چاهی موجود در محدوده اردستان به سمت موغار ایجاد شود. به عبارت دیگر، به دلیل تمرکز بیشتر چاه‌های بهره‌برداری در این ناحیه، تخلیه آبخوان در این بخش نسبت به بخش‌های دیگر آبخوان بیشتر است و میدان چاهی گفته شده، باعث تغییر جهت جریان آب زیرزمینی به صورت موضعی به سمت غرب موغار شده است (شکل ۳-ب). براساس نقشه تراز آب زیرزمینی دشت اردستان منحنی‌های تراز روند عمومی جنوب شرق-شمال غرب دارند. منحنی‌های با تراز حداکثر و حداقل به ترتیب در حاشیه جنوبی و مرکزی آبخوان اردستان گسترش دارند. تراکم منحنی‌ها در جنوب دشت، وجود تغذیه جانبی از ارتفاعات جنوبی را نشان می‌دهد. مقطع خروجی آب زیرزمینی در بخش‌های شمالی و غربی آبخوان واقع شده است (شکل ۳-پ). پراکنش نقشه‌های هم‌عمق آب زیرزمینی تا حدودی منطبق بر تغییرات تراز آب زیرزمینی در این بازه زمانی می‌باشد. بیشترین عمق آب زیرزمینی منطبق با کمترین تراز سطح ایستابی بوده و در مرکز آبخوان واقع شده است. به‌طور کلی، عمق آب زیرزمینی در آبخوان اردستان از ۱۵ تا ۱۶۱ متر در نوسان است. نقشه‌های تغییرات تراز آب زیرزمینی آبخوان اردستان در دو مقطع قبل و بعد از اجرای طرح تعادل بخشی بیانگر بیشینه کاهش تراز ۸ متری در سطح آب زیرزمینی در دوره ۷ ساله تعادل بخشی می‌باشد. کاهش تراز آب زیرزمینی در نواحی غربی آبخوان بیانگر سهم بیشتر میدان چاهی غرب موغار (به علت تمرکز بیشتر چاه‌های بهره‌برداری در این ناحیه) در تخلیه آبخوان نسبت به بخش‌های دیگر آبخوان است (شکل ۳-ت).

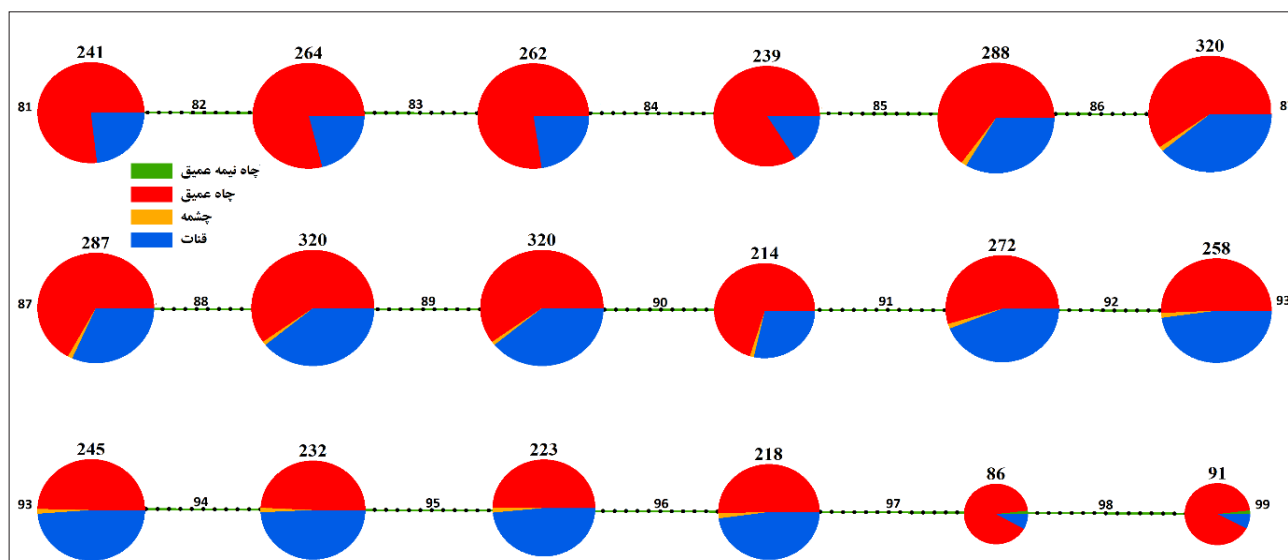
در آبخوان اردستان تعداد ۴۶ حلقه چاه مشاهده‌ای وجود دارد که ۱۵ چاه مشاهده‌ای از سال ۱۳۹۷ و یک چاه از سال ۱۳۹۲ وارد شبکه داده‌برداری شده‌اند. تخلیه سالانه از منابع آب زیرزمینی دشت اردستان در شکل (۴) ارائه شده است. بیش از ۵۰ درصد از تخلیه آبخوان اردستان توسط چاه‌های عمیق انجام می‌شود (شکل ۵). بیشتر از ۹۰ درصد تخلیه آبخوان به مصارف کشاورزی می‌رسد و سایر مصارف از قبیل شرب و به ویژه صنعت در مقابل مصرف بخش کشاورزی ناچیز است.



شکل ۳- نقشه‌های الف) تراز و جهت جریان، ب) جبهه‌های ورودی و خروجی، پ) هم‌عمق و ت) تغییرات تراز آب زیرزمینی آبخوان اردستان برای سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۹ (شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، ۱۳۹۹-الف)



شکل ۴- منابع آب زیرزمینی دشت اردستان بر حسب تخلیه سالانه میلیون متر مکعب (شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، ۱۳۹۹-الف)



شکل ۵- میزان تخلیه آبخوان اردستان (۱۳۸۱-۱۳۹۹)، اندازه دایره‌ها، تخلیه کل آبخوان در هر سال را نشان می‌دهد که بر حسب میلیون متر مکعب ارائه شده است (شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، ۱۳۹۹-الف)

دارد. تمرکز چاه‌های بهره‌برداری با تخلیه سالانه بیشتر از ۰/۲ میلیون متر مکعب در این محدوده، باعث شده یک منحنی بسته در نقشه هم‌تراز آب زیرزمینی با کمترین تراز سطح ایستابی شکل گیرد (شکل ۳-الف).

بیشترین مصرف چاه‌های مجاز در محدوده مطالعاتی اردستان، مربوط به بخش کشاورزی می‌باشد و در مقابل تخلیه کل چاه‌های مجاز، می‌توان از تخلیه چاه‌های غیرمجاز صرف نظر کرد؛ علاوه بر این، بیش از نیمی از چاه‌های غیرمجاز متروکه بوده و آبدهی ندارند (جدول ۲).

کم‌وبیش همه چشمه‌ها و قنات‌ها در ارتفاعات جنوبی محدوده مطالعاتی قرار دارند. بیش از ۵۶۰ چاه بهره‌برداری در گستره آبخوان آبرفتی اردستان وجود دارد که بیشتر از ۵۰ درصد تخلیه کل آبخوان را شامل می‌شود. بیشترین تمرکز چاه‌های بهره‌برداری در نوار مرکزی آبخوان اردستان به‌صورت شرقی-غربی است که برابر با تمرکز جمعیت و آبادی‌ها در این محدوده می‌باشد. بیشترین افت سطح ایستابی نیز در همین گستره ایجاد شده است که نشان از نقش مهم چاه‌ها و تخلیه مصنوعی در مقابل تخلیه‌های ناشی از چشمه‌ها و قنات‌ها

جدول ۲- تخلیه چاه‌های مجاز و غیرمجاز محدوده مطالعاتی اردستان بر حسب میلیون متر مکعب، به تفکیک نوع مصرف براساس آخرین آماربرداری کلی منابع آبی (۱۳۹۷)، تعدادی از چاه‌ها هم‌زمان به‌منظور مصارف گوناگون استفاده می‌شوند (شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، ۱۳۹۷)

نوع چاه	کشاورزی	شرب	صنعت	فضای سبز	سایر	متروکه	مجموع
مجاز	تعداد	۲۴۲	۴۶	۱۸	۳۰	۷۵	۴۳۸
تخلیه	۶۶/۸۳	۵/۵۹	۱	۱/۴۲	۲/۲۱	۰	۷۷/۰۲
غیرمجاز	تعداد	۱۶	۱۴	۰	۳	۱۴	۸۷
تخلیه	۱/۴۷	۰/۱۷	۰	۰/۰۱۵	۰/۰۲	۰	۱/۶۸

در سال ۱۳۹۸ نسبت به سال ۱۳۹۷، از ۱۱۰ میلیون متر مکعب به ۷۵ میلیون متر مکعب رسیده است (شکل ۵). علت این موضوع را می‌توان به کاهش توان طبیعی آبخوان در تخلیه آب زیرزمینی نسبت داد که با کاهش آبدهی قنات‌ها و چشمه‌ها تأیید می‌شود، در این صورت، تخلیه مصنوعی آبخوان توسط چاه، بیشترین نسبت تخلیه را به خود اختصاص می‌دهد که در آبخوان اردستان، از حدود ۵۰ درصد تا سال ۱۳۹۷ به بیش از ۹۰ درصد در سال‌های پس از آن رسیده است.

نتایج و بحث

مقادیر تخلیه از آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی اردستان از سال ۱۳۹۰ روند کاهشی پیدا کرده است. این تخلیه‌ها در سال ۱۳۹۸ به کمترین اندازه خود رسیده و کاهش نزدیک به ۵۰ درصدی داشته است. نکته قابل توجه، کاهش بیش از ۹۰ درصدی تخلیه قنات‌ها و چشمه‌ها در سال گذشته شده، است. درحالی‌که تخلیه چاه‌ها با روند بسیار ملایم‌تری کاهش پیدا کرده است، برای نمونه

علاوه بر این، در سال‌های پس از اجرای طرح تعادل بخشی، حداقل تراز سطح ایستابی ثبت شده در آبخوان، بالغ بر ۸ متر به نسبت سال‌های پیش از اجرای طرح، کاهش یافته است و منحنی بسته حداقل تراز آب از ناحیه مرکزی آبخوان به نوار مرکزی و به صورت شرقی-غربی گسترش یافته است (شکل ۳-ت). این موضوع نشان از تخلیه نامتوازن و مصنوعی آبخوان توسط شبکه چاه‌های بهره‌برداری (بیشتر عمیق) دارد که بیشتر در نوار مرکزی آبخوان در محدوده زواره، اردستان و موغار متمرکز شده‌اند. پذیرشی بر این گزاره، قنات‌ها و به‌ویژه چشمه‌های موجود در محدوده مطالعاتی می‌باشند که به‌عنوان مجاری طبیعی تخلیه آب‌های زیرزمینی شناخته شده و پس از سال ۱۳۹۴ کاهش آبدی نسبی را نشان می‌دهند (شکل ۵).

پروژه تغذیه مصنوعی ظفرقند اردستان از سال ۱۳۸۵ در حال بهره‌برداری است و از سال ۱۳۹۷ توانسته سالانه بیش از ظرفیت اسمی خود (یک میلیون متر مکعب) تغذیه انجام دهد. بیشترین تغذیه انجام شده در سال‌های بعد از تعادل بخشی در سال ۱۳۹۹ به مقدار حدود سه میلیون متر مکعب می‌باشد (جدول ۳). علاوه بر این، طرح تغذیه مصنوعی روستاهای نیسیان و کهنگ واقع در جنوب شهر اردستان از سال ۱۳۶۹ در حال اجرا است. این طرح که با شیوه نهرهای موازی در حال انجام است، ظرفیت تغذیه کمتر از یک میلیون متر مکعب در سال را دارد و به‌منظور تقویت آبدی قنات‌ها و چاه‌های روستاهای گفته شده انجام می‌شود.

جدول ۳- حجم تغذیه و اعتبار هزینه شده پروژه تغذیه مصنوعی ظفرقند اردستان در بازه زمانی اجرای طرح تعادل بخشی (۱۳۹۳-۱۴۰۰) (شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، ۱۳۹۹-ب)

سال	حجم آبدی اِبراز شده (میلیون متر مکعب)	میزان تغذیه انجام شده (میلیون متر مکعب)	اعتبار هزینه شده از آغاز (میلیون ریال)
۱۳۹۳	۰/۵۸	۰/۵۶۳	۲۰۰۰
۱۳۹۴	۰/۷۵	۰/۷۲۸	۲۰۰۰
۱۳۹۵	۰/۹۱	۰/۸۸۳	۲۰۰۰
۱۳۹۶	۰/۴۳	۰/۴۱۷	۲۰۰۰
بهار ۱۳۹۷	۰/۶۵	۰/۶۳۱	۲۰۰۰
زمستان ۱۳۹۷	۱/۲	۱/۱۴	۲۰۰۰
بهار ۱۳۹۸	۰/۵۷	۰/۵۵۳	۲۰۰۰
زمستان ۱۳۹۸	۱	۰/۹۷	۲۰۰۰
بهار ۱۳۹۹	۰/۸۳	۰/۸۰۵	۲۰۰۰
پاییز ۱۳۹۹	۱/۲۷	۱/۲۳۵	۳۰۵۰
زمستان ۱۳۹۹	۱/۱	۱/۰۶۷	۳۹۸۰
بهار ۱۴۰۰	۰/۱۲۸	۰/۱۲۴	۳۹۸۰

تصفیه‌خانه اردستان واقع در مرکز دشت اردستان با روش برکه تثبیت و ظرفیت پساب تولیدی ۴۰۰۰ متر مکعب در روز در حال فعالیت است (جدول ۴). تصفیه‌خانه اردستان به‌صورت اسمی توان صرفه‌جویی سالانه ۱/۵ میلیون متر مکعب آب را دارد؛ درحالی‌که براساس جدیدترین اطلاعات، در تابستان ۱۴۰۱، روزانه ۱۷۵۰ متر مکعب پساب، یعنی کمتر از نصف ظرفیت اسمی خود، خروجی دارد. علاوه بر این، تنها قرارداد رسمی استفاده از این پساب با مجتمع فولاد اردستان به میزان ۷۸۰ متر مکعب در روز بسته شده است که در مقابل برداشت سالانه از آبخوان درصد بسیار ناچیزی را شامل می‌شود.

جدول ۴- اطلاعات کلی تصفیه‌خانه اردستان

روش تصفیه	برکه تثبیت
جمعیت تحت پوشش طرح	۲۰۰۰۰ نفر
ظرفیت اسمی تصفیه‌خانه	۴۰۰۰ متر مکعب در روز
میزان پساب خروجی تیر ۱۴۰۱	۱۷۵۰ متر مکعب در روز
قرارداد مجتمع فولاد اردستان	۷۸۰ متر مکعب در روز

در مورد استفاده از پساب تصفیه شده در بخش‌های مختلف کشاورزی یا صنعت این نکته قابل توجه است که علاوه بر ظرفیت اسمی و واقعی بسیار پایین تصفیه‌خانه اردستان در مقابل کل حجم آب خروجی از آبخوان، مقایسه پارامترهای کیفی پساب تصفیه‌خانه اردستان و استانداردهای محیط‌زیست در بخش کشاورزی و تغذیه مصنوعی نشان می‌دهد که پارامترهای pH، BOD و COD در هر دو حالت حداکثر و حداقل میزان خود در طول یک سال از مقدار استاندارد تجاوز نمی‌کنند، درحالی‌که میزان کلیفرم مدفوعی بیش از ۵۰ برابر میزان استاندارد می‌باشد. در بخش صنعت نیز به جز pH، مقادیر پارامترهای مواد معلق و COD در طول یک سال تا سه برابر مقادیر استاندارد می‌رسد (مهندسین مشاور آبگستران میهن، ۱۳۹۶). علاوه بر بحث کیفیت آب خروجی، میزان پساب خروجی به‌منظور استفاده در بخش‌های کشاورزی، صنعت و تغذیه مصنوعی بسیار پایین است. هرچند وجود تصفیه‌خانه اردستان از نظر اقتصادی و کاهش تنش بر منابع آب زیرزمینی برتری دارد اما محدودیت‌های فنی موجود در سیستم تصفیه‌خانه باتوجه به استاندارد مصرف‌کنندگان در کیفیت پساب خروجی قابل توجه است. در نتیجه، باتوجه به ویژگی‌های کیفی پساب خروجی، قابلیت استفاده از آن در بخش شرب به هیچ عنوان وجود ندارد. باتوجه به اهمیت بسیار بالای پارامترهای کیفی به‌ویژه کلیفرم مدفوعی و میزان بسیار زیاد آن در پساب خروجی تصفیه‌خانه و همچنین دبی خروجی پایین، استفاده از این پساب در بخش کشاورزی و تغذیه مصنوعی با محدودیت جدی روبه‌رو است. این محدودیت در بخش صنعت قابل توجهیه

است و به نظر می‌رسد بخش صنعت تنها درخواست کننده مصرف پساب تصفیه‌خانه اردستان باشد. شهرک‌های صنعتی مهاباد، اردستان و زواره اردستان نزدیک‌ترین صنایع در محدوده تصفیه‌خانه اردستان می‌باشند که می‌توانند در تخصیص پساب این تصفیه‌خانه مورد توجه قرار گیرند. درحالی‌که تنها قرارداد رسمی به میزان ۷۸۰ متر مکعب در روز با مجتمع فولاد اردستان بسته شده است. استفاده نکردن از حداکثر توان تصفیه‌خانه و پاسخ ندادن به نیازهای صنعت و کشاورزی و محدودیت‌های فنی در تولید پساب با کیفیت از جمله مهم‌ترین دلایل کارایی نداشتن این تصفیه‌خانه در تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی می‌باشد که امکان جایگزینی با چاه‌های کشاورزی و یا تغذیه

مصنوعی آبخوان را از میان می‌برد. تعداد چاه‌های پر شده و حجم صرفه‌جویی شده در سال‌های پس از تعادل بخشی (۱۳۹۴-۱۴۰۰) نسبت به سال‌های پیش از آن رشد چشمگیری پیدا کرده است (جدول ۵). نکته قابل توجه این است که مجموع تخلیه همه چاه‌های غیرمجاز نسبت به چاه‌های مجاز قابل صرف نظر کردن است و با فرض انسداد همه آن‌ها، تأثیر چندانی بر کمیت آب زیرزمینی نخواهد گذاشت. سالانه به‌طور متوسط نزدیک به ۰/۳۵ میلیون متر مکعب در تخلیه آب زیرزمینی در سال‌های اجرای طرح تعادل بخشی صرفه‌جویی شده است، درحالی‌که در این بازه زمانی، سالانه در حدود ۲۰۰ میلیون متر مکعب آب از آبخوان اردستان تخلیه شده است.

جدول ۵- تعداد چاه‌های غیرمجاز پر شده و حجم صرفه‌جویی ناشی از آن در محدوده مطالعاتی اردستان (شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، ۱۳۹۹-الف)

سال	تعداد چاه‌های پر شده			حجم صرفه‌جویی شده (هزارمترمکعب)	توضیحات
	کل	کشاورزی	شرب	صنعت	
۱۳۸۶	۱	۰	۰	۱	مجموع سال‌های قبل از تعادل بخشی
۱۳۸۷	۲	۰	۲	۰	
۱۳۸۸	۰	۰	۰	۰	
۱۳۸۹	۳	۱	۲	۰	تعداد چاه‌های پر شده: ۱۱
۱۳۹۰	۱	۱	۰	۰	حجم صرفه‌جویی شده: ۲۱/۵
۱۳۹۱	۱	۰	۱	۰	هزار متر مکعب
۱۳۹۲	۱	۱	۰	۰	
۱۳۹۳	۲	۰	۲	۰	
۱۳۹۴	۳	۰	۳	۰	مجموع سال‌های بعد از تعادل بخشی
۱۳۹۵	۶	۲	۰	۴	
۱۳۹۶	۱۲	۴	۵	۳	
۱۳۹۷	۵	۳	۲	۰	تعداد چاه‌های پر شده: ۴۰
۱۳۹۸	۶	۱	۵	۰	حجم صرفه‌جویی شده: ۲۴۸۲
۱۳۹۹	۶	۶	۰	۰	هزار متر مکعب
۱۴۰۰	۲	۰	۲	۰	

تعداد کنتورهای هوشمند کارگذاشته شده از سال ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰ در مجموع به ۶۷ شماره می‌رسد. با فرض ثابت بودن شمار چاه‌های بهره‌برداری و با استناد به تعداد ۵۲۵ حلقه چاه براساس آخرین آماربرداری سال ۱۳۹۷، تنها ۱۳ درصد چاه‌های موجود به کنتور هوشمند مجهز شده‌اند (جدول ۶).

نتایج اطلاعات به‌دست آمده از اجرای طرح تعادل بخشی برآمده از اصلاح و تعدیل پروانه چاه‌های کشاورزی در محدوده مطالعاتی اردستان نشان می‌دهد در بازه سال‌های پس از تعادل بخشی،

سالانه به‌طور متوسط در حدود کمتر از دو میلیون متر مکعب صرفه‌جویی در میزان تخلیه آبخوان رخ داده است (جدول ۷).

جدول ۶- تعداد کنتورهای هوشمند کارگذاشته شده از سال ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰ در محدوده مطالعاتی اردستان (شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، ۱۳۹۹-ب)

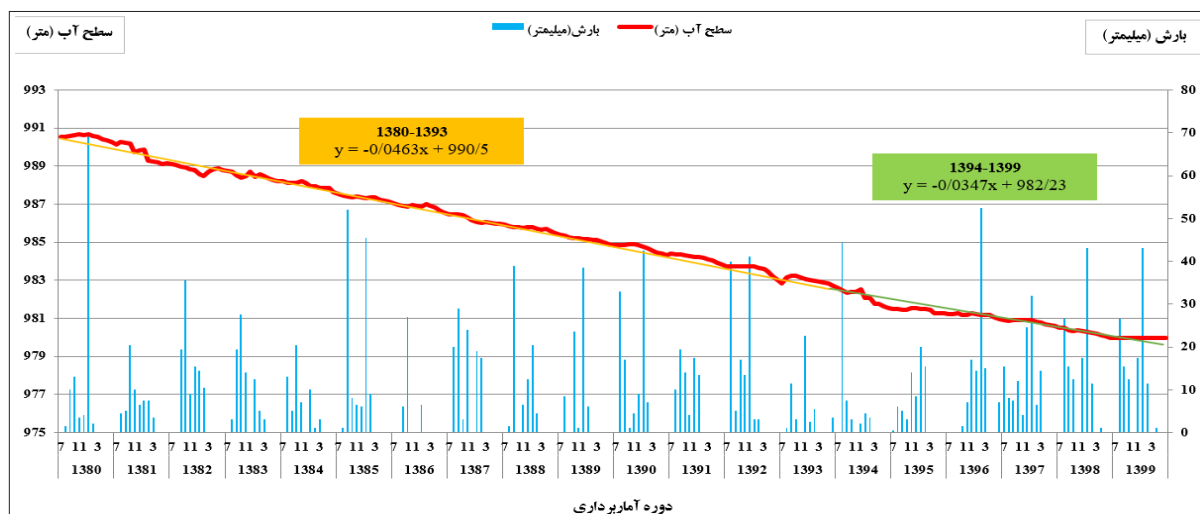
سال	۱۳۹۶	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹	۱۴۰۰	مجموع
شمار	۲	۲۳	۱۷	۱۸	۷	۶۷

جدول ۷- اصلاح و تعدیل پروانه چاه‌های کشاورزی در محدوده اردستان (شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، ۱۳۹۹-ب)

سال	تعداد	تخلیه سالانه (میلیون متر مکعب)	حجم صرفه‌جویی شده (میلیون متر مکعب)
۱۳۹۵	۱۶	۳/۷۳	۰/۹۳
۱۳۹۶	۳۰	۷/۶۵	۱/۶۶
۱۳۹۷	۶۱	۱۶/۱۶	۳/۵
۱۳۹۸	۵۵	۱۴/۴۴	۳/۱۳
۱۳۹۹	۱۶	۳/۶	۰/۷۹
۱۴۰۰	۱۸	۲/۲۹	۰/۴۹
مجموع	۱۹۳	۴۷/۹۲	۱۰/۳۷

براساس هیدروگراف معرف آبخوان اردستان، تراز سطح ایستابی در طول بازه مطالعاتی ۲۰ ساله، حدود ۱۰ متر افت نشان

می‌دهد (شکل ۶). شیب منحنی هیدروگراف از سال ۱۳۹۴ تاکنون، کم‌وبیش نسبت به سال‌های پیش از شروع تعادل‌بخشی کاهش یافته است. به‌منظور تعیین اثر کارهای تعادل‌بخشی بر این قسمت از منحنی هیدروگراف، باید مجموع حجم‌های صرفه‌جویی شده برآمده از تعادل‌بخشی را در نظر گرفت. در مجموع، در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۰، کمتر از ۱۱ میلیون متر مکعب صرفه‌جویی در تخلیه آبخوان ایجاد شده است، در همین بازه زمانی، در مجموع حدود ۱۴۵۰ میلیون متر مکعب تخلیه از آبخوان انجام شده است که می‌توان از حجم صرفه‌جویی شده در مقابل این مقدار صرف‌نظر کرد. علاوه‌بر این، کاهش تخلیه سالانه از آبخوان طی سال‌های تعادل‌بخشی، با اندازه‌های صرفه‌جویی شده از تعادل‌بخشی همخوانی ندارد. نکته مهم، کاهش چشمگیر تخلیه از چشمه‌ها و قنات‌ها به‌ویژه در سال‌های ۹۸ و ۹۹ است (شکل ۵).



شکل ۶- هیدروگراف معرف آبخوان اردستان در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰

کاهش آبدهی این منابع آبی، به‌ویژه چشمه‌ها به‌عنوان یک مسیر طبیعی خروج آب از آبخوان، کاهش توان طبیعی آبخوان و کاهش ذخیره دینامیک آن را نشان می‌دهد. به‌این‌ترتیب، دلایل کاهش تخلیه و یا به‌عبارت‌دیگر، کاهش مصرف آب زیرزمینی را می‌توان با اولویت بالایی به کاهش توان طبیعی آبخوان نسبت داد. علاوه‌براین، بارش سالانه در سال‌های ۱۳۹۶ به بعد افزایش یافته است که به تغذیه بیشتر آبخوان انجامید (شکل ۶). کارهای دیگر برنامه تعادل‌بخشی که تأثیر مستقیم بر کاهش تخلیه آبخوان می‌گذارد، (مانند ایجاد بازار محلی آب و جایگزینی پساب‌های صنعتی برای آبیاری کشاورزی) نیز در محدوده مطالعاتی اردستان انجام نشده است. به‌این‌ترتیب، تنها عوامل طبیعی و کاهش تجمعی ذخیره آبخوان را می‌توان عامل کاهش در مقادیر تخلیه از آبخوان و کاهش شیب منحنی هیدروگراف معرف آبخوان دانست.

همانطور که پیشتر بررسی شد، مجموع حجم صرفه‌جویی شده برآمده از انسداد چاه‌های غیرمجاز در طول سال‌های پس از تعادل‌بخشی، در مقابل حجم تخلیه سالانه محدوده اردستان تقریباً ناچیز است (جدول ۵). همچنین، کنترهای هوشمند کارگذاشته شده تاکنون شمار بسیار ناچیزی از کل چاه‌های موجود در محدوده را پوشش می‌دهد (جدول ۶). به‌این‌ترتیب، تنها می‌توان اصلاح و تعدیل پروانه‌های چاه‌های کشاورزی را به‌عنوان عامل ظاهری کاهش شدت افت تراز سطح ایستابی در دشت نسبت داد (جدول ۷). کم‌وبیش همه مطالعات پیشین نشان داده‌اند بیشترین تأثیر روی تراز سطح ایستابی برآمده از برداشت از چاه‌های بهره‌برداری می‌باشد، علاوه‌براین، با یک تقریب اندک، همه این برداشت را می‌توان به چاه‌های مجاز کشاورزی نسبت داد که پروانه بهره‌برداری دارند و اضافه‌برداشت از حد پروانه

نیز در آن‌ها دیده می‌شود. در نتیجه، به‌منظور تعادل بخشی آبخوان‌ها، کنترل این چاه‌ها باید با اولویت بالایی مورد توجه قرار گیرد. در این راستا، دو بحث ساعت کارکرد و آبدهی چاه مطرح می‌شود که در محاسبه حجم تخلیه از آبخوان موثر است. به دلیل نبود امکانات لازم برای اندازه‌گیری دبی و نبود تجربه و دانش کافی در داده‌برداران، صحت و دقت آمار موجود برای دبی و میزان تخلیه، خطای بالایی دارد. همچنین ساعت کارکرد عامل مهمی است که براساس خود اظهاری مالک و یا مجاورین در فرم داده‌برداری ثبت می‌شود. باتوجه‌به اینکه مالکین چاه‌ها به اهمیت ساعت کارکرد آگاه نیستند، در صورتی که داده‌بردار نیز واکاوی لازم را انجام ندهد، ساعت واقعی کارکرد به‌دست نخواهد آمد.

۲۷ درصد از کل چاه‌ها در محدوده مطالعاتی اردستان کنتور ندارند (جدول ۸). شمار کنتورهای هوشمند کارگذاشته در سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰ نیز درصد بسیار پایینی را از کل چاه‌های بدون کنتور در بر می‌گیرد. این نکته باید مورد توجه قرار گیرد که در هنگام محاسبه حجم صرفه‌جویی شده از تعدیل و اصلاح پروانه‌ها، ساعت کارکرد و دبی تخلیه مندرج در پروانه چاه، پیش و پس از اصلاح و تعدیل به‌عنوان مبنای محاسبات در نظر گرفته می‌شوند، که با وجود تجهیز نبودن همه چاه‌ها به کنتور هوشمند، هیچ تضمینی برای صحت اعداد و ارقام گفته شده وجود ندارد. علاوه‌بر این، ملزم نمودن مصرف‌کنندگان به رعایت دبی و ساعت کارکرد در طول سال نیز هیچگونه ضمانت اجرایی ندارد. تقریباً در سه دوره اخیر آماربرداری کلی (۱۳۸۵، ۱۳۹۰، ۱۳۹۷)، به تدریج دبی‌های میانگین کاهش یافته‌اند (جدول ۸)؛ درحالی‌که مصرف‌کنندگان، به‌ویژه کشاورزان، معمولاً از حداکثر توان چاه برای استخراج آب استفاده می‌کنند و کاهش دبی در آماربرداری‌های سال‌های اخیر (۱۳۹۰ و ۱۳۹۷) را بیشتر می‌توان به کاهش توان طبیعی آبخوان نسبت داد، کاهش تخلیه قنات‌ها و چشمه‌ها تقریباً با نسبت مشابه و هم‌زمان با کاهش تخلیه چاه‌ها این گزاره را تایید می‌کند. منابع گفته شده، به‌ویژه چشمه‌ها، به‌عنوان مجاری طبیعی و بدون اعمال نیرو برای خروج آب از آبخوان در نظر گرفته می‌شوند که کارهای تعادل بخشی

آبخوان‌ها در مورد آن‌ها درست نیست و تنها ذخیره دینامیک آبخوان است که خروجی آن‌ها را کنترل می‌کند. دبی میانگین همه چاه‌ها، قنات‌ها و چشمه‌هایی که به‌عنوان منابع انتخابی پایش کمی انتخاب شده‌اند در طول بازه مطالعاتی ۲۰ ساله این پژوهش روند رو به افتری را نشان می‌دهد. در نتیجه، آمار و ارقام و محاسبات انجام شده به‌منظور تعیین میزان آب صرفه‌جویی شده در اثر تعدیل پروانه‌های کشاورزی، شاید به‌صورت تئوری درست باشد، اما شواهد موجود، صحت آن‌ها را اثبات نمی‌کنند. نکته مهمتر این است که ساعت کارکرد نوشته شده در پروانه‌های مصرفی هیچگونه مبنای علمی و دقیقی ندارد، چراکه برای همه محدوده‌ها و الگوهای کشت متفاوت، یکسان است. این عدد کم‌وبیش در بیشتر پروانه‌ها، ۳۰۰۰ و در شماری ۶۰۰۰ ساعت گفته شده است. در مناطق خشک مانند استان اصفهان، ۳۰۰۰ ساعت برای مصرف یک نوبت کشت در سال، بیش از نیاز و برای بیش از یک نوبت کشت در سال کافی نیست، علاوه‌بر اینکه نوع کشت نیز در ساعت کارکرد و دبی تأثیر بسیاری دارد.

تعداد کل چاه‌ها و پروانه‌های بهره‌برداری در محدوده مطالعاتی اردستان در دهه گذشته افزایش داشته است (جدول ۸)؛ در حالی‌که محدوده اردستان وضعیت ممنوعه دارد و نباید مجوز جدیدی برای حفر و بهره‌برداری در آن‌ها صادر شود. با وجود رشد تعداد چاه‌ها از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۷، تخلیه کلی آبخوان کاهش یافته است، این موضوع را می‌توان با تعداد چاه‌های متروکه مرتبط دانست (جدول ۸). تعداد چاه‌های متروکه نیز در دهه گذشته افزایش قابل توجهی پیدا کرده است که نشان از کاهش توان آبخوان دارد، چراکه بیشتر، چاه‌هایی متروکه می‌شوند که عمق کم داشته و یا امکان کف‌شکنی به هر دلیلی در آن‌ها وجود نداشته است. در محدوده مطالعاتی اردستان، سهم تخلیه چاه‌های عمیق که برداشت از آن‌ها با نیروی برق یا دیزل و به لطف کف‌شکنی در سال‌های گذشته انجام می‌شود، نسبت به سایر موارد تخلیه آبخوان مانند چاه‌های نیمه‌عمیق و کم‌عمق و یا چشمه‌ها و قنات‌ها در تخلیه کل آبخوان افزایش داشته است و در سال‌های اخیر، کم‌وبیش بیش از ۹۰ درصد تخلیه آبخوان را به خود اختصاص می‌دهد.

جدول ۸- اطلاعات کلی چاه‌های محدوده مطالعاتی اردستان در سه دوره آماربرداری سال‌های ۱۳۸۵، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۷

سال آمار	کل چاه	کل تخلیه سالانه (میلیون مترمکعب)	دارای پروانه حفر	متروکه	دارای پروانه بهره‌برداری	دارای پروانه کف‌شکنی	میانگین دبی (لیتر بر ثانیه)	دارای کنتور سالم	دارای کنتور خراب	بدون کنتور
۱۳۸۵	۵۰۵	۱۸۸/۷	-	-	-	-	۲۳/۲	-	-	-
۱۳۹۰	۶۳۲	۱۴۱/۵	۳۲۵	۱۹	۲۸۵	۹۸	۱۳/۵	۱۱۲	۱۴	۵۰۶
۱۳۹۷	۵۲۵	۷۸/۷	-	۱۱۷	۴۳۸	-	۱۶	۳۳۱	۷	۱۲۷

علاوه بر اقداماتی که تا این مرحله بررسی شد، پیرامون سند ملی آب در محدوده اردستان نیز نکات دارای اهمیتی وجود دارد. بیشتر پهنه کشاورزی محدوده مطالعاتی اردستان در مناطق زواره، اردستان و مهاباد قرار دارد. گندم، جو و انار به ترتیب بیشترین سطح زیر کشت محدوده اردستان را شامل می‌شوند. گیاهان زراعی غالب شامل جو، گندم، یونجه، شلغم، چغندر، ارزن، ذرت، پیاز، کلزا، کنجد، باقلا، زیره، پنبه، هندوانه، خربزه و خیار و گیاهان باغی غالب شامل انار، زردآلو، گیلان، آلبالو، زیتون، گلابی، انگور، خرما، پسته، انجیر، گردو و بادام می‌باشند. منبع اصلی آب کشاورزی در مناطق کوهستانی، قنات و در دشت، چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق است. همه محصولات کشاورزی کشت شده در محدوده اردستان با توجه به وضعیت آب و هوایی محدوده مانند تبخیر و تعرق بالا، بیشترین نیاز آبی خالص در سطح استان را دارد. پیرامون به‌روزرسانی سند ملی آب در استان اصفهان، جدیدترین اطلس نیاز آبی خالص محصولات زراعی و باغی استان اصفهان در سال ۱۳۹۸ تهیه شده است. نتایج جدید بیانگر افزایش نیاز آبی محصولات کشاورزی کشت شده در محدوده اردستان به نسبت سند ملی پیشین است. برای نمونه، نیاز آبی محصولات غالب محدوده اردستان شامل گندم، یونجه و انار، به ترتیب ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ میلی‌متر در سال افزایش را نشان می‌دهند (مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان

اصفهان، ۱۳۹۸). با این وجود، کمبودها و کاستی‌هایی نیز در این مطالعه وجود دارد که در جدول (۹) به آن‌ها اشاره شده است. در بخش اطلاع‌رسانی طرح احیا و تعادل بخشی علاوه بر بخش داناب که شمار بسیاری از دانش‌آموزان و معلمان استان اصفهان را تحت پوشش قرار می‌دهد، برنامه اطلاع‌رسانی و آگاهی‌رسانی برای دیگر گروه‌های مردم جامعه هر سال انجام می‌شود. این نشست‌ها با سازمان‌هایی مانند قوه قضاییه، نیروی انتظامی، روحانیون، شهرداری مرکز استان، نمایندگان مجلس، صنعت آب و برق (آبفا و برق)، استانداری، جهاد کشاورزی، اداره کل محیط‌زیست و نمایندگان بهره‌برداران منابع آب و تشکلهای مرتبط انجام می‌شود. علاوه بر این جلسات اطلاع‌رسانی در طرح احیا و تعادل بخشی تولیدات و محتواهای رسانه‌ای قابل توجهی مانند موشن، تیزر، پوستر و غیره نیز تولید و منتشر می‌شود و سالانه گزارش‌ها و برنامه‌های مصاحبه از مدیرعامل، مدیران و کارشناسان در صدا و سیما تهیه و منتشر می‌شود. سوال مهم در این باره این است که کارهای گفته شده تا چه اندازه توانسته سواد آبی مسئولان و دیگر گروه‌های مردم را تقویت کند و چه معیارهایی برای سنجش این مهم در نظر گرفته شده است؟ ارزیابی پروژه‌ها و کارهای طرح احیا و تعادل بخشی در محدوده مطالعاتی اردستان در جدول (۹) جمع‌بندی شده است.

جدول ۹- ارزیابی اجرای پروژه‌های طرح احیا و تعادل بخشی در محدوده مطالعاتی اردستان

طرح	انجام شده (+) انجام نشده (-)	توضیحات
حفر و تکمیل شبکه چاه‌های مشاهده‌ای سطح آب زیرزمینی (شبکه پی‌زومتری) و چاه‌های اکتشافی	+	بیشترین کمبود در بحث تعادل بخشی آبخوان به تولید و تدقیق داده‌ها مربوط است؛
تهیه بیان و به‌روزرسانی بانک اطلاعاتی محدوده‌های مطالعاتی	+	بیان آب زیرزمینی به‌طور منظم در دشت اردستان تهیه می‌شود؛ آماربرداری سراسری به‌صورت سالانه در دشت انجام نمی‌شود؛ درستی و دقت داده‌هایی که در بیان استفاده می‌شود گنگ است؛ خلاصه وضعیت محدوده (داده‌برداری) به‌صورت تخمینی و براساس تعمیم چاه‌های کمی منتخب محدوده تهیه می‌شود که نمی‌تواند بازتاب واقعی اطلاعات کامل آبخوان باشد.
پهنه‌بندی و بررسی مخاطرات ناشی از فرونشست زمین در محدوده مطالعاتی	+	تنها در یک مطالعه توسط سازمان زمین‌شناسی استان اصفهان، بیشینه فرونشست برابر با ۷۹ میلی‌متر برآورد شده است؛ شروع فرونشست نشان از بیان منفی منابع آب زیرزمینی دارد؛ رصد سالانه فرونشست (با استفاده از تکنیک‌های راداری و مدل‌سازی) به‌صورت پیوسته انجام نمی‌شود.
اجرای پروژه‌های تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب در دشت‌های ممنوعه و مطالعه و اجرای پروژه‌های آبخیزداری	+	توجهی به روش‌های دیگر تغذیه مصنوعی در کنار استفاده از جریان‌های سیلابی رودخانه‌ها و مسیل‌های موجود نشده است؛ کندی پیشرفت کار در احداث و اجرای پروژه‌های پخش سیلاب مشهود است؛ حجم آب تغذیه شده در مقابل حجم کل آب مصرفی در آبخوان ناچیز است؛ مطالعات جدیدی درباره امکان‌سنجی و اجرای پروژه‌های تغذیه مصنوعی و آبخیزداری در بازه طرح تعادل بخشی انجام نشده است؛ اثرگذاری پروژه‌های تغذیه مصنوعی نیازمند صرف هزینه‌های زیاد است.

توضیحات	انجام شده (+) انجام نشده (-)	طرح
کارهای انجام شده از نظر شمار و حجم آب صرفه جویی شده در طول سالهای پس از تعادل بخشی، قابل توجه نیست (آسیب شناسی این کارها به صورت ویژه در متن مقاله بررسی شده است).	+	خرید و انسداد چاه های کم بازده کشاورزی
	+	کار گذاشتن کنتورهای حجمی و هوشمند آب و برق کنترل برداشت از چاه ها
	+	کنترل، نظارت و مسلوب المنفعه کردن چاه های فاقد پروانه و مضر به مصالح عمومی
محاسبات براساس اطلاعاتی که یک بار وارد شده و قابلیت به روز رسانی ندارند انجام می شود و اگر هم به هنگام سازی این اطلاعات ممکن باشد، تنها اطلاعات ایستگاه ها قابل تغییر است.	+	به روز نمودن سند ملی آب در محدوده های مطالعاتی
بسیاری از روش های برآورد تبخیر-تعرق در شرایط اقلیمی و داده های مختلف در دسترس، نتایج دقیقی تولید نمی کند و لازم است در شرایط مختلف معادلات متفاوتی به کار گرفته شود.		
کم و بیش تاریخ های کشت یک یا چند محصول برای دشت های مختلف ثابت فرض می شود. با توجه به تغییر شرایط آب و هوایی از سالی به سال دیگر و حتی تفاوت دما از مکانی به مکان دیگر، زمان کشت در سطح هر منطقه متفاوت است.		
الگوی کشت در هر منطقه براساس سیاست های ملی و منطقه ای، منابع آب و خاک و ضوابط بهره برداری مطلوب و دیگر عوامل مؤثر از ضروریات است که متأسفانه به طور کامل و جدید در سندهای پیشین به آن پرداخته نشده است.		
امکان استفاده از سیستم تعیین نیاز آبی به طور مستقیم توسط افراد (کشاورز) وجود ندارد، به عبارت دیگر، افزایش بهره وری کشاورزی نیازمند ایجاد یک مزرعه هوشمند است که پتانسیل این قابلیت را داشته باشد.		
معیار و شاخصی به منظور ارزیابی کارهای انجام شده در برنامه اطلاع رسانی و منتشر نشدن خروجی نشست های برگزار شده وجود ندارد؛ این نکته که اطلاع رسانی در رابطه با هنجارهای اجتماعی و محیط زیستی برآمده از کمبود آب بسیار کارآتر از ارائه اطلاعات در مورد چگونگی صرفه جویی آب است در برنامه های اطلاع رسانی کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛ نیاز به برگزاری دوره های آموزشی تخصصی ویژه کارکنان دفاترهای حفاظت در شرکت آب منطقه ای، کارکنان گروه های گشت و بازرسی، کارشناس های ناظر بخش خصوصی و سایر مدیران و مسئولان بخش آب و بخش های مرتبط دیگر روشن است.	+	اطلاع رسانی و آگاه سازی افکار عمومی
از نظر کمیت و به ویژه کیفیت آب خروجی تصفیه خانه اردستان، این امکان وجود ندارد.	-	جایگزینی پساب تصفیه خانه های فاضلاب با چاه های کشاورزی در دشت های ممنوعه و بحرانی
براساس جدول زمانی طرح تعادل بخشی، این کار باید تا پایان سال ۱۴۰۰ به نتیجه می رسید.	-	نصب تجهیزات اندازه گیری الکترونیکی (On-line) بر روی ایستگاه ها، چاه های پیژومتری و منابع آب انتخابی
در مجموع تعداد ۱۳۰ شرکت حفار مجهز به GPS در کل استان اصفهان وجود دارد که پیش از آغاز طرح تعادل بخشی تجهیز شده بودند و در مدت انجام طرح کار جدیدی درباره ساماندهی آن ها انجام نشده است.	-	ساماندهی شرکت های حفار و نصب GPS بر روی دستگاه های حفاری موجود در استان
سرمایه گذاری در بحث راهکارهای اجتماعی و مشارکتی، مهمترین کار در مدیریت و تعادل بخشی آبخوان ها است که کاری در این مورد در دشت اردستان انجام نشده است.	-	ایجاد و استقرار بازار محلی آب در محدوده های مطالعاتی
		ایجاد تشکلهای آب بران در محدوده های مطالعاتی و انجام حمایت های فنی و مالی از آنها

بررسی هیدروگراف ۲۰ ساله آبخوان اردستان نشان می‌دهد که باوجود افت سه متری منحنی هیدروگراف معرف در سال‌های پس از تعادل‌بخشی، شیب منحنی به‌صورت نسبی بهبود پیدا کرده است. تخلیه آب زیرزمینی از چهار سال پیش از شروع کارهای تعادل‌بخشی (۱۳۹۰) به تدریج کاهش یافته و در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ به کمتر از نصف تخلیه میانگین آبخوان، یعنی در حدود ۱۰۰ میلیون متر مکعب می‌رسد. مجموع حجم صرفه‌جویی به‌دست آمده برآمده از طرح‌های تعادل‌بخشی که به‌صورت مستقیم بر کمیت آبخوان اثر می‌گذارند، شامل اجرای پروژه‌های تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب، کارگذاشتن کنتورهای هوشمند، انسداد چاه‌های غیرمجاز و کم‌بازده و جایگزینی پساب تصفیه خانه‌های فاضلاب، از ۱۱ میلیون متر مکعب در طول سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۰ بیشتر نمی‌شود؛ درحالی‌که در این مدت، سالانه بیش از ۱۰۰ میلیون متر مکعب تخلیه از آبخوان صورت می‌گیرد و کارهای دیگر طرح تعادل‌بخشی که تأثیر مستقیم بر کاهش تخلیه آبخوان می‌گذارد، شامل ایجاد بازار محلی آب و جایگزینی پساب‌های صنعتی برای آبیاری کشاورزی نیز در محدوده مطالعاتی اردستان انجام نشده است. علاوه‌براین، از نظر زمانی و کمی، تأثیر مثبتی در منحنی هیدروگراف آبخوان اردستان در مدت اجرای طرح تعادل‌بخشی مشاهده نشده و نوسانات آن تنها ارتباط مستقیمی با رخداد‌های بارش نشان می‌دهد. در بازه زمانی مد نظر این پژوهش، آبدی قنات‌ها و چشمه‌های محدوده مطالعاتی که بیانگر تخلیه طبیعی آبخوان می‌باشند، به شدت کاهش یافته است، نمونه‌ای از موارد موجود، کاهش بیش از ۹۰ درصدی آبدی چشمه‌ها و قنات‌ها در دو سال انتهایی بازه مطالعاتی هیدروگراف است. بر این اساس، کاهش توان طبیعی آبخوان و ذخیره دینامیک ارتفاعات تغذیه کننده منابع آبی از جمله قنات‌ها و چشمه‌ها، نیاز به کف‌شکنی بیشتر چاه‌ها در محدوده آبخوان و افزایش بیشینه ۸ متری افت سطح ایستابی در سال‌های پس از انجام کارهای تعادل‌بخشی، این موضوع را تأیید می‌کند که کارهای برنامه تعادل‌بخشی و نظارت بر انجام درست و فنی آن‌ها نیاز به توجه بیش از پیش در محدوده مطالعاتی اردستان دارد.

سپاسگزاری

این پژوهش با سفارش و حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان (دفتر مطالعات پایه منابع آب) در راستای حل چالش‌های کشور در زمینه تعادل‌بخشی آب‌های زیرزمینی انجام شد. به این وسیله از حمایت آن شرکت قدردانی می‌شود.

بیات، م.ج.، جوادی، س.، هاشمی شاهدانی، م.، حسنی، ی. و بنی‌حیب، م.ا. ۱۳۹۹. تعادل‌بخشی آبخوان با روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی و برنامه‌ریزی مثبت ریاضی در دشت قزوین. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۴(۱۴): ۱۳۳۶-۱۳۴۷.

حسینی جلفان، م.، هاشمی شاهدانی، م. و جوادی، س. ۱۳۹۹. ارزیابی میزان تأثیرگذاری سامانه کنترل خودکار توزیع آب سطحی کشاورزی به‌منظور کاهش برداشت و تعادل‌بخشی آبخوان در شرایط کم‌آبی (مطالعه موردی: کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین)، نشریه آب و آبیاری، ۱۰(۲): ۲۸۱-۲۹۹.

خدادادی، م. ۱۴۰۰. ارزیابی طرح احیا و تعادل‌بخشی آب‌های زیرزمینی دشت شهریار با تأکید بر کنتورهای هوشمند. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

رضایی، س.، جوادی، س. و کاردان‌مقدم، ح. ۱۳۹۹. ارزیابی راهکارهای مدیریت منابع آب زیرزمینی با استفاده از رویکرد اجزای محدود در شبیه‌سازی عددی. هیدروژئولوژی، ۵(۲): ۳۲-۴۲.

زنگنه، م.، سرائی تیریزی، م.، خسروجردی، ا. و صارمی، ع. ۱۴۰۰. اثربخشی راهکارهای تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی برای کنترل فرونشست (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی ورامین). مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۲(۷): ۱۷۳۶-۱۷۵۱.

شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان. ۱۳۹۷. اطلاعات آماربرداری سراسری سال ۱۳۹۷، معاونت حفاظت و بهره‌برداری شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان. اصفهان.

شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان. ۱۳۹۹-الف. آمار خلاصه وضعیت محدوده‌های مطالعاتی استان اصفهان، معاونت حفاظت و بهره‌برداری شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان. اصفهان.

شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان. ۱۳۹۹-ب. گزارش اندازه‌گیری منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی اردستان (۴۸۰۱). معاونت حفاظت و بهره‌برداری شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان. اصفهان.

عدالت، ع.، خداپرست، م. و محمدرجبی، ع. ۱۴۰۰. بررسی اثرات تغییر تراز آب زیرزمینی آبخوان بر پدیده فرونشست و راهکارهای تعادل‌بخشی آبخوان (مطالعه موردی: دشت علی آباد قم). نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۳(۵): ۱-۲۲.

عمیدپور، ز. و غلامی سفیدکوهی، م.ع. ۱۳۹۹. تأثیر سیستم آبیاری نوین بر تعادل‌بخشی به منابع آب زیرزمینی. پنجمین همایش ملی دانش و فناوری علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط‌زیست. موسسه سام ایرانیان، تهران.

- Perspective on Groundwater Management in Four Water-Stressed Mediterranean Areas: Priorities and Challenges. *Land*, 11: 738.
- Dangar S., Asoka A. and Mishra V. 2021. Causes and implications of groundwater depletion in India: A review. *Hydrology*, (596): 126103.
- Hasan M.R., Mostaf M.G., Rahman N., Saiful Islam S. and Islam M. 2018. Groundwater Depletion and its Sustainable Management in Barind Tract of Bangladesh. *Environmental Sciences*, 12: 247-255.
- Lall U., Josset L. and Russ T. 2020. A Snapshot of the World's Groundwater Challenges. *Annual Review of Environment and Resources*, (45)1: 171-194.
- Senthilkumar M. and Gnanasundar D. 2022. Aquifer characterization and hydrogeological modeling for devising groundwater management strategies for the Chennai aquifer system, southern India. *Environment Earth Science*, 81: 187.
- Turner S.W.D., Hejazi M., Yonkofski C., Kim S.H. and Kyle P. 2018. Influence of groundwater extraction costs and resource depletion limits on simulated global nonrenewable water withdrawals over the twenty-first century. *Earth's Future*, 7: 123-135.
- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان. ۱۳۹۸. اطلس نیاز آبی خالص محصولات زراعی و باغی استان اصفهان. سازمان جهاد کشاورزی استان اصفهان.
- معاونت آب و آبفا وزارت نیرو. ۱۳۹۴. مجموعه دستورالعمل‌های طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی، دفتر نظام‌های بهره‌برداری و حفاظت آب و آبفا وزارت نیرو.
- معاونت حفاظت و بهره‌برداری شرکت مدیریت منابع آب ایران. ۱۳۹۵. دشت‌های ممنوعه کشور، شرکت مدیریت منابع آب ایران.
- میرحاجی، ن. ۱۳۹۹. ارزیابی اثربخشی اقدامات طرح احیا و تعادل بخشی بر کمیت منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی دشت خوی). دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های دانش‌بنیان در علوم زمین. دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- مهندسین مشاور آبگستران میهن. ۱۳۹۶. طرح مطالعات جامع پساب استان اصفهان، برنامه‌ریزی منابع و مصارف پساب فاضلاب تصفیه‌خانه اردستان. معاونت طرح و توسعه شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان.
- Boni R., Teatini P., Zoccarato C., Guardiola-Albert C., Ezquerro P., Bru G., Tomás R., Valdes-Abellan J., Pla C., Navarro-Hernández M.I. Elçi A. Çaylak B. Hakan Ören A. Shatanawi KH. Hind Mohammad A. Abu Hajar H. Letterio T. Genovesi R. Hreisha H. Al-Mimi Q. and Meisina C. 2022. Stakeholders'

The Study of the Effects of Restoration and Resilience Plan on Groundwater of Qaleh Tol Plain, North East Khuzestan

F. Alijani^{1*}, S. F. Musavi², H. Mohammadi³

1- Assist. Prof., Department of Minerals and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. 2- MSc of Hydrogeology, Kamiab Gostar Jonub Consulting Engineers, Ahvaz, Iran. 3- PhD Candidate of Hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

*(Corresponding Author Email: f_alijani@sbu.ac.ir)

Received: 05-12-2022

Revised: 26-12-2022

Accepted: 27-12-2022

Available Online: 29-12-2022

بررسی اثرات طرح احیا و تعادل بخشی بر آب های زیرزمینی دشت قلعه تل، شمال شرق خوزستان

فرشاد علی جانی^{۱*}، سیده فاطمه موسوی^۲، هادی محمدی^۳

۱- استادیار هیدروژئولوژی، گروه زمین شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. ۲- کارشناس ارشد هیدروژئولوژی، مهندسین مشاور کمیاب گستر جنوب، اهواز، ایران. ۳- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: f_alijani@sbu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۰/۰۸

Abstract

The restoration and resilience project with the aim of compensating for the reservoir deficit and preventing the decline of the aquifers is being developed by the Ministry of Energy with various projects and is being implemented throughout Iran. The implementation of restoration and resilience projects in the forbidden plain of Qaleh Tol, northeast of Khuzestan, has started since 2017. The evaluation of the implemented plans, saving 1.7 million cubic meters per year (about 14% reduction in the exploitation of groundwater) has been done by comparing the fluctuations of the groundwater level of the plain before and after the implementation of the plan. The results showed that the amount of changes in the reservoir level and the volume of Qaleh Tol aquifer in the water year 2021-2022, which is in the dry period along with the implementation of restoration and balancing projects in the region, is positive and equal to 0.41 meters and 1.8 million cubic meters, respectively. Based on this, while during the drought period of 2021-2022, most of the plains of Khuzestan province have faced a drop in the reservoir level and reservoir deficit, however, the groundwater level has risen in Qaleh Tol plain, which can be due to the positive effects of the implementation of the projects. Due to the intermittent years with more rainfall than normal and drought, it is not possible to comment with certainty regarding the effects of project implementation on the aquifer balance, and the clear role of the effect on the representative hydrograph is not certain due to the short-term fluctuations of water level changes.

Keywords: Restoration and Resilience Plan, Groundwater drawdown, Khuzestan.

چکیده

طرح احیا و تعادل بخشی با هدف جبران کسری مخزن و جلوگیری از افت آبخوان های زیرزمینی با پروژه های مختلف در وزارت نیرو تدوین و در کل کشور در حال اجرا است. اجرای طرح های احیا و تعادل بخشی در دشت ممنوعه قلعه تل، شمال شرق خوزستان، از سال ۱۳۹۷ آغاز شده است. ارزیابی اجرای طرح های اجرا شده، با صرفه جویی ۱/۷ میلیون متر مکعبی در سال (حدود ۱۴ درصد کاهش بهره برداری از آب زیرزمینی) با مقایسه نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت در قبل و بعد از اجرای طرح انجام شده است. نتایج نشان داد که میزان تغییرات سطح ایستابی و حجم آبخوان قلعه تل در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ که در دوره خشک و همراه با اجرای طرح های احیا و تعادل بخشی در منطقه می باشد، مثبت و به ترتیب برابر ۰/۴۱ متر و ۱/۸ میلیون متر مکعب می باشد. بر این اساس در حالی که در دوره خشکسالی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ عمده دشت های استان خوزستان با افت سطح ایستابی و کسری مخزن مواجه شده اند، ولی در دشت قلعه تل تراز آب زیرزمینی بالا آمده است که می تواند به دلیل اثرات مثبت اجرای طرح های احیا و تعادل بخشی آبخوان باشد. با توجه به تناوب سال های با بارش بیشتر از نرمال و خشکسالی، نمی توان با قطعیت در ارتباط با اثرات اجرای طرح بر تعادل آبخوان نظر داد و نقش واضح با تأثیر بر روی هیدروگراف معرف، به علت نوسانات کوتاه مدت تغییرات سطح آب، قطعی نیست.

واژه های کلیدی: طرح احیا و تعادل بخشی، افت سطح آب زیرزمینی، خوزستان.

از تحقیقات مغفول می‌ماند. Zhang و همکاران (۲۰۱۹) بیان داشتند آب زیرزمینی یکی از مهمترین منابع برای تأمین آب در نواحی خشک می‌باشد. آنها با بررسی حوضه رودخانه زرد چین که یک نمونه معمول حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک می‌باشد و عمده مصرف آب زیرزمینی آن برای تأمین آب کشاورزی است، بیان نمودند که اجرای پروژه‌های تأمین آب کشاورزی باعث افت سطح آب‌های زیرزمینی از سال ۲۰۰۰ به بعد گردیده است. در این مطالعه، از داده‌های چندگانه شامل داده‌های سنجش از دور ماهواره GRACE، داده‌های مشاهده‌ای آب زیرزمینی و داده‌های شبیه‌سازی مدل‌ها برای شناسایی روند ذخیره آب زیرزمینی و نقش تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ استفاده نمودند. نتایج بررسی آنها نشان داد که در مقیاس حوضه‌ای داده‌های GRACE، تخمین کلی از تغییرات ذخیره آب زیرزمینی به دست می‌دهد. آنها بیان نمودند که مصرف زیادتر آب زیرزمینی برای اهداف مختلف افزایش یافته و این باعث کاهش حجم ذخیره آب زیرزمینی به میزان ۱۰ میلی‌متر بر سال شده است. بر این اساس علیرغم افزایش تغذیه آب زیرزمینی و کاهش سطح زیر کشت، ذخیره آب زیرزمینی بازیابی نشده است.

در تحقیقی که در منطقه معدنی در Johannesburg انجام گرفته است، میزان نوسانات سطح آب زیرزمینی در بلندمدت و میزان بارندگی ثبت شده و سپس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است (Abiye و همکاران، ۲۰۱۸). جهت این تجزیه و تحلیل از روش CRD استفاده شده است. نتایج حاصل از CRD نشان می‌دهد که در سال‌های پر بارش، سطح آب زیرزمینی کم عمق تر می‌شود. در صورت عدم همبستگی تغییرات سطح آب زیرزمینی با بارش، این فرضیه تقویت می‌شود که برداشت آب زیرزمینی، علت مهمی برای نوسانات سطح آب زیرزمینی است. در تحقیقی در بخشی از زیرحوضه Kandivalasa در هند، سطح آب زیرزمینی در ۴۱ چاه مشاهده‌ای در فاصله سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ مورد بررسی و پایش قرار گرفت (Rao و Prasad، ۲۰۱۸). در طول این پایش، سطح آب زیرزمینی به طور پیوسته کاهش پیدا کرد. این کاهش در سال ۲۰۱۵ بسیار بیشتر بود، زیرا در این سال میزان بارندگی نیز به کمترین میزان خود رسیده بود. تخلیه آب زیرزمینی به خصوص در بخش‌های شرقی و جنوب‌غربی محدوده مورد مطالعه، مشاهده شد. زیرا در این بخش میزان برداشت، بیش از حد مجاز بوده است. به طور کلی در این زیرحوضه میزان برداشت مجاز سالانه ۱۱/۳ میلیون متر مکعب بوده است، در حالی‌که بهره‌برداری واقعی به ۱۶/۶ میلیون متر مکعب در سال رسیده است. میزان اضافه برداشت ۵/۶ میلیون متر مکعب، علت اصلی افت سطح آب زیرزمینی است. با تخمین میزان برداشت مجاز سالانه، میزان برداشت واقعی از آب‌های

در سال‌های اخیر فشار به منابع آب زیرزمینی کشور جهت تأمین آب مورد نیاز بخش‌های مختلف (کشاورزی، شرب و بهداشت، فضای سبز، صنایع و خدمات) فزونی یافته است؛ به طوری که آب استحصال از چاه‌ها بسیار بیشتر از ظرفیت آب تجدیدپذیر آبخوان‌ها بوده و همین امر منجر به نزول سطح آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های کشور و بروز اثرات مخرب از جمله خشکیدن قنات و چشمه‌ها، افزایش هزینه بهره‌برداری، شور شدن آب استحصال از چاه‌ها، بایرشدن زمین‌های زراعی، فرونشست زمین و ایجاد درز و شکاف در تأسیسات و منازل در برخی مناطق گردیده است.

از مهمترین پروژه‌های طرح احیا و تعادل‌بخشی، می‌توان به ایجاد گروه‌های گشت و بازرسی، انسداد چاه‌های غیرمجاز و جلوگیری از اضافه برداشت چاه‌های مجاز، نصب و راه اندازی کنتورهای هوشمند، اطلاع‌رسانی و تهیه برنامه‌های فرهنگی، مدیریت مشارکتی آب‌های زیرزمینی، تغذیه مصنوعی و استقرار و تشکیل بازارهای محلی آب اشاره کرد. از جمله اقدامات مهمی که در راستای تعادل‌بخشی آب زیرزمینی صورت گرفته و اکنون با جدیت بیشتری در حال پیشروی می‌باشد، نصب وسایل اندازه‌گیری هوشمند جهت مدیریت مصرف منابع آب زیرزمینی است. از جمله اهداف نصب کنتورهای هوشمند، اندازه‌گیری حجم آب برداشت شده توسط بهره‌برداران منابع آب و جلوگیری از هرگونه برداشت غیرمجاز، ایجاد تعادل بین منابع و مصارف آب زیرزمینی با برنامه‌ریزی متکی بر اطلاعات بدست آمده از قرائت کنتورها و حجم بهره‌برداری از منابع آب و شناسایی و برخورد با بهره‌برداران دارای اضافه برداشت و بهره‌برداران غیرمجاز می‌باشد.

تاکنون مطالعات مختلفی در ارتباط با بررسی اثرات اجرای طرح‌های مختلف حفاظت کمی و کیفی از منابع آب و به ویژه آب‌های زیرزمینی انجام شده است (Al-Amin و همکاران، ۲۰۱۸؛ Bhattacharjee و همکاران، ۲۰۱۸؛ Lezzaik و همکاران، ۲۰۱۸؛ Morsy و همکاران، ۲۰۱۸؛ Samani؛ ۲۰۲۱). Dong و همکاران (۲۰۱۳) در مقاله‌ای خطرپذیری آبخوان‌های کم‌عمق و عمیق در تیانجین چین را در قالب پروژه انتقال آب به شمال کشور چین ارزیابی نمودند. ایشان بر اساس خصوصیات آبخوان‌های کم‌عمق و عمیق، دو مجموعه سیستم شاخص ارزیابی چهار معیاره طراحی نمودند. در مرحله بعد، فاکتورها نرمالیزه شده و وزن‌هایی به آنها اختصاص یافت. سپس میزان خطرپذیری آبخوان‌های کم‌عمق و عمیق محاسبه گردید. در انتها عدم قطعیت ارزیابی خطرپذیری آبخوان با استفاده از روش شاخص کریجینگ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نکته قابل توجه در این تحقیق تجزیه و تحلیل عدم قطعیت ارزیابی خطرپذیری آبخوان است که در بسیاری

زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه و بررسی تراز آب زیرزمینی، مناطقی که در معرض خطر جدی کم آبی قرار داشتند، شناسایی گردید. این نتایج به همراه راهکارهای جایگزین استفاده از منابع آب زیرزمینی، در اختیار تصمیم‌گیران قرار گرفت.

در ایران نیز در چند سال اخیر مطالعات مختلفی در ارزیابی پروژه‌های طرح احیا و تعادل‌بخشی انجام شده است. کبیری و نظری (۱۳۹۶) در تحقیقی بیان کرده‌اند که آمار ارائه شده در منابع آب ایران، وضع دشوار روند افت سالانه آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. در این بین اما، طرح تعادل‌بخشی، نقطه امیدی است که بتوان با اجرای آن بحران به وجود آمده در منابع آب زیرزمینی را تسکین بخشیده و با ارتقای اثربخشی این طرح در دشت‌های بحرانی، بتوان وضعیت این دشت‌ها را بهبود بخشید. در این تحقیق اثربخشی و نقات قوت و ضعف این طرح بررسی و راهکارهای لازم ارائه گردیده است و به این نکته اشاره شده است که چنانچه طرحی با این اهمیت و وسعت، بدون مطالعات امکان‌سنجی فنی، اجتماعی و نهادی آغاز و ادامه یابد، ممکن است موجبات شکست در طرح، بی‌اعتمادی بیشتر بین بهره‌برداران و متولیان آب، از بین رفتن سرمایه اجتماعی و در نهایت تخریب منابع آب گردد. نجفی بیامه و همکاران (۱۳۹۵) در این پژوهش به مبانی محاسباتی دستورالعمل اجرای توامان آئین‌نامه مصرف بهینه آب کشاورزی و قانون تعیین تکلیف چاه‌های آب فاقد پروانه بهره‌برداری پرداخته‌اند. نتایج نشان‌دهنده وجود ابهامات و ایراداتی در رابطه با اعداد و ارقام مورد نیاز جهت اجرایی نمودن این دستورالعمل می‌باشد. با بررسی تفاوت‌های مشاهده شده، پیشنهاداتی جهت تدقیق اطلاعات مورد نظر ارائه گردید. فارغ از ابهامات وارده به نحوه برآورد میزان آب قابل برنامه‌ریزی جهت مصارف بخش کشاورزی، در این تحقیق به بررسی دستورالعمل فوق‌الذکر با تأکید بر داده‌های مربوط به استان کرمانشاه پرداخته شده است. در تحقیقی که توسط علی‌پور و همکاران (۱۳۹۵) انجام شده است، به بررسی وضعیت این طرح در دشت ممنوعه بحرانی نیشابور به عنوان یکی از دشت‌های پایلوت این طرح در استان خراسان رضوی پرداخته شده است و بر اساس داده‌ها و آمار موجود، چهار سناریو برای احیای آبخوان نتیجه‌گیری شده است. در این تحقیق مقایسه نوع مصارف آب در جهان، ایران، خراسان رضوی و نیشابور انجام گرفته است. در این تحقیق اشاره شده که اجرای طرح احیا و تعادل‌بخشی می‌تواند گام موثری در جهت جبران برخی خسارت‌ها در نظر گرفته شود، اما کاملاً محرز است که زیرساخت‌های این طرح در دشت‌های پایلوت اصلاً وجود ندارد؛ به ویژه در دشت نیشابور که هنوز بر سر ارقام آمار و اطلاعات ابتدایی بحث و جدل فراوان وجود دارد. عدم تطابق آمار و اطلاعات منابع آب حاصل از آماربرداری سراسری در هر ۵ سال یک بار و آمار سالانه حفاظت و بهره‌برداری منابع

آب و بروز اشکال در بیلان، راه‌های متفاوت محاسبات بیلان، بی اطلاع بودن از آمار دقیق چاه‌های غیر مجاز و حتی برداشت‌های مجاز و عدم تخصیص به موقع اعتبارات و حقوق گروه‌های گشت و بازرسی موجب شده که طرح همواره با مشکلات فراوان همراه باشد، چرا که شرح خدمات بندهای ۱۵ گانه طرح تعادل‌بخشی، کمتر همسو خواهد بود.

وابستگی بیش از اندازه به منابع تجدیدنپذیر آب‌های زیرزمینی و در نتیجه تخلیه و افت این منابع، اثرات منفی و ناگواری بر روی محیط زیست، مسائل سیاسی، اقتصادی و اجتماعی دارد. فقدان ابزارهای مناسب جهت شناسایی و تشخیص انواع خطرهایی که آب‌های زیرزمینی را تهدید می‌کند، باعث تشدید تخریب و تخلیه آبخوان‌ها می‌شود. اجرای طرح احیا و تعادل‌بخشی در دشت‌ها که یکی از مصوبات شورای عالی آب است، به عنوان راهکار برون‌رفت از بحران، به تمامی شرکت‌های آب منطقه‌ای کشور اعلام شده است؛ اما این طرح با چالش‌ها و مشکلاتی روبه‌رو است که موجب عدم رسیدن به هدف فوق خواهد شد. در استان خوزستان با توجه به افت سطح آب زیرزمینی در دشت قلعه‌تل و مطالعات انجام شده، این دشت نیز در فهرست دشت‌های ممنوعه کشور قرار گرفته و لذا اجرای پروژه‌های طرح احیا و تعادل‌بخشی برای دشت در اولویت شرکت سهامی سازمان آب و برق خوزستان به عنوان متولی امر قرار گرفته است. در این دشت طرح‌های مختلف شامل تقویت و تشکیل گروه‌های گشت و بازرسی، اصلاح و تعدیل پروانه‌های بهره‌برداری کشاورزی، ایجاد تشکلهای آبران مردمی، تغذیه مصنوعی و تجهیز چاه‌های بهره‌برداری به ابزارهای هوشمند، انجام گرفته شده است. هدف از این تحقیق واکاوی تأثیرات اجرای طرح‌های چندگانه احیا و تعادل‌بخشی بر تغییرات ذخیره آبخوان قلعه‌تل بدون هر گونه پیش‌دوری و با تکیه بر داده‌های هیدرواقليمی می‌باشد.

موقعیت و ویژگی‌های گستره مطالعاتی

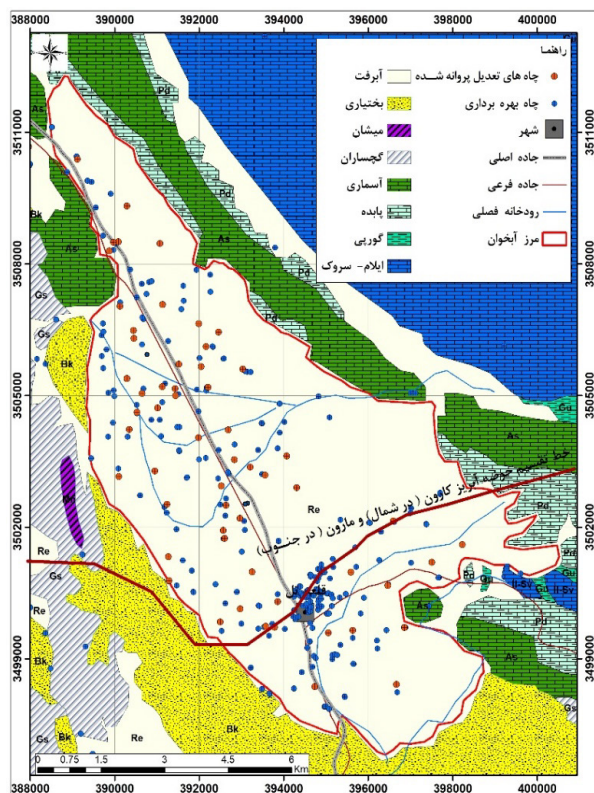
گستره مطالعاتی مرغاب دارای وسعت ۸۱۸/۵۱ کیلومتر مربع می‌باشد که از این مساحت ۷۱۳/۲۳ کیلومتر ارتفاعات و ۱۰۸/۲۸ کیلومتر مربع به دشت تخصیص یافته است. آبخوان‌های گستره مطالعاتی مرغاب شامل چهار آبخوان قلعه‌تل، نوترگی، چهارتنگ وهلایجان می‌باشد. آبخوان قلعه‌تل در بین طول جغرافیایی ۴۹° ۴۹' تا ۴۹° ۵۷' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱° ۴۴' تا ۳۱° ۴۶' شمالی قرار گرفته است و به واسطه راه ارتباطی اهواز- ایزه قابل دسترسی است. موقعیت این آبخوان و نقشه زمین‌شناسی آن در شکل (۱) ارائه شده است. آبخوان آبرفتی قلعه‌تل در منطقه زاگرس چین خورده و در مسیر گسل پی سنگی ایزه واقع شده است. این آبخوان از شرق به سازندهای آهکی ایلام- سروک و

آسماری و سازندهای مارنی- شیلی پابده و گورپی، از شمال و شمال غرب به آهک آسماری و از جنوب، جنوب غربی و غرب به کنگلومرای بختیاری و مارن‌های گچساران ختم می‌شود.

آبخوان قلعه‌تل از نوع آزاد تک لایه است. مهمترین کاربری در محدوده دشت قلعه‌تل کشاورزی است. دشت قلعه‌تل شامل ۱۰۰۰۰ هکتار زمین است که ۱۴۵۰ هکتار از آن تحت کشت آبی و مابقی آن زمین دیم است. محصولات در دو نوبت پاییزه و بهار کشت می‌شود (حیدری، ۱۳۹۱). محصولات پاییزه عبارت است از: گندم دیم، گندم آبی، جو دیم، کلزا، پیاز. محصولات بهار نیز شامل برنج (در سال‌های پربابی)، حبوبات، صیفی‌جات، کشت گلخانه‌ای، ذرت، سیب زمینی، بادام زمینی و سبزیجات می‌باشد (بر اساس مشاهدات میدانی). برداشت آب از آبخوان عمدتاً با هدف کشاورزی و به میزان کمی با هدف شرب و مصارف شهری صورت می‌گیرد. وسعت آبخوان قلعه‌تل که تحت پوشش شبکه چاه‌های مشاهده‌ای منطقه می‌باشد، برابر ۷۳/۸۴ کیلومترمربع است. با توجه به رخنمون‌های سنگی منطقه اسکلت آبخوان، سازندهای آسماری و کنگلومرای بختیاری و همچنین از رسوبات آبرفتی ریز و درشت رودخانه‌ای در منطقه تشکیل شده است. در محدوده آبخوان قلعه‌تل در حال حاضر ۱۵ چاه مشاهده‌ای وجود دارد. عمق سنگ کف آبرفت از کمتر از ۱۰ متر تا حدود ۲۰۰ متر در دشت قلعه‌تل متغیر است. به طور کلی از جنوب شرق به سمت شمال غرب دشت، ضخامت آبرفت افزایش می‌یابد (علی‌حاجی و همکاران، ۱۳۹۸).

ارتفاع توپوگرافی در دشت قلعه‌تل و در محدوده آبخوان آن از ۸۱۹ تا ۱۰۵۳ متغیر است. شیب توپوگرافی از جنوب شرقی به سمت غرب و شمال غربی است. میانگین ارتفاع در این دشت ۸۸۴ متر و میانگین شیب، ۲/۹ درصد است. در بخش جنوبی آبخوان سرشاخه‌های رودخانه فصلی گلال و در بخش شمالی سرشاخه‌های فصلی رود مرغاب قرار دارد. به سبب ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی خاص، خط تقسیم دو حوضه رود کارون در شمال و رود مارون در بخش جنوبی- مرکزی دشت قلعه‌تل قرار دارد. همچنین خط تقسیم آب زیرزمینی (با وجود جابجایی‌های زیاد در سال‌های اخیر) تقریباً در همین محدوده قرار داشته و بنابراین می‌توان چنین گفت که زهکشی آب‌های سطحی و زیرزمینی، هم جهت می‌باشد.

بر اساس آزمون‌های پمپاژ ۵ حلقه چاه اکتشافی و ۸ حلقه چاه بهره‌برداری در منطقه، ضریب قابلیت انتقال بین ۱۱۵ تا ۱۷۱۶ متر مربع در روز و ضریب ذخیره بین ۰/۲ تا ۰/۳۸ متغیر می‌باشد. با این حال تجربیات مطالعات میدانی مهندسين مشاور کمياب گستر جنوب نشان می‌دهد که میانگین ضریب ذخیره (آبدهی ویژه) در آبخوان قلعه‌تل تقریباً ۰/۰۶ می‌باشد. نتایج واسنجی مدل کمی آبخوان قلعه‌تل نشان می‌دهد که هدایت هیدرولیکی



شکل ۱- موقعیت و نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (منبع: ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ کوه آسماری، شرکت ملی نفت ایران)

بحث پیرامون گنتورهای هوشمند

کنتورهای هوشمند نصب شده بر روی چاه‌های کشاورزی به دو دست کلی کنتورهای هوشمند حجمی و کنتورهای هوشمند آب و برق تقسیم می‌شوند. کنتورهای هوشمند حجمی به دو شکل هوشمند الکترومغناطیسی و هوشمند WI وجود دارد که معمولاً بر روی چاه‌های دیزلی نصب و مورد استفاده قرار می‌گیرد. کنتورهای هوشمند حجمی با عبور آب از داخل آن به طور مستقیم حجم آب عبوری را اندازه‌گیری می‌کند. کنتورهای هوشمند الکترومغناطیسی از طریق ایجاد میدان الکترومغناطیسی در اطراف لوله آب حجم عبوری آب را اندازه‌گیری می‌کند که این کنتورها بیشتر برای چاه‌های ماده ۱۲ (مرغداری‌ها و دامداری‌ها)، خدماتی و چاه‌های صنعتی با دبی پایین توسط آب منطقه‌ای، پیشنهاد می‌گردد.

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل داده‌های سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای در دوره ۱۱ ساله (۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱)، داده‌های بانک آماربرداری چاه‌های بهره‌برداری و اطلاعات مربوط به اجرای طرح‌های تعادل‌بخشی در سطح دشت می‌باشد که از سازمان آب و برق خوزستان دریافت شده است. داده‌های سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای پس از بررسی اولیه در صورت نیاز مورد بازبینی قرار گرفتند.

بر اساس اطلاعات دریافتی از معاونت حفاظت و بهره‌برداری منابع آب سازمان آب و برق خوزستان طرح‌های مختلفی در سطح دشت قلعه‌تل اجرا شده است. در سال ۱۳۹۷-۱۳۹۶ با استفاده از بودجه طرح احیا و تعادل‌بخشی، بالغ بر ۵۵ دستگاه کنتور حجمی هوشمند جهت کنترل میزان برداشت منابع آب زیرزمینی بر روی چاه‌های بهره‌برداری این دشت، نصب گردید. همچنین با اعلام ضرایب تعدیل منطقه مرغاب، بالغ بر ۷۰ پروانه بهره‌برداری، اصلاح و تعدیل شده‌اند و حجم صرفه‌جویی این اصلاح و تعدیل بالغ بر ۱/۷ میلیون متر مکعب می‌باشد. لازم به ذکر است با توجه به اجرای پروژه ایجاد تشکلهای آبران در این دشت، تغییرات الگوی کشت نیز در این دشت ایجاد شده و کشت‌هایی مانند کشت بادام زمینی رواج یافته و در زمان اجرای این پروژه (۱۳۹۸-۱۳۹۷) کشت شلتوک به میزان قابل توجهی کاهش یافته و از کشت‌های جایگزین و گلخانه‌ای استفاده شده است. همچنین در دوره ۱۰ ساله (۱۳۹۱ تا ۱۴۰۱) یک گروه گشت و بازرسی به طور مداوم در سطح دشت قلعه به فعالیت گشت زنی مشغول می‌باشند، لذا از حفر چاه‌های غیر مجاز جدید در سطح دشت ممانعت کامل به عمل آمده است. پروژه تغذیه مصنوعی به روش پخش سیلاب نیز در جبهه ورودی شرق دشت قلعه‌تل در اواسط دهه ۸۰ اجرا گردیده است که متأسفانه به دلیل وجود لایه‌های رسی ضخیم در زون غیر اشباع، پس از آبیگری اولیه، نفوذ از حوضچه‌ها به کندی انجام شده است. بر این اساس در حوضچه‌ها اقدام به حفر چاه‌های تغذیه‌ای شد تا مشکل عدم نفوذ از لایه‌های رسی بخش غیر اشباع حل شود. با این حال با توجه به آورد رسوب بالای حوضه بالادست پس از آبیگری مجدد رواناب (بدون انجام ترسیب در حوضچه رسوبگیر) اقدام به تغذیه رواناب گل‌آلود در چاه‌های تغذیه‌ای گردید که باعث رسوب گل و لای در چاه‌ها و پر شدن آنها گردید. بر این اساس عملاً پروژه تغذیه مصنوعی دشت قلعه‌تل در همان سال ابتدایی بهره‌برداری با شکست مواجه شد و دیگر آبیگری از طریق آن رخ نداده است. بر این اساس عملاً دو پروژه اصلی احیا و تعادل‌بخشی شامل نصب کنتورهای حجمی و تغییر الگوی کشت جایگزین با مشارکت مردمی از سال ۱۳۹۷ در سطح دشت قلعه‌تل اجرا شده است. به منظور تعیین اثرات نصب کنتورهای حجمی هوشمند و تغییر

کنتورهای هوشمند حجمی WI، توسط حرکت چرخ دنده به داخل آن به وسیله عبور آب، دبی آب را به صورت دیجیتال قرائت می‌کند. بر روی هر نوع کنتور حجمی یک دستگاه مودم قرار دارد که در شرکت‌های آب منطقه‌ای، امکان دریافت اطلاعات توسط مودم و پردازش آنها وجود ندارد که این، یکی از مشکلات وارده به این کنتورها می‌باشد. بنابراین حتماً باید با حضور فیزیکی و بازدید کنتور و قرائت آن از صحت عملکرد آنها با خبر شد. مشکل دیگر آنکه در خصوص این کنتورها در صورت ماسه‌دهی چاه به مرور زمان چرخ دنده‌های کنتور حجمی، فرسایش یافته و احتمال ایجاد خطای قرائت دبی و حجم آب ورودی در این کنتورها وجود دارد. علاوه بر این، گاهی اوقات کشاورزان جهت عدم قرائت کنتور با ایجاد ضربه به آن باعث خرد شدن چرخ دنده در کنتورهای هوشمند WI شده و کارکرد کنتور را مختل می‌کنند. بنابراین تا زمان بازدید کنتور، خرابی مشخص نمی‌گردد. لازم به ذکر است کنتورهای هوشمند حجمی WI در حال حاضر بر روی چاه‌های کشاورزی دیزلی قرار می‌گیرد.

کنتورهای هوشمند آب و برق در حال حاضر بر روی تمام چاه‌های کشاورزی برقی قرار می‌گیرد. عملکرد این کنتورها به این صورت است که برق پمپ چاه و یا الکتروموتور از این کنتور عبور کرده و بر اساس توان پمپ یا الکتروموتور و برق مصرفی آنها دبی مصرفی چاه را محاسبه می‌کند. این کنتورها دارای یک مودم و یک کارت شارژ بوده که حجم آب پروانه بهره‌برداری به صورت سالانه توسط شرکت‌های آب منطقه‌ای بر روی آن شارژ شده و فقط مالک چاه به اندازه حجم پروانه بهره‌برداری قادر به بهره‌برداری از چاه می‌باشد و پس از مصرف حقابه سالانه، کنتور خود به خود برق چاه را قطع و از بهره‌برداری آن جلوگیری می‌کند. از مشکلات این کنتور این است که با توجه به اندازه‌گیری دبی لحظه‌ای و توان مصرفی پمپ، باید به درستی کالیبره شود و در صورت عدم کالیبره درست، قرائت کنتور دچار مشکل می‌شود. در صورت آبیاری بارانی و یا خط انتقال طولانی که مستقیم توسط پمپ صورت می‌گیرد، به دلیل مصرف آمپر بالا و توان مصرفی زیاد پمپ، قرائت کنتور بسیار بالاتر از دبی حقیقی چاه می‌باشد. بنابراین برای این مشکل باید از یک پمپاژ ثانویه استفاده شود. هیچ گونه انشعابی از کنتور برق آبی نباید گرفته شود، زیرا قرائت کنتور در این صورت بالاتر از دبی واقعی چاه می‌باشد. بنابراین از تابلو برق کنتور فقط باید یک خروجی جهت پمپ چاه گرفته شود تا اخلال در کارکرد کنتور ایجاد نکند.

با توجه به موارد بالا کنتورهای هوشمند آب و برق به دلیل وجود نظارت مستقیم بر مصرف چاه‌های کشاورزی از طریق شارژ کارت حقابه سالانه، جهت نصب بر روی چاه‌ها مناسب‌تر می‌باشند. لازم به ذکر است امکان دست‌کاری این کنتورها به مراتب از کنتورهای هوشمند حجمی کمتر است، بنابراین تخلف در خصوص این کنتورها نیز بسیار پایین‌تر می‌باشد.

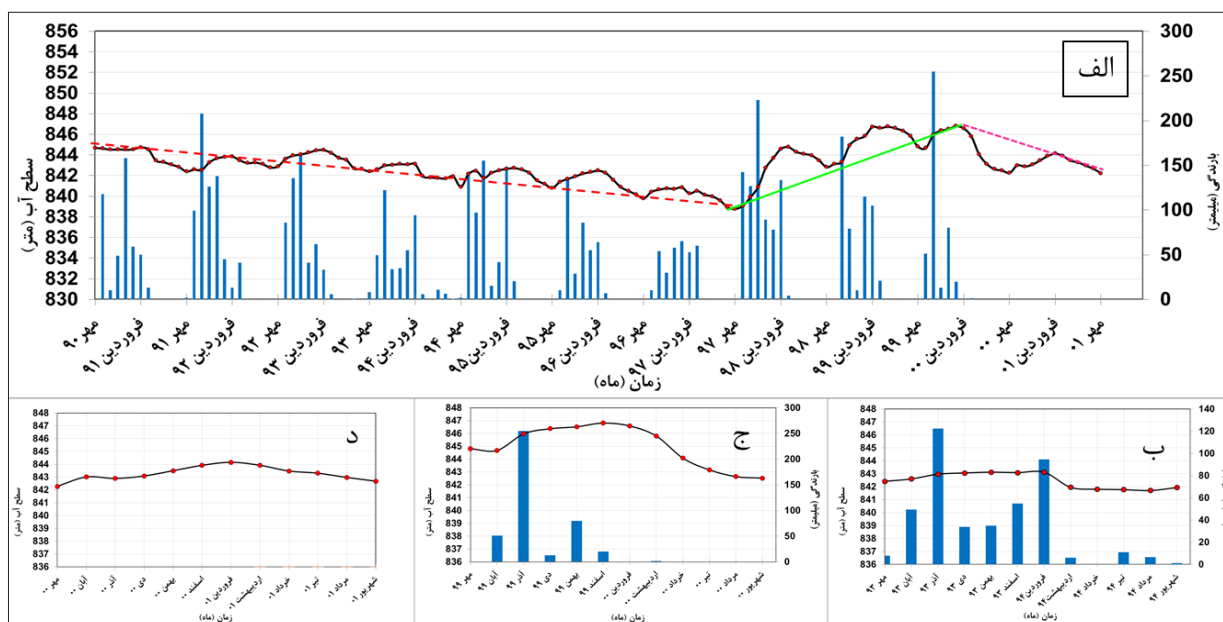
الگوی کشت در آبخوان بر سطح ایستابی آبخوان قلعه‌تل، دو سال آبی با وضعیت مشابه در قبل و بعد از اجرای طرح برای بررسی سطح ایستابی انتخاب گردید. بدین منظور از هیدروگراف معرف آب زیرزمینی استفاده شد. با توجه به اینکه طرح نصب کنتورهای حجمی در سال آبی ۹۷-۱۳۹۶ انجام شده، سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ با بارش ۴۲۰ میلی‌متر (در ایستگاه قلعه‌تل) به عنوان سال شاخص پس از اجرای طرح و سال آبی ۹۴-۹۳ با بارش ۴۲۲ میلی‌متر به عنوان سال آبی شاخص، پیش از اجرای طرح انتخاب گردید. همچنین سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ نیز به علت فراگیر بودن خشکسالی، مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با مقایسه نوسانات سطح آب در هیدروگراف معرف و نقشه‌های هم تراز و هم تغییرات آب زیرزمینی دشت قلعه‌تل، نسبت به اثرات اجرای طرح‌های احیا و تعادل‌بخشی در سطح دشت پایلوت قلعه‌تل اقدام شد.

نتایج و بحث

در این مقاله با مقایسه روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در دو سال با بارش نزدیک به هم پیش از اجرای طرح‌های احیا و تعادل‌بخشی (سال آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۳) و پس از آن (سال آبی

۱۴۰۰-۱۳۹۹)، ارزیابی اثرات اجرای طرح بر آبخوان دشت قلعه‌تل انجام شده است.

به منظور بررسی نوسانات سطح ایستابی آبخوان قلعه‌تل، هیدروگراف معرف آبخوان در بازه زمانی ۱۴۰۱-۱۳۹۰ تهیه و در شکل ۲-الف ارائه شده است. در هیدروگراف معرف آبخوان قلعه‌تل، سه روند دیده می‌شود. از مهر ۹۰ تا شهریور ۹۷ سطح آب زیرزمینی در آبخوان قلعه‌تل به میزان ۵/۷۶ متر افت داشته است. این بدان معنی است که طی ۷ سال به طور متوسط ۸۲ سانتی‌متر در هر سال، سطح آب در آبخوان پایین رفته است. از مهر ۹۷ تا اسفند ۹۹ سطح آب آبخوان به میزان ۸ متر خیز داشته است (۳/۲۲ متر در هر سال). به نظر می‌رسد که افزایش چشم‌گیر سطح ایستابی طی ۲/۵ سال متأثر از بارش فراوان و ترسالی سال ۹۸-۱۳۹۷ می‌باشد. از فروردین ۱۳۹۹ تا شهریور ۱۴۰۱ سطح آبخوان به میزان ۳/۹۱ متر افت داشته است (۲/۶۱ متر در سال). طی خشکسالی سال‌های آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰، کاهش تغذیه و برداشت آب از آبخوان عامل اصلی افت سطح ایستابی بوده است. در نهایت تراز سطح آب در آبخوان قلعه‌تل طی دوره ۱۱ ساله، به میزان ۲ متر افت داشته که معادل ۱۸ سانتی‌متر در هر سال می‌باشد.



شکل ۲- هیدروگراف معرف آبخوان قلعه‌تل (الف) در دوره زمانی ۱۴۰۱-۱۳۹۰ (ب) در سال آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ (ج) در سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ (د) در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ (داده‌های تأیید شده بارش ماهانه سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ توسط امور آب منتشر نشده و در اختیار نبوده است)

بر اساس هیدروگراف معرف آبخوان در این سال (شکل ۲-ب)، آب آبخوان به میزان ۴۸ سانتی‌متر افت داشته است. این میزان حدود ۳۰ سانتی‌متر بیش از متوسط افت آبخوان در دوره ۱۱ ساله مورد بررسی می‌باشد. حداکثر سطح ایستابی در این سال در بهمن و فروردین ۱۳۹۳ به میزان ۸۴۲/۱۲ متر و حداقل سطح

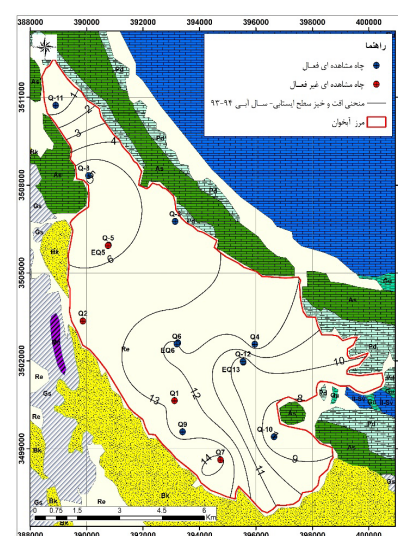
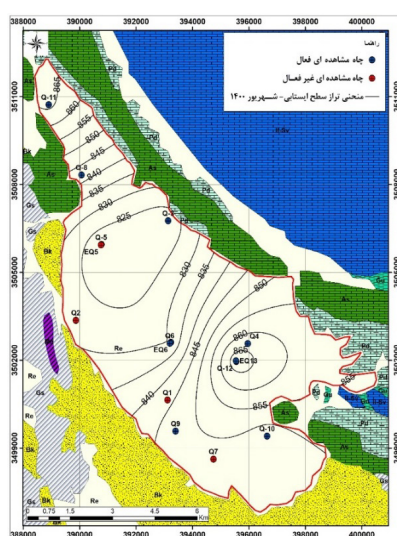
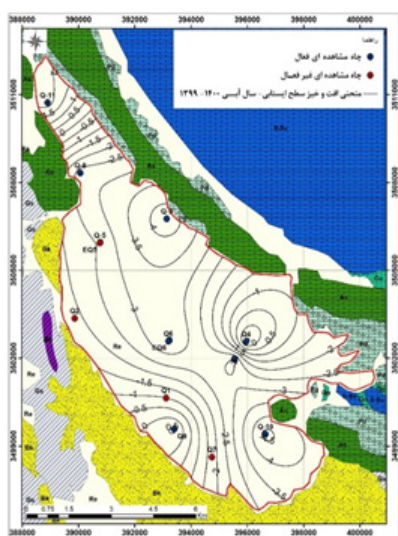
در سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ در ایستگاه بارانگرد که در محدوده آبخوان قلعه‌تل قرار دارد، در مجموع ۴۲۲ میلی‌متر بارندگی ثبت شده است. وضعیت بارش در این سال مشابه با سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ بوده و از این رو به عنوان سال شاخص پیش از اجرای طرح هوشمندسازی کنتور چاه‌های بهره‌برداری، ثبت شده است.

ایستابی در مرداد ماه به میزان ۸۴۱/۷۲ متر می‌باشد. بر اساس نقشه افت و خیز سطح آب (شکل ۳) تغییرات سطح آب بین ۲/۳- در بخش‌های شمالی و جنوبی تا حدود ۰/۵ متر در بخش شمال غربی متغیر می‌باشد. بر اساس نقشه‌های سطح آب، افت کلی در سطح ایستابی آبخوان قلعه‌تل در سال آبی ۱۳۹۳-۹۴ حدود ۹۰ سانتی‌متر می‌باشد که تقریباً دو برابر افت برآورد شده بر اساس هیدروگراف معرف است. با توجه به ماهیت دو روش مذکور، روش تعیین افت کلی بر اساس نقشه‌های هم تغییرات با توجه به ماهیت میانگین‌گیری آن از کل منطقه نسبت به روش هیدروگراف معرف مبتنی بر چندضلعی‌ها، نتایج نزدیک‌تر به واقعیت را به دست می‌دهد.

در سال آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ در ایستگاه بارانگرد که در شمال غرب آبخوان قلعه‌تل قرار دارد، در مجموع ۴۳۶ میلی‌متر و در ایستگاه قلعه‌تل ۴۲۰ میلی‌متر بارندگی ثبت شده است. این سال به عنوان سال شاخص پس از اجرای طرح هوشمندسازی کنتور چاه‌های بهره‌برداری ثبت شده است. بر اساس هیدروگراف معرف آبخوان در این سال (شکل ۲-ج)، آب آبخوان به میزان ۲/۳ متر افت داشته است. این میزان حدود ۲/۱۲ متر بیش از متوسط افت

آبخوان در دوره ۱۱ ساله مورد بررسی می‌باشد. حداکثر سطح ایستابی در این سال در اسفند ماه ۱۳۹۹ به میزان ۸۴۶/۸ متر و حداقل سطح ایستابی در شهریور ماه ۱۴۰۰ به میزان ۸۴۲/۵ متر می‌باشد. نقشه هم تراز سطح آب زیرزمینی در ماه شهریور ۱۴۰۰ در شکل (۴) ارائه شده است. بر اساس نقشه افت و خیز سطح آب در سال آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ (شکل ۵)، حداکثر افت سطح آبخوان به میزان ۴/۷ متر در شمال آبخوان و در محدوده چاه مشاهده‌ای Q-3 و نیز در جنوب آبخوان در مجاورت چاه مشاهده‌ای Q-10 می‌باشد. بالا آمدن سطح آب زیرزمینی نیز در بخش‌هایی از شرق، شمال و جنوب غربی دیده می‌شود. بر اساس نقشه‌های سطح آب، افت کلی در سطح ایستابی آبخوان قلعه‌تل در سال آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۰، حدود ۲/۲ متر می‌باشد.

در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰، میزان بارش در ایستگاه قلعه‌تل برابر ۳۲۰ میلی‌متر و به عنوان سال خشک بوده است. بر اساس هیدروگراف معرف آبخوان در این سال (شکل ۲-د)، آب آبخوان به میزان ۴۱ سانتی‌متر خیز داشته است. حداکثر سطح ایستابی در این سال در فروردین ۱۴۰۱ به میزان ۸۴۴/۱۶ متر و حداقل سطح ایستابی در مهر ۱۴۰۰ به میزان ۸۴۲/۲۷ متر می‌باشد.



شکل ۳- نقشه افت و خیز سطح ایستابی آبخوان قلعه‌تل در سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۴
شکل ۴- نقشه هم تراز آب زیرزمینی دشت قلعه‌تل در شهریور ماه ۱۴۰۰
شکل ۵- نقشه افت و خیز سطح ایستابی آبخوان قلعه‌تل در سال آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۰

بر اساس نتایج آماربرداری سراسری از منابع آب زیرزمینی در استان خوزستان در سال ۱۳۹۷، در محدوده آبخوان قلعه‌تل ۳۶۶ چاه بهره‌برداری با مجموع بهره‌برداری سالانه ۳۰/۶ میلیون متر مکعب وجود دارد. در سال ۱۳۹۶-۱۳۹۷ اجرای طرح احیا و تعادل بخشی در آبخوان ممنوعه قلعه‌تل در قالب سه طرح تعدیل و اصلاح پروانه‌های بهره‌برداری، نصب کنتورهای حجمی هوشمند و ایجاد بازار مشترک آب، اجرا گردید. بدین منظور پروانه بهره‌برداری ۷۲ چاه بهره‌برداری مجاز با دبی بین ۱ تا ۳۵ لیتر

بر ثانیه در محدوده آبخوان قلعه‌تل از تاریخ ۹۷/۲/۱۸ تا تاریخ ۱۴۰۱/۶/۲۷ تصحیح و تعدیل گردید. این چاه‌ها به منظور آبیاری ۱۳۷۲ هکتار از مزارع کشاورزی دشت قلعه‌تل مورد بهره‌برداری قرار گرفتند. میزان کل برداشت سالانه از این چاه‌ها حدود ۱۱/۴۳ میلیون متر مکعب می‌باشد. پس از اجرای طرح تعدیل پروانه‌های بهره‌برداری از آبخوان و برنامه نصب کنتورهای حجمی هوشمند از سال ۱۳۹۷-۱۳۹۶ سالانه حدود ۱/۷ میلیون متر مکعب در مصرف آب صرفه‌جویی صورت می‌گیرد. این رقم معادل ۱۴/۸

درصد از مقدار برداشت اولیه از این ۷۲ حلقه چاه و معادل ۵/۵ درصد از کل برداشت از آبخوان می‌باشد.

آبخوان قلعه‌تل واقع در محدوده مطالعاتی مرغاب با کد ۲۳۰۹ از تاریخ ۱۳۹۷/۳/۱۳ به مدت سه سال به عنوان دشت ممنوعه اعلام شد. این بدان معنی است که نباید اضافه برداشت از آبخوان صورت گرفته و میزان برداشت سالانه در حد ۳۰/۶ میلیون متر مکعب در سال ثابت بماند. الگوی کشت پاییزه در دشت غالباً دیم- گلخانه‌ای و الگوی کشت بهاره آبی- گلخانه است. از این رو تمرکز زمانی برداشت از آبخوان در بهار و تابستان می‌باشد. همچنین در سال‌های اخیر الگوی کشت از محصولات پرآب بر مثل برنج، به محصولات کم‌آب بر مثل بادام‌زمینی، تغییر یافته است. بنا بر آنچه که پیش‌تر ذکر شد، پروژه‌های تغذیه مصنوعی (چه از طریق حوضچه تغذیه و چه از طریق چاه تغذیه) در منطقه با شکست مواجه شده است. به علت ممانعت از آبیاری غرقابی و اجرای طرح‌های آبیاری بارانی و قطره‌ای در سطح گسترده (بر اساس مشاهدات میدانی)، آب برگشتی از کشاورزی به آبخوان یا ناچیز بوده و یا بطور پنهان و به مقدار جزئی در کم کردن اثر تغییرات منفی ذخیره آبخوان به ویژه در شمال غرب آبخوان که عمق آب زیرزمینی در حدود ۱۰ متر است، اثرگذار می‌باشد. آنچه که مسلم است در حال حاضر و به دلیل شرایط خشکسالی حاکم، میزان بهره‌برداری از آبخوان ثابت بوده و عمده تغذیه آبخوان از بارش می‌باشد. در جدول (۱) نتایج محاسبه تغییرات سطح آب و ذخیره آبخوان قلعه‌تل برای ۱۱ سال دوره آماری (۱۴۰۱-۱۳۹۰) ارائه شده است. همچنین در نمودار شکل (۶) تغییرات ذخیره آبخوان با میزان بارش مقایسه شده است. پاسخ سریع تغییرات ذخیره آبخوان به بارش به خوبی در این نمودار قابل مشاهده است.

تعیین دقیق تغذیه آبخوان از بارش معمولاً به مطالعات دقیق و سنجش‌های صحرائی نیاز دارد. اما با برازش میزان بارش سالانه بر نوسانات سالانه سطح ایستابی (هیدروگراف معرف در شکل ۲) و برازش مجموع بارش سالانه بر تغییرات ذخیره آبخوان (شکل ۶) می‌توان به نتایج نسبی در مورد تغذیه از بارش دست یافت و به پیش‌بینی رفتار آبخوان در برابر بارش پرداخت. میانگین مجموع بارش سالانه یک دوره ۴۵ ساله از سال ۱۳۴۵ تا سال ۱۳۹۰ در ایستگاه بارانگرد (به عنوان قدیمی‌ترین ایستگاه معرف دشت قلعه‌تل) ۶۶۱ میلی‌متر می‌باشد (حیدری،

۱۳۹۱). همچنین میانگین مجموع بارش سالانه از سال ۱۳۹۰ تا سال ۱۴۰۱ در ایستگاه قلعه‌تل ۴۹۷ میلی‌متر می‌باشد. بر اساس جدول (۱) و نمودار شکل (۶) در سال‌هایی که بارش در منطقه کمتر از ۴۹۷ میلی‌متر است (به استثنای سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰)، بیلان آب زیرزمینی منفی می‌باشد.

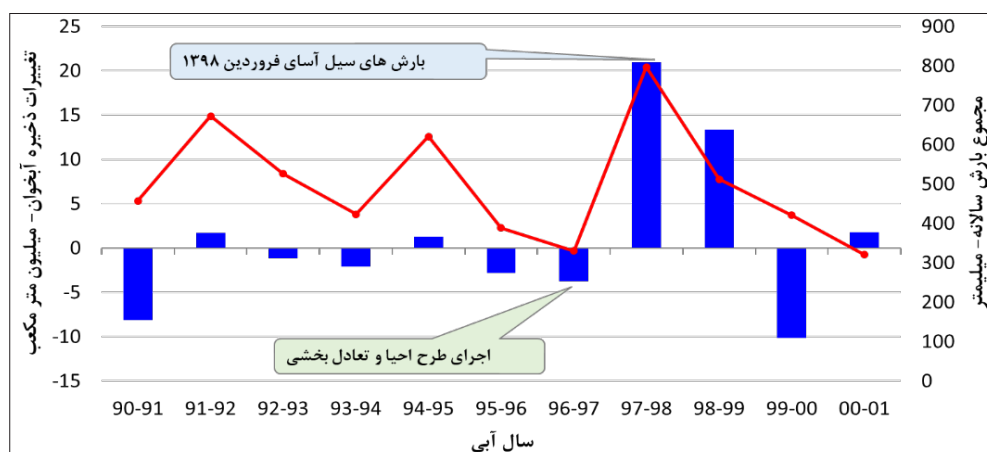
بر اساس هیدروگراف معرف آبخوان قلعه‌تل در شکل (۲) و نمودار شکل (۶)، خیز ۸ متری تراز آب زیرزمینی (۳/۲۲ متر در هر سال) از مهر ۹۷ تا اسفند ۹۹ مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد که افزایش چشمگیر سطح ایستابی در طی ۲ سال متأثر از تغذیه از باران‌های زیاد ناشی از ترسالی در سال‌های آبی ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ (به ویژه باران‌های سیل آسای سال ۱۳۹۸) می‌باشد. از این رو جدا کردن سهم تغذیه از بارش و اثرات طرح احیا و تعادل‌بخشی در این دو سال آبی مشکل است. مسلم است که سنجش اثرات طرح احیا و تعادل‌بخشی در سال‌های خشکسالی واضح‌تر می‌باشد.

با توجه به بارش ۴۲۰ میلی‌متری در سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹، که کمتر از حد میانگین سالانه و نشان‌دهنده خشکسالی است، طبیعی است که با کاهش شدید بارش‌ها، بهره‌برداری بیش از حد از آبخوان صورت گرفته و تغییرات ذخیره آبخوان منفی باشد. به نظر می‌رسد که در این سال آبی طرح احیا و تعادل‌بخشی یا به خوبی اجرا نشده و یا اثر آن در کاهش تغییرات منفی ذخیره آبخوان، مخفی شده است.

همانطور که در بالا ذکر شد، بر اساس نمودار شکل (۶) چنین به نظر می‌آید که پاسخ تغییرات ذخیره آبخوان به کاهش و یا افزایش مجموع بارش سالانه بسیار سریع می‌باشد، با این حال در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ که واجد کمترین میزان بارش در دوره ۱۱ ساله مورد بررسی است، تغییرات ذخیره آبخوان مثبت شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان تغییرات سطح ایستابی و حجم آبخوان قلعه‌تل (جدول ۱)، در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ که سال با بارش کمتر از میانگین همراه با اجرای طرح‌های احیا و تعادل‌بخشی در منطقه می‌باشد، به ترتیب برابر ۴۱/۱ متر و ۸/۱ میلیون متر مکعب می‌باشد. بر این اساس در حالی که در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰، عمده دشت‌های استان خوزستان با افت سطح ایستابی و کسری مخزن مواجه شده‌اند، ولی در دشت قلعه‌تل، تراز آب زیرزمینی بالا آمده است که می‌تواند به دلیل اثرات مثبت اجرای طرح‌های احیا و تعادل‌بخشی آبخوان باشد.

جدول ۱- تغییرات سطح آب و ذخیره آبخوان قلعه‌تل بر اساس هیدروگراف معرف آبخوان در دوره آماری ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱

سال آبی	مجموع بارش سالانه (میلی‌متر)	تغییرات ذخیره آبخوان (میلیون متر مکعب)	تغییرات سطح آب (متر)	میانگین سالانه سطح ایستابی (متر)
۱۳۹۰-۹۱	۴۵۷	-۸/۱۸	-۱/۸۵	۸۴۴/۱۳
۱۳۹۱-۹۲	۶۷۲	۱/۷۰	۰/۳۸	۸۴۳/۱۸
۱۳۹۲-۹۳	۵۲۵/۵	-۱/۲۰	-۰/۲۷	۸۴۳/۷۲
۱۳۹۳-۹۴	۴۲۲/۶	-۲/۱۱	-۰/۴۸	۸۴۲/۴۷
۱۳۹۴-۹۵	۶۲۰	۱/۲۵	۰/۲۸	۸۴۲/۰۹
۱۳۹۵-۹۶	۳۸۸	-۲/۸۰	-۰/۶۳	۸۴۱/۵۳
۱۳۹۶-۹۷	۳۳۰	-۳/۷۹	-۰/۸۵	۸۴۰/۲۳
۱۳۹۷-۹۸	۷۹۶/۷	۲۰/۹۵	۴/۷۳	۸۴۲/۵۴
۱۳۹۸-۹۹	۵۱۲	۱۳/۳۴	۳/۰۱	۸۴۵/۳۹
۱۳۹۹-۰۰	۴۲۰/۵	-۱۰/۱۷	-۲/۲۹	۸۴۵/۰۰
۱۴۰۰-۰۱	۳۲۰	۱/۸۰	۰/۴۱	۸۴۳/۲۷



شکل ۶- تغییرات ذخیره آبخوان و مجموع بارش سالانه در آبخوان قلعه‌تل در دوره آماری ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱

نتیجه‌گیری

در دشت ممنوعه قلعه‌تل، در رابطه با مقادیر آب قابل برنامه‌ریزی، مصارف بر اساس اصلاح پروانه، نصب کنتورهای حجمی و کنترل برداشت و مشارکت دینفعان با تغییر الگوی کشت، باعث شده تا هیدروگراف معرف آبخوان پس از حدود ۴ سال از اجرای طرح‌ها تا حدی با پاسخ مثبت همراه باشد. البته در ادامه اجرای طرح‌ها می‌توان با برآورد صحیح نیاز خالص آبی گیاهان و بازبینی برآورد آب قابل برنامه‌ریزی، بازنگری در نحوه محاسبات مربوط به اصلاح پروانه‌های چاه‌های بهره‌برداری، مطالعه دقیق و اجرای پروژه‌های تغذیه مصنوعی و مهار سیلاب‌های مخرب، تعیین سطح زیر کشت واقعی توسط گروه‌های گشت و بازرسی، تدقیق بیلان آب زیرزمینی دشت، تکمیل و توسعه شبکه چاه‌های مشاهده‌ای در سطح دشت و جلوگیری از کف‌شکنی چاه‌هایی که مجوز جابجایی گرفته‌اند، از کسری مخزن آبخوان دشت جلوگیری نمود.

در مناطق خشک و نیمه‌خشک همانند دشت قلعه‌تل، مدیریت منابع آب پیچیدگی‌های زیادی دارد. این پیچیدگی‌ها متأثر از طبیعت و خصوصیات ذاتی آبخوان، شرایط برداشت از آبخوان، میزان تغذیه آبخوان و بسیاری از موارد دیگر است که تمام این شرایط بر نوسانات سطح آب زیرزمینی تأثیرگذار است. نتایج نشان داد که میزان موفقیت اجرای طرح احیا و تعادل‌بخشی در آبخوان قلعه‌تل به دلیل رخداد دو سال با بارش بیش از نرمال (سال‌های آبی ۱۳۹۶-۹۷ و ۱۳۹۷-۹۸) با دوره کوتاه‌مدت ۴ ساله سپری شده از اجرای پروژه‌های طرح احیا و تعادل‌بخشی، در حاله‌ای از ابهام است. هر چند که طرح به خودی خود مبین صرفه‌جویی ۱/۷ میلیون متر مکعبی از آخرین آمار مربوط به برداشت، پیش از آغاز اجرای طرح به میزان ۳۰/۶ میلیون متر مکعبی سالانه در سطح دشت می‌باشد؛ ولی اینکه اجرای آن می‌تواند بر تعادل آبخوان نقش واضحی با تأثیر بر روی هیدروگراف معرف بگذارد، به علت نوسانات کوتاه‌مدت تغییرات سطح آب، قطعی نیست.

بررسی بلندمدت سطح آب زیرزمینی و داده‌های بارندگی در دشت قلعه‌تل نشان می‌دهد که نوسانات سطح آب می‌تواند به عنوان نتیجه مستقیم در مدیریت منابع آب، مورد استفاده قرار گیرد. الگوی نوسانات سطح آب زیرزمینی و بررسی جریان آب زیرزمینی، در ارتباط با میزان تغذیه و برداشت در آبخوان، می‌بایست مورد استفاده قرار گیرد. تغییرات ثابت در دامنه سطح آب به عنوان یک شاخص برای تغییرات تغذیه آبخوان در دوره‌های پیش و بعد از اجرای طرح‌های احیا و تعادل‌بخشی، می‌تواند در سال‌های با بارش مشابه، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرد. با توجه به تغییرات اقلیمی در ایران و به ویژه در استان خوزستان، بارندگی با الگوی نامنظم در فصل‌های محدودی از سال می‌تواند به عنوان عامل مثبت در بالا بردن سطح آب عمل نماید. اما این عامل و یا عوامل تغذیه و برداشت، نمی‌توانند به تنهایی انحرافات بزرگ هیدروگراف‌ها را توضیح دهند و برای این کار، نیاز به بررسی بلندمدت نوسانات سطح آب زیرزمینی می‌باشد.

پی‌نوشت

- 1-Synthetic weights
- 2-Indicator kriging method
- 3-Uncertainty analysis of risk assessment
- 4-Cumulative Rainfall Departure
- 5-Woltman Irrigation

منابع

حیدری، ص. ۱۳۹۱. شبیه‌سازی کمی منابع آب زیرزمینی در سناریوهای مختلف جهت مصارف کشاورزی با استفاده از مدل pmwin (مطالعه موردی دشت قلعه‌تل). وزارت علوم، تحقیقات و فناوری. دانشگاه شهید چمران، دانشکده مهندسی علوم آب. اهواز.

علی‌پور، ا.، حسنی، خ. و لگزیان، ر. ۱۳۹۵. بررسی طرح احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی، مطالعه موردی: دشت پابلوت ممنوعه بحرانی نیشابور. دومین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان. اصفهان.

علی‌جانی، ف.، حاجی‌زاده، م.، ناصری، ح. و میرزایی، ل. ۱۳۹۸. بررسی ناهنجاری‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان دشت قلعه‌تل، شمال شرق خوزستان، با استفاده از تجسس عمیق ژئوالکتریک. نشریه هیدروژئولوژی، ۴(۲): ۳۳-۱۸.

کبیری، ش. و نظری، ب. ۱۳۹۶. ارزیابی اثربخشی طرح احیا و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی. اولین اجلاس هم‌اندیشی با متخصصان علوم آب و محیط زیست، وزارت نیرو. تهران.

نجفی‌بیامه، م.، مرادی، ع.، شهلائی، م.ر. و جلیلیان، ع. ۱۳۹۵.

آسیب‌شناسی فرآیند بازنگری در صدور پروانه‌های بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در طرح احیاء و تعادل‌بخشی، مطالعه موردی: استان کرمانشاه. دومین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان. اصفهان.

نقشه زمین‌شناسی کوه آسماری. شرکت ملی نفت ایران. نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی، شیت شماره ۵۹۵۳.

- Abiye T., Masindi K., Mengistu H. and Demlie M. 2018. Understanding the groundwater-level fluctuations for better management of groundwater resource: A case in the Johannesburg region. *Groundwater for Sustainable Development*, 7: 1-7.
- Al-Amin S., Berglund E.Z., Mahinthakumar G. and Larson K. L. 2018. Assessing the effects of water restrictions on socio-hydrologic resilience for shared groundwater systems. *Journal of Hydrology*, 566: 872-885.
- Bhattacharjee S., Saha B., Saha B., Sadib Uddin M. and Panna C.H. 2018. Groundwater governance in Bangladesh: established practices and recent trends. *Groundwater for Sustainable Development*, 8: 69-81.
- Dong D., Sun W., Zhu Z., Xi S. and Lin G. 2013. Groundwater risk assessment of the third aquifer in Tianjin City, China. *Water Resour. Manag.*, 27 (8): 3179-3190.
- Lezzaik K., Milewski A. and Mullen J. 2018. The groundwater risk index: Development and application in the Middle East and North Africa region. *Science of the Total Environment*, 628: 1149-1164.
- Morsy K.M., Morsy A.M. and Hassan A.E. 2018. Groundwater sustainability: Opportunity out of threat. *Groundwater for Sustainable Development*, 7: 277-285.
- Prasad Y.S. and Rao B.V. 2018. Groundwater depletion and groundwater balance studies of Kandivalasa River Sub Basin, Vizianagaram District, Andhra Pradesh, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 6: 71-78.
- Samani S. 2021. Assessment of groundwater sustainability and management plan formulations through the integration of hydrogeological, environmental, social, economic and policy indices. *Groundwater for Sustainable Development*, 15: 100681.
- Zhang K., Xie X., Zhu B., Meng S. and Yao Y. 2019. Unexpected groundwater recovery with decreasing agricultural irrigation in the Yellow River Basin. *Agricultural Water Management*, 213: 858-867.

Assessment of the Groundwater Rehabilitation and Balancing with Emphasis on Smart Meters in Shahriar Plain

M. Khodadadi Benis¹, H. R. Nassery^{2*}, Y. Nikpeyman³

1,2&3- Ph.D. Student of Hydrogeology, Professor and Assistant Professor, Department of Minerals and Groundwater Resources, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: h-nassery@sbu.ac.ir)

Received: 10-12-2022

Revised: 25-12-2022

Accepted: 26-12-2023

Available Online: 29-12-2022

ارزیابی طرح احیاء و تعادل بخشی آب های زیرزمینی دشت شهریار با تأکید بر کنتورهای هوشمند

ملیحه خدادادی بنیس^۱، حمیدرضا ناصری^۲، یاسر نیک پیمان^۳

۱، ۲ و ۳- دانشجوی دکتری آب های زیرزمینی، استاد هیدروژئولوژی و استادیار هیدروژئولوژی، گروه زمین شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: h-nassery@sbu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۰/۰۸

Abstract

Increasing exploitation of groundwater has caused problems such as water table drops and declining in the country's aquifer storage volume. The multiplicity of these problems has led to various programs for rehabilitating and balancing of groundwater resources. One of these strategies is to install a smart meter on the exploitation wells. Shahriar plain aquifer is one of the aquifers in Iran which has caused numerous problems in this aquifer. In this study, after examining the characteristics of the Shahriar plain aquifer and monthly changes in groundwater level in the statistical course from 2011 to 2019, the effect of installing a smart meter on groundwater level fluctuations was analyzed. The study area was divided into three sections with a high number, medium, and low smart meter installations. A separate representative hydrograph was prepared for each section. The results of the analysis of maps and hydrographs indicated that in the period after installing the smart meter, the slope of groundwater level fluctuations in the area with a high number of smart meters is similar to the slope and the trend of groundwater level fluctuations in the area with a low number of smart meters; Therefore, installing smart meters on exploitation wells, through current methods and policies, cannot be a suitable approach for sustainable management of groundwater resources; Because installing smart meter without limiting the amount of overdraft does not have a positive effect on aquifer regeneration and balancing. In this research, other balancing measures performed in the study area were reviewed.

Keywords: Groundwater Resources, Shahriar Plain Aquifer, Rehabilitation and Balancing Aquifer, Smart Meter, Representative Hydrograph.

چکیده

افزایش بهره برداری از آب های زیرزمینی موجب ایجاد مشکلاتی مانند افت سطح ایستابی و کاهش حجم ذخیره آبخوان های کشور شده است. شمار زیاد این مشکلات باعث شده برنامه ریزی های گوناگون برای احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور به کار گرفته شود. یکی از این راهبردها کار گذاشتن کنتور هوشمند بر روی چاه های بهره برداری است. آبخوان دشت شهریار از آن دسته آبخوان های کشور است که افزایش بهره برداری از آن باعث ایجاد مشکلات بسیاری در این آبخوان شده است. در این پژوهش پس از بررسی ویژگی های آبخوان دشت شهریار و تغییرات ماهانه سطح آب زیرزمینی در دوره آماری ۱۳۹۸-۱۳۹۰، کارایی کار گذاشتن کنتور هوشمند بر نوسانات سطح آب زیرزمینی، تجزیه و تحلیل شد. گستره مورد مطالعه به سه بخش تعداد زیاد، متوسط و کم کار گذاشتن کنتور هوشمند تفکیک شد. برای هر یک از بخش ها هیدروگراف معرف جداگانه ای تهیه شد. نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل نقشه ها و هیدروگراف ها نشان داد در بازه زمانی بعد از کار گذاشتن کنتور هوشمند شیب نوسانات سطح آب زیرزمینی در گستره با تعداد زیاد کار گذاشتن کنتور هوشمند مشابه شیب و روند نوسانات سطح آب زیرزمینی در گستره با تعداد کم کار گذاشتن کنتور هوشمند است؛ بنابراین کار گذاشتن کنتور هوشمند بر روی چاه های بهره برداری، با استفاده از روش ها و سیاست های کنونی، نمی تواند یک رویکرد مناسب برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی باشد؛ زیرا کار گذاشتن کنتور هوشمند بدون محدود کردن میزان اضافه برداشت کارایی مثبتی بر احیاء و تعادل بخشی آبخوان ندارد. در این پژوهش دیگر کارهای انجام شده برنامه تعادل بخشی در گستره مورد مطالعه مانند تغذیه مصنوعی و انسداد چاه های غیرمجاز بررسی شدند.

واژه های کلیدی: منابع آب زیرزمینی، آبخوان دشت شهریار، احیاء و تعادل بخشی آبخوان، کنتور هوشمند، هیدروگراف معرف.

هرچند کارگذاشتن کنتورهای هوشمند بر روی چاه‌های بهره‌برداری آثار مثبتی دارد اما با گذشت زمان و آشنایی کشاورزان با این کنتورها به مرور تأثیر آنها خنثی شود و اضافه برداشت‌ها ادامه‌یابد، بنابراین پیشنهاد کردند برای کنترل برداشت آب در این دشت بهتر است علاوه بر کارهای مدیریتی به مسائل فرهنگی نیز توجه شود. شهبازی و همکاران (۱۳۹۹)، کارهای مدیریتی در کنترل سطح آب زیرزمینی دشت هشتگرد استان البرز، با هدف ارزیابی کارایی اجرای برنامه‌های تعادل‌بخشی و احیاء منابع آب زیرزمینی این دشت را بررسی کردند. نتایج به‌دست آمده از ارزیابی کارایی سناریوهای مدیریتی نشان داد، از میان برنامه‌های احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی، انجام هم‌زمان طرح تغذیه مصنوعی و ممنوعیت کامل چاه‌های بهره‌برداری غیرمجاز بیشترین کارایی را در وضعیت کمی آبخوان داشته است؛ همچنین به‌کار بردن محدودیت بر روی بهره‌برداری از چاه‌های مجاز کارایی ارزشمندتری بر احیاء و تعادل‌بخشی آبخوان داشته است. نیرومند فرد و همکاران (۱۳۹۹)، معیارهای مدیریتی هیدروژئولوژیک بر تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت سرایان را بررسی کردند. بررسی مقایسه میزان افت سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی قبل از کارگذاشتن کنتور هوشمند و بعد از کارگذاشتن کنتور هوشمند نشان داد بعد از کارگذاشتن کنتور هوشمند سطح آب زیرزمینی با شیب کمتری افت می‌کند اما خشکسالی‌ها و افزایش بهره‌برداری همچنان موجب افت سطح آب زیرزمینی در منطقه می‌شود. (Wang و همکاران، ۲۰۱۷)، برای کاهش شکاف بین درخواست آب زیرزمینی و تأمین آن که برآمده از بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی می‌باشد، کارایی انجام کارگذاشتن کنتور هوشمند توسط دولت چین در شمال چین را ارزیابی کردند. آن‌ها با تجزیه و تحلیل نتایج بررسی‌های میدانی در شش استان واقع در شمال چین و همچنین بررسی سیاست‌های پیاده‌سازی قانون کارگذاشتن کنتور هوشمند، نتیجه گرفتند کارگذاشتن کنتور هوشمند به مدیریت و کنترل بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی کمک می‌کند؛ با این وجود، کاستی‌هایی در فرآیند اجرا وجود دارد، از جمله این کاستی‌ها می‌توان به هزینه زیاد کارگذاشتن و نگهداری، سیستم ناقص سیاست‌گذاری مدیریت منابع و توسعه نامتعادل بین مناطق مختلف اشاره کرد. Toth و Toth (۲۰۱۹)، به ارزیابی اثربخشی کارگذاشتن کنتور هوشمند بر میزان تلفات آب در منطقه‌ای از شهر فانو (ایتالیا) در یک شبکه واقعی با خواندن هم‌زمان پرداختند. نتایج نشان داد کارگذاشتن کنتور هوشمند می‌تواند تا حد قابل توجهی به کاهش تلفات منابع آب کمک کند.

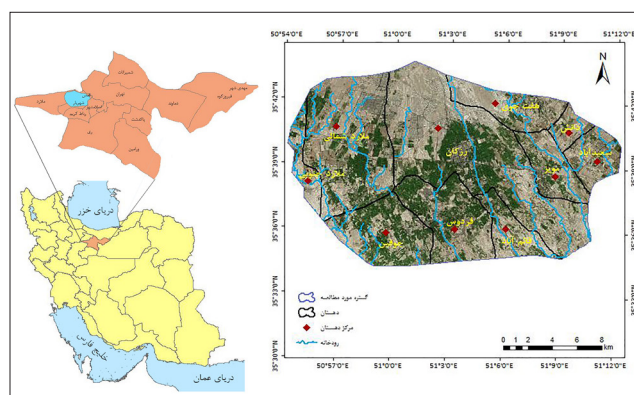
دشت شهریار از اراضی هموار و کم ارتفاع تشکیل شده است. این گستره از نظر ویژگی‌های جغرافیایی در جلگه آبرفتی روی مخروط‌افکنه کرج قرار گرفته است و شیبی از شمال به جنوب و از غرب به شرق دارد که شیب غربی آن نسبت به شیب شمالی

بحران آب‌های زیرزمینی در سراسر جهان یک مسئله قابل تأمل است (Pal و همکاران، ۲۰۲۰). کاهش حجم آب‌های زیرزمینی بی‌گمان یکی از بزرگترین چالش‌های پایداری بشریت در قرن ۲۱ است. مسئولان مدیریت منابع آب در سراسر جهان به کارهای فوری و هدفمند برای اطمینان از پایداری جوامع به سیاست‌های مدیریت آب‌های زیرزمینی، نیاز دارند (Castilla-Raho و Rojas، ۲۰۱۹). ادامه مدیریت ناپایدار منابع آب زیرزمینی در ایران می‌تواند جبران‌ناپذیر باشد؛ این مدیریت ناپایدار بر روی زمین، محیط‌زیست، غذا، امنیت اقتصادی-اجتماعی کشور کارا است (Ashraf و همکاران، ۲۰۲۱). باتوجه به افت سطح ایستابی در بسیاری از آبخوان‌های ایران به دلیل برداشت‌های بی‌رویه از این منابع، اجرای طرح احیاء و تعادل‌بخشی جهت مدیریت آبخوان‌ها به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت دارد (پورصاحی و همکاران، ۱۳۹۹). طرح تعادل‌بخشی، نقطه‌امیدی است که بتوان با اجرای آن بحران به وجود آمده در منابع آب زیرزمینی را بهبود بخشید و با بالا بردن اثربخشی این طرح در دشت‌های بحرانی، بتوان وضعیت این دشت‌ها را بهبود بخشید (کبیری و نظری، ۱۳۹۶). احیاء و تعادل‌بخشی آب‌های زیرزمینی دربرگیرنده تلاش‌های گوناگونی مانند تغذیه مصنوعی، انسداد چاه‌های غیرمجاز و کارگذاشتن کنتورهای هوشمند بر روی چاه‌های بهره‌برداری است که به‌ویژه در دهه اخیر به‌منظور افزایش سطح و حجم آب‌های زیرزمینی مورد توجه زیادی قرار گرفته است (وزارت نیرو، ۱۳۹۴).

در این راستا به بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه احیاء و تعادل‌بخشی آبخوان اشاره می‌شود. رحمانی (۱۳۹۵)، به بررسی نیازهای اجرای طرح احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی کشور پرداخت و بیان کرد باتوجه به نقش تعیین‌کننده آب زیرزمینی در تأمین آب مورد نیاز برای مصارف مختلف مانند شرب، صنعت و کشاورزی در مناطق مختلف کشور، باید برای به‌کارگیری طرح احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی تلاش بسیار نمود. نی‌نیوا و همکاران (۱۳۹۶)، تأثیر کارگذاشتن کنتورهای هوشمند آب و برق بر روی چاه‌های آب در دشت‌های شرق استان کردستان را با استفاده از تحلیل داده‌های چاه‌های بهره‌برداری قبل و بعد از کارگذاشتن کنتور هوشمند، بررسی کردند. نتایج به‌دست آمده از تحلیل میزان برداشت چاه‌های بهره‌برداری بیانگر این است که کنتورهای هوشمند توانایی نگارش اطلاعات میزان برداشت را دارد اما بهره‌برداران با درخواست شارژ اضافه بر مصرف سالانه دوباره موجب افزایش بهره‌برداری آب زیرزمینی و کاهش سطح آب زیرزمینی می‌شوند بنابراین باید تغییر در سیاست‌های تعیین شده ایجاد شود. مقامی‌مقیم و تقی‌پور (۱۳۹۸)، عوامل کارآمد در تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت صفی‌آباد شهرستان اسفراین را بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد

کمتر است. متوسط ارتفاع این گستره نسبت به سطح دریاهای آزاد در بخش‌های شمالی ۱۲۵۰ متر و در نواحی جنوبی ۱۱۵۰ متر می‌باشد.

آبخوان دشت شهریار از نوع آزاد است. آبخوان به نسبت‌های متفاوت از عناصر تخریبی مانند قله سنگ، شن و ماسه، سیلت و رس تشکیل شده است و از نواحی ورودی آب‌های زیرزمینی به سمت بخش‌های میانی و خروجی دشت اندازه ذرات به تدریج کاهش می‌یابد. گستره مورد مطالعه در کوهپایه جنوبی کوه‌های البرز مرکزی قرار گرفته است و شمالی‌ترین فرونشست ایران مرکزی محسوب می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی گستره مورد مطالعه در کشور و استان تهران

به‌طور کلی آبخوان دشت تهران-کرج در طول تاریخ زمین‌شناسی توسط بارش‌ها، جریان رودخانه‌های دائمی و فصلی و سیلاب‌ها تغذیه شده است. علاوه بر این عوامل طبیعی، در سال‌های اخیر پساب‌های انتقالی به دشت تهران از حوضه‌های مجاور و از راه چاه‌های جذبی عامل مصنوعی تغذیه آبخوان است. رودخانه‌های کرج و کن به گستره مورد مطالعه وارد می‌شوند. این دو رودخانه از ارتفاعات جنوبی البرز سرچشمه می‌گیرند (صناعی، ۱۳۹۳).

در گستره مورد مطالعه با توجه به میانگین بارندگی سالانه ۲۲۱/۳ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۵/۴ درجه سانتی‌گراد، برای بازه زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۹، ضریب خشکی منطقه برابر ۸/۷۱ است و در دسته خشک قرار می‌گیرد. براساس سیستم طبقه‌بندی آمبرژه اقلیم منطقه از نوع نیمه خشک سرد تعیین شد.

مواد و روش‌ها

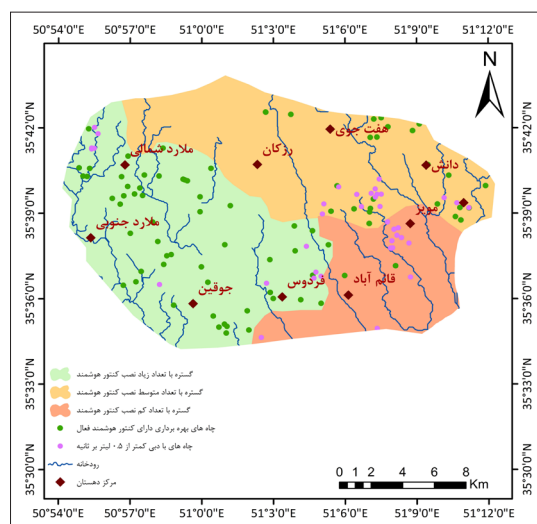
پس از تهیه نقشه گستره مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزارهای Google Earth و GIS موقعیت قرارگیری چاه‌های مشاهده‌ای ارزیابی شد. به منظور تهیه هیدروگراف معرف سطح آب زیرزمینی در کل گستره مورد مطالعه، پس از تحلیل و بررسی سطح آب زیرزمینی در هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای، اطلاعات سطح آب

زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای گستره مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Surfer و روش Kriging در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸، به تفکیک ماه درون‌یابی شد. برای تهیه نقشه‌های هم‌پتانسیل آب زیرزمینی در هر ماه، از میان چاه‌های مشاهده‌ای حفر شده در گستره مورد مطالعه، از اطلاعات سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای حفر شده در آبخوان عمیق و اصلی استفاده شد. نمودار بارش ماهانه مربوط به سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۹۱ تا سال آبی ۱۳۹۹-۱۳۹۸، توسط نرم‌افزار Excel تهیه شد؛ سپس با اضافه کردن نمودار بارش ماهانه به هیدروگراف معرف هر چاه مشاهده‌ای، اطلاعات ماهانه مربوط به سطح آب زیرزمینی هر چاه مشاهده‌ای با اطلاعات ماهانه بارش و همچنین با لاگ‌های در دسترس چاه‌های مشاهده‌ای مقایسه و ارزیابی شد؛ از این روش میزان افت سطح آب زیرزمینی و ابهامات هیدروگراف هر چاه مشاهده‌ای مشخص شد. با بررسی میزان برداشت چاه‌های بهره‌برداری، نوع مصرف این چاه‌ها و کارهای احیاء و تعادل بخشی در هر منطقه، علت افت و خیز سطح آب زیرزمینی در هیدروگراف هر چاه مشاهده‌ای ریشه‌یابی شد.

پس از تحلیل و بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی در هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای، به منظور تجزیه و تحلیل نوسانات سطح آب زیرزمینی در مناطق مختلف گستره مورد مطالعه و دستیابی به میانگین تراز سطح آب زیرزمینی در هر ماه، سطح آب زیرزمینی گستره مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Surfer، از روش Kriging در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸ (به دلیل تکمیل بودن اطلاعات این بازه زمانی و مقایسه سطح آب زیرزمینی قبل از سال ۱۳۹۴ و بعد از سال ۱۳۹۴ به منظور ارزیابی کارایی انجام طرح کارگذاشتن کنتور هوشمند که از سال ۱۳۹۴ در گستره آغاز شده است)، به تفکیک ماه درون‌یابی شد. هر یک از فایل‌های رستری مربوط به درون‌یابی سطح آب زیرزمینی تهیه شده توسط نرم‌افزار Surfer به منظور خروجی گرفتن و تهیه نقشه، به محیط نرم‌افزار GIS اضافه شدند. میانگین سطح آب زیرزمینی برای هر ماه از نقشه مرتبط با آن ماه استخراج شد و از این راه هیدروگراف معرف ماهانه گستره مورد مطالعه برای سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۰، توسط نرم‌افزار Excel تهیه شد.

طرح کارگذاشتن کنتور هوشمند بر روی چاه‌های بهره‌برداری از سال ۱۳۹۴ در گستره مورد مطالعه آغاز شد. از سال ۱۳۹۴ تا پایان سال ۱۳۹۹ تعداد ۱۰۸ شماره کنتور هوشمند بر روی ۱۰۸ حلقه چاه بهره‌برداری کارگذاشته شد. براساس دیدگاه کارشناسان اداره امور آب شهرستان شهریار، چاه‌های بهره‌برداری با نوع مصرف کشاورزی در اولویت کارگذاشتن کنتور هوشمند بودند؛ بعد از چاه‌های کشاورزی اولویت کارگذاشتن کنتور هوشمند با چاه‌های بهره‌برداری با نوع مصرف صنعتی و سپس با چاه‌های بهره‌برداری با نوع مصرف شرب و بهداشت بود؛ به همین دلیل چاه‌های بهره‌برداری دارای

کنتور هوشمند در گستره مورد مطالعه، به صورت یکنواخت توزیع نشده‌اند. برای بررسی میزان کارایی کارگذاشتن کنتور هوشمند بر نوسانات سطح آب زیرزمینی، کل گستره مورد مطالعه براساس تعداد کنتور هوشمند کارگذاشته شده، به سه بخش (بخش با تعداد زیاد، متوسط و کم کارگذاشتن کنتور هوشمند) تفکیک شد (شکل ۲).



شکل ۲- نقشه سه گستره با تعداد زیاد، متوسط و کم کارگذاشتن کنتور هوشمند

برای تجزیه و تحلیل نوسانات سطح آب زیرزمینی و مقایسه این نوسانات در بازه‌های زمانی قبل از کارگذاشتن کنتور هوشمند (قبل از سال ۱۳۹۴) و بعد از کارگذاشتن کنتور هوشمند (سال ۱۳۹۴ و بعد از آن) برای هر گستره، اطلاعات سطح آب زیرزمینی از سال آبی ۱۳۹۱-۱۳۹۰ تا سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ به صورت ماهانه درونبایی شدند. پس از درونبایی این اطلاعات، میانگین سطح آب زیرزمینی هر ماه، از نقشه‌های درونبایی شده استخراج شد و هیدروگراف معرف ماهانه مربوط به هر گستره تهیه شد.

در بخش شمالی گستره مورد مطالعه از سال ۱۳۹۷ تاکنون طرح تغذیه مصنوعی به روش احداث حوضچه‌های آرامش در حال انجام است. به منظور بررسی تاثیر اجرای طرح تغذیه مصنوعی بر افزایش سطح آب زیرزمینی آبخوان گستره مورد مطالعه، نمودار تجمعی مربوط به حجم تجمعی آب نفوذ یافته از روش تغذیه مصنوعی در هر ماه، از سال ۱۳۹۷ تا سال ۱۳۹۹، در نرم‌افزار Excel تهیه شد. به منظور بررسی حجم آب صرفه‌جویی شده از روش انسداد چاه‌های غیرمجاز هر یک از سه گستره با تعداد متفاوت کارگذاشتن کنتور هوشمند، کل چاه‌های غیرمجاز مسدود شده به تفکیک سال مربوط به انسداد چاه در هر یک از گستره‌ها در محیط نرم‌افزار GIS، با استفاده از ابزار clip تفکیک شد و پس از گردآوری اطلاعات چاه‌های مسدود شده در هر سال و در هر گستره در نرم‌افزار Excel، مجموع حجم آب صرفه‌جویی شده

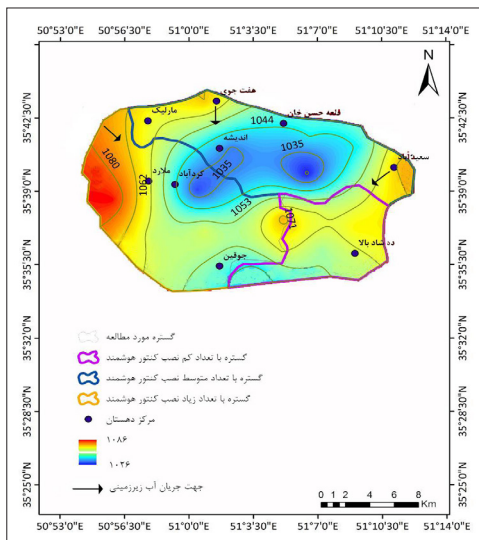
نتایج

بررسی و تحلیل نقشه‌های هم‌پتانسیل آب زیرزمینی، که به صورت ماهانه تهیه شدند، بیانگر آن است که در بازه‌های زمانی مختلف تراز سطح آب زیرزمینی، در نقاط مختلف متفاوت می‌باشد. جهت کلی جریان آب زیرزمینی در بازه زمانی چهار ساله ۱۳۹۴-۱۳۹۰ (قبل از کارگذاشتن کنتور هوشمند)، از دو طرف شمال غرب و شمال شرق به سمت جنوب شرق و جنوب غرب است (شکل ۳). در بازه زمانی چهار ساله ۱۳۹۸-۱۳۹۵ نیز، جهت جریان آب زیرزمینی از غرب و شمال شرق به سمت گستره مورد مطالعه است (شکل ۴).

در بخش مرکزی گستره، نقشه‌های هم‌پتانسیل افزایش سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهند، به گونه‌ای که در این نقاط جهت جریان آب زیرزمینی به طرف شمال گستره مورد مطالعه می‌باشد. با بررسی تعداد چاه‌های بهره‌برداری حفر شده در گستره مورد مطالعه و میزان بهره‌برداری و کاربری هر یک از این چاه‌ها مشخص شد، چاه‌های بهره‌برداری موجود در مناطق شمالی گستره (اندیشه و هفت جوی و باباسلمان) تعداد و میزان برداشت قابل توجهی دارند و نوع کاربری این چاه‌ها به دلیل مسکونی و شهری بودن مناطق شمالی گستره، بیشتر شرب و صنعتی است و پس از مصرف و استخراج آب زیرزمینی، آب برگشتی به آبخوان صورت نمی‌گیرد. به این دلیل در این نواحی افت سطح آب زیرزمینی رخ داده و خطوط هم‌پتانسیل آب زیرزمینی به صورت دایره‌هایی با مرکزهای یکسان در این قسمت‌ها شکل گرفته‌اند. تعداد، عمق و دبی چاه‌های بهره‌برداری حفر شده در مناطق میانی دشت محدود است، همچنین نوع کاربری زمین در این مناطق، کشاورزی است. شاید به دلیل تعداد کم چاه‌های بهره‌برداری و دبی پایین این چاه‌ها نسبت به چاه‌های بهره‌برداری بالادست گستره مورد مطالعه و آب برگشتی کشاورزی به آبخوان، در این مناطق، افزایش سطح آب زیرزمینی نسبت به مناطق اطراف رخ داده است (شکل ۵ و ۶).

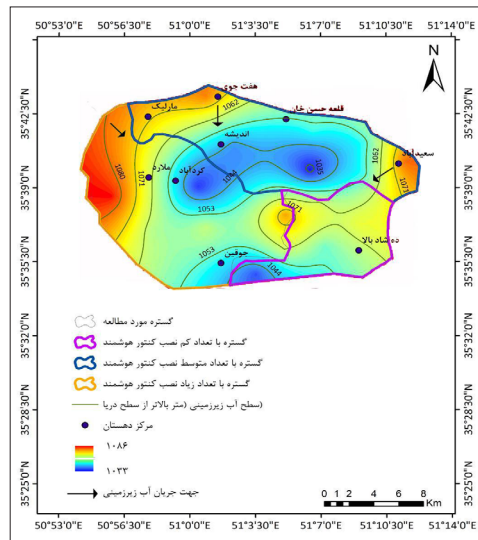
بر اساس توپوگرافی گستره مورد مطالعه، گرادیان هیدرولیکی پایین بین مناطق میانی و مناطق شمالی دشت وجود دارد، بنابراین آب می‌تواند به دلیل افزایش بهره‌برداری در بالادست و شیب هیدرولیکی پایین، به سمت شمال گستره جریان داشته باشد. هیدروگراف معرف ماهانه گستره مورد مطالعه نشان می‌دهد سطح آب زیرزمینی از سال آبی ۱۳۹۱-۱۳۹۰ تا بخش میانی سال آبی

به منظور ارزیابی و مقایسه نوسانات سطح آب زیرزمینی در سه گستره و بررسی کارایی کارگذاشتن کنتور هوشمند، هر سه هیدروگراف ماهانه مربوط به سه گستره در یک نمودار نمایش داده شده‌اند (شکل ۸).



شکل ۴- نقشه هم‌پتانسیل سطح آب زیرزمینی گستره مورد مطالعه سال آبی (۱۳۹۵-۱۳۹۸)

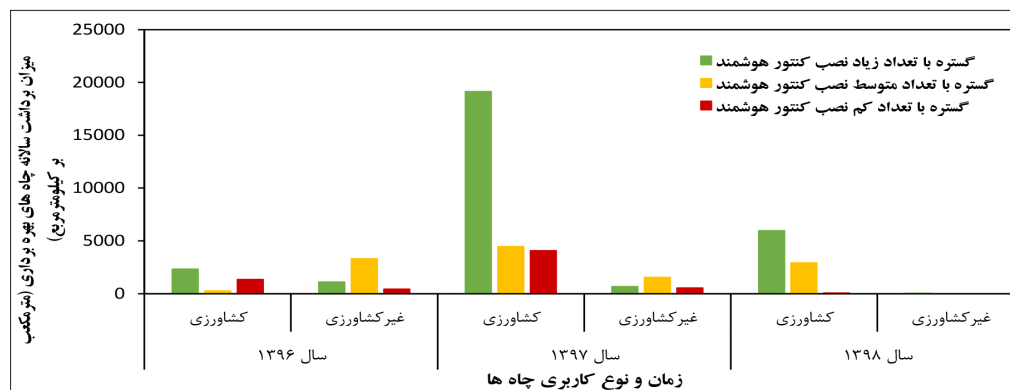
۱۳۹۸-۱۳۹۷ با شیب‌های متفاوتی کاهش یافته است؛ اما پس از اواسط سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ افزایش سطح آب زیرزمینی به دلیل افزایش میزان بارندگی در منطقه و شاید به دلیل تغذیه مصنوعی در شمال منطقه، رخ داده است (شکل ۷).



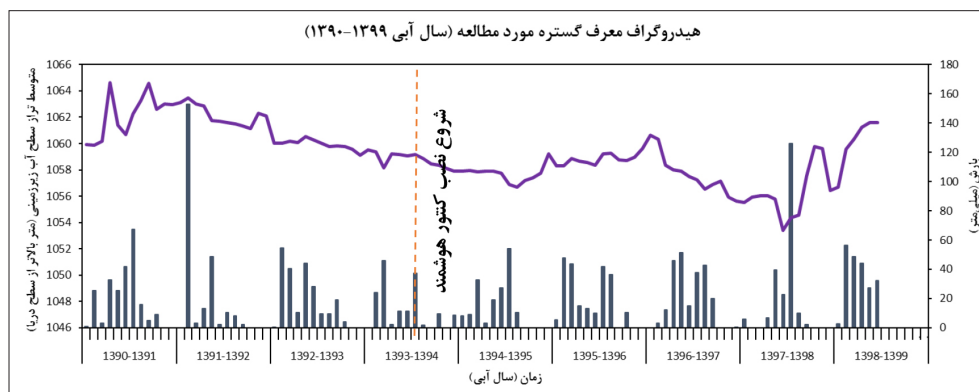
شکل ۳- نقشه هم‌پتانسیل سطح آب زیرزمینی گستره مورد مطالعه سال آبی (۱۳۹۰-۱۳۹۶)



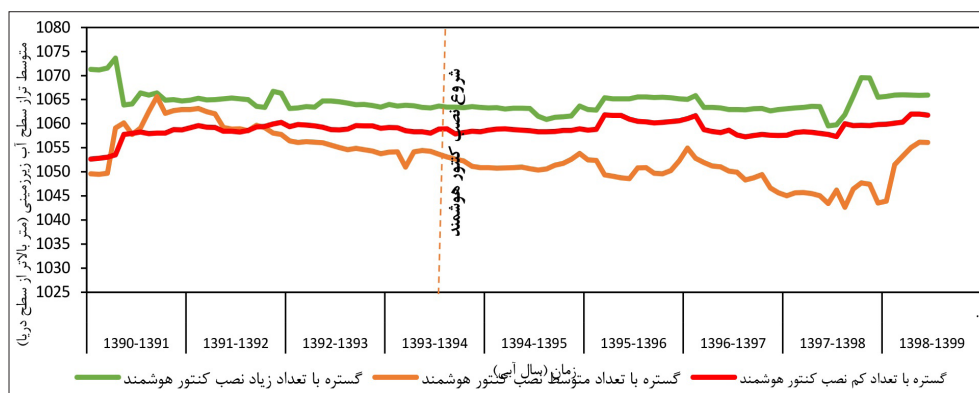
شکل ۵- میزان برداشت سالانه چاه‌های بهره‌بردار در دوم آماربرداری به تفکیک زمان و نوع کاربری



شکل ۶- میزان برداشت سالانه چاه‌های بهره‌بردار در سوم آماربرداری به تفکیک زمان و نوع کاربری



شکل ۷- هیدروگراف معرف ماهانه گستره مورد مطالعه (سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۹۹)



شکل ۸- هیدروگراف معرف ماهانه سه گستره با تعداد زیاد، متوسط و کم کارگذاشتن کنتور هوشمند (سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۹۹)

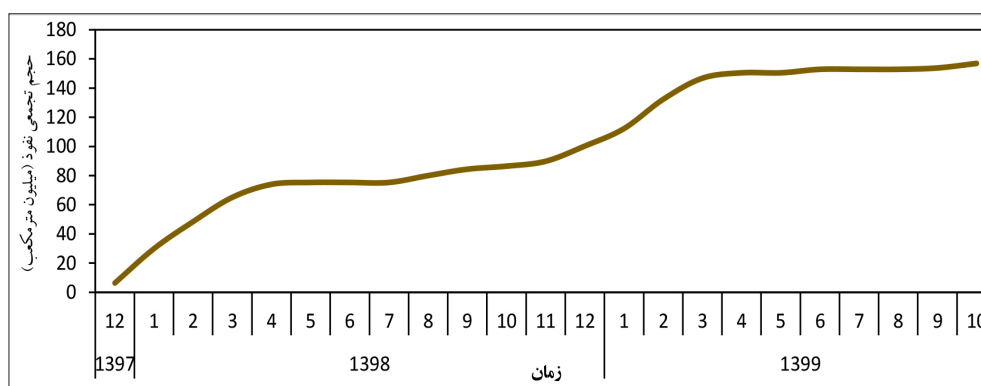
روند نوسانات سطح آب زیرزمینی و شیب نوسانات در هیدروگراف سه گستره در بازه زمانی بعد از کارگذاشتن کنتور هوشمند تقریباً یکسان است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت کارگذاشتن کنتور هوشمند در منطقه کارایی بسیاری بر فرآیند احیاء و تعادل بخشی آبخوان نداشته است. در گستره مورد مطالعه به منظور تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی، در سال‌های اخیر کارهای دیگری مانند انسداد چاه‌های غیرمجاز و تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی در بالادست گستره انجام شده است. در ادامه به تحلیل و بررسی کارایی این کارها بر آبخوان دشت شهریار پرداخته شده است.

باتوجه به اطلاعات حجم نفوذ آب بر اثر انجام طرح تغذیه مصنوعی (برحسب مترمکعب) که این اطلاعات مربوط به اسفند ماه سال ۱۳۹۷ تا دی ماه سال ۱۳۹۹ می‌باشند (شرکت آب منطقه‌ای استان تهران، ۱۴۰۰)، حجم تجمعی نفوذ (برحسب میلیون مترمکعب) برآورد شد و نمودار حجم تجمعی نفوذ (برحسب میلیون مترمکعب) در مقابل زمان تهیه شد (شکل ۹). براساس این نمودار می‌توان نتیجه گرفت، از اسفند ماه سال ۱۳۹۷ تا دی ماه سال ۱۳۹۹، حجم تجمعی آب نفوذ یافته ۱۵۶/۹ میلیون مترمکعب است. این حجم از آب نفوذ یافته اندازه چشمگیری می‌باشد و تأییدکننده این نکته است که تغذیه مصنوعی کارایی

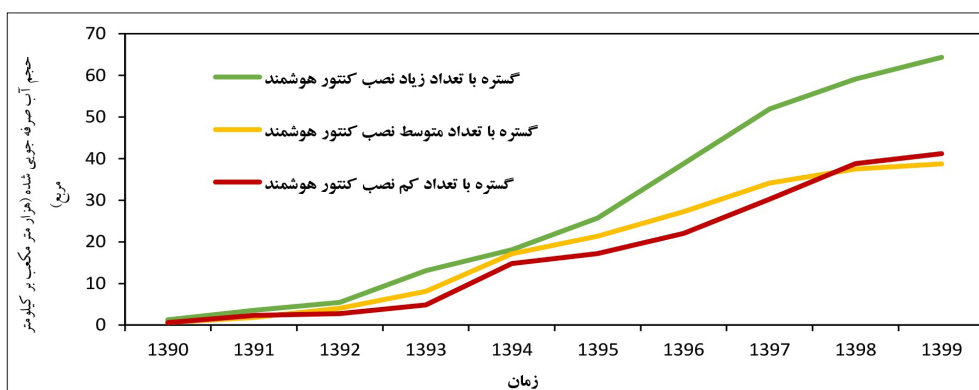
این نمودار نشان می‌دهد، نوسانات سطح آب زیرزمینی در هر سه گستره روند یکسانی دارد و در زمان‌های یکسانی سطح آب زیرزمینی در هر سه گستره افزایش یا کاهش یافته است. شیب نوسانات سطح آب زیرزمینی در هیدروگراف‌های گستره با تعداد زیاد کارگذاشتن کنتور هوشمند و گستره با تعداد کم کارگذاشتن کنتور هوشمند تقریباً یکسان است اما هیدروگراف با تعداد متوسط کارگذاشتن کنتور هوشمند بیانگر این نکته است که سطح آب زیرزمینی با شیب بیشتری در این گستره نسبت به دو گستره دیگر تا آغاز سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ کاهش یافته است؛ ریشه این پدیده می‌تواند برآمده از تعداد بیشتر چاه‌های بهره‌برداری و همچنین بهره‌برداری بیشتر چاه‌های این گستره نسبت به دو گستره دیگر باشد. نوع کاربری چاه‌های بهره‌برداری در این گستره به دلیل نوع کاربری اراضی، بیشتر شرب، بهداشت و صنعتی است و در نتیجه مانند دو گستره دیگر آب برگشتی کشاورزی برای تغذیه دوباره آبخوان انجام نمی‌شود. در گستره با تعداد متوسط کارگذاشتن کنتور هوشمند به دلیل نزدیکی بیشتر با منطقه تغذیه مصنوعی در بالادست منطقه، بعد از سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ سطح آب زیرزمینی با شیب بیشتری نسبت به سه گستره دیگر افزایش داشته است. این موضوع بیانگر آن است که تغذیه مصنوعی در شمال منطقه به میزان قابل توجهی در افزایش سطح آب زیرزمینی آبخوان دست داشته است.

چشمگیری بر روی افزایش سطح آب زیرزمینی در آبخوان گستره مورد مطالعه داشته است. گستره با تعداد متوسط کنتور هوشمند در نزدیکی بیشتری با منطقه تغذیه مصنوعی نسبت به دو گستره با تعداد زیاد و تعداد کم کنتور هوشمند قرار گرفته است، بنابراین پس از بخش آغازی سال ۱۳۹۸ سطح آب زیرزمینی با شیب بیشتری نسبت به دو گستره دیگر، در گستره با تعداد متوسط کنتور هوشمند افزایش یافته است. در گستره مورد مطالعه از سال ۱۳۹۰ تا پایان سال ۱۳۹۹ در مجموع تعداد ۴۵۴ حلقه چاه بهره‌برداری غیرمجاز بسته شده است. اطلاعات حجم آب صرفه‌جویی شده به وسیله انسداد چاه‌های غیرمجاز هر گستره جمع‌آوری و نمودار حجم تجمعی آب صرفه‌جویی شده از روش انسداد چاه‌های غیرمجاز هر گستره، نسبت به مساحت

گستره مربوط به آن، رسم شد (شکل ۱۰). نمودار مربوط به آن نشان می‌دهد، انجام طرح انسداد چاه‌های غیرمجاز باعث صرفه‌جویی ۶۵ هزار، ۴۰ هزار و ۴۲ هزار مترمکعب آب زیرزمینی، به ترتیب در گستره با تعداد زیاد، متوسط و کم کارگذاشتن کنتور هوشمند، از سال ۱۳۹۰ تا سال ۱۳۹۹، شده است. گستره با تعداد زیاد و با تعداد کم کارگذاشتن کنتور هوشمند به ترتیب بیشترین و کمترین حجم تجمعی آب صرفه‌جویی شده از طریق انسداد چاه‌های غیرمجاز طی سال‌های ۱۳۹۰ تا اواسط ۱۳۹۸ را دارا هستند؛ اما پس از اواسط سال ۱۳۹۸ حجم تجمعی آب صرفه‌جویی شده در گستره با تعداد متوسط کارگذاشتن کنتور هوشمند کمتر از گستره با تعداد کم کارگذاشتن کنتور هوشمند است (شکل ۱۰).



شکل ۹- نمودار حجم تجمعی نفوذ به آبخوان گستره مورد مطالعه از طریق تغذیه مصنوعی



شکل ۱۰- نمودار حجم تجمعی آب صرفه‌جویی شده از طریق انسداد چاه‌های غیرمجاز به تفکیک زمان و گستره

۱۳۹۷ سطح ایستابی با شیب بیشتری افت می‌کند؛ زیرا گستره با تعداد متوسط کارگذاشتن کنتور هوشمند مناطق مسکونی و شهری بیشتری دارد؛ بنابراین، بیشتر چاه‌های بهره‌برداری جا گرفته شده در این مناطق مصرف صنعتی و شرب دارند، در نتیجه هنگام مصرف و برداشت آب زیرزمینی، آب برگشتی به آبخوان رخ نمی‌دهد و افت بیشتری در این گستره نسبت به دو گستره دیگر رخ می‌دهد. پس از بخش پایانی سال ۱۳۹۷ در هر سه گستره افزایش سطح

نتیجه‌گیری

شیب و روند نوسانات سطح آب زیرزمینی در گستره با تعداد زیاد کارگذاشتن کنتور هوشمند و گستره با تعداد کم کارگذاشتن کنتور هوشمند یکسان است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت کارگذاشتن کنتور هوشمند کارایی چندانی در افزایش سطح آب زیرزمینی گستره مورد مطالعه نداشته است. در گستره با تعداد متوسط کارگذاشتن کنتور هوشمند تا بازه زمانی پیش از بخش پایانی سال

ایستابی رخ داده است اما در هیدروگراف گستره با تعداد متوسط کارگذاشتن کنتور هوشمند این شیب بیشتر است. بنابراین، باتوجه به اینکه گستره با تعداد متوسط کارگذاشتن کنتور هوشمند نزدیکی بیشتری با منطقه اجرای طرح تغذیه مصنوعی دارد و اجرای طرح تغذیه مصنوعی از اسفند ماه سال ۱۳۹۷ در منطقه آغاز شده است، در نتیجه تغذیه مصنوعی کارایی زیادی بر افزایش سطح آب زیرزمینی آبخوان گستره داشته است. باتوجه به مقایسه تاثیر اقدامات تعادل بخشی در گستره مورد مطالعه، می توان نتیجه گرفت اجرای طرح تغذیه مصنوعی کارایی بیشتری نسبت به اجرای طرح انسداد چاه های غیر مجاز و کارگذاشتن کنتور هوشمند بر روی چاه های بهره برداری، بر احیای آبخوان گستره مورد مطالعه دارد. علاوه بر کنترل میزان برداشت بهره برداران، صدور پروانه و مجوز حفر چاه های بهره برداری نیز باید کنترل شود؛ چون باوجود تعیین حقایق معقول برای هریک از چاه های بهره برداری و کنترل میزان برداشت بهره بردار، مجموع میزان برداشت از آبخوان با افزایش تعداد چاه های بهره برداری افزایش می یابد. کنترل حفر چاه های مجاز، موجب سادگی مدیریت و کنترل میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی می شود و مجموع بهره برداری از آبخوان نیز کاهش می یابد.

منابع

پورصالحی، ف.، اکبرپور، الف. و هاشمی، ر. ۱۳۹۹. بررسی اثر تغذیه مصنوعی به روش چاه تزریق بر تراز آبخوان آزاد با استفاده از مدل عددی MODFLOW (مطالعه موردی: دشت بیرجند). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۴ (۳): ۹۸۱-۹۹۲.

رحمانی، ح. ۱۳۹۵. ضرورت های اجرای طرح احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور. ششمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران. دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

شرکت آب منطقه ای استان تهران. ۱۴۰۰. اطلاعات تغذیه مصنوعی منطقه سرحد آباد.

شهبازی، الف.، صفری، ف. و کتابچی، ح. ۱۳۹۹. مدل سازی اقدامات مدیریتی در کنترل افت سطح تراز آب زیرزمینی (دشت هشتگرد استان البرز). تحقیقات منابع آب، ۱۶ (۱): ۱۱۶-۱۳۴.

صناعی، م. ۱۳۹۳. عوامل موثر بر تخریب ساختمان و کاهش عمر مفید چاه های آب در آبخوان دشت شهریار. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده علوم پایه. تهران، ایران.

کبیری، ش. و نظری، ب. ۱۳۹۶. ارزیابی اثربخشی طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی. اولین اجلاس «هم اندیشی با متخصصان علوم آب و محیط زیست». وزارت نیرو. https://waterhouse.ir/sites/default/files/117_0.pdf

مقامی مقیم، غ. ر. و تقی پور، ع. الف. ۱۳۹۸. بررسی عوامل در تغییرات سطح آب های زیرزمینی دشت صفی آباد شهرستان اسفراین. مجله علمی پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان، ۸ (۲۲): ۴۲-۲۷.

نیرومندفرد، ف.، خریمه نژاد، ح. و خاشعی سیوکی، ع. ۱۳۹۹. بررسی معیارهای مدیریتی و هیدروژئولوژیکی بر تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی دشت سرایان. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۰ (۴۰): ۲۱۰-۲۲.

نی نیوا، پ.، عزیزی کاشانتویی، م.، خالدین، و. و فغانی، ع. ۱۳۹۶. بررسی تاثیر نصب کنتورهای هوشمند آب و برق بر روی چاه های آب (مطالعه موردی: دشت های شرق استان کردستان). سومین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه. موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران.

وزارت نیرو. ۱۳۹۴. طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی. دستورالعمل ششم: دستورالعمل نصب و بهره برداری کنتورهای هوشمند (حجمی و آب و برق). معاونت امور آب و آبفا. دفتر نظام های بهره برداری و حفاظت آب و آبفا.

Ashraf S., Nazemi A. and Aghakouchak A. 2021. Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran, Scientific Reports, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88522-y>.

Bragalli C. and Toth, E. 2019. Effective of smart meter-based urban water loss assessment in a real network with synchronous and incomplete readings. Environmental Modelling & Software, 112 (46): 128-142.

Castilla-Rho J. and Rojas R. 2019 Sustainable groundwater management: How long and what will it take?. Journal of Global Environmental Change, 58. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101972>.

Pal S., Kundu S. and Mahato S. 2020. Groundwater potential zones for sustainable management plans in river basin of India and Bangladesh. Journal of Cleaner Production. 257. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120311>.

Todd D. K. and Mays L. W. 2005. Groundwater Hydrology. John Wiley & Sons Inc, Third Ed., New York, USA.

Wang X., Shao J., Steenbergen F. V. and Zhang Q. 2017. Implementing the prepaid smart meter system for irrigated groundwater production in northern China: Status and Problems. 9: 6. <https://doi.org/10.3390/w9060379>.

Pathology of Water Governance in Yazd

L. Bonyad¹, A. Zare Shahabadi^{2*}, M. Parsamehr³

1,2- PhD Student and Associate professor, Department of Human Sciences, Faculty of Sociology, Yazd University, Iran. 3- Associate Professor, Department of Cooperation and Social Welfare, Faculty of Sociology, Yazd University, Iran.

*(Corresponding Author Email: a_zare@yazd.ac.ir)

Received: 07-04-2022

Revised: 29-08-2022

Accepted: 10-09-2022

Available Online: 21-12-2022

آسیب شناسی حکمرانی آب در یزد

لیلی بنیاد^۱، اکبر زارع شاه آبادی^{۲*}، مهربان پارسامهر^۳

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار جامعه شناسی، بخش جامعه شناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه یزد، ایران. ۳- دانشیار بخش تعاون و رفاه اجتماعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه یزد، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: a_zare@yazd.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹

Abstract

Water governance is a decision-making process in a set of political, economic, social, and executive systems in order to plan, develop water resources management and provide water services in different parts of society. Yazd province is one of the driest provinces in the country due to being located on the central plateau. Therefore, it seems that water governance is necessary in such a way that in different sectors of agriculture, drinking water hygiene, and industry, the main goal project is, to have optimal consumption, and water resources are not destroyed. The approach of the present research is qualitative; The foundation's data method and data collection technique were semi-structured in-depth interviews with three groups of managers and administrative experts, independent experts and experts in the water field, and employers in the industry and agriculture sectors. which were selected by purposeful sampling until reaching theoretical saturation. The data analysis technique was also open, central, and selective coding. The findings of the research showed that the water governance model is based on self-interested governance. This type of governance means paying attention to immediate and present interests and not paying attention to the state of water resources for the future, which has characteristics such as orders from the top to bottom, show, temporary, without paying attention to environmental issues and sustainable development. There has been a lack of interaction between the people and the officials and the defective participation of the stakeholders.

Keywords: Pathology, Governance, Self-Interested Governance, Imperative Governance, Yazd.

چکیده

حکمرانی آب، فرآیند تصمیم‌گیری در مجموعه‌ای از سیستم‌های سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و اجرایی به منظور برنامه‌ریزی، توسعه و مدیریت منابع آب و ارائه خدمات آب در بخش‌های مختلف جامعه می‌باشد. استان یزد به دلیل واقع شدن در فلات مرکزی، یکی از خشک‌ترین استان‌های کشور است. بنابراین حکمرانی آب به گونه‌ای که بخش‌های مختلف کشاورزی، شرب-بهداشت، صنعت و همچنین ذی‌نفعان اصلی، مصرف بهینه‌ای داشته باشند و منابع آب نیز تخریب نگردد، ضروری به نظر می‌رسد. هدف پژوهش حاضر آسیب‌شناسی فرآیند تصمیم‌سازی و عملکرد مدیران در حوزه حکمرانی آب در یزد است. رویکرد پژوهش حاضر کیفی، روش داده‌بنیاد و تکنیک جمع‌آوری اطلاعات مصاحبه عمیق نیمه‌ساختاریافته با سه گروه از مدیران و کارشناسان اداری، صاحب‌نظران و خبرگان آزاد حوزه آب و کارفرمایان بخش صنعت و کشاورزی بوده است که به روش نمونه‌گیری هدفمند تا رسیدن به اشباع نظری انتخاب شدند. تکنیک تحلیل داده‌ها نیز کدگذاری باز، محوری و انتخابی بوده است. یافته‌های پژوهش نشان داد که مدل حکمرانی آب در یزد، حکمرانی منفعت‌طلبانه است. این نوع حکمرانی به معنای توجه به منافع آنی و کنونی و عدم توجه به وضعیت منابع آب برای آیندگان می‌باشد که دارای ویژگی‌هایی چون حکمرانی دستوری و از بالا به پایین، نمایشی، موقتی، بدون توجه به مسائل زیست‌محیطی و توسعه‌پایدار، عدم وجود تعامل بین مردم و مسئولین و همراه با مشارکت معیوب بهره‌برداران بوده است.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌شناسی، حکمرانی، حکمرانی منفعت‌طلبانه، حکمرانی دستوری، یزد.

در چند دهه گذشته، نگرانی‌های زیست‌محیطی مورد توجه روزافزون قرار گرفته است. امروزه تغییرات آب و هوایی، کنترل آلودگی، بهره‌برداری بیش از حد از منابع، حفظ تنوع زیستی و مدیریت منابع آب از دغدغه‌های مهم عمومی در مقیاس محلی، منطقه‌ای، ملی و جهانی است. تخریب محیط‌زیست و بحران‌ها و خطرات مرتبط با سلامت انسان، همراه با تداوم فقر، موجب شک نسبت به توسعه فناوری و رشد اقتصادی شده و در عین حال، در مورد توانایی سیاست‌گذاران آب در رسیدگی به موقع به مشکلات تردید ایجاد کرده است (Ahmadov, 2020).

کمیابی و کمبود منابع آب از موضوعات چالش برانگیز به ویژه در چند دهه اخیر است. امروزه میزان آب در دسترس مانند گذشته نیست؛ چرا که علاوه بر رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای آب، جهان با تغییرات اقلیمی و گرمایش شدیدی مواجه شده است. همچنین در دهه‌های اخیر روند تصمیم‌سازی در حوزه آب نامناسب بوده است. پیچیدگی و چندلایه بودن؛ مسأله آب نیازمند مدیریت چندمنظوره و سطح به سطح در حوزه تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری؛ کرده است. در این حالت وجود سناریوهای متعدد در حوزه منابع آب می‌تواند به پیش‌بینی رفتار کنشگران و متناسب با آن، تصمیم‌گیری مدیران به منظور انتخاب بهترین راه کمک کند. صفویان و همکاران (۱۳۹۶) نشان دادند که با استفاده از سناریوسازی می‌توان برنامه مدیریتی برای حوضه آبریز موردنظر را با توجه به تغییراتی که ممکن است در آینده‌ای نزدیک ایجاد شود، ارائه کرد؛ بنابراین این فعالیت‌های مدیریتی امکان بهبود کیفیت آب در آینده را پیش‌بینی می‌کنند. یکی از راه‌های دستیابی به توسعه، داشتن الگوی حکمرانی مناسب با منطقه مورد نظر است، الگویی که ضمن برآورد نیازهای صنعتی و تولید، سازگاری با اقلیم را مدنظر قرار دهد. مفهوم‌شناسی واژه حکمرانی اشاره به پاسخگو بودن، هم در زمینه سیاست‌گذاری و هم در حوزه اجرا دارد (بدیسار و احمدی، ۱۳۹۶). حکمرانی، مفهومی؛ شامل کنشگران (فعالان) از دستگاه دولتی، بخش غیردولتی و جامعه مدنی در فرآیند تصمیم‌گیری مشورتی است (Cars, 2002). چنانچه اصطلاح حکمرانی را با حوزه آب پیوند زنیم و همین شیوه مدیریت را در قالب حوزه آب بحث کنیم؛ حکمرانی آب، مجموعه‌ای از سیستم‌های سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و اجرایی به منظور توسعه و مدیریت منابع آب و ارائه خدمات آب در بخش‌های مختلف جامعه می‌باشد (Hall و Rogers, 2003). سالاریان و همکاران (۱۳۹۸) نشان دادند برای رسیدن به یک چشم‌انداز مشترک در حوضه آبریز کشف‌رود، نیازمند مشارکت و درگیر نمودن کنشگران کلیدی به منظور افزایش مشارکت آنان و ارائه چارچوبی جهت شناسایی،

تحلیل و مشارکت کنشگران کلیدی در فرآیند تصمیم‌سازی این حوضه آبریز است. حکمرانی آب در ایران نامناسب بوده است. بر اساس پژوهش‌های بدیسار و همکاران (۱۳۹۹) باور بر این است که مشکلات آبی امروز و فردای کشور بیش‌تر پیامد حکمرانی نامطلوب هستند تا مطلقاً کم‌آبی. همچنین نتایج پژوهش رحیمی و همکاران (۱۴۰۰) نشان داد که رژیم حکمرانی کنونی در چهار شهرستان ارسنجان، نیریز، خرامه و استهبان، رژیم رانت‌خواه متمرکز می‌باشد؛ که از ویژگی‌های شیوه حکمرانی سلسله مراتبی تلقی می‌شود. بنی‌اسدی و پالوج (۱۳۹۹) نیز در پژوهش خود اذعان داشتند که مشکل اصلی منابع آب در کشور، وجود حکمرانی بد و نامطلوب و سامانه مدیریتی ناکارآمد است. ترتیبات نهادی نامناسب، مدیریت از هم گسسته، عدم شفافیت و عدم مشارکت ذی‌نفعان در مدیریت، از جمله ویژگی‌های سامانه حکمرانی فعلی منابع آب در کشور است. بسیاری از مردم از توانایی دولت برای رفع معضلات و چالش‌های بخش آب ناامید شده‌اند؛ این امر موجب تجدیدنظر در تئوری‌های سنتی مدیریت دولتی گشته است؛ بنابراین مدیریت متمرکزگرا و بالا به پایین که در گذشته به عنوان ابزاری قوی برای حل مشکلات اجتماعی فرض می‌شد، با بحران هویت مواجهه شده است (الوانی و علیزاده‌ثانی، ۱۳۸۶).

متوسط بارندگی استان یزد در دوره ۳۰ ساله آماری (۱۳۶۶-۱۳۹۵) ۹۷/۹ میلی‌متر و متوسط بارندگی سالانه شهر یزد در همین دوره، ۴۶ میلی‌متر است. این ارقام در سال‌های اخیر کاهش یافته است؛ به طوریکه در دوره ۱۰ ساله منتهی به سال ۱۳۹۵ متوسط بارندگی به ترتیب ۷۸/۱ و ۳۵/۷ است. متوسط بارندگی استان یزد در حدود ۲ درصد حجم نزولات جوی کشور است که با وجود پتانسیل سالانه تبخیر ۳۱۹۳ میلی‌متر، بیش از ۹۰ درصد این مقدار، تبخیر می‌شود. متوسط سالانه دما ۱۷ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۳۳ درصد است (کانون تفکر آب-بیانیه شماره ۱، ۱۳۹۷). همین پیشینه آب و هوایی به بهترین شکل، وضع کمبود بارش و افزایش تبخیر در شهر یزد را نشان می‌دهد. بنابراین با این وضعیت پرداختن به حکمرانی آب، هم در بخش کشاورزی که بیشترین مصرف‌کننده آب به میزانی در حدود ۹۶۲/۷ میلیون مترمکعب (۸۹ درصد) و هم در بخش صنعت که ۴/۴ میلیون مترمکعب (۴/۴ درصد) از منابع آب را مصرف می‌کند؛ ضروری به نظر می‌رسد (کانون تفکر آب-بیانیه شماره ۲، ۱۳۹۷). بر اساس داده‌های آماری جهاد کشاورزی استان یزد، سطح زیرکشت استان در سال ۱۳۹۶، شامل ۷۶۸۴۱ هکتار در بخش باغی و ۳۹۸۵۲ هکتار در بخش زراعی می‌باشد. محصولات باغی استان شامل پسته، بادام، زیتون، زردآلو، انار، انگور، خرما، گردو، زعفران، محصولات گلخانه‌ای و گیاهان دارویی و محصولات زراعی استان شامل گندم، جو، ذرت دانه‌ای، کنجد، یونجه، ارزن، سورگوم، زیره، روناس، سبزی و صیفی است. در حال حاضر، فقط

در ۲۴ هزار هکتار از سطح زیرکشت، از روش‌های نوین آبیاری استفاده می‌شود. بازده آبیاری در بخش کشاورزی معادل ۴۵ درصد است. سرانه سالانه مصرفی آب کشاورزی برابر ۷۷۶۲ مترمکعب بر هکتار و حجم سالانه آب مصرفی در این بخش برابر ۹۲۶ میلیون مترمکعب است. در حال حاضر، استان یزد صادرکننده تولیدات کشاورزی مانند روناس، پسته، انار، زعفران و محصولات گلخانه‌ای است (کانون تفکر آب-بیانیه شماره ۳، ۱۳۹۷).

این استان به لحاظ صنعتی بودن، یکی از استان‌های مهاجریز کشور محسوب می‌شود، به نحوی که تنها در سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰، خالص مهاجرت به استان ۱/۹ درصد اعلام شده است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵) و از این لحاظ در جایگاه سوم قرار دارد. البته علی‌رغم اینکه استان یزد در زمره استان‌های صنعتی کشور به شمار می‌آید، ولی بخش خدمات، بیشترین سهم اشتغال استان را به خود اختصاص داده است؛ سهم اشتغال بخش خدمات از کل اشتغال استان در سال ۱۳۹۵، ۴۶/۳ و بخش‌های کشاورزی و صنعت به ترتیب دارای سهم ۲/۸ و ۲۸/۳ درصدی بوده‌اند. مشارکت اقتصادی استان یزد در سال ۱۳۹۸، ۴۰/۸ درصد و دارای رتبه هفتم کشور رسیده است. نرخ بیکاری استان ۱۲/۸ درصد و دارای رتبه یازدهم کشور و بالاتر از نرخ بیکاری کشور (۱۲/۴) می‌باشد. همچنین نرخ بیکاری زنان استان ۲۷ درصد و دارای رتبه سوم کشور بعد از کرمان و البرز و نرخ بیکاری کل استان برای مردان، ۳ درصد بوده است (کانون تفکر اقتصاد، ۱۳۹۸).

به لحاظ اجتماعی نیز مردم یزد از دیرباز به واسطه زندگی در شهر کویری و تلاش برای رفع نیازهای خود به شهر قنات و قنوت و قناعت مشهور بوده‌اند. از طرفی شهر یزد اولین شهر خشت خام جهان و دومین شهر تاریخی جهان است، بنابراین به لحاظ گردشگری، دارا بودن کویر و موزه‌های آبی شرایط مناسبی را برای جذب گردشگر فراهم آورده است؛ زارع شاه‌آبادی و بنیاد (۱۳۹۷) در پژوهشی با عنوان تحلیل ثانویه تحقیقات موجود درباره نقش قنات، بافت تاریخی و گردشگری شهری (گردشگری آب؛ حلقه مفقوده حکمرانی آب)؛ نشان دادند که در سال‌های اخیر توجه مدیران و برنامه‌ریزان شهری به نقش قنات به عنوان یکی از راه‌های جذب گردشگر، افزایش یافته است. بنابراین جذب گردشگر از طریق گردشگری آب، هم از نظر شهروندان و هم از دیدگاه گردشگران داخلی و خارجی نقش موثری در بهبود گردشگری شهری داشته است.

به لحاظ تقسیمات سیاسی، استان یزد دارای ۱۰ شهرستان، ۲۲ بخش، ۴۶ دهستان و ۲۳ نقطه شهری می‌باشد. استان یزد با مساحتی حدود ۷۶/۵۰۰ کیلومتر مربع، رتبه هشتم و با جمعیت ۱,۱۳۸,۵۳۳ نفر (سرشماری ۱۳۹۵)، رتبه بیست و چهارم را در کشور دارا می‌باشد. نرخ شهرنشینی در این استان ۸۵/۳۲ درصد و تراکم جمعیت ۱۵/۴۶ نفر در کیلومتر مربع می‌باشد.

در مرکز استان نهادی به نام شرکت آب منطقه‌ای استان یزد فعالیت دارد که تصمیمات مربوط به تهیه و تخصیص منابع آب و همچنین حفاظت و بهره‌برداری از آنها را با هماهنگی بخش‌های مختلف مثل سازمان جهاد کشاورزی و سازمان آب و فاضلاب انجام می‌دهد. فعالیت‌های شرکت آب منطقه‌ای در ۵ حوزه مطالعات پایه منابع آب، طرح و توسعه، حفاظت و بهره‌برداری، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع انسانی، مالی و پشتیبانی می‌باشد. مهمترین وظایف این شرکت، انجام مطالعات لازم برای شناخت، توسعه و بهره‌برداری از منابع آب استان، تهیه و اجرای طرح‌ها و پروژه‌های تأمین و عرضه آب، مهندسی رودخانه‌ها، کنترل سیلاب و تغذیه مصنوعی، ایجاد، بهره‌برداری و نگهداری از تأسیسات و سازه‌های تأمین و عرضه آب، انجام اقدامات لازم به منظور جلوگیری از افت منابع و جبران آب زیرزمینی در چارچوب قوانین و مقررات، حفاظت و بهره‌برداری بهینه از منابع آب در چارچوب سیاست‌ها یا ضوابط و برنامه‌های مصوب وزارت نیرو، انتقال آب خارج از حوضه به استان یزد، بهره‌برداری از منابع آب مورد نیاز بخش‌های مختلف مصرف در قالب تخصیص مصوب وزارت نیرو و ترویج فرهنگ استفاده صحیح از آب، می‌باشد (تاریخچه آب منطقه‌ای یزد، ۱۳۹۳).

استان یزد از یک سو به واسطه اقلیم گرم و خشک، میانگین بارندگی سالانه ۹۷/۹ میلی‌متر و میزان تبخیر زیاد، دارای آب و هوایی خشک است و از سوی دیگر مصارف آب به ویژه در دو بخش کشاورزی به واسطه کشت محصولات آب‌بر مانند صیفی‌جات و وجود صنایع متعدد آب‌بر همچون صنایع فولاد، کاغذ، کاشی، سرامیک و نساجی، بسیار بالاست به گونه‌ای که مسئولان استان به منظور تأمین منابع آبی در این دو بخش، مجبور به انتقال آب از خلیج فارس و دریای عمان شده‌اند و از همه مهم‌تر اینکه شواهد موجود حاکی از وجود یک نوع حکمرانی خاص منابع و مصارف آب را می‌دهد. اکنون سوال اصلی این مقاله این است که با توجه به مطالب بالا، حکمرانی آب در دهه‌های اخیر در استان یزد چگونه بوده و چه ویژگی‌هایی داشته است؟

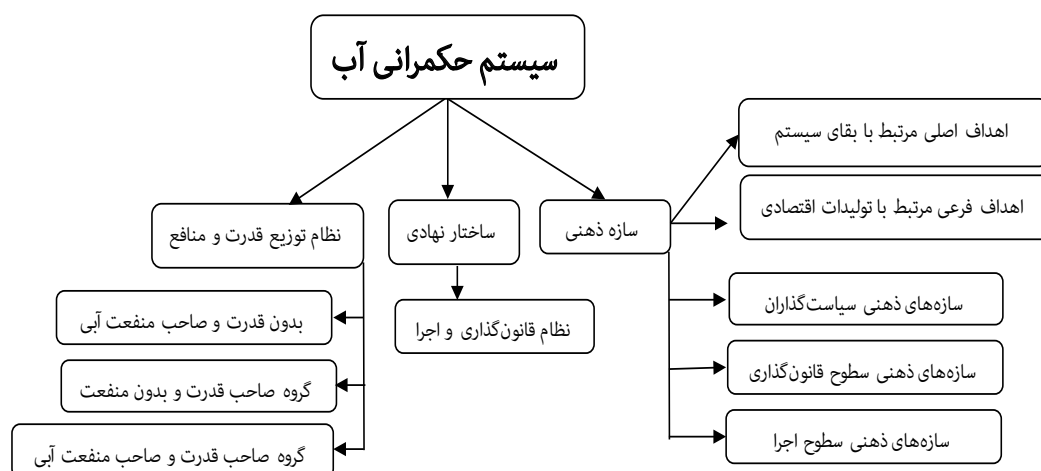
حساسیت نظری

دیکشنری اکسفورد^۲ «حکمرانی» را اینگونه تعریف کرده است: عمل یا شیوه اداره یک دولت، سازمان/ نحوه مدیریت سازمان‌ها یا کشورها در بالاترین سطح و سیستم‌های انجام این کار. در فرهنگ لغات بین‌المللی وبستر^۳ نیز واژه حکمرانی به معنای حکومت، فرمانروایی، امارت، تدبیر و نظارت معنا شده است. از نظر Rhodes (۱۹۹۶) حکمرانی به «شبکه‌های بین سازمانی و خود سازماندهی شده» اشاره دارد. از دیدگاه Fukuyama (۲۰۱۳) حکمرانی عبارت است از «توانایی حکومت برای ایجاد و اجرای قوانین و ارائه

خدمات بدون توجه به اینکه این دولت دموکراتیک است یا نه». برخی صاحب نظران استدلال می کنند که حکمرانی فعالیت دولت ها و نحوه ارتباط آن با سایر فعالیت ها در جامعه است (Westraeus, ۲۰۱۶). سازمان ملل متحد تعریف جامعی از حکمرانی خوب ارائه داده است که عبارت است از «مشارکت، شفافیت و پاسخگویی که موثر و عادلانه است و حاکمیت قانون را ترویج می دهد». حکمرانی خوب تضمین می کند که اولویت های سیاسی، اجتماعی و اقتصادی مبتنی بر اجماع گسترده در جامعه است و صدای فقیرترین و آسیب پذیرترین افراد در تصمیم گیری در مورد تخصیص منابع توسعه، باید شنیده شود (Al-Khalidi, ۲۰۱۴).

نظریات مختلفی در خصوص حکمرانی آب وجود دارد، برخی از صاحب نظران معتقدند نظریات پیرامون حکمرانی آب در سه سطح چیستی، چرایی و چگونگی قابل بررسی است. نظریات مربوط به سطح چیستی؛ شامل تشریح مفهوم حکمرانی آب و سیر تاریخی می باشد. این دسته از پژوهش ها به تبیین مفهوم حکمرانی آب پرداخته و اغلب با بیان سیر تحول نظریه های حکمرانی آب، حکمرانی خوب را به عنوان آخرین نظریه معرفی نموده اند. نظریات مربوط به سطح چرایی در واقع به بررسی اثر حکمرانی آب بر پارامترهای مختلف و بالعکس تأثیر پارامترهای مختلف بر حکمرانی آب پرداخته اند، نظریات مربوط به سطح چگونگی نیز با گسترش دامنه پژوهش خود و در نظر گرفتن شرایط بومی و ملی، سعی در ارائه الگویی برای چگونگی حکمرانی آب در ایران داشته اند یا روش های اجرایی و دستیابی به حکمرانی مطلوب را ارائه داده اند (اسکوئی و اسماعیلی، ۱۴۰۰). پژوهش حاضر با الهام از سطح سوم (چگونگی) - چنانچه سطوح تحلیل را در سه بخش چیستی، چرایی و چگونگی مورد بررسی قرار دهیم- سیستم حکمرانی آب را در سه بعد، ساختار نهادی، سازه های ذهنی و

نظام توزیع قدرت و منافع، مورد توجه قرار می دهد. مطابق با نظریه استروم، تحلیل نهادی حکمرانی آب در سه حوزه فرآیند تصمیم سازی، ساختار نهادی^۴ و عملکرد، بررسی می شود. سطح اول (فرآیند تصمیم سازی): این سطح شامل شاخص های حکمرانی خوب مبتنی بر فهرست پیشنهادی سازمان ملل در برنامه ریزی ارزیابی جهانی آب است (United Nation, ۲۰۰۶). مولفه های هشتگانه حکمرانی خوب عبارتند از: پاسخ دهی، شفافیت، اثربخشی و بازدهی، انسجام، مسئولیت پذیری، مشارکت، حاکمیت قانون و عدالت. سطح دوم (عملکرد): عملکرد را از طریق مولفه های سازماندهی و ظرفیت سازی در بخش آب، برنامه ریزی راهبردی، تخصیص آب، توسعه و مدیریت منابع آب و تنظیم منابع آب و خدمات مرتبط؛ مورد بررسی قرار می دهد. سطح سوم (ساختار): این سطح شامل قوانین، سیاست ها و مدیریت سازمانی می باشد. در ادبیات مدیریت منابع آبی، سازه های ذهنی به طرز فکر بخش اجرا در مورد اهداف (فرعی) مرتبط با تولیدات اقتصادی و اهداف (اصلی) مرتبط با بقای سیستم اکولوژیک (حفاظت از منابع آب) و طریقه رسیدن به آن اطلاق می شود. این سازه های ذهنی در سه سطح سازه های ذهنی سیاست گذاران و سازه های ذهنی سطوح قانون گذاری تا اجرا قابل تقسیم است. بعد سوم سیستم حکمرانی آب نظام توزیع قدرت و منافع است. در این بعد افراد بر اساس منفعت آبی به سه بخش «گروه صاحب قدرت و بدون منفعت آبی»، «گروه صاحب قدرت و صاحب منفعت آبی» و «گروه بدون قدرت و صاحب منفعت آبی» تقسیم بندی می شوند که بیشتر تصمیمات در نظام حکمرانی در حوزه تصمیم سازی و وضع قوانین و مقررات و همچنین عملکرد اجرا، متأثر از منفعت و قدرت می باشد. (فرزانه و همکاران، ۱۳۹۶). در شکل (۱) مدل مفهومی مبتنی بر این حساسیت نظری، ترسیم گردیده است.



شکل ۱- مدل مفهومی تحقیق

این پژوهش با رویکرد کیفی و روش داده بنیاد انجام شده است. در این روش پژوهشگر می‌خواهد از طریق تحلیل سیستماتیک داده‌ها به یک نظریه استقرایی در یک قلمرو واقعی برسد (Glaser, ۱۹۹۲). داده‌های تحقیق از طریق مصاحبه نیمه‌ساختاریافته جمع‌آوری شده است. روش نمونه‌گیری در نظریه داده بنیاد از نوع نمونه‌گیری هدفمند^۵ است. این روش انتخاب آگاهانه شرکت‌کننده‌های خاص توسط پژوهشگر می‌باشد (قاسمی شریانی و همکاران، ۱۳۹۷). جامعه آماری تحقیق سه گروه از مدیران و کارشناسان اداری، صاحب‌نظران و خبرگان آزاد حوزه آب و کارفرمایان بخش صنعت و کشاورزی بوده است که تعداد ۲۸ نفر از آنها از طریق اشباع نظری^۶ به عنوان نمونه انتخاب شدند. بدین معنا مصاحبه‌ها تا جایی پیش رفت که مشارکت‌کنندگان در پژوهش به کفایت تجربی داده‌ها رسیدند. سنجش درستی داده‌ها در پژوهش کیفی از طریق اعتبارپذیری/ قابلیت اعتبار^۷، تعمیم‌پذیری^۸، قابلیت انتقال، راستی‌آزمایی^۹، اطمینان‌پذیری و قابلیت تأیید/ تأییدپذیری^{۱۰} است. آنچه که در پژوهش کمی از آن تحت عنوان روایی نام برده می‌شود، در پژوهش کیفی همان قابلیت اعتبار است. در پژوهش حاضر داده‌های بدست آمده از هر مصاحبه، کنترل شد. همچنین مصاحبه‌ها و طراحی سوالات به گونه‌ای انجام شد که پاسخگو نهایت صداقت را در پاسخ به سوالات داشته باشد. شناخت مصاحبه‌شوندگان نسبت به موضوع مورد مطالعه و شخص مصاحبه‌کننده، اعتمادی که در طول مصاحبه به دست آمده بود و علاقه آنان به حل چالش آب^{۱۱} در یزد نقش مهمی را در افزایش این اعتماد داشت. به منظور تعمیم‌پذیری نتایج در پژوهش حاضر پس از هشت مصاحبه جداگانه با سه گروه، پاسخ‌ها شبیه به هم شدند و به عبارت بهتر، داده جدیدی تولید نشد و پژوهشگر به اشباع نظری رسید. البته این اشباع نظری در مصاحبه با صنعت‌گران و کشاورزان به نسبت سایرگروه‌ها سریع‌تر اتفاق افتاد و پس از پنج مصاحبه و تکرار مصاحبه‌ها تا حدود زیادی تعمیم‌پذیری داده‌ها تضمین شد. به منظور حصول اطمینان از داده‌های به دست آمده، مصاحبه‌ها در نوبت دیگر در مورد کارشناسان و صاحب‌نظران مجدداً انجام شد و بازهم همان نتایج و همان پاسخ‌ها به دست آمد. البته در مورد کشاورزان و صنعت‌گران که امکان مصاحبه مجدد وجود نداشت، از طریق تکرار مصاحبه تلاش شد این اطمینان‌پذیری از نتایج تاحد زیادی محقق شود. به منظور تحقق مسأله تأییدپذیری، پژوهشگر نهایت تلاش خود را انجام داد که چارچوب‌های نظری را در ذهن خود کنار بگذارد و بدون پیش‌ذهنیی فرآیند مصاحبه‌ها را جلو ببرد. به منظور تأیید نهایی، مصاحبه برخی از

مصاحبه‌شوندگان بنا به درخواست خودشان پس از پیاده‌سازی متون مصاحبه برای آنان ارسال شد که پس از ارسال گفته‌ها و نظرات خودشان را تأیید کردند. داده‌ها نیز با استفاده از کدگذاری باز، محوری و انتخابی تحلیل شدند.

یافته‌ها

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد بیشتر مصاحبه‌کنندگان تحصیلات دکتری (۱۰ نفر)، اکثراً مرد (۲۵ نفر) و بیشترین بازه سنی مربوط به سنین (۵۰-۵۹) می‌باشد.

جدول ۱- توصیف ویژگی‌های مشارکت‌کنندگان در مصاحبه

سمت	تحصیلات	جنسیت	سن
صاحب‌نظر	دکتری	مرد	۶۸
صاحب‌نظر	دکتری	مرد	۳۹
صاحب‌نظر	دکتری	مرد	۶۶
صاحب‌نظر	دکتری	مرد	۵۴
صاحب‌نظر	دکتری	مرد	۵۵
صاحب‌نظر	کارشناسی ارشد	مرد	۶۸
صاحب‌نظر	دکتری	مرد	۶۶
صاحب‌نظر	دکتری	مرد	۵۳
صاحب‌نظر	دکتری	مرد	۵۵
کارشناس	کارشناسی	مرد	۵۶
مدیر	دکتری	مرد	۴۱
کارشناس	کارشناسی	مرد	۵۰
کارشناس	کارشناسی	مرد	۶۷
مدیر	کارشناسی	مرد	۵۳
کارشناس	کارشناسی	مرد	۵۳
کارشناس	کارشناسی ارشد	مرد	۴۳
کشاورز	ابتدایی	مرد	۷۰
کشاورز	ابتدایی	مرد	۶۸
کشاورز	بی‌سواد	مرد	۶۱
کشاورز	کارشناسی	مرد	۵۷
صنعتگر	دکتری	مرد	۵۴
صنعتگر	کارشناسی ارشد	مرد	۵۰
صنعتگر	کارشناسی ارشد	مرد	۳۲
صنعتگر	کارشناسی	زن	۳۳
صنعتگر	کارشناسی	زن	۳۴
صنعتگر	کارشناسی ارشد	زن	۴۳
صنعتگر	کارشناسی	مرد	۵۵
صنعتگر	کارشناسی	مرد	۳۸

تحلیل داده‌ها نشان داد که مقوله هسته حکمرانی منفعت‌طلبانه^{۱۲} بوده است که این منفعت به سه گروه صاحبان قدرت بدون منفعت آبی، صاحبان قدرت با منفعت آبی و افراد بدون صاحب قدرت، اما دارای منفعت آبی، تقسیم‌بندی می‌شوند. تصمیمات تماماً به وسیله مدیران ارشد و سیاست‌مداران با توجه به منفعتشان و بدون توجه به آمایش سرزمین و اقلیم محلی و منطقه‌ای و با نگاهی گذرا و موقتی، نه بلندمدت تدوین شده‌است. این نوع حکمرانی نه در استان یزد، بلکه در مرکز توسط مدیران ارشد یزدی‌تبار کشور انجام شده‌است. انتقال آب و سپس استقرار صنایع، کشت محصولات متنوع، ایجاد اشتغال، استقرار صنایع سنگین و آب‌بر و توزیع این آب، منافع زیاد سیاسی، اقتصادی و اجتماعی چه در سطح ملی و چه در سطح محلی برای افراد و گروه‌های مختلف داشته‌است. نکته‌ای که بایستی بدان اشاره کرد؛ رابطه تنگاتنگ نظام توزیع قدرت و منافع با اقتصاد سیاسی آب در ایران و البته یزد است. اقتصاد سیاسی، معطوف به تبیین موضوعاتی است که رابطه بین قدرت سیاسی و ضرورت‌های اقتصادی در یک جامعه را منعکس می‌سازد. بنابراین موضوع اقتصاد سیاسی، بحث پیرامون نحوه ارتباط میان حوزه سیاست و حوزه اقتصاد و هدف آن نیز ارائه تحلیل‌های اجتماعی، سیاسی و تاریخی از فرآیندهای اقتصادی است. در این خصوص باید گفت یکی از مهمترین دغدغه کشورها، مسأله توسعه است. نظریه‌های توسعه ارتباط مستقیمی با سازوکارهای اقتصاد سیاسی هر جامعه دارد، اگرچه مولفه‌های مربوط به اقتصاد جهانی بر چگونگی روند توسعه در هر کشوری از جمله ایران تأثیرگذار است، اما واقعیت آن است که شکل‌بندی‌های اقتصادی هر کشور و مولفه‌های تأثیرگذار بر نظام اجتماعی واحدهای سیاسی را باید اصلی‌ترین عامل توسعه و همچنین تبیین نشانه‌های اقتصاد سیاسی در آن کشور دانست. شکل‌بندی و ماهیت اقتصاد سیاسی کشورها را می‌توان بر اساس چگونگی برنامه‌ریزی اقتصادی و راهبردی آن کشورها ملاحظه کرد (مصلی‌نژاد، ۱۴۰۰). زمانی که از اقتصاد سیاسی آب سخن به میان می‌آید، این سوال را می‌توان مطرح کرد که آیا دولت‌ها یا نهادهای عمومی در قالب کنشگران فردی یا سمن‌ها توانسته‌اند شرایط را برای شکل‌گیری توسعه پایدار در استان یزد فراهم آورند یا خیر؟ تحلیل یافته‌های حاصل از مصاحبه با مدیران و کارشناسان اداری-صاحب‌نظران و خبرگان آزاد حوزه آب و کارفرمایان بخش صنعت و کشاورزی؛ نشان می‌دهد که اقتصاد سیاسی آب در یزد با نوعی تناقض مواجهه است، این شهر به لحاظ صنعتی و معدنی دارای ظرفیت‌های بالایی است. وجود فضا جهت گسترش شهرک‌های صنعتی در شهر یزد، وجود معادن غنی و نیروی انسانی متخصص و مزیت‌های دیگر، باعث ایجاد پتانسیل بالایی در جهت برنامه‌ریزی راهبردی توسعه شهرک صنعتی در این شهر و نیز موجب پدید آمدن فرصت‌هایی از قبیل به وجود آمدن حوزه‌های صنعتی فعال و قدرتمند و پتانسیل بالای تأسیسات صنعتی و افزایش

رغبت سرمایه‌گذاران برای سرمایه‌گذاری در بخش صنعت شده است (رضایی و خاوریان گرمسیر، ۱۳۹۳). اما شهر یزد به واسطه اقلیم گرم و خشک توان پذیرش صنایع متعدد و عمده‌آب محور را ندارد. در سالهای اخیر به واسطه انتقال آب از خلیج فارس و دریای عمان؛ صنایع متعددی در استان احداث و فعال شده‌است. برتری (تسلط) رویکرد اقتصاد محور نسبت به رویکردهای زیست‌محیطی و اهمیت رشد و تولید و افزایش درآمد و اشتغال به ویژه در سالهای اخیر، چندان اجازه توجه به مباحث مرتبط با توسعه پایدار در استان را به سیاست‌گذاران و تصمیم‌سازان نمی‌دهد. اگر چه در چندسال اخیر تلاش‌های بسیاری توسط ذینفعان مختلف در بخش‌های کشاورزی، صنعت و حتی شرب- بهداشت به منظور مدیریت بهینه منابع آب صورت گرفته اما به زعم Swatuk (۲۰۰۸) به دلیل تعدد ذینفعان و منافع و ظرفیت‌های متفاوت آنها، هیچ «راه حل سریع و موثری»^{۱۳} برای حل مشکلات آب جهان وجود ندارد. گره خوردن برنامه‌های توسعه استان در یزد با گسترش صنایع آب‌محور یکی از دیگر از عوامل موثر بر عدم موفقیت برنامه‌های توسعه پایدار در استان یزد است. به دلیل آنکه مدیران و سیاست‌گذاران به جای تمرکز بر پتانسیل‌های طبیعی و بالقوه استان، صرفاً افزایش درآمد سرانه و تولید را عامل مهم در پیشرفت استان یزد می‌دانند، در حالیکه این سبک توسعه با سند آمایش استان نیز همخوانی ندارد. بنابراین دولتمردان و سیاست‌گذاران نتوانسته‌اند شرایط پایدار سیستم منابع آب را حفظ کنند.

باتوجه به موارد مطرح شده در این بخش به نظر می‌رسد یکی از ویژگی‌های حکمرانی منفعت‌طلبانه در یزد، شیوه حکمرانی متمرکز، دستوری، بالا به پایین و بدون مشارکت بهره‌برداران اصلی است؛ به نوعی تصدی‌گری دولت در همه امور مربوط به تقسیم آب است؛ رویکرد از بالا به پایین، که به عنوان شیوه حکمرانی «مشت آهنین» یا «دستکش مخملی» توصیف می‌شود، با یک دولت قدرتمند و سلسله مراتبی مشخص می‌شود که در آن نخبگان سیاسی، سیاستی را طراحی می‌کنند و سپس از طریق یک زنجیره سخت، متوالی و پایدار اجرا می‌شود (Bevir، ۲۰۰۷). تحلیل یافته‌های حاصل از مصاحبه نشان داد که علی‌رغم مشارکت بهره‌برداران در مدیریت منابع آب در یزد، همچنان نقش دولت پررنگ‌تر از سایر اضلاع مثلث است، البته این صرفاً مختص به یزد نیست؛ بلکه در سایر نقاط کشور نیز به همین صورت است. بخشی از این مسأله دارای پیش‌زمینه‌ای تاریخی است. لباف خانیکی (۱۳۹۸) در پژوهش خود نشان داد که توسعه شهر یزد و نزدیکی روستای حسن‌آباد به یزد، فرآیند تغییر کاربری از کشاورزی به مسکونی و تجاری را شدت می‌بخشد و حبابه‌های بیشتری از زمین، منفک می‌شوند. به این ترتیب رسم جدید مالکیت مستقل آب از زمین ظاهر می‌شود که تا امروز به قوت خود باقی است.

مقوله فشارهای سیاسی صاحبان قدرت به عنوان یکی از مقولات مرتبط با مقوله هسته^۴ (حکمرانی منفعت طلبانه) قابل بررسی است ورود آب انتقالی به یزد به واسطه تنش آبی که در اکثر استان‌های کشور وجود دارد، صرفاً یک بحث فنی و اجرایی نیست؛ بلکه تبدیل به موضوعی سیاسی شده که در پژوهش حاضر در قالب مقوله سیاسی‌شدن مدیریت منابع و مصارف آب مطرح شده است. در ایران؛ برخی از تصمیماتی که در حوزه آب در سطح کلان و حتی در سطح منطقه‌ای مانند یزد، تصویب و اجرا می‌شود؛ تحت تأثیر فشارهای سیاسی است و چنانچه فرهنگ دینفعان در مدیریت منابع و مصارف آب ضعیف باشد و صرفاً پای رویکردهای بهره‌بردارانه و استثمارگراییانه در کار باشد، نتیجه‌ای جز اتلاف منابع آب به ویژه در بخش‌های کشاورزی و صنعت نخواهد داشت. فشار سیاسی صاحبان قدرت و دخالت افراد غیرمتخصص در پروژه‌های سد، انتقال و بهره‌برداری از منابع آبی و آنچه که امروز از آن به عنوان بهره‌برداری از آب‌های ژرف یاد می‌شود، همه نشان‌دهنده نفوذ صاحبان قدرت در مسائل تخصصی است. رانت و فساد در حوزه منابع زیست‌محیطی یکی از مصداق‌های بارز فشارهای سیاسی است.

از دیگر ویژگی‌های مرتبط با حکمرانی منفعت طلبانه شکل‌گیری نوعی از حکمرانی است که حاصل تعامل میان سه بخش مردم، دولت و نهادهای مدنی است؛ اما این حکمرانی حاصل یک تعامل واقعی و سازوکار عملی نیست، بلکه نتیجه یک مکانیسم نمایشی است که ویژگی جوامع درحال توسعه است و از آنجا که ظهور آن عملاً نه از سر احتیاج بلکه نوعی سرگرمی و بازی با کلمات تلقی می‌شود. به جای مشارکت فعالانه هر سه بخش و ظهور مدیریت جامع منابع و مصارف آب در یزد، جز هدر رفتن منابع آب و نابرابری آبی؛ نتیجه‌ای نداشته است. سخن راندن از حکمرانی منابع آب و اتخاذ تصمیمات دستوری و کشت محصولات پرآب‌خواه و احداث صنایع آب‌بر بدون توجه به ظرفیت بخش‌های مختلف، اقدام صحیحی نیست.

از دیگر ویژگی‌های حکمرانی منفعت طلبانه مجموعه عواملی است که در قالب مولفه‌هایی چون تعامل کم بین مردم و مسئولین در زمینه حل بحران و مشارکت معیوب، تسلیم نظرات منفعت طلبانه دینفعان بودن و عدم هدایت این مشارکت به مباحث علمی، مطرح می‌شود. این ویژگی‌ها نشان از عدم برنامه‌ریزی و آینده‌نگری، تصمیمات عجولانه، غریبومی و غیرعالمانه در حوزه مدیریت منابع آب، بدون توجه به تصمیم‌سازی‌ها و سیاست‌گذاری‌های سطح کلان به ویژه در بخش کشاورزی و صنعت است.

مجموعه عواملی چون عدم مسئولیت‌پذیری مدیران محلی و انفعال آنان، مطیع بودن مدیران محلی و پذیرش دستوری برنامه‌ها، درست اجرا نشدن قوانین، برنامه‌ها و دستورالعمل‌ها، تشکیل‌دهنده یکی دیگر از ویژگی‌های حکمرانی منفعت طلبانه

است؛ که ناشی از فرسودگی و کهنگی زیرساخت‌ها در مدیریت منابع آب است. هم در بعد اجرایی و هم در بعد فکری، نبود ثبات و استمرار در مدیریت منابع آب کشور، زیرساخت‌ها و امکانات را دچار فرسایش می‌کند، عدم توجه به آمایش سرزمین و ایجاد نابرابری و توزیع نابرابر امکانات در شهر و روستا، عدم توجه به اقلیم خشک یزد و اقدام به ساخت و سازهای ناسازگار با اقلیم در فضای شهری، گسترش صنایع پرآب‌بری چون سرامیک، کاغذ، فولاد و نساجی به جهت تولید و افزایش سود و صنعتی شدن شهر یزد و همچنین عدم توجه به گزارش‌ها و راهبردهای علمی به ویژه در جلوگیری از گسترش صنایع پرآب‌بر، نمونه‌های بارزی از برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت منابع آب و عدم آینده‌نگری در مدیریت منابع آب است. ویژگی این نوع حکمرانی با توجه به داده‌ها به شرح زیر است:

۱- عدم مسئولیت‌پذیری مدیران محلی و انفعال آنان: برخی از صاحب‌نظران معتقد بودند که با توجه به اینکه برنامه‌ها ملی-محور است و از طرف وزارت نیرو به شرکت‌های آب منطقه‌ای ابلاغ می‌شود، این شرکت‌ها چندان دخالتی در تغییر این برنامه‌ها و سیاست‌گذاری‌ها ندارند. اما شرکت آب منطقه‌ای هر استان می‌تواند سیاست‌هایی را به منظور کاهش مصرف منابع آب اجرا و عملیاتی کند. مانند آنچه شرکت آب منطقه‌ای یزد، در سال‌های اخیر اجرا کرده است که شامل: طرح کاهش صد در صدی آب برنامه هزی شب مهر آب یزد و طرح سپاس آب می‌باشد. مسئولین محلی به جای انفعال باید ویژگی‌های اقلیمی یزد و پیشینه درخشان آن در مدیریت منابع آب و تجارب ارزنده آن را به وزارت نیرو و مسئولین ارشد انتقال بدهند تا مانع بسیاری از سیاست‌گذاری‌های اشتباه و نادرست در حوزه مدیریت منابع و مصارف آب شوند.

۲- مطیع بودن مدیران محلی و پذیرش دستوری برنامه‌ها، بدین معنا که سازمان‌های آب منطقه‌ای و آب و فاضلاب کمتر پیشنهاد دهنده سیاست‌ها و برنامه‌ها بوده‌اند و وزارت نیرو همچنان تصدی‌گری خود را در ارتباط با اتخاذ سیاست‌ها و برنامه‌ها، حفظ کرده بود. باتوجه به موارد مطرح شده در این بخش به نظر می‌رسد مجموعه این مقولات را می‌توان تحت عنوان حکمرانی دستوری^۵، مورد بررسی قرار داد. منظور از حکمرانی دستوری، آن نوع از حکمرانی است که به شیوه متمرکز، دستوری، بالا به پایین و بدون مشارکت بهره‌برداران اصلی است، به نوعی تصدی‌گری دولت در همه امور مربوط به تقسیم آب است.

۳- درست اجرا نشدن قوانین، برنامه‌ها و دستورالعمل‌ها: از دیگر مسائلی که به ویژه در دیدگاه‌های اساتید و کارشناسان مطرح شد، پیرامون این مسأله است که گاهی قوانین، سیاست‌ها و برنامه‌ها وجود دارند، لیکن به درستی به اجرا در نمی‌آیند و چالش اصلی بسیاری از کارشناسان در حوزه آب نه خود قانون که نحوه پیاده‌سازی آن است. یکی از مباحثی که در این راستا مورد توجه

قرار می‌گیرد، عدم تمرکز روی مباحث سند چشم‌انداز ۱۴۰۴ است. این سند که در تاریخ ۱۳ آبان‌ماه ۱۳۸۲ از طرف دفتر رهبری برای اجرا ابلاغ شد، یک سند راهبردی است که جایگاه کشور در بیست سال آینده در منطقه را ترسیم می‌کند. از نظر یکی از کارشناسان این سند چشم‌انداز از بیست سال قبل، پیش‌روی ما قرار داشته، ولی دولت‌ها به این سند توجهی نداشتند و امروز نیز فقط دوسال به پایان این سند مانده است و نمی‌توان انتظار معجزه داشت.

۴- فقدان راهبرد علمی و عدم توجه به آمایش سرزمین، اقلیم خشک، استقرار صنایع پرآب‌بر: از دیگر چالش‌های مربوط به حکمرانی منفعت‌طلبانه در بخش‌های مختلف کشاورزی و صنعت فقدان به کارگیری راهبردهای علمی و عدم توجه به استفاده از دانش روز می‌باشد. این ویژگی خود را در قالب مقولاتی چون ارتقاء تکنولوژی برای مصرف بهینه منابع آب، عدم توجه به آمایش سرزمین و توسعه پایدار، استقرار صنایع با مصرف آب بالا، کشت محصولات پرآب‌بر و عدم توجه به اقلیم خشک شهر یزد؛ نشان می‌دهد.

الف) ارتقاء تکنولوژی در زمینه مصرف آب به گونه‌ای که دیگر استفاده از آب چاه به دلیل داشتن املاح زیاد غیرقابل استفاده نخواهد بود، بلکه به کمک مواد افزودنی (نوعی لعاب) می‌توان آب چاه را به آب شرب تبدیل کرد. تحلیل یافته‌های حاصل از مصاحبه‌ها نشان داد که ارتقاء تکنولوژی در زمینه مصرف منابع آب در بخش صنعت به کمک بازچرخانی آب، علاوه بر مدیریت منابع با کاهش هزینه می‌تواند به تولید سود بیشتر و دریافت بسته‌های حمایتی و تشویقی توسط کارفرما بیانجامد.

ب) از دیگر مقولات مرتبط با مسأله فقدان راهبرد علمی، عدم توجه به آمایش سرزمین و توسعه پایدار است. عدم وجود توسعه پایدار که تمرکز بر ارتباط بین اجتماع، اقتصاد و محیط‌زیست است، باعث ورود صنایع پرآب بر به شهر خشک و کم‌آبی چون یزد شده است. از طرف دیگر عدم توجه به سند آمایش سرزمین که به ارتباط نظام‌مند میان انسان، فضا و فعالیت‌های او به منظور بهره‌برداری منطقی از همه امکانات می‌پردازد؛ نشان‌دهنده وجود نوعی دیدگاه آنارشیستی در بحث توسعه میان سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران و اتخاذ تصمیمات از بالا به پایین است. به عبارت دیگر زمانی که مردم یزد به عنوان کنشگران فعال در اتخاذ این تصمیمات مداخله‌ای نداشته باشند و مدیریت یکپارچه شهری جایگزین تعصبات محلی گردد، سیاست‌ها هر چند درست و منطقی به نظر رسد، اما کارایی چندانی نخواهد داشت. به عبارتی ذینفعان اصلی در شکل‌گیری نظام توسعه کنار گذاشته شده‌اند، پس در نتیجه دولت پدرسالار متولی همه امور می‌شود و مردم مطرود و کنارگذاشته شده، فقط نقش تماشاگر یک ورزشگاه فوتبال را خواهند داشت. در حالی‌که ما بایستی

به این مسأله واقف باشیم و حتی فراتر اعتقاد داشته باشیم که مباحث مربوط به مدیریت منابع آب بایستی در عرض یکدیگرند باشند، یعنی تعامل منطقی و مناسبی میان دولت، مردم و نهادهای خصوصی باشد، نه اینکه در طول یکدیگر باشند.

ج) استقرار صنایع پرآب‌بر و کشت محصولات آب‌بر یکی از چالش‌های اصلی در بروز حکمرانی منفعت طلبانه منابع و مصارف آب در یزد است که در قالب مقوله فقدان راهبرد علمی مطرح می‌شود و باعث انتخاب صنایع آب‌بری چون فولاد، کاشی و سرامیک، نساجی و کاغذ برای یزد شده است، استقرار این نوع از صنایع و کشت محصولات کشاورزی بدون توجه به میزان مصرف آب، ناشی از سوء مدیریت است در واقع اتخاذ سیاست‌های نادرست و بدون توجه به اقلیم، منجر به ورود صنایعی شده که در حقیقت بایستی این صنایع به لحاظ مصرف بالای آب در کنار شهرهای ساحلی واقع می‌شدند، یا در بخش کشاورزی از محصولات کم‌آب‌بری مثل زعفران، پسته و ... به جای محصولات پرآب‌بری مثل سبزیجات و صیفی‌جاتی چون بادمجان، خیار، هندوانه، بامیه و یونجه استفاده شود.

د) از دیگر مقولات مرتبط با فقدان راهبرد علمی، عدم توجه به اقلیم خشک شهر یزد است. در واقع شهر یزد به واسطه اقلیم متفاوت، بایستی دارای سیاست‌گذاری‌های متفاوت باشد. بنابراین نمی‌توان انتظار داشت این سیاست‌های کلان در همه نقاط یک کشور نسخه واحدی داشته باشند. بسیاری از کارشناسان معتقدند برای یزد به عنوان یک شهر کویری، سیاست‌های فردی و تجربه شده، بایستی جایگزین سیاست‌های کلان شود. اهمیت سیاست‌های منطقه‌ای هم در زمینه کشاورزی با توجه به اقلیم خشک و الگوی کشت متناسب با منطقه و هم در زمینه صنایع پرآب‌بری که در یزد وجود دارد و هم در زمینه ساخت مسکن و استفاده از وسایل گرمایشی و سرمایشی به اثبات رسیده است.

ه) عدم تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی مصرف آب در بخش شهری و شرب از مقولات مرتبط با فقدان راهبرد علمی و عدم توجه به دانش روز است. یکی از موضوعاتی که در این راستا مورد توجه قرار می‌گیرد، وجود فرهنگ سنتی مصرف در بین شهروندان یزدی است. منظور از فرهنگ سنتی مصرف در بین شهروندان، فرهنگی است که به عنوان یک عامل بازدارنده در مصرف بهینه آب عمل نمی‌کند. به عبارت ساده‌تر در یک شهر کویری؛ رفتار دریایی و انتظارات کویری است^۶. این نحوه مصرف، هم در بخش شرب، هم کشاورزی و هم صنعت خود را نشان می‌دهد. به طور مثال در زمینه مصرف بخش خانگی، مصرف بی‌رویه آب در کولر آبی به دلیل تبخیر زیاد، استفاده از آن از طرف سازمان آب منطقه‌ای منع شده، اما مردم همچنان تشویق به استفاده از کولر گازی می‌شوند. یکی از کارشناسان معتقد است دلیل این امر آن است که در وزارت نیرو بخش برق از بخش آب قوی‌تر است. این خود

نمونه ای از عدم تصمیم‌گیری درست در مصرف بهینه آب است. در زمینه فضای سبز هم چمن‌های مصنوعی و کاشت گیاهان کم‌آب‌بر بایستی جایگزین چمن‌کاری‌های طبیعی شود. در زمینه کشاورزی نیز فرهنگ مصرف کشاورزان بایستی به سمت کاشت محصولات کم‌آب‌بر تغییر کند.

م) از دیگر مقولات مرتبط با فقدان راهبرد علمی؛ عدم توجه مدیران به مباحث علمی و به کارگیری آن در تصمیمات است. تحلیل یافته‌های حاصل از مصاحبه با مدیران و کارشناسان اداری، صاحب‌نظران و خبرگان آزاد حوزه آب و کارفرمایان بخش صنعت و کشاورزی نشان داد که بسیاری از مدیران چه در سطوح کلان یا میانه و حتی خرد یا اصلاً توجهی به مباحث علمی مرتبط با زمینه شغلی خود ندارند و یا به دلیل مشغله کاری و برگزاری جلسات متعدد، زمانی برای شرکت در جلسات علمی مرتبط با وظایف خود ندارند. برخی از کارشناسان نیز معتقد بودند از آنجاکه هدف بسیاری از مدیران اقدامات زودبازده و نتیجه محور است، در نتیجه حاضر به رفع مشکلات به‌صورت اصولی و مبتنی بر مبانی علمی موجود نیستند؛ چرا که اساساً راه‌حل علمی مشکلات پیش‌رو، نیازمند طرح راه‌حلی است که بعضاً مستلزم گذشت زمان و دستیابی به تجارب مختلف است، درحالی‌که مدیران صرفاً می‌خواهند مشکل را به‌صورت سر پایی، مقطعی و به سرعت حل نمایند؛ درنتیجه چندان اعتقادی به مباحث علمی و به‌کارگیری آن در تصمیمات ندارند. حتی برگزاری کنفرانس‌ها و همایش‌هایی که در حوزه‌های مختلف علمی برگزار می‌شود، به‌زعم بسیاری از کارشناسان چندان تأثیری در مدیریت بهینه آب در بخش‌های مختلف صنعت، کشاورزی و شرب-بهداشت و مدیریت بهینه منابع آب ندارند؛ اگرچه در چند سال اخیر به مباحث علمی، کانون‌های تفکر، اندیشکده‌ها و اتاق‌های فکر با جدیت بیشتری توجه شده است.

ن) از دیگر مقولات مرتبط با فقدان راهبرد علمی؛ عدم رعایت اصول و ضوابط در طرح مسائل علمی در بحث مدیریت منابع آب است. برخی از صاحب‌نظران که با شرکت‌های مشاور پروژه‌های مشترکی انجام داده بودند، این مسأله را بیان کردند که در برخی موارد نتایج حاصل از پروژه‌ها توسط کارفرمایان دست‌کاری می‌شد و بدین ترتیب اعتبار علمی خود را از دست می‌داد. بنابراین تا زمانی که پروژه‌های علمی مربوط به آب از اعتبار و پایایی کافی برخوردار نیست، نمی‌توان انتظار برنامه‌ریزی صحیح برای آینده و آینده‌نگری در حوزه منابع آب را داشت. یکی از کارشناسان بیان کرد که بیشتر اوقات آمارهای مربوط به صرفه‌جویی، آمارهای صحیحی نیستند و اساساً صرفه‌جویی آب در بخش کشاورزی در این ۲۰ سال اتفاق نیفتاده و بهره‌وری وجود نداشته است، در واقع عملاً آبی وجود نداشته که بخواد مصرف شود.

۵- اتخاذ تصمیمات نمایشی و پرزرق و برق و جلوه‌دهنده توسعه یکی دیگر از ویژگی‌های حکمرانی منفعت‌طلبانه است که در قالب مقولات فرعی چون؛ ورود آب انتقالی به یزد و به دنبال آن گسترش صنایع و معادن به ویژه صنایع آب‌بر و ارائه آمار بالای اشتغال و درآمد، خود را نشان می‌دهد.

الف) پروژه انتقال آب: ورود آب انتقالی به یزد و به دنبال آن گسترش صنایع و معادن به ویژه صنایع پرآب‌بر در شهری خشک و کم‌بارش به بهانه گسترش صنایع، نمادی از حکمرانی نمایشی در مدیریت منابع و مصارف آب است. برخی از پژوهشگران معتقدند طرح انتقال آب باعث مصرف بیشتر، گسترش صنایع پرآب‌بر و عامل نابودی منابع آب خواهد شد و برخی دیگر طرح انتقال آب را منبعی مهم برای ذخیره منابع می‌دانند که چنانچه با اصول خاص و علمی انجام شود، می‌تواند مفید باشد. بسیاری از کارشناسان و صاحب‌نظرانی که مصاحبه با آنان انجام شده معتقدند که میزان آب زیرزمینی و انتقالی و سطحی (که میزان آن بسیار ناچیز است؛ برای مصارف صنعتی کفایت نمی‌کند، تحلیل یافته‌های حاصل از مصاحبه‌ها نشان داد که به منظور حل این مشکل، دو راه بیشتر وجود ندارد، یا صنایع ایجاد شده را تعطیل کنیم و یا بایستی آب را انتقال دهیم. به دلیل حجم اشتغالی که از گذشته تا به امروز ایجاد شده و تنش‌های اجتماعی ناشی از معضل بیکاری در استان، قادر به تعطیلی کامل صنایع نیستیم، اما بایستی مصرف آب در صنایع را به واسطه بازچرخانی و استفاده از پساب کارخانه؛ کاهش دهیم و از ایجاد و احداث صنایع آب‌بر جدید، جلوگیری کنیم.

ب) ارائه آمار بالای اشتغال و درآمد: یکی از چالش‌هایی که در خصوص مدیریت منابع آب وجود دارد، این است که اشتغال در بخش کشاورزی بدون حفاظت از منابع و مدیریت آب صورت گرفته، به ویژه زمانی که بحث قانون تعیین تکلیف چاه‌های آب فاقد پروانه بهره‌برداری^{۱۷} مطرح بوده است. یافته‌های حاصل از مصاحبه با کارشناسان و مدیران، صاحب‌نظران و خبرگان دانشگاهی و به ویژه کشاورزان و صنعتگران حاکی از آن است که در بخش کشاورزی، مدیریت منابع آب به صورت اصولی مطرح نبوده است. در واقع پس از انقلاب به دلیل خرابی‌های ناشی از جنگ، عملاً بخش صنعت و خدمات توان تولید محصولات را نداشته، بنابراین بخش کشاورزی به تنهایی بار اشتغال کشور را به دوش کشیده است. در واقع برای حل مشکل اشتغال در بخش کشاورزی، کشت محصولات بدون توجه به میزان مصرف آب و عمدتاً محصولات پرآب‌بر در دستور کار قرار گرفت و درآمد موقت برای کشاورزان ایجاد نمود. همچنین در صنعت هم برای ایجاد اشتغال بدون توجه به مکان‌یابی احداث صنایع آب‌بر، عمده صنایع آب‌بر را در مناطق خشک و کویری احداث شد که این مسأله نیز به حکمرانی منفعت‌طلبانه آب دامن زده است.

۶- عدم شفافیت اطلاعات در زمینه منابع و مصارف آب و همچنین اطلاعات دیگر: یکی از ابعاد حکمرانی در حوزه منابع آب، بحث عدم وجود شفافیت است؛ به ویژه عدم شفافیت در حوزه آمار و اطلاعات در مورد میزان منابع آب مصرف شده در بخش‌های مختلف. نبود آمارهای درست و دقیق در زمینه آب انتقالی، برنامه‌ریزی برای سیاست‌گذاران در حوزه‌های جمعیتی را با مشکل مواجهه می‌کند.

تحلیل یافته‌های حاصل از مصاحبه‌ها به ویژه با دوگروه صاحب‌نظران دانشگاهی، کارشناسان و مدیران نشان داد که یکی از چالش‌های مهمی که در این زمینه وجود دارد این است که معمولاً سازمان‌های مختلف (آب منطقه‌ای، جهاد کشاورزی، برنامه و بودجه) آمارهای یکدیگر را قبول ندارند و نوعی هرج و مرج به لحاظ پذیرش و اتکا به آمار در میان سازمان‌ها وجود دارد. از طرف دیگر اجماعی (در میان کارشناسان و صاحب‌نظران دانشگاهی) در خصوص درصد آب انتقالی که برای مصارف صنعت در نظر گرفته می‌شود نیز وجود ندارد.

۷- مشارکت معیوب و تعامل کم بین مردم و مسئولین در زمینه حل بحران: یکی از مقولات مرتبط با مشارکت معیوب، عدم هدایت مشارکت ذینفعان به مباحث علمی است. این مقوله در قالب زیرمقوله‌هایی (مقوله‌های فرعی) چون عدم ارتباط میان رشته‌های مختلف آب در کشور، توجه به تأثیر متغیرهایی چون فرهنگ، دین و آموزش در بحث آب و تعامل با دنیا و استفاده از تجربه‌های آنان، خود را نشان می‌دهد. نکته‌ای که در ارتباط با مباحث علمی وجود دارد این است که در میان رشته‌های مرتبط با منابع آب یک نوع از هم گسیختگی وجود دارد و به نوعی عملکرد رشته‌های دانشگاهی مانند سازمان‌ها جزیره‌ای است و هیچ تعاملی میان رشته‌های دانشگاهی وجود ندارد. مسأله دیگری که در اینجا مد نظر قرار می‌گیرد این است که روابط بین رشته‌ای و تأثیر متغیرهای مختلف از جمله دین یا فرهنگ باید در بحث آب لحاظ شود، بنابراین مدیریت منابع آب، فقط مربوط به آب نیست، بلکه مربوط به مجموعه عواملی است که روی آن تأثیرگذار است. تحلیل یافته‌های حاصل از مصاحبه با صاحب‌نظران دانشگاهی، کارشناسان و مدیران و کارفرمایان بخش صنعت و کشاورزی نشان داد که مسأله دیگری که در راستای عدم هدایت به سمت مباحث علمی باید مورد توجه قرار گیرد، این است که ما بایستی با تمام دنیا تعامل داشته باشیم، چرا که پیامدهای زیست‌محیطی، تغییرات و سیاست‌های آب و هوایی، به هیچ وجه از هم جدا نیستند. نمی‌توانیم بگوییم قاره آسیا تغییرات اقلیمی مخصوص به خود را دارد و این تغییرات جدای از تغییرات قاره اروپا، استرالیا و یا امریکا است. البته تعامل با دنیا به معنای تحمیل دیدگاه‌ها و سلطه رویکردهای آنان نیست، بلکه با شناخت

کلی از سازمان‌های جهانی آب، می‌توان سیاست‌های آنان را شناخت و پی برد که چالش‌هایی که در کشور ما در زمینه منابع و مصارف آب وجود دارد، کدام‌ها هستند و چه شباهت و تفاوت‌هایی میان مدیریت منابع و مصارف آب ما با کل دنیا وجود دارد و در نهایت به تدوین راهبردها و استراتژی‌هایی بیانجامد که نشان می‌دهد مدیریت آب نیازمند شناخت ملی و بین‌المللی، برنامه‌ریزی منطقه‌ای و عملکرد بومی و محله‌ای بوده و این ارتباط زنجیره‌ای است.

الف) محتوای مصاحبه‌ها در سه سطح مدیران-کارشناسان، صاحب‌نظران حوزه آب و کشاورزان و صنعتگران، حاکی از آن است که تعامل و گفتگو بین سطوح مختلف مدیریتی یا حتی در سطوح خرد بین مردم با همدیگر وجود ندارد. در زمینه تعامل مردم با مدیران، می‌توان گفت کشاورزان و صنعتگران حمایت‌هایی که بایستی از سازمان‌ها و نهادهای متولی دریافت می‌کردند به ویژه در سال‌های اخیر، چندان رضایت‌بخش نبوده، در نتیجه این فاصله و شکاف بین مردم و مدیران روز به روز بیشتر شده است. از طرف دیگر زمانی که سرمایه اجتماعی وجود نداشته باشد، مسئولان نمی‌توانند انتظار مشارکت از سوی ذینفعان را داشته باشند. از تحلیل یافته‌ها چنین برداشت می‌شود مشارکت اجتماعی خود از ابعاد سرمایه اجتماعی است. نقش سرمایه اجتماعی و حفاظت ذی‌نفعان از منابع آب‌های زیرزمینی غیرقابل انکار است؛ سرمایه‌گذاری در ایجاد سرمایه اجتماعی شرایط را برای حفاظت از محیط‌زیست و حل چالش‌های زیست‌محیطی فراهم می‌آورد. رابطه اعتماد اجتماعی و رفتار مشارکتی یک رابطه کاملاً دوسویه است. هر چه اعتماد اجتماعی مجموعه ذینفعان به عملکرد دولت، سیاست‌گذاران و مدیران در سطوح کلان بیشتر باشد، مشارکت ذینفعان به ویژه در بخش اجرای طرح‌ها افزایش می‌یابد.

ب) از دیگر مقولات مرتبط با مشارکت معیوب و تعامل کم بین مردم و مسئولین؛ تسلیم بودن در برابر نظرات منفعت‌طلبانه ذینفعان است. از تحلیل یافته‌های مصاحبه‌ها چنین استخراج شد که نباید کشاورز را یک کارگزار محروم جلوه داد، بلکه او یک کنش‌گر اقتصادی عاقل است که منافع و مصالح خودش رو تشخیص می‌دهد و در مواجهه با کنش‌ها، کاملاً عقلانی و منفعت‌طلبانه برخورد می‌کند. این کشاورز هنگامی که احتمال ضرر و زیان مالی بدهد یا زمانی که احساس کند که باغ او در حال خشک شدن است به حفر چاه غیرمجاز روی می‌آورد. در مورد صنعتگران هم به همین ترتیب است. برای آنها اولویت با مسائل زیست‌محیطی نیست، بلکه مسائل اقتصادی است. چنانچه انتقال کارخانه باعث افت خط تولید کارخانه و زیان اقتصادی به او شود، اقدام به انتقال کارخانه نخواهد کرد؛ مگر اینکه دولت با حمایت‌های تشویقی مثل کاهش مالیات، او را

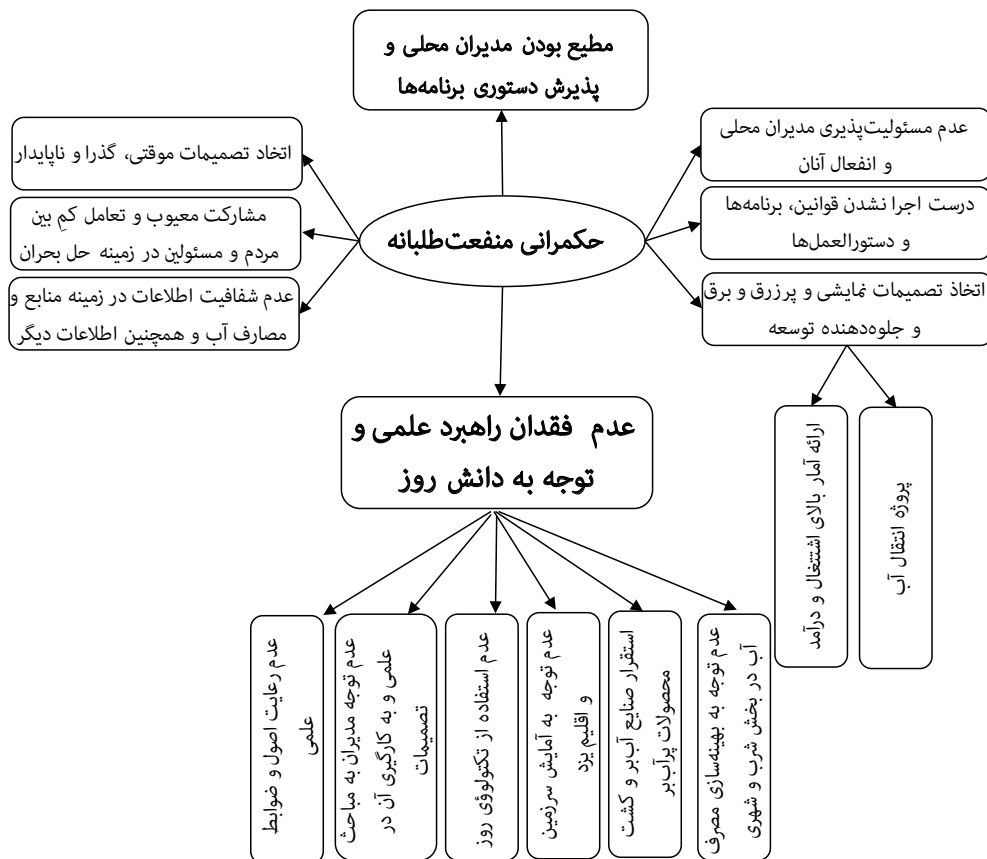
به سمت اهمیت مسائل محیط‌زیستی سوق دهد. بنابراین در این اثناء دولت بایستی حفاظت و ترمیم منابع آبهای زیرزمینی را در اولویت قرار دهد نه اینکه بنا به مصلحت در مقابل خواسته‌های ذی‌نفعان کوتاه بیاید.

۸- اتحاد تصمیمات موقتی، گذرا و ناپایدار: تحلیل یافته‌های حاصل از مصاحبه با مدیران و کارشناسان اداری، صاحب‌نظران و خبرگان آزاد حوزه آب و کارفرمایان بخش صنعت و کشاورزی نشان از وجود نوعی حکمرانی است که دارای برنامه از پیش مدونی نبوده، که برخی مصاحبه‌شوندگان از آن تحت عنوان مدیریت روزمرگی یاد می‌کردند، یعنی بدون پیش‌بینی و حل چالش‌های مرتبط با آب، بیشتر به فکر درمان در مدیریت منابع آب بوده‌اند نه پیشگیری.

نتیجه‌گیری

شهر یزد از گذشته تا امروز همواره با محدودیت‌های طبیعی در دسترسی به منابع و مصارف آب مواجهه بوده است. مردم این شهر از گذشته و با آگاهی از این محدودیت‌ها به مدیریت بومی آب اقدام کرده‌اند. آنها با حفر قنات منابع آب خود را مدیریت می‌کردند و با مهندسی قنات به توازن پایداری بین منابع و مصارف آب رسیده بودند. اما در دهه‌های اخیر در بخش صنعت ویژگی‌های اقلیمی در احداث، بازسازی و تأسیس صنایع آب‌بر نادیده گرفته شد و سیاست‌گذاران و دولت‌مردان شروع به احداث صنایع، به‌ویژه صنایع آب‌بر در دل کویر نمودند و با این اقدام به مصرف منابع آب و حکمرانی منفعت‌طلبانه منابع و مصارف آب دامن زدند. احداث صنایع آب‌بر و کشت محصولات پر آب‌بر شرایط را برای مهاجرپذیر شدن یزد فراهم آورد، نیاز آبی تشدید شد و فکر انتقال آب به ذهن سیاست‌گذاران بیش‌از پیش متبادر گشت. انتقال آب همواره با چالش‌های اجتماعی، سیاسی و اقتصادی همراه بوده‌است؛ به‌ویژه انتقال آب از استان‌های هم‌جوار که در چند سال اخیر باعث تخریب لوله‌های آب از استان اصفهان به استان یزد شده‌است. این تخریب توسط کشاورزان ناراضی از انتقال آب از زاینده‌رود به یزد اتفاق می‌افتد. در واقع در انتقال آب توازن بین ظرفیت منابع طبیعی و مصرف (توازن بین منابع و مصارف) در نظر گرفته نمی‌شود و چالش ایجاد می‌نماید. مشکل آب در یزد قبل از انقلاب هم مطرح بوده، اما قبل از انقلاب مشکل آب در یزد به‌صورت مسئله وجود داشته، ولی بعد از انقلاب با حکمرانی نامناسب این مسئله تبدیل به مشکل شده‌است. یکی از مسائلی که در خصوص حکمرانی منفعت‌طلبانه بایستی به آن اشاره کرد، ورود مهاجران از استان‌های مختلف به واسطه کار در صنعت

به شهر یزد بوده است، این مسئله علاوه بر به هم خوردن تعادل جمعیتی شرایط را برای مهاجرت‌های زیست‌محیطی یا مهاجرت‌های اکولوژیکی^{۱۸} فراهم آورده که اگر اقدامات و برنامه‌ریزی‌های لازم برای این منظور انجام نگیرد، در چند سال آینده بازهم بیش‌از امروز، شهر یزد با مشکل تأمین منابع آب مواجه خواهد شد. سوال اصلی پژوهش حاضر این است که ویژگی حکمرانی در حوزه آب در استان یزد در چهار دهه اخیر چگونه بوده و چه ویژگی‌هایی داشته است؟ این پژوهش با رویکرد کیفی و روش داده بنیاد و تکنیک مصاحبه عمیق نیمه ساختاریافته انجام شده است. جامعه آماری سه گروه از مدیران و کارشناسان اداری، صاحب‌نظران و خبرگان آزاد حوزه آب و کارفرمایان بخش صنعت و کشاورزی بوده‌اند، که ۲۸ نفر از آنان با روش نمونه‌گیری هدفمند تا رسیدن به اشباع نظری انتخاب شدند. تکنیک تحلیل داده‌ها نیز کدگذاری باز، محوری و انتخابی بوده است. آنچه از تحلیل و تفسیر نتایج به دست آمده، نشان می‌دهد حکمرانی آب در یزد منفعت‌طلبانه بوده و سیاست‌هایی که در فرآیند تصمیم‌سازی، سیاست‌گذاری و اجرا در زمینه منابع و مصارف آب در سه دهه گذشته اتخاذ شده مبتنی بر نظرات کارشناسانه و علمی و با توجه به منافع بلندمدت و آینده‌نگرانه این استان نبوده است، بلکه ناآگاهانه بر اساس منافع ذی‌نفعان صاحب قدرت و منافع زودگذر و موقتی مردم اتخاذ شده است. همانطور که فرزانه و همکاران (۱۳۹۶) اشاره داشتند وقتی می‌گوییم افراد بر اساس منفعت آبی به سه بخش «گروه صاحب قدرت و بدون منفعت آبی»، «گروه صاحب قدرت و صاحب منفعت آبی» و «گروه بدون قدرت و صاحب منفعت آبی» تقسیم می‌شوند، این منفعت اقتصادی صرفاً مادی نیست، بلکه منافع سیاسی و حتی منافع اجتماعی ناشی از اخذ این تصمیمات را نیز باید به حساب آورد. رویکردهایی که با ظاهرسازی و دادن وعده دروغ تصور می‌کنند که به مردم خدمت می‌کنند و شغل ایجاد می‌کنند درحالی‌که در درازمدت به منافع ملی ضربه می‌زنند. حکمرانی منفعت‌طلبانه دارای ویژگی‌هایی چون: عدم مسئولیت‌پذیری مدیران محلی و انفعال آنان، مطیع بودن مدیران محلی و پذیرش دستوری برنامه‌ها، درست اجرا نشدن قوانین، برنامه‌ها و دستورالعمل‌ها، فقدان راهبرد علمی و عدم توجه به آمایش سرزمین، اقلیم خشک و استقرار صنایع آب‌بر، اتخاذ تصمیمات نمایشی و پرزرق و برق و جلوه‌دهنده توسعه، عدم شفافیت اطلاعات در زمینه منابع و مصارف آب و همچنین اطلاعات دیگر، مشارکت معیوب و تعامل کم بین مردم و مسئولین در زمینه حل بحران و اتخاذ تصمیمات موقتی، گذرا و ناپایدار می‌باشد. در شکل (۲) مدل پارادایمی حکمرانی منفعت‌طلبانه ارائه شده است.



شکل ۲- مدل پارادایمی حکمرانی آب در یزد

ندارند، چه رسد به مدیران ارشد و سیاست‌گذاران. مطیع‌بودن مدیران محلی به معنای حرف شنوی از دستورالعمل‌ها و سیاست‌ها نیست، بلکه به معنای بی‌تفاوتی و عدم شناخت مسئولان نسبت به اقلیم محل زندگی در اتخاذ تصمیمات است. دستوری بودن برنامه‌ها، سیاست‌ها و دستورالعمل‌ها اجازه تفکر، کنکاش، برگزاری نشست‌ها و انتقاد از سیاست‌های متمرکز را نمی‌دهد. اقلیم متفاوت نیازهای متفاوت دارد و با روح دستوری بودن، تمرکزگرایی و آمرانه سیاست‌ها همخوانی ندارد. درست اجرا نشدن قوانین، برنامه‌ها و دستورالعمل‌ها یکی از ویژگی‌های حکمرانی منفعت‌طلبانه است. تحلیل یافته‌های پژوهش نشان داد که در برهه‌هایی سیاست‌ها، برنامه‌ها و دستورالعمل‌های مناسبی تدوین شده ولیکن به دلایل متعددی، این قوانین اجرا نشده است. اجرایی نشدن درست قوانین و برنامه‌ها و استثناء قائل شدن برای گروه‌ها یا طبقات خاصی از مردم، توده مردم را نسبت به اجرای درست قوانین ناامید می‌کند و اعتماد اجتماعی را در کشور کاهش می‌دهد. اجرایی نشدن درست قوانین شرایط را برای برداشت‌های شخصی، سلیقه‌ای، حزبی و غیرعلمی فراهم می‌کند و منابع در دسترس به هدر رفته و نابود می‌شود. عدم سازگاری تصمیمات با اقلیم و منطقه مورد نظر و وارد کردن آب

اولین ویژگی حکمرانی منفعت‌طلبانه؛ عدم مسئولیت‌پذیری مدیران محلی و انفعال آنان است. یکی از ۸ بعد حکمرانی آب مسئولیت‌پذیری است. این مسئولیت‌پذیری هم در سطح کلان و توسط سیاست‌گذاران و مسئولین بلندپایه و هم در سطح میانه، توسط مدیران ارشد و هم در سطح خرد، توسط کارشناسان بایستی وجود داشته باشد. پذیرش حس مسئولیت در تمام سطوح از طرف مسئولان شرایط را برای جلب اعتماد مصرف‌کنندگان منابع آب چه در بخش صنعت، چه در بخش کشاورزی و چه در سطح خرد فراهم می‌آورد. در خصوص عدم مسئولیت‌پذیری مسئولان باید گفت از آنجا که در بیشتر مواقع تصمیمات از بالا اتخاذ شده و بعد به استان ابلاغ می‌شده است، در نتیجه مسئولان استان هیچ احساس مسئولیتی در قبال این تصمیمات نداشتند که عیوب را به مرکز گوشزد نمایند. دومین ویژگی حکمرانی منفعت‌طلبانه؛ مطیع‌بودن مدیران محلی و پذیرش دستوری برنامه‌هاست. یکی از معضلاتی است که در حوزه مدیریت منابع آب گرفتار سیستم‌های سازمانی و حتی بین‌سازمانی شده و در تحلیل یافته‌های پژوهش به دست آمد، این است که کارشناسان معتقد بودند که خیلی از اوقات در سطح یک شهر مدیران محلی نیز ایده‌های همدیگر را قبول ندارند و اصلاً باور به مشارکت ذی‌نفعان در مدیریت آب

به یک سرزمین خشک که توانایی پذیرفتن صنایع آب‌بر را ندارد، مصداق بارز حکمرانی منفعت‌طلبانه است. یکی از کشاورزانی که در مصاحبه شرکت کرد، معتقد بود که آب منطقه‌ای چاه‌های غیرمجاز را پلمپ می‌کند و مجوز حفرچاه را به سختی صادر می‌کند، اما اکثر مناطق ییلاقی یزد مثل ده‌بالا برای جلوگیری از خشک شدن باغات خودشان چاه غیرمجاز حفر کرده‌اند؛ بنابراین اگر قانون است برای همه بایستی به یکسان انجام شود. از دیگر ویژگی‌های حکمرانی منفعت‌طلبانه؛ فقدان راهبرد علمی و عدم توجه به دانش روز است که در قالب مقولاتی چون عدم توجه به آمایش سرزمین، اقلیم خشک و استقرار صنایع آب‌بر مطرح شد. با شروع دوران مدرن و تقدس‌زدایی از طبیعت و محور قرارگرفتن عالم انسانی (در برابر عالم طبیعی) زمینه برای تجاوز و دست‌کاری بیش‌از پیش انسان در طبیعت فراهم شد. این بهره‌کشی و استثمار زمانی که بیش‌ازحد توان اقلیم منطقه استثمار شده باشد و یا زمانی که سازگار با اقلیم منطقه موردنظر نباشد، به‌مراتب وضعیت بدتری خواهد داشت. منفعت‌طلبی انسان نسبت به طبیعت شرایط را به گونه‌ای پیش می‌برد که هدف توجیه‌کننده وسیله و ابزار رسیدن به آن می‌شود؛ در نتیجه به گزارش‌ها، طرح‌ها و پژوهش‌های علمی توجه چندانی نمی‌شود؛ به طرح‌های آمایش سرزمین توجهی نشده و توزیع امکانات و ثروت‌ها و گسترش شهر به طور کلی در یزد متمرکز شده و سایر شهرهای استان (به‌اباد، یافق و خاتم) با اختلاف زیاد در انتهای جدول قرار دارند (حسینی راد، ۱۳۷۱). از مصادیق دیگر حکمرانی خودخواهانه منابع و مصارف آب در یزد این است که موضوع آب به‌عنوان یک بحث علمی از دسترس صاحب‌نظران و کارشناسان خارج شده و به عنوان ابزاری برای جذب توده‌ها و عاملی برای پایان دادن به کشمکش‌ها و تنش‌های آبی و رفع اشتغال و بیکاری خیل عظیم شاغلان جویای کار مورد توجه قرار گرفته است؛ عدم استفاده از تکنولوژی به ویژه در بخش کشاورزی و بخش صنعت و به خصوص صنایع آب‌بر، یکی از چالش‌های بسیار مهم است. عدم تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی مصرف آب در بخش شرب، مصرف آب این بخش را بازهم بیشتر افزایش خواهد داد. استفاده از کشت محصولات پرآب‌بر و نداشتن الگوی کشت متناسب با اقلیم یزد، حکمرانی مطلوب منابع آب را به طنزی تلخ تشبیه کرده است. اتخاذ تصمیمات نمایشی و پرزرق و برق و جلوه‌دهنده توسعه، ویژگی دیگر حکمرانی منفعت‌طلبانه در یزد است. ورود آب انتقالی به یزد و به دنبال آن گسترش صنایع و معادن به ویژه صنایع پرآب‌بر در شهری خشک و کم‌بارش به بهانه گسترش صنایع، مصداق واقعی تصمیمات نمایشی و پرزرق و برق است. غیر قابل توجیه بودن انتقال آب در صورت عدم مدیریت مصرف یکی از مسائلی که بسیاری از کارشناسان، صاحب‌نظران و حتی صنعتگران به آن اشاره داشتند. در واقع اگر این مدیریت

مصرف رخ ندهد، به زعم یکی از کارشناسان، کل دریای عمان و خلیج فارس هم به یزد انتقال داده شود، بازهم با کمبود آب مواجهه خواهیم شد. بنابراین راهکارهای مدیریت مصرف هم از طرف مدیران و سیاست‌گذاران و هم از طرف مصرف‌کنندگان در هر سه بخش کشاورزی، شرب-بهداشت و صنعت بایستی عملیاتی شود، اگر نه نفس انتقال آب بی‌معنی است. به طوری کلی انتقال آب از زاینده‌رود بایستی به عنوان راهکار میان‌مدت دیده شود به ویژه که هم کوه‌رنگ و هم زاینده‌رود امروزه خود با مشکل کم‌آبی روبه‌رو هستند؛ به زعم یکی از اساتید، ما خون را از دست انسان کم‌خون می‌گیریم و به دست دیگر او تزریق می‌کنیم و این کار منطقی نیست. از موضوعاتی که در تحلیل یافته‌های پژوهش بدان دست یافتیم این بود که از یک طرف علاقه یزدی‌ها به کارهای کشاورزی نباید نادیده گرفته شود، چرا که از گذشته علی‌رغم کم‌آبی همواره کشاورزی در این شهر وجود داشته و از طرف دیگر کشت غرقابی در شهر کویری و کم‌آبی مانند یزد اقدام صحیحی نیست. مسأله دیگری که بایستی در این جا بدان پرداخت این است که سهم بخش کشاورزی در اشتغال یزد بایستی کاهش پیدا کند، به هر حال به دلیل محدودیت آبی که شهر با آن مواجهه است، استان یزد بایستی هرچه بیشتر به سمت صنایع کم‌آب‌بر سوق پیدا کند. نمی‌توانیم به بهانه آمار بالای اشتغال منابع آب را نابود کنیم. بسیاری از صاحب‌نظران اعتقاد داشتند که کشت بسیاری از صیفی‌جات مانند گوجه، خیار، بادمجان، هندوانه در یزد و صادرات آن به شهرها یا کشورهای دیگر توجیه منطقی ندارد.

عدم شفافیت اطلاعات در زمینه منابع و مصارف آب و همچنین اطلاعات دیگر؛ از چالش‌های مهم مرتبط با حکمرانی منابع و مصارف آب در یزد می‌باشد. سازمان ملل متحد تعریف جامعی از حکمرانی خوب ارائه داده است که عبارت است از «مشارکت، شفافیت و پاسخگویی که موثر و عادلانه است، و حاکمیت قانون را ترویج می‌دهد». یافته‌های حاصل از پژوهش نشان داد، با عدم شفافیت در خصوص آمارها و اطلاعات میان دستگاه‌های مختلف، تعداد چاه غیرمجاز، میزان اختصاص آب شرب به صنعت در فصول گرم سال مواجهه هستیم^{۱۹}. برخی کشاورزان نیز معتقد بودند وزارت جهاد کشاورزی بایستی الگوی کشت هر فصل را در اختیار ما قرار دهد و ما آگاهی داشته باشیم این فصل چه محصولی بکاریم و چه محصولی قرار است دولت وارد کند، اگر این الگوی کشت شفاف در اختیار ما قرار گیرد قیمت محصول دچار نوسانات غیرمنطقی نخواهد شد. مشارکت معیوب و تعامل کم بین مردم و مسئولین در زمینه حل بحران، از چالش‌های مهم در حوزه حکمرانی منابع و مصارف آب در یزد است که نقش دولت در عین مشارکت با همه ذی‌نفعان نباید جنبه انفعالی پیدا کند و مشارکت

- 1-Governance
- 2-New Oxford International Dictionary
- 3-New Webster's International Dictionary
- 4-Institutional structures
- 5-Purposive sampling
- 6-Theoretical saturation
- 7-Credibility
- 8-Transferability
- 9-Dependability
- 10-Confirmability
- 11-Water challenge
- 12-Self-interested governance
- 13-Magic bullet

۱۴- در روش گراند تئوری، محقق پس از تحلیل مصاحبه‌ها و انجام مراحل کدگذاری باز، محوری و گزینشی به مقوله هسته دست می‌یابد.

- 15-Imperative governance

۱۶- این بخش از سخنان دکتر پاپلی یزدی است.
 ۱۷- قانون تعیین تکلیف چاه‌های آب فاقد پروانه بهره‌برداری، شماره ابلاغیه ۲۸۲۵۱/۳۹۲، سال ۱۳۸۹. وزارت نیرو موظف است ضمن اطلاع‌رسانی فراگیر و مؤثر به ذی‌نفعان، طی دو سال تمام پس از ابلاغ این قانون، برای کلیه چاه‌های آب کشاورزی فعال فاقد پروانه واقع در کلیه دشت‌های کشور که قبل از پایان سال ۱۳۸۵ هجری شمسی حفر و توسط وزارت نیرو و دستگاه‌های تابعه استانی شناسایی شده باشند و براساس ظرفیت آبی دشت مرتبط، و با رعایت حریم چاه‌های مجاز و عدم اضرار به دیگران و عموم مشروط به اجراء آبیاری تحت فشار توسط متقاضی پروانه بهره‌برداری صادر نماید.

- 18-Ecological migration

مهاجرت‌هایی که به واسطه تغییرات اقلیمی و عمدتاً اجباری اتفاق می‌افتد. در این نوع مهاجرت، افراد به دلیل خشکسالی‌های پی در پی و متعدد و وابستگی ساکنان مناطق به کشاورزی و عدم امکان کشت به دلیل کمبود منابع آب، مهاجرت می‌کنند.
 ۱۹- مسأله اختصاص آب شرب به صنعت در فصول گرم سال، در مصاحبه با یکی از کارکنان آب منطقه‌ای و یکی از اساتید دانشگاه، مورد تأیید قرار گرفته است.

معیوب باشد. از تحلیل یافته‌های مصاحبه‌ها چنین استخراج شد که نباید کشاورز را یک کارگزار محروم جلوه داد، بلکه او یک کنش‌گر اقتصادی عاقل است که منافع و مصالح خودش رو تشخیص می‌دهد و کاملاً در مواجهه با کنش‌ها، عقلانی و منفعت‌طلبانه برخورد می‌کند. این کشاورز هنگامی که احتمال ضرر و زیان مالی بدهد یا زمانی که احساس کند که باغ او در حال خشک شدن است، به حفر چاه غیرمجاز روی می‌آورد. در مورد صنعتگران هم به همین ترتیب است، برای آنها اولویت با مسائل زیست‌محیطی نیست، بلکه مسائل اقتصادی است. چنانچه انتقال کارخانه باعث افت خط تولید کارخانه و زیان اقتصادی به او شود، اقدام به انتقال کارخانه نخواهد کرد، مگر اینکه دولت حمایت‌های اقتصادی خود را از این بخش در جهت حفاظت محیط‌زیست افزایش دهد. از مولفه‌های مشارکت معیوب؛ تعامل کم بین مردم و مسئولین می‌باشد. زمانی که سرمایه اجتماعی و شبکه‌های اجتماعی بین مردم و دولت و نهادهای مدنی و خصوصی کاهش یابد، افراد، کشاورزان، صنعت‌گران و کلیه ذینفعان، فضایی برای مطالبه‌گری و ادعای به حق خود نداشته باشند؛ به خشونت و رفتارهای نابهنجارانه روی می‌آورند؛ مانند آسیب رساندن به خطوط لوله‌های انتقالی آب توسط کشاورزان اصفهانی، به دلیل اعتراض به انتقال آب (از سرچشمه‌های کوه‌رنگ در استان چهارمحال بختیاری و زاینده‌رود در استان اصفهان به یزد) و نگرانی از توزیع نامناسب حقابه‌های آب توسط کشاورزان اصفهانی که مورد اخیر آن را می‌توان در اعتراضات ۱۷ آبان ماه ۱۴۰۰ مشاهده نمود. از تحلیل یافته‌ها چنین برداشت می‌شود که از دیگر مولفه‌های حکمرانی منفعت‌طلبانه؛ اتخاذ تصمیمات موقتی، گذرا و ناپایدار است. در این بخش ما شاهد نوعی حکمرانی ناپایدار در خصوص مدیریت منابع آب بوده‌ایم. از یک طرف وزارت جهاد کشاورزی و شرکت آب منطقه‌ای تلاش خود را صرف ضابطه‌مند کردن حفرچاه می‌کنند، از طرف دیگر به زعم کارشناسان و مدیران شرکت آب منطقه‌ای، زمانی که می‌بینند چاه غیرمجازی حفر شده و اشتغالی ایجاد شده به دلیل کم جلوه دادن آمار بیکاری و جلوگیری از تنش‌های اجتماعی، قادر به از بین بردن چاه غیرمجاز نیستند؛ برخی کارشناسان اعتقاد داشتند که این «رویکرد استثناء قائل شدن برای اشخاص خاص/گاهی اجبار و گاهی اختیار» دولت‌ها، همه‌اشار جامعه را نسبت به اتخاذ تصمیمات قاطع، ناامید کرده است. در این خصوص یکی از صاحب‌نظران که خود کارفرمای بخش صنعت نیز بود، طبق مستندات بیان نمود که از سال ۶۸ طرح انتقال صنایع به خارج از شهر یزد مطرح شده، ولی همچنان تعداد زیادی از کارخانه‌ها در سطح شهر فعالیت می‌کنند که این امر منجر به آلودگی زیست‌محیطی شده است.

منابع

اسکوئی، م. و اسماعیلی، ک. ۱۴۰۰. تحلیلی بر نظریه‌های حکمرانی و مدیریت منابع آب در ایران. فصلنامه آب و

- توسعه پایدار، ۸(۱): ۱-۱۰.
- بنی‌اسدی، م. و پالوج، م. ۱۳۹۹. طراحی مدل حکمرانی مطلوب منابع آب زیرزمینی در سطح حوزه آبخیز، حوزه آبخیز ارزوئیه-استان کرمان. مدیریت و مهندسی آبخیز، ۱۲(۲): ۵۱۴-۵۲۵.
- بدیسار، س.ن. و احمدی، م.س. ۱۳۹۶. حقوق حاکم بر آب در بستر حقوق عمومی ایران. نشر میزان. تهران. چاپ اول.
- بدیسار، س.ن.، احمدی، م.س. و مدبرنژاد، ع.س. ۱۳۹۹. ارزیابی شاخص های حکمرانی خوب در بخش آب. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۲(۲): ۲۷۵-۲۸۶.
- تاریخچه شرکت آب منطقه ای یزد. ۱۳۹۳. شرکت آب منطقه ای یزد. <https://www.yzrw.ir/st/4>.
- رحیمی، م.، ملکیان، آ. و علم بیگی، ا. ۱۴۰۰. تعیین شیوه و رژیم حکمرانی آب در مواجهه با تغییرات محیطی از دیدگاه نهاد و ذینفعان محلی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دریاچه طشک-بختگان). نشریه مرتع و آبخیزداری، ۴۷(۱): ۸۲-۱۰۱.
- رضایی، م.ر. و خاوریان گرمسیر، ا.ر. ۱۳۹۳. برنامه ریزی راهبردی توسعه شهرک صنعتی شهر یزد با استفاده از چارچوب استراتژیک SOAR. فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۸: ۷۷-۹۴.
- زارع شاه‌آبادی، ا. و بنیاد، ل. ۱۳۹۷. تحلیل ثانویه تحقیقات موجود درباره نقش قنات، بافت تاریخی و گردشگری شهری (گردشگری آب؛ حلقه مفقوده حکمرانی آب)، همایش قنات، میراث ماندگار و آب، دانشگاه پیام نور، اردکان، ایران.
- سالاری، ف.، قربانی، م. و ملکیان، آ. ۱۳۹۴. پایش اجتماعی شبکه ذی‌نفعان در حکمرانی محلی منابع آب (منطقه مورد مطالعه: حوضه آبخیز رزین، شهرستان کرمانشاه). نشریه مرتع و آبخیزداری، ۴۸(۲): ۲۸۷-۳۰۵.
- سالاریان، م.، داوری، ک.، علیزاده، ا.، لگزیان، م. و فاضلی، م. ۱۳۹۸. چارچوب دستیابی به چشم‌انداز مشترک در مدیریت مشارکتی-راهبردی آب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کشف‌رود). نشریه اکوهیدرولوژی، ۶(۴): ۸۶۵-۸۸۶.
- صفویان، آ.، سلمان ماهینی، ع.ر.، میرکریمی، س.ه. و سعدالدین، ا. ۱۳۹۴. انتخاب بهترین سناریوی بهبود کیفیت آب با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی در حوضه آبخیز گرگانرود- استان گلستان. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۹(۳۰): ۱۵-۲۲.
- الوانی، س.م. و علیزاده‌ثانی، م. ۱۳۸۶. تحلیلی بر کیفیت حکمرانی خوب در ایران. مطالعات مدیریت (بهبود و تحول)، ۱۸(۵۳): ۱-۲۴.
- فرزانه، م.ج.، باقری، ا. و رضانی قوام‌آبادی، م.ج. ۱۳۹۶. بنیان‌های نهادی بحران در مدیریت منابع آب زیرزمینی ایران. نشریه پژوهش‌های اقتصادی، ۱۷(۱): ۵۷-۹۴.
- قاسمی شریانی، م.، رضوانی، م.ر.، طیبی، س.ج. و غفاری، ف. ۱۳۹۷. عوامل مولد انسجام سیاستی جهت مقابله با بحران آب در ایران. نشریه تحقیقات منابع آب، ۱۴(۳): ۴۲-۵۶.
- کانون تفکر آب. ۱۳۹۷. تغییر اقلیم. بیانیه شماره ۱. دانشگاه یزد. ایران. آدرس وبگاه: <https://yazd.ac.ir/offices/research/thinktank/water/achievements>
- کانون تفکر آب. ۱۳۹۷. سیمای آب استان یزد. بیانیه شماره ۲. دانشگاه یزد. ایران. <https://yazd.ac.ir/offices/research/thinktank/water/achievements>
- کانون تفکر آب. ۱۳۹۷. مصرف آب در بخش کشاورزی. بیانیه شماره ۳. دانشگاه یزد. ایران. <https://yazd.ac.ir/offices/research/thinktank/water/achievements>
- کانون تفکر اقتصاد، ۱۳۹۸. بیکاری در استان یزد. بیانیه شماره ۱. دانشگاه یزد. ایران. <https://yazd.ac.ir/offices/research/thinktank/economic>
- حسینی، ر.، مشفق، م. و زارع مهرجردی، ر. ۱۳۹۵. توصیف و تحلیل مهاجرت‌های بین‌استانی در ایران و تعیین‌کننده‌های آن طی دوره ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰. فصلنامه برنامه‌ریزی فضایی (جغرافیا)، ۶(۴): ۱۹-۴۴.
- حسینی‌راد، ر. ۱۳۷۱. تحلیل توسعه اقتصادی منطقه یزد از دید آمایش سرزمین، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده اقتصاد و معارف اسلامی، دانشگاه امام صادق(ع).
- لباف خانیکی، م.، رضوانی، م.ر.، بدری، س.ع. ۱۳۹۸. تبیین فرآیند همکاری‌های قلمرویی در بهره‌برداری از قنات (مورد مطالعه: قنات حسن‌آباد، استان یزد). نشریه پژوهش‌های روستایی، ۱۰(۳): ۳۸۲-۳۹۵.
- مصلی‌نژاد، ع. ۱۴۰۰. اقتصاد سیاسی ایران در دوران معاصر. انتشارات دانشگاه تهران. تهران.
- یوسفی، ا.، امینی، ا.م.، یادگاری، ا. و فتاحی، ا. ۱۳۹۶. پایداری نظام‌های حکمرانی آب زاینده‌رود در گذر توسعه. نشریه مطالعات میان‌رشته‌ای در علوم انسانی، ۳۶: ۲۳-۴۸.
- Ahmadv E. 2020. Water resources management to achieve sustainable development in Azerbaijan. Sustainable Futures, 100030(2): 1-10.
- Al-Khaldi F. 2014. Good Governance And Gender Equality, A thesis submitted to Johns Hopkins University in conformity with the requirements for the degree of Master of Arts in Government. PhD Thesis, Florida Atlantic University.
- Bevir M. 2007. Encyclopedia of Governance, SAGE Publications, Inc.Pp:971-972.

- Rhodes R.A.W. 1996. The New Governance: Governing without Government. *Political Studies*, 44(4), 652-667.
- United Nation. 2006. Water: A shared responsibility (Vol. 2). World Water Assessment Programme Berghahn Books.
- Westraeus P. 2016. Good Governance Institutions and Economic Growth: Evidence from Sub-Saharan Africa, Bachelor's Thesis, Linnæus University.
- Swatuk L. 2008. A Political Economy of Water. *Journal of Water Alternatives*, 1(1). 24-47.
- Cars G. 2002. Urban governance, institutional capacity and social milieux. Aldershot, Hampshire, England; Burlington, VT : Ashgate.
- Fukuyama F. 2013. What Is Governance? Center for Global Development 1800 Massachusetts Ave., NW Washington, DC 20036. Working Paper 314, January 2013.
- Glaser B. 1992. Basics of Grounded Theory Analysis. Mill Valley, CA: Sociology Press.
- Rogers P. and Hall AW. 2003. Effective water governance. Global Water Partnership Stockholm, 48p.

Assessing the Household's Willingness to Adopt Efficient Water Technologies in District 6 of Tehran

S. Abedi^{1*}, F. Kamyab², N. Nasiri³

1,2- Assistant Professor and MSc in Environmental Economics, Faculty of Economics, Allameh Tabataba'i University, Iran. 3- M.Sc in Water Resources Management, Sharif University, Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: s.abedi@atu.ac.ir)

Received: 11-04-2022

Revised: 28-05-2022

Accepted: 19-06-2022

Available Online: 21-12-2022

ارزیابی تمایل خانوارهای شهری به پذیرش تکنولوژی‌های کارآمد آبی در منطقه ۶ شهر تهران

سمانه عابدی^{۱*}، فاطمه کامیاب^۲، نسترن نصیری^۳

۱، ۲- به ترتیب استادیار و دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد اقتصاد محیط‌زیست، دانشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبائی، ایران. ۳- کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران-گرایش مدیریت منابع آب، دانشگاه شریف، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: s.abedi@atu.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۹

Abstract

Efficient water technologies as a non-economic tool in protecting water resources have always been of interest to environmental economists. Therefore, this study was conducted to evaluate the willingness of households in Tehran to adopt efficient water technologies to protect water resources in 2020. For this purpose, using the survey method in the form of interviews and completing a questionnaire, the factors affecting the acceptance of the use of efficient water technologies were determined using the logit model. The results showed that 57% of the sample is willing to accept efficient water equipment. The results also indicate that the attitude towards water protection with a tensile strength of 13.1 is one of the most critical components affecting the acceptance of these technologies. Education level and household size are the second and third most important factors affecting the adoption of efficient water technology. With a one percent increase in each of them, respectively, 3.2 and 2.29 percent will tend to accept the use of these technologies. In this regard, providing facilities to households to provide tools to reduce water consumption, implement incentive schemes, mandatory separation of household meters and eliminate water costs from charging, effective public media advertising (radio, television, etc), and cyberspace play an effective role Encourage households to use efficient water technologies.

Keywords: Non-Price Instruments, Water Conservation, Logit Model, Efficient Water Technology, Willingness to Accept.

چکیده

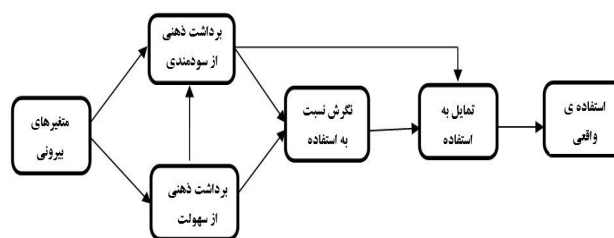
تکنولوژی‌های کارآمد آبی به‌عنوان ابزار غیراقتصادی در حفاظت از منابع آب، همواره مورد توجه اقتصاددانان محیط‌زیست واقع شده است. بنابراین این پژوهش با هدف ارزیابی تمایل خانوارهای شهر تهران نسبت به پذیرش تکنولوژی‌های کارآمد آبی جهت حفاظت از منابع آب در سال ۱۳۹۹ انجام شده است. برای این منظور با استفاده از روش پیمایشی در قالب مصاحبه و تکمیل پرسشنامه، عوامل مؤثر بر پذیرش کاربرد تکنولوژی‌های کارآمد آبی با بهره‌گیری از الگوی لجیت تعیین شد. نتایج مطالعه نشان داد ۵۷ درصد از نمونه مورد مطالعه، حاضر به پذیرش تجهیزات کارآمد آبی است. همچنین نتایج نشان داد آن است که شاخص نگرش نسبت به حفاظت از آب (با کشش ۱۳/۱)، از جمله مهمترین مؤلفه‌های اثرگذار بر پذیرش تکنولوژی‌های مذکور می‌باشد. سطح تحصیلات و اندازه خانوار نیز، جایگاه دوم و سوم مهمترین عوامل مؤثر بر پذیرش تکنولوژی کارآمد آبی را به خود اختصاص داده است؛ به‌طوری‌که با یک درصد افزایش در هر یک از آنها به ترتیب، ۳/۲ و ۲/۲۹ درصد احتمال تمایل به پذیرش استفاده از تکنولوژی‌های مذکور افزایش خواهد یافت. در این راستا اعطای تسهیلات به خانوار جهت تهیه ابزارهای کاهش‌دهنده مصرف آب، اجرای طرح‌های تشویقی، تفکیک اجباری کنتور خانوارها و حذف هزینه آب از روی شارژ، تبلیغ مؤثر از رسانه‌های عمومی (رادیو، تلویزیون و ...) و فضای مجازی نقش مؤثری در ترغیب خانوارها به استفاده از تکنولوژی‌های کارآمد آبی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: ابزارهای غیرقیمتی، حفاظت از آب، الگوی لجیت، تکنولوژی کارآمد آبی، تمایل به پذیرش.

میانگین دمای سطح جهانی از سال‌های ۱۹۶۱-۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰-۲۰۱۹ حدود ۰/۶۶ درجه سانتیگراد افزایش یافته است. به طوری که افزایش یک درجه سانتیگراد در گرمایش جهانی می‌تواند منجر به پیامدهای خطرناک تغییرات آب و هوایی مانند بالا آمدن سطح دریاها، ذوب شدن یخچال‌ها و کاهش منابع آب شیرین شود (Valipour و همکاران، ۲۰۲۱). از طرف دیگر با توسعه سریع جامعه و اقتصاد و همچنین رشد جمعیت، مسائلی مانند کمبود آب، تشدید آلودگی آب و وضعیت نامطلوب اکولوژی آب به تدریج به عوامل حیاتی محدود کننده توسعه پایدار تبدیل شده است (Liang و همکاران، ۲۰۲۲). پژوهش‌ها نشان می‌دهد در سال ۱۹۵۰ تنها ۲۰ میلیون نفر (۱۲ کشور) در جهان با کمبود آب مواجه بوده‌اند. در حالی که پس از ۴۰ سال جمعیتی در حدود ۳۰۰ میلیون نفر (۲۶ کشور) با این بحران مواجه و پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۵۰ جمعیتی بیش از ۷ میلیارد نفر (۶۵ کشور) در جهان با کمبود آب روبه‌رو شوند. نکته قابل تأمل آن است که عمده این جمعیت در کشورهای در حال توسعه زندگی می‌کنند و ایران جزء کشورهایی خواهد بود که طی سال‌های آینده از تنش آبی رنج خواهد برد (حمدی احمد آباد و همکاران، ۱۳۹۸). در این میان حفاظت از منابع آب، برای پایداری حیات اقتصادی و اجتماعی حائز اهمیت است. یکی از مهمترین دلایلی که پرداختن به مسائل مرتبط با کمبود آب را افزایش می‌دهند، رفتارهای انسانی است (Abubakar؛ ۲۰۲۱، Ashraf و همکاران، ۲۰۱۹). بر این اساس، پژوهش در حوزه تعیین و ارزیابی رفتار حفاظت از آب، به‌عنوان یکی از مهمترین اهداف اقتصاددانان محیط‌زیست به‌شمار می‌آید (Corral-Verdugo و همکاران، ۲۰۰۳). مؤلفه‌های اقتصادی-اجتماعی از قبیل رشد جمعیت، افزایش مصرف و استفاده از زمین، منجر به افزایش بی‌ثباتی در تقاضا برای آب و میزان آب در دسترس می‌شود (Saatsaz؛ ۲۰۲۰، Ebadi و همکاران، ۲۰۲۰). اثرات ترکیبی عوامل مذکور فشارهای زیادی به منابع حیاتی آب وارد می‌کنند که موجب تنش شدید آب می‌شود (Aprile و Fiorillo؛ ۲۰۱۶، Kelly و Fong؛ ۲۰۱۵). باتوجه به رشد روز افزون جمعیت، تقاضای آب آشامیدنی و مصارف خانگی، بررسی کمیت و کیفیت آب مصرفی و همچنین چگونگی مصرف آن اهمیت زیادی دارد. چراکه پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد تقاضای آب خانگی تا سال ۲۰۵۰، حدود ۱۳ درصد افزایش می‌یابد (Rodriguez-Sanchez و Sarabia-Sanchez، ۲۰۲۰). ایران با وجود منابع کم آب شیرین جز پرمصرف‌ترین کشورهای دنیا محسوب می‌شود و سرانه مصارف آب شهری در ایران بیش از میانگین مصرف جهانی است (بختیاری و همکاران، ۱۳۹۹). لازم به ذکر است، اگرچه مصرف آب خانگی سهم کمی از کل مصرف آب را شامل می‌شود اما تأمین آن به دلایل نیاز اساسی انسان به آب، مسائل بهداشتی، احتمال بروز تنش‌های

اجتماعی، همراه با اقلیم گرم و خشک ایران و هزینه‌های بالای تأمین، انتقال و توزیع آب، افزایش بی‌رویه مصرف و منابع محدود آب قابل دسترس، نسبت به سایر کاربری‌ها اولویت بالاتری دارد (شاهنگیان و همکاران، ۱۳۹۹؛ Ardalan و همکاران، ۲۰۱۹). آمار سال‌های اخیر برای شهر تهران نشان می‌دهد سرانه میزان مصرف آب شیرین و حجم فاضلاب دفع شده خانگی به ترتیب حدود ۲ و ۷ درصد طی سال‌های ۱۳۹۷ الی ۱۳۹۸ افزایش یافته است. در سال ۱۳۹۵ میزان هدررفت آب توسط خانوار متصل به شبکه آب بهداشتی، ۲۶/۸ درصد بوده است. کل برداشت آب مصرفی در شهر تهران برای سال ۱۳۹۶، معادل ۶۴/۸۶ درصد بوده که میزان هدر رفت آن در این سال به ۱۴/۶۵ درصد رسیده است (سالنامه آماری شهر تهران، ۱۳۹۸ و ۱۳۹۶). بنابراین باتوجه به اینکه آب خانگی، اصلی‌ترین مؤلفه مصرف آب شهری می‌باشد، بنابراین با کاهش میزان مصارف آن، می‌توان اقدامات مؤثری در راستای سازگاری با شرایط دشوار موجود انجام داد (کدخدایی و همکاران، ۱۴۰۰). بنابراین مدیریت تقاضای آب اهمیت خاصی دارد. مدیریت تقاضای آب، به فعالیت‌هایی اطلاق می‌شود که به کاهش تقاضای آب، بهبود راندمان مصرف آن و جلوگیری از آلوده یا نابود شدن منابع آبی کمک می‌نماید (حبیبی، ۱۳۷۸). بر این اساس حفاظت از آب یکی از ابزارهای مفید و یک جز حیاتی مدیریت منابع آب برای پاسخگویی به تقاضای رو به رشد آن به‌شمار می‌آید. به عبارت دیگر در ادبیات موضوع، حفاظت از آب از طریق کاهش تقاضا در طول زمان، به‌عنوان یک مؤلفه اصلی و مهم مدیریت آب شناخته شده است (Stavenshagen و همکاران، ۲۰۱۸). در این زمینه اگرچه بهره‌گیری از ابزار اقتصادی مانند تغییر در ساختار قیمت‌گذاری و افزایش قیمت آب می‌تواند در حفظ منابع آب توسط خانوار اثرگذار باشد، اما نمی‌توان آن را به‌عنوان تنها راه حل اساسی برای صرفه‌جویی و حفاظت از آن در نظر گرفت (Renzetti و Dupont، ۲۰۱۳؛ Olmstead و Stavins، ۲۰۰۹). در این راستا سیاست‌های غیرقیمتی در کنار ابزار اقتصادی، می‌توانند در جهت حفاظت از آب مؤثر واقع شوند. ابزارهای کاهش دهنده مصرف آب مانند دوش کم فشار، سیفون ایمن، ماشین لباس‌شویی و ظرف‌شویی با حداقل مصرف آب نمونه‌هایی از ابزارهای غیرقیمتی حفاظت از آب تلقی می‌شوند و با کاهش مصرف آب مصرفی خانوار می‌توانند منابع آبی را حفظ کنند (Waskom و همکاران، ۲۰۱۸؛ Koop و همکاران، ۲۰۱۹). در نتیجه از یک سو پیشرفت‌های تکنولوژیکی دستگاه‌های مصرفی آب باعث افزایش کارایی و صرفه‌جویی در مصرف منابع آب می‌شوند و از سوی دیگر نحوه استفاده و دانش کاربران در مورد تکنولوژی‌های گفته شده نیز در نهایت تأثیر عمده‌ای بر عملکرد تجهیزات خواهد گذاشت (Kelly و Fong، ۲۰۱۵). بنابراین لزوم حفاظت از آب توسط خانوارها به وسیله ابزارها و تجهیزات کارآمد می‌تواند به‌عنوان یک راه حل برای کمک به حل بحران آب کشور در

نظر گرفته شود. اما نکته قابل تأمل آن است که محدودیت عمده در توسعه سیاست‌های حفاظت از آب، مرتبط با کمبود دانش در رابطه با میزان حساسیت خانوار به انواع مختلف ابزارهای سیاستی حفاظت از آب است (Fan و همکاران، ۲۰۱۴؛ Millock و Nauges، ۲۰۱۰). بنابراین ارزیابی رفتار و عملکرد حفاظتی خانوار و همچنین شناسایی مهمترین مؤلفه‌های اثرگذار بر پذیرش تکنولوژی‌های حفاظت از آب و همچنین ارزیابی تمایل به پذیرش خانوار برای تکنولوژی‌های حفاظت از آن از اهداف مهم این پژوهش می‌باشد. یکی از مباحثی که در چند دهه اخیر به بررسی این موضوع می‌پردازد، مفاهیم پذیرش فناوری است که در بخشی از علوم رفتاری بررسی می‌شود و مدل‌های گوناگونی همچون تئوری عمل منطقی^۱ تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده^۲، تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده تجزیه شده^۳، مدل اولیه، مدل گسترش یافته پذیرش فناوری^۴ و تئوری تلفیقی پذیرش و کاربرد فناوری^۵ به این موضوع می‌پردازند (Davis، ۱۹۸۹). Davis (۱۹۸۹) مدل پذیرش فناوری را بیش از ربع قرن پیش ارائه نمود. این مدل توسط محققان متعددی در بسیاری از کشورهای جهان تأیید و قابلیت کاربرد آن مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از آن لی و همکاران (۲۰۰۳)، مدل تم را به عنوان یکی از برجسته‌ترین و معتبرترین مدل‌ها در پذیرش فناوری معرفی کردند (جلالی و همکاران، ۱۳۹۶). چارچوب مفهومی مدل پذیرش تکنولوژی تجهیزات کارآمد آبی منطبق بر الگوی تم، در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱- چارچوب مفهومی مدل پذیرش تکنولوژی تجهیزات کارآمد آبی

الگوی تم از پنج سازه شامل متغیرهای بیرونی، برداشت ذهنی از سهولت استفاده، برداشت ذهنی از سودمندی، نگرش نسبت به استفاده و تمایل به استفاده از فناوری تشکیل شده است. براساس این مدل، دو باور برداشت ذهنی از سودمندی و برداشت ذهنی از سهولت استفاده، برای پیش‌بینی نگرش و رفتار افراد نسبت به پذیرش تکنولوژی موثر است (جلالی و همکاران، ۱۳۹۶). باتوجه به اینکه این مدل به بررسی هنجارهای ذهنی نمی‌پردازد (Davis، ۱۹۸۹)، در بسیاری از مطالعات که وضعیت روانشناختی افراد جامعه آماری مشخص نیست مورد استفاده قرار می‌گیرد (Akinwale و Adepotu، ۲۰۱۹؛ Li و همکاران، ۲۰۲۱). لازم به ذکر است متغیرهای بیرونی بر درک سهولت، درک سودمندی و پذیرش فناوری تأثیرگذارند. عوامل

اقتصادی مانند سطح درآمد و هزینه‌های افراد (Sinha و Verma، ۲۰۱۸)، عوامل اجتماعی و فرهنگی مانند سطح تحصیلات (Bögel و Upham، ۲۰۱۸؛ Lee و همکاران، ۲۰۱۸) در پذیرش فناوری دخالت دارند. همچنین برخی از پژوهشگران، عواملی مانند مزیت نسبی، سازگاری، آزمون‌پذیری و قابلیت دیدن را از عوامل موثر در پذیرش فناوری می‌دانند (دانش و همکاران، ۱۳۹۲).

باتوجه به سهم قابل ملاحظه مصارف آب در بخش کشاورزی و هدر رفت آب در فعالیت‌های کشاورزی عمده تحقیقات صورت گرفته در ارتباط با پذیرش فناوری جهت کاهش میزان هدر رفت آب در ایران به استفاده از این فناوری‌ها در بخش کشاورزی برگشته است (بلالی و همکاران، ۱۳۹۵؛ کورکی نژاد، ۱۴۰۰). در این زمینه لازم به ذکر است، اگرچه در ایران مطالعات بسیار اندکی در راستای بررسی رفتار خانوارهای شهری در خصوص پذیرش تکنولوژی‌های کارآمد آبی جهت حفاظت از انجام شده اما در سطح جهانی، مطالعات متعددی در این خصوص صورت گرفته است از جمله آن‌ها می‌توان به مطالعه Rosenberg و Suero (۲۰۱۰) در پژوهشی با هدف برآورد توانایی خانوار برای حفظ آب در آمریکا به استفاده از مدل‌های تحلیلی، نیمه تحلیلی و رگرسیونی اشاره نمود. نتایج نشان داد برازش خوب الگوهای صرفه‌جویی آب از طریق توالی، دوش حمام و لباس‌شویی‌ها بوده است. علاوه بر آن نتایج نشان داد صرفه‌جویی در مصرف آب در خانه‌هایی با تعداد اعضای بیشتر در مقایسه با خانوارهایی با تعداد اعضای کمتر، بیشتر بوده است. همچنین سن افراد خانواده نیز از دیگر عوامل موثر در میزان صرفه‌جویی در مصرف آب است و افراد نوجوان نسبت به افراد خردسال و میانسال کمتر در مصرف آب صرفه‌جویی داشته‌اند. Dolnicar و Hurlimann (۲۰۱۰) با هدف ارائه اطلاعات تجربی برای نگرش‌های استرالیایی‌ها به سمت حفاظت از آب با استفاده از پرسشنامه در ۸ منطقه از استرالیا به این نتایج رسیدند استرالیایی‌ها عموماً نگرش مثبت به حفاظت از آب و ابزار صرفه‌جویی آب دارند؛ هرچند ممکن است این نوع نگرش‌های مثبت همواره به رفتار واقعی تبدیل نشود. Millock و Nauges (۲۰۱۰) در پژوهشی با استفاده از الگوی رگرسیونی پروبیت احتمال سرمایه‌گذاری خانوار را در تجهیزات آبرسانی مختلف تخمین زده‌اند. نتایج به‌دست آمده بیانگر این است که پذیرش تجهیزات آبرسانی خانوار به وسیله اندازه‌گیری و هزینه آب مصرفی و عامل‌های رفتاری و وضعیت مالکیت به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین احتمال سرمایه‌گذاری بیشتر در تجهیزات مختلف آبرسانی توسط خانوارهایی که میزان آب مصرفی خود را اندازه‌گیری و برای آن هزینه می‌کنند، وجود دارد.

میزان درآمد و تحصیلات در برخی از مطالعات بر تمایل به صرفه‌جویی در مصرف آب تأثیرگذار بوده است، اگرچه این همبستگی همیشه واضح نیست. به عنوان نمونه در مطالعه انجام شده روی ۲۶۶۸۹ خانوار اسپانیایی بیانگر آن است با افزایش تحصیلات، تمایل افراد

برای آگاهی در رابطه با محیط‌زیست افزایش می‌یابد اما از سوی دیگر افزایش تحصیلات و افزایش درآمد، تمایل به رفاه و سبک زندگی آسوده‌تر را افزایش داده و در نهایت منجر به افزایش میزان مصرف آب می‌شود (Mondéjar-Jiménez و همکاران، ۲۰۱۱). بنابراین افراد با تحصیلات بالاتر نسبت به صرفه‌جویی در مصرف آب متعهدتر هستند اما در واقع مصرف آب بیشتری دارند.

نتایج مطالعه Davies و همکاران (۲۰۱۴) در رابطه با استفاده از نمایشگرهای خانگی میزان مصرف آب در شهر سیدنی، نشان می‌دهد میزان مصرف آب در طول ۵ سال، کاهش حدود ۶/۸ درصدی داشته است. براساس این پژوهش، افزایش میزان آگاهی افراد نسبت به استفاده از این تکنولوژی در ماه اول و جابجایی این دستگاه در مناطق پرتردد خانه، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در صرفه‌جویی در مصرف آب داشته است و پس از حذف این فناوری به دلیل تبدیل این رفتار به عادت، افراد همچنان در مصرف آب صرفه‌جویی داشته‌اند. لازم به ذکر است اقدامات بعدی مانند برنامه‌های تشویقی و آموزش در کاهش میزان مصرف در بلند مدت تأثیرگذار بوده است. Kelly و Fong (۲۰۱۵) به بررسی حفاظت از آب، پیامدهای آگاهی، نگرش و رفتار کاربر پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد مصرف‌کنندگان نگرش مطلوب به حفاظت از آب خانگی داشته‌اند، باین‌حال شور و شوق آنها تنها به کاهش مصرف آب منجر شده است و کمتر از نیمی از آن‌ها از ابزارهای حفاظت استفاده می‌نمایند. علاوه‌برآن نتایج نشان داد نصب کنتور، افزایش قیمت آب و افزایش دانش کاربر در مورد مسائل مربوط به آب، موجب تغییر در رفتارهای صرفه‌جویی آب شده است.

Gunay و Boylu (۲۰۱۷) با هدف ارزیابی رفتار و نگرش خانوار در مورد استفاده موثر و کارآمد از منابع آب، با استفاده از تحلیل رگرسیون سلسله‌مراتبی در استان سوفرانبلو ترکیه اشاره نمود. نتایج تجزیه و تحلیل نشان داد رفتار مصرفی پایدار و نگرش به حفاظت از آب، در رفتار صرفه‌جویی آب در خانه مؤثر است. همچنین از نظر آماری رابطه مثبت و معنی‌داری بین درآمد ماهیانه، رفتار مصرفی پایدار، نگرش به حفاظت از آب و رفتارهای صرفه‌جویی آب وجود دارد.

همچنین جنسیت افراد در مصرف آب تأثیرگذار داشته و پژوهش‌ها تمایل کمتر مردان به صرفه‌جویی در مصرف آب را نشان می‌دهد و عدم تمایل به تغییر روش روزانه و نیاز به زمان و هزینه بیشتر برای تغییر رفتار مردان در صرفه‌جویی در مصرف آب از موانع بیان شده است (Tong و همکاران، ۲۰۱۷). Tong و همکاران (۲۰۱۷) در روستایی در شمال چین تحقیقی انجام دادند و بیان کردند در ابتدا میزان مصرف آب زنان حدود ۲ برابر بیشتر از مردان بوده است اما با افزایش آگاهی زنان، بسیاری از آنها تحت تأثیر نتایج و هنجارهای اجتماعی صرفه‌جویی مصرف آب قرار گرفته‌اند و در مصرف آب صرفه‌جویی کرده‌اند.

نتایج Rasoulkhani و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی اثر ویژگی‌های جمعیتی و خانگی، تأثیر شبکه‌های اجتماعی و عوامل خارجی مانند قیمت آب و سیاست‌های تخفیفی دولت بر پذیرش فناوری حفاظت از آب مسکونی نشان داد افزایش درآمد و اصلاح ساختار قیمت‌گذاری آب، بیش از هر یک از ویژگی‌های جمعیتی یا ساختمانی، بر پذیرش خانواده‌ها از فناوری‌های صرفه‌جویی در مصرف آب اثرگذار است. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد، اثربخشی برنامه‌های تخفیف به‌هزینه فناوری حفاظت و ثروت جامعه بستگی دارد. به‌طوری‌که تخصیص تخفیف پتانسیل افزایش پذیرش فناوری‌های گران قیمت را تا ۵۰ درصد افزایش داد. علاوه‌براین، طبق نتایج ارتباط با شبکه‌های اجتماعی، بر نرخ پذیرش فناوری حفاظت از آب مسکونی نیز اثرگذار بود.

Zhao و همکاران (۲۰۱۹) به تعیین تأثیرگذارترین عادات صرفه‌جویی در مصرف آب و موانع اتخاذ عادات صرفه‌جویی در مصرف آب در ساختمان‌های مسکونی در هنگ کنگ پرداختند. نتایج بیانگر آن است که اگر سیاست‌ها برای برداشتن موانع شناسایی شده، هدف قرار گیرند، این امکان وجود دارد کل مصرف آب شیرین خانگی در هنگ کنگ به میزان ۱۴/۷ درصد کاهش یابد. همچنین مشخص شد، دانش و آگاهی در رابطه با کمبود آب و عادات خوب استفاده از آب، مانعی برای پذیرش عادات صرفه‌جویی در مصرف آب در خانواده‌های هنگ کنگ نیست. در مقابل، دولت باید توجه مردم را به اثرات محیط‌زیستی مصرف آب و مصرف بالای آب شیرین مردم هنگ کنگ جلب کند تا موانع آگاهی و انگیزه پذیرش را برطرف کند. Russell و Knoeri (۲۰۲۰) به بررسی تأثیر عادات افراد در میزان صرفه‌جویی در مصرف آب پرداخته است. در این پژوهش اگرچه میزان درآمد خانوار و جمعیت افراد خانواده به‌عنوان دو عامل مهم در میزان مصرف آب شناخته شده است اما این دو عامل قابلیت بهبود توسط سیاست‌گذاران را ندارند. همچنین بر طبق این تحقیق رویکردهای اجباری و داوطلبانه با تشویق افراد به صرفه‌جویی بیشتر، می‌تواند تا حدودی در صرفه‌جویی مصرف آب تأثیرگذار باشد. برخی از پژوهش‌ها نیز به تأثیر نگرش‌های مذهبی در میزان تمایل به صرفه‌جویی و حفاظت آب پرداخته‌اند (Wilson و همکاران، ۲۰۲۱). پژوهش انجام شده بر روی دانش‌آموزان مقطع متوسطه در ایران، همبستگی مثبت میان نگرش‌های مذهبی و تمایل به صرفه‌جویی در مصرف آب را نشان می‌دهد. همچنین براساس این پژوهش، نتایج به‌دست آمده فاصله بسیاری از وضعیت مطلوب دارد و لازم است در این زمینه اقدامات آموزشی و تبلیغاتی انجام گیرد (Marzban و همکاران، ۲۰۲۰).

در چند سال اخیر، استفاده از فناوری‌هایی برای تصفیه فاضلاب و استفاده مجدد از آن به‌عنوان یکی از راهکارهای صرفه‌جویی در مصرف آب مطرح شده است. میزان تمایل استفاده از این راهکار نسبت به نتایج گذشته اندکی متفاوت بوده است و زنان با وجود افزایش آگاهی نسبت به این روش، به دلیل احتمال بیماری، تمایل

کمتری در استفاده از این روش داشته‌اند و نسبت به سلامت خانواده خود هشیارتر بوده‌اند. همچنین سهولت استفاده و بوی بد، بیماری و هزینه‌ها اهمیت قابل ملاحظه‌ای در تمایل استفاده از این فناوری داشته است (Thiam و همکاران، ۲۰۲۱). استفاده از مخازن جمع‌آوری آب باران یکی دیگر از روش‌های حفاظت از آب است که برخی از پژوهشگران تمایل افراد در استفاده از آن را بررسی کرده‌اند. پژوهش صورت گرفته در سیدنی نشان می‌دهد استفاده سایر افراد در میزان پذیرش و تمایل پرداخت برای این مخازن تأثیرگذار است (Tapsuwan و همکاران، ۲۰۱۸).

در ایران در مطالعه ملکی نسب و همکاران (۱۳۸۹) ارزیابی صرفه‌جویی در مصرف آب خانگی به واسطه استفاده از قطعات کاهنده مصرف (شیرهای بهداشتی اهرمی و تجهیزات کاهنده مصرف شامل درفشان و دوش‌های کم مصرف) در سطح شهر شاندیز ارزیابی شد. نتایج تحلیل‌ها بیانگر آن است که جایگزینی شیرآلات جدید به‌طور متوسط موجب کاهش کل مصرف آب خانگی به میزان ۲۶ درصد در شهر شاندیز (کاهش ۲۷ تا ۳۴ درصدی در مصارف انتهایی مربوطه) شده است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهند، نسبت درآمد به هزینه اجرای طرح نصب تجهیزات کم مصرف در منازل مشترکین خانگی شهر شاندیز بیش از ۲ برابر می‌باشد. نتایج عابدی (۱۳۹۷) نشان داد مؤثرترین عوامل تمایل به پذیرش استفاده از تجهیزات کاهنده آب در داخل منازل به ترتیب به شاخص نگرش در مورد تکنولوژی‌های کارآمد آبی و تحصیلات با کشش‌های وزنی ۱/۱۴ و ۴/۱۷ اختصاص دارد. علاوه بر آن، افزایش شاخص نگرانی محیط‌زیستی و تحصیلات به ترتیب منجر به افزایش ۱/۱۴ و ۴/۱۱ درصدی تمایل به سرمایه‌گذاری در تکنولوژی کارآمد آبی در خارج از ساختمان، می‌شود. شهیدی و همکاران (۱۳۹۸) عوامل مؤثر بر الگوی مصرف آب شرب برای منابع کمیاب با استفاده از نظرات کارشناسان با بهره‌گیری از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و TOPSIS را بررسی کردند. نتایج بیانگر آن است، اگر چه افزایش قیمت‌ها شاید نتواند تأثیر مؤثری بر میزان مصرف داشته باشد اما راهبردهای تهیه و به‌کارگیری برچسب بهره‌وری آب بر روی کلیه تجهیزات و لوازم خانگی، استفاده از کاتالوگ‌های آموزشی و هشدارهای تبلیغاتی جهت کاهش مصرف آب، نصب وسایل و تجهیزات مصرف آب در مدارس و مراکز آموزشی و بعضی از مساجد و نگرش جامع منابع آب در ایران، بهترین راهبرد در میان راهبردهای الگوی مصرف آب شرب مناطق خشک است. شاهنکیان و همکاران (۱۳۹۹) عوامل مؤثر بر تمایل و رفتارهای حفاظت از آب ساکنان شهر تهران به کمک تیوری رفتار برنامه‌ریزی شده را بررسی کردند. نتایج نشان داد، نگرش و کنترل رفتاری درک شده بر تمایل به انجام رفتارهای صرفه‌جویی و رفتارهای افزایش بهره‌وری تأثیرگذار است. این موضوع نشان می‌دهد هرچه باورهای محکمی نسبت به نتایج مثبت انجام یک رفتار وجود داشته باشد، تمایل نسبت به انجام آن رفتار بیشتر است. اما هنجار

ذهنی، تأثیری بر تمایل به انجام این رفتارها ندارد. به‌علاوه، نتایج نشان می‌دهد تأثیرگذاری تمایل و کنترل رفتاری درک شده بر انجام هر دو رفتار است. بنابراین هم‌سو با یافته‌های تحقیق، افرادی که احساس می‌کنند انجام رفتارهای حفاظت از آب آسان است و درک بیشتری از اطمینان و کنترل بر انجام آن دارند، به احتمال بیشتری تمایل به انجام این رفتارها دارند. نارویی مرند و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای تأسیسات آبرسانی و مصرف آب در خوابگاه‌های دانشگاه سیستان و بلوچستان را بررسی کردند. نتایج بیانگر مشکلاتی از جمله، خراب و قدیمی بودن شیرآلات و اتصالات آن‌ها، قدیمی بودن سردوش‌ها، نامناسب بودن سیفون‌ها، استفاده نادرست از آب توسط افراد ساکن در خوابگاه‌ها و آبیاری نادرست فضای سبز می‌باشد، موارد بیان شده از عوامل مهم هدر رفت حجم بالایی از آب می‌باشد. بنابراین به‌منظور بررسی تأثیر راهکار پیشنهادی (تعویض شیرآلات خوابگاه با شیرآلات اهرمی)، شبکه آبرسانی خوابگاه با دو نوع شیر معمولی و اهرمی با نرم‌افزار WaterGEMS شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد، استفاده از شیرآلات اهرمی به‌طور متوسط حدود ۲۳ درصد کاهش مصرف آب را در پی دارد و می‌تواند تأثیر زیادی در کاهش مصرف آب و هزینه آب‌بها داشته باشد. کدخدایی و همکاران (۱۴۰۰) روش‌های فرهنگ‌سازی مصرف بهینه خانگی آب برای تغییر رفتار مصرف آب شهروندان کلان شهر مشهد را رتبه‌بندی کردند. ارزیابی انجام شده با استفاده از روش تلفیقی تحلیل سلسله مراتبی خاکستری (Grey-AHP) و روش تاپسیس خاکستری (Grey-TOPSIS) صورت گرفته است. نتایج نشان داد تبلیغات رسانه‌ای و استفاده از بیلبوردهای تبلیغاتی به‌عنوان مناسب‌ترین شیوه‌های فرهنگ‌سازی مصرف بهینه آب در شهر مشهد شناخته شدند. شیوه‌های توزیع بروشورهای آموزشی، آموزش در مدارس و برگزاری دوره‌های آموزشی برای شهروندان نیز به ترتیب در رتبه‌های دوم تا چهارم قرار گرفتند. شیوه‌های فرهنگ‌سازی مصرف بهینه آب که استفاده از آنها سهولت بیشتری دارد، مناسب‌تر بوده و تأثیر بیشتری بر کاهش مصرف آب دارند.

بنابراین در مجموع طبق ادبیات موضوع و مبانی نظری عوامل متعددی بر پذیرش خانوارهای شهری در استفاده از فناوری‌های کاهنده مصرف آب اثرگذار است که خلاصه آن در جدول (۱) ارائه شده است.

در مجموع باتوجه به اینکه کالاها و خدماتی که آب فراهم می‌کند برای منابع طبیعی و پایداری اقتصادی حیاتی بوده و در نهایت کیفیت زندگی را تحت تأثیر قرار می‌دهند و همچنین کیفیت و کمیت این منبع به شدت تحت تأثیر فشارهای ناشی از تقاضای رو به رشد و تغییر عرضه قرار دارد (Bruley و همکاران، ۲۰۲۱؛ Theodori و Fox، ۲۰۰۹)، بنابراین جهت کاهش تخریب منابع آب درک رفتارهای پاسدار محیط‌زیست ضروری به نظر می‌رسد. زیرا اگر افراد در رابطه با منابع طبیعی به‌خصوص آب احساس

مسئولیت و تعهد داشته باشند، رفتار سازگار با محیط زیست و در راستای حفاظت از منابع آب انجام خواهند داد (Harland و همکاران، ۲۰۰۷). به طوری که حفاظت از آب نشان دهنده اهمیت رفتار پیروی از محیط زیست برای داشتن محیط زیست پایدار است (Du و همکاران، ۲۰۱۸؛ Aprile و Fiorillo، ۲۰۱۶). به این منظور در این مطالعه جهت بررسی اثربخشی تکنولوژی های کارآمد آبی، به عنوان یکی از ابزارهای غیراقتصادی حفاظت از آب، رفتار خانوارهای شهری منطقه (۶) تهران ارزیابی شد. این منطقه توزیع جمعیت گروه های مختلف سنی مانند بیشتر مناطق تهران

بوده و حدود ۷۵ درصد از جمعیت در گروه سنی ۱۵ تا ۶۴ سال هستند. همچنین جمعیت زنان در این منطقه اندکی از جمعیت مردان بیشتر است و تعداد افراد خانوار در این منطقه مانند سایر مناطق ۲۲ گانه تهران طبق آخرین سرشماری انجام شده در سال ۱۳۹۵، حدود ۳ نفر بوده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۹). لازم به ذکر است طبق اطلاعات مرکز آمار (۱۳۹۹) در منطقه مورد ارزیابی حدود ۹۸ درصد افراد باسواد هستند که نسبت به متوسط شهر تهران با نرخ ۹۴ درصد باسواد، به عنوان یکی از با سوادترین و آگاه ترین مناطق تهران شناخته می شود.

جدول ۱- مؤلفه های مؤثر بر پذیرش خانوارهای شهری در استفاده از فناوری های کاهنده مصرف آب مبتنی بر ادبیات موضوع

ابعاد اثرگذاری	متغیرها	مطالعات
فردی	سن، جنسیت، تحصیلات، تعداد اعضای خانواده، تأهل	Suero و Rosenberg (۲۰۱۰)؛ Millock و Nauges (۲۰۱۰)؛ Mondéjar-Jiménez و همکاران، (۲۰۱۱)؛ Boylu و Gunay (۲۰۱۷)؛ Tong و همکاران (۲۰۱۷)؛ Rasoulkhani و همکاران (۲۰۱۸)؛ Russell و Knoeri (۲۰۲۰)؛ Wilson و همکاران، (۲۰۲۱)؛ Marzban و همکاران، (۲۰۲۰)؛ عابدی (۱۳۹۷)
اقتصادی	درآمد خانوار، هزینه خانوار، وضعیت مالکیت، شغل، هزینه آب و نحوه پرداخت آن	Suero و Rosenberg (۲۰۱۰)؛ Millock و Nauges (۲۰۱۰)؛ Mondéjar-Jiménez و همکاران، (۲۰۱۱)؛ Boylu و Gunay (۲۰۱۷)؛ Tong و همکاران، (۲۰۱۷)؛ Tapsuwan و همکاران (۲۰۱۸)؛ Rasoulkhani و همکاران (۲۰۱۸)؛ Russell و Knoeri (۲۰۲۰)؛ Wilson و همکاران، (۲۰۲۱)؛ Marzban و همکاران، (۲۰۲۰)؛ عابدی (۱۳۹۷)؛ شهیدی و همکاران (۱۳۹۸)
اجتماعی و نگرشی	شاخص های نگرش حفاظت از آب، عضویت در سازمان های مردم نهاد، شاخص های نگرشی و رفتاری مرتبط با حفاظت از محیط زیست	Dolnicar و Hurlimann (۲۰۱۰)؛ Nauges و Millock (۲۰۱۰)؛ Davies و همکاران (۲۰۱۴)؛ Kelly و Fong (۲۰۱۵)؛ Tong و همکاران، (۲۰۱۷)؛ Tapsuwan و همکاران (۲۰۱۸)؛ Russell و Knoeri (۲۰۲۰)؛ Wilson و همکاران، (۲۰۲۱)؛ عابدی (۱۳۹۷)؛ شهیدی و همکاران (۱۳۹۸)؛ شاهنگیان و همکاران (۱۳۹۹)؛ کدخدایی و همکاران (۱۴۰۰)

روش تحقیق

در کشورها و مناطق مختلف، مطالعات متعددی با استفاده از یک الگوی ویژه عوامل مؤثر بر پذیرش تکنولوژی های حفاظت از آب بررسی شدند. پژوهش های انجام شده در این زمینه بیشتر به دو گروه روش های آماری و رگرسیونی تقسیم بندی می شوند. برخی از تحقیقات از روش مدل سازی عامل بنیان^۱ برای بررسی میزان تمایل به پذیرش صرفه جویی در مصرف آب بهره گرفته اند (Rasoulkhani و همکاران، ۲۰۱۸). پرکاربردترین روش های رگرسیونی شامل رگرسیون های چند متغیره مانند حداقل مربعات معمولی، الگوهای با متغیر وابسته محدود شده مانند لاجیت^۲ و پروبیت^۳ و توییت^۴ هستند (عابدی و همکاران، ۱۳۹۳). در این پژوهش از آنجایی که ساختار پرسشنامه در بررسی تمایل به پذیرش خانوارها، یک متغیر وابسته با انتخاب دوگانه دارد، لازم است از یک مدل کیفی انتخاب برای محاسبه تمایل به پذیرش افراد استفاده شود. براین اساس به منظور ارزیابی تمایل خانوار شهری به پذیرش تکنولوژی های کارآمد آبی و همچنین جهت بررسی تأثیر متغیرهای مختلف توضیحی بر میزان تمایل به پذیرش خانوار، و باتوجه به گسسته بودن متغیر وابسته و برتری مدل لاجیت بر مدل های دیگر مانند

پروبیت و توییت به دلیل آسانی محاسبات و فراوان در مطالعات خارجی، از مدل رگرسیونی لاجیت استفاده شده است. در الگوی لاجیت مقادیر احتمال پیش بینی شده بین صفر و یک قرار دارند (Haneman، ۱۹۸۴). بر اساس مدل رگرسیونی لاجیت، در صورتی که فرد تکنولوژی های کارآمد آبی را بپذیرد P_i به صورت رابطه (۱) بیان می شود (مداح و سیف علیان، ۱۳۹۸).

$$p_i = F_{\eta}(\Delta U) = \frac{1}{1 + \exp[-(\Delta U)]} \quad (1)$$

$$= \frac{1}{\exp[-(\alpha - \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \theta S)]}$$

که در آن F_{η} تابع توزیع تجمعی با یک اختلاف لجستیک استاندارد است. U مطلوبیت غیرمستقیم است که فرد از پذیرش تکنولوژی های کارآمد آبی به دست می آورد و ΔU تفاضل مطلوبیت به دست آمده از تمایل و بی میلی به پذیرش برای ارزش وجودی می باشد و S دیگر متغیرهای اقتصادی-اجتماعی (رفتاری) مدل را نشان می دهد (پیری و همکاران، ۱۳۸۸). لازم به ذکر است برای تجزیه، تحلیل و تفسیر نتایج متغیرهای الگوی لاجیت لازم است از ضرایب اثر نهایی و کشش استفاده شود که با مشتق گیری تابع احتمال مدل لاجیت نسبت به متغیرهای توضیحی، اثر نهایی هر متغیر و کشش مربوطه به ترتیب با روابط (۲) و (۳) محاسبه می شود (پرهیزکاری و همکاران، ۱۳۹۵):

ویژگی‌های اجتماعی-اقتصادی خانوار در جدول (۲) ارائه شده و نشان می‌دهد کمترین سن در بین پاسخ دهندگان ۱۸ و بالاترین سن، ۸۲ سال می‌باشد. همچنین میانگین تعداد اعضای خانوار حدود ۴ نفر است. کمترین و بیشترین درآمد، ۲۰ و ۱۰۰ میلیون ریال می‌باشد. میانگین هزینه آب خانوار ۸۳/۵ هزار ریال در ماه است. طبق مبانی نظری سطح دانش و تحصیلات هم عامل موثری بر تمایل به پذیرش خانوار محسوب می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش سطح تحصیلات، دانش و آگاهی خانوارها در ارتباط با آب حفاظت از آب افزایش می‌یابد و به موجب آن، تمایل به پذیرش فناوری‌های کاهنده هدررفت آب نیز افزایش خواهد داشت. برپایه اطلاعات جدول (۲) کمترین و بیشترین تحصیلات پاسخ‌دهندگان در نمونه مورد بررسی به ترتیب به مقطع ابتدایی و دکتری مربوط می‌باشد. همچنین مطابق اطلاعات جمع‌آوری شده حدود ۶۰ درصد از پاسخ‌دهندگان را زنان و سایر افراد را مردان تشکیل می‌دهند. همچنین باتوجه به پاسخ‌های خانوار مشخص شد، ۵۷/۴ درصد از پاسخ‌دهندگان به پذیرش تجهیزات کارآمد گرایش داشتند یا در حال استفاده از آن بودند. براساس توزیع فراوانی پاسخ‌دهندگان براساس سطح سواد (جدول ۳)، ۲۹/۴٪ و ۲۷/۲٪ پاسخ‌دهندگان به ترتیب تحصیلاتی در سطح فوق‌لیسانس و لیسانس دارند و درصد کمی از پاسخ‌دهندگان تحصیلات سیکل به پایین دارند. علاوه بر آن، ویژگی‌های نگرشی حفاظت از آب هم عامل مهمی در تعیین تمایل به پذیرش خانوار تلقی می‌شود. به عبارت دیگر، افرادی که نسبت به صرفه‌جویی در مصرف آب متعهدتر هستند و به این مسائل توجه بیشتری دارند، به دلیل هم‌راستابودن استفاده از فناوری‌های کاهنده مصرف آب با نگرش حفاظتی آب در این افراد، نسبت به پذیرش این فناوری‌ها تمایل بیشتری دارند. توزیع فراوانی شاخص نگرش خانوار نسبت به حفاظت آب در جدول (۴) ارائه شده است. بستن شیر آب هنگام ظرف شستن، اطلاع از بحران کم‌آبی و بستن شیر آب هنگام مسواک زدن، به ترتیب با میانگین‌های ۴/۵۲، ۴/۵۱ و ۴/۳۷ مهمترین عامل‌های اثرگذار در نگرش مصرف‌کنندگان در حفاظت از آب بوده‌اند (جدول ۴).

جدول ۲- ویژگی‌های اجتماعی-اقتصادی پاسخ دهندگان

متغیر	کمترین	بیشترین	میانگین	انحراف معیار
سن پاسخ‌دهندگان	۱۸	۸۲	۳۶/۲۵	۱۲/۰۸۴
سطح تحصیلات	۲	۸	۵/۶۴	۱/۴۱۷
اندازه هر خانوار	۲	۸	۵/۶۴	۱/۲۴۱
هزینه آب (هزار ریال)	۲۰	۲۰۰	۸۳/۵۱	۴۱/۲۰۹
درآمد (میلیون ریال)	۲۰	۱۰۰	۳۶/۳۶	۱۴/۰۴۶
جنسیت	۰	۱	۰/۶	۰/۴۹۲
پذیرش تکنولوژی کارآمد آبی	۰	۱	۰/۵۶	۰/۴۹۸

$$ME = \frac{\partial P_i}{\partial X_{ik}} = \frac{e^{\Delta U}}{(1 + e^{\Delta U})^2} \beta_k \quad (2)$$

$$\varepsilon_i = \left[\frac{e^{\Delta U}}{(1 + e^{\Delta U})^2} \beta_k \right] \frac{X_{ik}}{P_i} \quad (3)$$

مدل رگرسیونی که در این پژوهش برای برآورد تمایل به پذیرش استفاده می‌شود، مبتنی بر ادبیات پذیرش تکنولوژی و پیشنه تحقیق به صورت رابطه (۴) است:

پارامترهای مدل رگرسیونی لاجیت با استفاده از روش حداکثر راست نمایی برآورد می‌شوند.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 + \beta_7 x_7 + \beta_8 x_8 + \beta_9 x_9 \quad (4)$$

که در آن، Y متغیر وابسته و تمایل خانوار به پذیرش را نشان می‌دهد، در صورتی که فرد حاضر به پذیرش تکنولوژی‌های کارآمد آبی باشد، Y برابر یک و در غیر این صورت Y صفر است. X_۱ وضعیت تاهل فرد (مجرد برابر با یک و متاهل برابر با صفر)، X_۲ اندازه خانوار، X_۳ جنسیت فرد پاسخ دهنده (زن برابر با یک و مرد برابر با صفر)، X_۴ تحصیلات فرد پاسخ دهنده، X_۵ نحوه پرداخت هزینه آب مصرفی (پرداخت از طریق شارژ برابر با یک و پرداخت شخصی برابر با صفر)، X_۶ هزینه هر دوره مصرف آب، X_۷ میزان درآمد، X_۸ شاخص نگرش به حفاظت آب) با استفاده از سوالات در قالب طیف لیکرت (استخراج شد) و X_۹ شاخص عملکرد به حفاظت آب (مبتنی بر تعداد رویکردهای حفاظت از آب تعیین شد) را نشان می‌دهد. در این زمینه لازم به ذکر است شاخص نگرش به حفاظت آب مربوط به نگرش در خصوص فعالیت‌های فردی حفاظت از آب است که در جدول (۴) به شرح فعالیت‌ها پرداخته شده است. همچنین شاخص عملکرد حفاظت آب بیانگر شاخصی است که تعداد عادت‌های پاسخ‌دهندگان را برای حفاظت از آب نشان می‌دهد و در جدول (۶) به شرح آنها پرداخته شده است.

همچنین لازم به ذکر است با بهره‌گیری از فن پیمایشی در قالب مصاحبه و تکمیل پرسشنامه طراحی برای خانوارهای منطقه ۶ استان تهران، اطلاعات مورد نیاز در سال ۱۳۹۹ جهت تجزیه و تحلیل جمع‌آوری شد. به این منظور باتوجه به جمعیت ۲۵۱۳۸۴ نفری این منطقه ۶، با استفاده از جدول مورگان (Morgan و Krejcie، ۱۹۷۰) تعداد ۳۸۴ پرسشنامه به عنوان نمونه تعیین شد، از این تعداد پرسشنامه پخش شده بین خانوار، ۱۳۶ پرسشنامه قابل بهره‌برداری بود. لازم به ذکر است فرم ساختاری این پرسشنامه شامل سوالات اقتصادی (میزان درآمد خانوار، هزینه آب مصرفی)، سوالات اجتماعی (تحصیلات، اندازه خانوار، سن، وضعیت تاهل، نحوه پرداخت هزینه آب)، سوالات نگرشی و رفتاری نسبت به حفاظت از آب بوده است. در مطالعه حاضر برای استخراج مدل رگرسیونی لاجیت و تعیین عوامل موثر بر تمایل به پذیرش خانوار برای تکنولوژی‌های کارآمد آبی از نرم‌افزار EVIEWS استفاده شده است.

جدول ۳- توزیع فراوانی پاسخ‌دهندگان بر اساس سطح تحصیلات

سطح تحصیلات	ابتدایی	سیکل	دیپلم	فوق دیپلم	لیسانس	فوق لیسانس	دکتری	مجموع
فراوانی	٪۰/۶۶	٪۸/۰۸	٪۱۶/۹۱	٪۱۲/۵	٪۲۷/۲	٪۲۹/۴	٪۵/۱۴	۱۰۰

جدول ۴- توزیع فراوانی پاسخ‌دهندگان براساس شاخص محیط‌زیستی نگرش نسبت به حفاظت از آب

سوالات	خیلی موافقم	موافقم	بی تفاوت	مخالفم	خیلی مخالفم	میانگین
بستن شیر آب هنگام ظرف شستن	٪۶۴/۷	٪۲۷/۲	٪۴/۴۱	٪۲/۹۴	٪۰/۷۳	۴/۵۲
اطلاع از بحران کم‌آبی	٪۵۵/۸۸	٪۴۱/۱۷	٪۲/۲۰	٪۰/۷۳	٪۰	۴/۵۱
بستن شیر آب هنگام مسواک زدن	٪۶۰/۲۹	٪۲۳/۵۲	٪۱۲/۵	٪۰/۷۳	٪۲/۹۴	۴/۳۸
تأثیر مشارکت مردم در حفظ آب	٪۵۵/۱۴	٪۳۳/۰۸	٪۷/۳۵	٪۲/۲۰	٪۲/۲۰	۴/۳۷
تمایل به استفاده از تجهیزات	٪۴۰/۴۴	٪۴۴/۸۵	٪۸/۸۲	٪۵/۱۴	٪۰/۷۳	۴/۱۹
دوش کوتاه گرفتن	٪۳۶/۰۲	٪۳۸/۹۷	٪۱۳/۹۷	٪۶/۶۱	٪۴/۴۱	۳/۹۶
خرید تجهیزات	٪۲۷/۹۴	٪۴۷/۰۵	٪۲۰/۵۸	٪۰/۷۳	٪۳/۶۷	۳/۹۵
آشنایی با تجهیزات	٪۲۵/۷۰	٪۳۵/۲۹	٪۱۸/۳۸	٪۱۶/۹۱	٪۳/۶۷	۳/۶۳
شرکت در NGOها	٪۹/۵۵	٪۲۴/۲۶	٪۳۸/۲۳	٪۱۶/۹۱	٪۱۱/۰۲	۳/۰۴
جمع کردن آب باران	٪۷/۳۵	٪۱۰/۲۹	٪۳۴/۵۵	٪۲۵/۷۳	٪۲۲/۰۵	۲/۵۵

نتایج بیانگر آن است که مهمترین رفتارهای حفاظت از آب نمونه مورد مطالعه شامل استفاده از ماشین لباس‌شویی هنگام تکمیل ظرفیت، ماشین ظرف‌شویی هنگام تکمیل ظرفیت و دوش کوتاه گرفتن به ترتیب با میانگین ۲/۵۵، ۳/۲۴ و ۳/۴۴ می‌باشد.

جدول ۶- ویژگی‌های رفتاری پاسخ‌دهندگان نسبت به حفاظت از آب

سوالات	میانگین	امتیاز
استفاده از ماشین ظرف‌شویی وقتی کاملاً پر است.	۲/۵۵	۳۴۸
استفاده از ماشین لباس‌شویی وقتی کاملاً پر است.	۳/۲۴	۴۴۱
دوش کوتاه گرفتن	۳/۴۴	۴۶۹
استفاده از سیفون ایمن	۳/۵۱	۴۷۸
استفاده از شیرآلات کاهش‌دهنده با ظاهر نه چندان زیبا اما کارآمد	۳/۶۶	۴۹۹
عدم استفاده از آب برای شستشوی خودرو	۴/۹۷	۶۷۶
استفاده از سر دوش کاهش‌دهنده	۵/۴۴	۷۴۰
چشم‌پوشی از سایر هزینه‌ها برای خرید تجهیزات کاهش‌دهنده	۵/۷۵	۷۸۲
جمع‌آوری آب باران	۸/۴۶	۱۱۵۱
استفاده مجدد از آب خارج شده از لباسشویی	۹/۳۰	۱۲۶۵

همانطور که در پیش اشاره شد، جهت تعیین مهمترین مؤلفه‌های اثرگذار بر پذیرش تکنولوژی‌های کارآمد آبی از الگوی لاجیت استفاده شده و نتایج الگو در جدول (۷) ارائه شده است. لازم به ذکر است ضرایب برآورد شده اولیه فقط علائم تأثیر متغیرهای مستقل و توضیحی را روی احتمال پذیرش متغیر وابسته نشان می‌دهد اما

توزیع فراوانی تمایل به استفاده از تجهیزات کارآمد آبی در جدول (۵) ارائه شده است. تجزیه و تحلیل اطلاعات بیانگر آن است که اکثر پاسخ‌دهندگان ضمن تمایل به پذیرش تجهیزات، در حال استفاده از تکنولوژی‌های کاهش‌دهنده مصرف آب در منازل نیز هستند. باتوجه به اینکه خانوار ساکن در منطقه مطالعاتی سطح درآمدی مناسبی دارند، بنابراین استفاده از این فناوری‌ها که تا حدودی موجب افزایش آسایش و رفاه خانوار می‌شود، منطقی است. همچنین این افراد به دلیل تجربه استفاده از این وسایل تمایل بیشتری به استفاده از این فناوری‌ها دارند. بنابراین طبق نتایج، ماشین لباس‌شویی، ماشین ظرف‌شویی و سیفون ایمن به ترتیب با ۸۶/۰۳، ۸۵/۳ و ۸۲/۳ درصد بیشترین میزان تمایل به مصرف را در میان وسایل کارآمد آبی در حفاظت از آب خانوار به خود اختصاص می‌دهند.

جدول ۵- توزیع فراوانی پاسخ‌دهندگان نسبت به استفاده از تجهیزات کارآمد آبی

سوالات	فراوانی
ماشین لباس‌شویی با حداقل مصرف آب	٪۸۶/۰۳
ماشین ظرف‌شویی با حداقل مصرف آب	٪۸۵/۳
سیفون ایمن	٪۸۲/۳۴
شیرآلات هوشمند و دارای سنسور	٪۷۴/۲۷
دستگاه تصفیه آب	٪۷۱/۳۲
سردوش کم فشار	٪۵۵/۱۵

رفتار حفاظتی پاسخ‌دهندگان در استفاده از منابع آب در پذیرش تکنولوژی‌های کارآمد آبی آن‌ها اهمیت دارد مطابق جدول (۶)

تفسیر مقداری ندارند؛ بنابراین اثر نهایی و کشش‌ها نیز جهت تفسیر متغیرها محاسبه و در جدول (۷) گزارش شده است. طبق نتایج، آماره LR بیانگر آن است که الگو در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشد که بازگوکننده آن است که متغیرهای توضیحی در مدل لاجیت، به خوبی توانسته‌اند متغیر وابسته را توصیف کنند. ضریب تعیین مک‌فادن در این برآورد ۰/۳۲ به‌دست آمده، به این معنی که ۳۲ درصد از متغیر

وابسته به وسیله متغیرهای مستقل توضیح داده می‌شود و مقدار ضریب تعیین مک‌فادن برای الگوی لاجیت برآورد شده، باتوجه‌به تعداد مشاهدات متغیر وابسته رقم مطلوبی می‌باشد (سام دلیری و همکاران، ۱۳۹۲). از آنجایی که متغیرهای وابسته مدل لاجیت فقط دو ارزش صفر و یک دارند، بنابراین مشاهدات پیرامون این دو نقطه قرار خواهد گرفت و به طور طبیعی ضریب تعیین این مدل‌ها بالا نیست.

جدول ۷- نتایج مدل لاجیت برای تعیین تمایل خانوار به پذیرش تکنولوژی‌های کارآمد آبی

متغیرها	نماد متغیر	ضریب	ارزش آماره Z	معنی‌داری آماره	اثر نهایی	کشش
ضریب ثابت	C	***۱۰/۳۷۲	-۳/۹۹۹	۰/۰۰۰	-۳/۵۴۸	--
وضعیت تاهل	M	***-۲/۲۱۳	-۳/۷۶۶	۰/۰۰۰	-۰/۷۵۶	-۱/۵۵۲
اندازه خانوار	SF	**۰/۳۵۴	۲/۲۲۳	۰/۰۲۶	۰/۱۲۱	۲/۲۹۷
جنسیت	G	-۰/۶۶۳	-۱/۴۲۲	۰/۱۵۴	-۰/۲۲۶	-۰/۶۹۲
سطح تحصیلات	EDU	۰/۳۲۴	۱/۵۳۰	۰/۱۲۵	۰/۱۱۰	۳/۲۰۰
نحوه پرداخت هزینه آب	PGH	***-۱/۳۳۰	-۲/۸۵۹	۰/۰۰۴	-۰/۴۵۵	-۱/۳۰۲
هزینه آب	CW	*۰/۰۱۰	۱/۷۹۰	۰/۰۷۳	۰/۰۰۳	۱/۴۶۵
درآمد	I	۰/۰۰۵	۰/۲۷۶	۰/۷۸۲	۰/۰۰۱	۰/۳۱۸
شاخص نگرش نسبت به حفاظت آب	INDEX_N	***۱/۹۱۶	۳/۸۳۱	۰/۰۰۰	۰/۶۵۵	۱۳/۱۰۹
شاخص عملکرد نسبت به حفاظت آب	NDEX_A	*۰/۲۷۲	۱/۷۱۳	۰/۰۸۶	۰/۰۹۳	۲/۱۶۶
Prob(LR statistic)=0.000			LR statistic= 60.86648			
Prob(LR statistic)=0.000						

*، **، *** به ترتیب معنی‌داری در سطح ۹۵، ۹۰ و ۹۹٪

باتوجه‌به جدول (۷) با وجود اینکه همه متغیرها معنادار نشده‌اند، اما می‌توان گفت به لحاظ نوع تأثیرگذاری علامت آن‌ها مورد انتظار و مطابق تئوری است. نتایج نشان می‌دهد شاخص نگرش نسبت به حفاظت، سطح تحصیلات و اندازه خانوار به ترتیب بیشترین اثرگذاری را بر تمایل به پذیرش استفاده از تجهیزات کارآمد آبی در نمونه مورد مطالعه دارد. به عبارت دیگر با یک درصد افزایش در شاخص نگرش نسبت به حفاظت از آب، سطح تحصیلات و اندازه خانوار، احتمال تمایل به پذیرش تکنولوژی‌های مذکور به ترتیب ۱۳، ۳/۲ و ۲/۲۹ درصد افزایش خواهد یافت. لازم به ذکر است اگرچه سطح تحصیلات از لحاظ آماری معنی‌دار نمی‌باشد، اما علامت آن مطابق انتظار مثبت است و با نتایج Devi (۲۰۲۰) و Kanza و همکاران (۲۰۱۴) سازگاری دارد. همچنین در تحقیقات Tianyu و Meng (۲۰۲۰) تأثیر تحصیلات در تمایل به پذیرش بسیار قابل ملاحظه بوده است و با افزایش تحصیلات، میزان انگیزه افراد برای حفاظت از آب افزایش یافته است. ضمن آنکه تاهل اثر منفی و معنی‌دار (در سطح یک درصد) بر تمایل به پذیرش تجهیزات کارآمد آبی در خانوار دارد. براین اساس افراد متاهل نسبت به افراد مجرد، ۱/۶ درصد احتمال تمایل کمتری نسبت به پذیرش چنین تکنولوژی‌هایی دارند. علت این امر می‌تواند ناشی از این باشد که با شروع زندگی مشترک و هزینه بالای زندگی، افراد احتمالاً دغدغه‌های مهم دیگری به جز کاهش مصرف آب دارند و استفاده

از تکنولوژی کارآمد آبی در اولویت سبد مصرفی قرار ندارد، بنابراین این موضوع منجر به کاهش تمایل به پذیرش تکنولوژی‌هایی آبی می‌شود. همچنین اندازه خانوار اثر مثبت و معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) بر میزان تمایل به پذیرش دارد. به عبارت دیگر با افزایش یک درصدی تعداد اعضای خانوار، احتمال تمایل خانوار به پذیرش تجهیزات کارآمد آبی ۲/۳ درصد افزایش می‌یابد. اثر نهایی هم برای این متغیر نشان می‌دهد، با افزایش یک نفر در تعداد اعضای خانوار، احتمال تمایل به پذیرش ۰/۱۲ درصد افزایش می‌یابد. به این معنی که با افزایش تعداد اعضای خانواده و بالاتر رفتن میزان هزینه و مخارج، خانوار ترجیح می‌دهند با استفاده از تجهیزات کارآمد میزان آب مصرفی و هزینه آب خود را کاهش دهند، نتایج Kanza و همکاران (۲۰۲۰)، Kanza و همکاران (۲۰۱۴) و Wilson و همکاران (۲۰۲۱) این موضوع را تایید می‌کند. متغیر جنسیت به لحاظ آماری معنادار نشده است اما دارای اثر منفی بر تمایل به پذیرش خانوار است. کشش برای این متغیر نشان می‌دهد که احتمال تمایل به پذیرش زنان ۰/۷ درصد کمتر از مردان می‌باشد. نتایج طبق مطالعه Kanza و همکاران (۲۰۱۴) بیانگر این واقعیت است که زنان نسبت به مردان تمایل کمتری به پذیرش تجهیزات کارآمد آبی دارند. درحالی‌که در برخی از پژوهش‌ها، تمایل زنان به پذیرش فناوری حفاظت از آب بیشتر بوده است (Tong و همکاران، ۲۰۱۷). علاوه‌برآن، متغیر نحوه پرداخت هزینه آب، در سطح یک درصد

این مطالعه به تعیین و برآورد تمایل خانوار شهری به پذیرش تکنولوژی‌های کارآمد آبی با استفاده از تکمیل پرسشنامه و الگوی رگرسیونی لاجیت پرداخته است. نتایج بیانگر این است که، عملکرد و نگرش خانوارهای نمونه مورد بررسی در زمینه حفاظت از آب به هم نزدیک است و در این زمینه سطح تحصیلات بسیار تأثیرگذار است. چرا که منطقه مورد مطالعه از آگاه‌ترین و باسوادترین مناطق استان تهران محسوب می‌شود. به طوری که براساس داده‌های به دست آمده از پرسشنامه اکثر افراد تحصیلات فوق لیسانس و لیسانس بودند و ۵۷/۴ درصد خانوار تمایل به پذیرش تجهیزات کارآمد آبی داشتند یا در حال استفاده از تجهیزات بیان شده هستند. علاوه بر آن نتایج نشان می‌دهد متغیرهای تاهل، جنسیت و نحوه پرداخت هزینه آب، اثر منفی و متغیرهای اندازه خانوار، تحصیلات، درآمد، هزینه آب و شاخص نگرش و عملکرد نسبت به حفاظت اثر مثبت بر تمایل به پذیرش خانوار برای تجهیزات کارآمد آبی دارند. طبق نتایج اندازه خانوار که به نوعی شاخص استفاده از آب، تفسیر می‌شود نشان‌دهنده این است که با افزایش تعداد اعضای خانوار میزان تمایل خانوار به پذیرش تجهیزات کارآمد کاهش می‌یابد. علاوه بر آن نحوه پرداخت هزینه آب هم بیانگر این است که اگر پرداخت هزینه آب به صورت شارژ باشد با توجه به مشخص نبودن میزان مصرف آب در این حالت، تلاش برای کاهش مصرف آب کمتر است و تمایل برای پذیرش تکنولوژی‌های کارآمد آبی نیز کمتر می‌شود. شاخص‌های محیط زیستی نگرش و عملکرد حفاظت هم مبین آن است که با افزایش آگاهی و دانش خانوار، تمایل آن‌ها برای استفاده و پذیرش تکنولوژی‌های کارآمد بیشتر می‌شود. میزان هزینه آب مصرفی هم اگرچه اثر نهایی کوچکی دارد اما نشان‌دهنده آن است که با افزایش هزینه آب میزان تمایل خانوار به پذیرش تجهیزات هم بیشتر می‌شود. بنابراین با توجه به نتایج مطالعه حاضر و محدودیت دسترسی به منابع آبی، لازم است، در کنار صرفه‌جویی و حفاظت خانوارها، دولت با حمایت و سیاست‌گذاری مناسب محیط‌زیستی و در راستای حفظ منابع آب و اهمیت به آب به عنوان حیاتی‌ترین مسئله کشور، تلاش‌های روزافزون برای حل بحران کم‌آبی در شهرها را داشته باشد. هرگونه سیاست‌گذاری توجیهی و اقتصادی در زمینه تلاش برای از بین بردن آب به عنوان یک کالای اجتماعی و ارزان قیمت می‌تواند منجر به افزایش صرفه‌جویی و حفاظت از آب از سوی خانوارها شود و هدررفت آب را کاهش دهد. طبق نتایج مستخرج از پرسشنامه، یکی از دلایل عدم استفاده یا استفاده کم خانوارها از ابزارهای کاهش‌دهنده مصرف آب، هزینه بالاتر این ابزارها نسبت به ابزارهای معمولی است که اعطای تسهیلات به خانوار جهت تهیه ابزارهای کاهش‌دهنده مصرف آب می‌تواند راهی مناسب برای حفاظت بیشتر از آب باشد. علاوه بر آن نمایانند تخفیف برای اولین استفاده افراد

معنی‌دار و اثر منفی بر تمایل به پذیرش تکنولوژی‌هایی مذکور دارد. به عبارت دیگر افرادی که هزینه آب خود را به صورت شارژ ماهانه پرداخت می‌کنند به میزان ۱/۳ درصد احتمال، تمایل کمتری نسبت به پذیرش تکنولوژی‌های کارآمد دارند، درحالی که خانوارهایی که هزینه آب خود را به صورت شخصی پرداخت می‌کنند، نسبت به خانوارهایی که هزینه آب آن‌ها به صورت شارژ پرداخت می‌شود، احتمال پذیرش بالاتری برای تجهیزات کارآمد دارند. به دلیل اینکه افراد هنگام پرداخت شارژ درک کمتری نسبت به هزینه مصرفی آب دارند، بنابراین توجه و تمایل کمتری نسبت کاهش مصرف آب و استفاده از تجهیزات کارآمد آبی دارند که یافته‌های Millock و Nauges (۲۰۱۰) این نتیجه را تایید کرده است. هزینه آب نیز مطابق انتظار معنی‌دار (در سطح ۱۰ درصد) و اثر مثبت بر تمایل به پذیرش تجهیزات کارآمد آبی دارد. براین اساس یک درصد افزایش در هزینه آب، میزان احتمال تمایل به پذیرش را ۱/۴۶٪ افزایش می‌دهد. این موضوع بیانگر این واقعیت است که با افزایش هزینه آب، خانوار برای جلوگیری از افزایش هزینه‌ها و مخارج خود ترجیح می‌دهند با استفاده از تجهیزات کارآمد آبی، مصرف و هزینه آب خود را کاهش دهند. همچنین متغیر درآمد به لحاظ آماری معنادار نشده است اما اثر مثبتی بر تمایل خانوار به پذیرش تجهیزات دارد که مطالعات Kanza و همکاران (۲۰۱۴)، Lu و همکاران (۲۰۱۹) و Lucio و همکاران (۲۰۱۸) درستی این موضوع را اثبات می‌کند. کشش برآورد شده برای درآمد نشان می‌دهد، با یک درصد افزایش در درآمد خانوار میزان احتمال تمایل خانوار به پذیرش تجهیزات کاهش‌دهنده مصرف آب، ۰/۳ درصد افزایش می‌یابد. مطالعه Millock و Nauges (۲۰۱۰) تأیید می‌کند، درآمد اثر کوچکی روی تمایل خانوار به پذیرش تجهیزات کارآمد دارد. نتایج Thorvaldson و همکاران (۲۰۱۰) و Wilson و همکاران (۲۰۲۱) نشان می‌دهد تأثیر مستقیم افزایش درآمد، تمایل به پذیرش فناوری‌های کارآمد آبی است. شاخص محیط‌زیستی نگرش به حفاظت، در سطح ۱٪ معنی‌دار شده است و اثر مثبتی بر تمایل به پذیرش دارد. مطابق نتایج، یک درصد افزایش در سطح فرهنگ و احساس مسئولیت خانوار نسبت به حفاظت از آب، احتمال تمایل خانوار به پذیرش تجهیزات حفاظت‌کننده و کاهش‌دهنده مصرف آب را ۱۳/۱٪ افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر، هرچه آگاهی‌بخشی و دانش خانوار و در ادامه احساس مسئولیت خانوار در رابطه با تجهیزات و تکنولوژی‌های کارآمد آبی افزایش یابد، تمایل خانوارها به پذیرش این تجهیزات افزایش خواهد یافت (Thorvaldson و همکاران، ۲۰۱۰؛ Tianyu و Meng، ۲۰۲۰). شاخص عملکرد حفاظتی نیز در سطح ۱۰٪ معنادار شده است. این شاخص اثر مثبتی بر تمایل به پذیرش دارد. به گونه‌ای که با افزایش رفتارهای حفاظتی خانوار در جهت استفاده از تجهیزات کاهش‌دهنده مصرف آب، میزان احتمال تمایل خانوار به پذیرش و استفاده از این تجهیزات ۲/۱۶٪ افزایش می‌یابد.

- بلالی، ح.، سعدی، ح. ا.، و وحدت ادب، ر. ۱۳۹۵. عوامل‌های اقتصادی و اجتماعی موثر بر پذیرش تکنولوژی آبیاری تحت فشار در گندم‌زارهای شهرستان همدان. پژوهش مدیریت آموزش کشاورزی، (۳۷): ۹۸-۸۵.
- بختیاری، ن.، زنگنه، ی.، تقوایی، م. و زنگنه، م. ۱۳۹۹. بررسی الگوی فضایی مصرف آب خانگی در اصفهان و تحلیل عوامل اجتماعی و فرهنگی مؤثر بر آن. پژوهش‌های جغرافیای انسانی، (۲): ۵۱۵-۵۳۱.
- پرهیزکاری، ا.، مظفری، م.، حسینی خدادادی، م. و پرهیزکاری، ر. ۱۳۹۵. بررسی عوامل موثر بر مشارکت کشاورزان حوزه آبخیز شاهرود (استان قزوین) در به‌کارگیری عملیات حفاظت آب‌و خاک با کاربرد الگوی لاجیت چندگزینه‌ای. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، (۱۳): ۲۴۱-۲۵۳.
- پیری، م.، مسنن مظفری، م. و جاودان، ا. ۱۳۸۸. برآورد تمایل به پرداخت افراد برای ارزش وجودی جنگل‌ها: (مطالعه موردی جنگل‌های ارسباران). جنگل و فرآورده‌های چوب (منابع طبیعی ایران)، (۴): ۳۴۳-۳۵۷.
- جلالی، ز.، اشرفی ریزی، ح.، سلیمانی، م. ر. و افشار، م. ۱۳۹۶. عوامل موثر بر پذیرش فناوری اطلاعات توسط کتابداران دانشگاهی اصفهان بر مدل TAM. مجله دانشکده پیراپزشکی دانشگاه علوم پزشکی تهران، (۱۶): ۴۱۰-۴۰۰.
- حبیبی، م. ح. ۱۳۷۸. مدیریت مصرف آب. اولین همایش بیلان آب. سازمان آب و برق خوزستان، اهواز، ایران.
- حمدی احمدآباد، ی.، لیاقت، ع. م.، رسول‌زاده، ع. و قادرپور، ر. ۱۳۹۸. بررسی روند سرانه مصرف آب در ایران براساس رژیم غذایی دو دهه گذشته. تحقیقات آب و خاک ایران، (۱): ۷۷-۸۷.
- دانش، ف.، رشیدی، و.، زاهدی، ر. و صادقیان، ن. ۱۳۹۱. تحلیلی بر مفاهیم پذیرش و اشاعه نوآوری جهت ارائه مدل مفهومی برای پذیرش و اشاعه اطلاعات. فصلنامه علمی پژوهشی پژوهشگاه علوم و فناوری اطلاعات ایران، (۳): ۵۶۹-۵۸۲.
- سام دلیری، ا.، امیرنژاد، ح. و مرتضوی، س. ا. ۱۳۹۲. برآورد تمایل به پرداخت ساکنان شهرستان چالوس جهت حفاظت از دریاچه ولشت با استفاده از روش ارزش‌گذاری مشروط با انتخاب دوگانه یک و نیم بعدی. بوم‌شناسی کاربردی، (۵): ۱-۱۲.
- شهرداری تهران. سالنامه آماری شهر تهران. ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸. سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات. تهران.
- شاهنکیان، س.، تابش، م.، یزدان پناه، م. و زبیدی، ط. ۱۳۹۹. مقایسه عوامل روانشناختی موثر بر رفتارهای صرفه‌جویی و رفتارهای افزایش بهره‌وری آب خانگی. مورد مطالعه شهر تهران. تحقیقات منابع آب ایران، (۴): ۳۱-۴۶.

از این تجهیزات می‌تواند موجب تشویق خانوار در خرید و نصب برخی از این تجهیزات باشد. اجرای طرح‌های تشویقی (معافیت‌ها و یا تخفیف‌های مالیاتی، تعرفه‌های کاهشی و غیره برای خانوارهایی که به صرفه‌جویی از آب پرداخته و جزو مشترکین کمتر از میانگین الگوی مصرف آب هستند، می‌تواند موثر واقع شود. چنین مشوق‌های اقتصادی می‌تواند خانوار را به استفاده از ابزارهایی با حداقل مصرف میزان آب مصرفی، هدایت نماید. طبق نتایج، پرداخت مستقیم، تأثیر مثبتی بر استفاده از تجهیزات کارآمد آبی و در نتیجه کاهش هدررفت آب دارد؛ بنابراین تفکیک اجباری کنتور خانوارها و حذف هزینه آب از روی شارژ نیز در حفاظت از آب می‌تواند راهگشا باشد. در واقع تفکیک اجباری کنتور خانوار می‌تواند راهی مناسب برای حذف هزینه آب از روی شارژ باشد. چرا که صدور قبض مجزا، منجر می‌شود، مشترکین نسبت به مصرف آب خانگی، آگاهی و در نتیجه نسبت به کاهش مصرف عکس‌العمل نشان دهند. طبق نتایج یکی دیگر از دلایل عدم استفاده خانوار از تجهیزات کارآمد، عدم دانش کافی در این مورد و مقاومت برای استفاده از ابزارهای قدیمی می‌باشد به عبارت دیگر باتوجه به آنکه سطح تحصیلات، تقویت نگرش حفاظتی و افزایش عادات رفتاری در حفاظت از آب اثر قابل توجهی در پذیرش این قبیل فناوری‌ها دارد، بنابراین افزایش فرهنگ و آگاهی بخشی به مردم می‌تواند نقش عمده‌ای در حفاظت از آب و استفاده از تجهیزات کارآمد به وسیله خانوار داشته باشد و در این راستا دولت می‌تواند به کمک تبلیغ مؤثر از رسانه‌های عمومی (رادیو، تلویزیون و ..) و فضای مجازی و حتی برگزاری کارگاه‌های ترویجی و آموزشی در سرای محلات نقش مؤثری را ایفا کند. علاوه بر موارد ذکر شده طبق بررسی اطلاعات جمع‌آوری شده از پرسشنامه عامل دیگر استفاده کمتر خانوار از ابزارهای کاهش‌دهنده مصرف آب، ظاهر نه چندان زیبای این تجهیزات است. اگرچه این دلیل نسبت به سایر دلایل اهمیت کمتری دارد، لازم است تدابیر مناسبی جهت تولید ابزارهای خوش‌نما توسط کارخانه‌های سازنده داخلی برای زیاتر بودن این ابزار، صورت پذیرد.

پی‌نوشت

- 1-Theory of Reasoned Action
- 2-The Theory Of Planned Behavioural
- 3-Decomposed Theory Of Planned Behaviour
- 4-Extended Technology Acceptance Model
- 5-Unified Theory Of Acceptance And Use Of Technology
- 6-Agent-based modeling
- 7-Logit model
- 8-Probit model
- 9-Tobit model

- Ardalan A., Khaleghy Rad M. and Hadi M. 2019. Urban Water Issues in the Megacity of Tehran. In: Ray, B., Shaw, R. (eds) Urban Drought. Disaster Risk Reduction. Springer, 263-288.
- Ashraf S., AghaKouchak A., Nazemi A., Mirchi A., Sade-gh M., Moftakhari H. R., Hassanzadeh E., Miao C.-Y., Madani K. and Mousavi Baygi M. 2019. Compound- ing effects of human activities and climatic changes on surface water availability in Iran. *Climatic change*, 152(3): 379-391.
- Bögel P. M. and Upham P. 2018. Role of psychology in sociotechnical transitions studies: Review in re- lation to consumption and technology acceptance. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 28: 122-136.
- Boylu A. A. and Gunay G. 2017. Do families' attitudes and behaviors support sustainable water consump- tion? *European Journal of Sustainable Development*, 6(4): 115-115.
- Bruley E., Locatelli B. and Lavorel S. 2021. Nature's con- tributions to people: Coproducing quality of life from multifunctional landscapes. *Ecology and Society*, 26(1): 12.
- Corral-Verdugo V. c., Bechtel R. B. and Fraijo-Sing B. 2003. Environmental beliefs and water conservation: An empirical study. *Journal of Environmental Psy- chology*, 23(3): 247-257.
- Davies K., Doolan C., Van Den Honert R. and Shi R. 2014. Water-saving impacts of Smart Meter technol- ogy: An empirical 5 year, whole-of-community study in Sydney, Australia. *Water Resources Research*, 50(9): 7348-7358.
- Davis F. D. 1989. Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS quarterly*, 13(3): 319-340.
- Devi J. S. 2020. Water Supply for Willingness to Pay and Affordability to Pay in Chennai City, Tamil Nadu, In- dia. *Journal of critical reviews*, 7(4): 1232-1239.
- Dolnicar S. and Hurlimann A. 2010. Australians' water conservation behaviours and attitudes. *Australasian Journal of Water Resources*, 14(1): 43-53.
- Du Y., Wang X., Brombal D., Moriggi A., Sharpley A. شهیدی، ع.، خاشعی سیوکی، ع. و زراعتکار، ز. ۱۳۹۸. بررسی راهبردهای موثر بر مدیریت تقاضای آب شرب شهر بیرجند. آب و فاضلاب، ۳۰ (۱): ۱۳۵-۱۳۰.
- عابدی، س. ۱۳۹۷. ارزیابی اثربخشی ابزارهای اقتصادی در کاهش هدررفت آب، دومین کنفرانس اقتصاد آب، تهران. ایران.
- عابدی، س.، یزدانی، س.، صالح، ا.، سلامی، ح. ا. و جهانسوز، م. ر. ۱۳۹۳. تجزیه وتحلیل عوامل مؤثر بر پذیرش کشاورزی حفاظتی در استان فارس. تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران، ۲۴۷-۲۵۵: (۲)۴۵.
- نارویی مرنند، ف.، صفری، س. و گیوه چی، س. ۱۴۰۰. بررسی الگوی مصرف آب در مکان عمومی (مطالعه موردی: دانشگاه سیستان و بلوچستان). نشریه آب و توسعه پایدار، ۷ (۴): ۴۵-۵۰.
- کدخدایی، م.، جعفرزاده، م. و عباسی، ع. ۱۴۰۰. رتبه‌بندی روش‌های فرهنگ‌سازی مصرف بهینه خانگی آب در کلان شهرها با استفاده از مدل تلفیقی Grey-AHP و Grey-TOPSIS. آب و فاضلاب، ۳۲ (۱): ۲۷-۴۰.
- کورکی‌نژاد، ژ. ۱۴۰۰. کارایی فنی آب و تعیین عوامل مؤثر بر پذیرش تکنولوژی نوین آبیاری با تأکید بر نقش سرمایه اجتماعی (تولیدکنندگان پسته شهرستان سیرجان). تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران، ۵۲ (۳): ۵۰۷-۵۲۳.
- مرکز آمار ایران. ۱۳۹۹. ویژگی‌های جمعیتی، اجتماعی و اقتصادی مناطق ۲۲ گانه تهران در سرشماری سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵. سازمان برنامه و بودجه کشور. تهران، ایران.
- ملکی نسب، ا.، و تابش، م.، و قالیباف سرشوری، م. ۱۳۸۹. بررسی میدانی تأثیر نصب تجهیزات شیرآلات کم‌مصرف در کاهش مصرف آب خانگی. تحقیقات منابع آب ایران، ۶ (۲) (مسلسل ۱۷): ۳۶-۴۵.
- مداح، م. و سیف‌علیان، س. ۱۳۹۸. عوامل مؤثر بر تمایل به پرداخت در پروژه انتقال آب دریای خزر با استفاده از روش ارزش‌گذاری مشروط (مطالعه موردی شهر سمنان). مجله آب و فاضلاب، ۳۰ (۵): ۷۵-۸۵.
- Abubakar I. R. 2021. Understanding the socioeconom- ic and environmental indicators of household water treatment in Nigeria. *Utilities Policy*, 70: 101209.
- Adepoju A. O. and Akinwale Y. O. 2019. Factors influ- encing willingness to adopt renewable energy tech- nologies among micro and small enterprises in Lagos State Nigeria. *International Journal of Sustainable En- ergy Planning and Management*, 19: 69-82.
- Aprile M. C. and Fiorillo D. 2016. Water conservation behavior and environmental concerns. *Journal of Cleaner Production*, 159: 119-129

- Krejcie R. V. and Morgan D. W. 1970. Determining sample size for research activities. *Educational and psychological measurement*, 30(3): 607-610.
- Lee J., Kim K., Shin H. and Hwang J. 2018. Acceptance factors of appropriate technology: Case of water purification systems in Binh Dinh, Vietnam. *Sustainability*, 10(7): 2255.
- Li B., Ding J., Wang J., Zhang B. and Zhang L. 2021. Key factors affecting the adoption willingness, behavior, and willingness-behavior consistency of farmers regarding photovoltaic agriculture in China. *Energy Policy*, 149: 112101.
- Lu L., Deller D. and Hviid M. 2019. Price and behavioural signals to encourage household water conservation: Implications for the UK. *Water Resources Management*, 33(2): 475-491.
- Lucio M., Giulia R. and Lorenzo C. 2018. Investigating attitudes towards water savings, price increases, and willingness to pay among Italian university students. *Water Resources Management*, 32(12): 4123-4138.
- Liang J., Zhang SH., Wang H. and Du H. 2022. Yanrong Wang Adoption behavior of water efficiency labeling: origin, research progress and theoretical framework – evidence from China. *Water Policy*, 24(1): 66–82.
- Marzban A., Ansari A., Rafiee S. Y., Ebrahimi A. A., Dolatabadi M. and Beykzavieh A. 2020. Relationship between Religious Attitudes and Water Conservation Tendency in High School Students. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 5(1): 955-961.
- Millock K. and Nauges C. 2010. Household adoption of water-efficient equipment: the role of socio-economic factors, environmental attitudes and policy. *Environmental and Resource Economics*, 46(4): 539-565.
- Mondéjar-Jiménez J., Cordente-Rodríguez M., Meseguer-Santamaría M. and Gázquez-Abad J. 2011. Environmental behavior and water saving in Spanish housing. *International Journal of Environmental Research*, 5(1): 1-10.
- Olmstead S. M. and Stavins R. N. 2009. Comparing price and nonprice approaches to urban water conservation. *Water Resources Research*, 45(4): 1-10.
- and Pang S. 2018. Changes in environmental awareness and its connection to local environmental management in water conservation zones: the case of Beijing, China. *Sustainability*, 10(6): 2087.
- Dupont D. P. and Renzetti S. 2013. Household behavior related to water conservation. *Water Resources and Economics*, 4: 22-37.
- Davis F. D. 1989. Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS quarterly*, 13(3): 319-340.
- Ebadi A. G., Toughani M., Najafi A. and Babae M. 2020. A brief overview on current environmental issues in Iran. *Central Asian Journal of Environmental Science and Technology Innovation*, 1(1): 1-11.
- Fan L., Wang F., Liu G., Yang X. and Qin W. 2014. Public perception of water consumption and its effects on water conservation behavior. *Water*, 6(6): 1771-1784.
- Harland P., Staats H. and Wilke H. A. 2007. Situational and personality factors as direct or personal norm mediated predictors of pro-environmental behavior: Questions derived from norm-activation theory. *Basic and applied social psychology*, 29(4): 323-334.
- Haneman W. M. 1984. Welfare evaluation in contingent valuation experiments with discrete responses. *American Journal of Agricultural Economics*, 71(3): 332-341.
- Kanza P., Boyer T. A., Ghimire M. and Moss J. Q. 2014. Household Adoption of Water Conservation and Resilience under Drought: The Case of Oklahoma City. *Water Economics and Policy*, 1(2): 1-22.
- Kelly D. and Fong D. 2015. Water conservation: the implications of user awareness, attitude, and behaviour. 41st International Symposium of CIB W062 Water Supply and Drainage for Buildings. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, China.
- Koop S. H. A. Van Dorssen A. J. and Brouwer S. 2019. Enhancing domestic water conservation behaviour: A review of empirical studies on influencing tactics. *Journal of environmental management*, 247: 867-876.

- Environmental Economics and Policy Studies, 23(1): 173-210.
- Thorvaldson J., Pritchett J. and Goemans C. 2010. Western Households' Water Knowledge, Preferences, and Willingness to Pay. Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroecologie, 58(4): 497-514.
- Tianyu J. and Meng L. 2020. Does education increase pro-environmental willingness to pay? Evidence from Chinese household survey. Journal of cleaner production, 275: 122713.
- Tong Y., Fan L. and Niu H. 2017. Water conservation awareness and practices in households receiving improved water supply: A gender-based analysis. Journal of cleaner production, 141: 947-955.
- Valipour M., Bateni S. M. and Jun C. 2021. Global Surface Temperature: A New Insight. Climate, 9(5): 81
- Verma P. and Sinha N. 2018. Integrating perceived economic wellbeing to technology acceptance model: The case of mobile based agricultural extension service. Technological forecasting and social change, 126: 207-216.
- Waskom R., Kallenberger J., Bauder T., Wardle E. and Neibauer M. 2018. Homeowner's guide to: household water conservation Colorado State University. Libraries, 1-6.
- Wilson C., Athukorala W., Torgler B., Gifford R., Garcia-Valiñas M. A. and Managi S. 2021. Willingness to pay to ensure a continuous water supply with minimum restrictions. Empirical Economics, 61(3): 1519-1537.
- Zhao Y., Bao Y. and Lee W. 2019. Barriers to Adoption of Water-Saving Habits in Residential Buildings in Hong Kong. Sustainability, 11: 1-13.
- Rasoulkhani K., Logasa B., Presa Reyes M. and Mostafavi A. 2018. Understanding Fundamental Phenomena Affecting the Water Conservation Technology Adoption of Residential Consumers Using Agent-Based Modeling. Water, 10(8): 993.
- Russell S. V. and Knoeri C. 2020. Exploring the psychosocial and behavioural determinants of household water conservation and intention. International Journal of Water Resources Development, 36(6): 940-955.
- Rodriguez-Sanchez C. and Sarabia-Sanchez F.J. 2020. Does water context matter in water conservation decision behaviour? Journal of Sustainability, 12(7): 3026.
- Saatsaz M. 2020. A historical investigation on water resources management in Iran. Environment. Development and Sustainability, 22(3): 1749-1785.
- Stavenhagen M., Buurman J. and Tortajada C. 2018. Saving water in cities: Assessing policies for residential water demand management in four cities in Europe. Cities, 79: 187-195.
- Suero F. and Rosenberg D. 2010. Estimating and verifying household potential to conserve water. World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change. Island, United States.
- Tapsuwan S., Cook S. and Moglia M. 2018. Willingness to Pay for Rainwater Tank Features: A Post-Drought Analysis of Sydney Water Users. Water, 10(9): 1-15.
- Theodori G. and Fox W. 2009. Attitudes and behaviors on water conservation in Texas. Texas water development board contract, Contract No. 0704830767: 1-54.
- Thiam D. R., Dinar A. and Ntuli H. 2021. Promotion of residential water conservation measures in South Africa: the role of water-saving equipment.

Investigating the Consequences of Implementing Pressurized Irrigation Projects and Its Effect on Satisfaction and Continuity of Its Use in Qazvin Province

M. Masoomi¹, H. Shabanali Fami^{2*}, H. Varmazyari³, S. Kordalivand⁴

1,2,3,4- M.Sc. of Rural Development, Professor, Assistant Professor and PhD student, Department of Agricultural Development and Management, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: hfami@ut.ac.ir)

Received: 17-04-2022

Revised: 14-05-2022

Accepted: 15-05-2022

Available Online: 21-12-2022

بررسی پیامدهای اجرای طرح‌های آبیاری تحت فشار و اثر آن بر رضایت و استمرار استفاده از آن در استان قزوین

محمد معصومی^۱، حسین شعبانعلی فمی^{۲*}، حجت ورمزیاری^۳، سمیه کردعلیوند^۴

۱، ۲، ۳، ۴- به ترتیب کارشناسی ارشد توسعه روستایی، استاد، استادیار و دانشجوی دکتری رشته توسعه کشاورزی، گروه مدیریت و توسعه کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: hfami@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

Abstract

The main objective of this study was to perform a survey method to assess the implications of implementing pressured irrigation projects in Qazvin province, as well as their effect on satisfaction and continuing use. The main data collection tool was a questionnaire, data collection method, documentary study, and interview, and the study population of this study included all farmers who installed a pressurized irrigation system in their fields between 2015 and the end of 2018 (N=477), which was determined based on Krejcie and Morgan sampling table with a sample size of 214 people. In addition to dispersion and centrality statistics, coefficient of variation and confirmatory factor analysis were utilized to assess and explain the data. Farmers' opinions of the social, economic, and environmental impacts of the implementation of a pressurized irrigation system were investigated in this study. The findings revealed that farmers' average perceptions in these three aspects were higher than normal (The average of each dimension is higher than 3). The most important social consequences of adopting pressured irrigation systems, according to the respondents, are "reducing rural migration", "creating a sense of constructive competition among farmers to use these systems", and "sustainability and continuity of agricultural jobs in the region, as well as hope for the future of agriculture". "Optimal water usage management", "quantitative enhancement of agricultural productivity", and "enhanced farm investment" are among the most important economic consequences. "The prospect of uniform distribution of production inputs through reservoirs" was one of the most significant environmental impacts.

Keywords: Water Management, Pressurized Irrigation Systems, Outcome, Satisfaction, Qazvin Province.

چکیده

تحقیق حاضر با هدف بررسی پیامدهای اجرای طرح‌های آبیاری تحت فشار و اثر آن بر رضایت و استمرار استفاده از آن در استان قزوین، به روش پیمایشی انجام شد. ابزار اصلی جمع‌آوری داده‌ها پرسشنامه، روش جمع‌آوری داده‌ها مطالعه اسنادی و مصاحبه و جامعه مورد مطالعه این پژوهش در برگیرنده تمام کشاورزانی بود که از سال ۱۳۹۴ تا پایان سال ۱۳۹۷ سیستم آبیاری تحت فشار را در مزارع خود پیاده کرده بودند (N=۴۷۷). بر اساس جدول نمونه‌گیری کرجسی و مورگان حجم نمونه ۲۱۴ نفر تعیین شد و برای تجزیه و تحلیل و توصیف داده‌ها علاوه بر آماره‌های پراکندگی و مرکزیت، از ضریب تغییرات و تحلیل عاملی تأییدی استفاده شد. در این تحقیق ادراک کشاورزان در سه زمینه پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی ناشی از اجرای سیستم آبیاری تحت فشار بررسی شد. نتایج نشان داد، به‌طور کلی میانگین ادراکی کلی کشاورزان در ارتباط با این سه بعد بالاتر از مقدار متوسط بود (میانگین هر بعد بالاتر از ۳). از دیدگاه پاسخگویان مهمترین پیامدهای اجتماعی اجرای سیستم‌های آبیاری تحت فشار «کاهش مهاجرت روستاییان»، «ایجاد حس رقابت سازنده بین کشاورزان برای استفاده از این سیستم‌ها» و «پایداری و استمرار شغل کشاورزی در منطقه و امید به آینده کشاورزی» است، مهمترین پیامدهای اقتصادی شامل «مدیریت مصرف بهینه آب»، «بهبود کمی تولیدات کشاورزی» و «افزایش سرمایه‌گذاری در مزرعه» و مهمترین پیامدهای محیط‌زیستی شامل، «امکان توزیع یکنواخت نهاده‌های تولید از طریق مخازن»، «افزایش حاصلخیزی خاک و پایداری منابع آب و خاک» و «امکان آبیاری در تپه ماهورها و شیب‌ها» بودند.

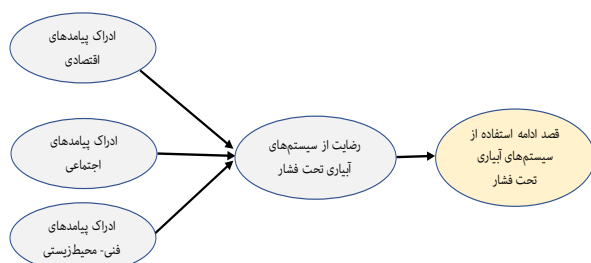
واژه‌های کلیدی: مدیریت آب، سیستم‌های آبیاری تحت فشار، پیامد، رضایت، استان قزوین.

کمبود آب به چالشی بزرگ در سراسر جهان تبدیل شده است (Castillo و همکاران، ۲۰۲۱)، بر اساس گزارش توسعه جهانی آب سازمان ملل متحد در سال ۲۰۱۸، پیش‌بینی شده است تقاضای جهانی آب تا سال ۲۰۵۰ بین ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش یابد. نزدیک به ۴/۸ تا ۵/۷ میلیارد نفر با کمبود آب مواجه خواهند شد و این امر نیاز به برنامه‌ریزی سریع، اجرای استراتژیک و مدیریت موثر و اقدامات متقابل در برابر چالش‌های بی‌شمار و پیچیده آب را ایجاد می‌کند (Wang، ۲۰۲۰)، مدیریت یکپارچه منابع آب به دلیل کمبود آب، رشد جمعیت، تغییرات آب‌وهوا و بدتر شدن کیفیت منابع اهمیت فزاینده‌ای دارد (Candido و همکاران، ۲۰۲۲)، از طرفی تخصیص آب در شش بعد کمیت، کیفیت، زمان‌بندی، مکان، قیمت و هزینه همچنان یک چالش مداوم پیش روی برنامه‌ریزی منابع آب در سراسر جهان است. این چالش با شواهد فزاینده‌ای از تغییرات آب‌وهوا و عوامل تنش‌زا تأمین آب مرتبط با آن گسترده‌تر می‌شود. این تنش سیستم‌های غذا، انرژی و آب را به چالش می‌کشد (Ward و همکاران، ۲۰۲۲).

در ایران مقایسه میانگین بارندگی کل (۲۵۰ میلیمتر در سال) با میانگین بارندگی جهان (۸۶۰ میلیمتر در سال) نشان می‌دهد، میزان بارندگی در ایران حدود یک سوم میانگین بارندگی جهان است (پیرایش و همکاران، ۱۳۹۳). نظر به محدودیت منابع آب کشور، سرمایه‌گذاری‌های بیشتر در بخش عرضه آب نمی‌تواند پاسخگوی افزایش تقاضای آب باشد و این محدودیت از یک طرف و تقاضای فزاینده آن در بخش‌های مختلف از طرف دیگر، باعث گسترش شکاف بین عرضه و تقاضای آب شده است (آبایی و همکاران، ۱۳۹۱). بنابراین راه‌حل بحران آب را باید در چگونگی توسعه و مدیریت صحیح منابع آبی یا به بیان دیگر مدیریت تقاضا جستجو کرد. مدیریت تقاضای آب به مفهوم بهره‌برداری بهتر و کارتر از آب می‌باشد که از طریق وضع قوانین، تدوین آیین‌نامه‌ها، بهره‌گیری از ابزارهای اقتصادی و برنامه‌ریزی و نظارت و مشارکت بهره‌برداران امکان‌پذیر می‌باشد مهمترین راهکار مدیریت تقاضا در بخش کشاورزی افزایش راندمان آبیاری از طریق استفاده مجدد از آب‌های برگشتی، نوسازی کانال‌های انتقال آب، توسعه سیستم‌های آبیاری تحت فشار و کم آبیاری است (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۳). در این میان استفاده از سیستم‌های آبیاری تحت فشار یکی از روش‌های بهینه مصرف آب در بخش کشاورزی است که در سال‌های گذشته، دولت سرمایه‌گذاری‌های زیادی برای توسعه آن انجام داده است (امینی و افصلی ابرقویی، ۱۳۹۲). پیاده‌سازی و استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری پیامدهای اجتماعی، فرهنگی، اقتصادی و محیط‌زیستی دارد، استقرار و به‌کارگیری سیستم‌های آبیاری

تحت فشار به‌عنوان یک فناوری نوآورانه تغییراتی را در زندگی جامعه پذیرنده ایجاد خواهند نمود که از این تغییرات تحت عنوان دستاوردهای اجتماعی و فرهنگی نام برده می‌شود. این دستاوردهای طیف گسترده‌ای را در بر می‌گیرند، برای مثال می‌توان به مدیریت صحیح آب، کاهش فقر، افزایش دانش و آگاهی کشاورزان از نوآوری‌ها، مشارکت‌های اجتماعی، کاهش بیکاری، ماندگاری جمعیت و کاهش مهاجرت اشاره کرد (جلالیان، ۱۳۹۱). درواقع، شیوه‌های جدید آبیاری تحت فشار از طریق جلوگیری از اتلاف بی‌رویه آب می‌تواند تا حدودی مشکل کم آبی را در بخش کشاورزی بر طرف کند (بشیری امانی و همکاران، ۱۳۹۲). دشت قزوین یکی از دشت‌های مستعد کشور در تولید محصولات کشاورزی است که همانند بسیاری از دشت‌های کشور، بیلان آب زیرزمینی در آن منفی است. کبیری و همکاران (۱۳۹۶) افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت قزوین را بررسی کردند، در طی ۵۱ سال (۱۳۴۳-۱۳۹۴) این افت بین ۵ تا ۱۰۰ متر در بخش‌های مختلف آن دشت بود. همچنین میزان تخلیه سفره‌های زیرزمینی نیز از حدود ۴۰۰ میلیون متر مکعب در سال ۱۳۴۸ به حدود ۱۹۹۰ میلیون متر مکعب در سال ۱۳۹۲ رسیده است که یکی از دلایل آن برداشت بی‌رویه از چاه‌های غیرمجاز تشخیص داده شده است. باریکانی و همکاران (۱۳۹۰) محدودیت منابع آب‌های سطحی منطقه و فصلی بودن این منابع را عامل اصلی فشار بر روی سفره‌های زیرزمینی بیان کردند. بر اساس گزارش این تحقیق برداشت اضافه بر ظرفیت از آب‌های زیرزمینی در دشت قزوین موجب افت سالیانه ۱/۵ متر سطح سفره‌های زیرزمینی و فرو نشست زمین تا حدود ۲۵ سانتی‌متر در سال شده است. این شرایط که معلول توسعه بی‌رویه یا ناپایدار کشاورزی و خشکسالی سال‌های اخیر است، دشت قزوین را از نظر امنیت آبی کشاورزی در شرایط بحرانی قرار داده است که ضرورت دارد تدابیری برای کنترل این مشکل اندیشیده شود. این راهکارها شامل نصب کنتورهای هوشمند در چاه‌های کشاورزی، کنترل حفر چاه‌های غیرمجاز تا بهبود بهره‌وری مصرف آب در مزرعه از طریق به‌کارگیری روش‌ها و فناوری‌های نوین مانند آبیاری تحت فشار می‌شود. پژوهش‌ها روند کاهش تقاضا برای شیوه‌های نوین آبیاری به دلیل مشکلات متعدد از قبیل مشکلات فنی، اقتصادی و اجتماعی، فردی و غیره را نشان می‌دهد (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۱). از این رو بررسی ادراک کشاورزان در زمینه پیامدهای سیستم‌های آبیاری تحت فشار و اثر آن بر رضایت و قصد ادامه استفاده از این سیستم‌های آبیاری لازم و ضروری است. در ادامه به بررسی تحقیقاتی که بر روی پیامدهای استفاده از سیستم‌های آبیاری تحت فشار تمرکز داشته‌اند، پرداخته شده است. مطالعات پیشین داخلی صورت گرفته در این حوزه بیشتر در زمینه پیامدهای اقتصادی استفاده از سیستم‌های آبیاری تحت

و رضایت کشاورزان نیز، انگیزه ادامه استفاده از این سیستم‌های آبیاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. باتوجه به آنچه بیان شد، الگوی مفهومی پژوهش در شکل (۱) به تصویر کشیده شده است.



شکل ۱- مدل مفهومی پژوهش

مواد و روش

این تحقیق از نظر رویکرد نوعی تحقیق کمی می‌باشد که به شیوه پیمایشی انجام شد. از لحاظ هدف از نوع تحقیقات کاربردی و از لحاظ شیوه گردآوری داده‌ها از نوع تحقیقات میدانی است. علاوه بر آن، این پژوهش از نظر کنترل متغیرها از نوع تحقیقات غیرآزمایشی و باتوجه به اینکه در یک مقطع زمانی خاص انجام می‌گیرد از نوع مقطعی می‌باشد. برای اندازه‌گیری متغیرها و گردآوری داده‌ها از پرسشنامه استفاده شد، به این صورت که باتوجه به اهداف پژوهش و چارچوب مفهومی پس از بررسی پیش‌نگاشته‌ها، پرسشنامه تدوین شد و باتوجه به زمینه پژوهش (آبیاری تحت فشار) اصلاحاتی در آن انجام شد. درواقع پرسشنامه مورد استفاده در این پژوهش از نوع محقق ساخت بود که باتوجه به اهداف پژوهش و چارچوب مفهومی طراحی شد. در این پژوهش جهت تعیین روایی پرسشنامه از روایی محتوا استفاده شد. برای این منظور متناسب با مبانی نظری و مطالعات پیشین در زمینه موضوع و توجه به جزئیات هر کدام از متغیرهای پژوهش، سوالات پرسشنامه به‌منظور اطمینان از روایی لازم با نظر اساتید راهنما و مشاور بررسی شد. به منظور اطمینان از دقت و اعتمادپذیری پرسشنامه تحقیق نیز از آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی استفاده شد. جامعه آماری این پژوهش در بر گیرنده تمام کشاورزانی بود که از سال ۱۳۹۴ تا پایان سال ۱۳۹۷ سیستم آبیاری تحت فشار در مزارع خود را پیاده کرده بودند که بر اساس آمار دریافت شده از مدیریت آب و خاک و امور فنی و مهندسی سازمان جهاد کشاورزی استان قزوین (جدول ۱)، تعداد کشاورزان مجری سیستم آبیاری تحت فشار به تفکیک هر شهرستان (N= ۴۷۷) بودند. بر اساس جدول نمونه‌گیری Morgan و Krejcie (۱۹۷۰) حجم نمونه ۲۱۴ نفر تعیین شد. نمونه پژوهش به‌صورت تصادفی و به شیوه نمونه‌گیری طبقه‌ای متناسب گزینش شد (n=۲۱۴).

فشار می‌باشد. به‌عنوان نمونه، نتایج پژوهش نظری و همکاران (۱۳۹۲) در زمینه ارزیابی تأثیر گسترش آبیاری تحت فشار در تغییر ساخت زراعی، الگوی کشت و راندمان تولید در شهرستان میاندواب نشان می‌دهد یکپارچگی اراضی و کاهش تعداد قطعات در بین بهره‌برداران، افزایش دو برابری مساحت کشت چغندرقد، افزایش تولید محصولات زراعی تحت کشت منطقه شامل گندم، جو و چغندرقد و به‌طور خلاصه تغییر الگوی کشت و افزایش راندمان تولید از پیامدهای سیستم‌های آبیاری تحت فشار می‌باشد. نجفی کانی و زنگانه (۱۳۹۲) در پژوهش خود از طریق مقایسه بین دو شیوه آبیاری تحت فشار و سنتی در روستاهای شهرستان علی آباد کنول نتیجه گرفتند، در روش آبیاری تحت فشار هزینه تولید کمتر، میزان تولید بیشتر، مصرف کود و سم کمتر و اثربخشی آن بیشتر است. میزان مشارکت عمرانی کشاورزان استفاده کننده از دو روش، تفاوت معناداری نداشت اما میزان کمک مالی کشاورزان نوین در عمران روستایی نسبت به کشاورزان سنتی بیشتر بود. همچنین رضایت از شغل کشاورزی، پایداری و استمرار شغل و انگیزه ماندگاری سرپرست و اعضای خانواده کشاورزان بهره‌مند از سیستم آبیاری تحت فشار بیشتر بود. گذشته از مطالعات انجام شده در داخل کشور، مطالعاتی در سطح بین‌المللی صورت گرفته است که به پیامدهایی از قبیل افزایش بهره‌وری نیروی کار و زمین (Lecina و همکاران، ۲۰۱۰)؛ کاهش هزینه‌های نهاده تولید، بهبود اوضاع محیط‌زیستی، افزایش بهره‌وری از منابع موجود و افزایش راندمان آبیاری (Schoengold و Zilberman، ۲۰۰۴)؛ سودآور بودن سیستم‌های آبیاری قطره‌ای و توجیه اقتصادی آن (Cetin و همکاران، ۲۰۰۴) و توسعه پایدار کشاورزی به واسطه توسعه سیستم‌های نوین آبیاری اشاره شده است. به ناچار این پیامدها در همه نقاط جهان اتفاق نمی‌افتد. برای مثال به‌کارگیری فناوری آبیاری تحت فشار ممکن است در سال‌های اول باعث صرفه‌جویی در مصرف آب شود اما در ادامه با گسترش سطح زیر کشت، کشاورزان به برداشت آب بیشتر از سفره‌های زیرزمینی به میزان قبل تشویق خواهند شد. همچنین بهبود بهره‌وری آب (که آب تنها یک عامل پیش‌ران برای شکل‌گیری آن است)، بر پدیده امنیت غذایی (که پدیده‌ای چند وجهی و پیچیده است)، در کوتاه مدت اتفاق نمی‌افتد و یا پیامد آن در کوتاه مدت محسوس نیست. باتوجه به آنچه بیان شد، در یک جمع‌بندی کلی می‌توان از بررسی پیشینه پژوهش‌ها این‌طور نتیجه گرفت که متغیرهای متعدد و زیادی در مطالعات پیشین به‌عنوان عوامل پیامدهای سیستم‌های آبیاری تحت فشار بیان شده است و مطالعات انجام شده تا حدودی پراکنده بوده و از الگویی خاص پیروی نمی‌کنند. با این حال در یک دسته‌بندی کلی می‌توان این پیامدها را در سه دسته پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی دسته‌بندی کرد. پی بردن کشاورزان از این پیامدها بر رضایت آنها از سیستم‌های آبیاری تحت فشار تأثیرگذار است

جدول ۱- جامعه و نمونه آماری به تفکیک هر شهرستان (استعلام از مدیریت آب و خاک و امور فنی و مهندسی سازمان جهاد کشاورزی استان قزوین، ۱۳۹۹)

شهرستان	جامعه آماری	نمونه آماری
قزوین	۱۳۹	۶۲
آوج	۲۱	۱۰
بویین زهرا	۸۰	۳۶
البرز	۳۷	۱۲
آبیک	۲۹	۱۳
تاکستان	۱۸۱	۸۱
کل استان	۴۷۷	۲۱۴

همچنین به منظور تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده در مطالعه حاضر از نرم‌افزارهای SPSS و Smart PLS استفاده شد. در ادامه، ابتدا یافته‌های حاصل از تحلیل داده‌های مربوط به ویژگی‌های فردی، اقتصادی و واحد بهره‌برداری آورده شده است و سپس باتوجه به اهداف پژوهش یافته‌های مربوط به تحلیل داده‌ها آورده شده است.

نتایج و بحث

۱- توصیف نمونه مورد مطالعه

به‌طور کلی ۷۵/۸ درصد از پاسخگویان مرد بودند و از نظر میانگین سنی، ۵۳/۶ درصد در دامنه سنی بین ۳۰ تا ۴۵ سال قرار داشتند. از نظر منبع تأمین آب کشاورزی بیش از نیمی از پاسخگویان یعنی ۱۱۵ نفر معادل ۵۵/۶ درصد، منبع تأمین آب خود را چاه مشترک ذکر کردند. همچنین ۵۳ نفر معادل ۲۵/۶ درصد چاه اختصاصی داشتند. از نظر نوع سیستم آبیاری تحت فشار، اکثریت پاسخگویان یعنی ۱۵۸ نفر معادل ۷۶/۳ درصد نوع سیستم آبیاری تحت فشار اجرا شده در مزرعه و باغات خود را از نوع قطره‌ای بیان کردند. در مقابل ۲۸ نفر معادل ۱۳/۵ درصد سیستم آبیاری بارانی و ۲۱ نفر معادل ۱۰/۱ درصد هر دو نوع سیستم آبیاری تحت فشار قطره‌ای و بارانی را اجرا کرده بودند.

- بررسی ادراک کشاورزان از پیامدهای طرح آبیاری تحت فشار

رتبه‌بندی گویه‌های مربوط به ادراک کشاورزان از پیامدهای اجتماعی اجرای سیستم آبیاری تحت فشار در منطقه نشان می‌دهد، از دیدگاه آن‌ها پیامدهای اجتماعی طرح به ترتیب سه پیامد «کاهش مهاجرت روستاییان»، «ایجاد حس رقابت سازنده بین کشاورزان برای استفاده از این سیستم‌ها» و «پایداری و استمرار شغل کشاورزی در منطقه و امید به آینده کشاورزی» بیشترین رای را داشتند، در مقابل سه پیامد «ارتقا پایگاه و منزلت اجتماعی کشاورزان»، «افزایش رضایت از شغل کشاورزی» و «تقویت مشارکت و انسجام گروهی کشاورزان» کمترین

رای را داشتند (جدول ۲). علاوه بر آن در مورد ادراک کشاورزان از پیامدهای اقتصادی اجرای سیستم آبیاری تحت فشار نتایج رتبه‌بندی گویه‌های بیانگر آن بود که از دیدگاه کشاورزان سه پیامد «مدیریت مصرف بهینه آب»، «بهبود کمی تولیدات کشاورزی» و «افزایش سرمایه‌گذاری در مزرعه» بیشترین رای؛ در مقابل سه پیامد «افزایش درآمد سالیانه کشاورزان»، «کاهش هزینه‌های مزرعه» و «افزایش بهره‌وری تولید» کمترین رای را داشتند (جدول ۲). علاوه بر آن این ادراک کشاورزان در مورد پیامدهای محیط‌زیستی اجرای طرح نشان می‌دهد مهم‌ترین پیامدهای محیط‌زیستی موردپسند در سیستم آبیاری تحت فشار، «امکان توزیع یکنواخت نهاده‌های تولید (کود و سم) از طریق مخازن»، و «افزایش حاصلخیزی خاک به دلیل کنترل آبیاری و پایداری منابع آب و خاک» بودند و در مورد پیامدهای محیط‌زیستی «افزایش سفتی خاک»، «کاهش گونه‌های گیاهی خودرو» و «جلوگیری از افت فزاینده سفره‌های آب زیرزمینی» پاسخگویان کمترین رای را داشتند (جدول ۲). مقایسه میانگین کلی ادراک پاسخگویان در ارتباط با سه مؤلفه مورد بررسی نشان داد میانگین ادراک پیامدهای اجتماعی در مقایسه با دو مؤلفه دیگر بالاتر بود (جدول ۲).

- بررسی وضعیت رضایت کشاورزان از اجرای سیستم‌های آبیاری تحت فشار

بررسی وضعیت رضایت کشاورزان از اجرای سیستم آبیاری تحت فشار بیانگر آن بود که گویه‌های «به‌طور کلی از پیامدهای اجتماعی طرح این رضایت دارم»، «پیامدهای احداث این طرح تا حد زیادی به آنچه مردم انتظار داشتند، نزدیک است» و «به‌طور کلی از حاصلخیزی خاک و پایداری منابع آب و خاک به‌واسطه اجرای سیستم آبیاری تحت فشار رضایت دارم» به ترتیب بیشترین رای؛ در مقابل گویه‌های «به‌طور کلی از پیامدهای اقتصادی اجرای این طرح رضایت دارم»، «مسئولان در اجرای این طرح، تصمیم صحیحی گرفته‌اند» و «به‌طور کلی اجرای طرح کیفیت زندگی مردم روستا را بهبود بخشیده است» به ترتیب کمترین رای را از دیدگاه پاسخگویان داشتند.

- بررسی وضعیت تمایل به استمرار استفاده از سیستم‌های آبیاری تحت فشار در بین کشاورزان

رتبه‌بندی گویه‌های مربوط به تمایل به استمرار استفاده از سیستم آبیاری تحت فشار نشان داد، دو گویه «اجرای این سیستم آبیاری را به دیگر کشاورزان توصیه می‌کنم» و «هدف من ادامه استفاده از سیستم آبیاری تحت فشار به‌جای استفاده از دیگر روش‌های آبیاری است» در رتبه‌های اول و دوم و در مقابل دو گویه «قصد دارم به‌جای عدم ادامه استفاده سیستم آبیاری تحت فشار به استفاده از آن ادامه دهم» و «اگر بتوانم در آینده قصد دارم در بخش دیگری از مزرعه آبیاری تحت فشار را اجرا کنم» در رتبه‌های پنجم و ششم به بیان دیگر در رتبه‌های آخر قرار گرفتند.

جدول ۲- ادراک کشاورزان نسبت به پیامدهای طرح‌های آبیاری تحت فشار

رتبه	ضریب تغییرات	انحراف معیار	میانگین*	گویه	زمینه
۱	۰/۱۹۴	۰/۶۸	۳/۴۹	کاهش مهاجرت روستاییان	اجتماعی
۲	۰/۲۱۸	۰/۷۴	۳/۳۸	ایجاد حس رقابت سازنده بین کشاورزان برای استفاده از این سیستم‌ها	
۳	۰/۲۲۶	۰/۷۵	۳/۳۱	پایداری و استمرار شغل کشاورزی در منطقه و امید به آینده کشاورزی	
۴	۰/۲۳۰	۰/۸۷	۳/۷۸	بهبود معیشت پایدار مردم	
۵	۰/۲۳۷	۰/۸۳	۳/۴۹	افزایش فرصت‌های شغلی در حوزه پشتیبانی (تعمیرگاه)	
۶	۰/۲۳۹	۰/۸۰	۳/۳۴	ایجاد اشتغال برای فارغ‌التحصیلان دانشگاهی رشته‌های کشاورزی	
۷	۰/۲۴۶	۰/۸۲	۳/۳۲	تقویت مشارکت و انسجام گروهی کشاورزان	
۸	۰/۲۵۲	۰/۹۰	۳/۵۷	افزایش رضایت از شغل کشاورزی	
۹	۰/۳۳۱	۰/۷۰	۲/۱۱	ارتقا پایگاه و منزلت اجتماعی کشاورزان	
			۳/۳۱	میانگین کل	
۱	۰/۱۷۷	۰/۵۷	۳/۲۱	مدیریت مصرف بهینه آب	اقتصادی
۲	۰/۱۸۱	۰/۵۷	۳/۱۴	بهبود کمی تولیدات کشاورزی	
۳	۰/۱۸۲	۰/۵۸	۳/۱۸	افزایش سرمایه‌گذاری در مزرعه	
۴	۰/۱۸۶	۰/۶۲	۳/۳۲	بهبود کیفی تولیدات کشاورزی	
۵	۰/۱۹۲	۰/۶۲	۳/۲۲	یکپارچه‌سازی اراضی زراعی منطقه	
۶	۰/۱۹۴	۰/۶۵	۳/۳۵	کاهش هزینه کنترل آفات، علف‌های هرز و بیماری‌ها	
۷	۰/۱۹۵	۰/۶۳	۳/۲۴	سودآوری بیشتر کشاورز در بلند مدت	
۸	۰/۲۱۲	۰/۶۸	۳/۲۰	افزایش درآمد سالیانه کشاورزان	
۹	۰/۲۱۳	۰/۶۸	۳/۱۸	افزایش بهره‌وری تولید	
۱۰	۰/۲۵۹	۰/۸۶	۳/۳۱	کاهش هزینه‌های مزرعه	
			۳/۲۳	میانگین کل	
۱	۰/۲۰۵	۰/۶۷	۳/۲۷	امکان توزیع یکنواخت نهاده‌های تولید (کود و سم) از طریق مخازن	محیط‌زیستی
۲	۰/۲۲۰	۰/۷۳	۳/۳۱	افزایش حاصلخیزی خاک به دلیل کنترل آبیاری و پایداری منابع آب و خاک	
۳	۰/۲۳۰	۰/۷۵	۳/۲۵	کاهش جمعیت کرم خاکی	
۴	۰/۲۴۶	۰/۸۰	۳/۲۴	افزایش مصرف سموم و کودهای شیمیایی	
۵	۰/۲۴۷	۰/۸۲	۳/۳۲	جلوگیری از افت فزاینده سفره‌های آب زیر زمینی	
۶	۰/۲۵۵	۰/۸۶	۳/۳۷	کاهش گونه‌های گیاهی خودرو	
۷	۰/۲۶۲	۰/۸۲	۳/۱۲	افزایش سفتی خاک	
			۳/۲۸	میانگین کل	

۲- تحلیل مؤلفه‌های ادراک پیامدهای اجتماعی، ادراک پیامدهای اقتصادی و ادراک پیامدهای محیط‌زیستی و تأثیر آن بر رضایت و تمایل به استمرار استفاده از سیستم آبیاری تحت فشار.

- بررسی مدل اندازه‌گیری پژوهش

در این بخش مدل اندازه‌گیری پژوهش بررسی شد. این مدل شامل مؤلفه‌های ادراک پیامدهای اجتماعی، ادراک پیامدهای اقتصادی و ادراک پیامدهای محیط‌زیستی است که بر رضایت از سیستم آبیاری تحت فشار اثر می‌گذارند و رضایت از سیستم آبیاری تحت فشار،

تمایل به استمرار استفاده از سیستم آبیاری تحت فشار را پیش‌بینی می‌کند. به‌منظور اطمینان از روایی مدل اندازه‌گیری پژوهش از شاخص‌های میانگین واریانس استخراج شده (AVE) و معیار فورنل و لارکر، همچنین به‌منظور بررسی پایایی مدل اندازه‌گیری از شاخص‌های روایی ترکیبی (CR) و آلفای کرونباخ استفاده شد. در ادامه مدل اندازه‌گیری پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌طور که مقادیر بارعاملی گزارش شده گویه‌ها در جدول (۳) نشان می‌دهد مقدار بارعاملی برای هر کدام از گویه‌های مورد بررسی بالاتر از مقدار ۰/۴ بود و در برخی موارد که گویه‌ای مقادیر بار عاملی کمتر از

۰/۴ داشت از تحلیل حذف شد (EC2). باتوجه به اینکه مقادیر آماره t برای هر یک از گویه‌ها بالاتر از مقدار استاندارد ۱/۹۶ می‌باشد می‌توان بیان کرد گویه‌های انتخاب شده برای هر یک از سازه‌های پژوهش در سطح پنج درصد خطا معنادار بوده و برای سنجش متناظر خود دقت لازم را دارد. در ارتباط با پایایی سازه‌های پژوهش همان‌طور که مقادیر گزارش شده برای شاخص پایایی ترکیبی و آلفای کرونباخ نشان می‌دهد همه سازه‌ها پایایی لازم را دارند، زیرا مقادیر گزارش شده برای پایایی ترکیبی و آلفای کرونباخ در مورد هر کدام از سازه‌ها بالاتر از مقدار استاندارد ۰/۷ حاصل شد که پایایی سازه‌های پژوهش را نشان می‌دهد (جدول ۳).

جدول ۳- پایایی سنجی سازه‌های مدل اندازه‌گیری پژوهش

سازه	نشنگر	بار علمی	مقدار t	آلفای کرونباخ	پایایی ترکیبی
ادراک	ارتقا پایگاه و منزلت اجتماعی کشاورزان (S۱)	۰/۶۸	۱۷/۵۶	۰/۸۴	۰/۸۷
پیامدهای اجتماعی	تقویت مشارکت و انسجام گروهی کشاورزان (S۲)	۰/۷۱	۱۸/۸۱		
	بهبود معیشت پایدار مردم (S۳)	۰/۸۰	۲۸/۹۹		
	کاهش مهاجرت روستائیان (S۴)	۰/۵۸	۱۲/۹۹		
	پایداری و استمرار شغل کشاورزی در منطقه و امید به آینده کشاورزی (S۵)	۰/۶۰	۱۰/۹۷		
	افزایش رضایت از شغل کشاورزی (S۶)	۰/۷۱	۱۷/۸۵		
	ایجاد اشتغال برای فارغ التحصیلان دانشگاهی رشته‌های کشاورزی (S۷)	۰/۶۲	۱۲/۵۸		
	ایجاد حس رقابت سازنده بین کشاورزان برای استفاده از این سیستم‌ها (S۸)	۰/۵۸	۸/۶۳		
	افزایش فرصت‌های شغلی در حوزه پشتیبانی (تعمیرگاه) (S۹)	۰/۵۶	۸/۸۸		
ادراک	یکپارچه‌سازی اراضی زراعی منطقه (EC۱)	۰/۶۹	۲۱/۸۵	۰/۸۳	۰/۸۶
پیامدهای اقتصادی	مدیریت مصرف بهینه آب (EC۳)	۰/۵۱	۷/۱۲		
	بهبود کمی تولیدات کشاورزی (EC۴)	۰/۵۷	۸/۴۹		
	بهبود کیفی تولیدات کشاورزی (EC۵)	۰/۶۶	۱۳/۴۷		
	سودآوری بیشتر کشاورز در بلند مدت (EC۶)	۰/۶۰	۱۱/۳۲		
	افزایش سرمایه‌گذاری در مزرعه (EC۷)	۰/۶۷	۱۲/۸۹		
	افزایش بهره‌وری تولید (EC۸)	۰/۶۵	۱۲/۹۰		
	افزایش درآمد سالیانه کشاورزان (EC۹)	۰/۶۹	۱۳/۰۰		
	کاهش هزینه کنترل آفات، علف‌های هرز و بیماری‌ها (EC۱۰)	۰/۶۲	۱۱/۰۴		
ادراک	امکان توزیع یکنواخت نهاده‌های تولید (کود و سم) از طریق مخازن (EN۱)	۰/۵۲	۸/۱۶	۰/۷۷	۰/۸۲
پیامدهای محیط‌زیستی	افزایش مصرف سموم و کودهای شیمیایی (EN۳)	۰/۴۷	۷/۰۴		
	افزایش حاصلخیزی خاک به دلیل کنترل آبیاری و پایداری منابع آب و خاک (EN۴)	۰/۶۴	۱۱/۱۰		
	افزایش سفتی خاک (EN۵)	۰/۶۱	۱۱/۴۷		
	جلوگیری از افت فزاینده سفره‌های آب زیر زمینی (EN۶)	۰/۶۸	۱۴/۱۲		
	کاهش گونه‌های گیاهی خودرو (ENV)	۰/۶۹	۱۴/۰۴		
	کاهش جمعیت کرم خاکی (EN۸)	۰/۵۷	۸/۳۷		
رضایت از سیستم آبیاری تحت فشار	به‌طور کلی از پیامدهای اقتصادی اجرای این طرح رضایت دارم (R۱)	۰/۶۴	۱۳/۷۱	۰/۸۶	۰/۸۹
	به‌طور کلی از پیامدهای اجتماعی طرح این رضایت دارم (R۲)	۰/۷۳	۱۷/۶۵		
	به‌طور کلی از حاصلخیزی خاک و پایداری منابع آب و خاک به واسطه اجرای سیستم آبیاری تحت فشار رضایت دارم (R۳)	۰/۷۸	۲۹/۳۸		
	به‌طور کلی اجرای طرح کیفیت زندگی مردم روستا را بهبود بخشیده است (R۴)	۰/۷۴	۲۰/۴۷		
	اجرای این طرح انتظارات مردم را تا حد زیادی برآورده کرده است (R۵)	۰/۷۵	۲۴/۶۸		
	پیامدهای احداث این طرح تا حد زیادی به آنچه مردم انتظار داشتند، نزدیک است (R۶)	۰/۷۷	۲۵/۲۱		
	مسئولان در اجرای این طرح، تصمیم صحیحی گرفته‌اند (RV)	۰/۷۳	۱۹/۶۸		

تمایل به	اجرای این سیستم آبیاری را به دیگر کشاورزان توصیه می‌کنم (IN۱)	۰/۷۶	۱۹/۲۵	۰/۸۰	۰/۸۶
استمرار	در مورد مزایای این سیستم آبیاری تحت فشار برای دیگران صحبت می‌کنم (IN۲)	۰/۷۸	۲۷/۶۵		
استفاده	اگر به عقب برگردم دوباره این طرح را در مزرعه خود اجرا خواهم کرد (IN۳)	۰/۴۷	۷/۷۹		
از سیستم	قصد دارم به جای عدم ادامه استفاده سیستم آبیاری تحت فشار به استفاده از آن ادامه دهم (IN۴)	۰/۷۱	۲۱/۴۴		
آبیاری تحت فشار	هدف من ادامه استفاده از سیستم آبیاری تحت فشار به جای استفاده از دیگر روش‌های آبیاری است (IN۵)	۰/۷۳	۱۸/۴۶		
	اگر بتوانم در آینده قصد دارم در بخش دیگری از مزرعه آبیاری تحت فشار را اجرا کنم (IN۶)	۰/۷۴	۱۸/۲۷		

- روایی سنجی مدل اندازه‌گیری پژوهش

به منظور بررسی روایی همگرایی سازه‌های مدل اندازه‌گیری از شاخص میانگین واریانس استخراج شده (AVE) و برای بررسی روایی واگرا از دو شاخص معیار فورنل-لارکر و شاخص چند خصیصه‌ای- تک خصیصه‌ای (HTMT) استفاده شد. باتوجه به اینکه مقادیر گزارش شده در جدول (۴) بالاتر از مقدار ۰/۵ می‌باشد، می‌توان بیان داشت سازه‌ها در تشریح واریانس گویه‌های خود، سطح پایینی از خطا و سازه‌های پژوهش به طور میانگین قابلیت تشریح بیش از نیمی از واریانس گویه‌ها را دارند. به بیان ساده‌تر سازه‌ها روایی دارند. علاوه بر آن باتوجه به نتایج گزارش شده برای معیار فورنل- لارکر می‌توان بیان داشت هر کدام از سازه‌های پژوهش در مقایسه با سایر سازه‌ها

بیشترین اشتراک واریانس با گویه‌های خود را دارند که این نتایج، نتایج گزارش شده برای میانگین واریانس مستخرج مبنی بر روایی سازه‌ها را تأیید می‌کند (جدول ۴). همچنین باتوجه به اینکه مقادیر گزارش شده برای هر کدام از سازه‌های مدل اندازه‌گیری بر پایه نسبت چند خصیصه‌ای- تک خصیصه‌ای کمتر از مقدار ۰/۹ می‌باشد، می‌توان اظهار داشت سازه‌های مدل اندازه‌گیری دارای روایی تشخیصی هستند.

- بررسی مدل ساختاری پژوهش

بعد از بررسی روایی و پایایی سازه‌های مدل اندازه‌گیری و اطمینان از روایی و پایایی سازه‌ها در این مرحله مدل ساختاری پژوهش یا به بیان دیگر روابط بین سازه‌ها بررسی می‌شود.

جدول ۴- روایی سنجی مدل اندازه‌گیری پژوهش

نسبت چند خصیصه‌ای- تک خصیصه‌ای (HTMT)					رویکرد فورنل-لارکر					سازه	
۵	۴	۳	۲	۱	۵	۴	۳	۲	۱	AVE	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	۰/۸۰۷	۰/۵۸	ادراک پیامدهای اجتماعی (۱)
---	---	---	---	۰/۶۶۶	---	---	---	۰/۷۳۹	۰/۶۵۵	۰/۵۳	ادراک پیامدهای اقتصادی (۲)
---	---	---	۰/۷۸۶	۰/۸۶	---	---	۰/۷۳۰	۰/۶۲۱	۰/۵۹۲	۰/۵۱	ادراک پیامدهای محیط‌زیستی (۳)
---	---	۰/۸۲۰	۰/۸۱۶	۰/۷۶۱	---	۰/۷۳۹	۰/۶۱۱	۰/۶۵۴	۰/۷۱۳	۰/۵۵	رضایت از اجرای سیستم آبیاری تحت فشار (۴)
---	۰/۸۴۷	۰/۷۴۰	۰/۷۰۴	۰/۶۰۳	۰/۷۴۷	۰/۷۲۵	۰/۵۹۸	۰/۶۰۹	۰/۵۳۴	۰/۵۶	قصد ادامه استفاده از سیستم آبیاری تحت فشار (۵)

۳- بررسی تأثیر پیامدهای ادراکی سیستم‌های آبیاری تحت فشار بر رضایت کشاورزان

باتوجه به یافته‌های گزارش شده در جدول (۵)، مقدار بتا یا ضریب مسیر اثر ادراک پیامدهای اجتماعی بر رضایت از اجرای سیستم آبیاری تحت فشار ۰/۲۷۷ تخمین زده شد. باتوجه به اینکه مقدار آماره t برای این ضریب مسیر ۳/۸ به دست آمده و از مقدار ۱/۹۶ بزرگتر است، دلایل کافی برای رد فرضیه صفر وجود دارد و ادراک پیامدهای اجتماعی اثر مستقیم و معناداری بر رضایت کشاورزان از اجرای سیستم آبیاری تحت فشار دارد و مقدار ضریب مسیر اثر ادراک پیامدهای اقتصادی بر رضایت کشاورزان از اجرای سیستم آبیاری تحت فشار ۰/۴۲۶ تخمین زده شد. همچنین مقدار آماره t برای این مسیر ۸/۰۷ محاسبه شد که از مقدار ۱/۹۶ بزرگتر است؛ بنابراین می‌توان بیان داشت در سطح ۹۹ درصد اطمینان اثر ادراک پیامدهای اقتصادی بر رضایت کشاورزان از اجرای سیستم آبیاری تحت فشار اثری مستقیم و معنادار است و فرضیه صفر رد شد (جدول ۵). در مورد اثر ادراک پیامدهای محیط‌زیستی بر رضایت از اجرای سیستم

آبیاری تحت فشار همان‌طور که نتایج گزارش شده در جدول (۵) نشان می‌دهد، مقدار بتا برای این مسیر ۰/۲۲۸ تخمین زده شد. همچنین مقدار آماره t، ۳/۱۳ به دست آمد که نشان می‌دهد ادراک پیامدهای محیط‌زیستی اثر مستقیم و معنادار بر رضایت کشاورزان از اجرای سیستم آبیاری تحت فشار دارد. در مجموع سه عامل ادراک پیامدهای اجتماعی؛ ادراک پیامدهای اقتصادی و ادراک پیامدهای محیط‌زیستی، ۶۷/۹ درصد از تغییرات واریانس رضایت از اجرای سیستم آبیاری تحت فشار را تشریح کردند. باتوجه به مقادیر گزارش شده برای هر یک از سه مسیر گفته شده و مقادیر f^2 در جدول (۵)، می‌توان بیان کرد به ترتیب ادراک پیامدهای اقتصادی، ادراک پیامدهای اجتماعی و ادراک پیامدهای محیط‌زیستی سهم بیشتری در تبیین واریانس رضایت از اجرای سیستم آبیاری تحت فشار دارند. علاوه بر آن باتوجه به اینکه مقدار Q^2 بیشتر از مقدار صفر است (جدول ۵) می‌توان گفت مدل مسیر در ارتباط با سازه درون‌زای رضایت از اجرای سیستم آبیاری تحت فشار تناسب پیش‌بین دارد یا به عبارت دیگر مدل مسیر قابلیت پیش‌بینی روابط ساختاری را دارد.

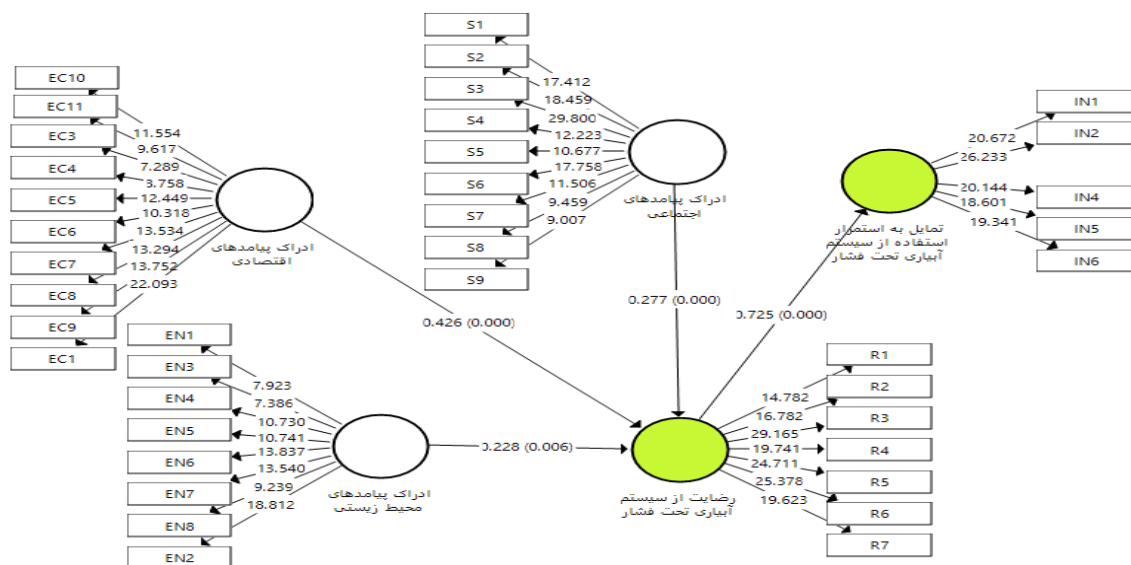
۴- بررسی تأثیر رضایت کشاورزان از سیستم‌های آبیاری تحت فشار بر تمایل به استمرار استفاده از این سیستم آبیاری

همان‌طور که یافته‌های گزارش شده در جدول (۵) نشان می‌دهد، مقدار بتا برای اثر مسیر رضایت از اجرای سیستم آبیاری تحت فشار بر قصد ادامه استفاده از سیستم آبیاری تحت فشار ۰/۷۲۵ و مقدار آماره t مربوط به آن ۲۲/۴۸ تخمین زده شد. باتوجه به اینکه مقدار آماره t از مقدار ۱/۹۶ بزرگتر است بنابراین می‌توان بیان داشت در

سطح ۹۹ درصد اطمینان اثر رضایت از اجرای سیستم آبیاری تحت فشار بر قصد ادامه استفاده از سیستم آبیاری تحت فشار اثری مستقیم و معنادار است. لازم به ذکر است رضایت از اجرای سیستم آبیاری تحت فشار، ۵۲/۶ درصد از تغییرات واریانس تمایل به استمرار استفاده از سیستم آبیاری تحت فشار را تشریح نمود. علاوه بر آن مقدار Q^2 بیشتر از صفر تخمین زده شد که نشان می‌دهد مدل مسیر قدرت پیش‌بینی روابط ساختاری را دارد.

جدول ۵- اثرهای مورد بررسی به همراه ضرایب معنی‌داری

مسیر	بتا	آماره t	STDE	Sig.	نتیجه	R^2	f^2	Q^2
ادراک پیامدهای اجتماعی ← رضایت از سیستم آبیاری تحت فشار	۰/۲۷۷	۲/۸۸	۰/۰۷۱	۰/۰۰۰	پذیرش	۰/۰۸۲		
ادراک پیامدهای اقتصادی ← رضایت از سیستم آبیاری تحت فشار	۰/۴۲۶	۸/۰۷	۰/۰۵۳	۰/۰۰۰	پذیرش	۰/۶۷۹	۰/۳۱۷	۰/۳۴۴
ادراک پیامدهای محیط‌زیستی ← رضایت از سیستم آبیاری تحت فشار	۰/۲۲۸	۳/۱۳	۰/۰۷۳	۰/۰۰۲	پذیرش	۰/۰۴۹		
رضایت از سیستم آبیاری تحت فشار ← تمایل به استمرار استفاده از سیستم آبیاری تحت فشار	۰/۷۲۵	۲۲/۴۸	۰/۰۳۲	۰/۰۰۰	پذیرش	۰/۵۲۶	---	۰/۲۶۹



شکل ۲- مقادیر معناداری مدل مسیر اثر عوامل مختلف بر رضایت و تمایل

به ترتیب ۰/۳۹۸ و ۰/۲۷۲ محاسبه شد. مقایسه این مقادیر با مقادیر ۰/۰۱، ۰/۱۵ و ۰/۳۶ پیشنهاد شده به عنوان معیاری برای مقادیر ضعیف، متوسط و قوی بیانگر برازش قوی مدل پژوهش و قابلیت تعمیم آن به جامعه آماری است.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

هدف از این پژوهش بررسی ادراک کشاورزان در زمینه پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی ناشی از اجرای سیستم آبیاری تحت فشار بود. به‌طور کلی میانگین نمره ادراکی کلی کشاورزان در ارتباط با این سه بعد بالاتر از مقدار متوسط بود (میانگین هر بعد بالاتر از ۳ از ۵). از دیدگاه پاسخگویان مهمترین پیامدهای اجتماعی اجرای

در ارتباط با شاخص‌های نیکویی برازش، نتایج تحلیل داده‌های گردآوری شده نشان داد، مقدار شاخص مربع فاصله اقلیدسی (d- ULS)، ۷/۳۸، محاسبه شد که در سطح ۰/۰۵ معنادار هستند و نشان می‌دهد برآورد مدل به شکل کارا صورت گرفته است. مقدار شاخص SRMR برابر ۰/۰۷ می‌باشد که این مقدار نشان می‌دهد خطای اندازه‌گیری در ماتریس همبستگی قابل پذیرش می‌باشد. شاخص نیکویی برازش تنه‌هاوس (GOF)، شاخص دیگری است که به منظور سنجش برازش مدل و قابل تعمیم بودن آن در جامعه استفاده می‌شود. این شاخص برازش کلی مدل را نشان می‌دهد و از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$GOF = \sqrt{\text{Comunality} \times R^2} \quad (1)$$

مقادیر این شاخص برای سازه‌های درون‌زای رضایت از سیستم‌های آبیاری تحت فشار و تمایل به استمرار استفاده از این سیستم آبیاری

سیستم‌های آبیاری تحت فشار «کاهش مهاجرت روستاییان»؛ «ایجاد حس رقابت سازنده بین کشاورزان برای استفاده از این سیستم‌ها» و «پایداری و استمرار شغل کشاورزی در منطقه و امید به آینده کشاورزی» بودند. این نتیجه بیانگر پیامدهای مثبت اجتماعی حاصل از اجرای سیستم‌های آبیاری تحت فشار است که توانسته شاخص‌های اجتماعی از قبیل ایجاد و حفظ حس رقابت‌پذیری، ماندگاری جمعیت در روستا، استمرار و پایداری شغل کشاورزی و امید به آینده کشاورزی را به همراه داشته باشد. همسو با این نتایج در پژوهش‌های دیگر به پیامدهای اجتماعی طرح‌های آبیاری تحت فشار همچون افزایش گرایش به عضویت در تشکلهای و تعاونی‌های روستایی، بهبود حس رقابت در بین مردم جهت استفاده از دستاوردهای این طرح (بشیری امانی و همکاران، ۱۳۹۲)، ماندگاری در روستا، کاهش مهاجرت، تمایل به استفاده از این روش‌ها، افزایش اشتغال، امنیت شغلی، تمایل به کشاورزی و پیشرفت محیط‌های روستایی (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۱) و رضایت از شغل کشاورزی، پایداری و استمرار شغل و انگیزه ماندگاری سرپرست و اعضای خانواده کشاورزان بهره‌مند از سیستم آبیاری (نجفی کانی و زنگانه، ۱۳۹۲) اشاره شده است. پیشنهاد می‌شود به منظور تقویت پیامدهای اجتماعی طرح‌های آبیاری تحت فشار و بهبود ماندگاری آنها، دولت در زمینه تقویت سرمایه اجتماعی کشاورزان، تقویت تشکلهای محلی و بهبود زنجیره ارزش کشاورزی، حمایت لازم را به عمل آورد. در ارتباط با ادراک کشاورزان در مورد پیامدهای اقتصادی اجرای سیستم‌های آبیاری تحت فشار لازم به ذکر است، بر اساس تحلیل دیدگاه‌های پاسخگویان سه پیامد اصلی اقتصادی اجرای این سیستم یعنی «مدیریت مصرف بهینه آب»؛ «بهبود کمی تولیدات کشاورزی» و «افزایش سرمایه‌گذاری در مزرعه» برجسته‌تر بودند. همسو با پیامدهای اقتصادی شناسایی شده، در پژوهش‌های پیشین به پیامدهای اقتصادی از قبیل افزایش عملکرد محصول، کاهش نیاز به نیروی انسانی در واحد سطح، کاهش هزینه‌های تولید (بشیری امانی و همکاران، ۱۳۹۲)، افزایش تولید، درآمد، پس‌انداز، کاهش هزینه‌های تولید، جذب گروه‌های کم درآمد، افزایش سرمایه‌گذاری در کشاورزی، استفاده بهینه از آب، آشنایی با ارزش روش‌ها، تنوع بخشی به محصولات (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۱) اشاره شده است. ادراک کشاورزان در این زمینه تأثیرات اقتصادی مطلوب طرح‌های آبیاری تحت فشار را نشان می‌دهد. پیشنهاد می‌شود دولت از طریق آموزش و مشاوره، انگیزه‌های سرمایه‌گذاری و بهبود تولید و مصرف منابع توسط کشاورزان را تقویت و به سمت فعالیت‌های هم‌افزا مانند توسعه فعالیت‌های غیرزراعی و بهبود بنیان‌های فناوری در واحدهای بهره‌برداری سوق دهد. همچنین در ارتباط با ادراک کشاورزان در مورد پیامدهای محیط‌زیستی اجرای سیستم‌های آبیاری تحت فشار نتایج نشان داد، مهم‌ترین پیامدهای محیط‌زیستی، «امکان توزیع یکنواخت نهاده‌های تولید (کود و سم) از طریق مخازن» و «افزایش حاصلخیزی خاک از طریق کنترل آبیاری عناصر مفید و پایداری

منابع آب و خاک» بودند. بر اساس این نتایج پیشنهاد می‌شود دولت طرح‌های بهبود حاصلخیزی، توسعه و بهسازی باغات و بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها را با طرح‌های آبیاری تحت فشار تلفیق و از طریق ایجاد این پیوند به تقویت و هم‌افزایی این طرح‌ها کمک نماید. در ارتباط با رضایت کشاورزان از سیستم‌های آبیاری تحت فشار نتایج نشان داد در ارتباط با گویه‌های «به‌طور کلی از پیامدهای اجتماعی طرح این رضایت دارم»؛ «پیامدهای احداث این طرح تا حد زیادی به آنچه مردم انتظار داشتند، نزدیک است» و «به‌طور کلی از حاصلخیزی خاک و پایداری منابع آب و خاک به واسطه اجرای سیستم آبیاری تحت فشار رضایت دارم»؛ کشاورزان بیشترین رضایت را داشتند. باین حال باتوجه به طبقه‌بندی پاسخگویان بر اساس شاخص انحراف معیار از میانگین اکثریت پاسخگویان یعنی ۶۱/۴ درصد معادل ۱۲۷ نفر از نظر رضایت از اجرای طرح در طبقه ضعیف قرار گرفتند. باتوجه به این نتیجه و نتایج پژوهش‌های پیشین می‌توان بیان کرد یکی از عامل‌های کلیدی در زمینه تمایل به استمرار استفاده از سیستم‌های آبیاری تحت فشار در آینده جلب و بهبود رضایت کشاورزان مجری طرح می‌باشد چرا که عدم رضایت کشاورزان از طریق عدم ادامه استفاده از این نوآوری منجر به شکست آن و عدم تمایل سایر کشاورزان به استفاده از آن در آینده خواهد شد. از این رو چنانچه استفاده از این سیستم آبیاری در آینده استمرار داشته باشد، لازم است به رضایت کشاورزان توجه شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود، برنامه‌ریزی منظم و ارزشیابی‌های مستمر پروژه‌های مربوط به گسترش سیستم‌های آبیاری تحت فشار به طور جدی مورد توجه قرار گرفته و دلایل عدم رضایت آنها شناسایی و این نارضایتی رفع شود. از طرفی باتوجه به ادراک ضعیف کشاورزان نسبت به بحران آب و اینکه در مطالعات پیشین نیز اثر مستقیم و معنادار ادراک بحران آب بر رفتار کشاورزان گزارش شده است، ضروری است آگاهی‌های لازم در این زمینه از طریق آموزش‌های ترویجی به کشاورزان ارائه شود. تصحیح ادراک کشاورزان نسبت به واقعیت بحرانی بودن شرایط منطق از نظر آب می‌تواند به بهبود دانش، نگرش و در نهایت تغییر رفتار آنها در مدیریت آب کشاورزی منجر شود. بر این اساس پیشنهاد می‌شود از طریق ارائه آموزش و تبیین وضعیت بحران کم‌آبی و همچنین تشکیل تشکلهای یا گروه‌های محلی نجات آب، ضمن ارتقا آگاهی کشاورزان در مورد بحران آب و مدیریت بهینه آن، اصلاح الگوی مصرف آب و به‌کارگیری فناوری‌های حفاظت از آب در بخش کشاورزی به یک فرهنگ تبدیل شود. همچنین باتوجه به نرخ تورم و نوسان قیمت لوازم و تجهیزات اجرای سامانه آبیاری تحت فشار، تسهیلات پرداختی به کشاورزان متناسب با تورم واقعی و متناسب با وضعیت قیمت تجهیزات و لوازم محاسبه و با نرخ بهره متناسب در اختیار کشاورزان قرار گیرد تا رضایت آنها بهبود یابد. ادراک مساعد نسبت به پیامدها و رضایت کم از طرح نشان دهنده این است که چشمداشت و انتظارات کشاورزان از این طرح کاملاً تأمین نشده و نیاز به بازبینی و بازنگری کلی در اجرای آن

از طریق کسب نقطه نظرات کشاورزان می‌باشد. البته بهبود آگاهی کشاورزان نسبت به پیامدهای متنوع آشکار و پنهان طرح به‌ویژه در دراز مدت می‌تواند رضایت کلی آنها را بهبود بخشد.

سیاسگزاری

این پژوهش از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران بهره‌مند شده است که به این وسیله نویسندگان مقاله از این نهاد محترم بابت حمایت‌های مالی و پشتیبانی تشکر و قدردانی به عمل می‌آورند.

منابع

- امینی، ا. م. و افضل‌ی ابرقویی، م. ۱۳۹۲. ارزیابی سازوکارهای مؤثر بر موفقیت بهره‌برداران در برپایی سیستم‌های آبیاری تحت فشار در استان اصفهان. فصلنامه تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران، ۴۴(۳): ۴۸۹-۵۰۰
- آبابایی، ب.، سرائی تبریزی، م.، فرهادی بانسوله، ب.، سهرابی، ت. و میرزایی، ف. ۱۳۹۱. واسنجی مدل CERES-Barley با استفاده از روش مدل‌سازی معکوس تحت شرایط کم آبیاری. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۲(۲): ۳۷-۴۸.
- باریکانی، ا.، احمدیان، م. و خلیلیان، ص. ۱۳۹۰. بهره‌برداری بهینه پایدار از منابع آب زیرزمینی در بخش کشاورزی (مطالعه موردی زیربخش زراعت دشت قزوین). نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی، ۲۵(۲): ۲۵۳-۲۶۲.
- بشیری امانی، پ.، اعظمی، م. و نادری، م. ک. ۱۳۹۲. واکاوی به کارگیری آبیاری تحت فشار توسط کشاورزان شهرستان همدان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی. دانشگاه بوعلی سینا. <https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/666d9572933916dbdf118b40d2f7eba1>
- پیرایش، ا.، ابراهیمی، م. ص. و عابدی کوپائی، ج. ۱۳۹۳. بررسی دیدگاه کشاورزان پذیرنده سیستم‌های آبیاری بارانی در گسترش و عدم گسترش این سیستم‌ها (مطالعه موردی: شهرستان بهبهان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی، دانشگاه اصفهان. <https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/b49cf726ba12c5eedbb4212ca5c9b013>
- جلالیان، ج. ۱۳۹۱. تحلیل اثرات نظام‌های آبیاری نوین بر وضعیت بهره‌برداران کشاورزی در شهرستان خدابنده. فصلنامه اقتصاد فضا و توسعه روستایی، ۲: ۴۱-۶۴.
- علیزاده، ح. ع.، لیاقت، ع. و سهرابی، ت. ۱۳۹۳. ارزیابی سناریوهای توسعه سیستم‌های آبیاری تحت فشار بر منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل پویایی سیستم. نشریه حفاظت آب و خاک، ۳(۴): ۱-۱۵.
- قاسمی، ر.، برقی، ح.، قنبری، ی. و امینی فسخودی، ع. ۱۳۹۱. تاثیر به‌کارگیری تکنولوژی‌های نو در کشاورزی با تاکید بر روش‌های نوین آبیاری در توسعه کشاورزی مناطق روستایی بخش کهک استان قم. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی. دانشگاه اصفهان. <https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/0d59e5a7fb780bdc149ed7ea61af4bfa>

کبیری، ش.، پویا، ح. و یونسی، م. ۱۳۹۶. بررسی میزان و دلایل افت سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت قزوین با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS). دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران. دانشگاه شهرکرد-انجمن هیدرولوژی ایران، شهرکرد.

نجفی کانی، ع. ا. و زنگانه، ا. ۱۳۹۲. آبیاری تحت فشار گامی در راستای توسعه کشاورزی و روستایی (نمونه موردی: روستاهای شهرستان علی‌آباد کتول). چشم‌انداز جغرافیایی در مطالعات انسانی، ۸(۲۴): ۱۲۱-۱۳۲.

نظری، ع.، منافی آذر، ر. و عبدالمی، ع. ۱۳۹۲. ارزیابی تأثیر گسترش آبیاری تحت فشار در تغییر ساخت زراعی، الگوی کشت و راندمان تولید (مطالعه موردی: شهرستان میاندوآب). چشم‌انداز جغرافیایی در مطالعات انسانی، ۸(۲۵): ۱۴۷-۱۶۱.

- Candido L.A., Coêlho G.A.G., de Moraes M.M.G.A. and Florêncio L. 2022. Review of Decision Support Systems and Allocation Models for Integrated Water Resources Management Focusing on Joint Water Quantity-Quality. Journal of Water Resources Planning and Management, 148(2): 03121001.
- Castillo G. M. L., Engler A. and Wollni M. 2021. Planned behavior and social capital: Understanding farmers' behavior toward pressurized irrigation technologies. Agricultural Water Management, 243: 106524.
- Cetin B., Yazgan S. and Tipi T. 2004. Economics of drip irrigation of olives in Turkey. Agricultural Water Management, 66(2): 145-151.
- Krejcie R. V. and Morgan D. W. 1970. Determining sample size for research activities. Educational and psychological measurement, 30(3): 607-610.
- Lecina S., Isidoro D., Playán E. and Aragüés R. 2010. Irrigation modernization in Spain: Effects on water quantity and quality-A conceptual approach. International Journal of Water Resources Development, 26(2): 265-282.
- Schoengold K. and Zilberman D. 2004. Water and development: the importance of irrigation in developing countries. Presentation, Berkeley. [Online] Available at http://are.berkeley.edu/courses/ARE253/2004/handouts/Bretton_Woods.Pdf (accessed 19 October 2010).
- Wang Y.N. 2020. China's per capita water resources are only a quarter of the world average. Why are floods so frequent and serious? China Economic Weekly 31 August. <http://www.ceweekly.cn/2020/0831/310921.shtml>.
- Ward F. A., Amer S. A., Salman D. A., Belcher W. R., Khamees A. A., Saleh H. S., Saeed A.A.A. and Jazaa H. S. 2022. Economic optimization to guide climate water stress adaptation. Journal of Environmental Management, 301: 113884.

Optimal Design of Urban Water Distribution Network Using Improved Artificial Bee Colony Algorithm

M. R. Najarzadegan¹, R. Moeini^{2*}

1,2-MSc Student and Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Iran.

*(Corresponding Author Email: r.moeini@eng.ui.ac.ir)

Received: 11-05-2022

Revised: 12-07-2022

Accepted: 14-07-2022

Available Online: 21-12-2022

بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم ارتقا یافته کلونی زنبور عسل مصنوعی

محمدرضا نجارزادگان^۱، رامتین معینی^{۲*}

۲۰۱- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد محیط زیست-آب و فاضلاب و دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، ایران.

*(نویسنده مسئول (E-Mail: r.moeini@eng.ui.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۳

Abstract

Urban Water Distribution Networks are the most important and costly network in each city. The Major part of the urban water distribution network costs is related to the executive progress and purchase of water distribution network accessories. Therefore, the cost of the water distribution network can be reduced by reducing and optimizing this part. For this purpose, the problem of water distribution network design should be defined as an optimization model and solved it using an efficient method. Nowadays, Meta-heuristics algorithms are the most efficient methods for solving optimization models. In this research, two sample problems mean Schaake and Lai (1969) water distribution network and NEWYORK city are modeled in the EPANET software and solved using an improved version of the artificial bee colony algorithm that is called MATLAB software. To evaluate the efficiency of the proposed algorithm, the results are presented and compared with the basic and standard version of the artificial bee colony algorithm and other results. Using an improved artificial bee colony algorithm for the two-loop network (NEWYORK), the objective function value and computational cost are 419000 \$ (38.13 M\$) and 2800 (3800), respectively. A comparison of the results shows that the construction and computed costs are reduced compared with the result of the standard version. Therefore, this algorithm is an efficient algorithm for solving optimization problems such as the design of a water distribution network. **Keywords:** Artificial Bee Colony Algorithm, Water Distribution Network, EPANET, Optimum Design, Pipe Diameter.

چکیده

شبکه‌های توزیع آب شهری از زیرساخت‌های مهم و پر هزینه شهری می‌باشند. بخش زیادی از هزینه‌های شبکه توزیع آب شهری، مربوط به فرآیندهای اجرایی و خرید متعلقات شبکه توزیع آب است. از این رو، با کاهش و بهینه‌سازی آن، هزینه شبکه توزیع آب کاهش می‌یابد. به این منظور، لازم است مساله طراحی شبکه توزیع آب شهری در چارچوب یک مساله بهینه‌سازی بررسی و با استفاده از یک روش کارآمد حل شود. الگوریتم‌های فراکاوشی از جمله روش‌های کارآمد برای حل مدل‌های بهینه‌سازی می‌باشند. در این تحقیق، دو مثال نمونه یعنی شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای تحقیق اسکاک و لای و شبکه توزیع آب شهر نیویورک در محیط نرم‌افزار EPANET مدل‌سازی و با استفاده از نسخه اصلاحی الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی در محیط نرم‌افزار MATLAB حل می‌شوند. به منظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، نتایج با نسخه پایه و استاندارد الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی و سایر نتایج موجود برای دو شبکه شاخص به نام‌های دوحلقه‌ای و شهر نیویورک مقایسه می‌شود. برای شبکه‌های دوحلقه‌ای و شهر نیویورک مقدار تابع هدف به ترتیب مقدار تابع هدف ۴۱۹۰۰۰ دلار و ۳۸۱۳ میلیون دلار و هزینه محاسباتی به ترتیب مقادیر ۲۸۰۰ و ۳۸۰۰ با استفاده از الگوریتم اصلاحی زنبور عسل مصنوعی به دست می‌آید. بررسی نتایج نشان‌دهنده کاهش هزینه‌های احداث و هزینه‌های محاسباتی این الگوریتم در مقایسه با نسخه استاندارد می‌باشد. بنابراین، این الگوریتم، یک الگوریتم کارآمد برای حل مسائل بهینه‌سازی به ویژه طراحی شبکه توزیع آب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل، شبکه توزیع آب، EPANET، طراحی بهینه، قطرلوله.

آب یک عنصر حیاتی و کلیدی در توسعه اقتصادی و اجتماعی یک کشور است که لازم است با کیفیت مناسب و براساس نیاز آبی به دست مصرف کنندگان از جمله مصرف کنندگان شهری برسد. به این منظور سیستم های انتقال و توزیع آب طراحی و احداث می شود. سیستم های انتقال و توزیع آب، از جمله جریان های حیاتی و زیرساخت های مهم یک کشور به ویژه در راستای توسعه اقتصادی و صنعتی است (Mehta و همکاران، ۲۰۱۷).

در حالت کلی، شبکه های توزیع آب شهری، یک سیستم انتقال و توزیع آب شرب از مخزن (ها) به مصرف کنندگان است. هدف اصلی هر شبکه توزیع آب، رساندن آب به مصرف کنندگان میزان مورد نیاز و با کیفیت مطلوب براساس استانداردهای موجود می باشد. در حالت کلی، احداث شبکه ها و بهره برداری از آنها، بسیار هزینه بر است. علاوه بر آن با گذشت زمان و افزایش عمر تجهیزات و لوله های شبکه های توزیع آب، قابلیت اعتماد شبکه کاهش یافته و با هر تغییر در شرایط بهره برداری یا فرسودگی عمر لوله ها، آبرسانی به مقدار کافی و با کیفیت مناسب دچار ناهم آهنگی می شود. بنابراین مسأله طراحی و بهره برداری بهینه شبکه توزیع آب، مورد توجه محققین این حوزه می باشد (Mousavi Moulaei و Moieni، ۲۰۱۸).

بررسی سوابق تحقیقاتی نشان می دهد، تحقیقات متعددی در زمینه بهینه سازی طراحی و بهره برداری شبکه توزیع آب شهری انجام شده است که در ادامه این بخش به مهمترین آنها اشاره شده است. هدف اصلی این تحقیقات، کاهش هزینه های احداث و بهره برداری شبکه، یا بهبود وضعیت شبکه توزیع آب و یا افزایش قابلیت اطمینان شبکه توزیع آب می باشد. به این منظور این مسأله در قالب یک مسأله بهینه سازی، تعریف و با استفاده از روش های مناسب حل می شود. روش های حل مسائل بهینه سازی در حالت کلی، در چهار دسته برنامه ریزی خطی، برنامه ریزی غیر خطی، برنامه ریزی پویا و الگوریتم های فراکاوشی تقسیم بندی می شوند. هر یک از این دسته روش ها مزایا و محدودیت های خاص خود را دارند. در این بین الگوریتم های فراکاوشی مزایای بیشتری نسبت به سایر روش ها دارند، بنابراین امروزه استفاده از آنها بیش از سایر روش ها مورد توجه محققین قرار گرفته است. الگوریتم های فراکاوشی دسته ای از روش هایی هستند که بر مبنای رفتار طبیعی موجودات زنده و پدیده های واقعی معرفی می شوند. یکی از مهمترین مزایای این دسته روش ها، توانایی یافتن جوابی نزدیک به جواب بهینه و با هزینه محاسباتی مناسب می باشد. (معینی و سقراطی، ۱۳۹۹)

افشار و غفوری (۱۳۸۲) با استفاده از دو برنامه بهینه سازی به نام های DOT و DOC، از روش های برنامه ریزی ریاضی، برای حل مسأله طراحی بهینه شبکه های آب و سیستم پمپاژ استفاده نمودند. شاهی و همکاران (۱۳۹۲) با ارائه یک مدل بهینه سازی به نام الگوریتم

تکامل تفاضلی (DE)^۱، برای حل مسأله بهینه سازی سیستم توزیع آب شهر تربت جام، استفاده نمودند. نتایج نشان دهنده برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچگان بود. خلیفه و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از الگوریتم ژنتیک و نرم افزار تحلیل هیدرولیکی WaterGems مسأله بهینه سازی طراحی شبکه توزیع آب شهر رویدر استان هرمزگان را به منظور کاهش هزینه ها حل نمودند. نتایج نشان دهنده کاهش هزینه های شبکه در حدود ۱۲ تا ۱۵ درصد از هزینه کل پروژه بود. افتخاری و اکبری (۱۳۹۹) با استفاده از الگوریتم ژنتیک و نرم افزار تحلیل هیدرولیکی WaterGems، مسأله بهینه سازی شبکه توزیع آب شهر مشهد را حل نمودند. نتایج نشان دهنده کاهش ۱۴ درصدی هزینه های کل پروژه با استفاده از روش پیشنهادی بود. علاوه بر آن Savic و Walters (۱۹۷۷) با ارائه نسخه اصلاحی الگوریتم ژنتیک، مسأله بهینه سازی شبکه توزیع آب را حل نمودند. مسائل شبکه توزیع آب دو حلقه ای و شبکه توزیع آب شهر هانوی به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. در این تحقیق، با اعمال محدودیت و کاهش فضای جست و جو، کارایی روش پیشنهادی نسبت به الگوریتم پایه و استاندارد بهبود یافت. همچنین آن ها با ارائه یک مدل به نام GANET و استفاده از الگوریتم ژنتیک استاندارد، مسأله طراحی شبکه توزیع آب را حل نمودند. Lippai و همکاران (۱۹۹۹) با استفاده از الگوریتم جست و جو ممنوعه^۲ و استفاده از نرم افزار تحلیل هیدرولیکی EPANET مسأله بهینه سازی شبکه توزیع آب را حل نمودند. از اطلاعات شبکه توزیع آب شهر نیویورک به عنوان مطالعه موردی استفاده شد. نتایج نشان دهنده کاهش هزینه های احداث شبکه بود. Cunha و Sousa (۱۹۹۹) با استفاده از الگوریتم نورد شبیه سازی شده^۳، مسأله بهینه سازی طراحی شبکه توزیع آب را حل نمودند. شبکه توزیع آب نمونه دو حلقه ای و هانوی به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. نتایج نشان دهنده کاهش هزینه محاسباتی و زمان آنالیز بود. Wu و همکاران (۲۰۰۱) با استفاده از الگوریتم ژنتیک مسأله بهینه سازی طراحی شبکه توزیع آب نمونه دو حلقه ای، هانوی و شهر نیویورک را حل نمودند. نتایج نشان دهنده کاهش هزینه های محاسباتی در مقایسه با سایر روش های موجود بود. Maier و همکاران (۲۰۰۳) مسأله بهینه سازی طراحی شبکه توزیع آب شهر نیویورک را با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان^۴ حل نمودند. نتایج روش پیشنهادی نشان دهنده کاهش در حدود ۹ درصد در هزینه های احداث شبکه بود. Eusuff و Lansey (۲۰۰۳) با استفاده از الگوریتم جهش قورباغه^۵ و نرم افزار تحلیل هیدرولیکی EPANET مسائل بهینه سازی طراحی شبکه توزیع آب دو حلقه ای، شهر نیویورک و هانوی را حل نمودند. نتایج نشان دهنده کارایی روش پیشنهادی بود. به عبارت دیگر با استفاده از روش پیشنهادی، جوابی با هزینه محاسباتی و زمان محاسبه کمتر حاصل شد. Afshar (۲۰۰۷) مسأله طراحی بهینه شبکه های توزیع آب نمونه دو حلقه ای و شهر نیویورک را حل کرد و از الگوریتم بهینه ساز جامعه مورچگان به منظور بهینه سازی استفاده نمود. نتایج نشان دهنده کارایی روش

پیشنهادی بود. Afshar (۲۰۰۹) مسأله طراحی بهینه شبکه توزیع آب نمونه دو حلقه‌ای و شهر نیویورک را با استفاده از الگوریتم ژنتیک فشرده حل کرد. نتایج نشان‌دهنده کاهش هزینه محاسباتی روش پیشنهادی نسبت به سایر نتایج موجود بود. Tong و همکاران (۲۰۱۱) قطره‌های بهینه شبکه نمونه توزیع آب نمونه دو حلقه‌ای را تعیین نمودند. به این منظور، از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده کارایی مناسب روش پیشنهادی بود. Reza و همکاران (۲۰۱۷) با ارائه نسخه اصلاحی الگوریتم ژنتیک، مسأله بهینه‌سازی شبکه توزیع آب را حل نمودند. مسائل شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای و شبکه هانوی به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. در این تحقیق، با اعمال محدودیت و کاهش فضای جست‌وجو، کارایی روش پیشنهادی نسبت به الگوریتم پایه و استاندارد بهبود یافت. Shende و Chau (۲۰۱۹) از الگوریتم فراکاوشی جدید به نام سیبانت^۲ به منظور کاهش هزینه مسائل بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای و شبکه هانوی استفاده نمودند. نتایج نشان‌دهنده کاهش زمان اجرای نرم‌افزار و کاهش هزینه‌های طراحی نسبت به سایر نتایج موجود بود. در نهایت، Heydari و همکاران (۲۰۲۰) مسأله بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب شهر ایلام کشور ایران را با استفاده از نسخه توسعه یافته الگوریتم ژنتیک حل نمودند. در این تحقیق، از نرم‌افزار EPANET برای شبیه‌سازی و تحلیل هیدرولیکی استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده کاهش هزینه‌های احداث شبکه توزیع آب با استفاده از پلی‌اتیلن و پلی‌پروپن و افزایش ۱۲/۶۱ درصدی هزینه احداث شبکه در صورت استفاده از لوله‌های پلاستیکی تقویت شده با الیاف شیشه بود. بررسی پیشینه پژوهشی نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های هوش مصنوعی در مدل‌سازی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مسائل حوزه‌های مختلف به‌ویژه در مسائل مهندسی مورد توجه محققین بوده است (Hosseini و همکاران، ۲۰۱۶؛ Sadeghifar و Barati، ۲۰۱۸؛ Barati و Kazemi، ۲۰۲۲). در این راستا، به دلیل قابلیت‌های ویژه الگوریتم‌های فراکاوشی استفاده از آنها در حل بهینه‌سازی و همچنین توسعه الگوریتم‌های اولیه و پایه به منظور افزایش کارایی عملکرد آنها مورد توجه محققین می‌باشد. الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی (ABC)^۳ از جمله الگوریتم‌های فراکاوشی می‌باشد. در ابتدا، الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی را Karaboga و Basturk (۲۰۰۷) معرفی کردند. در ادامه، نسخه‌های اصلاحی مختلف برای این الگوریتم پیشنهاد و از آن برای حل توابع ریاضی و مسائل مختلف بهینه‌سازی در حوزه مهندسی پیشنهاد شد. بررسی نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب این روش نسبت به سایر الگوریتم‌ها در حل مسائل بهینه‌سازی بود (Khetrapal و همکاران، ۲۰۲۰). با توجه به قابلیت‌های الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی در حل مسائل بهینه‌سازی و عدم استفاده از آن در حل مسأله طراحی بهینه شبکه توزیع آب شهری، در این تحقیق، از این الگوریتم و نسخه اصلاحی آن برای حل مسأله طراحی بهینه شبکه توزیع آب استفاده شده است. همچنین دو مسأله طراحی

شبکه نمونه دو حلقه‌ای و شهر نیویورک با استفاده از این الگوریتم حل شده است. همچنین، با معرفی نسخه اصلاحی این الگوریتم، از آن برای حل این مسائل استفاده و نتایج تجزیه و تحلیل شده است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی برای حل مسأله طراحی بهینه شبکه توزیع آب استفاده و نتایج با نسخه اولیه و استاندارد، مقایسه شده است. بنابراین، در این بخش توضیحاتی درباره این الگوریتم‌ها ارائه شده است.

• الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی

الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی از جمله الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی مبتنی بر جست‌وجو هوشمند است که اولین بار توسط Karaboga و Basturk (۲۰۰۷) ارائه شد. رفتار طبیعی زنبور عسل در تعامل و جست‌وجو غذا توسط زنبورهای عسل، مبنای این الگوریتم می‌باشد. در حالت کلی، زنبورهای عسل به سه دسته، ناظر، کارگر و اکتشاف تقسیم می‌شوند. زنبور عسل کارگر در اطراف منطقه کندو در جست‌وجو منبع غذایی به طور تصادفی هستند. پس از انتخاب منبع غذایی با مراجعه به کندو و با همراه کردن زنبورهای اکتشاف، به سوی منبع غذایی حرکت می‌کنند. در این فرآیند، زنبورهای ناظر با در نظر گرفتن بیشترین احتمال یافتن منابع غذایی و کیفیت ماده غذایی، به سوی منابع غذایی حرکت می‌کنند. علاوه بر این، زنبورهای اکتشاف بدون در نظر گرفتن اطلاعات دو دسته اول زنبورها، در جست‌وجو منابع غذایی هستند تا همه حالت‌ها و شرایط منابع غذایی بررسی شود (Mirbod و همکاران، ۲۰۱۷؛ معینی و سقراطی، ۱۳۹۹). به طور خلاصه، در الگوریتم کلونی زنبور عسل، جست‌وجوی منابع غذایی شامل سه مرحله اصلی می‌باشد.

- ۱- جست‌وجو توسط زنبورهای کارگر و حرکت به سوی منابع غذایی (تغذیه) و اندازه‌گیری کیفیت شهد
- ۲- تعیین مواد غذایی توسط زنبوران ناظر با به اشتراک گذاری اطلاعات زنبورهای کارگر و مشخص شدن مقدار شهد هر منبع
- ۳- حرکت زنبورهای اکتشاف به سوی منابع احتمالی غذایی (Mirbod و همکاران، ۲۰۱۷).

در این الگوریتم، موقعیت احتمالی منبع غذایی تعیین شده توسط زنبورها نشان‌دهنده جواب بهینه مسأله می‌باشد. همچنین، یک منبع مناسب، کیفیت شهد بهتر و کمترین مسافت تا کندو را دارد. در این الگوریتم، تعداد زنبورهای کارگر و ناظر برابر می‌باشد. با بررسی هر جواب احتمالی، بر اساس تابع هدف مسأله، کیفیت شهد منبع غذایی محاسبه می‌شود. به این منظور، جواب اولیه به صورت تصادفی تولید شده و ادامه جواب‌های جدید، با رابطه (۱) تعیین می‌شود.

$$v_{ij} = x_{ij} + \varphi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (1)$$

در این رابطه، v منبع غذایی جدید، نمایه k و i شمارنده منبع غذایی، نمایه j شمارنده متغیرها، φ عدد تصادفی بین $[0, 1]$ و X_{ij} موقعیت متغیر j از منبع غذایی i است. در هر تکرار، هزینه جواب جدید ساخته شده، با استفاده از توابع هدف محاسبه می‌شود. باتوجه به مقادیر تابع هدف، جواب‌ها با بهترین جواب ذخیره شده قبلی، مقایسه شده و در صورتی که این جواب از جواب قبلی بهتر باشد، جایگزین جواب قبلی می‌شود. این مرحله، وظیفه زنبورهای ناظر است. این دسته از زنبورها با جست‌وجو منبع غذایی با کیفیت بیشتر (با فاصله کمتر)، جواب بهینه (منبع غذایی برتر) را از بین جواب‌های موجود (منابع غذایی در دسترس) انتخاب می‌کنند. به عبارت دیگر، زنبورهای کارگر تمامی جواب‌ها (منابع غذایی) را جست‌وجو و اطلاعات را در اختیار زنبورهای ناظر می‌گذارند و دسته زنبورهای ناظر منابع غذایی با کیفیت بهتر (جواب بهینه مسأله) را انتخاب می‌کنند (Mirbod و همکاران، ۲۰۱۷؛ معینی و سقراطی، ۱۳۹۹).

در این الگوریتم، احتمال انتخاب منبع غذایی i از براساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^n fit_i} \quad (2)$$

در رابطه بالا، P_i احتمال منبع غذایی i ، fit_i مقدار تابع هدف برای منبع غذایی i و SN تعداد منابع غذایی می‌باشد. باتوجه به مقادیر احتمال محاسباتی، هر منبع غذایی توسط زنبور ناظر بررسی و منبع مناسب انتخاب می‌شود. براین اساس، احتمال اینکه یک منبع در جست‌وجوهای هر تکرار چندین بار بررسی شود، وجود دارد. روند یاد شده تا رسیدن به شرط توقف الگوریتم ادامه می‌یابد (Mirbod و همکاران، ۲۰۱۷).

• الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی

در این بخش، به منظور افزایش عملکرد الگوریتم استاندارد کلونی زنبور عسل مصنوعی، نسخه اصلاحی آن معرفی می‌شود. در حالت کلی، ساختار نسخه اصلاحی بر مبنای نسخه اولیه و پایه بوده اما برخی از جزئیات، در راستای افزایش عملکرد، اصلاح شده است. در نسخه اصلاحی، تعداد زنبورهای کارگر و ناظر برابر نبوده و به نسبت‌های متفاوت تقسیم می‌شود. علاوه بر این، در نسخه اصلاحی، عملکرد زنبورهای ناظر در انتخاب و به‌روزرسانی منبع غذایی متفاوت می‌باشد که جزئیات آن در ادامه ارائه می‌شود. به منظور بهبود سرعت همگرایی الگوریتم کلونی زنبور عسل، دو ویژگی جدید پیشنهاد شده است (Mirbod و همکاران، ۲۰۱۷).

در الگوریتم اصلاحی، در ابتدا، رابطه (۱) بازنویسی شده و بنابراین ضریب شعاع همگرایی در رابطه (۳) منظور می‌شود. در رابطه بالا، Rc_i ضریب مجاورت همگرایی در تکرار i ام است که براساس رابطه (۴) محاسبه می‌شود و سایر پارامترهای پیش از این، تعریف شده است.

$$v_{ij} = x_{ij} + Rc_i \times \varphi_{ij} (x_{ij} - x_{kj}) \quad (3)$$

$$Rc_i = F_r \times Rc_{i-1} \quad (4)$$

در رابطه بالا، F_r ضریبی بین صفر و یک بوده و ضریب شوک نام‌گذاری شده است. براساس رابطه جدید پیشنهادی، دامنه جست‌وجوها محدود شده و در نتیجه زنبورها، در زمان کمتر، منبع غذایی با کیفیت‌تر را شناسایی می‌کنند. به این ترتیب اگر زنبورها نتوانند در تکرار معین، بهترین راه‌حل را بهبود بخشند، این عملگر به اصلاح برخی از منابع غذایی می‌رسد و با حذف نیمی از بدترین جواب‌ها و جایگزینی به‌طور تصادفی، مایه بهبود کیفیت منابع غذایی می‌شود. در واقع این عملگر به منظور افزایش توانایی الگوریتم برای جلوگیری از گیر افتادن در جواب‌های بهینه محلی در فضای جست‌وجوی مسأله تعریف شده است. علاوه بر آن، ضریب همگرایی در جست‌وجو نیز برای این الگوریتم تعریف می‌شود. به این صورت که با استفاده از این عملگر، دامنه جست‌وجو زنبورها در تکرارهای مختلف، محدودتر می‌شود. بنابراین موقعیت غذایی جدید به دلیل تغییرات محدود در موقعیت غذایی قبلی قرار نمی‌گیرد بلکه پس از تکرار معین به جواب بهینه، منتهی می‌شود. در این الگوریتم از پارامترهایی به نام $limit$ به مفهوم حداکثر تعداد مجاز عدم بهبود منبع غذایی و $ndim$ تعداد متغیرهای مستقلی که در هر مرحله پس از ایجاد راه‌حل جدید با راه‌حل اولیه مقایسه شوند، به منظور تسریع همگرایی استفاده شده است (Mirbod و همکاران، ۲۰۱۷).

• مسأله طراحی بهینه سیستم توزیع آب

در این بخش، مدل بهینه‌سازی مسأله طراحی سیستم توزیع آب شهری معرفی می‌شود. به این منظور لازم است، متغیر تصمیم مسأله، تابع هدف و محدودیت‌های مسأله تعریف شوند. در این مسأله، متغیر تصمیم، قطر لوله‌ها می‌باشد. توابع هدف مختلفی از جمله حداقل‌سازی هزینه‌های احداث و بهره‌برداری و یا حداکثرسازی قابلیت اطمینان و یا تاب‌آوری شبکه را می‌توان برای این مسأله تعریف نمود. در این تحقیق، تابع هدف، حداقل‌سازی هزینه احداث (خرید) شبکه توزیع آب تعریف شده است. محدودیت‌های این مسأله شامل معادله پیوستگی در گره‌ها، افت انرژی در حلقه‌ها، سرعت و فشار حداقل و حداکثر و قطر تجاری لوله‌ها می‌باشد. فرم ریاضی مسأله بهینه‌سازی به شرح رابطه‌های (۵ تا ۱۱) می‌باشد (Moeini و Mousavi Moulaei، ۲۰۱۸).

$$\text{Minimize } CT = \sum_{i=1}^N C_i L_i \quad (5)$$

Subjected to:

$$\sum q_i - q_j = Q_k \quad \forall k = 1, 2, 3, \dots, K \quad (6)$$

$$i \in in(k) \quad j \in out(k)$$

$$\sum J_i = 0, i \in p, \forall p = 1, 2, 3, \dots, P \quad (7)$$

$$J_i = \mu L_i \left(\frac{q_i}{ch_i} \right)^2 d_i^{-5}, \forall i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (8)$$

$$H_{\min} \leq H_k \leq H_{\max}, \forall k = 1, 2, 3, \dots, K \quad (9)$$

$$d_i \in D, \forall i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (10)$$

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}, \forall i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (11)$$

که در این روابط، C_T کل هزینه احداث شبکه توزیع آب و تابع هدف، L_i طول لوله i ام، c_i هزینه واحد طول لوله i ام، N برابر کل تعداد لوله‌های موجود در شبکه توزیع آب، Q_k دبی مورد نیاز در گره مصرف شماره k ، q_i دبی لوله شماره i ام، $\ln(k)$ لوله‌های ورودی به گره شماره k ، out_k لوله‌های خروجی از گره k ، K کل تعداد گره‌های موجود در شبکه توزیع آب، J_i افت هد در لوله شماره i ، P کل تعداد حلقه‌های شبکه توزیع آب، d_i قطر لوله i ، ch_i ضریب هیزن ویلیامز لوله i ام، μ و λ ضرایب ثابت معادله هیزن ویلیامز، H_k هد گره k ، H_{max} حداکثر هد مجاز در هر گره مصرف، H_{min} حداقل هد مجاز در هر گره مصرف و D لیست قطرهای تجاری موجود در بازار، V_i سرعت جریان در لوله i ام، V_{max} حداکثر سرعت مجاز در لوله و V_{min} حداقل سرعت مجاز در لوله است.

مدل تعریف شده برای مسأله طراحی بهینه شبکه توزیع آب، یک مدل محدود شده است که روش‌های متعددی برای اعمال محدودیت‌های حل آن پیشنهاد شده است. در این تحقیق از روش ضریب جریمه ثابت برای حل آن استفاده می‌شود. به این منظور تابع هدف جدیدی یعنی توابع هدف جریمه‌دار شده، به شرح روابط ذیل تعریف شده است:

$$C_p = \sum_{i=1}^N C_i L_i + \alpha_p (CSV_v + CSV_H) \quad (12)$$

$$CSV_v = \sum_{i=1}^N (1 - \frac{V_i}{V_{max}})^2 + \sum_{i=1}^N (\frac{V_i}{V_{max}} - 1)^2 \quad (13)$$

$$CSV_H = \sum_{i=1}^K (1 - \frac{H_i}{H_{min}})^2 + \sum_{i=1}^K (\frac{H_i}{H_{max}} - 1)^2 \quad (14)$$

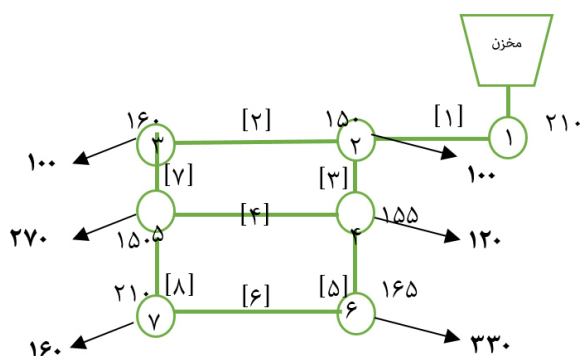
در رابطه بالا C_p تابع هدف جریمه‌دار شده، α_p ضریب جریمه (عدد بسیار بزرگ)، CSV_v مقدار تخلف از محدودیت سرعت جریان در لوله‌ها و CSV_H مقدار تخلف از محدودیت فشار گره‌ای است. در صورتی که مقادیر مولفه‌های داخل پرانتز، پارامترهای CSV_v و CSV_H منفی باشد، مقدار آن صفر منظور شده است (Moeini و Musavi moulaei، ۲۰۱۸).

در این تحقیق، یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز به منظور طراحی بهینه سیستم توزیع آب شهری پیشنهاد شده است. در مدل پیشنهادی از نرم‌افزار EPANET به عنوان شبیه‌ساز و از نسخه‌های استاندارد و اصلاح شده الگوریتم زنبور عسل مصنوعی به عنوان بهینه‌ساز استفاده شده است. به این منظور، کدنویسی الگوریتم در نرم‌افزار متلب انجام و با استفاده از کدهای دستوری مربوط، به نرم‌افزار شبیه‌ساز EPANET متصل شده است. در مدل پیشنهادی با انتخاب قطر لوله به عنوان متغیر تصمیم، قطر لوله‌ها توسط الگوریتم کلونی زنبور عسل تعیین و به عنوان ورودی مدل شبیه‌ساز EPANET در نظر گرفته شد. با تحلیل شبکه در نرم‌افزار EPANET با استفاده از روابط پیوستگی و افت انرژی، خصوصیات هیدرولیکی شبکه تعیین و مقادیر پارامترهای هیدرولیکی (فشار و سرعت) با مقادیر استاندارد، مقایسه شد. این روند تا رسیدن به شرط توقف و تعیین قطرهای بهینه ادامه یافته است.

از جمله نرم‌افزارهای کاربردی و توانمند در شبیه‌سازی و تحلیل شبکه توزیع آب، می‌توان به نرم‌افزار EPANET اشاره نمود. با استفاده از ابزار اتصال و کدهای دستوری، اتصال نرم‌افزار EPANET با سایر نرم‌افزارها از جمله متلب (MATLAB) امکان‌پذیر است. بنابراین، تحلیل شبکه‌های بزرگ مقیاس نیز به راحتی امکان‌پذیر است (Metha و همکاران، ۲۰۱۷).

• مطالعه موردی

در این تحقیق، به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، دو مسأله پنج مارک (نمونه)، شبکه دو حلقه‌ای و شهر نیویورک به عنوان مطالعه موردی انتخاب و با استفاده از روش پیشنهادی حل شد. برخی از اطلاعات این دو شبکه در این بخش معرفی شده است. شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای، از ۲ حلقه، ۷ گره و ۸ لوله تشکیل شده است که با استفاده از مخزنی با هد ثابت ۶۸۹ فوت (۲۱۰ متر) آب آن تامین می‌شود. جانمایی این شبکه در شکل (۱) ارائه شده است. در این شکل، اعداد داخل کروشه، شمارنده لوله‌ها و اعداد داخل دایره (گره‌ها)، شمارنده گره‌ها است. در این شبکه، طول لوله‌ها همگی ۳۲۸۱ فوت (۱۰۰۰ متر) و ضریب هیزن ویلیامز لوله‌ها مقدار ثابت ۱۳۰ در نظر گرفته شده است. همچنین، حداقل فشار مجاز گره‌ای ۹/۷۴ فوت (۳۰ متر) در نظر گرفته شده است. برای این شبکه، ۱۴ قطر لوله تجاری موجود در بازار و هزینه واحد طول برای هر قطر در جدول (۱) ارائه شده است. سایر اطلاعات شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای در جدول (۱) ارائه شده است. لازم به ذکر است اعداد مجاور گره‌ها، ترازهای ارتفاعی بر حسب متر و اعداد برجسته نیازهای گره‌ای بر حسب مترمکعب بر ساعت می‌باشد (Lai و Sckaake، ۱۹۶۹).



شکل ۱- جانمایی شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای

شبکه دوم مطالعه موردی، شبکه توزیع آب شهر نیویورک است که شامل ۲۰ گره، ۲۱ لوله و یک مخزن می‌باشد. جانمایی این شبکه در شکل (۲) ارائه شده است. در این شبکه، هد مخزن مقدار ثابت و برابر با ۳۰۰ فوت (۹۱/۴۴ متر) و ضریب هیزن ویلیامز همه لوله‌ها ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. در جدول (۳) لیست اطلاعات مورد نیاز به منظور مدل‌سازی ارائه شده است. مسأله شبکه توزیع آب شهر

تجزیه و تحلیل نتایج

در این تحقیق، با استفاده از مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی پیشنهادی، قطر بهینه شبکه‌های دو حلقه‌ای و شهر نیویورک تعیین شده است. در این بخش نتایج به‌دست آمده از روش پیشنهادی ارائه شده است. به این منظور نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبور عسل استفاده و نتایج با نتایج الگوریتم پایه و استاندارد کلونی زنبور عسل مقایسه شده است. یادآوری این نکته ضروری است که الگوریتم‌های مورد استفاده، پارامترهای ثابتی دارند که برای تعیین مناسب‌ترین مقدار برای آن لازم است آنالیز حساسیت انجام شود. با انجام آنالیز حساسیت، مقادیر مناسب برای پارامترهای الگوریتم‌ها، در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین باتوجه به ماهیت تصادفی جواب اولیه الگوریتم‌ها، هر مسأله ۱۰ بار اجرا شده است. باتوجه به مقادیر مناسب به‌دست آمده برای پارامترهای الگوریتم، در جدول (۲) شبکه‌های دو حلقه‌ای و شهر نیویورک، با استفاده از روش پیشنهادی طراحی شده که نتایج آن، در جدول (۳) ارائه شده است.

مقایسه نتایج نشان‌دهنده آن است که با استفاده از الگوریتم اصلاحی و پایه کلونی زنبور عسل مصنوعی، جواب قابل قبولی برای هر دو مسأله حاصل شده اما عملکرد الگوریتم نسخه اصلاحی الگوریتم مناسب‌تر است. همچنین، هزینه محاسباتی (حاصل ضرب جمعیت در تعداد تکرار رسیدن به جواب بهینه) در الگوریتم اصلاحی زنبور عسل مصنوعی از نسخه پایه و استاندارد، کمتر است. به عبارت دیگر، برای شبکه دو حلقه‌ای و شهر نیویورک، مقادیر هزینه محاسباتی نسخه اصلاحی الگوریتم در مقایسه با نسخه پایه به ترتیب ۵۲/۶ درصد و ۱۲/۰۷ درصد کاهش یافته است. مهم‌ترین دلیل آن، تعریف پارامتر شوک در الگوریتم اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی است که بر این اساس دو مفهوم اکتشاف و بهره‌برداری در این الگوریتم تعامل بهتری دارند. علاوه بر آن در هر ۱۰ بار اجرای مدل، جواب‌شدنی^۸ (موجه) برای مسائل با استفاده از نسخه پایه و اصلاحی الگوریتم کلونی زنبور عسل به‌دست آمده است.

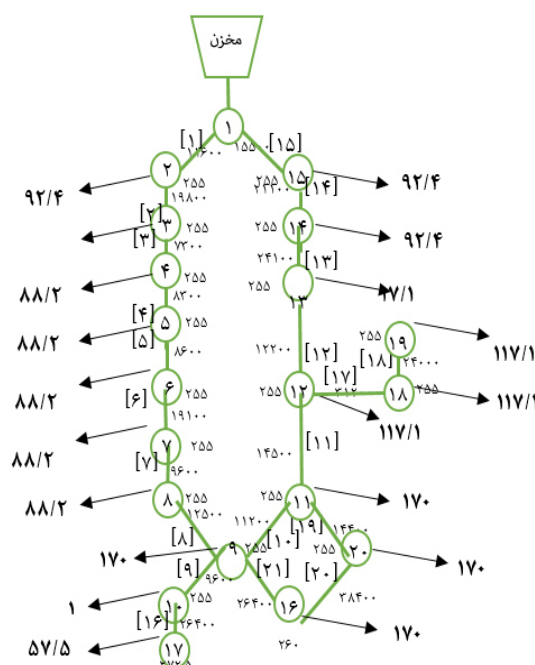
قطر بهینه لوله‌های به‌دست آمده با استفاده از نسخه‌های استاندارد و اصلاحی الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی، برای هر دو مسأله در جدول‌های (۴ و ۵) ارائه شده است.

نمودار همگرایی حداقل جواب‌های به‌دست آمده از نسخه‌های استاندارد و اصلاحی الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی (تغییرات هزینه احداث شبکه با افزایش تعداد تکرار الگوریتم) در شکل‌های (۳ و ۴) ارائه شده است. مقایسه نمودارهای همگرایی نشان می‌دهد، سرعت همگرایی جواب‌ها در نسخه اصلاحی الگوریتم بیشتر از نسخه استاندارد الگوریتم می‌باشد. باتوجه به نتایج به‌دست آمده، عملکرد نسخه اصلاحی الگوریتم زنبور عسل مصنوعی از نسخه استاندارد این الگوریتم مناسب‌تر است. در ادامه، نتایج به‌دست آمده

شهر نیویورک با استفاده از قطرهای موجود در جدول (۳) مدل‌سازی و تحلیل شده است. اما مشکل اصلی در این شبکه کمبود فشار در گره‌های مصرف شماره‌های ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ می‌باشد که با در نظر گرفتن لوله‌هایی به موازات لوله‌های موجود در شبکه توزیع، مشکل عدم تأمین محدودیت فشار حداقل در گره‌های یاد شده حل شده است. لیست قطرهای تجاری مورد استفاده به همراه هزینه واحد طول آنها در جدول (۱) ارائه شده است. لازم به ذکر است در شکل (۲) اعداد مجاور گره‌ها، حداقل هد مجاز بر حسب فوت (ft) و اعداد برجسته نیازهای گره‌ای بر حسب فوت مکعب بر ثانیه (cfs/s) و اعداد مجاور لوله‌ها معرف طول لوله‌ها بر حسب فوت می‌باشد. همچنین، قطر لوله‌های ۱ الی ۶ و لوله ۹ برابر ۱۸۰ اینچ (۴۵۷۲ میلی‌متر)، لوله‌های ۷ و ۸ برابر ۱۳۲ اینچ (۳۳۵۲/۸ میلی‌متر)، لوله‌های ۱۰ الی ۱۵ برابر ۲۰۴ اینچ (۵۱۸۱/۶ میلی‌متر)، لوله‌های ۱۶، ۱۷ و ۲۱ برابر ۷۲ اینچ (۱۸۲۸/۸ میلی‌متر) و لوله‌های ۱۸ الی ۲۰ برابر ۶۰ اینچ (۱۵۲۴ میلی‌متر) می‌باشند (Murphy و همکاران، ۱۹۹۳).

جدول ۱- لیست اقطار تجاری و هزینه واحد طول هر قطر موجود

شبکه	هزینه به ازای واحد طول هر قطر تجاری	لیست قطرهای تجاری موجود
دو حلقه‌ای	۵۰، ۳۲، ۲۳، ۱۶، ۱۱، ۸، ۵، ۲، ۳۰۰، ۱۷۰، ۱۳۰، ۹۰، ۶۰	۱۰، ۸، ۶، ۴، ۳، ۲، ۱، ۱۸، ۱۶، ۱۴، ۱۲، ۵۵۰ (unit/meter) ۲۴، ۲۲، ۲۰ (in)
شهر نیویورک	۳۱۶، ۲۶۷، ۲۲۱، ۱۷۶، ۱۳۴، ۵/۹۳، ۶۳۲، ۵۷۷، ۵۲۲، ۴۶۹، ۴۱۷، ۳۶۵، ۸۰۴، ۷۴۶، ۶۸۹	۹۶، ۸۴، ۷۲، ۶۰، ۴۸، ۳۶، ۱۰۸، ۱۲۰، ۱۳۲، ۱۴۴، ۱۵۶، ۲۰۴، ۱۹۲، ۱۸۰، ۱۶۸ (dollar/foot) ۲۰۴، ۱۹۲، ۱۸۰، ۱۶۸ (in)



شکل ۲- جانیایی شبکه توزیع آب شهر نیویورک

از الگوریتم‌های پیشنهادی با سایر نتایج موجود مقایسه شد. شبکه نمونه توزیع آب دو حلقه‌ای با استفاده از الگوریتم‌های مختلف فراکاوشی از جمله نسخه‌های مختلف الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان (AC)، الگوریتم جهش قورباغه (SF)، الگوریتم ممتیک (MA)، الگوریتم چرخش آب (WCA) و الگوریتم تکاملی تفاضلی (DE) حل شده و جواب بهینه ۴۱۹۰۰۰ برای این مسأله حاصل شده است. هزینه محاسباتی الگوریتم‌های مختلف در حل این مسأله در جدول (۶) ارائه شده است. مقایسه نتایج به دست آمده، نشان می‌دهد در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، هزینه محاسباتی الگوریتم‌های پیشنهادی، کمتر

شده است. علاوه بر آن، کمترین هزینه محاسباتی با استفاده از نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی حاصل شده است. به عبارت دیگر، با استفاده از نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی، میزان هزینه محاسباتی الگوریتم‌های ژنتیک ساده، ژنتیک سریع، جهش قورباغه، جامعه مورچگان، ممتیک، چرخش آب و تکاملی تفاضلی به ترتیب به میزان ۸۹/۲۸٪، ۱۶۶/۶۸٪، ۳۱۲/۶۸٪، ۸۲/۱۴٪، ۳۰۷/۲۲٪، ۶۸۵/۷۲٪ و ۱۷۱/۴۳٪ کاهش یافته است. در مجموع، مقایسه نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب‌تر الگوریتم‌های پیشنهادی در حل مسأله شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای است.

جدول ۲- مقادیر مناسب بهینه پارامترهای الگوریتم‌های استاندارد و اصلاحی کلونی زنبور عسل مصنوعی

مسأله	الگوریتم زنبور عسل	تکرار	جمعیت	Limit	ndim	ضریب مجاورت همگرایی	ضریب شوک
دو حلقه‌ای	استاندارد	۶۰	۱۰۰	۸۰	۵	-	-
	اصلاحی	۶۰	۱۰۰	۱۰۰	۷	۳	۰/۹
شهر نیویورک	استاندارد	۸۰	۱۰۰	۱۰۰	۷	-	-
	اصلاحی	۸۰	۱۰۰	۱۰۰	۵	۴	۰/۹

جدول ۳- نتایج به دست آمده برای مسائل مورد مطالعه با استفاده از روش پیشنهادی

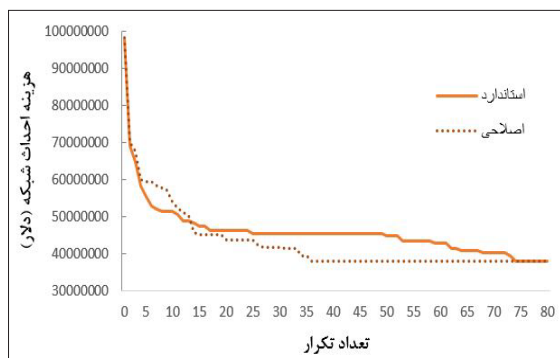
مسأله	الگوریتم کلونی زنبور عسل	کمترین مقدار تابع هدف	میانگین مقدار تابع هدف	بیشترین مقدار تابع هدف	انحراف از معیار استاندارد	تعداد جواب شنی	هزینه محاسباتی
دو حلقه‌ای	استاندارد	۴۱۹۰۰۰	۴۱۹۰۰۰	۴۱۹۰۰۰	۰	۵	۳۸۰۰
	اصلاحی	۴۱۹۰۰۰	۴۱۹۰۲۰/۴۳۴	۴۲۴۰۲۵/۸۴۷	۰/۰۳۰	۵	۱۸۰۰
شهر نیویورک	استاندارد	۳۸۱۲۸۰۰	۳۸۱۲۸۰۰	۳۸۱۲۸۰۰	۰/۰۱۶۴	۵	۷۱۰۰
	اصلاحی	۳۸۱۲۸۰۰	۳۸۱۲۸۰۰	۳۸۱۲۸۰۰	۰/۰۷۵۸	۵	۶۲۰۰

جدول ۴- قطر بهینه لوله‌های شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای (in)

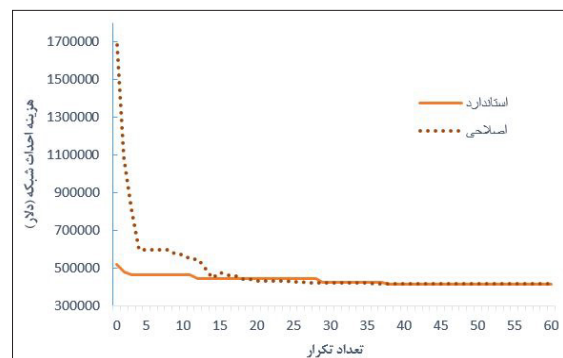
الگوریتم کلونی زنبور عسل	شماره لوله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
استاندارد	۱۸	۱۰	۱۶	۴	۱۶	۱۰	۱۰	۱۰	۱
اصلاحی	۱۸	۱۰	۱۶	۴	۱۶	۱۰	۱۰	۱۰	۱

جدول ۵- قطر بهینه لوله‌های موازی موجود در شبکه شهر نیویورک (in)

الگوریتم کلونی زنبور عسل	شماره لوله	۷	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۱
استاندارد	۱۳۲	۹۶	۹۶	۸۴	۷۲	۷۲	۷۲
اصلاحی	۱۳۲	۹۶	۹۶	۸۴	۷۲	۷۲	۷۲



شکل ۴- نمودار همگرایی نسخه‌های استاندارد و اصلاحی الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی (شبکه شهر نیویورک)



شکل ۳- نمودار همگرایی نسخه‌های استاندارد و اصلاحی الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی (شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای)

شبکه توزیع آب شهر نیویورک با استفاده از الگوریتم‌های مختلف فراکاوشی ازجمله الگوریتم ژنتیک، الگوریتم جامعه مورچگان، الگوریتم جهش قورباغه، جست‌وجوی ممنوعه و انواع الگوریتم‌های تکاملی تفاضلی حل شده که مقادیر تابع هدف و هزینه محاسباتی آن در جدول (۷) ارائه شده است. مقایسه نتایج جدول (۷) نشان می‌دهد با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی تحقیق حاضر، در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، جواب‌های مناسب‌تر (مقدار تابع هدف کمتر) و با هزینه محاسباتی کمتر حاصل شده است که عملکرد نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی در مقایسه با نسخه استاندارد مناسب‌تر است. به عبارت دیگر، با استفاده از نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی، میزان هزینه احداث شبکه (تابع هدف) در مقایسه با الگوریتم‌های

ژنتیک، جامعه مورچگان، ژنتیک فشرده، تکاملی تفاضلی خود تطبیقی و مناسب‌ترین مرجع تکاملی تفاضلی^۹ به ترتیب به اندازه ۱/۷۶٪، ۱/۳۴٪، ۱/۳۴٪ و ۱/۳۴٪ کاهش یافته است. در مجموع، بررسی نتایج حل مسائل مطالعه موردی اول و دوم یعنی شبکه نمونه توزیع آب دو حلقه‌ای و شبکه شهر نیویورک با استفاده از الگوریتم‌های مختلف فراکاوشی نشان دهنده آن است که حل این مسائل با استفاده از سایر الگوریتم‌های فراکاوشی با افزایش هزینه محاسباتی و افزایش مدت زمان اجرای برنامه در مقایسه با الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی است. بنابراین، استفاده از روش پیشنهادی موجب کاهش میزان زمان محاسبات بهینه‌ساز و دستیابی به جواب مناسب‌تر و با هزینه محاسباتی (تعداد عملگر ارزیابی) کمتر شده است.

جدول ۶- مقایسه هزینه محاسباتی الگوریتم‌های مختلف فراکاوشی (شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای)

نام محقق (سال)	الگوریتم	هزینه محاسباتی (تعداد عملگر ارزیابی)
Savic و Walters (۱۹۹۷)	ژنتیک استاندارد	۲۵۰۰۰۰
Abebe و Solomatine (۱۹۹۹)	ژنتیک ساده	۵۳۰۰
Wu و همکاران (۲۰۰۱)	ژنتیک سریع و بی‌نظم (FMGA)	۴۶۷۷
Eusuff و Lansey (۲۰۰۳)	جهش قورباغه	۱۱۵۵۵
Afshar (۲۰۰۷)	جامعه مورچگان	۵۱۰۰
Moeini و Mousavi Moulai (۲۰۱۸)	جامعه مورچگان	۴۷۰۰
Elbeltagi و El-Ghandour (۲۰۱۸)	ممتیک (MA)	۱۱۴۰۲
Praneeth و همکاران (۲۰۱۹)	چرخش آب (WCA)	۲۲۰۰۰
Poojitha و همکاران (۲۰۲۰)	تکاملی تفاضلی (DE)	۷۶۰۰
تحقیق حاضر	نسخه استاندارد الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی	۳۸۰۰
تحقیق حاضر	نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی	۲۸۰۰

جدول ۷- مقایسه مقدار تابع هدف و هزینه محاسباتی الگوریتم‌های مختلف فراکاوشی (شبکه توزیع آب شهر نیویورک)

محقق (سال)	الگوریتم	مقدار تابع هدف (میلیون دلار)	هزینه محاسباتی (عملگر ارزیابی)
Murphy و همکاران (۱۹۹۳)	ژنتیک استاندارد	۳۸/۸۰	۱۰۰۰۰۰۰
Savic و Walters (۱۹۹۷)	ژنتیک استاندارد	۴۰/۴۲	۴۶۰۱۶
Lippai و همکاران (۱۹۹۹)	جست‌وجوی ممنوعه	۳۸/۱۳	۱۰۰۰۰۰۰
Eusuff و Lansey (۲۰۰۳)	جهش قورباغه	۳۸/۱۳	۶۰۰۰۰
Maier و همکاران (۲۰۰۳)	جامعه مورچگان	۳۸/۸۰	۲۲۶۳۵
Afshar (۲۰۰۹)	ژنتیک فشرده	۳۸/۶۴	۱۸۲۰۰
Moeini و Mousavi Moulai (۲۰۱۸)	جامعه مورچگان	۳۸/۶۴	۹۹۰۰
Zheng (۲۰۱۵)	تکاملی تفاضلی خود تطبیقی (SADE)	۳۸/۶۴	۲۳۵۰۰
Moosavian و Lence (۲۰۱۹)	مناسب‌ترین مرجع تکاملی تفاضلی (FDE)	۳۸/۶۴	۴۱۹۳
تحقیق حاضر	نسخه استاندارد الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی	۳۸/۱۳	۷۱۰۰
تحقیق حاضر	نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی	۳۸/۱۳	۶۲۰۰

افشار، م. ه. و غفوری، ح. ر. ۱۳۸۲. طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب، نشریه بین‌المللی علوم مهندسی، ۱۴(۲): ۱۳۳-۱۴۵.

خلیفه، س. غ.، بارانی، ع.، خلیفه، و. و ذونعمت کرمانی، م. ۱۳۹۸. بهینه‌سازی شبکه توزیع آب با الگوریتم ژنتیک موجود در مدل Water Gems (مطالعه موردی: شهر روی در استان هرمزگان)، نشریه مهندسی عمران، ۳۲: ۱۱۱-۱۲۳.

شاهی، ب.، جعفرزاده، م. ر. و موسویان، ع. ن. ۱۳۹۲. کاربرد الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) در بهینه‌سازی سیستم‌های توزیع آب شهری (مطالعه موردی بر روی شبکه آبرسانی شهر تربت جام). هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران. زاهدان، ایران.

معینی، ر. و سقراطی، ف. ۱۳۹۹. بهره‌برداری بهینه از سامانه سد تک مخزنه با الگوریتم اصلاحی کلونی زنبورعسل مصنوعی (مطالعه موردی: سد دز در استان خوزستان). نشریه دانش آب و خاک، ۳۰(۱): ۱۰۹-۱۲۱.

- Abebe A.J. and Solomatine D.P. 1999. Application of global optimization to the design of pipe networks. 3rd International Conference on Hydroinformatics, Copenhagen, Balkema, Rotterdam
- Afshar M.H. 2007. Application of ant algorithm to pipe network optimization. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions B: Engineering, 31(B5): 487-500.
- Afshar M.H. 2009. Application of a compact genetic algorithm to pipe network optimization problems, Scientia Iranica. Transactions A: Civil Engineering, 16(3): 264- 271.
- Cunha M.C. and Sousa J. 1999. Water distribution network design optimization: simulated annealing approach, Journal of Water Resources Planning and Management, 125(4): 215-221.
- El-Ghandour H. A. and Elbeltagi E. 2018. Comparison of five evolutionary algorithms for optimization of water distribution networks. Journal of Computing in Civil Engineering, 32(1): 04017066.01-10.
- Eusuff M.M. and Lansey K. E. 2003. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm, Journal Water Resource Planning Management, 129(3): 210-225.
- Heydari S., Mamizadeh J., Sarvarian J. and Ahmadi G. 2020. Optimization of water distribution networks using developed binary genetic algorithm and hydraulic model software, Journal of applied resource in water and wastewater, 13: 30-35.
- Hosseini K., Jafari Nodoushan E., Barati R. and Shahheydari H. 2016. Optimal design of labyrinth spillways us-

در این تحقیق، نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی معرفی و عملکرد آن در حل مسأله طراحی بهینه شبکه توزیع آب بررسی شد. به این منظور یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز معرفی شد که در آن از نرم‌افزار EPANET به عنوان شبیه‌ساز و الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی به عنوان بهینه‌ساز استفاده شد. به منظور نشان دادن عملکرد روش پیشنهادی، دو شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای و شهر شهر نیویورک به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. نتایج به دست آمده با نتایج نسخه پایه و استاندارد الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی و سایر نتایج موجود مقایسه شد. برای شبکه دو حلقه‌ای مقدار تابع هدف (هزینه احداث شبکه) و هزینه محاسباتی به ترتیب ۴۱۹۰۰۰ دلار و ۲۸۰۰ عملگر ارزیابی و برای شبکه شهر نیویورک مقدار تابع هدف (هزینه احداث) ۳۸۱۳ میلیون دلار و ۶۲۰۰ عملگر ارزیابی، با استفاده از الگوریتم اصلاحی کلونی زنبورعسل مصنوعی، مقایسه نتایج نشان داد با استفاده از نسخه اصلاحی الگوریتم زنبورعسل مصنوعی نسبت به نسخه استاندارد و سایر الگوریتم‌های فراکاوشی، مقادیر تابع هدف و هزینه محاسباتی کمتر بود. به عبارت دیگر برای شبکه دو حلقه‌ای، با استفاده از نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی میزان هزینه محاسباتی الگوریتم‌های مورد استفاده در بهترین حالت ۶۸۵/۷۲٪ کاهش یافت. همچنین، برای شبکه شهر نیویورک، با استفاده از نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی میزان هزینه احداث شبکه (میزان تابع هدف) در بهترین حالت به اندازه ۶/۰۱٪ کاهش یافت. بنابراین استفاده از آن در حل مسأله بهینه‌سازی شبکه توزیع آب شهری پیشنهاد می‌شود.

پی‌نوشت

- 1-Differential Evolution Algorithm
- 2-Tabu Search
- 3-Simulated Annealing
- 4-Ant Colony Optimization Algorithm
- 5-Shuffled Frog Optimization Algorithm
- 6-SiBANET
- 7-Artificial Bee Colony
- 8-Feasible
- 9-Differential evolution based global best algorithm

منابع

افتخاری، م. و اکبری، م. ۱۳۹۹. ارزیابی هزینه‌ای مدل‌های فراابتکاری مورد استفاده در طراحی شبکه توزیع آب شهری. مجله آب و فاضلاب، ۲: ۴۸-۵۶.

- Praneeth P, Vasan A and Raju KS. 2019. Pipe size design optimization of water distribution networks using water cycle algorithm. In: Harmony Search and Nature Inspired Optimization Algorithms. Singapore: Springer, 741: 1057-1067.
- Poojitha S.N., Singh G. and Jothiprakash V. 2020. Improving the optimal solution of GoYang network – using genetic algorithm and differential evolution. Water Supply, 20(1): 95–102
- Reca J., Martinez J. and Lopez R. 2017. A hybrid water distribution networks design optimization method based on a search space reduction approach and a genetic algorithm, Water journal, 9: 845-855.
- Sadeghifar T. and Barati R. 2018. Application of adaptive Neuro-fuzzy inference system to estimate alongshore sediment transport rate (A real case study: southern shorelines of Caspian Sea). Journal of Soft Computing in Civil Engineering, 2(4): 72-85.
- Savic D.A. and Walters G.A. 1977. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks, Journal of water resources planning and management, 123(2): 67-77.
- Schaake J. C. and Lai F.H. 1969. Linear programming and dynamic programming applications to water distribution network design. Rep.116. Department of civil engineering. Massachusetts Inst. of Technol. Cambridge Massachusetts, United States.
- Shende C. and Chau K.W. 2019. Design of water distribution systems using an intelligent simple benchmarking algorithm with respect to cost optimization and computational efficiency, Water Supply, 19: 1892-1898.
- Tong L., Han G. and Qia J. 2011. Design of water distribution network via ant colony optimization, The 2nd international conference on intelligent control and information processing. Harbin, China.
- Wu Z. Y., Boulous P. F., Orr C. H. and Ro J. J. 2001. Using genetic algorithms to rehabilitate distribution systems, Journal of american water works association, 93(11): 74-85.
- Zheng F. 2015. Comparing the real-time searching behavior of four differential evolution variants applied to water-distribution-network design optimization. Journal of Water Resources Planning and Management, 141(10): 04015016-1-12.
- ing meta-heuristic algorithms. KSCE Journal of Civil Engineering, 20(1): 468-477.
- Karaboga D. and Basturk B. 2007. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm, Journal of Global Optimization, 39: 459-471.
- Kazemi M. and Barati R. 2022. Application of dimensional analysis and multi-gene genetic programming to predict the performance of tunnel boring machines. Applied Soft Computing, 124: 108997.
- Khetrapal P. Pathan J. and Shrivastava S. 2020. Power loss minimization in radial distribution systems with simultaneous placement and sizing of different types of distribution generation units using improved artificial bee colony algorithm, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, 12: 1-22.
- Lippai I., Heaney J.P. and Laguna M. 1999. Robust water system design with commercial intelligent search optimizers, Journal of Computing in Civil Engineering, 13(3): 135-143.
- Maier H.R., Simpson A.R., Zecchin A.C., Foong W.K., Phang K.Y., Seah H.Y. and Tan C.L. 2003. Ant colony optimization for design of water distribution systems, Water Resources Planning and Management, 129(3): 200–209.
- Mehta D.J., Yadav V., Waikhom S. and Prajapati K. 2017. Design of optimal water distribution systems using WATERGEMS: A case study of Surat City. E-proceedings of the 37th IAHR World Congress. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Moieni R. and Mousavi Moulaei S.A. 2018. Simulation-optimization model for design of water distribution system using ant based algorithms, The Journal of Engineering Research (TJER), 15(1): 42-60.
- Moosavian N. and Lence B.J. 2019. Fittest individual referenced differential evolutionary algorithms for optimization of water distribution networks. Journal of Computing in Civil Engineering, 33(6): 04019036-1-16.
- Mirbod S.A.R., Daei M. and Tajmir rahi H. 2017. Development of R- μ relation for the seismically base isolated structures using modified ABC algorithm, International journal of optimization in civil Engineering, 7: 25-44.
- Murphy L.J., Simpson A.R. and Dandy G.C. 1993. Design of a network using genetic algorithms, Water, 20: 40-42.

An Analysis of the Salinity Status of Water Resources in Use in the Agricultural Sector

M.H. Rahimian^{1*}, H. Gholami²

1- Assistant Professor, National Salinity Research Center (NSRC), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran.
2- PhD Student of Water Science and Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

*(Corresponding Author Email: mh.rahimian@areeo.ac.ir)

Received: 05-04-2022

Revised: 16-08-2022

Accepted: 21-08-2022

Available Online: 21-12-2022

تحلیلی بر وضعیت شوری منابع آب در حال استفاده بخش کشاورزی

محمدحسن رحیمیان^{۱*}، حسن غلامی^۲

۱- استادیار مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران. ۲- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: mh.rahimian@areeo.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰

Abstract

The salinity of irrigation water resources combined with improper irrigation and drainage management is considered one of the most important threats to the sustainability of the agricultural sector in irrigated lands of the country. According to an overall estimate, about half of the country's irrigated farms have salinity problems at different levels. Given that no up-to-date and accurate report on the salinity status of agricultural water resources of Iran has been prepared so far, this paper decided to do this with the help of the latest statistics and information available at a national scale. For this purpose, the quality (salinity) data of agricultural water resources related to Iran Water Resources Management Company and also the results of previous studies on the quality of surface and underground water resources were used. The results of data analysis, which was conducted on 44.5 billion cubic meters of groundwater used in the agricultural sector, show that the average electrical conductivity of these resources is around 2.0 dS.meter⁻¹. of which, about 31% (equivalent to 13.8 bcm), as well as about 20% of the surface agricultural water resources (equivalent to around 3.6 to 4.4 bcm) have salinities higher than the average. Concludingly, the possible effects of salinity on crop yield have also been provided, as well as proper solutions to overcome the salinity problems of irrigated agriculture.

Keywords: Ground Water, Surface Water, Salinity, Electrical Conductivity, Agriculture.

چکیده

شوری منابع آب کشاورزی توأم با مدیریت ضعیف آبیاری و زهکشی، به عنوان مهمترین عامل تهدیدکننده پایداری بخش کشاورزی در اراضی فاریاب شناخته می شود. بطوریکه بر اساس یک تخمین کلی، حدود نیمی از کشت های آبی کشور در معرض مشکلات شوری با درجات مختلف قرار دارند. با توجه به اینکه تاکنون گزارشی از آخرین وضعیت شوری منابع آب در حال استفاده بخش کشاورزی تدوین نشده است، این مقاله بر آن شد تا با کمک آمار و اطلاعات موجود در مقیاس ملی، این مهم را انجام دهد. بدین منظور از داده های کیفیت (شوری) منابع آب کشاورزی مربوط به شرکت مدیریت منابع آب ایران و همچنین از نتایج مطالعات قبلی در زمینه کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی استفاده شد. نتایج تحلیل داده های مذکور که بر روی ۴۴/۵ میلیارد مترمکعب آب های زیرزمینی مورد استفاده در بخش کشاورزی انجام گردید، نشان می دهد که متوسط هدایت الکتریکی این منابع در حدود ۲ دسی زیمنس بر متر است. همچنین از نظر حجمی، حدود ۳۱٪ این منابع (معادل با ۱۳/۸ میلیارد مترمکعب) و حدود ۲۰٪ از آب های سطحی مصرفی در بخش کشاورزی (معادل با ۳/۶ تا ۴/۴ میلیارد مترمکعب) دارای شوری های بالاتر از عدد میانگین می باشند. در انتهای این مقاله، به اثرات شوری بر عملکرد محصول و راهکارهای غلبه بر مشکلات شوری در اراضی فاریاب نیز مختصراً اشاره شده است. **واژه های کلیدی:** آب زیرزمینی، آب سطحی، شوری، هدایت الکتریکی، کشاورزی.

یکی از عوامل تهدیدکننده پایداری بخش کشاورزی به ویژه در اراضی فاریاب^۱، شورشیدن تدریجی خاک‌های کشاورزی به واسطه شوری منابع آب آبیاری می‌باشد. بر اساس یک تخمین کلی، حدود نیمی از اراضی کشت‌های آبی کشور دارای مشکلات شوری با درجات مختلف هستند (Cheraghi, ۲۰۰۴) که در صورت عدم تغییر مدیریت، افت ۵۰ درصدی عملکرد محصول در آنها محتمل است (Qadir و همکاران، ۲۰۰۷). از طرفی دیگر، میانگین درازمدت بارندگی کشور ۲۴۳ میلی‌متر و پتانسیل تبخیر در حدود ۲۰۰۰ میلی‌متر می‌باشد که به ترتیب یک سوم و سه برابر میانگین جهانی است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۷) و این دو موضوع (بارندگی کم و تبخیر زیاد) سبب می‌شوند تا شستشوی طبیعی املاح از خاک‌های کشاورزی به‌خوبی صورت نگیرد. مسأله شور شدن خاک و از بین رفتن تدریجی کشاورزی در اثر آبیاری با آب شور، جنبه جهانی نیز دارد و بر خطرات آن مرتباً تأکید شده است. به‌عنوان مثال، Qadir و همکاران (۲۰۱۴) اذعان داشته‌اند که طی ۲۰ سال متمادی، روزانه ۲۰۰۰ هکتار از اراضی تحت آبیاری ۷۵ کشور واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا در اثر شور شدن از بین رفته است. طبق برآوردهای صورت گرفته توسط ایشان، خسارت تخریب خاک در مزارع تحت آبیاری دنیا، نزدیک به ۲۷/۳ میلیارد دلار در هر سال است. در مورد ایران، این تخمین، نزدیک به ۵۰ درصد اراضی فاریاب و به حدود ۳/۵ میلیون هکتار می‌رسد (بنائی و همکاران، ۱۳۸۳) که سالانه خسارتی بالغ بر یک میلیارد دلار را به کشور وارد می‌کند (FAO, ۲۰۱۲؛ هاشمی‌نژاد، ۱۳۹۵). لازم به ذکر است که سطح اراضی کشاورزی ایران، اعم از کشت‌های دائمی یا سالانه آبی و دیم در حدود ۱۸/۲ میلیون هکتار است که از این سطح، مقدار تقریبی ۷/۸ میلیون هکتار را کشاورزی فاریاب (آبی) تشکیل می‌دهند. بنابراین، آبیاری اراضی با آب‌های شور توأم با مدیریت ضعیف آبیاری و زهکشی می‌تواند موجب شوری‌زایی ثانویه^۲ خاک‌های کشاورزی، بروز خسارت به محصول و نهایتاً افت قابل توجه درآمد و اشتغال در این بخش گردد (Qadir و همکاران، ۲۰۰۷؛ Siadat و همکاران، ۱۹۹۷). در همین راستا، با توجه به اینکه گزارش به‌روز از آخرین وضعیت شوری منابع آب بخش کشاورزی تا کنون تدوین نشده است، این مقاله سعی بر آن داشته تا با کمک آمار و اطلاعات موجود در مقیاس ملی، این مهم را انجام دهد. بررسی و تبیین وضعیت فعلی کیفیت (شوری) منابع آب کشاورزی، تحلیل آخرین داده‌های موجود و همچنین ارائه برخی راهکارهای مدیریت و کنترل شوری در اراضی فاریاب کشور از مهمترین اجزای این مقاله است که در ذیل به آن‌ها پرداخته شده است.

برای انجام این پژوهش از داده‌های کیفیت (شوری) منابع آب کشاورزی مربوط به شرکت مدیریت منابع آب ایران در سال ۱۳۹۷ و همچنین از نتایج مطالعات قبلی در زمینه کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی مورد استفاده در بخش کشاورزی، استفاده شده است. تحلیل مکانی داده‌ها و طبقه‌بندی کلاس‌های شوری از مهمترین مراحل انجام این پژوهش بوده است و از این طریق، سعی شد تا ابتدا وضعیت شوری منابع آب کشاورزی در نقاط مختلف کشور تبیین شود و سپس با بهره‌گیری از تجارب و تحقیقات قبلی صورت گرفته در این زمینه، راهکارهایی جهت غلبه بر مشکلات شوری در اراضی فاریاب ارائه گردد.

نتایج و بحث

الف- تحلیل کیفیت (شوری) آب‌های زیرزمینی

جدول (۱) میانگین هدایت الکتریکی منابع آب کشاورزی استان‌های مختلف کشور بر حسب دسی‌زیمنس بر متر را نشان می‌دهد که از آمار شرکت مدیریت منابع آب ایران در سال ۱۳۹۷ استخراج شده است. در این بین، استان‌هایی نظیر بوشهر، خراسان جنوبی و یزد دارای بیشترین میانگین شوری آب مصرفی در بخش کشاورزی هستند؛ بطوریکه چاه‌های کشاورزی این استان‌ها دارای میانگین هدایت الکتریکی تقریبی ۵ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشند. همچنین، با در نظر گرفتن حجم آب استحصال شده از هر منبع (چاه، چشمه، قنات) در هر استان، میانگین وزنی شوری آب کشاورزی نیز محاسبه (ستون آخر جدول) و به ترتیب صعودی مرتب شد. همانطوری که ملاحظه می‌گردد، منابع آب کشاورزی ۱۱ استان کشور دارای میانگین وزنی شوری تقریبی ۲ دسی‌زیمنس بر متر و بیشتر هستند. این استان‌ها شامل بوشهر، یزد، خراسان جنوبی، هرمزگان، قم، اصفهان، سمنان، سیستان و بلوچستان، فارس، خراسان رضوی و کرمان می‌باشند.

با توجه به اینکه در بین منابع مختلف آب زیرزمینی (چاه، چشمه و قنات)، چاه‌های کشاورزی با ۷۷٪ بیشترین سهم را از نظر تأمین آب در بخش کشاورزی دارند، دامنه تغییرات هدایت الکتریکی این چاه‌ها به‌صورت استان به استان نیز بررسی شد. شکل (۱) تغییرات میانگین، حداکثر و حداقل هدایت الکتریکی (شوری) مشاهداتی چاه‌های کشاورزی استان‌های مختلف را نشان می‌دهد. بدین ترتیب، بیشترین مقادیر مطلق شوری آب چاه‌های کشاورزی در استان‌های سیستان و بلوچستان، یزد و اصفهان، اندازه‌گیری و ثبت شده است. انجام فعالیت‌های

است که کشاورزان این مناطق برای استفاده از منابع آب بسیار شور مذکور در پیش گرفته‌اند. استفاده از فناوری‌هایی نظیر آب‌شیرین‌کن نیز در برنامه برخی کشاورزان پیشرو برای تولید گیاهان اقتصادی و پر سود نظیر پسته و برخی محصولات گلخانه‌ای، قرار گرفته است.

آبزی‌پروری و تولید محصولات باغی و زراعی متحمل به شوری، اعم از پسته، جو و علوفه به عنوان عمده مصارف شورترین چاه‌های کشاورزی این استان‌ها گزارش گردیده است. همچنین، اختلاط و استفاده تلفیقی آب شور با سایر منابع آبی موجود در محل که کیفیت مناسب‌تری دارند، جزو مهمترین راهکارهایی

جدول ۱- میانگین هدایت الکتریکی منابع آب زیرزمینی کشاورزی (بر حسب دسی‌زیمنس بر متر) در استان‌های مختلف کشور

ردیف	نام استان	چاه	چشمه	قنات	میانگین وزنی شوری
۱	چهارمحال و بختیاری	۰/۵	۰/۴	۰/۴	۰/۴
۲	کرمانشاه	۰/۵	۰/۴	۰/۴	۰/۵
۳	لرستان	۰/۶	۰/۳	۰/۴	۰/۵
۴	مازندران	۰/۹	۰/۳	-	۰/۵
۵	گیلان	۱/۰	۰/۳	۰/۷	۰/۵
۶	کردستان	۰/۶	۰/۴	۰/۶	۰/۶
۷	اردبیل	۱/۰	۰/۵	۰/۷	۰/۶
۸	همدان	۰/۹	۰/۴	۰/۶	۰/۹
۹	کهگیلویه و بویراحمد	۰/۹	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۱۰	البرز	۱/۲	۰/۴	۱/۰	۱/۱
۱۱	مرکزی	۱/۳	۰/۶	۰/۷	۱/۱
۱۲	آذربایجان غربی	۱/۲	۰/۵	۰/۷	۱/۱
۱۳	ایلام	۱/۴	۱/۰	۱/۲	۱/۲
۱۴	آذربایجان شرقی	۱/۳	۰/۷	۰/۷	۱/۲
۱۵	تهران	۱/۴	۰/۴	۱/۵	۱/۳
۱۶	قزوین	۱/۵	۰/۵	۰/۹	۱/۴
۱۷	زنجان	۱/۶	۰/۶	۰/۷	۱/۴
۱۸	گلستان	۱/۷	۰/۶	۰/۸	۱/۴
۱۹	خوزستان	۱/۶	۰/۹	۰/۹	۱/۴
۲۰	خراسان شمالی	۲/۱	۰/۷	۱/۴	۱/۵
۲۱	کرمان	۲/۰	۰/۶	۱/۰	۱/۹
۲۲	خراسان رضوی	۲/۲	۰/۸	۱/۲	۲/۰
۲۳	فارس	۲/۳	۱/۱	۰/۹	۲/۰
۲۴	سیستان و بلوچستان	۲/۵	۱/۲	۱/۶	۲/۳
۲۵	سمنان	۲/۷	۰/۹	۱/۷	۲/۳
۲۶	اصفهان	۳/۴	۰/۵	۱/۳	۲/۷
۲۷	قم	۴/۰	۰/۶	۰/۹	۳/۳
۲۸	هرمزگان	۳/۴	۳/۸	۱/۵	۳/۴
۲۹	خراسان جنوبی	۵/۲	۱/۷	۲/۰	۴/۴
۳۰	یزد	۵/۲	۱/۹	۱/۷	۴/۵
۳۱	بوشهر	۵/۶	۳/۶	۲/۸	۵/۴
-	میانگین	۲/۰	۰/۹	۱/۰	۱/۷



جدول (۲) حجم اختصاص یافته به کلاس‌های مختلف شوری آب زیرزمینی استان‌های مختلف را نشان می‌دهد که از آمار و گزارش‌های مطالعات پایه منابع آب استخراج شده است (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۷). در این جدول، تنوع زیادی از نظر توزیع شوری آب زیرزمینی (آب آبیاری) استان‌های مختلف دیده می‌شود. برخی استان‌ها نظیر کرمانشاه، چهارمحال و بختیاری، لرستان و گیلان، تقریباً

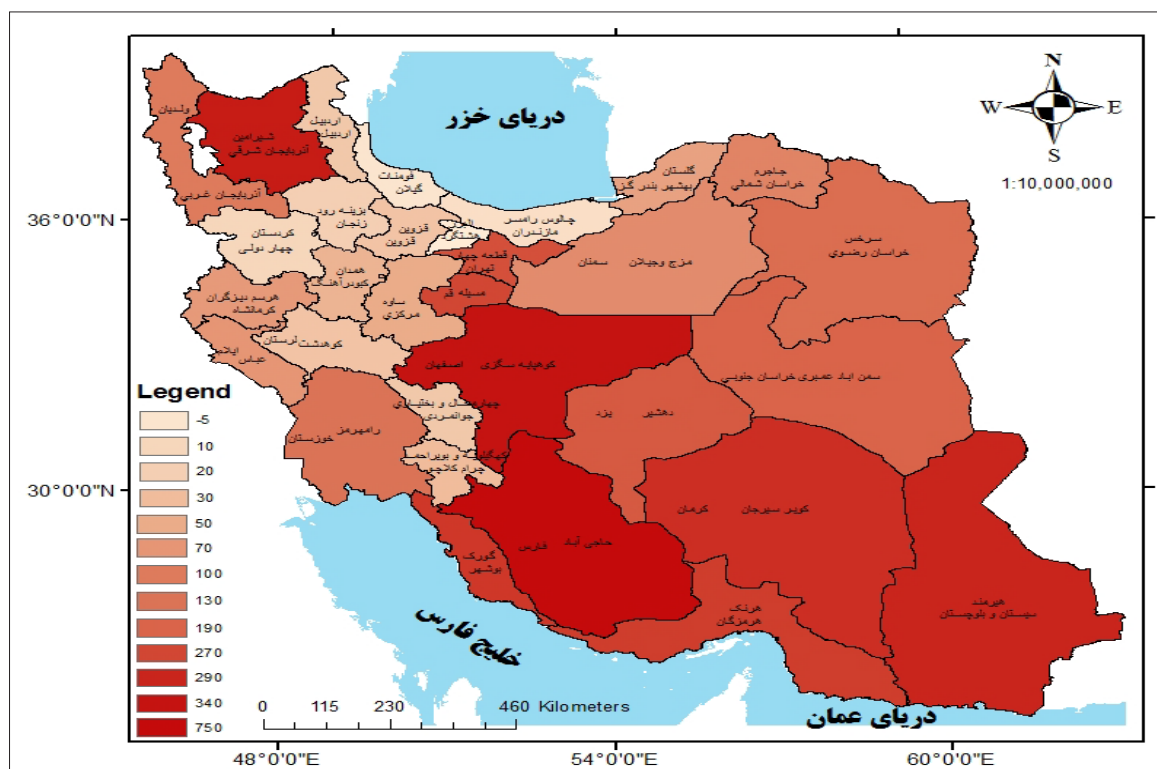
فاقد آب‌های زیرزمینی شور بوده و طبیعتاً بخش عمده منابع آب آنها در کلاس کیفی کمتر از ۲ دسی زیمنس بر متر قرار گرفته است. اما در استان‌هایی نظیر بوشهر، یزد، خراسان جنوبی، هرمزگان، قم، اصفهان، سمنان، سیستان و بلوچستان، فارس، خراسان رضوی و کرمان میانگین شوری آب زیرزمینی آنها در حدود ۲ و یا بالای ۲ دسی زیمنس بر متر بوده و کلاس‌های شوری آب آبیاری این استان‌ها، دارای تنوع می‌باشند.

جدول ۲- درصد حجمی اختصاص یافته به کلاس‌های مختلف شوری آب زیرزمینی استان‌های مختلف، در حال استفاده در بخش کشاورزی

کلاس شوری آب زیرزمینی (دسی زیمنس بر متر)						استان
۱۶ < EC	۱۶ > EC > ۱۲	۱۲ > EC > ۸	۸ > EC > ۴	۴ > EC > ۲	۲ > EC	
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۱	۹۹/۹	کرمانشاه
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۲	۹۹/۸	چهارمحال بختیاری
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۱	۰/۲	۹۹/۷	لرستان
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۱	۰/۳	۹۹/۶	گیلان
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۱	۱/۰	۹۸/۹	کردستان
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۱	۱/۱	۹۸/۸	مازندران
۰/۰	۰/۰	۰/۱	۰/۴	۱/۷	۹۷/۸	کهگیلویه بویراحمد
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۸	۳/۹	۹۵/۲	همدان
۰/۰	۰/۰	۰/۲	۱/۳	۵/۳	۹۳/۲	گلستان
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۸/۴	۹۱/۶	اردبیل
۰/۰	۰/۰	۰/۱	۱/۸	۸/۷	۸۹/۳	آذربایجان غربی
۰/۰	۰/۰	۰/۴	۴/۰	۷/۷	۸۸/۰	زنجان
۰/۰	۰/۰	۰/۶	۴/۰	۷/۹	۸۷/۵	آذربایجان شرقی
۰/۰	۰/۰	۰/۶	۴/۵	۱۲/۹	۸۲/۰	مرکزی
۰/۰	۰/۰	۰/۸	۸/۷	۱۷/۳	۷۳/۲	خراسان شمالی
۰/۰	۰/۰	۰/۱	۲/۹	۳۰/۰	۶۷/۰	خوزستان
۰/۰	۰/۰	۰/۱	۵/۴	۳۱/۵	۶۳/۰	ایلام
۰/۰	۰/۳	۱/۸	۱۳/۲	۲۹/۶	۵۵/۱	سمنان
۰/۰	۰/۱	۰/۲	۱/۰	۳/۶	۹۵/۱	البرز
۰/۰	۰/۶	۲/۸	۴/۶	۱۰/۲	۸۱/۹	تهران
۰/۰	۰/۰	۰/۷	۱۳/۶	۳۹/۰	۴۶/۷	سیستان و بلوچستان
۰/۰	۰/۰	۰/۳	۲/۹	۱۴/۷	۸۲/۰	قزوین
۰/۱	۲/۰	۸/۲	۳۴/۸	۲۷/۹	۲۷/۱	قم
۰/۲	۰/۶	۲/۹	۹/۲	۱۸/۹	۶۸/۲	فارس
۰/۵	۱/۷	۴/۴	۱۳/۲	۱۹/۶	۶۰/۵	اصفهان
۰/۵	۱/۹	۷/۸	۱۴/۴	۱۷/۶	۵۷/۹	خراسان رضوی
۰/۸	۰/۶	۰/۹	۹/۰	۵۶/۹	۳۱/۸	هرمزگان
۰/۹	۲/۵	۷/۹	۵۲/۶	۲۳/۶	۱۲/۴	بوشهر
۱/۲	۱/۳	۲/۶	۱۰/۴	۱۴/۸	۶۹/۶	کرمان
۱/۸	۴/۰	۱۲/۷	۳۷/۸	۲۳/۸	۱۹/۹	خراسان جنوبی
۵/۳	۶/۸	۸/۰	۲۰/۲	۲۳/۰	۳۶/۷	یزد
۰/۵	۰/۹	۲/۹	۹/۷	۱۶/۸	۶۹/۳	مجموع

همانند افت کمی استحصال از منابع آب زیرزمینی در دهه‌های اخیر، کیفیت این منابع نیز دستخوش تغییرات بوده و میانگین شوری (هدایت الکتریکی) این منابع به مرور زمان افزایش یافته است. بر اساس تحلیل آمار منابع آبی منتخب زیرزمینی سطح کشور (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۷)، میانگین شوری منابع آب زیرزمینی کشور طی دو دهه اخیر در حدود ۰/۴ دسی زیمنس بر متر (۴۰۰ میکروموس بر سانتیمتر) افزایش داشته است. اگرچه در یک مقیاس ملی و برای محصولات کشاورزی متحمل به شوری آب آبیاری، این افزایش خیلی محسوس به نظر نمی‌رسد، اما بررسی نقطه به نقطه شوری چاه‌ها و منابع آب کشاورزی، نشان‌دهنده افزایش قابل توجه شوری آب زیرزمینی در برخی مناطق کشور بوده که باعث افت قابل توجه عملکرد محصولات کشاورزی شده و یا به تغییر الگوی کشت و نوع فعالیت‌های کشاورزی در آن منطقه انجامیده است. برای بررسی دقیق‌تر این مسأله، از بین ۵۴۴ دشت کشور (محدوده مطالعاتی)،

ابتدا بحرانی‌ترین دشت هر استان که دارای بیشترین افزایش شوری آب زیرزمینی طی دوره آماری بود، شناسایی گردید. سپس میزان افزایش سالانه شوری آب زیرزمینی این دشت‌ها بر حسب میکرو زیمنس بر سانتی‌متر در سال، محاسبه گردید (شکل ۳). در این بین، استان‌های فارس (دشت حاجی‌آباد، کد ۲۷۲۱)، اصفهان (دشت کوهپایه - سگری، کد ۴۲۰۱)، آذربایجان شرقی (دشت شیرامین، کد ۳۰۱۷)، سیستان و بلوچستان (دشت هیرمند، کد ۵۲۰۴) و کرمان (دشت کویر سیرجان، کد ۴۴۱۸) دارای روند افزایشی شوری محسوس‌تری نسبت به سایر مناطق کشور بوده‌اند؛ بطوریکه افزایش سالانه شوری آب زیرزمینی این دشت‌ها به ترتیب ۷۶۲، ۳۳۶، ۳۱۹، ۲۹۱ و ۲۸۹ میکرو زیمنس بر سانتیمتر بوده که مقادیر قابل توجهی محسوب می‌شوند. همچنین، روند تغییرات شوری آب‌های زیرزمینی در استان‌های گیلان، مازندران و البرز صعودی نبوده و تغییرات قابل توجهی در طول دوره آماری نداشته‌اند.



شکل ۳- میزان افزایش سالانه شوری منابع آب زیرزمینی در بحرانی‌ترین دشت هر استان از نظر افزایش شوری بر حسب میکرو زیمنس بر سانتی‌متر در سال (استخراج از کموگراف‌های شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۷)

ب- تحلیل کیفیت (شوری) آب‌های سطحی

در خصوص کلاس‌های کیفی (شوری) آب‌های سطحی کشور و حجم منابع آبی موجود در هر کلاس شوری، آمار دقیقی در دسترس نبوده و یا آمار مذکور، تا حدودی قدیمی و یا موردی می‌باشند. به‌عنوان مثال، بررسی‌های انجام شده توسط Shati

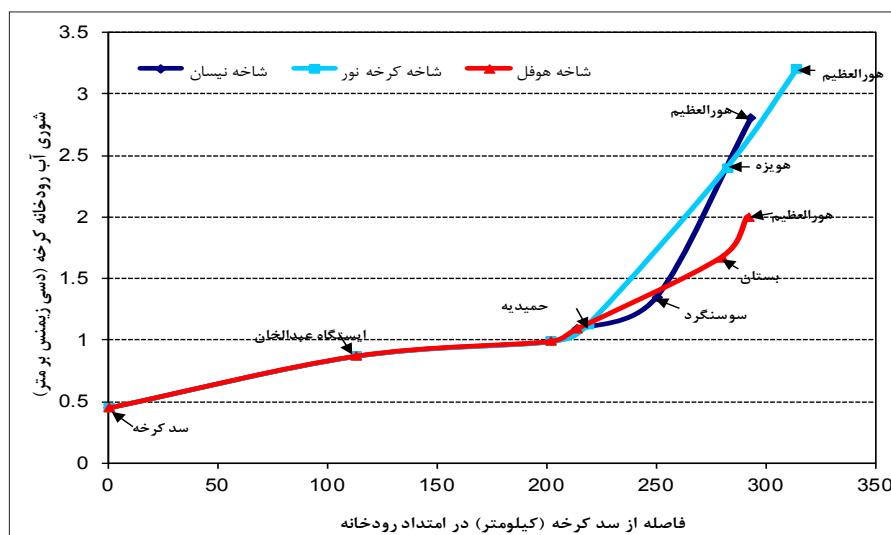
(۱۹۹۸) نشان داده که حجم آب جریان یافته در رودخانه‌هایی که مجموع املاح آنها بیشتر از ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر (حدود ۲/۳ دسی زیمنس بر متر) است، در حدود ۱۰/۷ میلیارد مترمکعب (معادل با ۱۱٪ از کل جریان‌های سطحی کشور) می‌باشد. اغلب این رودخانه‌ها در نواحی جنوب، جنوب‌غرب و فلات مرکزی ایران

کشاورزی مصرف می‌شوند که از نظر کیفی، تخمین زده می‌شود که ۲۰ درصد این منابع (بین ۳/۶ تا ۴/۴ میلیارد مترمکعب) دارای شوری‌های بالای ۲ دسی زیمنس بر متر بوده و درصد باقیمانده، شوری‌های کمتر از این میزان داشته باشند.

ج- دلایل شوری منابع آب سطحی و زیرزمینی

در خصوص دلایل شور شدن منابع آب‌های سطحی، می‌توان عامل زهکشی اراضی مجاور رودخانه‌ها و ورود جریان‌های زهکش به داخل رودخانه‌ها را به‌عنوان عامل اصلی قلمداد نمود (Ghassemi و همکاران، ۱۹۹۵). همچنین عبور رودخانه از گنبدهای نمکی یا سازندهای زمین‌شناسی شور و افت تدریجی کیفیت آب آنها در مسیر جریان به سمت پایین‌دست، از دیگر دلایل شوری منابع آب سطحی است. به‌عنوان مثال، شوری آب رودخانه کرخه در محل سد، کمتر از ۰/۵ دسی زیمنس بر متر است که پس از طی مسافت تقریبی ۳۰۰ کیلومتری در شاخه کرخه نور و در محل ورود به هورالعظیم، شوری آن به بالای ۳ دسی زیمنس بر متر می‌رسد (شکل ۴). بنابراین، تغییرات مکانی شوری آب رودخانه‌ها و افزایش شوری از بالادست به سمت پایین‌دست، از مهمترین مواردی است که بر مدیریت مصرف آب‌های سطحی در بخش کشاورزی و همچنین مدیریت زهکشی اراضی مجاور رودخانه‌ها تأثیرگذار بوده و توجه به آن‌ها ضروری می‌باشد.

جریان داشته‌اند. بر اساس محاسبات مذکور، حدود ۷۰ درصد از حجم آب‌های فوق‌الذکر (معادل با ۷/۵۴ میلیارد مترمکعب) در حوضه‌آبریز خلیج فارس و دریای عمان جریان دارد. حدود ۱۴/۲ درصد (۱/۵۳ میلیارد مترمکعب) در حوضه‌آبریز فلات مرکزی، حدود ۸/۸ درصد (۹۳۲ میلیون مترمکعب) در حوضه‌آبریز دریای مازندران، حدود ۶/۱ درصد (۶۵۸ میلیون مترمکعب) در حوضه‌آبریز دریاچه ارومیه و حدود ۰/۸ درصد (۸۲ میلیون مترمکعب) نیز در حوضه‌آبریز قره‌قوم جریان دارد. حوضه‌آبریز مرزی شرق فاقد آب‌های لب‌شور و شور سطحی گزارش شده است (نیریزی، ۱۳۷۷؛ عابدی و همکاران، ۱۳۸۱). قدرت‌ها (۱۳۷۸) نیز مجموع آورد سالانه رودخانه‌هایی با میانگین شوری بیشتر از ۳/۵ دسی زیمنس بر متر که شامل ۱۷ رودخانه فصلی و دائمی در آن زمان بوده‌اند را در حدود ۴/۷ میلیارد مترمکعب تخمین زده است. تخمین‌های دیگری نشان داده است که سالیانه در حدود ۶/۷ میلیارد مترمکعب آب‌های لب‌شور و شور در ۱۲ رودخانه مهم کشور جریان داشته‌اند (Shiati, ۱۹۹۸). به‌دلیل تغییر در میزان و الگوی بارش‌های سالانه کشور طی سال‌های اخیر و همچنین اقدامات و عملیات سازه‌ای انجام شده بر روی رودخانه‌ها و جریان‌های سطحی، شاید نتوان اعداد و ارقام فوق‌الذکر را به سال‌های اخیر نیز تعمیم داد؛ اما بررسی‌های صورت گرفته این تحقیق نشان می‌دهد که در حال حاضر بین ۱۸ تا ۲۲ میلیارد مترمکعب از منابع آب سطحی کشور در بخش



شکل ۴- روند افزایشی شوری آب رودخانه کرخه در امتداد حرکت از بالادست (در محل سد کرخه) به سمت پایین‌دست در شاخه‌های مختلف و ورود به هورالعظیم

تمامی عوامل موثر در بروز بحران آب کشور، در افت کیفی آب‌های زیرزمینی دهه‌های اخیر کشور نیز موثر بوده‌اند. رشد سریع و توزیع نامتناسب جمعیت در کشور، فعالیت‌های کشاورزی غیرکارآمد و سوء مدیریت در طرح‌های توسعه‌ای

در خصوص دلایل شور شدن منابع آب زیرزمینی، عوامل طبیعی نظیر توپوگرافی، زمین‌شناسی و میزان تغذیه توسط بارش و در کنار آن‌ها، سوء مدیریت برداشت آب از سفره‌ها، از مهمترین عوامل هستند. در این خصوص، می‌توان چنین گفت که تقریباً

از جمله این عواملاند (Madani, ۲۰۱۴). این عوامل همگی سبب برداشت‌های بی‌رویه منابع آب زیرزمینی در بسیاری از مناطق کشور شده و علاوه بر اینکه سطح ایستابی را به پائین‌تر از قبل برده است، باعث افت قابل توجه کیفیت آب استحصالی چاه‌ها در دهه‌های اخیر گردیده است. افت محسوس سطح ایستابی به میزان تقریبی سالانه ۲/۵ متر در آبخوان ارسنجان استان فارس، ۲/۳ متر در آبخوان صوغان کرمان، ۱/۷ متر در آبخوان هومند آسرد استان البرز، ۱/۵ متر در آبخوان رشتخوار خراسان رضوی، ۱/۴ متر در آبخوان کبودرآهنگ همدان و ۱/۲ متر در آبخوان مهیار شمالی استان اصفهان، از جمله موارد قابل توجه افت سطح ایستابی در دهه‌های اخیر بوده است.

د- اثرات شوری بر افت عملکرد محصولات کشاورزی

شوری یکی از مهمترین تنش‌های محیطی است که از طریق ایجاد فشار اسمزی، ایجاد سمیت ویژه یونی و بهم‌زدن تعادل تغذیه‌ای، رشد و عملکرد گیاهان را محدود می‌کند (همایی،

۱۳۸۱). تنش شوری در تمامی مراحل رشد، بر گیاه اثرگذار است، اما ممکن است حساسیت گیاه در یک مرحله از رشد نسبت به مرحله دیگر متفاوت باشد. تحمل گیاهان نسبت به شوری نه تنها در بین انواع و گونه‌های مختلف گیاهی و مراحل مختلف رشد متغیر است، بلکه تحت شرایط مختلف مزرعه‌ای و محیطی (نظیر ویژگی‌های خاک مزرعه، میزان تبخیر، بارندگی و دمای هوا) و همچنین مدیریتی (نظیر شیوه و حجم آب آبیاری، نحوه و میزان آبشویی املاح خاک، روش کاشت و ...) تغییر می‌کند. به همین دلیل است که در طبقه‌بندی کیفیت آب کشاورزی، می‌بایست تأثیر شوری آب آبیاری بر شوری خاک نیز مد نظر باشد و برای این موضوع عواملی نظیر نوع گیاه، شرایط محیطی و مدیریت آبیاری هم در نظر گرفته شوند. جدول (۳) طبقه‌بندی گیاهان مختلف بر اساس میانگین شوری عصاره اشباع خاک ناحیه ریشه (EC_e) را نشان می‌دهد که توسط کمیته بین‌المللی آبیاری و زهکشی با همکاری کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران تدوین شده است.

جدول ۳- طبقه‌بندی گیاهان مختلف بر اساس میزان شوری عصاره اشباع خاک در شرایط ایران

هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_e) بر حسب dS/m	میزان حساسیت گیاه به شوری و افت عملکرد ناشی از آن	طبقه بندی خاک مزرعه بر اساس شوری
کمتر از ۲	اثر شوری بر عملکرد گیاه، ناچیز و قابل چشم‌پوشی است.	غیر شور
۲ تا ۴	برای عملکرد گیاهان حساس به شوری، محدودیت ایجاد خواهد کرد.	شوری کم
۴ تا ۸	برای عملکرد گیاهان حساس به شوری، محدودیت ایجاد خواهد کرد.	شوری متوسط
۸ تا ۱۶	تنها گیاهان متحمل به شوری، دارای عملکرد قابل قبول خواهند بود.	شوری زیاد
بیشتر از ۱۶	تنها تعداد محدودی از گیاهان که متحمل زیاد به شوری هستند، دارای عملکرد اقتصادی خواهند بود.	شوری خیلی زیاد (شدید)

شوری خاک یک مزرعه عمدتاً تحت تأثیر شوری آب آبیاری و از آن مهمتر، کسر آبشویی آن مزرعه است. جزء یا کسر آبشویی (LF)^۲ طبق تعریف، بخشی از کل آب مصرفی است که مازاد بر نیاز آبی گیاه بوده و پس از آبیاری ضمن عبور از ناحیه ریشه، املاح موجود در این ناحیه را شستشو و به اعماق پایین‌تر هدایت می‌فاید. در واقع، کسر آبشویی به عنوان کلید استفاده موفق و پایدار آب شور در اراضی فاریاب شناخته می‌شود (Shalhevet, ۱۹۹۴). در روش ارائه شده توسط Ayers و Westcot (۱۹۸۹) می‌توان برای هر کسر آبشویی مشخص، متوسط شوری عصاره اشباع خاک منطقه ریشه (EC_e) را به

کمک شوری آب آبیاری (EC_{iw}) تخمین زد. به‌عنوان مثال، در کسر آبشویی ۱۵ تا ۲۰ درصد، شوری عصاره اشباع خاک در حدود ۱/۵ برابر شوری آب آبیاری خواهد بود. بدیهی است که با افزایش کسر آبشویی، شوری خاک به شوری آب آبیاری نزدیک خواهد شد. در روش مذکور، کمتر شدن شوری عصاره اشباع خاک از شوری آب آبیاری، تنها در کسرهای آبشویی ۳۰ درصد و بیشتر رخ خواهد داد (Westcot و Ayers, ۱۹۸۹). توزیع املاح در خاک نیز تابع کسر آبشویی است. به‌طوریکه در شوری‌های یکسان آب آبیاری، هر چه کسر آبشویی بیشتر شود، شیب افزایش غلظت املاح خاک با افزایش عمق، کمتر می‌شود.

کمبود آب، می‌تواند عملیات آبخوایی را با سهولت و بازدهی بیشتری انجام دهد. حتی در مورد خاک‌های با نرخ نفوذپذیری کم (خاک‌های سنگین) که افزایش عمق آبیاری با هدف تأمین آبخوایی، منجر به کاهش تهویه خاک و خسارت به گیاه خواهد شد، آبخوایی را می‌توان به خارج فصل رشد موکول کرد و یا اینکه همزمان با تواتر بیشتر آبیاری‌ها، عمق آب در هر نوبت را کاهش داد. استفاده از آبیاری بارانی با شدت پاشش کمتر از نرخ نفوذپذیری خاک و یا بکارگیری روش‌های موضعی به منظور ایجاد جریان غیراشباع آب در خاک، می‌تواند با مصرف حجم آب کمتر، به کنترل بهتر شوری خاک کمک کند (Oster و همکاران، ۱۹۷۲). همچنین، در شرایط کمبود آب و عدم تأمین نیاز آبخوایی با روش‌های متداول، کاهش سطح خیس شده زمین با هدف افزایش عمق آبیاری در هر نوبت بسیار مفید و کاربردی است. شخم‌زدن سطح خاک باغات پس از هر نوبت آبیاری از دیگر عملیات مفید و کنترل‌کننده شوری خاک مزرعه به‌ویژه در مناطق خشک است که در بین کشاورزان فلات مرکزی به‌ویژه باغداران پسته هنوز هم مرسوم است. با توجه به حذف ارتباط موئینگی خاک پس از هر شخم، تبخیر کمتری از سطح خاک صورت گرفته و به تبع آن، املاح کمتری در سطح زمین تجمع پیدا می‌کنند. همچنین، این اقدام به کاهش درز و شکاف خاک‌های سنگین و جلوگیری از عبور آب در بین حفرات درشت خاک در حین آبیاری بعدی کمک می‌کند و به افزایش راندمان آبخوایی می‌انجامد. بدیهی است که ایجاد پایلوت‌های ملی و منطقه‌ای ترویجی در زمینه معرفی و انتقال تجارب موجود در زمینه مدیریت و کنترل شوری مزرعه می‌تواند به ظرفیت‌سازی و آموزش بهتر بهره‌برداران بخش کشاورزی کمک نموده و اثربخشی این راهکارها را مضاعف نماید.

پی‌نوشت

1-Irrigated Agriculture

2-Anthropogenic (Secondary)

3-Leaching Fraction

منابع

بنائی، م.ج.، مومنی، ع.، بای بوردی، م. و ملکوتی، م.ج. ۱۳۸۳. خاک‌های ایران: تحولات نوین در شناسایی، مدیریت و بهره‌برداری. موسسه تحقیقات خاک و آب. ۴۸۲ ص.
رنجبر، غ.ج.، رحیمیان، م.ج. و هاشمی‌نژاد، ی. ۱۳۹۳. دستورالعمل فنی بهبود تولید گندم در شرایط شور. مرکز ملی تحقیقات

کشاورزی آبی در ایران دارای مساحت تقریبی ۷/۸ میلیون هکتار بوده که حدود ۷۱ درصد از حجم مصرف منابع آب تجدیدشونده اعم از سطحی و زیرزمینی را به خود اختصاص داده است. در یک مقیاس ملی، متوسط هدایت الکتریکی چاه‌های کشاورزی در حدود ۲ دسی زیمنس بر متر بوده و از نظر حجمی، حدود ۳۱٪ از آب‌های زیرزمینی (معادل با ۱۳/۸ میلیارد مترمکعب) و حدود ۲۰٪ از آب‌های سطحی (معادل با ۳/۶ تا ۴/۴ میلیارد مترمکعب) مصرفی در بخش کشاورزی دارای شوری‌های بالاتر از میانگین می‌باشند. همچنین، در حال حاضر میانگین شوری منابع آب زیرزمینی کشاورزی در ۱۱ استان کشور (شامل بوشهر، یزد، خراسان جنوبی، هرمزگان، قم، اصفهان، سمنان، سیستان و بلوچستان، فارس، خراسان رضوی و کرمان) برابر یا بیشتر از میانگین کشوری است. به‌عنوان مثال، متوسط شوری آب چاه‌های کشاورزی در استان‌های یزد، خراسان جنوبی و بوشهر به ترتیب ۵/۲، ۵/۲ و ۵/۶ دسی زیمنس بر متر می‌باشد. تحت چنین شرایطی، هم آب و هم املاح در هنگام آبیاری به خاک مزرعه اضافه می‌شوند. لذا مدیریت نامناسب آب‌های شور موجب شورشدن تدریجی خاک‌های زراعی کشاورزی، ناپایداری و کاهش قابل توجه تولید و افت شاخص بهره‌وری خواهد شد. این مسأله، ضرورت توجه به پدیده شوری در بخش کشاورزی را گوشزد می‌نماید. پدیده‌ای که سالانه باعث خسارات محسوس و غیرمحسوس زیادی به این بخش می‌گردد. اما در کنار این مسأله، راهکارهایی نیز برای کنترل و مدیریت شوری منابع آب و خاک کشاورزی در مقیاس‌های مزرعه‌ای وجود دارند که می‌توانند افت تولید و خسارات وارده به کشاورزان را کم کنند. در یک تقسیم‌بندی کلی، این راهکارها در قالب عملیات فیزیکی، شیمیایی، هیدرولوژیکی و بیولوژیکی قابل توصیه هستند. تسطیح مناسب سطح خاک به منظور ایجاد یکنواختی در توزیع آب و جلوگیری از تجمع موضعی املاح در نقاط مرتفع زمین، بهینه‌سازی سیستم و زمان‌بندی مناسب آبیاری با هدف کاهش تنش‌های خشکی وارده به گیاه در شرایط شور، اختلاط آب‌های شور با منابع آبی باکیفیت‌تر، توجه به زمان و شیوه کوددهی و تغذیه گیاه، توجه به شیوه و محل کاشت بذر یا نشاء در زمین، افزایش تراکم کاشت در شرایط شور و استفاده از ارقام یا الگوی کشت گیاهی مناسب، می‌تواند در مدیریت و کنترل شوری و کاهش خسارات شوری به کشاورزان موثر باشد (رنجبر و همکاران، ۱۳۹۳؛ رنجبر و همکاران، ۱۳۹۴؛ صادق‌زاده و کشاورز، ۱۳۷۹). همچنین، آبخوایی در فصول سرد بجای فصول گرم و یا در خارج از فصل رشد گیاه در شرایط

- FAO. 2012. Status and New Developments on the Use of Brackish Water for Agricultural Production in the Near East. United Nations Food and Agriculture Organization. Regional Office for the Near East (RNE). 88 pp.
- Ghassemi F., Jakeman A.J. and Nix H.A. 1995. Salinisation of Land and Water Resources: Human Causes, Extent, Management and Case Studies. CAB International Publishing, Wallingford, UK., Pp. 544. ISBN: 0851989063.
- Madani K. 2014. Water management in Iran: what is causing the looming crisis?. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4): 315-328.
- Oster J.D., Willardson L.S. and Hoffman G.J. 1972. Sprinkling and ponding techniques for reclaiming saline soils. *Trans. ASAE*, 15(6): 1115-1117.
- Qadir M., Qureshi A.S. and Cheraghi S.A.M. 2007. Extent and characterisation of salt-affected soils in Iran and strategies for their amelioration and management. *Land Degradation and Development*, 19 (2): 214-227.
- Qadir M., Quillérrou E., Nangia V., Murtaza G., Singh M., Thomas R. J., Drechsel P. and Noble A. D. 2014. Economics of Salt-induced Land Degradation and Restoration. *Natural Resources Forum*, 38: 282-295.
- Shalhevet J. 1994. Review article: using water of marginal quality for crop production: major issues. *Agricultural Water Management*, 25: 233-269.
- Shiati K. 1998. Brackish water as a source of irrigation: behavior and management of salt-affected reservoirs (Iran). In: 10th Afro-Asian Conf. Bali, Indonesia.
- Siadat H., Bybordi M. and Malakouti M.J. 1997. Salt-affected soils of Iran: a country report. A paper presented in the International symposium on "Sustainable Management of Salt Affected Soils in the Arid Ecosystem", Cairo, Egypt.
- شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی، شماره ثبت: ۴۶۶۷۴/۱۳۹۳.
- رنجبر، غ.ج.، شیران، م.، رحیمیان، م.ج. و هاشمی‌نژاد، ی. ۱۳۹۴. تأثیر یافته‌های تحقیقاتی بر بهبود عملکرد گندم در اراضی پایین‌دست حوزه کرخه، اولین همایش ملی بررسی ابعاد اجرای طرح توسعه کشاورزی ۵۵۰ هزار هکتاری، اهواز، ایران.
- شرکت مدیریت منابع آب ایران. ۱۳۹۷. داده‌های کیفیت (شوری) منابع آب زیرزمینی. سامانه ارائه آمار و گزارش‌های مطالعات پایه منابع آب، <https://www.wrm.ir>.
- صادق‌زاده، ک. کشاورز، ع. ۱۳۷۹. توصیه‌هایی بر بهینه‌سازی کارایی مصرف آب در اراضی زراعی کشور. انتشارات سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.
- عابدی، م.ج.، نیری‌سی، س.، ابراهیمی بی‌رنگ، ن.، ماهرانی، م.، مهرداد، م.، خالدی، ه.، چراغی، س.ع.م. ۱۳۸۱. استفاده از آب شور در کشاورزی پایدار. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. ۳۳۵ ص.
- عباسی، ف.، عباسی، ن.، توکلی، ع.ر. ۱۳۹۷. بهره‌وری آب در بخش کشاورزی؛ چالش‌ها و چشم‌اندازها. آب و توسعه پایدار، ۴(۱): ۱۴۴-۱۴۱.
- قدرت‌نما، ق. ۱۳۷۸. منابع، مصارف و نیازهای آبی در ایران: حال و آینده. آب و توسعه (فصلنامه امور آب وزارت نیرو)، ۷(۲ - ۳): ۴۶-۲۱.
- نیری‌سی، س. ۱۳۷۷. نگرشی بر استفاده از آب‌های شور و لب‌شور در کشت آبی. مجموعه مقالات نهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.
- هاشمی‌نژاد، ی. ۱۳۹۵. بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر شور شدن اولیه و ثانویه خاک. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، مرکز ملی تحقیقات شوری. ۱۳۰ ص.
- همایی، م. ۱۳۸۱. واکنش گیاهان به شوری. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. چاپ اول. تهران، ایران.
- Ayers R.S. and Westcot D.W. 1989. Water quality for agriculture. FAO irrigation and drainage paper (No. 29). FAO, Rome, Italy.
- Cheraghi S.A.M. 2004. Institutional and scientific profiles of organizations working on saline agriculture in Iran. In *Prospects of Saline Agriculture in the Arabian Peninsula: Proceedings of the International Seminar on Prospects of Saline Agriculture in the GCC Countries 18-20 March 2001, Dubai, United Arab Emirates*, Taha FK, Ismail S, Jaradat A (eds). Amherst Scientific Publishers: mherst, MA; 399-412.

Investigating the Appropriate Method of Sludge Dewatering Technology in Wastewater Treatment Plants Using Analytical Hierarchy Process (Case Study: Wastewater Treatment Plant in the South of Tehran)

F. Golbabaee Kootenaei^{1*}, N. Mehrdadi², T. Taghizade Firozjaee³, A. Fahimi Bandpey⁴, H. Valehi Reikande⁵

1,2- Postdoctoral Researcher and Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Iran. 3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Iran. 4- MSc Graduate, Department of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran. 5- PhD Student, Department of Environmental Engineering, Kish International Campus, University of Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: fgolbabaee@ut.ac.ir)

Received: 14-05-2022

Revised: 10-08-2022

Accepted: 19-08-2022

Available Online: 21-12-2022

بررسی روش مناسب آبگیری لجن در تصفیه خانه های فاضلاب با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

(مطالعه موردی: تصفیه خانه فاضلاب جنوب شهر تهران)

فرشاد گلپایانی کوتنائی^{۱*}، ناصر مهرداد^۲، طاهره تقی زاده فیروزجایی^۳، عطیه فهیمی بندپی^۴، هادی والهی ریکانده^۵

۱، ۲- به ترتیب پژوهشگر پس دکتری و استاد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، ایران. ۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران. ۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، ایران. ۵- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی محیط زیست، پردیس بین المللی کیش، دانشگاه تهران، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: fgolbabaee@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

Abstract

In recent decades, the management and treatment of sewage and sludge dewatering process have become crucial due to their high nutrient content. However, choosing the right technology in this area is a big challenge due to the complexities and the existence of many uncertainties. In this article, an analytical hierarchy process is used as a decision-making tool to choose the appropriate dewatering method in the southern Tehran treatment plant, in which the criteria structure and the evaluation process are defined by describing several possible options for sludge dewatering to be compared and weighted. The results were analyzed and evaluated using Expert choice software. According to the results, the belt filter press is the best and most appropriate technology for sewage sludge dewatering among pressure and belt filter press, lagoon, centrifuge, and sludge drying beds. Finally, validation had been done based on the sensitivity analysis method, which shows the effect of changes in input parameters on the results and was carried out for technical, economic, environmental, and management criteria, and the sensitivity of the options to the change in the weight of the main criteria was determined and the results showed that the most sensitivity in the economic criteria refers to the lagoon process, in the technical criteria refers to the centrifuge process, in the environmental criteria refer to the centrifuge process, and in the management criteria refers to the belt filter press process. The results show that this method, due to its simplicity and adaptability to different situations and regions, can be considered at the national level for different decision-makers in the field of selecting processes in water and wastewater treatment.

Keywords: Dewatering, Treatment, Sewage, Sludge, Analytical Hierarchy Process.

چکیده

در چند دهه اخیر مدیریت، تصفیه و فرآیند آبگیری لجن فاضلاب به دلیل محتوای بالای مواد مغذی اهمیت زیادی پیدا نموده است. با این حال، انتخاب فناوری مناسب در این زمینه به دلیل پیچیدگی ها و وجود عدم قطعیت های زیاد، یک چالش بزرگ است. در این مقاله از یک فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به عنوان یک ابزار تصمیم گیری برای انتخاب روش مناسب آبگیری در تصفیه خانه فاضلاب جنوب شهر تهران استفاده می شود که در آن ساختار معیارها و فرآیند ارزیابی با توصیف چند گزینه ممکن برای آبگیری لجن تعریف شده است تا نسبت به یکدیگر مقایسه و وزن دهی شوند. نتایج با استفاده از نرم افزار Expert choice بررسی و ارزیابی شد. مطابق با نتایج، بهترین و مناسب ترین فناوری برای آبگیری لجن فاضلاب از بین فناوری های فیلتر پرس فشاری و نواری، لاگون، سانتریفیوژ و بسترهای لجن خشک کن، فرآیند فیلتر پرس نواری برآورد شده است. در نهایت، صحت سنجی براساس روش تحلیل حساسیت که اثر تغییرات پارامترهای ورودی بر روی نتایج را نشان می دهد، برای معیارهای فنی اقتصادی، محیط زیستی و مدیریتی انجام گرفت و حساسیت گزینه ها نسبت به تغییر وزن معیارهای اصلی تعیین شد و نتایج نشان داد بیشترین حساسیت در معیار اقتصادی متوجه فرآیند لاگون، در معیار فنی متوجه فرآیند سانتریفیوژ، در معیار محیط زیستی متوجه فرآیند سانتریفیوژ و در معیار مدیریتی متوجه فرآیند فیلتر پرس نواری می شود. نتایج نشان داد، این روش به دلیل سادگی و قابلیت تطبیق آن با موقعیت ها و مناطق مختلف، در سطح ملی برای تصمیم گیرهای مختلف در زمینه انتخاب فرآیندها در تصفیه آب و فاضلاب می تواند در نظر گرفته شود.

واژه های کلیدی: آبگیری، تصفیه، لجن، فاضلاب، تحلیل سلسله مراتبی.

گری ارزیابی و مقایسه شده و بهینه‌ترین گزینه تصفیه انتخاب شده است (Zeng و همکاران، ۲۰۰۷). یک مطالعه اخیر رویکردی را پیشنهاد می‌کند که تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان و روش‌های چند معیاره مانند Fuzzy TOPSIS و AHP را برای بهینه‌سازی نگهداری سیستم‌ها ترکیب می‌کند (Carpitella و همکاران، ۲۰۱۸). این روش، رویکردی موثر و عملیاتی بوده که می‌تواند تصمیمات غیرساختاری و پیچیده را در نظر بگیرد (Karimi و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین عملکرد بسیار خوبی در مسائل وزن‌دهی و رتبه‌بندی گزینه‌ها دارد (Goodwin و همکاران، ۲۰۱۹). این روش امکان انجام ارزیابی معیارهای کمی و کیفی را دارد و بر مبنای مقایسه زوجی بنا شده است، همچنین تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی اجازه ردیابی تصمیم‌گیری صحیح و تضمین کیفیت ارائه شده را توسط شاخص‌های سازگاری می‌دهد (Tscheikner-Gratl و همکاران، ۲۰۱۷؛ Haddad و همکاران، ۲۰۲۰).

انتخاب این روش بر اساس ویژگی‌های موضوع مورد بررسی و همچنین مزایا و معایب دیگر روش‌های تصمیم‌گیری بوده است. استفاده از AHP به‌جای دیگر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره به دلایل ذیل می‌باشد (Mahmoodzadeh و همکاران، ۲۰۰۷).

- در این روش، معیارهای کمی و کیفی در تصمیم‌گیری استفاده می‌شود و تنها مدل تصمیم‌گیری چند معیاره است که می‌تواند سازگاری قضاوت‌های تصمیم‌گیرندگان را اندازه‌گیری نماید.

- مقایسه زوجی در روش AHP به تصمیم‌گیرندگان اجازه می‌دهد وزن معیارها و یا رتبه گزینه‌ها را از ماتریس‌های مقایسه زوجی استخراج کنند و تعداد زیادی از معیارها می‌تواند در نظر گرفته شود.

- AHP به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند که جنبه‌های بحرانی مساله را به داخل یک ساختار سلسله‌مراتبی وارد نموده و مطابق با مساله، ساختار سلسله‌مراتبی انعطاف‌پذیری بسازد (Shakeri و همکاران، ۲۰۱۸).

همچنین برای تعیین میزان تأثیرگذاری وزن‌دهی معیارها بر اولویت‌بندی گزینه‌ها از آنالیز حساسیت استفاده شد. به‌طورکلی آنالیز حساسیت ساده‌ترین روش در تحلیل عدم قطعیت در تصمیم‌گیری می‌باشد و برای شناسایی پارامترهایی از مدل به‌کار می‌رود که بیشترین تأثیر را بر خروجی‌های پیش‌بینی شده دارند. در این روش، تأثیر ناشی از تغییر یک معیار در خروجی تعیین می‌شود و برای هر پارامتر، حساسیت‌های موضعی در نقاط مختلف واقع در بازه کلی تغییرات آن بررسی می‌شود (Ananda و همکاران، ۲۰۰۷). تنوع تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و لجن، به‌خصوص از نظر ظرفیت و شرایط خاص محلی اجازه نمی‌دهد در انتخاب فرآیند تصفیه یک نتیجه و تصمیم کلی مطرح شود که در تمام موارد قابل اجرا و کاربردی باشد، اما امکان دارد از نظر اولویت در انتخاب فرآیند تصفیه، نکاتی ملاک عمل قرار گیرد و در بیشتر تصفیه‌خانه‌ها قابل

لجن فاضلاب مخلوط ناهمگن پیچیده‌ای از میکروارگانیسم‌ها، مواد آلی هضم نشده مانند کاغذ، باقیمانده‌های گیاهی یا مدفوعی، مواد معدنی و رطوبت می‌باشد که طی مراحل مختلف تصفیه فاضلاب تولید می‌شود (Tyagi و همکاران، ۲۰۱۳). در اتحادیه اروپا، تولید لجن فاضلاب که در تصفیه اولیه، ثانویه و پیشرفته در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب تولید می‌شود، به طور متوسط روزانه ۹۰ گرم به ازای هر نفر است (Đurđević و همکاران، ۲۰۲۰). انتظار می‌رود در دهه آینده با گسترش تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، حجم و میزان فاضلاب تشکیل شده نیز به‌صورت پیوسته با افزایش جمعیت متصل به شبکه جمع‌آوری فاضلاب، ساخت تصفیه‌خانه‌های جدید و ارتقای تصفیه‌خانه‌های موجود به دلیل وضع قوانین محلی سخت‌گیرانه‌تر جهت پساب، افزایش یابد. یکی از موارد دارای اهمیت قبل از طراحی و اجرای هر تصفیه‌خانه فاضلاب و لجن، انتخاب بهترین فرآیند تصفیه است. به‌طور معمول، در برخی از کشورهای در حال توسعه، ارزیابی گزینه‌های تصفیه تنها براساس معیار اقتصادی صورت می‌گیرد (Đurđević و همکاران، ۲۰۲۰). در سال‌های گذشته، مطالعات و مدل‌های بهینه‌سازی زیادی برای یافتن بهترین گزینه تصفیه فاضلاب نمایان شده که بیشتر آن‌ها تنها هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری را مورد توجه قرار داده‌اند. اما، گزینه با حداقل هزینه، ممکن است بهترین گزینه نباشد. انتخاب بهترین فرآیند تصفیه، معمولاً پیچیده بوده و عدم قطعیت‌های زیادی دارد. گزینه‌های فنی، اقتصادی، محیط‌زیستی و مدیریتی در انتخاب بهترین گزینه تأثیرگذار می‌باشد (Akhoondi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Peniwati و همکاران، ۲۰۰۷).

راه‌های مختلفی برای ادغام ارزیابی عوامل و ابعاد مختلف و همچنین تعیین نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها وجود دارد. برای ادغام این ابعاد، کارایی و استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره ثابت شده و همواره مورد توجه بوده است. فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی یک روش چند معیاره که به خوبی تثبیت شده است، عوامل را در ساختارهای سلسله‌مراتبی سازماندهی می‌کند (Wind و Saaty، ۱۹۸۰). کاربردهای AHP شامل بررسی چگونگی برداشت‌های ذهنی و نگاه ذینفعان برای مدیریت ریسک و مصرف نهایی آب بازیافتی (Goodwin و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین برای مناسب بودن استفاده از فاضلاب تصفیه شده شهری به‌عنوان آبیاری می‌باشد (Zolfaghary و همکاران، ۲۰۲۱). در مطالعه چهار گزینه تصفیه یک تصفیه‌خانه فاضلاب شهری، از نقطه نظر اقتصادی، فنی و معیارهای مدیریتی شامل: هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، زمین مورد نیاز، حذف نیترژن و فسفر، اثرات دفع لجن، پایداری بهره‌برداری تصفیه‌خانه، تکنولوژی مطلوب و مهارت‌های پرسنلی، با استفاده توأمان از AHP و آنالیز وابستگی

استفاده باشد. باتوجه به اینکه امروزه سیستم‌های تصفیه فاضلاب و لجن پساب با هر درجه از تصفیه را تولید می‌کنند، مساله اساسی در انتخاب فرآیندهای تصفیه، تصمیم‌گیری در مورد مناسبترین گزینه تصفیه بر مبنای مسائل اقتصادی و محیط‌زیستی به‌منظور هدایت صحیح سرمایه‌های ملی و جلوگیری از اتلاف منابع مالی است. امروزه باتوجه به توسعه سریع فعالیت‌های صنعتی، تصفیه پساب‌های تولیدی، نه تنها به‌عنوان یک راهکار اساسی در حفاظت کیفی منابع آب سطحی و زیرزمینی محسوب می‌شود، بلکه پساب تصفیه شده آن نیز به‌عنوان یک منبع آبی جهت بازچرخانی استفاده می‌شود، همچنین برای آبیاری فضای سبز و کشاورزی اهمیت بالایی دارد (Wondim و همکاران، ۲۰۱۸).

اگرچه لجن فاضلاب تنها ۱ تا ۲ درصد حجم فاضلاب تصفیه شده را تشکیل می‌دهد اما مدیریت آن بسیار پیچیده است و هزینه‌های تصفیه آن تقریباً ۲۰ تا ۶۰ درصد از کل هزینه‌های عملیاتی تصفیه‌خانه است. برای کاهش هزینه تصفیه لجن از روش‌های کاهش حجم لجن استفاده می‌شود که می‌تواند هزینه‌های حمل و نقل را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. کارآمدترین روش برای به حداقل رساندن حجم لجن، آبگیری است. این فرآیند منجر به کاهش رطوبت از ۷۵٪ به ۹۸٪ می‌شود که معادل افزایش محتوای جامد از ۲٪ به ۲۵٪ است. همچنین حجم لجن آبگیری شده که باید برای مرحله دیگر تصفیه منتقل شود ۱۲ برابر کمتر از حجم فرآوری نشده خواهد بود (Andreoli و همکاران، ۲۰۰۷).

هدف از این مطالعه، بررسی و انتخاب بهترین و مناسبترین فناوری برای آبگیری لجن فاضلاب برای تصفیه‌خانه جنوب شهر تهران می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه جهت تعیین بهترین و مناسبترین فناوری برای آبگیری لجن فاضلاب، معیارهای اصلی فنی، اقتصادی، محیط‌زیستی و مدیریتی به همراه زیرمعیارهای مربوط به آن بر اساس روش AHP تعیین شد. با داشتن نتایج برداشت شده از پرسشنامه فراهم‌شده توسط کارشناسان و خبرگان حوزه تصفیه فاضلاب و لجن، وزن دهی معیارها در روش AHP و همچنین آنالیز حساسیت معیارها با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice برای تعیین بهترین گزینه برای آبگیری لجن انجام شد.

ماهیت پژوهش حاضر تحلیلی تطبیقی پیمایشی است. به‌این‌منظور باتوجه به اهداف مختلفی که از فرآیند تصفیه انتخابی انتظار می‌رود از جمله: پتانسیل بالا در مقابل نوسانات کمی و کیفی فاضلاب ورودی، تولید پساب با کیفیت مناسب جهت استفاده مجدد و دستیابی به استانداردهای محیط زیستی، تولید لجن مناسب، دارا بودن حداقل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و

بهره‌برداری و حداقل انرژی مصرفی، انتخاب فرآیند تصفیه بهینه باید با دخالت معیارهای مختلف، متناسب با وزن و اهمیت نسبی آن‌ها و با کمک گرفتن از مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره انجام شود.

مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، انتخاب‌گر بودند و به‌منظور انتخاب مناسبترین گزینه از بین گزینه‌های موجود به‌کار می‌روند. در تصمیم‌گیری چند معیاره از چندین شاخص استفاده می‌شود و شامل مراحل شناسایی معیارها، وزن‌دهی، انتخاب گزینه برتر با استفاده از یک روش MADM و انتخاب گزینه نهایی است.

۱- شناسایی معیارها

انتخاب معیارها و شاخص‌های مناسب مهمترین اثر را بر رتبه‌بندی نهایی دارد. بنابراین انتخاب شاخص‌های مناسب برای تصمیم‌گیری، یکی از مهمترین مراحل تصمیم‌گیری چند معیاره است. در مراجع، معیارهای مختلفی برای انتخاب فرآیند بهینه تصفیه فاضلاب و لجن مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این معیارها: هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، میزان انرژی مصرفی، پرسنل تخصصی مورد نیاز، زمین مورد نیاز، کمیت و کیفیت فاضلاب و لجن ورودی، قابلیت شوک‌پذیری، درجه تصفیه مورد نیاز، شرایط اقلیمی و محلی، قابلیت اجرای فرآیند، اطمینان از عملکرد دائمی تصفیه‌خانه، کارایی، قابلیت استفاده مجدد از یک لجن تولیدی و پساب تصفیه شده، استانداردهای محیطی، ایمنی و غیره قابل ذکر است. به‌منظور شناسایی فرآیندهای آبگیری لجن و بررسی عملکرد آن‌ها در شهر تهران، درکنار بازدید میدانی و بررسی کارایی سیستم‌ها، از پرسشنامه استفاده شد. معیارهای انتخاب بر اساس واقعیت‌های موجود در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری تهران مشخص می‌شود. در این مطالعه، معیارهای اصلی مقایسه روش‌های آبگیری لجن معرفی خواهد شد و ارزیابی معیارها، بر اساس تجربیات حاصل شده از طراحی، اجرا و بهره‌برداری فرآیندها در شهرهای مختلف ایران و جهان و استفاده از نظرات متخصصان و خبرگان این حوزه صورت می‌گیرد.

۲- تعیین وزن معیارها

باتوجه به تنوع پارامترهای تأثیرگذار، انتخاب فرآیند بهینه پیچیده و مشکل می‌باشد. وزن‌دهی یکی از مهمترین و مشکل‌ترین مراحل تصمیم‌گیری چند معیاره بوده که می‌تواند عدم قطعیت قابل توجهی در فرآیند تصمیم‌گیری ایجاد نماید (Hamed و همکاران، ۲۰۱۲). روش‌های مختلفی برای برآورد وزن نسبی شاخص‌ها وجود دارد. در این تحقیق، از روش پرسشنامه‌ای که توانایی در نظر گرفتن ارجحیت‌های ذهنی تصمیم‌گیر را در محاسبه وزن شاخص‌ها دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳- وزن دهی معیارها

در روش AHP از قضاوت های کارشناسی استفاده می شود و مقایسه های زوجی را برای اندازه گیری اینکه چگونه یک گزینه نسبت به سایر گزینه ها مطابق با معیارهای تعیین شده در اولویت می باشد، به کار می برند (Wind و Saaty، ۱۹۸۰). در این روش با استفاده از ساختار سلسله مراتبی معیارها، کاربران اجازه تصمیم گیری برای تعیین بهترین گزینه را خواهند داشت. برای محاسبه وزن معیارها، پس از تعیین ماتریس های مقایسه زوجی، با استفاده از مقیاس داوری که در جدول (۱) آورده شده است، می شود معیارها را براساس سطوح نه گانه تعریف شده مقایسه کرد (Saaty، ۲۰۰۸؛ Ishizaka و Labib، ۲۰۰۷). همچنین این روش، تصمیم گیری فردی و گروهی را در بر می گیرد (Koulinas و همکاران، ۲۰۱۹). به این ترتیب می توان از افراد مختلف در مورد مقایسه معیارها پرسش نموده و بعد به روش مناسب نتایج را جمع بندی نمود.

جدول ۱- مقدار عددی برتری ها برای مقایسه زوجی

عبارت زبانی برتری ها	مقدار عددی
برتری کامل	۹
برتری بین ۷ و ۹	۸
برتری خیلی زیاد	۷
برتری بین ۵ و ۷	۶
برتری زیاد	۵
برتری بین ۳ و ۵	۴
برتری کم	۳
برتری بین ۱ و ۳	۲
برتری برابر	۱

معیار اصلی برای پذیرفتن مقایسه زوجی این است که مقایسه ها

باهم سازگار باشند، برای این منظور باید نرخ ناسازگاری محاسبه شود. نرخ ناسازگاری نشان می دهد، تا چه اندازه می توان به داده های گردآوری شده از دیدگاه هر کارشناس اعتماد کرد. شاخص ناسازگاری^۲ (I.I.) به صورت ذیل تعریف می شود:

$$I.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (۱)$$

در این رابطه، $\lambda_{\max}$ بزرگترین مقدار ویژه و n تعداد معیارها می باشد. برای هر ماتریس، حاصل تقسیم شاخص ناسازگاری (I.I.) بر شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی (I.R.R.) هم بعدش معیار مناسبی برای قضاوت در مورد ناسازگاری می باشد که آن را نرخ ناسازگاری (I.R.) می نامند.

$$I.R. = I.I. / I.R.R. \quad (۲)$$

نرخ ناسازگاری قابل قبول، باید کمتر از ۰/۱ باشد (Saaty، ۱۹۹۶). در صورتی که ماتریس ناسازگار باشد از تصمیم گیرنده خواسته می شود، پاسخ های خود را بازنگری کند (Lynn و همکاران، ۱۹۶۲). مقادیر شاخص ناسازگاری برای ماتریس هایی که اعداد آنها کاملاً تصادفی اختیار شده محاسبه شده که آن را شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی (I.I.R.) نام نهاده اند. مقادیر این شاخص برای ماتریس های n بعدی مطابق جدول (۲) می باشد.

در تصمیم گیری گروهی، در صورتی که ماتریس مقایسه زوجی سازگار باشد، جهت ترکیب نظرات مختلف کارشناسان در قضاوتی خاص، جواب ها با استفاده از میانگین هندسی بر اساس رابطه (۲) جمع می شوند (Shih و DeFilippi، ۱۹۷۰).

$$a_{ij}^{[c]} = \left(\prod_{k=1}^m a_{ij}^{[k]} \right)^{1/m} \quad (۳)$$

در رابطه فوق m تعداد تصمیم گیرندگان، k شماره تصمیم گیرندگان، i و j به ترتیب بیانگر سطر و ستون ماتریس مقایسات زوجی، $a_{ij}^{[k]}$ نشان دهنده عنصر سطر i ام و ستون j ام ماتریس مقایسه زوجی تصمیم گیرنده k ام و $a_{ij}^{[c]}$ عنصر سطر i ام و ستون j ام ماتریس مقایسه زوجی جمع شده می باشد.

جدول ۲- شاخص ناسازگاری ماتریس های تصادفی

N	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
I.I.R.	۰	۰	۰/۵۸	۰/۹	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۵

واحد دانه و چربی گیری، حوض ته نشینی اولیه، حوض های هوادهی، صافی های چکنده، ته نشینی ثانویه، کلر زنی، تصفیه لجن، تغلیظ کننده ثقلی لجن خام، هاضم های بی هوازی، واحد ذخیره و تثبیت لجن، واحد آبیگری از لجن، واحد تغلیظ مکانیکی لجن فعال مازاد، ذخیره لجن آبیگری شده، سیستم جمع آوری و ذخیره مصرف بیوگاز، تاسیسات تولید انرژی الکتریکی و تاسیسات تصفیه گازهای مزاحم است.

۴- نمونه موردی

برای تصفیه بخشی از فاضلاب جمع آوری شده شهر تهران، تصفیه خانه جنوب شامل ۸ واحد برای جمعیتی معادل ۴ میلیون و ۲۰۰ هزار نفر در نظر گرفته شده است. زمین تصفیه خانه جنوب تهران ۱۱۰ هکتار بوده و در جنوب غربی شهر ری قرار دارد. نوع فرایند تصفیه فاضلاب این تصفیه خانه لجن فعال بوده و شامل واحدهای تلمبه خانه ورودی یا واحد پمپاژ، واحد آشغال گیری،

نواری، بسترهای لجن خشک‌کن و لاگون‌های لجن خشک‌کن می‌باشد. هر کدام از این فرآیندها در تعدادی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ایران اجرا شده و به بهره‌برداری رسیده است. باتوجه به تنوع پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند آبیگری، انتخاب فرآیند بهینه پیچیده و مشکل می‌باشد. اولین گام در این زمینه، شناخت معیارهای انتخاب و بررسی است. در شکل (۱) مهمترین معیارها و زیرمعیارهای موثر در انتخاب فرآیند آبیگری لجن فاضلاب شهری، بر اساس تجربیات حاصل از بهره‌برداری از فرآیندهای مختلف در جهان و ایران مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است (Azar و همکاران، ۲۰۱۰؛ Karimi و همکاران، ۲۰۱۱؛ Abbasi و همکاران، ۲۰۲۱؛ Mehrdadi و همکاران، ۲۰۱۲) و نظرات نویسندگان و کارشناسان ارائه شده است.

بعد از انتخاب فرآیندهای مختلف آبیگری لجن و همچنین انتخاب معیارهای مختلف موثر در تصمیم‌گیری، با کمک گرفتن از مراجع و همچنین نظر خبرگان تصفیه لجن، وزن‌دهی معیارها و زیرمعیارها با امتیازدهی متخصصین تصفیه فاضلاب و لجن، میانگین‌گیری هندسی از نظرات و نرمال‌سازی میانگین نظرات انجام شد. به‌ایان ترتیب، اهمیت نسبی معیارهای مختلف نسبت به فرآیندهای تصفیه مورد بررسی، تعیین شد. در نهایت انجام مقایسه‌های زوجی معیارها و محاسبه نرخ ناسازگاری، با استفاده از نرم‌افزار Export Choice که جهت تحلیل مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره با استفاده از روش AHP طراحی شده، صورت گرفت. برای ایجاد ساختار سلسله مراتبی برای انتخاب بهترین فرآیند آبیگری لجن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری تهران، هدف اصلی در سطح یک سلسله مراتبی، پنج گزینه تصفیه در سطح چهار و در سطوح دو و سه، معیارها و زیرمعیارهای انتخاب در نظر گرفته شد. این ساختار در شکل (۱) ارائه شده است.

در ابتدا وزن معیارهای اصلی تصمیم‌گیری شامل: معیارهای فنی، اقتصادی، محیط‌زیستی و مدیریتی با امتیازدهی متخصصین تصفیه فاضلاب و لجن و میانگین‌گیری از آن‌ها تعیین و ماتریس مربوط به آن تشکیل شد.

افرادی که در این نظرسنجی شرکت کرده‌اند و از نظرات آن‌ها استفاده شده است، دربرگیرنده اساتید دانشگاهی از دانشگاه‌هایی مانند دانشگاه تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشگاه صنعتی بابل، دانشگاه جندی شاپور اهواز، دانشگاه صنعتی قم، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشگاه آزاد اسلامی و غیره می‌باشند. همچنین متخصصینی از شرکت آب و فاضلاب و شرکت مدیریت منابع و شرکت‌های تابعه در کنار نظرات متخصصین و صاحب‌نظرانی از شرکت‌های خصوصی و مراکز تحقیقاتی نیز در این نظرسنجی شرکت کردند. در مرحله بعد وزن نسبی شاخص‌های مربوط به هر معیار تعیین و ماتریس‌های مربوط به آن ایجاد شد. جهت ارزیابی گزینه‌های مربوط به

باتوجه به درجه تصفیه مورد نیاز (میزان آبیگری) و شرایط محلی، اقلیمی و اقتصادی و فنی و بار آلودگی ورودی (میزان جامدات) روش مناسب و بهینه آبیگری انتخاب می‌شود. شرایط اقلیمی برای فرآیند تصفیه محدودیت‌هایی را ایجاد می‌کند. علاوه بر آن شرایط محیطی در توجیه و یا نفی فرآیند انتخابی تصفیه موثر است. بنابراین ابتدا شرایط خاص منطقه که در انتخاب و عملکرد روش تصفیه تأثیر می‌گذارد بررسی و سپس روش‌های مناسب آبیگری انتخاب و سرانجام روش بهینه پیشنهاد می‌شود. روش انتخابی باید از نظر اقتصادی و فنی بهترین گزینه باشد. شرایط خاص منطقه شامل درجه حرارت، تبخیر، تشعشع خورشید، میزان زمین و سطح آب زیرزمینی می‌باشد.

انتخاب روش بهینه آبیگری مناسب، ابتدا باید بر پایه درجه تصفیه مورد نیاز و حذف آلاینده‌های مورد نظر انجام پذیرد که این امر خود درخور بررسی شرایط محل، مشخصات کمی و کیفی لجن تولیدی، شرایط آب‌وهوایی و غیره می‌باشد. انتخاب روش تصفیه لجن، به میزان تصفیه مورد نیاز و اهداف تصفیه بستگی دارد. استانداردهای محیطی، ملاحظات مالی، تعداد و شرایط کارکنان مورد نیاز برای راهبری و نگهداری، امکان دسترسی به تجهیزات، نیاز به انرژی و شرایط کیک لجن خروجی از عوامل موثر در انتخاب فرآیند تصفیه و آبیگری هستند. انتخاب سیستم آبیگری، تصمیم ساده‌ای نبوده و به تجربیات میدانی دقیق و دانش فنی بالا در شناخت واحدهای مختلف عملیاتی و فرآیندی نیازمند است.

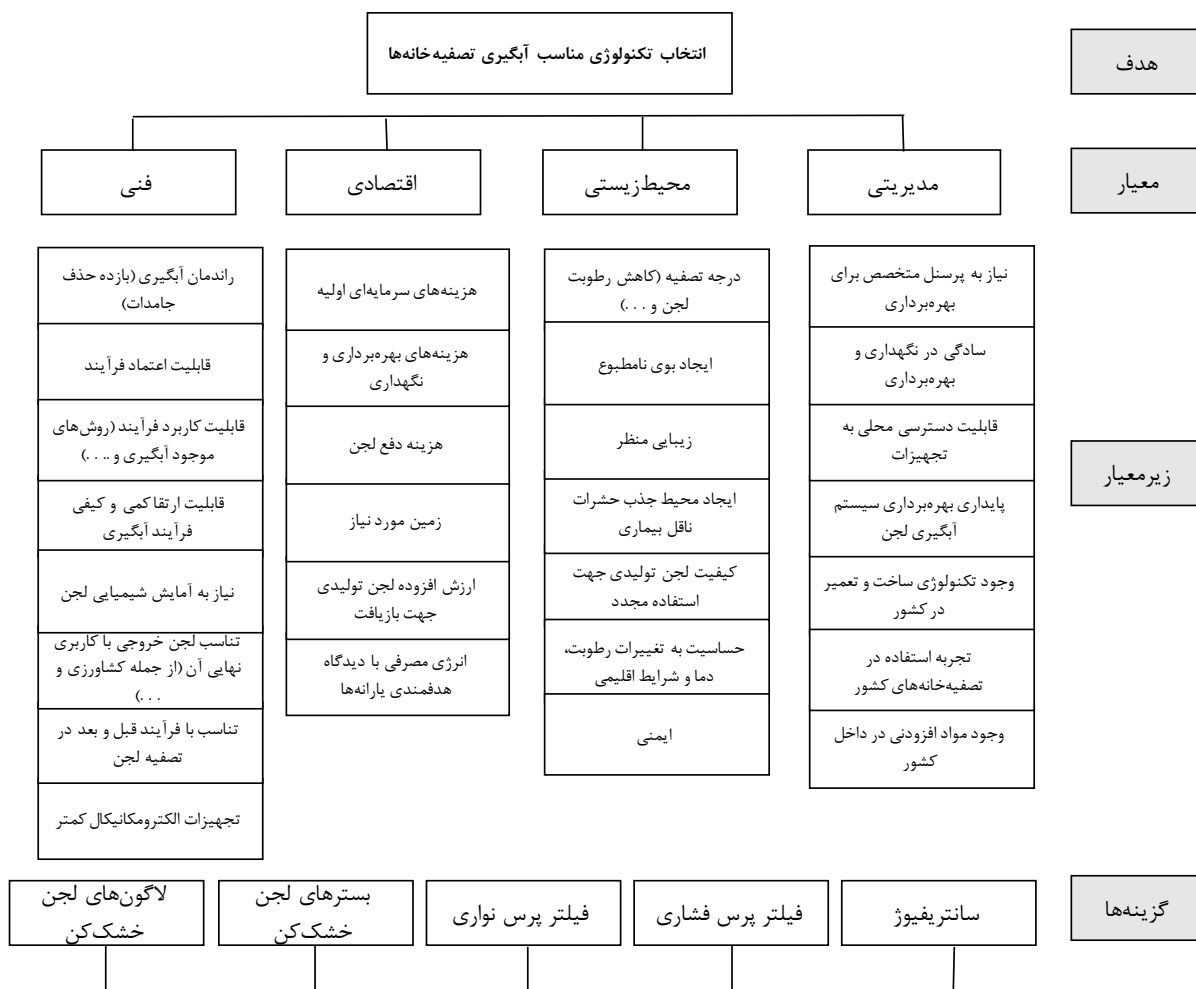
در تصفیه‌خانه‌ها، امکان انتخاب فرآیند تصفیه و آبیگری بهینه که بتواند اهداف گوناگون مانند حداقل‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و نگهداری و انرژی مصرفی، کیفیت لجن تولیدی و استفاده مجدد از آن را برآورده سازد، بسیار مشکل است. در این راستا طراحان سیستم‌های تصفیه فاضلاب و لجن یا با استفاده از سیستم‌های پایلوت که معمولاً پرهزینه و وقت‌گیر می‌باشد، نسبت به انتخاب فرآیند تصفیه اقدام می‌نمایند و یا بر اساس مقایسه اقتصادی و کیفی و بدون لحاظ تأثیر معیارهای مختلف متناسب با وزن و اهمیت نسبی آن‌ها، تنها بر اساس قضاوت‌های کارشناسی فرآیند بهینه را انتخاب می‌کنند.

۱- گزینه‌های انتخاب فرآیند برتر آبیگری لجن

باتوجه به مطالعات صورت گرفته، فرآیندهای آبیگری مختلفی تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه، پنج فرآیند آبیگری لجن فاضلاب که در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری ایران و جهان به بهره‌برداری رسیده، بررسی شد. این فرآیندها دربرگیرنده سانتریفیوژ، فیلتر پرس فشاری، فیلتر پرس

نسبی شاخص‌های مربوط به هر معیار نسبت به آن معیار محاسبه شد. همچنین نرخ ناسازگاری کنترل شد و از قابل قبول بودن هر مقایسه زوجی اطمینان حاصل شد.

فرآیندهای آگیری لجن، ماتریس مقایسه‌های زوجی مربوط به هر معیار و زیرمعیارها تشکیل شد. با استفاده از نرم‌افزار Export Choice وزن نسبی معیارهای اصلی نسبت به هدف اصلی و وزن



شکل ۱- ساختار سلسله مراتبی انتخاب مناسب‌ترین روش آگیری

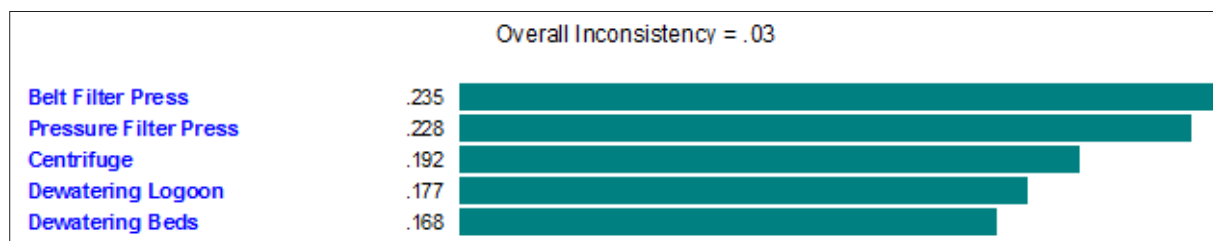
و معیار مدیریتی کم‌اثرترین معیار در اولویت‌بندی فرآیندهای آگیری لجن می‌باشد. جدول (۳) به تعیین وزن و اهمیت نسبی معیارهای مقایسه فرآیندهای آگیری لجن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری تهران می‌پردازد.

اولویت‌بندی نهایی گزینه‌ها نسبت به هدف اصلی طرح در شکل (۲) ارائه شده است. براساس نتایج بررسی فرم‌های نظرخواهی از کارشناسان و خبرگان حوزه تصفیه و بازیافت فاضلاب و لجن و پس از جمع‌بندی مشخص شد، فرایند فیلتر پرس نواری مناسب‌ترین روش آگیری لجن برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری تهران می‌باشد و پس از آن فرآیندهای فیلتر پرس فشاری، سانتریفیوژ، لاگون و بسترهای لجن خشک‌کن ماسه‌ای قرار می‌گیرند.

بر اساس نتایج به‌دست آمده از نظر کارشناسان و خبرگان، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، مهمترین زیرمعیار موثر در پارامترهای اقتصادی انتخاب فرآیندهای مختلف آگیری لجن بوده و به‌این ترتیب راندمان آگیری، تجربه استفاده در تصفیه‌خانه‌های کشور و درجه تصفیه به ترتیب مهمترین زیرمعیارهای موثر در معیارهای فنی، مدیریتی و محیط‌زیستی می‌باشند. اولویت‌بندی فرآیندهای مختلف آگیری لجن نسبت به معیارهای اصلی فنی، اقتصادی، محیط‌زیستی و مدیریتی، با توجه به خروجی‌های نرم‌افزار، فیلتر پرس نواری، لاگون، سانتریفیوژ و لاگون به ترتیب اولویت برتر در معیارهای فنی، اقتصادی، محیط‌زیستی و مدیریتی می‌باشند. همچنین نتایج نمایانگر این است که معیار محیط‌زیستی موثرترین

جدول ۳- تعیین وزن و اهمیت نسبی معیارهای مقایسه فرآیندهای آبیگری لجن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری تهران

معیارها	وزن اهمیت	فیلتر پرس فشاری	فیلتر پرس نواری	سانتریفیوژ	بستر لجن خشک‌کن	لاگون
معیارهای فنی	۰/۳۱۳	۰/۱۸۱	۰/۲۷۱	۰/۱۳۳	۰/۲۰۱	۰/۲۱۳
راندمان آبیگری	۰/۳۲۵	۰/۲۲۳	۰/۴۰۲	۰/۲۳۱	۰/۰۹۰	۰/۰۵۵
قابلیت اعتماد فرآیند	۰/۰۷۷	۰/۲۷۱	۰/۳۹۰	۰/۰۷۲	۰/۱۰۱	۰/۱۶۷
قابلیت کاربرد فرآیند	۰/۱۱۱	۰/۲۷۰	۰/۴۲۵	۰/۱۶۹	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸
قابلیت ارتقا کمی و کیفی فرآیند	۰/۰۴۷	۱۷۶/۰	۵۴۶/۰	۱۷۶/۰	۰/۵۱/۰	۰/۵۱/۰
نیاز به آمایش شیمیایی لجن	۰/۲۴۰	۰/۰۹۱	۰/۰۹۱	۰/۰۴۲	۰/۳۸۸	۰/۳۸۸
تناسب لجن خروجی با کاربری نهایی آن	۰/۰۳۰	۰/۱۴۳	۰/۱۴۳	۰/۱۴۳	۰/۲۸۶	۰/۲۸۶
تناسب با فرآیند قبل و بعد در تصفیه لجن	۰/۰۲۷	۰/۱۴۳	۰/۱۴۳	۰/۱۴۳	۰/۲۸۶	۰/۲۸۶
تجهیزات الکترومکانیکال کمتر	۰/۱۴۳	۰/۱۵۳	۰/۱۱۳	۰/۰۶۲	۰/۲۷۳	۰/۳۹۹
معیارهای اقتصادی	۰/۲۱۸	۰/۲۳۷	۰/۱۹۴	۰/۱۴۷	۰/۱۷۴	۰/۲۴۹
هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه	۰/۲۶۸	۰/۴۵۹	۰/۳۰۷	۰/۱۳۰	۰/۰۵۲	۰/۰۵۲
هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری	۰/۳۹۹	۰/۱۴۴	۰/۱۱۲	۰/۰۶۱	۰/۲۶۵	۰/۴۱۸
هزینه دفن لجن	۰/۰۳۹	۰/۲۵۰	۰/۲۵۰	۰/۲۵۰	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵
زمین مورد نیاز	۰/۱۵۰	۰/۲۵۱	۰/۲۵۱	۰/۴۰۸	۰/۰۳۷	۰/۰۵۳
ارزش افزوده لجن تولیدی جهت بازیافت	۰/۰۵۷	۰/۱۲۳	۰/۱۲۳	۰/۱۲۳	۰/۳۰۶	۰/۳۲۵
انرژی مصرفی با دیدگاه هدفمندسازی پارانه‌ها	۰/۰۸۸	۰/۱۱۷	۰/۱۷۱	۰/۰۷۴	۰/۲۵۵	۰/۳۸۳
معیارهای محیط‌زیستی	۰/۳۳۲	۰/۲۲۴	۰/۲۹۵	۰/۳۱۶	۰/۱۰۵	۰/۰۶۰
درجه تصفیه	۰/۳۵۵	۰/۲۲۸	۰/۳۳۳	۰/۳۴۲	۰/۰۵۶	۰/۰۴۱
ایجاد بو نامطبوع	۰/۲۴۱	۰/۲۶۴	۰/۳۰۶	۰/۳۴۴	۰/۰۴۹	۰/۰۳۷
زیبایی منظر	۰/۱۰۴	۰/۲۴۷	۰/۳۱۹	۰/۳۴۷	۰/۰۵۰	۰/۰۳۸
ایجاد محیط جذب حشرات ناقل بیماری	۰/۰۳۲	۰/۲۴۰	۰/۳۱۳	۰/۳۵۳	۰/۰۳۹	۰/۰۵۶
کیفیت لجن تولیدی جهت استفاده مجدد	۰/۱۵۵	۰/۱۴۵	۰/۱۴۵	۰/۱۴۵	۰/۳۸۴	۰/۱۸۱
حساسیت به تغییرات رطوبت و دما و ...	۰/۰۴۵	۰/۲۶۱	۰/۳۱۶	۰/۳۳۶	۰/۰۳۷	۰/۰۵۰
ایمنی	۰/۰۶۸	۰/۱۵۸	۰/۳۰۴	۰/۳۵۶	۰/۱۴۸	۰/۰۳۴
معیارهای مدیریتی	۰/۱۳۷	۰/۱۲۹	۰/۲۵۹	۰/۰۸۳	۰/۲۳۵	۰/۲۹۳
نیاز به پرسنل متخصص برای بهره‌برداری	۰/۱۰۶	۰/۱۱۷	۰/۱۷۱	۰/۰۷۲	۰/۲۴۱	۰/۳۹۸
سادگی در نگهداری و بهره‌برداری	۰/۲۴۹	۰/۱۳۷	۰/۱۳۷	۰/۰۷۹	۰/۲۴۴	۰/۴۰۳
قابلیت دسترسی محلی به تجهیزات	۰/۰۶۳	۰/۱۱۹	۰/۱۷۴	۰/۰۷۳	۰/۲۸۱	۰/۳۵۳
پایداری بهره‌برداری سیستم آبیگری لجن	۰/۰۴۱	۰/۱۵۸	۰/۱۵۸	۰/۰۸۹	۰/۲۸۹	۰/۲۸۹
وجود تکنولوژی ساخت و تعمیر در کشور	۰/۱۵۹	۰/۱۳۹	۰/۲۰۵	۰/۱۰۰	۰/۲۷۹	۰/۲۷۹
تجربه استفاده در تصفیه‌خانه‌های کشور	۰/۳۸۱	۰/۱۱۹	۰/۴۴۶	۰/۰۸۰	۰/۱۷۷	۰/۱۷۷



شکل ۲- اولویت‌بندی گزینه‌های آبیگری لجن نسبت به هدف کلی

۲- آنالیز حساسیت

وزن معیارها بیشترین اثر در رتبه‌بندی گزینه‌ها را دارند. تصمیم‌گیرنده باید درجه قابلیت اعتماد نتایج را برای تصمیم‌گیری نهایی بداند. به دلیل وجود عدم قطعیت در مراحل مختلف تصمیم‌گیری توسط چند شاخص، لازم است قبل از انتخاب گزینه نهایی، آنالیز حساسیت بر روی مساله صورت گیرد. بنابراین، انجام تحلیل حساسیت بعد از مشخص شدن رتبه‌بندی گزینه‌ها پیشنهاد می‌شود. در این تحلیل، محاسبات مجدد رتبه‌بندی گزینه‌ها با اصلاح وزن هر معیار انجام می‌گیرد. با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice یک تحلیل حساسیت کامل قابل انجام است. برای انجام این عمل، درحالی‌که وزن‌های دیگر معیارها ثابت باقیمانده، وزن یک معیار به صورت تدریجی افزایشی یا کاهشی تغییر می‌کند. بعد از انجام آنالیز حساسیت، ممکن است رتبه‌بندی گزینه‌ها تغییر کند (Mehrdadi و همکاران، ۲۰۱۲). آنالیز تمام تغییرات ممکن توسط نرم‌افزار Expert Choice که مدول آنالیز حساسیت قدرتمند و کاربر دوست دارند، قابل انجام است.

در تحلیل حساسیت‌های نشان داده شده در شکل (۳)، با تغییر درصد وزنی بین معیارهای اصلی، پایداری اولویت‌بندی گزینه‌ها بررسی شده است.

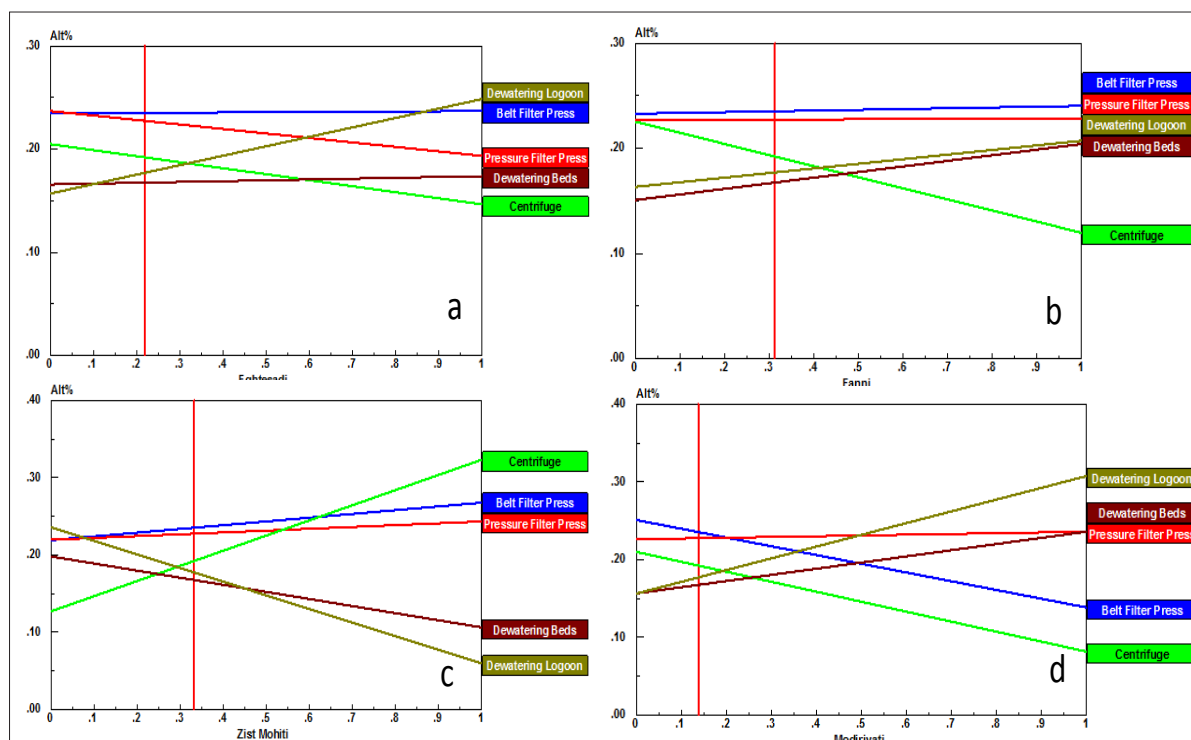
باتوجه به شکل (۳-ا)، با تغییر درصد وزنی معیار اقتصادی از ۷/۲ تا ۸۵/۴ اولویت اول که فیلتر پرس نواری بوده ثابت باقیمانده اما با افزایش آن از ۸۵/۴ اولویت فیلتر پرس نواری و لاگون تغییر می‌یابد. به صورت کلی بیشترین حساسیت در معیار اقتصادی متوجه فرآیند

لاگون می‌شود که با تغییر در میزان تأثیر معیار اقتصادی، موجب بیشترین تغییرات در اولویت‌بندی‌ها می‌شود.

باتوجه به شکل (۳-ب)، با تغییر درصد وزنی معیار فنی، اولویت اول و دوم که فیلتر پرس نواری و فشاری هستند، ثابت باقیمانده اما با کاهش آن از مقدار ۴۲/۱ اولویت سانتریفیوژ با لاگون و لجن خشک‌کن‌های بستر ماسه‌ای تغییر می‌یابد. به صورت کلی بیشترین حساسیت در معیار فنی بر فرآیند سانتریفیوژ تأثیرگذار است که با تغییر در میزان تأثیر معیار فنی، موجب بیشترین تغییرات در اولویت‌بندی‌ها می‌شود.

باتوجه به شکل (۳-ج)، با تغییر درصد وزنی معیار محیط‌زیستی از ۸/۸ تا ۶۳/۴ اولویت اول ثابت باقیمانده اما با کاهش آن از ۸/۸ اولویت اول به لاگون و با افزایش آن از ۶۳/۴ اولویت اول به سانتریفیوژ تغییر می‌یابد. به صورت کلی بیشترین حساسیت در معیار محیط‌زیستی بر فرآیند سانتریفیوژ تأثیرگذار است که با تغییر در میزان تأثیر معیار محیط‌زیستی، موجب بیشترین تغییرات در اولویت‌بندی‌ها می‌شود.

باتوجه به شکل (۳-د)، با تغییر درصد وزنی معیار مدیریتی از ۲۰/۸ تا ۵۰/۳ اولویت اول فیلتر پرس فشاری بوده اما با تغییر آن به بیشتر از ۵۰/۳ اولویت به لاگون تغییر کرده و در مقدار کمتر از ۲۰/۸ با فیلتر پرس نواری تعویض می‌شود. به صورت کلی بیشترین حساسیت در معیار مدیریتی بر فرآیند فیلتر پرس نواری تأثیرگذار است که با تغییر در میزان تأثیر معیار مدیریتی، موجب بیشترین تغییرات در اولویت‌بندی‌ها می‌شود.



شکل ۳- نمودار تحلیل حساسیت نسبت به معیار

- Akhoundi A. and Nazif S. 2018. Sustainability assessment of wastewater reuses alternatives using the evidential reasoning approach. *J. Cleaner Prod.*, 195: 1350-1376.
- Ananda J. 2007. Implementing participatory decision making in forest planning. *Environmental management*, 39(4): 534-544.
- Andreoli C. V., Von Sperling M and Fernandes F. 2007. Sludge treatment and disposal. IWA publishing. VOLUME SIX. London. New Yaork.
- Azar A., Jelogir A. G., Bidhendi G. N., Mehrdadi N., Zaredar N and Poshtegal. M. K.. 2010. Investigation of optimal method for hospital wastewater treatment. *J. Food Agric. Environ.*, 8(2): 1199-1202.
- Carpitella S., Certa A., Izquierdo J and La Fata C. M. 2018. A combined multi-criteria approach to support FMECA analyses: A real-world case. *Reliability Engineering & System Safety*. 169: 394-402.
- Dabaghian M., Hashemi S. H., Ebadi T. and Maknoon R. 2008. The best available technology for small electroplating plants applying analytical hierarchy process. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 5(4): 479-484.
- Đurđević D., Trstenjak M. and Hulenčić I. 2020. Sewage sludge thermal treatment technology selection by utilizing the analytical hierarchy process. *Water*, 12(5): 1255.
- Goodwin D., Raffin M., Jeffrey P. and Smith H. M. 2019. Stakeholder evaluations of risk interventions for non-potable recycled water schemes: a case study. *Science of the Total Environment*, 674: 439-450.
- Haddad M., Sanders D. and Tewkesbury G. 2020. Selecting a discrete multiple criteria decision making method for Boeing to rank four global market regions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 134: 1-15.
- Hamed H., Naser M., Mohammad T. J. and Hamidreza H. 2012. Performance simulation of H-TDS unit of FAJR industrial wastewater treatment plant using a combination of neural network and principal component analysis. *Journal of Water Resource and Protection*. 4(5): 311-317.

انتخاب نوع فرآیند آبگیری لجن برای تصفیه لجن فاضلاب شهری تهران اهمیت بالایی دارد. باتوجه به تنوع معیارهای تأثیرگذار (معیارهای کمی و کیفی)، استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره اجتناب‌ناپذیر می‌شود. در تصمیم‌گیری برای هر تصفیه‌خانه، وزن و اهمیت نسبی معیارها با اطلاعات ارائه شده در این تحقیق متفاوت خواهد بود و باید بر اساس واقعیت‌های هر تصفیه‌خانه ارزیابی صورت گیرد. در این مطالعه معیارهای اصلی فنی، اقتصادی، محیط‌زیستی و مدیریتی به همراه زیرمعیارهای مربوط به آن بر اساس روش AHP تعیین شد. با داشتن نتایج فراهم شده از پرسشنامه تهیه شده از کارشناسان و خبرگان حوزه تصفیه فاضلاب و لجن، وزن‌دهی معیارها در روش AHP و همچنین آنالیز حساسیت معیارها با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice برای تعیین بهترین گزینه برای آبگیری لجن انجام شد. تحلیل حساسیت بر روی معیارهای اصلی انجام شد و ضریب حساسیت برای چهار معیار فنی، اقتصادی، اجتماعی-محیط‌زیستی و مدیریتی به دست آمد تا قابلیت اعتماد نتایج برای تصمیم‌گیری نهایی مشخص شود. نتایج نشان داد فرایند فیلترپرس نواری مناسب‌ترین روش آبگیری لجن برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری تهران می‌باشد و پس از آن فرآیندهای فیلترپرس فشاری، سانتیفیوژ، لاگون و بسترهای لجن خشک‌کن ماسه‌ای قرار می‌گیرند.

سپاسگزاری

مقاله حاضر با استفاده از نتایج طرح شماره ۹۰/۱۴۹۱۱/۵۰۱ و با حمایت شرکت آب و فاضلاب تهران و شرکت فاضلاب تهران، نوشته شده است. به این وسیله از مسئولان شرکت‌های نامبرده و تصفیه‌خانه جنوب شهر تهران جهت حمایت‌های مادی و معنوی، تشکر و قدردانی می‌شود.

پی‌نوشت

- 1-Analytical Hierarchy Process (AHP)
- 2-Inconsistency Index

منابع

- Abbasi N., Ahmadi M. and Naseri M. 2021. Quality and cost analysis of a wastewater treatment plant using GPS-X and CapdetWorks simulation programs. *Journal of Environmental Management*, 284: 111993.

- and feedback: The analytic network process. RWS publications Pittsburgh. Pittsburgh. PA: RWS Publications. 1st ed. United States.
- Saaty T. L. 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1): 83-98.
- Shakeri H., and Nazif S. 2018. "Development of an algorithm for risk-based management of wastewater reuse alternatives." *Water Reuse Desalin*, 8(1): 38-57.
- Shih C. S. and DeFilippi J. A. 1970. System optimization of waste treatment plant process design. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 96(2): 409-421.
- Tscheikner-Gratl F., Egger P., Rauch W. and Kleidorfer M. 2017. Comparison of multi-criteria decision support methods for integrated rehabilitation prioritization. *Water*, 9(2): 68.
- Tyagi V. K. and Lo S.-L. 2013. Sludge: a waste or renewable source for energy and resources recovery? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25: 708-728.
- Wind, Y. and Saaty T. L. 1980. Marketing applications of the analytic hierarchy process. *Management science*, 26(7): 641-658.
- Wondim T. T. and Dzwaïro B. 2018. A scenario-based multiple attribute decision-making approach for site selection of a wastewater treatment plant: Bahir Dar City (Ethiopia) case study. *Water SA*, 44(4): 782-794.
- Zeng G., Jiang R., Huang G., Xu M. and Li J. 2007. Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis. *Journal of environmental management*, 82(2): 250-259.
- Zolfaghary P., Zakerinia M. and Kazemi H. 2021. A model for the use of urban treated wastewater in agriculture using multiple criteria decision making (MCDM) and geographic information system (GIS). *Agricultural Water Management*, 243: 106490.
- Ishizaka, A. and Labib A. 2009. Analytic hierarchy process and expert choice: Benefits and limitations. *Or Insight*, 22(4): 201-220.
- Karimi A., Mehrdadi N., Hashemian S., Bidhendi G. and Moghaddam R. T. 2011a. Using of the fuzzy TOPSIS and fuzzy AHP methods for wastewater treatment process selection. *International journal of academic research*, 3(1): 737-745.
- Karimi A., Mehrdadi N., Hashemian S., Bidhendi G. and Moghaddam R. T. 2011b. Selection of wastewater treatment process based on the analytical hierarchy process and fuzzy analytical hierarchy process methods. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 8(2): 267-280.
- Koulinas G. K., Marhvilas P. K., Demesouka O. E., Vavatsikos A. P. and Koulouriotis D. E. 2019. Risk analysis and assessment in the worksites using the fuzzy-analytical hierarchy process and a quantitative technique—A case study for the Greek construction sector. *Safety science*, 112: 96-104.
- Lynn W. R., Logan J. A. and Charnes A. 1962. Systems analysis for planning wastewater treatment plants. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 34(6): 565-581.
- Mahmoodzadeh S., Shahrabi J., Pariazar M. and Zaeri M. 2007. Project selection by using fuzzy AHP and TOPSIS technique. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 30(1): 333-338.
- Mehrdadi N. and Hasanlou H. 2012. Reduction of excess sludge using different methods in SBR process for biological wastewater treatment (emphasizing on ultrasonic usage), 38(1): 49-60.
- Peniwati K. 2007. Criteria for evaluating group decision-making methods. *Mathematical and Computer Modelling*, 46(7-8): 935-947.
- Saaty T. L. 1996. Decision making with dependence

An Overview of the Technologies Used for Water Purification in Aquaculture Systems with an Emphasis on the Model of Sustainable Development in Iran

A.R. Radkhah^{1*}, S. Eagderi², E. Sadeghinejad Masouleh³

1,2- Ph.D. Student and Associate Professor, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. 3- Research Instructor, Inland Waters Aquaculture Research Center, Iranian Fisheries Science Research Institute (IFSRI), Agriculture Research Education and Extension Organization (AREEO), Bandar-e Anzali, Iran.

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

Received: 07-05-2022

Revised: 06-08-2022

Accepted: 21-08-2022

Available Online: 21-12-2022

مروری بر فناوری‌های مورد استفاده جهت پالایش آب در سیستم‌های آبی پروری با تأکید بر الگوی توسعه پایدار در ایران

علیرضا رادخواه^{۱*}، سهیل ایگدری^۲، اسماعیل صادقی‌نژاد ماسوله^۳

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکترا و دانشیار، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ۳- مربی پژوهشی، پژوهشکده آبی‌پروری آب‌های داخلی، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندر انزلی، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: alirezaradkhah@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

Abstract

One of the main limitations in the development of the aquaculture industry in Iran is access to fresh water with good quality. This requires the development of sustainable technologies for aquaculture wastewater treatment. The present study investigates breeding technologies in order to save water consumption in Iran's aquaculture systems, relying on the model of sustainable development. In this research, the innovations created in aquaculture wastewater treatment in recirculating aquaculture systems (RASs), aquaponics and integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) systems have been discussed. A recirculating aquaculture system, which treats wastewater by removing toxic pollutants and recycling water, requires only 10% of the total volume of fresh water to produce of fish. Therefore, this system helps to save water. However, it has limitations, the most important of which is the accumulation of nitrates in the system, high economic cost, and difficult management, which is achieved by converting nutrients from aquaculture effluents into algal biomass. In addition to RASs, aquaponics is a food production system that combines conventional aquaculture methods and RASs. This method includes aquaculture and plant cultivation, which shows the integration of aquaculture-agriculture activities. Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) includes the use of symbiotic organisms in breeding systems that optimizes the balance of nutrients and purifies the wastewater resulting from aquaculture activities. This method shows the combination of different nutritional levels that organic and inorganic effluents are used by different organisms.

Keywords: Aquaculture Wastewater, Water Treatment, Recirculating Aquaculture System, Aquaponics, Sustainable Development.

چکیده

یکی از محدودیت‌های اصلی در مسیر توسعه صنعت آبی‌پروری ایران، دسترسی به آب شیرین با کیفیت مطلوب است. این امر سزاور استفاده از فناوری‌های مناسب برای تصفیه پساب‌های آبی‌پروری است. مطالعه حاضر به بررسی فناوری‌های پرورشی به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف آب در سیستم‌های آبی‌پروری ایران با تکیه بر الگوی توسعه پایدار پرداخته است. در این تحقیق، نوآوری‌های ایجاد شده در تصفیه پساب‌های آبی‌پروری در سیستم‌های پرورشی مدار بسته، آکوپونیک و سیستم‌های یکپارچه چندمنظوره (IMTA) مورد بحث قرار گرفته است. سیستم آبی‌پروری مدار بسته (RAS) که پساب را با حذف آلاینده‌های سمی و بازیافت آب، پالایش می‌کند، تنها به ۱۰ درصد از حجم کل آب شیرین برای تولید ماهی نیاز دارد. از این رو، این سیستم به صرفه‌جویی آب کمک می‌کند. اما با این حال محدودیت‌هایی دارد، از جمله مهم‌ترین آن‌ها تجمع نیترات در سیستم، هزینه اقتصادی زیاد و مدیریت دشوار آن می‌باشد که با تبدیل مواد مغذی حاصل از پساب آبی‌پروری به زیست‌توده جلبکی می‌توان بر این محدودیت‌ها پیروز شد. علاوه بر سیستم‌های آبی‌پروری مدار بسته، آکوپونیک یک سیستم تولید مواد غذایی است که شیوه‌های مرسوم آبی‌پروری و سیستم مدار بسته را با هم ترکیب می‌کند. این روش شامل پرورش آبزیان و کشت گیاهان می‌باشد که به نوعی پیوند فعالیت‌های آبی‌پروری-کشاورزی را نشان می‌دهد. آبی‌پروری یکپارچه چندمنظوره (IMTA) شامل استفاده از ارگانیسم‌های هم‌زیست در سیستم‌های پرورشی می‌باشد که باعث بهینه‌سازی تعادل مواد مغذی و پالایش پساب فراهم شده از فعالیت‌های آبی‌پروری می‌شود. این روش ترکیبی از سطوح تغذیه‌ای مختلف را نشان می‌دهد، از این رو، پساب‌های حاوی مواد آلی و معدنی توسط موجودات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: پساب آبی‌پروری، تصفیه آب، سیستم آبی‌پروری مدار بسته، آکوپونیک، توسعه پایدار.

کیلوگرم و در سال ۱۳۹۷ را بیش از ۱۱ کیلوگرم بیان کرد. همچنین، در سرشماری جدید مرکز آمار ایران (۱۴۰۱)، تعداد مزارع تکثیر و پرورش آبزیان خوراکی کشور در سال ۱۴۰۰ را بیش از ۱۷۰۰۰ واحد برآورد کرد. این سازمان اعلام نمود در پاییز سال ۱۴۰۰، مجموعاً ۱۷۶۱۰ واحد تکثیر و پرورش آبزیان در سطح کشور سرشمارش شده که نسبت به سال ۱۳۹۳ حدود ۳۳ درصد افزایش داشته است. آمارهای بیان شده نشان می‌دهد میزان تولیدات آبزی‌پروری ایران در طول سال‌های گذشته روند روبه‌رشدی داشته است.

علاوه بر پیشرفت‌هایی که آبزی‌پروری ایران در طی سال‌های گذشته داشته است، این صنعت مهم با چالش‌هایی نیز مواجه بوده است. کم‌آبی و کاهش منابع آب طبیعی از عمده چالش‌هایی هستند که سرنوشت بسیاری از کشورهای جهان به‌ویژه کشورهای در حال توسعه مانند ایران را تحت تأثیر قرار داده‌اند (Nqombolo و همکاران، ۲۰۱۸). از آنجایی که بخشی از تأمین غذای انسان وابسته به صنعت آبزی‌پروری می‌باشد، هرگونه چالشی که منجر به کاهش تولیدات آبزی‌پروری شود می‌تواند امنیت غذای انسان را نیز به خطر بیاندازد. از این رو، شناسایی و رفع چالش‌ها و معضلاتی که تولیدات آبزی‌پروری را تحت تأثیر قرار می‌دهند، یکی از ضروریات اساسی در جامعه امروز می‌باشد. براساس گزارش FAO (۲۰۲۰)، یکی از محدودیت‌های اصلی در مسیر توسعه آبزی‌پروری در بسیاری از کشورها، دسترسی به آب با کیفیت می‌باشد که رفع این محدودیت، مستلزم استفاده از فناوری‌های پایدار برای تصفیه پساب‌های آبزی‌پروری و صرفه‌جویی در مصرف آب است.

تاکنون، نگرانی‌های محیط‌زیستی زیادی در مورد آلودگی آب ناشی از فعالیت‌های آبزی‌پروری در سطح جهان مطرح شده است (Martinez-Porchas و Martinez-Cordova، ۲۰۱۲). اجزای آلی موجود در پساب‌های آبزی‌پروری مانند خوراک مصرف نشده و مدفوع باعث عدم مطلوبیت محیط آب و رسوبات می‌شوند (Dauda و همکاران، ۲۰۱۹). مواد آلی محلول و ذرات معلق، کل مواد جامد محلول، مواد مغذی مانند فسفر و نیتروژن اجزاء اصلی پساب‌های آبزی‌پروری را تشکیل می‌دهند که می‌توانند منجر به معضلات محیط‌زیستی شده و همچنین اثرات منفی بر رشد ماهیان داشته باشند (Zheng و همکاران، ۲۰۱۳؛ Martinez-Espineira و همکاران، ۲۰۱۵؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۹). اثر اولیه ناشی از مقادیر بالای پسماند آلی در فاضلاب آبزی‌پروری شامل افزایش فعالیت متابولیکی باکتری‌های هوازی است (Timmons و Lorsodo، ۱۹۹۴؛ Dauda و همکاران، ۲۰۱۹). کمبود اکسیژن برآمده از فعالیت‌های باکتریایی منجر به تخریب حیات هوازی در آب‌ها مانند رودخانه‌ها و دریاچه‌ها می‌شود. در این شرایط، امکان احیای سولفات در سیستم‌های بی‌هوازی بسیار بالا است (Sigalevich و همکاران، ۲۰۰۰). این امر باعث مهار همزمان فرایندهای نیتریفیکاسیون هوازی و نیترات‌زایی می‌شود. کمبود اکسیژن در هر دو فرآیند منجر به مرگ

آبزی‌پروری در مقایسه با فعالیت‌های کشاورزی، دامپروری و صیادی به‌عنوان یک صنعت نوپا شناخته می‌شود. در بیشتر نواحی آسیا، این فعالیت به یک بخش اقتصادی تبدیل شده است که با حمایت دولت و مشارکت قوی بخش خصوصی بهتر سازماندهی می‌شود (رادخواه و همکاران، ۱۳۹۹). صنعت آبزی‌پروری به‌منظور تحقق اهداف مختلف از جمله تولید غذای بیشتر، کسب درآمدهای بالاتر و بهبود اقتصاد گسترش یافته و شامل تضمین امنیت غذایی، کاهش فقر و ارتقای رفاه اجتماعی می‌شود (Kongkeo، ۲۰۰۱؛ Kim و همکاران، ۲۰۲۲). در طی ۲۰ سال گذشته، آبزی‌پروری در آسیا از یک روش سنتی به یک فعالیت مبتنی بر علم تبدیل شده است. این صنعت بسیار مهم به یک بخش قابل توجه برای تولید مواد غذایی تبدیل شده است به‌طوری‌که کمک بیشتری به اقتصاد ملی کرده و شرایط معیشتی بهتری را برای خانواده‌های روستایی و کشاورز فراهم کرده است. بر اساس آمار سازمان FAO (۲۰۲۲)، کل تولیدات شیلات و آبزی‌پروری در سال ۲۰۲۱ به حدود ۲۱۴ میلیون تن رسید که شامل ۱۷۸ میلیون تن جانوران آبزی و ۳۶ میلیون تن جلبک است که بیشتر به دلیل رشد آبزی‌پروری به‌ویژه در آسیا صورت گرفته است. این آمار نشان دهنده رشد تولیدات آبزی‌پروری در کشورهای آسیایی می‌باشد که از بعد جهانی نیز بسیار اهمیت دارد (FAO، ۲۰۲۲). در مقابل تولیدات آبزی‌پروری، سهم مصرف ماهیان نیز افزایش یافته است به‌طوری‌که بر اساس گزارش FAO (۲۰۲۰) پیش‌بینی می‌شود که سهم ماهیان مصرفی توسط انسان که از آبزی‌پروری نشأت می‌گیرند از ۵۲ درصد (میانگین در دوره ۲۰۱۸-۲۰۱۶) به ۵۸ درصد در سال ۲۰۲۸ افزایش یابد (FAO، ۲۰۲۰؛ FAO، ۲۰۲۲).

در سال‌های گذشته، صنعت آبزی‌پروری در ایران روند روبه‌رشدی را تجربه کرده است به‌طوری‌که براساس گزارش خدایی (۱۳۹۵)، ایران با تولید ۳۲۰ هزار و ۱۴۷ تن از انواع محصولات آبزی در رتبه هفدهم دنیا قرار گرفته است. درحالی‌که در منطقه خاورمیانه، صنعت آبزی‌پروری ایران در رتبه نخست قرار دارد و پس از ایران، ترکیه با ۲۳۴ هزار تن و پاکستان با ۱۴۸ هزار تن به‌ترتیب در رتبه های دوم و سوم قرار دارند (خدایی، ۱۳۹۵). صالحی (۱۳۹۷) میزان تولید آبزیان در پیش از انقلاب و پس از انقلاب ۱۳۵۷ را بررسی کرد و بیان کرد براساس آمار به‌دست آمده تا سال ۱۳۵۷، مجموع تولید صید و آبزی‌پروری ۳۲ هزار تن بود که ۳ هزار تن از این میزان را آبزی‌پروری و ۲۹ هزار تن را بخش صید و صیادی تشکیل می‌داد، درحالی‌که در سال ۱۳۹۷ میزان تولیدات صید و آبزی‌پروری نزدیک به یک میلیون و ۲۰۰ هزار تن افزایش یافت. همچنین، ارزش صادرات محصولات شیلاتی در سال ۱۳۵۷، مجموعاً ۱۱ میلیون دلار بود درحالی‌که در سال ۱۳۹۷ به بیش از ۵۰۷ میلیون دلار رسید. صالحی (۱۳۹۷) میزان سرانه مصرف آبزیان در سال ۱۳۵۷ را یک

ماکروفونا در رسوبات می‌شود. ورود مواد مغذی حاصل از پساب آبی‌پروری می‌تواند منجر به فرآیند خوراک‌وری^۱ در دریاچه‌ها و کانال‌های تخلیه شود، از این‌رو، استفاده از روش‌های تصفیه پایدار برای سازگاری با محیط‌زیست الزام‌آور است. اگرچه تاکنون از رویکردهای سنتی تصفیه پساب شامل روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی در سیستم‌های آبی‌پروری استفاده شده است، اما با این حال، کاربرد فناوری‌های جدید و پایدار برای تصفیه پساب‌های آبی‌پروری ضروری است. در این پژوهش، فن‌آوری‌های نوآورانه در آبی‌پروری ایران به منظور صرفه‌جویی در مصرف آب و همچنین، بهبود فرآیند تصفیه بررسی شده است. در این تحقیق، تلاش شده است، علاوه بر معرفی ویژگی هر کدام از فناوری‌ها، مقایسه‌ای بین آن‌ها صورت گیرد. امید است یافته‌های ارائه شده در این مطالعه بتواند در جهت دستیابی به صنعت آبی‌پروری پایدار که باتوجه به میزان منابع آبی یک کشور تحقق می‌یابد، مفید واقع شود. این مسئله در مورد کشورهای از قبیل ایران که با مشکل کم‌آبی در جهان روبه‌رو هستند، بسیار اهمیت دارد.

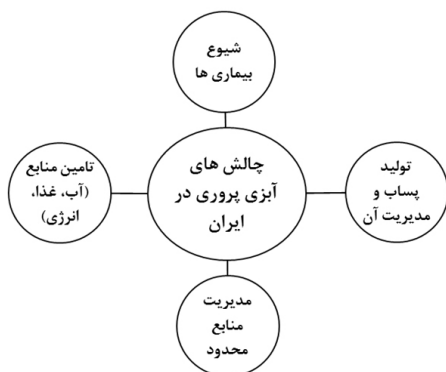
مفهوم توسعه پایدار

توسعه پایدار در گزارش کمیسیون برانتلند در سال ۱۹۸۷ به عنوان توسعه‌ای تعریف شد که نیازهای نسل حاضر را بدون به خطر انداختن توانایی نسل‌های آینده برای برآوردن نیازهای خود، برآورده می‌کند (IISD, ۲۰۲۲). چهار بُعد برای توسعه پایدار تعریف شده است که شامل جامعه، محیط‌زیست، فرهنگ و اقتصاد می‌باشد. این ابعاد به‌طور کامل در هم تنیده شده‌اند و جدا از یکدیگر نیستند. پایداری به عنوان الگویی برای نسل‌های آینده انگاشته می‌شود که در آن مسائل محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی به‌منظور دستیابی به یک زندگی با کیفیت، به حالت تعادل می‌رسند (UNESCO, ۲۰۲۲). لازم به ذکر است دسترسی به منابع آب کافی و با کیفیت و همچنین تأمین بهداشت از جمله پیش‌شرط‌های لازم برای تحقق توسعه پایدار در کشورهای در حال توسعه می‌باشند (Abu-Zeid, ۱۹۹۸).

چالش‌های پیش‌روی توسعه آبی‌پروری در ایران

در بخش آبی‌پروری دو هدف کلی وجود دارد که شامل (۱) به حداکثر رساندن نرخ رشد و (۲) به حداقل رساندن هزینه‌های تولید می‌باشد. نرخ رشد سریع، زمان دستیابی به اندازه قابل فروش را به حداقل می‌رساند و از طرف دیگر، نرخ ریسک را کاهش می‌دهد. کاهش هزینه‌های تولید موجب سودآوری بیشتر در صنعت آبی‌پروری می‌شود. برای انجام آن، تعدادی استراتژی وجود دارد که همه آن‌ها تا حدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این استراتژی‌ها

شامل به حداکثر رساندن تبدیل مواد غذایی و کاهش هزینه‌های آب، نیرو، فرآوری و ذخیره‌سازی می‌باشند (Allen و Steeby, ۲۰۱۱). یکی از چالش‌های اساسی در بخش آبی‌پروری در ایران، مشکل دسترسی به منابع شامل آب، غذا و انرژی می‌باشد (شکل ۱). باتوجه به وضعیت اقلیمی بسیاری از مناطق در ایران، دسترسی به آب با کیفیت مناسب در برخی از نقاط دشوار است، از طرف دیگر، انرژی و هزینه‌های بسیار زیادی نیز باید برای تصفیه آب استفاده شود که خود بخش دیگری از دشواری‌های پیش‌رو را تشکیل می‌دهد. این مسائل در گزارش‌های مختلف از جمله Allen و Steeby (۲۰۱۱) و Tom و همکاران (۲۰۲۱) نیز مطرح شده است، به‌طوری‌که این محققان، چالش‌های اصلی توسعه آبی‌پروری در کشورهای در حال توسعه مانند ایران را پیرامون مسائل مرتبط با حفاظت از محیط‌زیست، کمبود انرژی و تکنولوژی‌های موجود و کاهش منابع آب (شکل ۱) می‌دانند.

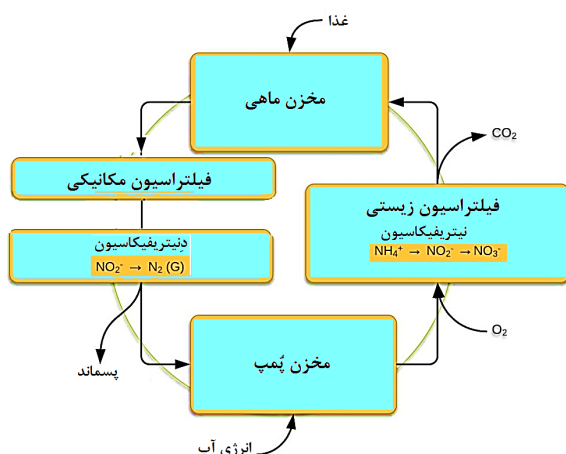


شکل ۱- چالش‌های پیش‌روی توسعه آبی‌پروری در ایران

تأمین غذا برای سیستم‌های آبی‌پروری اهمیت ویژه‌ای دارد، چراکه بیش از ۵۰ درصد هزینه‌های تولید را تشکیل می‌دهد و انرژی ورودی برای دستیابی به حداکثر رشد را فراهم می‌کند (FAO, ۲۰۲۱). در صنعت آبی‌پروری، خوراک از غذای زنده گرفته تا جیره‌های فرموله شده متغیر است و بیشتر با رشد و بلوغ گونه‌ها تغییر می‌کند (Allen و Steeby, ۲۰۱۱). بعد از غذا، آب در قلب صنعت آبی‌پروری قرار دارد. از این‌رو، سولاتی همچون کیفیت و کمیت آب مطرح می‌شود که در موفقیت عملیات آبی‌پروری نقش کلیدی دارد. پارامترهای کلیدی لازم برای هستی بیشتر گونه‌های آبی شامل اکسیژن محلول، دما، شوری، سختی، آمونیاک، نیتريت و میزان اسیدیته آب (pH) می‌باشند. انگیزه بیشتر عملیات آبی‌پروری، حفظ این متغیرهای کیفیت آب در محدوده‌هایی است که حداکثر رشد را تضمین می‌کنند. با این حال، کاهش مصرف آب و به حداقل رساندن پساب تولیدی نیز بسیار باارزش است. نوع رژیم غذایی اغلب به‌طور مستقیم بر کیفیت آب تأثیر می‌گذارد، چراکه غذای مصرف نشده و غذایی که توانایی هضم بالایی ندارد، باعث ورود مواد مغذی به آب

سیستم‌های متداول آبی‌پروری به میزان زیادی به آب نیاز دارند، از این رو، مهمترین عاملی که باید در این سیستم‌ها در نظر گرفته شود، پایداری در تأمین آب است. منابع آب متداول برای آبی‌پروری شامل آب‌های سطحی مانند رودخانه‌ها، چشمه‌ها، دریاچه‌ها، مخازن و همچنین چاه‌های آب زیرزمینی هستند. جریان آب در این سیستم‌ها باید به اندازه کافی برای رفع نیاز اکسیژن محلول و یا پاک‌سازی پسماندهای متابولیک گونه‌های آبی کافی باشد. در سیستم‌های متداول آبی‌پروری، تنها در صورتی می‌توان به خود تمیزشوندگی دست یافت که سرعت جریان به اندازه کافی در سیستم زیاد باشد. محدودیت‌های سیستم آبی‌پروری متداول و معمولی را می‌توان با استفاده از سیستم آبی‌پروری مدار بسته (RAS) برطرف نمود (Waller, 2001؛ Tom و همکاران، 2021).

سیستم آبی‌پروری مدار بسته (RAS) پساب را با حذف آلاینده‌های سمی و بازیافت آب تصفیه شده، پالایش می‌کند. بنابراین، تاندازه‌ای حجم کمی از آب برای تولید مقادیر زیادی ماهی در سیستم‌های RAS استفاده می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲- اصول اولیه در سیستم‌های آبی‌پروری مدار بسته (Aquaculture ID، 2022)

پساب را می‌توان به‌طور جزئی یا کامل به مخازن ماهی برگرداند. سیستم آبی‌پروری مدار بسته ۵ تا ۱۰ درصد جایگزینی آب در روز را بسته به عرضه و نرخ تغذیه خواهد داشت (NFDB، 2022). استفاده از سیستم‌های آبی‌پروری مدار بسته اثر آلودگی بر پرورش ماهی را کاهش می‌دهد و علاوه بر آن، استفاده از آب شیرین و پاک را نیز به حداقل می‌رساند (Akinwale و Dauda، 2014). از این رو، می‌توان بیان نمود، این نوع از سیستم‌های آبی‌پروری، سازگار با محیط‌زیست هستند. حذف مواد جامد، مواد آلی، آمونیاک و نیتریت برای توسعه سیستم‌های آبی‌پروری مدار بسته حیاتی است (Zheng و همکاران، 2013). در سیستم‌های آبی‌پروری مدار

می‌شود. ورود این مواد مغذی به محیط آب می‌تواند منجر به ایجاد شرایط پوتروفتیک شود. ورود مواد مغذی عامل محرکه‌ای برای رشد میکروب‌ها، فیتوپلانکتون‌ها و گیاهان می‌باشد که در نهایت، ممکن است منجر به کاهش کیفیت آب شود. با این حال، مقدار مواد مغذی موجود در پساب با زمان نگهداری آب و نرخ گردش هیدرولیکی پیوسته است. بنابراین، کیفیت آب رابطه مستقیمی با شدت و نوع سیستم آبی‌پروری مورد استفاده دارد (Steeby و Allen، 2011). علاوه بر موارد گفته شده، توسعه سیستم‌های آبی‌پروری چالش‌های مختلفی دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به پیدایش آلودگی‌های مختلف و شیوع بیماری‌ها (شکل ۱) اشاره کرد. تولید متراکم آبزیان در محیط پرورشی و استفاده از آنتی بیوتیک‌ها، مواد شیمیایی ضد عفونی‌کننده و آفت‌کش‌ها همگی مشکلاتی هستند که می‌توانند زمینه‌ساز پیدایش آلودگی‌های محیط‌زیستی باشند. به‌طوری‌که اگر چنانچه این موارد مدیریت نشوند، می‌توانند بسیاری از اراضی اطراف را نیز تحت تأثیر قرار دهند (رادخواه و همکاران، 1400؛ رادخواه و صادقی‌نژاد ماسوله، 1400). پدیدار شدن آلودگی در سیستم‌های پرورشی می‌تواند زمینه‌ساز افزایش عوامل میکروبی در این سیستم‌ها باشد که در نهایت، موجب شیوع بیماری‌هایی می‌شوند که حتی ممکن است از جانوران آبی به انسان نیز انتقال یابد (Steeby و Allen، 2011).

پساب به‌دست آمده از فعالیت‌های آبی‌پروری که دربرگیرنده مواد جامد معلق، ترکیبات نیترژن و ترکیبات فسفر است، به‌عنوان یکی از محدودیت‌های اصلی در سیستم آبی‌پروری مورد توجه قرار گرفته است (شکل ۱) و نیاز به مدیریت ویژه دارد. تصفیه پساب در سیستم‌های آبی‌پروری به‌منظور تولید ماهی سالم و همچنین، جلوگیری از اثرات زیان‌آور آلاینده‌ها بر محیط‌زیست ضروری است. به‌دلیل بار اقتصادی و مصرف انرژی بالا، محدودیت‌های زیادی برای استفاده از تصفیه‌خانه‌های معمولی در سیستم‌های آبی‌پروری وجود دارد. علاوه بر آن، استفاده از روش‌های سنتی تصفیه مانند روش‌های تصفیه هوازی و بی‌هوازی برای پساب آبی‌پروری، منجر به آزادسازی گازهای گلخانه‌ای مانند CO₂ و CH₄ می‌شود (Dume و همکاران، 2021). از این رو، بهبود روش‌های سنتی و مرسوم تصفیه برای حفظ پایداری در صنعت آبی‌پروری ضروری است.

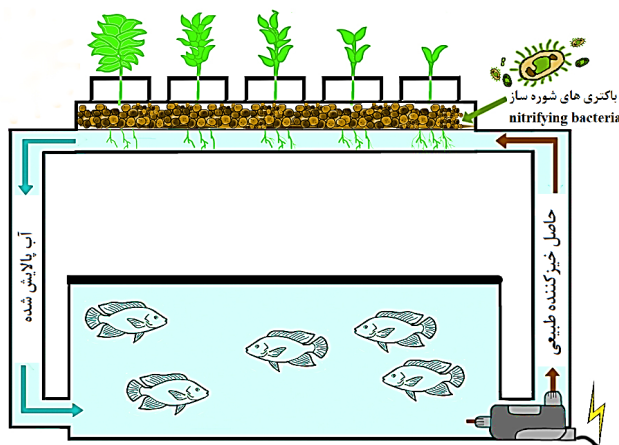
در سیستم‌های آبی‌پروری، کاهش مصرف آب از طریق دو شیوه؛ (۱) تصفیه پسماند به‌دست آمده از فعالیت‌های پرورشی و (۲) یک کردن آبی‌پروری با فعالیت‌های کشاورزی قابل اجرا است (Verdegem و همکاران، 2006). استفاده از سیستم آبی‌پروری مدار بسته^۲ (RAS) در جهت بهره‌برداری چندباره از آب و سپس تصفیه آن می‌تواند در راستای کاهش مصرف آب در صنعت آبی‌پروری مفید باشد. با این حال، یکی کردن آبی‌پروری با فعالیت‌های کشاورزی در شیوه‌های آکواپنیک نیز رویکرد دیگری است که در جهت صرفه‌جویی در مصرف آب به‌دست آمده است.

بسته، ماهی‌ها را می‌توان در کنار سایر ارگانیسم‌ها پرورش داد، چراکه مواد مغذی ناشی از پسماند رها شده ماهیان می‌تواند توسط سایر ارگانیسم‌ها مصرف شود (Dauda و همکاران، ۲۰۱۹). این وضعیت می‌تواند سیستم را پایدارتر از سیستم‌های گذشته کند. حذف پسماند در سیستم‌های مدار بسته از شیوه حذف فیزیکی جامدات و تبدیل آمونیاک و نیتريت به نیترات از شیوه فرآیند نیتريفيکاسیون انجام می‌شود. لازم به ذکر است نیتريفيکاسیون نمی‌تواند منجر به کاهش کلی ضایعات نیتروژنی شود، بلکه تنها آمونیاک را به نیترات تبدیل می‌کند و در نتیجه باعث تجمع نیترات و کاهش اسیدیته (pH) آب می‌شود (AWWA، ۲۰۰۲). از این رو، سیستم‌های مدار بسته به ۱۰ تا ۲۰ درصد تبادل آب در هر روز نیاز دارند تا تجمع نیترات را کاهش دهند و آب با کیفیت مناسب را برای حیات آبزیان تأمین نمایند (Martins و همکاران، ۲۰۱۰). غلظت بالای نیترات در سیستم مدار بسته برای ماهیان سمی است و می‌تواند منجر به یوتريفيکاسیون، کاهش اکسیژن و سمیت در سیستم‌های آبی‌پروری شود (Dauda و Akinwale، ۲۰۱۴؛ Aquaculture ID، ۲۰۲۲). استفاده از بیوفیلترهای نیترات‌زدایی^۲ در سیستم مدار بسته جهت کاهش هزینه انرژی و بهبود کارایی این سیستم موثر است و هزینه عملیات را تا ۱۰ درصد کاهش می‌دهد (Preena و همکاران، ۲۰۲۱). نیترات‌زدایی در بیوفیلترها باعث می‌شود ترکیبات نیتروژن معدنی مانند نیتريت و نیترات به نیتروژن عنصری تبدیل شوند (Moloantoa و همکاران، ۲۰۲۲). این فرآیند با محدودیت‌هایی همراه است، چراکه نیازمند پرسنل ماهر برای بهره‌برداری و نگهداری فیلترها است. کاستی‌های استفاده از سیستم مدار بسته و جستجو برای یافتن راه‌حلی بهتر، منجر به بروز فناوری‌های نوآورانه در این زمینه می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به یکی کردن روش‌های گیاه پالایی در سیستم‌های مدار بسته اشاره کرد. بررسی تحقیقات گذشته و همچنین آموخته‌های محققان نشان داده است، یکی کردن این روش‌ها با سیستم‌های مدار بسته در بهبود کارایی تصفیه، موفقیت‌آمیز بوده است. مویید این نکته گزارش‌هایی است که پیرامون حذف قابل توجه جامدات معلق، مواد آلی، نیتروژن، فسفر، عناصر کمیاب و میکروارگانیسم‌ها در پساب‌های آبی‌پروری ارائه شده است (Tom و همکاران، ۲۰۲۱).

استفاده از آکوپونیک در سیستم مدار بسته

آکوپونیک یک سیستم تولید مواد غذایی است که شیوه‌های گسترش یافته آبی‌پروری و سیستم مدار بسته را با هم ترکیب می‌کند (شکل ۳). روش گفته شده شامل پرورش جانوران آبی از قبیل حلزون، ماهی، خرچنگ یا میگو در مخازن هیدروپونیک است. این امر با کشت گیاهان در آب،

در یک محیط هم‌زیست به‌دست می‌آید (Stathopoulou و همکاران، ۲۰۱۸). در سیستم‌های متداول آبی‌پروری، مواد دفعی به‌دست آمده از موجودات پرورش یافته می‌تواند در آب تجمع یابد و در نهایت، موجب افزایش سمیت در محیط شود. در سیستم آکوپونیک، آب از یک سیستم آبی‌پروری به سیستم هیدروپونیک منتقل می‌شود. در سیستم هیدروپونیک، مواد مورد نظر توسط باکتری‌ها به نیترات و آمونیوم تجزیه می‌شوند که توسط گیاهان به‌عنوان مواد مغذی استفاده می‌شوند. سپس، آب دوباره به سیستم آبی‌پروری بازگردانده می‌شود (Tyson و همکاران، ۲۰۱۱؛ Dunwoody، ۲۰۱۳). بنابراین، سیستم آکوپونیک ترکیبی از جانوران و گیاهان آبی می‌باشد. گیاهان را می‌توان به‌طور هم‌زمان در سیستم‌های آبی‌پروری و در زمانی که در فضای باز یا در ساختمان‌هایی با نور کافی قرار می‌گیرند، کشت کرد. شایان ذکر است، چند نوع گیاه در سیستم آکوپونیک استفاده می‌شود که شامل گیاهان شناور و غوطه‌ور می‌باشند. گیاهان شناور به‌طور طبیعی با برگ‌های خود در بالای سطح آب شناور هستند، درحالی‌که ریشه‌های آن‌ها در آب معلق می‌باشد. از گیاهان شناوری که به‌طور متداول در سیستم‌های آبی‌پروری قابل کشت هستند، می‌توان به کاهوی آبی (*Pistia sp.*)، سنبل آبی (*Eichhoria crassipes*) و سرخس آبی (*Azolla sp.*) اشاره کرد (شکل ۴). لازم به ذکر است از این گیاهان می‌توان به‌عنوان غذا برای ماهی‌های گیاه‌خوار مانند تیلاپیا و کپور علف‌خوار استفاده کرد. علاوه‌برآن، گیاهان مذکور در کاهش رشد فیتوپلانکتون‌ها در آب نیز مفید هستند (Nazari و Mohebi، ۲۰۲۱). به‌عنوان مثال، سنبل آبی می‌تواند در طول یک روز، بیش از یک گرم نیتروژن در هر متر مربع از سیستم پرورشی را حذف نماید (Jusoh و همکاران، ۲۰۲۰).



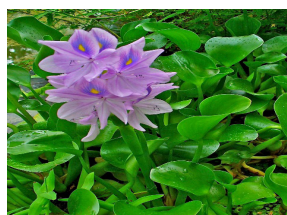
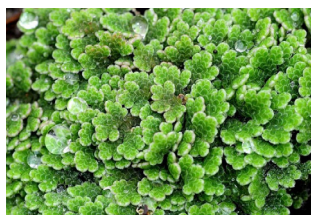
شکل ۳- نمایی از یک سیستم آکوپونیک. ماهیان، گیاهان، باکتری‌ها و آب اجزای اصلی یک سیستم آکوپونیک را تشکیل می‌دهند (Growing Passion، ۲۰۲۲)

یکی از نکات مهم در مورد گیاهان موجود در سیستم‌های آبی‌پروری، انتخاب نوع نیتروژن ترجیحی می‌باشد که می‌تواند شامل نیتروژن آمونیومی یا نیتروژن نیتراتی باشد. در واقع، گیاهان می‌توانند نیتروژن را به صورت نیترات (NO_3^-) یا آمونیوم (NH_4^+) جذب کنند، بنابراین جذب کل نیتروژن بیشتر ترکیبی از این دو شکل است. ترجیح نوع نیتروژن برای گونه‌های گیاهی مختلف، متفاوت است. هر گونه گیاهی برای جذب و رشد بهینه به نسبت متفاوتی از آمونیوم و نیترات نیاز دارد که این نسبت نیز باتوجه به دما، مرحله رشد گیاه، میزان pH در ناحیه ریشه و عوامل دیگر متفاوت است (Boudsocq و همکاران، ۲۰۱۲). هنگامی که سطح آمونیوم بالاتر است، قندها باید از برگ‌ها به ریشه منتقل شوند تا آمونیوم متابولیزه شود. در گیاهان گل‌دار و بارده مانند گوجه‌فرنگی و خیار و گیاهانی که بیشترین رشد را در برگ‌ها دارند (مانند کلم، کاهو، اسفناج)، قندها به سرعت در نزدیکی محل تولید مصرف می‌شوند و برای انتقال به ریشه بسیار کمتر در دسترس هستند. در این حالت، آمونیوم به طور مؤثر متابولیزه نمی‌شود و استفاده از نسبت پایین‌تر آمونیوم به نیترات برتری دارد (علیزاده، ۱۴۰۱). بسیاری از گیاهان

آبی مانند کاهوی آبی، سنبل آبی و سرخس آبی اغلب از نیتروژن نیتراتی استفاده می‌کنند.

دو تکنیک جدا از هم ممکن است برای کاهش مصرف انرژی استفاده شود: (۱) استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و (۲) کاهش پمپاژ آب. در مورد تکنیک دوم می‌توان بیان داشت با کاهش تعداد پمپ‌ها به حداقل و بهینه‌سازی جریان آب، ممکن است در مصرف انرژی صرفه‌جویی شود. یافتن تعادل صحیح بین این دو عنصر می‌تواند مصرف انرژی را کاهش دهد و در عین حال، بهره‌وری و سودآوری سیستم را افزایش دهد (Tom و همکاران، ۲۰۲۱).

در سیستم‌های دریایی از گیاهان مقاوم به شوری، برای تصفیه پسماند استفاده می‌شود (Brown و همکاران، ۱۹۹۹؛ Buhmann و Papenbrock، ۲۰۱۳). این گیاهان با جذب نیترات، فسفات و سایر ترکیبات به عنوان فیلترهای زیستی عمل می‌کنند. این مسئله می‌تواند بر حضور مناطق اکسیژن‌دار در خاک تأثیر بگذارد و موجب رشد باکتری‌های خاص و فرآیندهایی مانند آمونیفیکاسیون و نیتریفیکاسیون شود (Brown و همکاران، ۱۹۹۹).



کاهوی آبی (*Pistia sp.*) سنبل آبی (*Eichhornia crassipes*) سرخس آبی (*Azolla sp.*)
 شکل ۴- نمونه‌ای از گیاهان آبی قابل کشت در سیستم‌های آکواپونیک (Latour Marliac، ۲۰۲۲؛ IFAS، ۲۰۲۲؛ Jardineria، ۲۰۲۲)

سیستم‌های پرورشی مبتنی بر ریزجلبک‌ها

مفهوم آبی‌پروری استوار بر ریزجلبک‌ها، به معنای تبدیل مواد آلی موجود در پساب‌های یوتروفیک به زیست‌توده^۱ و رشد ریزجلبک‌ها است که این زیست‌توده می‌تواند تا حدی جایگزینی برای خوراک آبی‌پروری و افزایش ایمنی جانوران آبی باشد. همچنین، ساخت یک سیستم برپایه ریزجلبک می‌تواند پایداری دی اکسید کربن را افزایش دهد، باعث آزاد شدن اکسیژن شود و مانند یک پمپ زیستی عمل کند. برآیند این عوامل می‌تواند محیط مناسبی را برای جانوران آبی فراهم سازد. ریزجلبک‌ها مواد مغذی موجود در پساب آبی‌پروری را جذب می‌کنند و از این رو، زیست‌توده جلبک را می‌توان برداشت نمود و از آن به عنوان خوراک آبی‌پروری استفاده کرد (Nagappan و همکاران، ۲۰۲۱). محدودیت‌های اصلی فناوری سیستم مدار بسته (RAS) شامل هزینه‌های زیاد سرمایه‌گذاری و نگهداری سیستم می‌باشد که با تبدیل مواد مغذی به دست آمده از پساب آبی‌پروری به زیست‌توده جلبکی می‌توان بر این محدودیت‌ها پیروز شد. این امر می‌تواند به طور هم‌زمان فرآیند

تصفیه را نیز بهبود بخشد (Maiga و همکاران، ۲۰۱۷؛ Omondi و Navalina، ۲۰۲۰). استفاده از ریزجلبک‌ها به عنوان خوراک می‌تواند اثرات محیط‌زیستی پرورش ماهیان را کاهش دهد (Nagappan و همکاران، ۲۰۲۱). کشت جلبک در سیستم‌های تصفیه پسابی که برآمده از فعالیت‌های آبی‌پروری هستند، می‌تواند به منظور تولید زیست‌توده و همچنین برای تولید لپید استفاده شود، چراکه این سیستم‌ها بی‌چون و چرا دوستدار محیط‌زیست بوده و از نظر اقتصادی نیز برای رواج دادن مفهوم هم‌زیستی و پایداری مورد توجه هستند (Tossavainen و همکاران، ۲۰۱۹). براساس مطالعه Abdel-Raouf و همکاران (۲۰۱۲)، جلبک‌های رشد یافته در پساب‌های غنی از نیتروژن (N)، منابع با ارزشی از ترکیبات نیتروژنی مفید مانند آنتی‌اکسیدان‌ها را تشکیل می‌دهند. اگرچه استفاده از جلبک‌ها در سیستم‌های مدار بسته با مزایای مختلفی همراه است، اما با این حال، وجود مواد مغذی اضافی در این سیستم‌ها می‌تواند پیامدهای نامطلوبی مانند شکوفایی جلبکی را به همراه داشته باشد.

از جمله اثرات ناشی از افزایش ریزجلبک‌ها در سیستم‌های آبی‌پروری، می‌توان به تولید سموم مختلف اشاره کرد که بیشتر با

شکوفایی جلبک‌ها یا رشد سریع و بی‌اندازه متراکم جلبک‌ها همراه است (Pelley, ۲۰۱۶). افزایش متراکم جلبک‌ها حتی جلبک‌های غیرسمی می‌تواند برای جانوران پرورش یافته به یک فاجعه تبدیل شود، چراکه شکوفایی جلبک‌ها میزان اکسیژن آب را در بسیاری از سیستم‌های آبی‌پروری کاهش می‌دهد و از این رو، حیات آبزیان مانند ماهی‌ها را به خطر می‌اندازد. اثرات ناشی از شکوفایی میکروجلبک‌ها بسیار متفاوت است. برخی از جلبک‌ها فقط در تراکم‌های بسیار بالا سمی هستند، درحالی‌که برخی دیگر در تراکم‌های بسیار کم (چند سلول در لیتر) می‌توانند سمی باشند (Hofbauer, ۲۰۲۱). افزایش برخی از جلبک‌ها در سیستم‌های آبی‌پروری می‌تواند رنگ آب را تغییر دهد، درحالی‌که اثرات بعضی دیگر از جلبک‌ها بر ویژگی‌های آب کم‌وبیش غیرقابل تشخیص است (Banrie, ۲۰۱۳). یکی دیگر از اثرات مهم برآمده از افزایش ریزجلبک‌ها در سیستم‌های آبی‌پروری، گرفتگی لوله‌ها، اتصالات و غیره می‌باشد (Banrie, ۲۰۱۳). باتوجه به افزایش بار مواد مغذی در سیستم‌های پرورشی، بسیاری از گونه‌های جلبکی امکان شکوفایی پیدا نمی‌کنند. شکوفایی جلبک‌ها علاوه بر تأثیرات مستقیمی که بر کیفیت آب سیستم پرورشی می‌گذارد، بسیاری از محل‌های ورودی و خارجی آب مانند لوله‌ها و اتصالات را نیز اشغال می‌نمایند که به مرور زمان، منجر به گرفتگی لوله‌ها و قطع جریان آب می‌شود. بررسی اثرات برآمده از شکوفایی ریزجلبک‌ها در کشورهای مختلف نشان داده است که این پدیده با زیان‌های اقتصادی فراوانی همراه است. به عنوان مثال، در ایالات متحده آمریکا، اثرات اقتصادی برآمده از افزایش ریزجلبک‌ها در سیستم‌های آبی‌پروری بیش از ۴۰ میلیون دلار در سال یا ۱ میلیارد دلار در هر دهه است برآورد شده است (Hudnell, ۲۰۰۸). به‌طور کلی، افزایش ریزجلبک‌ها در سیستم‌های آبی‌پروری، به‌ویژه سیستم‌های مدار بسته، باعث بروز مشکلات مختلف برای آبی‌پرورشی و همچنین، گرفتگی لوله و اتصالات و غیره می‌شود. باتوجه به این موضوع، برداشت ریزجلبک‌ها پس از تصفیه پساب به پیشگیری از این مشکل کمک می‌کند. انعقاد/لخته‌سازی، سانتریفیوژ و فیلتراسیون سه روش برداشت هستند که برای کاربردهای مختلف مانند سوخت زیستی، غذای انسان و حیوان و بازسازی کیفیت آب استفاده می‌شوند (Branyikova و همکاران، ۲۰۱۸؛ Matter و همکاران، ۲۰۱۹؛ Najjar و Abu-Shamleh, ۲۰۲۰).

سیستم آبی‌پروری یکپارچه چندمنظوره

صنعت آبی‌پروری برای ادامه رشد نیاز به توسعه فناوری‌ها و شیوه‌های نوآورانه‌تر، مسئولانه‌تر، پایدار و سودآور دارد که باید از نظر محیط‌زیستی کارآمد و بی‌خطر و از نظر اجتماعی سودمند باشند. حفظ پایداری در این بخش، نه تنها از دیدگاه محیط‌زیستی، بلکه از دیدگاه اقتصادی، اجتماعی و فنی نیز به یک موضوع کلیدی

تبدیل شده است (Zenghelis و Ekins, ۲۰۲۱). آبی‌پروری یکپارچه شامل استفاده از ارگانیسم‌های مختلف در سیستم‌های پرورشی می‌باشد که تعادل مواد مغذی را بهینه کرده و جامدات آلی موجود در پساب و رسوبات را کاهش می‌دهد (Alexander و همکاران، ۲۰۱۶). این روش یک رویکرد هم‌زیستی برای تصفیه پساب آبی‌پروری است (Rosa و همکاران، ۲۰۲۰؛ Correia و همکاران، ۲۰۲۰). در شکل (۵) نمایی کلی از سیستم آبی‌پروری یکپارچه چندمنظوره^۵ (IMTA) ارائه شده است. این سیستم ترکیبی از سطوح تغذیه‌ای مختلف را نشان می‌دهد (شکل ۵) و از مواد مغذی آلی و معدنی که توسط موجودات مختلف در دسترس است، استفاده می‌کند (Chopin و همکاران، ۲۰۱۰). مفهوم IMTA بسیار انعطاف‌پذیر است، بنابراین می‌توان آن را بر اساس شرایط محیطی، زیستی، فیزیکی، شیمیایی، اجتماعی و اقتصادی توسعه داد. این روش را می‌توان برای سیستم‌های آب‌های آزاد یا زمینی و سیستم‌های دریایی یا آب شیرین به کار برد (Chopin و همکاران، ۲۰۱۰). در سیستم‌های یکپارچه، ذرات آلی و مواد مغذی محلول موجود در پساب توسط گونه‌هایی با سطوح تغذیه‌ای پایین‌تر جذب می‌شوند (Alexander و همکاران، ۲۰۱۶). این رویکرد به حذف تمام آلودگی‌های معدنی و آلی در پساب آبی‌پروری کمک می‌کند. علاوه بر این، از این روش می‌توان در ترکیب با واحدهای تصفیه هوازی-بی‌هوازی استفاده کرد چراکه باعث کاهش هزینه، مصرف انرژی و همچنین، پایداری بیشتر آن‌ها می‌شود (Chopin, ۲۰۱۳). تولید اکسیدان‌های طبیعی با استفاده از پساب آبی‌پروری یکی از پیشرفت‌های نوآورانه‌ای است که در زمینه سیستم‌های آبی‌پروری یکپارچه و چندمنظوره (IMTA) به دست آمده است. ساخت آنتی‌اکسیدان طبیعی برای درمان بیماری‌هایی مانند بیماری‌های قلبی، سرطان‌های خاص، آرتریت، پارکینسون، بیماری‌های گوارشی و بیماری آلزایمر ضروری است (Pham-Huy و همکاران، ۲۰۰۸). این نوع از آنتی‌اکسیدان‌ها نسبت به محصولات مصنوعی پایدارتر هستند. درشت‌جلبک‌ها به عنوان منبع مهمی از ترکیبات زیست‌فعال طبیعی در نظر گرفته می‌شوند (Olasehinde و همکاران، ۲۰۱۹؛ Elena-Suzana و همکاران، ۲۰۲۰). فعالیت آنتی‌اکسیدانی شناسایی شده در جلبک‌ها بیشتر شامل کلروفیل و مشتقات آن، کاروتنوئیدها، ویتامین‌های E و C، فوکوزانتین (Wang و همکاران، ۲۰۱۸)، آنزیم‌ها، اسیدهای آمینه شبه مایکوسپورین، پلی‌ساکاریدها و پلی‌فنل‌ها است (Alghazwi و همکاران، ۲۰۱۹؛ Elena-Suzana و همکاران، ۲۰۲۰). استفاده از درشت‌جلبک‌ها برای استخراج ترکیبات، روشی پایدار و غیرسمی برای تولید آنتی‌اکسیدان‌ها است که به سادگی انجام می‌شود. از این رو، می‌توان درشت‌جلبک‌ها را با هزینه کم در سیستم‌های آبی‌پروری یکپارچه و چندمنظوره (IMTA) کشت کرد (Guerrero و Cremades, ۲۰۱۲؛ Califano

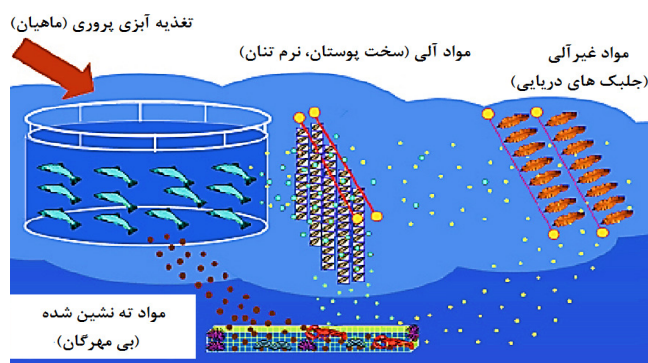
امنیت منابع اساسی مانند آب، انرژی و غذا برای توسعه پایدار امری ضروری است. رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و تغییر الگوی مصرف باعث ایجاد فشار بر این منابع شده است. انتظار می‌رود در آینده نزدیک، در بسیاری از نقاط جهان، تقاضای جمعیت و دسترسی به نیازهای اولیه مانند غذا با چالش روبه‌رو شود. امروزه، صنعت آبزی‌پروری که به‌عنوان یکی از مشارکت‌کنندگان بزرگ تولید مواد غذایی در سراسر جهان شناخته می‌شود، با چالش‌های جدی روبه‌رو است که دسترسی به آب باکیفیت زیاد به‌عنوان یکی از مسائل اساسی در این صنعت به‌شمار می‌رود. این امر نیازمند پختگی فناوری‌های پایدار برای تصفیه پسماند آبزی‌پروری است. حفظ کیفیت مناسب آب برای تولید محصولات و علاوه‌برآن، کنترل اثرات سوء ناشی از پسماندهای آبزی‌پروری یک نیاز ضروری برای حفظ پایداری است. تاکنون، استفاده بیشتر از شیوه‌های غیرعلمی آبزی‌پروری منجر به هدر رفتن انرژی یا مصرف بیشتر انرژی شده است. در سیستم‌های معمولی، کیفیت آب را می‌توان از طریق جایگزینی پساب با آب تازه حفظ کرد. تحقق این هدف نیاز به تجهیزات گران‌قیمت برای تصفیه پساب ندارد و از دیدگاه اقتصادی ارزان است.

تصفیه پساب‌های آبزی‌پروری چالش بزرگی است که امروزه این صنعت مهم با آن روبه‌رو است. روش‌های گسترش یافته و همگانی برای تصفیه پساب، به گردش آب زیادی نیاز دارند. ازاین‌رو، در سناریوی کنونی به‌دلیل کمبود آب در بسیاری از نقاط جهان از جمله ایران، این روش به‌عنوان یک رویکرد پایدار مورد پذیرش نیست. سیستم آبزی‌پروری مدار بسته (RAS) که پساب را با حذف آلاینده‌های سمی و بازیافت آب، پالایش می‌کند، تنها به ۱۰ درصد از حجم کل آب شیرین برای تولید مقادیر زیاد ماهی نیاز دارد (Lin و همکاران، ۲۰۰۲). ازاین‌رو، این سیستم پایدارتر از روش‌های معمولی تصفیه است. اما با این حال، سیستم مدار بسته محدودیت‌هایی مانند بارگیری هیدرولیکی کمتر و تجمع نیترات دارد که منجر به یوتروفیکاسیون و سمیت برای گونه‌های ماهی می‌شود. علاوه‌براین، هزینه بالای انرژی برای تأمین اکسیژن و حذف سمی بودن در سیستم‌های آبزی‌پروری مدار بسته، استفاده از این روش‌ها را از نظر اقتصادی غیرممکن ساخته است. علاوه‌بر تجمع نیترات در سیستم‌های مدار بسته، محدودیت‌های دیگری نیز وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به نصب، راه‌اندازی و بهبود کارایی فیلترهای زیستی، پیشگیری و مبارزه با بیماری‌ها، حذف مواد جامد معلق در این سیستم و مدیریت سخت سیستم مدار بسته اشاره کرد.

تولید زیست‌توده جلبکی از پساب آبزیان یکی دیگر از فناوری‌های نوآورانه در بخش آبزی‌پروری است. از محدودیت‌های اصلی

و همکاران، ۲۰۲۰). استفاده از جلبک‌ها به‌عنوان منبع ترکیبات آنتی‌اکسیدانی نیازمند بهره‌وری بالای زیست‌توده است. پساب‌های آبزی‌پروری منبع سرشار از نیتروژن و فسفات می‌باشند. از این استراتژی می‌توان برای تولید جلبک‌های پرورشی با هزینه کمتر استفاده کرد. از طرف دیگر، اثرات محیط‌زیستی منفی فعالیت‌های آبزی‌پروری را کاهش داد. جلبک‌های دریایی، به‌ویژه *Ulva spp* و *Gracilaria spp*، به‌عنوان فیلترهای زیستی برای حذف نیتروژن معدنی محلول از پساب‌های آبزی‌پروری استفاده شده است (Chopin, ۲۰۱۳). زیست‌توده جلبکی تولید شده در سیستم‌های IMTA می‌تواند به‌عنوان غذا برای جانوران یا به‌عنوان منبع مواد با ارزش تجاری استفاده شود (Guerrero و Cremades, ۲۰۱۲). جلبک‌هایی که در پساب‌های سرشار از نیتروژن رشد می‌کنند، منبع خوبی از ترکیبات نیتروژن (N) هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به فیکوبیلی پروتئین‌ها که به‌عنوان نشانگرهای فلورسانس استفاده می‌شوند، اسیدهای آمینه شبه مایکوسپورین (MAAs)، یا ترکیبات فنولی که به‌عنوان مواد نمایشگر UV استفاده می‌شوند، اشاره کرد (Pagels و همکاران، ۲۰۱۹؛ Ramli و همکاران، ۲۰۲۰).

در پژوهش‌های Chopin (۲۰۱۳) و Burge و همکاران (۲۰۱۶)، کارایی جلبک‌های دریایی و دوکفه‌ای‌ها در تصفیه پساب میگو یا ماهی که یکی دیگر از سیستم‌های IMTA است، نشان داده شده است. صدف‌ها که به‌عنوان فیلترکننده‌های غیرانتخابی (به این معنا که همواره جدا از نوع ترکیبات موجود در آب، در حال فیلتر آن به درون بدن هستند) شناخته می‌شوند، به‌طور طبیعی می‌توانند مواد آلی را به‌صورت زیست‌توده در خود ذخیره کنند (Burge و همکاران، ۲۰۱۶). علاوه‌برآن، برخی از تحقیقات از جمله Suckling و Kerrigan (۲۰۱۸) و Strand و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند عملکرد رشد دوکفه‌ای‌ها می‌تواند در سیستم‌های یکپارچه چندمنظوره بهبود یابد. علاوه‌برآن، بهره‌وری میگو نیز با حضور گونه‌های ثانویه افزایش می‌یابد که بیشتر به بهبود کیفیت آب نسبت داده می‌شود (Poli و همکاران، ۲۰۱۹).



شکل ۵- نمایی از یک سیستم آبزی‌پروری یکپارچه چندمنظوره (Chopin و همکاران، ۲۰۱۰)

فناوری سیستم‌های مدار بسته (RAS) می‌توان به هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری و نگهداری آن اشاره کرد که با تبدیل مواد مغذی به دست آمده از پساب آبی‌پروری به زیست‌توده جلبکی می‌توان بر این محدودیت‌ها پیروز شد. در نهایت، سیستم ترکیبی و یکپارچه شامل استفاده از ارگانیسم‌های مکمل می‌باشد که می‌تواند به منظور بهینه‌سازی تعادل مواد مغذی و کاهش جامدات آلی در پساب و رسوبات مورد توجه قرار گیرد.

آکوابونیک یک سیستم هیدروپونیک است که از آبی‌پروری برای رشد گیاهان استفاده می‌کند. این نوع از سیستم آبی‌پروری به تولید کنندگان اجازه می‌دهد که گونه‌های آب شیرین و شور را با شرایط کنترل شده پرورش دهند. در سیستم‌های آکوابونیک، فضولات ماهی با استفاده از باکتری‌ها به مواد مغذی برای گونه‌های گیاهی و سبزیجات تبدیل می‌شوند. کل این فرآیند سازگار با محیط‌زیست است، در مصرف آب صرفه‌جویی می‌کند و پسماندی تولید نمی‌کند (Yavuzcan Yildiz و همکاران، ۲۰۱۷).

برتری‌های محیط‌زیستی و اقتصادی این سیستم‌ها، مانند بهره‌وری آب، از عوامل مهم برای تولید پایدار است. یکی از برتری‌های اصلی آکوابونیک این است که این سیستم با مصرف آب تا ۱۰ برابر کمتر از کشاورزی سنتی، به بهره‌وری آب کمک می‌کند. این سیستم میزان هدر رفت آب را به حداقل می‌رساند و امکان استفاده مجدد از عناصر دیگر مانند مواد مغذی را فراهم می‌نماید (Rakocy، ۲۰۱۲). سامانه آکوابونیک مانند سایر سیستم‌های هیدروپونیک، نیازی به استفاده از مواد شیمیایی ندارد. استفاده نکردن از مواد شیمیایی نه تنها هزینه‌های ورودی را پایین نگه می‌دارد، بلکه برتری‌های محیط‌زیستی زیادی به همراه دارد و سلامت انسان را تأمین می‌کند. سیستم آکوابونیک اگرچه با بازدهی زیادی همراه است، اما کاستی‌هایی نیز دارد. راه‌اندازی سیستم‌های آکوابونیک می‌تواند گران باشد به‌طوری‌که امکانات زیرساختی برای این سیستم‌ها می‌تواند برخی از تولیدکنندگان را از سرمایه‌گذاری بازدارد (Marsh، ۲۰۲۰). هزینه اولیه راه‌اندازی یک سیستم آکوابونیک برای تولیدکنندگان متوسطی که به دنبال نصب سیستمی بزرگتر از مقیاس خانگی و کوچکتر از مقیاس تجاری هستند، کمی دشوار به نظر می‌رسد. عملیات تجاری بسته به نوع سیستم نصب شده می‌تواند از ۲۵۰۰۰ دلار تا بیش از ۱۰۰۰۰۰ دلار متغیر باشد (Marsh، ۲۰۲۰). یکی دیگر از کاستی‌های محدودیت‌های سیستم آکوابونیک، انتخاب گونه‌های لازم برای پرورش است. سیستم آکوابونیک برای پرورش تعداد بی‌شمار گونه ماهی و تعداد بی‌شمار نوع گیاه مناسب است (Junge و Graber، ۲۰۰۹)، اما محدوده انتخاب گونه‌ها برای این سیستم محدود است. اگرچه در سیستم‌های آکوابونیک، امکان پرورش گونه‌های آبی‌آب شور و شیرین مانند تیلپیا، کپور و باس وجود دارد، اما دامنه انتخاب گونه‌های گیاهی محدود است. این

مسئله موجب محدودیت در سامانه‌های آکوابونیک شده است (Ravindranath، ۲۰۱۷؛ Travis، ۲۰۱۸).

سیستم آبی‌پروری یکپارچه چندمنظوره (IMTA) از ارگانیسم‌های مختلف که سطوح غذایی گوناگونی را استفاده می‌کنند، تشکیل شده است. در این سیستم‌ها، کلیه مواد مغذی به واسطه ارگانیسم‌ها مصرف می‌شوند، بنابراین، امکان بروز آلودگی به حداقل می‌رسد. باتوجه‌به این مسئله، از آنجایی‌که سیستم‌های آبی‌پروری چندمنظوره سازگار با محیط‌زیست می‌باشند (Khanjani و همکاران، ۲۰۲۲)، مدیریت آن‌ها در مقایسه با سیستم‌های قبلی به مراتب آسان‌تر است. در این سیستم‌ها میزان بهره‌وری آب و مواد مغذی به حداقل می‌رسد و انرژی زیادی برای راه‌اندازی سیستم نیاز نیست (Chopin، ۲۰۰۶).

نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

در حال حاضر، آبی‌پروری به‌عنوان یکی از بخش‌های رشد یافته تولید غذا در سراسر جهان، با مشکلات متعددی مانند خودآلودگی مواجه است. این مسئله موجب شده است که اثرات زیان‌آور پسماندهای به‌دست آمده از عملیات آبی‌پروری بر محیط آبی در قالب بسیاری از مطالعات بررسی شود. کمتر از ۳۰ درصد مواد مغذی به‌دست آمده از خوراک می‌تواند توسط ماهی برای رشد استفاده شود، درحالی‌که مقدار باقیمانده به‌صورت ذرات آلی (خوراک مصرف نشده و مدفوع ماهی) و مواد مغذی معدنی (مدفوع ماهی) در آب رها می‌شود و باعث یوتروفیکاسیون، شکوفایی زیان‌آور جلبکی و اکسیژن‌زدایی آب می‌شود. نامطلوب شدن کیفیت آب، حیات زیست‌مندان در سیستم آبی‌پروری را به خطر می‌اندازد و بیشتر منجر به بیماری و مرگ آبزیان مانند ماهیان می‌شود.

اهمیت مسئله آب در ایران باتوجه‌به موقعیت قرارگیری این کشور در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک مورد توجه لایه‌های مختلف جامعه، مسئولین و پژوهش‌گران جهانی قرار گرفته است. با نظر به رویکردهایی که جهت صرفه‌جویی آب در کشور به‌دست آمده است، لازم است از روش‌های آبی‌پروری مدار بسته و از آن مهمتر، از سامانه‌های آکوابونیک و یکپارچه چندمنظوره به‌منظور پرورش آبزیان استفاده شود. انجام شدن این زمینه نیازمند همکاری دستگاه‌های دولتی و بخش خصوصی می‌باشد. بااین‌حال، ضروری است که پژوهش‌های بیشتری با هدف کاربرد روش‌های یاد شده در تولید و پرورش گونه‌های سرشناس آبزیان در کشور همچون ماهیان گرمابی (مانند کپور ماهیان پرورشی همچون کپور معمولی، کپور سرگنده، کپور نقره‌ای و کپور علف‌خوار) و سردابی (مانند آزاد ماهیان نظیر قزل‌آلای رنگین‌کمان) صورت گیرد.

- Alexander K.A., Angel D., Freeman S., Israel D., Johansen J. and Kletou D. 2016. Improving sustainability of aquaculture in Europe: Stakeholder dialogues on Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA). *Environmental Science and Policy*, 55: 96-106.
- Alghazwi M., Smid S., Karpiniec S. and Zhang W. 2019. Comparative study on neuroprotective activities of fucoidans from *Fucus vesiculosus* and *Undaria pinnatifida*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 122: 255-264.
- Allen P.J. and Steeby J.A. 2011. Aquaculture: Challenges and Promise. *Nature Education Knowledge*, 3(10): 5-12.
- Aquaculture ID. 2022. Recirculating aquaculture system. *Aquaculture*, 1(1): 6-16.
- AWWA A. 2002. Nitrification. U.S. Environmental Protection Agency Office of Ground Water and Drinking Water Standards and Risk Management Division 1200 Pennsylvania Ave., NW Washington DC 20004. *Economic and Engineering Services*, 6: 70-100.
- Banrie A. 2013. Algal toxins in pond aquaculture. *The Fish Site*, 1: 2-12.
- Boudsocq S., Niboyet A., Lata J.C., Raynaud X., Loeuille N., Mathieu J., Blouin M., Abbadie L. and Barot S. 2012. Plant preference for ammonium versus nitrate: a neglected determinant of ecosystem functioning?. *The American Naturalist*, 180(1): 60-69.
- Branyikova I., Prochazkova G., Potocar T., Jezkova Z. and Branyik T. 2018. Harvesting of Microalgae by Flocculation. *Fermentation*, 4(4): 93-107.
- Brown J., Glenn E., Fitzsimmons K.M. and Smith S. 1999. Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent. *Aquaculture*, 75(3): 255-268.
- Buhmann A. and Papenbrock J. 2013. Biofiltering of aquaculture effluents by halophytic plants: Basic principles, current uses and future perspectives. *Environmental and Experimental Botany*, 92: 122-133.
- Burge C.A., Closek C.J., Friedman C.S., Groner M.L., Jenkins C.M., Shore-Maggio A. and Welsh J.E. 2016. The Use of Filter-feeders to Manage Disease in a Changing World, *Integrative and Comparative Biology*, 56(4): 573-587.

- 1-Eutrophication
- 2-Recirculatory Aquaculture System
- 3-Denitrifying biofilter
- 4-Biomass
- 5-Integrated Multi-Trophic Aquaculture
- 6-Arthritis

منابع

- خدایی، ع.ا. ۱۳۹۵. رتبه هفدهم ایران در صنعت آبزی‌پروری جهان/ صنعت آبزی‌پروری ایران در رتبه نخست خاورمیانه. <https://mana.ir> (۱۰ مرداد ماه، ۱۴۰۱)
- رادخواه، ع. ر.، ایگدری، س. و صادقی‌نژاد ماسوله، ا. ۱۳۹۹. بررسی خواص ضد میکروبی نانو ذرات نقره (AgNPs) به منظور کنترل بیماری‌ها و مدیریت بهداشت در سیستم‌های آبزی‌پروری. *نشریه آبزیان زینتی*، ۷(۱): ۷-۱۵.
- رادخواه، ع. ر.، ایگدری، س. و صادقی‌نژاد ماسوله، ا. ۱۴۰۰. مروری بر فیلتراسیون غشایی و بررسی کارایی آن در بهبود کیفیت آب در سیستم‌های آبزی‌پروری مدار بسته (RAS). *نشریه آب و توسعه پایدار*، ۸(۳): ۸۱-۸۸.
- رادخواه، ع.ر. و صادقی‌نژاد ماسوله، ا. ۱۴۰۰. بررسی تأثیر عوامل فیزیکی‌وشیمیایی آب بر زیست‌فراهمی، میزان سمیت و سطح اثرگذاری نانوذرات فلزی در اکوسیستم‌های آبزی. *نشریه آب و توسعه پایدار*، ۸(۲): ۷۱-۹۰.
- صالحی، ح. ۱۳۹۷. پیشرفت‌های صنعت شیلات ایران پس از انقلاب اسلامی. وزارت جهاد کشاورزی. <https://www.maj.ir/page-Print/FA/0/prints/106641> (۱۵ بهمن ماه، ۱۳۹۷)
- علیزاده، ر. ۱۴۰۱. چگونه نسبت آمونیوم به نیترات روی گیاهان تأثیر می‌گذارد؟ تجارت سبز آبان. <https://abanagri.com> (۶ مرداد ماه، ۱۴۰۱)
- مرکز آمار ایران. ۱۴۰۱. تعداد مزارع تکثیر و پرورش آبزیان خوراکی کشور در سال ۱۴۰۰. <https://www.amar.org.ir> (۲۸ تیر ماه، ۱۴۰۱)
- Abdel-Raouf N., Al-Homaidan A. A. and Ibraheem I.B.M. 2012. Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3): 257-275.
- Abu-Zeid M.A. 1998. Water and sustainable development: the vision for world water, life and the environment. *Water Policy*, 1(1): 9-19.

- different proportions of straw pellets. *Atmosphere*, 12(11): 1380-1391.
- Ekins P. and Zenghelis D. 2021. The costs and benefits of environmental sustainability. *Sustainability Science*, 16: 949-965.
- Elena-Suzana B-D., Michiu D., Pop C.R., Rotar A.M., Tofana M., Pop O.L., Socaci S.A. and Farcas A.C. 2020. Macroalgae—A Sustainable Source of Chemical Compounds with Biological Activities. *Nutrients*, 12(10): 30-85.
- FAO. 2020. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020: Sustainability in action. FAO Publishing, 1st Edition. Rome, Italy.
- FAO. 2021. Food and Agriculture Organization: World review of fisheries and aquaculture. Fisheries Resources: Trends in Production, Utilization and Trade. FAO Publishing, 1st Edition. Rome, Italy.
- FAO. 2022. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Aquaculture, FAO Publishing, 3st Edition. Rome, Italy.
- Graber A. and Junge R. 2009. Aquaponic systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, 246: 147-156.
- Growing Passion. 2022. Aquaponics: From fish poop to plant roots. *EcoLife Conservation*, 1: 1-12.
- Guerrero S. and Cremades J. 2012. Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA): A sustainable, pioneering alternative for marine cultures in Galicia. *HAL Archives*, 1(1): 10-111.
- Hofbauer W.K. 2021. Toxic or otherwise harmful algae and the built environment. *Toxins (Basel)*, 13(7): 465. DOI: 10.3390/toxins13070465
- Hudnell H.K. 2008. Cyanobacterial harmful algal blooms: State of the science and research needs. Springer International Publishing, 1st Edition. New York, USA.
- IFAS. 2022. Center for Aquatic and Invasive Plants: *Eichhornia crassipes* (Water hyacinth). *Plants*, 2: 5-15.
- IISD. 2022. International Institute for Sustainable Development (IISD). *Sustainable Development*, 1: 3-16.
- Jardinieria O. 2022. Helecho de agua (*Azolla filiculoides*). *Plant Biology*, 1: 5-12.
- Califano G., Kwantes M., Abreu M.H., Costa R. and Wichard T. 2020. Cultivating the Macroalgal Holobiont: Effects of Integrated Multi-Trophic Aquaculture on the Microbiome of *Ulva rigida* (Chlorophyta). *Frontiers in Marine Science*, 12: 3-20.
- Chopin T. 2006. Integrated multi-trophic aquaculture. What it is and why you should care and don't confuse it with polyculture. *North Aquaculture*, 12(4): 4-12.
- Chopin T., Troell M., Reid G.K., Knowler D., Robinson S.M.C., Neori A., Buschmann A.H. and Pang S. 2010. Integrated multi-trophic aquaculture. *Global Sea Food*, 5: 1-14.
- Chopin T. 2013. Aquaculture, Integrated Multi-Trophic (IMTA). In book: *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Chapter: Aquaculture, Integrated Multi-Trophic (IMTA). Springer Publishing, Volume 1. 1st Edition. Amsterdam, Netherlands.
- Correia M., Azevedo I.C., Peres H., Magalhães R., Oliveira-Teles A., Ribeiro Almeida C.M. and Guimarães L. 2020. Integrated Multi-Trophic Aquaculture: A laboratory and hands-on experimental activity to promote environmental sustainability awareness and value of aquaculture products. *Frontiers in Marine Science*, 12: 150-170.
- Dauda A.B. and Akinwole A.O. 2014. Interrelationships among water quality parameters in recirculating aquaculture system. *NJRED*, 8(4): 20-25.
- Dauda A.B., Ajadi A., SusanTola-Fabunmi A.S. and Akinwole A.O. 2019. Waste production in aquaculture: Sources, components and managements in different culture systems. *Aquaculture and Fisheries*, 4(3): 81-88.
- Dunwoody R.K. 2013. Aquaponics and hydroponics: the effects of nutrient source and hydroponic subsystem design on sweet basil production. *Biology and Agriculture*, 2: 20-220.
- Dume B., Hanc A., Svehla P., Míchal P., Chane A.D. and Nigussie A. 2021. Carbon dioxide and methane emissions during the composting and vermicomposting of sewage sludge under the effect of

- Martins C.I.M., Eding E.H., Verdegem M.C.J., Heinsbroek L.T.N., Schneider O., Blancheton J.P., Rogued Orbcaste E. and Verreth J.A.J. 2010. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: a perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*, 43: 83-93.
- Matter I.A., Bui V.K.H., Jung M., Seo J.Y., Kim Y-E., Lee Y-C. and Oh Y-K. 2019. Flocculation harvesting techniques for microalgae: A review. *Applied Sciences*, 9(15): 3069-3076.
- Marsh J. 2020. Top pros and cons of aquaponics. *Environment*, 1(1): 2-11.
- Mohebi Z. and Nazari M. 2021. Phytoremediation of wastewater using aquatic plants, A review. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 8(1): 50-58.
- Moloantoa K.M., Khetsha Z.P., van Heerden E., Castillo J.C. and Cason E.D. 2022. Nitrate water contamination from industrial activities and complete denitrification as a remediation option. *Water*, 14(5):799.
- Nagappan S., Das P., Abdul Quadir M., Thaher M., Khana S., Mahata C., Al-Jabri A., Vatland A.K. and Kumar G. 2021. Potential of microalgae as a sustainable feed ingredient for aquaculture. *Journal of Biotechnology*, 341: 1-20.
- Najjar Y.S.H. and Abu-Shamleh A. 2020. Harvesting of microalgae by centrifugation for biodiesel production: A review. *Algal Research*, 51: 102046.
- NFDB A. 2022. Recent trends in aquaculture recirculatory aquaculture system (RAS). *National Fisheries Development Board*, 1: 1-12.
- Nqombolo A., Mpupa A., Moutloali R. M. and Nomngongo P. 2018. Wastewater treatment using membrane technology: Wastewater and water quality. *IntechOpen*, 4: 20-50.
- Olasehinde T.A., Olaniran A.O. and Okoh A.I. 2019. Macroalgae as a Valuable Source of Naturally Occurring Bioactive Compounds for the Treatment of Alzheimer's Disease. *Marine drugs*, 17(11): 609-620.
- Omondi D.O. and Navalía A.C. 2020. Constructed wetlands in wastewater treatment and challenges of emerging resistant genes filtration and reloading. In: Jusoh A., Nasir N.M., Yunos F.H.M., Jusoh H.H.W. and Lam S. 2020. Green technology in treating aquaculture wastewater. *AIP Conference Proceedings*, 2197: 1-13.
- Kerrigan D. and Suckling C. 2018. A meta-analysis of integrated multi-trophic aquaculture: Extractive species growth is most successful within close proximity to open-water fish farms. *Reviews in Aquaculture*, 10(3): 560-572.
- Khanjani M.H., Zahedi S. and Mohammadi A.R. 2022. Integrated multitrophic aquaculture (IMTA) as an environmentally friendly system for sustainable aquaculture: functionality, species, and application of biofloc technology (BFT). *Environmental Science and Pollution Research*, 9(2): 1-15.
- Kim D-Y., Shinde S.K., Kadam A.A., Saratale R.G., Saratale G.D., Kumar M., Syed A., Bahkali A.H. and Ghodake G.S. 2022. Advantage of species diversification to facilitate sustainable development of aquaculture sector. *Biology*, 11(3): 368-380.
- Kongkeo H. 2001. Current status and development trends of aquaculture in the Asian Region. *Technical Proceedings of the Conference on Aquaculture in the Third Millennium*. 1st Edition. Bangkok, Thailand.
- Latour Marliac. 2022. *Pistia Stratiotes (Water Lettuce)*. *Plants*, 2(1): 4-10.
- Lin Y.F., Jing S.R., Lee D.Y. and Wang T.W. 2002. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system. *Aquaculture*, 209: 169-184.
- Maiga Y., von Sperling M. and Mihelcic J. 2017. *Constructed wetlands*. Michigan State University Publishing. 1st Edition. New York, USA.
- Martinez-Espineira R., Chopin T., Robinson S., Noce A., Knowler D. and Yip W. 2015. Estimating the biomitigation benefits of integrated multi-trophic aquaculture: a contingent behavior analysis. *Aquaculture*, 437: 182-194.
- Martinez-Porchas M. and Martinez-Cordova L.R. 2012. World aquaculture: Environmental impacts and troubleshooting alternatives. *The Scientific World Journal*, 38(3): 10-22.

- oxygen concentrations. *Applied and Environmental Microbiology*, 66(11): 5013-5018.
- Stathopoulou P., Berillis P., Levizou E., Sakellariou-Makrantonaki M., Kormas A.K., Aggelaki A., Kapsis P., Vlahos N. and Mente E. 2018. Aquaponics: a mutually beneficial relationship of fish, plants and bacteria. 3rd International Congress on Applied Ichthyology and Aquatic Environment. Volos, Greece.
- Strand Ø., Jansen H.M., Jiang Z. and Robinson S.M.C. 2019. Perspectives on bivalves providing regulating services in integrated multi-trophic aquaculture. Springer Publishing, Volume 1, 1st Edition. Amsterdam, Netherlands.
- Timmons M.B. and Lørsø T.M. 1994. Aquaculture water reuse systems, engineering design and management. Volume 1. Elsevier Publishing. 1st Edition. New York, USA.
- Tom A.P., Jayakumar J.S., Biju M., Somarajan J. and Ibrahim M.A. 2021. Aquaculture wastewater treatment technologies and their sustainability: A review. *Energy Nexus*, 4: 22-43.
- Tossavainen M., Lahti K., Edelmann M. and Romantschuk M. 2019. Integrated utilization of microalgae cultured in aquaculture wastewater: wastewater treatment and production of valuable fatty acids and tocopherols. *Journal of Applied Phycology*, 31: 1753-1763.
- Travis A. 2018. Aquaponics description, advantages and disadvantages. *Farming Method*, 5(1): 6-16.
- Tyson R.V., Treadwell D.D. and Simonne E.H. 2011. Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *Hortechology*, 21: 6-13.
- UNESCO. 2022. Sustainable Development. Available at: <https://en.unesco.org/themes/education-sustainable-development/what-is-esd/sd> (visited 10 May 2022)
- Verdegem M.C.J., Bosma R.H. and Verreth J.A.J. 2006. Reducing water use for animal production through aquaculture. *International Journal of Water Resources Development*, 22(1): 101-113.
- Waller. 2001. Tank culture and recirculating systems: Environmental impacts of aquaculture. Sheffield Academic Press, Volume 1. 1st Edition. Sheffield, UK.
- techOpen, 5: 10-42.
- Pagels F., Guedes A.C., Amaro H.M., Kijjoa A. and Vasconcelos V. 2019. Phycobiliproteins from Cyanobacteria: Chemistry and biotechnological applications. *Biotechnology Advances*, 37: 422-443.
- Pelley J. 2016. Taming toxic algae blooms. *ACS Central Science*, 2(5): 270273. DOI: 10.1021/acscentsci.6b00129
- Pham-Huy L.A., He H. and Pham-Huy C. 2008. Free radicals, antioxidants in disease and health. *International Journal of Biomedical Science*, 4(2): 89-96.
- Poli M.A., Chamorro E., Marco L., Lorenzo A., Pinheiro I., Aranh M., Walter M., Seiffert Q. and Vieira F.N. 2019. Integrated multitrophic aquaculture applied to shrimp rearing in a biofloc system. *Aquaculture*, 511: 1-20.
- Preena P.G., Kumar V.G.R. and Singh I.S.B. 2021. Nitrification and denitrification in recirculating aquaculture systems: the processes and players. *Reviews in Aquaculture*, 13(4): 2053-2075.
- Rakocy J.E. 2012. Aquaponics-Integrating fish and plant culture: Aquaculture Production Systems. Wiley-Blackwell, 10(3): 344-386.
- Ramli N.M., Verreth J., Yusoff F.M., Nurulhuda K., Nagao N. and Verdegem M. 2020. Integration of algae to improve nitrogenous waste management in recirculating aquaculture systems: A review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8: 1004. DOI: 10.3389/fbioe.2020.01004
- Rosa J., Lemos M.F.L., Crespo D., Nunes M. and Letson S. 2020. Integrated multitrophic aquaculture systems – Potential risks for food safety. *Trends in Food Science and Technology*, 96: 79-90.
- Ravindranath K. 2017. Aquaponics – an integrated fish and plant production system for urban, suburban and rural settings. *NFDB Newsletter Matsya Bharat*, 8(5): 5-15.
- Sigalevich P., Baev M.V., Teske A. and Cohen Y. 2000. Sulfate reduction and possible aerobic metabolism of the sulfate-reducing bacterium *Desulfovibrio oxycliniae* in a chemostat coculture with *Marinobacter* sp. Strain MB under exposure to increasing

- Gao S. and Shen Y. 2019. Bio-mitigation based on integrated multi-trophic aquaculture in temperate coastal waters: practice, assessment, and challenges. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 47(2): 212-223. DOI: 10.3856/vol47-issue2-fulltext-1
- Zheng C., Zhao L., Zhou X., Fu Z. and Li A. 2013. Treatment technologies for organic wastewater. *IntechOpen*, 4(1): 50-85.
- Wang L., Park Y., Jeon Y. and Ryu B. 2018. Bioactivities of the edible brown seaweed, *Undaria pinnatifida*: A review. *Aquaculture*, 495: 873-880.
- Yavuzcan Yildiz H., Robaina L., Pirhonen J., Mente E., Domínguez D. and Parisi G. 2017. Fish Welfare in Aquaponic Systems: Its Relation to Water Quality with an Emphasis on Feed and Faeces—A Review. *Water*, 9(1): 2-17. DOI: 10.3390/w9010013
- Zhang J., Zhang S., Kitazawa D., Zhou J., Park S.,



طی دهه اخیر، رخداد خشکسالی‌های مداوم، بهره‌برداری نامتوازن از منابع آب کشور، کاهش آبدهی رودخانه‌ها و چشمه‌ها و افت سطح آب زیرزمینی، باعث رخداد مسائل اجتماعی در مناطق مختلف کشور شده است. بر این اساس پروژه اکتشاف و استحصال منابع آب ژرف کشور، تعریف و با استقبال مسئولین مواجه شد. در نهایت با اختصاص بودجه و تأمین اعتبار، این پروژه از اواسط دهه ۱۳۹۰ شمسی آغاز شد و تاکنون چند حلقه چاه آب ژرف در استان سیستان و بلوچستان حفاری شده است. با این حال نتایج کلی انتشار یافته از حفاری چاه‌های مذکور به لحاظ کمی و کیفی آن‌چنان امیدبخش نبوده است، به طوری که وجود آب زیرزمینی ژرف در جنوب شرق و حتی مناطق دیگر کشور در حال‌های از ابهام قرار گرفته است. در این مقاله سعی بر آن است تا با توجه به امکانات و محدودیت‌ها، روش در پیش گرفته شده برای اکتشاف آب‌های ژرف در ایران بررسی و راهبردی جدید برای تغییر روند پروژه، پیشنهاد شود.

واژه‌های کلیدی: آب ژرف، محدودیت‌ها، سیستان و بلوچستان، اکتشاف، راهبرد

مقدمه

با توجه به رشد جمعیت، توسعه شهرها و روستاها و افزایش فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی و رخداد خشکسالی‌های مداوم، به تبع تغییرات اقلیمی از اواسط دهه ۱۳۸۰ هجری شمسی، کمبود منابع آب رفته رفته به مشکلی جدی در کشور تبدیل شده است. از این رو وزارت نیرو با ارائه طرح‌های مختلف، درصدد جلوگیری از اضافه برداشت‌ها و شناسایی منابع جدید و به‌ویژه آب‌های زیرزمینی در بخش‌های مختلف کشور است. یکی از این منابع آب زیرزمینی غیر متعارف که طی ۱۰ سال اخیر مورد توجه قرار گرفته، استفاده از آب‌های ژرف می‌باشد. بر این اساس و با ارائه نظریه‌هایی همچون وجود مخزن بسیار بزرگ آب ژرف در ارتباط با مفهوم ابرحوضه و تغذیه احتمالی از هیمالیا، علاوه بر وزارت نیرو، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری نیز درگیر مسأله شده‌اند. با توجه به اینکه آبخوان‌های کارستی کشور و همچنین آبخوان‌های مرزی کشور هنوز به درستی شناسایی نشده‌اند، اینکه چگونه سمت‌گیری به آب‌های ژرف در مدیریت کلان منابع آب مطرح شده است، خود جای پرسش و ابهام دارد.

مفاهیم کلی آب‌های ژرف

آب‌های ژرف شامل آب‌های زیرزمینی هستند که در عمق زمین قرار دارند. عمق قرارگیری منابع آب ژرف به شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه وابسته است؛ لذا حد ژرفای مطلق بین منابع آب زیرزمینی معمول (آزاد و محبوس) و ژرف نمی‌توان در نظر گرفت. در یک تعریف ساده منابع آب ژرف را می‌توان منابع آب زیرزمینی (غالباً محبوس) در نظر گرفت که در اعماق پایین‌تر از منابع آب زیرزمینی کشف شده، قرار دارند. بر این اساس در نقاط مختلف جهان اعماق متفاوتی برای عمق تشکیل و قرارگیری

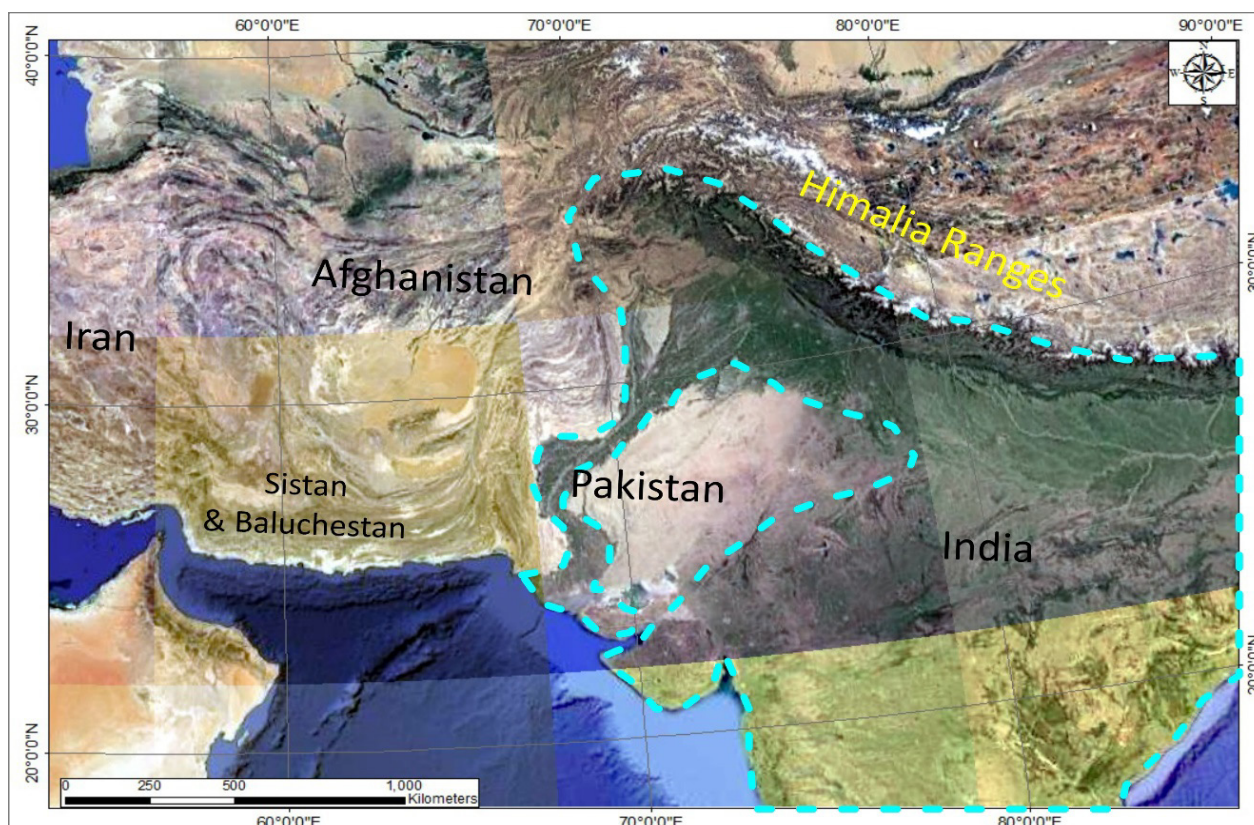
آبخوان‌های ژرف، گزارش شده است. حد تعیین آب ژرف در بنگلادش عمق ۱۵۰ متری، در شمال آفریقا عمق ۸۰۰ تا ۱۶۰۰ متری و در کالیفرنیا و استرالیا ۳۰۰ تا ۵۰۰۰ متری می‌باشد (رمضانی سربندی و همکاران، ۱۳۹۴). کیخایی و عباسی (۱۳۹۸) حجم آب زیرزمینی در آبخوان‌های سطحی ایران را حدود ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلیارد متر مکعب و حجم آب‌های ژرف را رقم اغراق‌آمیز ۵۰ تا ۶۰ هزار میلیارد مترمکعب (حدود ۱۲۰ تا ۱۵۰ برابر کل حجم میانگین بارش سالانه ایران) برآورد کرده‌اند.

یکی از مهمترین فرضیات در ارتباط با بحث آب‌های ژرف در ایران، مفهوم ابرحوضه^۱ است. ابرحوضه واژه کلیدی در تبیین مدل مفهومی آبخوان‌های ژرف است. طبق تعریف Bisson (۲۰۰۵) ابرحوضه عبارت است از آبخوان‌های بسیار عمیق متشکل از رسوبات شنی با سنگ مادر درز و شکاف‌دار واجد یا فاقد ساختارهای رسوبی که از نظر تغذیه، ذخیره، انتقال و به دام افتادن آب‌های زیرزمینی ژرف به صورت یکپارچه عمل می‌کنند. در مدل مفهومی ارائه شده توسط Bisson، ارتفاعات یک ابرحوضه در تغذیه آبخوان ژرف نقش دارند و جریان آب زیرزمینی در آبخوان می‌تواند در راستای شکستگی‌ها و گسل‌های مهم به وجود آید. مرزهای یک ابرحوضه اغلب با مرزهای حوضه‌های آب‌های سطحی همخوانی ندارند. ابرحوضه می‌تواند در ارتفاعات چندین حوضه آبریز سطحی تغذیه شود. بر اساس این فرضیه، ابرحوضه هیمالیا و انتقال آب‌های زیرزمینی از طریق گسل‌های پی سنگی به منطقه سیستان و بلوچستان مطرح شده است که علیرغم داده‌های حاصل از حفاری چاه‌های آب ژرف سیستان، این فرضیه تاکنون به اثبات نرسیده است. با بررسی کلی تصویر ماهواره‌ای هیمالیا می‌توان استنباط کرد که برخورد جبهه‌های رطوبتی اقیانوس هند به رشته کوه هیمالیا، و بارش‌های شدید در دامنه ارتفاعات هیمالیا (تا بیش از ۱۲۰۰۰ میلی‌متر در سال در شمال غرب هند) باعث شده است که تخلیه آب‌های زیرسطحی در این ابرحوضه از دو مسیر یکی در شمال هند و دیگری در بخش میانی پاکستان در نواری به عرض حدود ۱۰۰

کیلومتر رخ دهد که مخزن آب زیرزمینی عمیقی می باشد (شکل ۱). با توجه به جهت شمالی - جنوبی ساختارهای شرقی کشور، تغذیه زیرسطحی از این نوار به سمت غرب پاکستان و استان سیستان و بلوچستان متصور نمی باشد.

هر چند حجم ذخیره، گسترش فضایی و ضخامت اشباع منابع آب ژرف کشف شده در جهان قابل توجه است؛ به طوری که برای برخی از آبخوان های ژرف در دیگر کشورها گسترش فضایی بیش از یک میلیون کیلومترمربع، ضخامت اشباع چند صد تا چند هزار متر و حجم ذخیره آبی در حد ده ها هزار میلیارد مترمکعب، گزارش شده است، اما در سالیان گذشته مباحثی در سطح عموم و حتی مسئولین کشوری در ارتباط با کشف ذخیره آب ۱۰۰۰ میلیارد متر مکعبی آب ژرف در شرق ایران منتشر شده است که غیر علمی است. به لحاظ کیفی نیز عوامل متعددی همچون ترکیب شیمیایی آب بارش، جنس زمین (آبخوان)، اختلاط، زمان

ماندگاری آب زیرزمینی، تبخیر و شرایط فیزیکوشیمیایی محیطی بر کیفیت منابع آب زیرزمینی مؤثر است، که با توجه به زمان ماندگاری آب های ژرف، عملاً اینگونه آب ها دارای املاح زیاد و فلزات سنگین و سمی بیش از حدود مجاز برای شرب، دمای زیاد و عناصر رادیواکتیو می باشند. مسأله مهم دیگر، تجدیدپذیری آب های ژرف است. تجدیدپذیری، زمان ماندگاری و منشأ شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی در آبخوان های ژرف، اغلب بسیار کم است. سرعت جریان آب زیرزمینی در این آبخوان ها اغلب بسیار اندک و فاصله محل تغذیه تا تخلیه بالغ بر صدها کیلومتر (و در ارتباط با ابرحوضه هیمالیا - ایران تا چند هزار کیلومتر) می باشد که این باعث می شود سن این آب ها بسیار بیشتر از آب های اطراف و در حد چندین هزار سال باشد. یونسکو منابع آب زیرزمینی که دوره تجدید آن ها بیش از ۵۰۰ سال باشد را تجدیدنپذیر در نظر می گیرد.



شکل ۱- مرز تقریبی ابرحوضه هیمالیا و مسیرهای تخلیه آن در هندوستان و پاکستان

تاریخچه مطالعات و اکتشاف آب های ژرف در ایران

در تیرماه سال ۱۳۹۵ پیشنهاد طرح استفاده از آب های ژرف در مجلس شورای اسلامی ارائه شد و بر اساس آن مطالعات برای بهره برداری و استفاده از ظرفیت آب های ژرف در سیستان و بلوچستان آغاز گردید. در این راستا پروژه استحصال آب های

ژرف در معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری تعریف شد تا بر اساس آن تمام جوانب برداشت یا عدم برداشت از این منابع آبی مورد پژوهش و بررسی قرار گیرد. معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری در سال ۱۳۹۶ طرح پژوهشی «توسعه فناوری شناخت مسیر حرکت آب های ژرفی در منطقه سیستان و بلوچستان به کمک فناوری های مگنتوتلوریک و ژئورادار» را

انجام داد که در نهایت لایه‌های عمقی رسوبات دانه درشت حاوی ذخایر آب ژرف مشخص و یک نقطه جهت حفاری اولین چاه آب ژرف در منطقه زابل پیشنهاد شد.

بر اساس مطالعات، چاه اکتشافی شماره یک سیستان در سه فاز عملیاتی در عمق ۳ هزار متری حفاری شد که بر اساس اطلاعات منتشر شده، امکان تولید ۱۵۰۰ مترمکعب آب در روز را دارد. دمای آب این چاه، در سطح زمین بیش از ۸۰ درجه سانتی‌گراد بوده و دارای شوری بسیار زیاد و فلزات سنگین و سمی تا چندین برابر حد مجاز شرب بوده است. پروژه چاه شماره ۲ سیستان نیز به عنوان نخستین چاه ارزیابی، انجام شد که برخلاف چاه‌های یک و سه اطلاعات زیادی از آن منتشر نشده است.

بر اساس اطلاعات موجود، از عمق ۲۱۹۱ متری نخستین چاه ژرف در زابل، نمونه‌هایی از آب برداشت شده جهت آزمایشات مختلف از جمله تعیین سختی و قدمت آب و همچنین مشخص شدن تجدیدپذیر یا تجدیدنپذیر بودن این منبع آبی به آزمایشگاه‌های مختلفی در داخل و خارج کشور ارسال شده است؛ اما جزئیاتی از نتایج آزمایش‌ها منتشر نشده است. نتایج غیررسمی هیدروشنیمی نمونه آب چاه آب ژرف سیستان در سال ۱۳۹۷ از عمق ۹۰۰ متری بیانگر هدایت الکتریکی ۶۲ هزار میکروموس بر سانتی‌متر، و آرسنیک ۴۵ میکروگرم بر لیتر است. هدایت الکتریکی نمونه آب انتهایی چاه بیش از ۷۰ هزار میکروموس بر سانتی‌متر گزارش شده است. اردکانیان، وزیر نیرو، در آبان‌ماه ۱۳۹۹ بیان کرد که نتایج حاصل از آزمایشات نمونه‌برداری صورت گرفته از عمق ۲۱۹۱ متری این چاه نشان داده آب از نوع شور است و کیفیت آن برای مصارف شرب، صنعت و کشاورزی مناسب نمی‌باشد. هدایت الکتریکی آب در حدود ۲۵۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر بوده است. پس از آن درخواست شده تا حفاری این چاه تا عمق ۳۰۰۰ متر ادامه یابد که با موافقت وزارت نیرو محقق شده است. در این عمق نیز بر حسب انتظار، هدایت الکتریکی و درجه حرارت آب بسیار بالا بوده است. حفاری چاه سوم سیستان نیز تا آنجا که اطلاعات آن موجود است به نتیجه مهم و امیدبخشی منجر نشده است.

در سال ۱۳۹۹ موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو طرحی با عنوان مطالعات خدمات پژوهشی پتانسیل‌یابی پهنه‌های مستعد آب‌های ژرف کشور را در سه مرحله مطالعاتی به مرحله اجرا درآورد. نتیجه مرحله اول، شناسایی ۱۱ پهنه مستعد تمرکز منابع آب ژرف در سطح کشور بوده است. در مرحله دوم طرح ۱۳ زیرپهنه در سطح کشور به عنوان مناطق با اولویت بالا در ارتباط با تمرکز و تجمع آب ژرف مشخص شده است.

در همین حال، چهارمین حلقه چاه آب ژرف جنوب شرق ایران و اولین آب چاه ژرف سراوان در عمق ۱۳۷۰ متری خامه حفاری داده شد. آب در این عمق دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد را داشته است. کیفیت آب چاه مذکور با هدایت الکتریکی کمی بیش از

۱۰ هزار میکروموس بر سانتی‌متر برای تصفیه و بهره‌برداری مناسب تشخیص داده شد. اینکه آبدهی چاه مذکور از لایه‌های بالایی می‌باشد و یا از آب‌های ژرف، مشخص نمی‌باشد.

بر اساس جستجوی اینترنتی، سه چاه آب ژرف در منطقه سیستان به مرحله بهره‌برداری رسیده است که با هدف تأمین آب شرب مردم منطقه، با مشارکت شرکت‌های دانش‌بنیان، واحدهای نمک‌زدایی، طراحی و ساخته شده است که از جمله این سیستم‌ها، دستگاه نمک‌زدایی به روش الکترودیالیز معکوس در محل چاه شماره ۳ استان سیستان و بلوچستان به بهره‌برداری رسیده و وارد شبکه آب شرب شده است.

ملاحظات و ابهامات در مطالعات آب‌های ژرف

آنچه در ارتباط با مطالعات اکتشافی - بهره‌برداری آب‌های ژرف در ایران نگران‌کننده است، تصمیمات شتاب‌زده و بدون کارشناسی لازم می‌باشد. کما اینکه تاکنون نتایج این مطالعات در جنوب شرق ایران، در محافل علمی و آکادمیک توسط متخصصین موضوع مورد ارزیابی قرار نگرفته است. با توجه به گستره وسیع آبخوان‌های ژرف، چالش‌های سیاسی (بین کشوری) و اجتماعی (بین استان‌ها) برای بهره‌برداری از منابع آب ژرف دور از انتظار نیست (کاوسی حیدری و همکاران، ۱۳۹۸). بسیاری از آبخوان‌های ژرف مهم کشف شده در جهان، گستره سطحی و حجم ذخیره آب قابل توجهی دارند که اغلب بین دو یا چند کشور، مشترک می‌باشند که بهره‌برداری از این منابع آبی مشترک اغلب در چارچوب قواعد و حقوق بین‌الملل مربوطه میسر است. در ایران تاکنون مخزن غنی آب ژرف به لحاظ عمقی و یا گسترش جانبی مشخص نشده است و در این ارتباط نمی‌توان برای آن چالشی را متصور بود. مسأله مهم دیگر، کیفیت آب‌های ژرف است. آب‌های زیرزمینی ژرف می‌توانند شیرین، لب شور، شور و یا بسیار شور باشند. این منابع در برخی مناطق نظیر شمال شرق آفریقا و کشورهای عربی با وجود تجدیدنپذیر بودن به دلیل کیفیت بالا و میزان مواد محلول کم (که در برخی موارد کمتر از ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است) برای تأمین آب شرب و کشاورزی بهره‌برداری می‌شوند. چاه‌های آب ژرف سیستان و بلوچستان در رده شور و بسیار شور قرار دارند و برای استفاده شرب نیاز به تصفیه دارند.

به لحاظ زیست‌محیطی عملاً استخراج توأم از آبخوان‌های کم‌عمق و ژرف، نحوه دفع پساب‌های حاصل از تصفیه شورابه‌ها، و برقراری ارتباط هیدرولیکی عمودی بین آبخوان‌ها که می‌تواند باعث افزایش شوری و فلزات سنگین و سمی به آبخوان‌های کم‌عمق شود، می‌تواند نگران‌کننده باشد. با این حال آنچه که از داده‌های حاصل از چاه‌های آب ژرف سیستان و بلوچستان

بر می‌آید، آبدهی کم و عمق زیاد چاه‌ها می‌تواند تأثیر مهمی بر کاهش آبدهی و خشک شدن چشمه‌ها و چاه‌های مرتبط با برداشت آب از آبخوان ژرف در این مناطق، ایجاد کند. اینکه آبخوان ژرف نهایتاً می‌بایست در بخش سنگی در ناحیه‌ای با فاصله بسیار دورتر در سطح رخمون داشته باشد و متأثر از تغذیه از بارش باشد، از ابهامات اینگونه آبخوان‌ها در کشور ایران است. نکته دیگری که مطرح می‌باشد، تأثیر بهره‌برداری از آب‌های ژرف بر روی فرونشست زمین است. این مسأله در صورتی اهمیت می‌یابد که همزمان با استخراج آب ژرف عمقی از لایه‌های بالایی نیز استخراج صورت گیرد و این بهره‌برداری اختلاطی باعث افت آب زیرزمینی در لایه‌های بالایی، فرونشست و تخریب ساختمان چاه‌های آب ژرف شود.

نکته دیگری که کاوسی‌حیدری و همکاران (۱۳۹۸) به آن پرداخته‌اند، هزینه‌های بسیار زیاد شناسایی، اکتشاف، حفاری، بهره‌برداری و تصفیه آب‌های ژرف نسبت به هزینه‌های مشابه برای منابع آب سطحی و زیرزمینی کم‌عمق است. حال اینکه قیمت تمام شده آب‌های ژرف در ایران به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک چگونه محاسبه و توجیه اقتصادی برای آن انجام می‌شود، از ابهامات دیگر این طرح است.

با وجود شروع اکتشافات از آب‌های ژرف در کشور و عزم مسئولان برای گسترش مطالعات و حفر چاه‌های بیشتر، این پروژه هنوز مخالفان و موافقان زیادی دارد که هرکدام از آن‌ها دلایلی را برای مخالفت و یا موافقت خود عمدتاً در فضای مجازی ارائه کرده‌اند. ابهامات مذکور که می‌تواند مورد بررسی دقیق قرار گیرد، شامل موارد زیر است:

الف- اثرات مخرب زیست محیطی استحصال آب‌های ژرف: موافقان طرح بیان می‌کنند که برداشت از این چاه‌ها به محیط زیست آسیب نمی‌رساند. چاه‌های آب ژرف عمق زیادی دارند و مثل چاه‌های معمولی نیستند که اگر به تعداد زیاد حفر شوند، سطح آب‌های زیرزمینی پایین بیفتد و زمین نشست کند. از سوی دیگر گروه دیگری از کارشناسان بر این عقیده‌اند که استفاده از آب‌های ژرف به دلیل اینکه سال‌ها در اعماق زمین بوده‌اند و تعادل زمین را حفظ کرده‌اند، خطرناک است و نباید به هیچ عنوان برداشت شوند. استفاده از آب‌های ژرف در محیط زیست ایران، فاجعه‌ای به‌بار خواهد آورد که دیگر قابل جبران نخواهد بود.

ب- هزینه استحصال آب: همراهان و مدیران طرح بیان می‌کنند که هزینه استحصال یک مترمکعب آب ژرف، یک‌دویستم انتقال آب از دریای آزاد به مناطق خشک کشور است، ولی مخالفان هزینه استحصال آب ژرف، آن را ده‌ها برابر پروژه‌های انتقال آب و صدها برابر استحصال یک چاه عمیق آبرفتی می‌دانند.

ج- منشأ آب‌ها: بر اساس مطالعات صورت گرفته بر روی نخستین چاه حفر شده در سیستان، موافقان طرح اذعان می‌دارند که

منشأ این آب، کوه‌های هندوکش است؛ ولی مخالفان بر اساس مطالعات صورت گرفته بر روی نخستین چاه حفر شده در سیستان تأیید نمی‌کنند که این آب از ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلومتر دورتر و از ارتفاعات هندوکش بدون هیچ‌گونه انقطاع آب منتقل می‌شود و دلیل علمی مبنی بر اثبات آن وجود ندارد.

د- فرونشست زمین به دنبال استحصال آب ژرف: گروهی از کارشناسان عقیده دارند که فرونشست مربوط به آب‌های زیرزمینی است و ربطی به آب‌های ژرف ندارد و برداشت آب‌های ژرف هیچ مسأله محیط‌زیستی ندارد، ولی مخالفان بیان می‌کنند که اگر آب‌های ژرف مورد استفاده قرار گیرند، تبعات آن فرونشست زمین و رخداد فروچاله‌ها خواهد بود.

ه- کیفیت آب: در این باره کارشناسان درگیر طرح، بیان داشته‌اند که هدایت الکتریکی آب حدود ۱۲ هزار میکروزیمنس بر سانتی‌متر است که با تصفیه ساده می‌تواند قابل استفاده شود و نرخ تمام‌شده آن نسبت به هزینه‌های انتقالی، بسیار پایین است؛ ولی برخی از کارشناسان بیان داشته‌اند که هدایت الکتریکی آب چاه‌های ژرف در مقدار بسیار بالای ۲۵ هزار میکروزیمنس بر سانتی‌متر است و تصفیه خاص و به شدت هزینه‌بری برای قابل استفاده کردن آن، نیاز است.

و- وجود مواد رادیواکتیو در آب‌های ژرف: موافقان در تحقیقاتی که برای وزارت نیرو انجام داده‌اند، بیان می‌دارند که این آب هیچ‌گونه مواد رادیواکتیوی ندارد، ولی مخالفان عقیده دارند که آب‌های ژرف سیستان به دلیل قرارگیری در لایه‌های زمین داشتن منشأ مشترک با آب‌های ژرف پاکستان که از انرژی هسته‌ای استفاده می‌کند، آلوده به مواد رادیواکتیو هستند.

راهبرد آتی مطالعات آب‌های ژرف

شناسایی، اکتشاف و بهره‌برداری از منابع آب ژرف در چند دهه اخیر مورد توجه بسیاری از کشورهای واقع در مناطق خشک و فراخشک جهان به ویژه در خاورمیانه و شمال آفریقا بوده است. در ایران، شناخت همه جوانب مربوط به منابع آب ژرف، اعم از توسعه روش‌شناسی صحیح برای شناسایی و اکتشاف و تبیین مسائل زیست محیطی، اقتصادی، اجتماعی و حقوقی مترتب بر بهره‌برداری، تاکنون انجام نشده است. هرچند ایده پوپولیستی بهره‌برداری از منابع آب ژرف در سال‌های اخیر به طور جدی در کشور مطرح شده است، اما ابعاد مختلف این منابع آب برای جامعه علمی و مدیریتی کشور به دلیل عدم ارائه راهبرد خاص، تداخل وظایف نهادها، و سوء استفاده برخی از این امر، پر ابهام است. بر این اساس به نظر می‌رسد راهبرد فعلی در راستای اجرای پروژه اکتشاف آب‌های ژرف در کشور، به نتیجه مطلوب نخواهد رسید. بر این اساس و با بررسی جوانب مختلف، با بازبینی مجدد

روند مطالعات، راهبردی جدید در این خصوص اتخاذ شده و به شرح زیر پیشنهاد می‌گردد (شکل ۲):

الف - یکپارچه‌سازی مدیریت پروژه مطالعات اکتشافی - بهره‌برداری (بر این اساس به نظر می‌رسد وزارت نیرو و بهره‌بردار شرکت مدیریت منابع آب ایران به عنوان متولی می‌بایست مدیریت یکپارچه پروژه را بر عهده گیرد و بر اساس نیازسنجی از متخصصین دانشگاهی (با تأکید بر تخصص هیدروژئولوژی)، مشاورین مربوطه، شرکت ملی حفاری ایران، و سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، به تناسب در پیشبرد بخش‌های مختلف پروژه استفاده کند.

ب- انتشار بدون ملاحظه‌کاری داده‌ها و گزارشات موجود جهت تحلیل و بررسی آزادانه توسط محققین مختلف.

ج- بازبینی در مفاهیم مرتبط با آب‌های ژرف و به ویژه ارائه تعریف دقیق بر اساس عمق و نوع آب‌های ژرف در سطح ملی. د- دعوت از متخصصین داخلی و خارجی و برگزاری همایش به منظور استفاده از نتایج صاحب‌نظران مختلف و تجربیات بین‌المللی.

ه- جمع‌بندی همایش توسط کارگروهی از متخصصین دانشگاهی و وزارت نیرو و ارائه دستاوردهای کاربردی در سطح کارشناسی و مدیریتی.

و- برگزاری کارگاه مهندسی ارزش با حضور تمامی بدنه درگیر و بررسی تمامی جوانب و ملاحظات به منظور تصمیم‌گیری قطعی درباره توقف، خاتمه و یا از سرگیری مطالعات اکتشافی.

ز- بازبینی اولویت اکتشافی منابع آب ژرف از سیستان و بلوچستان به مناطق احتمالی فرار آب‌های مرزی در شمال شرق و غرب کشور.

ه- تعیین برنامه اکتشافی مرحله‌ای عمقی آب‌های ژرف در سه دسته نیمه ژرف (۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر)، ژرف (۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر) و بسیار ژرف (بیش از ۳۰۰۰ متر).

و- بازبینی روش‌های حفاری از دید اکتشافی - بهره‌برداری با استفاده از دکل‌های حفاری با گل و تغییر نگرش به حفاری با سیستم‌های هوا - کف به منظور شناسایی و اکتشاف با دقت و سرعت بیشتر در خصوص آب‌های ژرف.

ز- مطالعات مجدد و بازبینی گزارشات و داده‌های اکتشافی موجود (شامل ژئوفیزیکی، حفاری‌های انجام شده، آب زمین‌شناسی، هیدروژئوشیمی، و ایزوتوپی) در منطقه سیستان و بلوچستان با هدف تعیین کیفیت (هیدروشیمی و فلزات سنگین و رادیواکتیو)، منشأ (ایزوتوپی)، تفکیک لایه‌های بر اساس پتانسیل آبدی (لاگ‌های حفاری و آزمایش پمپاژ) و ارزیابی فنی و دقیق و بدون قصد سیاسی توسط کارشناسان مستقل و بدنه دانشگاهی (متولی پیشنهادی: وزارت علوم، تحقیقات و فناوری).

ح - ارائه نقشه جدید اولویت‌بندی مناطق اکتشافی در سطح

کشور (و نه تمرکز بر یک منطقه خاص همانند آنچه تاکنون در سیستان و بلوچستان انجام شده است).

ط- ارائه برنامه حفاری‌های جدید اکتشافی در پهنه‌های مختلف و تحلیل یافته‌های جدید به منظور تعیین نبود یا وجود آبخوان‌های حاوی آب ژرف بر اساس مطالعات ژئوفیزیکی با روش‌های نوین در دنیا.

ی- انجام حفاری‌های جدید با استفاده از دستگاه‌های حفاری جدید، پایش کمی و کیفی چاه‌های موجود، جمع‌آوری اطلاعات جدید هیدروژئولوژی، هیدروشیمی و ایزوتوپی.

ک- تحلیل منطقه‌ای و جامع شناسایی امکان توسعه بهره‌برداری از آب‌های ژرف، ارائه برنامه بهره‌برداری برحسب مناطق مختلف مبتنی بر امکانات مخزن، نیازهای آبی و مطالعات جامع منابع آب.

نتیجه‌گیری

ارزش آب ژرف در ایران و نیاز به ارائه برنامه مدیریت راهبردی برای آن، بر همگان روشن است. با این حال بحث اصلی در موفقیت یا شکست این پروژه در اکتشاف و تعیین امکان توسعه بهره‌برداری از این آب‌ها به ویژه در مناطق کم‌بارش شرق و جنوب‌شرق کشور می‌باشد. با این حال، بررسی‌های انجام شده تاکنون در خصوص اینکه منابع آب ژرف به ویژه در ایران، ویژگی‌های متمایزی نسبت به سایر منابع آب زیرزمینی داشته باشد، دارای ابهام است. پروژه‌های ناموفق اکتشاف و بهره‌برداری از آب‌های ژرف در عربستان و اردن، شرایط زمین‌شناسی خاص کشور ایران به لحاظ محل برخورد صفحات تکتونیکی، بالآمدگی کلی فلات ایران نسبت به کشورهای همسایه و خروج آب‌های سطحی و زیرسطحی از کشور، نامشخص بودن وجود یا نبود آبخوان ژرف و نامشخص بودن حجم و ذخیره و گسترش آن و کیفیت بسیار نامناسب احتمالی آب‌های ژرف احتمالی (هرچند محدود)، باعث شده است که تصمیمات شتاب‌زده در اجرای پروژه اکتشاف آب‌های ژرف در ایران، علیرغم اظهارات مسئولین و کارشناسان دخیل در پروژه، ناموفق به نظر برسد.

موازی‌کاری در مطالعات منابع آب ژرف در کشور از یک سو توسط وزارت نیرو با مطالعات شناسایی در قالب پهنه‌بندی مناطق مستعد آب‌های ژرف کشور و تعیین مناطق دارای پتانسیل آب ژرف و از سوی دیگر توسط معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری با انجام مطالعات اکتشافی موردی مبتنی بر بکارگیری تمامی ابزارهای اکتشافی در منطقه سیستان و بلوچستان، باعث شده است که بر خلاف دیگر مناطق جهان، مطالعات اکتشافی و پهنه‌بندی آب ژرف در ایران تحت نظر یک مدیریت واحد انجام نشود. نبود تجربه و تخصص کافی در بدنه کارشناسی حاضر در پروژه مطالعات آب‌های ژرف در ایران، عدم ارائه شفاف، دقیق و

منابع

رضانی سربندی، م.، شریفی فدیجی، م.، شهریاری، آ. و طاهری، ا. ۱۳۹۴. امکان سنجی استفاده از آب های فسیلی در فضای سبز شهری. اولین کنگره ملی توسعه و ترویج مهندسی کشاورزی و علوم خاک ایران، انجمن توسعه و ترویج علوم و فنون بنیادین، تهران.

کاوسی حیدری، ع.، روزبهانی، ر. و افتخاری، م. ۱۳۹۸. منابع آب زیرزمینی ژرف؛ ویژگی ها و محدودیت ها. نشریه آب و توسعه پایدار، ۶(۱): ۶۷-۷۶.

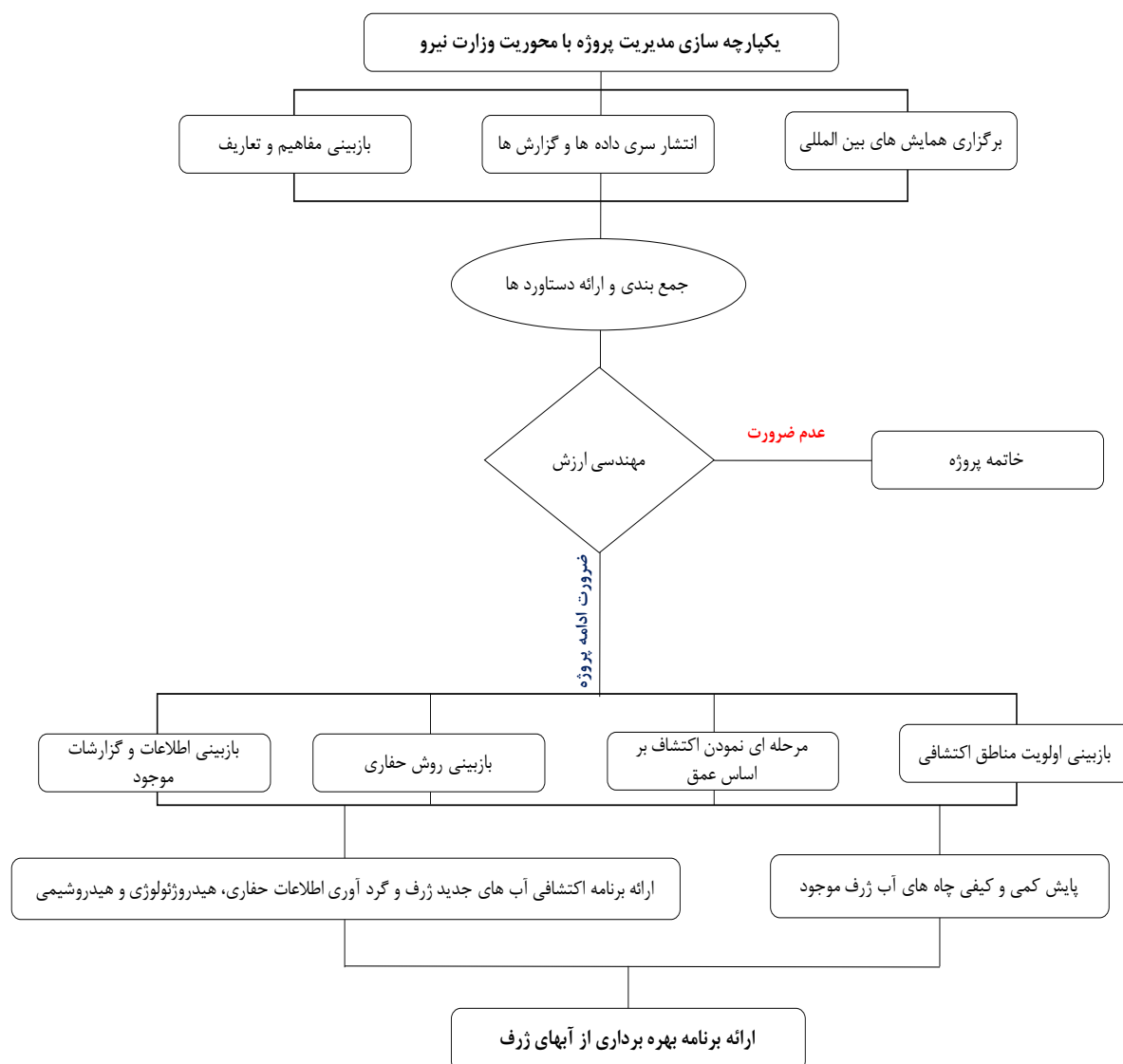
کیخایی، ف. و عباسی، ف. ۱۳۹۸. منابع آب ژرف: فرصت ها و چالش ها. نشریه آب و توسعه پایدار، ۶(۱): ۶۱-۶۶.

Bisson R.A. 2005. Megawatersheds. Water Encyclopedia, 5: 266-273.

کامل اطلاعات و گزارشات در محیط دانشگاهی کشور و محافل علمی بین المللی، اصرار بیش از حد و غیر قابل توجیه برخی کارشناسان و بالتبع مسئولین محلی و کشوری، بر وجود ذخیره هزار میلیارد متر مکعبی آب ژرف کشور، باعث ابهام و تشکیک در کل پروژه مذکور شده است. به نظر می رسد بهره برداری از منابع آب ژرف در کشور، نیازمند بازنگری راهبرد مطالعات، شفاف سازی کامل و همه جانبه (بدون محافظه کاری)، شناسایی ابعاد حقوقی، اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی در بهره برداری با در نظر گرفتن توسعه پایدار، ارزش بازاری و غیربازاری بهره برداری از این منابع، مسائل زیست محیطی و اجتماعی می باشد.

پی نوشت

1-Mega watershed



شکل ۲- نمودار راهبرد پیشنهادی جهت مطالعات آب های ژرف



مهار افت مستمر تراز آب زیرزمینی که معمولاً به تعادل بخشی آب زیرزمینی یاد می‌گردد؛ موضوع جدیدی نیست و اقدامات فراوانی مانند ممنوعه اعلام کردن دشت‌ها، طرح تعادل بخشی آب زیرزمینی، طرح سازگاری با کم‌آبی و ... در راستای آن تدوین و ابلاغ شده است. اما سوال اساسی این است که چرا در عرصه عمل، این گونه طرح‌ها کارایی لازم را نداشته و همچنان کشور با افت مستمر تراز آبخوان مواجه می‌باشد؟ این یادداشت فنی سعی در پاسخ به این سوال اساسی دارد و برای تبیین پاسخ این سوال، عبارت «تعادل بخشی آب زیرزمینی سهل ممتنع»، را بسط و کاربرد نموده است. این عبارت بر این مفهوم دلالت دارد که حرکت از شرایط کنونی (حاکمیت نهادهای دولتی) به شرایط مطلوب (مدیریت یکپارچه و مشارکتی در سطح حوضه آبریز) تغییری کوتاه‌مدت نبوده، بلکه فرآیندی مبتنی بر ظرفیت‌سازی برای تکامل و تحول در نهادهای مدیریت می‌باشد. لذا ضروری است برنامه‌های تعادل بخشی آب زیرزمینی به فراخور این مسیر پیچیده و طاقت‌فرسا تنظیم گردد.

مقدمه

آب زیرزمینی بزرگترین منبع آب شیرین محسوب می‌شود که بیش از ۹۶ درصد از حجم آب شیرین غیر منجمد را به خود اختصاص داده است. آب زیرزمینی تقریباً ۵۰ درصد از کل آب آشامیدنی و ۴۳ درصد از آب مصرفی به منظور آبیاری در بخش کشاورزی را در سراسر جهان تأمین می‌کند (Van der Gun و Margat, ۲۰۱۳). در ایران میزان سهم آب زیرزمینی در تأمین آب بسیار بیشتر از متوسط جهانی است، به طوریکه بیش از ۵۵ درصد کل منابع آب مورد نیاز کشور از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. سهم منابع آب زیرزمینی در تأمین نیازهای آب در مناطق خشک و نیمه خشک بسیار بزرگ است. به عنوان نمونه در دشت مشهد، از ۵۴۸۱ میلیون متر مکعب آب استحصالی بیش از ۹۲٪ که معادل ۵۰۱۶ میلیون مترمکعب می‌شود، از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد (شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۴۰۰). لذا آب زیرزمینی را می‌توان یگانه منبع تأمین آب مخصوصاً در شرایط خشکسالی دانست. ورود تکنولوژی پمپاژ، محدودیت‌های استحصال منابع آب زیرزمینی را مرتفع نمود و در پی این دسترسی آسان به آب زیرزمینی، بسیاری از مناطق جهان از جمله کشورمان بدون توجه به پیچیدگی‌های ظرفیت تجدیدپذیری آب زیرزمینی به توسعه استحصال آب از این منابع پرداختند. این توسعه برداشت موجب گردید تا میزان پمپاژ از ظرفیت تجدیدپذیری منابع آب زیرزمینی، به سرعت عبور نماید؛ لذا چندین دهه است که کشورمان در حال برداشت از ذخایر استاتیک و تجدیدناپذیر می‌باشد. بدیهی است که در صورت عدم کنترل افت مستمر تراز آبخوان، اتمام ذخایر تجدیدناپذیر و نابودی توسعه وابسته به آب زیرزمینی حتمی است. امروزه نابودی این ذخایر با ارزش و غیر قابل جایگزین، با فرونشست زمین، خشک شدن چشمه و قنات، شور شدن آب زیرزمینی و نابودی اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی، در حال ظهور است. بازخوانی تجارب گذشته نشان داده است که عدم توفیق در تعادل بخشی آب زیرزمینی می‌تواند ناشی از درک ناقص (عدم شمول کافی طرح‌ها به ابعاد مختلف مسأله) و یا حل ناقص (نداشتن

اولویت و در نتیجه عدم تخصیص اعتبار کافی) بوده است. وقتی که افراد بخواهند یک موضوع کاملاً پیچیده و گسترده را با فهم و اجرای ناقص و ناکافی بدون توجه به ابعاد مسأله، یعنی مبتنی بر «ساده‌انگاری» حل نمایند؛ «سهل ممتنع» اتفاق می‌افتد. در ادامه دلایل «سهل ممتنع» بودن مسأله تعادل بخشی آب زیرزمینی مورد تشریح قرار می‌گیرد.

باورهای ساده‌انگارانه در مورد آب زیرزمینی

در حدود یکی دو قرن پیش که هنوز تکنولوژی پمپاژ از منابع آب زیرزمینی توسعه نیافته بود؛ جوامع بشری در کنار رودخانه‌ها توسعه یافتند و میزان استحصال با میزان تخلیه طبیعی آبخانه در قالب چشمه و رودخانه‌ها محدود بود. سپس با حفر چاه‌های دستی و حفر قنات استحصال غیرطبیعی از منابع آب زیرزمینی شروع شد. لذا جوامع بشری برای اضافه برداشت آب از منابع آب زیرزمینی امکانات و تجهیزات مناسب را در اختیار نداشت و میزان برداشت تقریباً معادل همان مقداری بود که توسط چشمه و رودخانه از آب زیرزمینی تخلیه می‌گردید. شاید بتوان یکی از هوشمندانه‌ترین تکنولوژی‌هایی که جوامع بشری برای افزایش استحصال آب از آب زیرزمینی ساخته را سیستم قنات نام برد. سیستم قنات توانست به صورت سازگار با طبیعت، ظرفیت برداشت از منابع آب زیرزمینی را افزایش دهد؛ اما با ورود تکنولوژی پمپاژ به صورت کلی محدودیت‌های استحصال توسط چاه‌های دستی و زحمت فراوان در حفر قنات، برداشته شد. به بیان دیگر تکنولوژی پمپاژ دسترسی به منابع آب زیرزمینی را آسان نمود. این دسترسی راحت به منابع آب زیرزمینی موجب شده تا در میان مردم عوام و نا آشنا به سیستم پیچیده آب زیرزمینی، این افسانه که آب زیرزمینی به مثابه رودخانه و یا دریاچه‌ای مملو از آب شیرین در زیر پایمان قرار دارد، رواج یابد. این افسانه که ناشی از ساده‌انگاری در مورد سیستم پیچیده آب زیرزمینی است؛ در میان مردم عوام این فهم را جا انداخته بود که در برداشت آب از منابع آب زیرزمینی هیچ محدودیتی وجود ندارد. شکل (۱)

یک نقاشی است که فهم مردم ناآشنا به پیچیدگی‌های سیستم آب‌زیرزمینی مبتنی بر این افسانه (ناشی از باور ساده‌انگاران) را به نمایش گذاشته است. در این باور ساده‌انگارانه بهره‌برداران فکر می‌کنند که آب‌زیرزمینی مانند رودخانه و یا دریاچه‌ای مملو از آب شیرین در زیر پایمان است که هیچ محدودیتی در استحصال ندارد (Chevalking و همکاران، ۲۰۰۸).



شکل ۱- باور ساده‌انگارانه بهره‌برداران ناآشنا به پیچیدگی‌های سیستم آب‌زیرزمینی

امروزه همه مدیران و سیاست‌گذاران بر این باور غلط، و اینکه آب‌زیرزمینی آب موجود در شکستگی‌های سنگ‌های زیرزمین و یا آب موجود در آبرفت‌ها بوده، و لذا منبعی محدود می‌باشد، واقف هستند. این منبع محدود در هر منطقه‌ای متناسب با شرایط زمین‌شناسی و شرایط آب‌وهوایی حجم کاملاً مشخصی را به خود اختصاص می‌دهد که از طریق منافذ بسیار کوچک و میلی‌متری بین لایه‌های سطح زمین و بین ذرات خاک تغذیه می‌گردد.

این فهم اشتباه و باور غلط در مورد آب‌زیرزمینی ناشی از ساده‌انگاری سیستم پیچیده آب‌زیرزمینی، رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای آب و در نهایت برداشته شدن محدودیت‌های استحصال آب‌زیرزمینی ناشی از ورود تکنولوژی پمپاژ، موجب گردید تا اضافه‌برداشت از این منبع حیاتی افزایش یابد. برخی از منابع، این تحول در اضافه‌برداشت را به «انقلابی خاموش در استفاده بیش از حد از آب‌زیرزمینی» نام‌گذاری نموده‌اند (Martínez-Santos و Llamas، ۲۰۰۵).

سهم بسیار بزرگی از این انقلاب خاموش در استفاده بیش از حد از منابع آب‌زیرزمینی، به توسعه کشاورزی فاریاب مخصوصاً در اکثر کشورهای خشک و نیمه‌خشک دنیا اختصاص یافته است. شاید بتوان این‌گونه تعبیر نمود که با ورود تکنولوژی پمپاژ تحولی جدی در مدیریت آب‌زیرزمینی رخ داده است. برداشتی که عمدتاً بصورت ثقلی اتفاق می‌افتاد و کاملاً تابع شرایط طبیعت بود اکنون به وسیله پمپاژ، این امکان برای جوامع بشری فراهم شد تا بتواند بیش از ظرفیت تجدیدپذیر آب‌خانه آب برداشت نماید (Noori و همکاران، ۲۰۲۱). این تجاوز از ظرفیت تجدیدپذیری در بسیاری از

کشورهای دنیا تجربه شد و به زودی همه دریافتند که این برداشت اضافه، پایایی توسعه را به خطر می‌اندازد. اما این رشد و بلوغ هنوز در کشورمان رخ نداده و طی دهه‌های اخیر با عنوان سیاست خودکفایی گندم و امنیت غذایی، به توسعه کشاورزی فاریاب مبتنی بر برداشت از ذخایر استاتیک و تجدیدنپذیر آب‌زیرزمینی پرداخته شده است. در کنار این «سیاست ساده‌انگارانه» سایر سیاست‌های حمایتی دولت مانند وام‌های بلاعوض آبیاری تحت فشار و یارانه‌های انرژی باعث تشویق بیشتر کشاورزان به برداشت آب از منابع آب‌زیرزمینی شده است. بدیهی است که این باور غلط در مورد آب‌زیرزمینی موجب افزایش تعداد چاه‌های غیر مجاز شده است. از طرف دیگر این عدم درک درست در میان مالکین چاه‌های مجاز و غیر مجاز مانع از درک وضعیت بحرانی آب‌زیرزمینی شده و مانع از مشارکت جدی آب‌بران شده است.

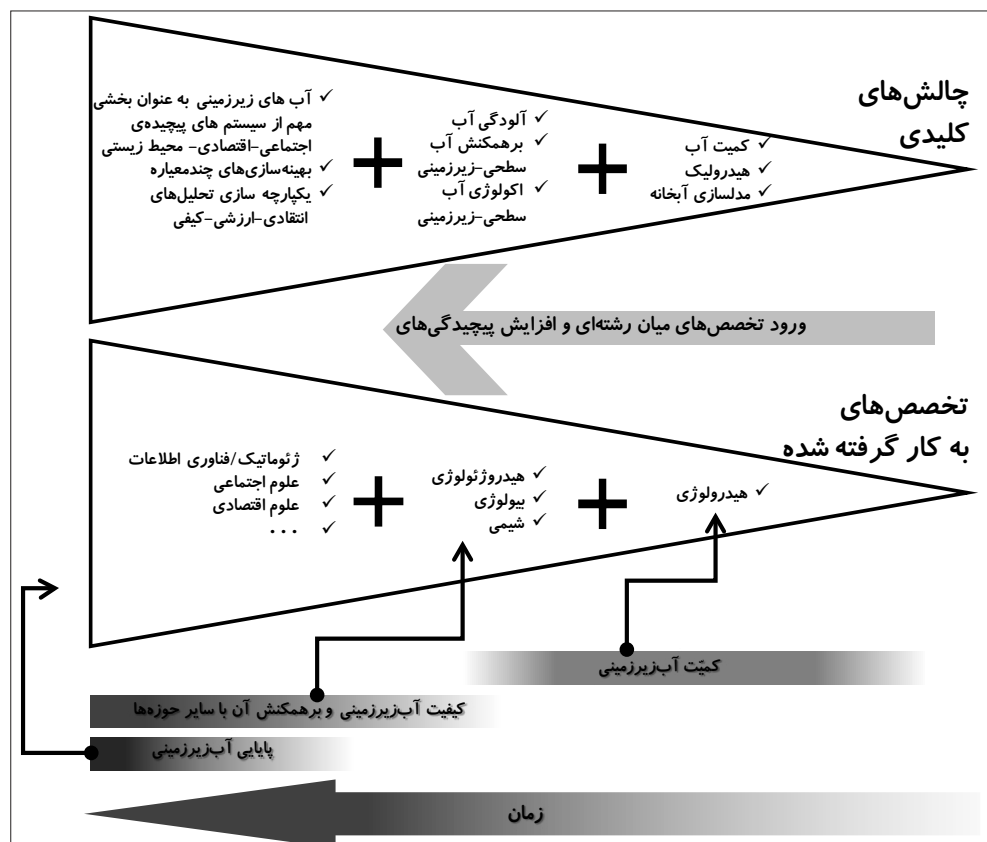
تحول مدیریت آب‌زیرزمینی

در ابتدای ورود تکنولوژی پمپاژ، کمیّت قابل پمپاژ از ذخایر آب‌زیرزمینی مورد توجه بود که از تخصص هیدرولوژی برای پاسخ به این نیاز استفاده می‌گردید. پس از گذشت چند دهه با شروع افت مستمر تراز آب‌زیرزمینی و رشد شهرنشینی، پیامدهای نامطلوب «انقلاب خاموش در استفاده بیش از حد از آب‌زیرزمینی» آشکار گردید. برخی از این پیامدهای نامطلوب مانند آلودگی آب‌خانه، خشک شدن چشمه‌ها، رودخانه‌ها و نابودی اکوسیستم‌های وابسته به آب‌زیرزمینی، چالش‌های جدیدی بود که ظهور نمود. برای پاسخ به این چالش‌ها، دیگر علم هیدرولوژی کفایت نداشت و علوم دیگر مانند هیدروژئولوژی، بیولوژی و شیمی نیز در مدیریت منابع آب‌زیرزمینی سهیم شدند. علاوه بر کمیّت، برهمکنش مدیریت آب‌زیرزمینی با سایر علوم مورد توجه جدی قرار گرفت. امروزه سیستم آب‌زیرزمینی به عنوان بخشی بسیار مهم از سیستم پیچیده اجتماعی-اقتصادی-زیست‌محیطی پذیرفته شده است.

با توجه به شکل (۲) مدیریت آب‌زیرزمینی از مورد توجه قرار دادن کمیّت قابل برداشت از آب‌زیرزمینی به رویکرد پایای آب‌زیرزمینی^۱ در پاسخ به این چالش‌های پمپاژ از آب‌زیرزمینی، متحول شده است. این رویکرد به هم‌تکاملی سیستم‌های مرتبط با آب توجه نموده و همچنین بر ضرورت اقدام مبتنی بر برنامه بلندمدت برای حفاظت از اکوسیستم تأکید شده است. در شکل (۲) سعی شده است تا مسیر تکامل مدیریت آب‌زیرزمینی از توجه به کمیّت تا توجه به پایایی تشریح گردد. امروزه مسأله مدیریت آب‌زیرزمینی با گسترش چالش‌های آن، به یک مسأله فرارشته‌ای تبدیل شده که تخصص‌های علوم اقتصاد، جامعه‌شناسی و ... نیز به آن افزوده گردیده است. بنابراین دستیابی به تحول اساسی در مدیریت آب‌زیرزمینی لازم است، تا معیارهای متناسب با سطح پیچیدگی

هنوز اقدام اجرایی که بتواند افت مستمر تراز آبخوان را متوقف نماید، رخ نداده است. به نظر می‌رسد که غفلت از پارادایم پایایی آب‌زیرزمینی در طرح‌ریزی و اجرا، یکی از مهمترین اصول در عدم توفیق در تعادل بخشی آب‌زیرزمینی باشد.

چالش‌های مدیریت آب‌زیرزمینی اتخاذ گردد. تحول مدیریت آب‌زیرزمینی تا حدودی در سطح پژوهش‌های دانشگاهی مورد بحث قرار گرفته و تخصص‌های متفاوت به مسأله اضمحلال آب‌زیرزمینی و چگونگی جلوگیری از آن، توجه نموده‌اند؛ اما



شکل ۲- تحول مدیریت آب‌زیرزمینی در پاسخ به رشد پیچیدگی‌های مسأله آب (Elshall و همکاران، ۲۰۲۰)

اقتصادی حاصل از پمپاژ که باعث توسعه اقتصادی-اجتماعی می‌شود، با منافع حفاظت اکوسیستم برای دوام و بقاء حیات در تعارض است. هنگامی می‌توان به پایایی آب‌زیرزمینی دست یافت که مدیریت آب به دنبال حداکثر نمودن منافع کلی که مجموع منافع کوتاه‌مدت اقتصاد-اجتماعی و منافع غیرمستقیم و بلندمدت حاصل از حفظ اکوسیستم است، باشد. در پارادایم پایایی آب‌زیرزمینی مشخص نمودن نقطه بهینه برای بیشینه نمودن منافع کل در یک دوره بلندمدت، امری اجتماعی-اقتصادی-محیط زیستی بوده، که تعیین تکلیف آن در سطح کلان، شدنی نیست؛ لذا با توجه به ماهیت پراکنده منبع آب‌زیرزمینی و متفاوت بودن شرایط اقتصادهای وابسته به آب‌زیرزمینی، لازم است تا در سطح محلی و با کمک خود مردم، راه حل بهینه که بیشترین سود منافع مستقیم و غیر مستقیم اقتصادی-اجتماعی-محیط زیستی را به همراه دارد، شناسایی و برای دستیابی به آن برنامه‌ریزی و اقدام گردد.

پارادایم پایایی آب‌زیرزمینی

شکل (۳) به تبیین مفهوم «پایایی آب‌زیرزمینی» پرداخته است. پایایی آب‌زیرزمینی را Gleeson و همکاران (۲۰۲۰) به صورت «حفظ کمیّت و کیفیت ذخایر آبخوان در یک دوره درازمدت [و جریان‌های آن] با استفاده عادلانه مبتنی بر حکمرانی خوب و مدیریت در یک دوره بلندمدت» تعریف نمودند. سیستم مدیریت پایای آب‌زیرزمینی، سیستمی است که در آن پمپاژ می‌تواند به طور مطمئن در مدت نامحدودی ادامه یابد. مدیران آب در صورتی می‌توانند راه‌حل‌های استفاده پایا از آب‌زیرزمینی را شناسایی کنند که حداکثر پمپاژ را در یک دوره بسیار طولانی مدت تعریف نموده و پیامدها و محدودیت‌های محیط‌زیستی، قانونی، اجتماعی، اقتصادی و فیزیکی را بپذیرند. هنگامی می‌تواند مدیریت آب در محدوده پایا قرار گیرد که دنبال حداکثر نمودن منافع بلندمدت به جای کسب منافع کوتاه‌مدت باشد (Hardin, ۱۹۶۸). زیرا منافع

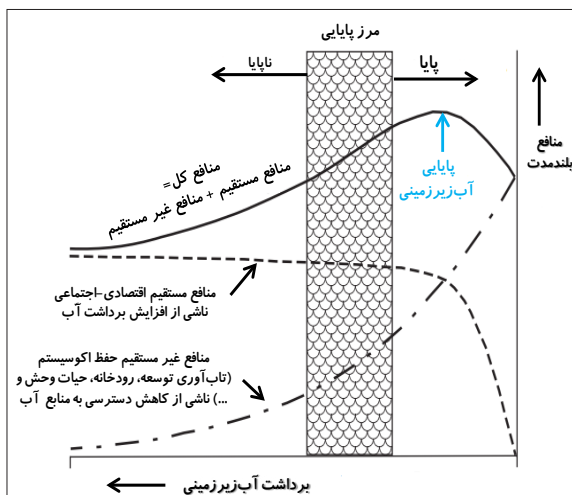
تجدیدپذیری با یک بیلان ساده و با داده‌های کافی امکان‌پذیر است. این دوره همراه با گذر از شار طبیعی ورود به آبخانه بوده و در صورت افزایش مصارف برداشت‌ها، وارد ذخایر استاتیک آبخانه می‌شود.

۳- با گذر مقدار مصارف از ۵۰ درصد نسبت به ظرفیت تجدیدپذیری آب‌زیرزمینی ($C/RW > 50\%$)، پایش کامل مبتنی بر داده‌های کافی و استفاده از حسابداری آب (WA+) ضرورت می‌یابد. در این مرحله در صورتیکه حسابداری آب به درستی انجام نشود، در شرایط اضطراری مانند وقوع خشکسالی‌ها که ظرفیت تجدیدپذیری به شدت کاهش می‌یابد، موجب برداشت از ذخایر استاتیک و افت تراز آبخوان خواهد گردید. در این شرایط تراز آب‌زیرزمینی نسبت به میانگین بلندمدت یک پله پایین می‌افتد که در صورت عدم مدیریت صحیح و جبران آن در شرایط ترسالی، بازگشت به تراز اولیه مقدور نخواهد بود. در این وضعیت به دلیل کمبود آب در سیستم حسابداری آب، حجم و میزان برگشت‌ها نیز مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

۴- در این شرایط به دلیل تجاوز از ظرفیت تجدیدپذیر آب‌زیرزمینی ($C/RW > 70\%$)، شناسایی اثرات و پیامدهای نامطلوب سیستم پیچیده آب‌زیرزمینی بسیار دشوار است و لذا مدل‌سازی‌های چند معیاری برای تعیین نقطه تعادل بین منافع اقتصادی پمپاژ و حفظ اکوسیستم‌های وابسته به آب‌زیرزمینی ضروری است. در این وضعیت عدم تعادل کیفی منابع آب زیرزمینی خودنمایی می‌کند. در صورت عدم مدیریت صحیح مصارف در این شرایط، افت مستمر تراز آبخوان قطعی خواهد بود.

۵- با عبور مصارف از ظرفیت تجدیدپذیر حوضه آبریز ($C/RW > 100\%$)، پیامدهای نامطلوب برداشت از ذخایر استاتیک و تجدیدنپذیر آب‌زیرزمینی مانند فرونشست، کاهش کیفیت آب، تعارض حقابه‌ها و... ظهور یافت. لذا برای حل تعارضات بر سر منابع محدود آب، علاوه بر موارد قبلی (حسابداری و مدل‌سازی چندمعیاره) توجه جدی به جلب مشارکت جدی مصرف‌کنندگان برای کاهش مصارف نیز مورد توجه قرار می‌گیرد.

۵- در این مرحله دو راه وجود دارد: راه اول اینکه به ادامه نابودی آبخوان ادامه داده و اقدامی خاصی انجام ندهیم. راه دوم مدیریت مصارف و بازگشت به سمت پایایی آب‌زیرزمینی است که تشریح کامل آن در شکل (۵) آورده شده است. در صورتی که کنش‌گران^۲ راه حل دوم را انتخاب نمایند، لازم است تا برای توانمندسازی خود تلاش نموده و مبتنی بر درک گستردگی و پیچیدگی سیستم منابع-مصارف آب، برای کاهش برداشت‌ها تصمیم‌گیری نمایند.



شکل ۳- پارادایم پایایی آب‌زیرزمینی

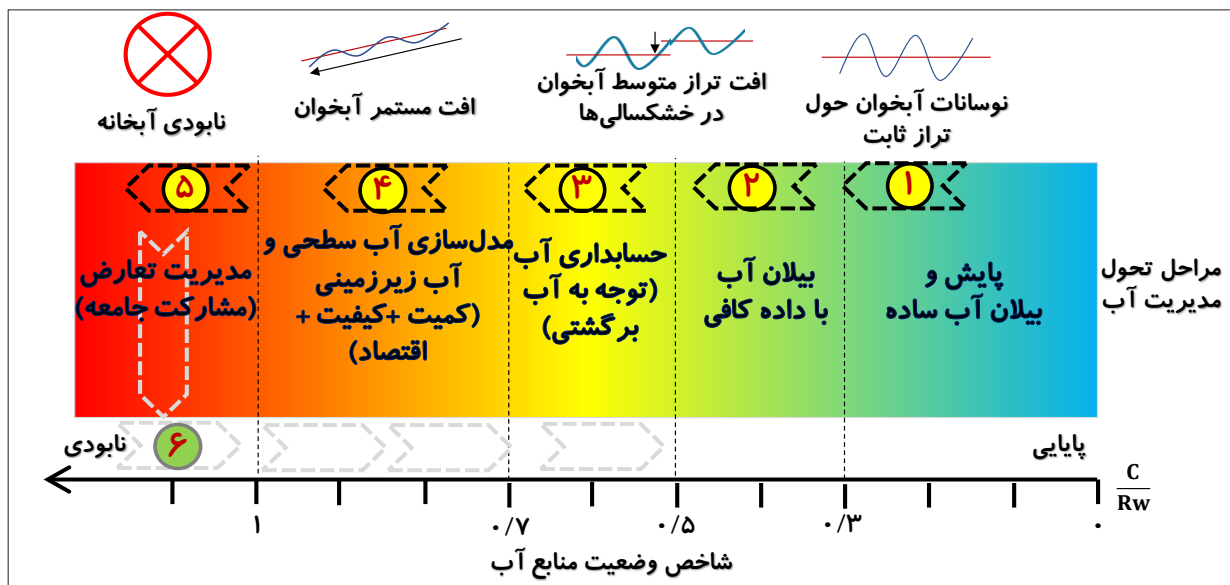
امروزه مدیریت آب در کشورمان فقط منافع مستقیم پیشران‌های اقتصادی-اجتماعی را در نظر گرفته و توجه به منافع غیرمستقیم حفظ اکوسیستم را مورد غفلت قرار داده است. بدیهی است چنین رویکردی بدون در نظر گرفتن منافع مستقیم و غیرمستقیم بلندمدت، محکوم به جانبداری از منافع کوتاه‌مدت و مستقیم اقتصادی-اجتماعی بوده، و اثربخشی در بهبود وضعیت آب‌زیرزمینی نخواهد داشت.

تبیین وضعیت پایایی آب‌زیرزمینی

بدیهی است که با رشد برداشت‌ها از منابع آب‌زیرزمینی، باید پایش منابع آب با دقت بیشتری صورت پذیرد؛ و از نظر تخصیص، دریافت مجوز برداشت، اجباری می‌شود. سپس حسابداری آب و مدل‌سازی چندمعیاره ضرورت می‌یابد (البته با داده کافی و موثق) تا به کمک نتایج آن بتوان وضعیت منابع و مصارف آب را در هر جزئی از محدوده، تحلیل نمود. در این مرحله و پس از آن، نیاز مبرمی به روش‌های رفع تعارض و اجماع‌سازی است؛ تا به کمک همکاری گردواران بتوان به تعادل‌بخشی آب‌زیرزمینی دست یافت. شرح این مراحل بر اساس نسبت مصرف به تجدیدپذیری (C/RW)^۲ در ذیل آورده شده است (شکل ۴).

۱- در این شرایط پایش و فراهم‌آوری بیلان ساده منابع آب، پاسخ‌گوی چالش‌های تخصیص منابع آب‌زیرزمینی می‌باشد. در این وضعیت ($C/RW < 30\%$) بوده، آب‌زیرزمینی در وضعیت پایا قرار دارد و لذا بین منابع و مصارف تعادل برقرار است.

۲- با گذر مقدار مصارف از ۳۰ درصد نسبت به ظرفیت تجدیدپذیری آب‌زیرزمینی، پایش برداشت‌ها و تنظیم آن با نرخ



شکل ۴- ارتباط پایایی آب زیرزمینی با شاخص نسبت مصرف به تجدیدپذیری (C/Rw)

۶- این مرحله، آغاز اصلاح برای مدیریت آب زیرزمینی و حرکت به سمت رویکرد پایایی آب زیرزمینی است. این اصلاح مدیریت آب زیرزمینی در سه گام اصلی مطابق شکل (۵) قابل انجام است. گام اول این اقدام، اصلاح در مدیریت آب زیرزمینی، «کاهش برداشت‌ها و کنترل افت» یا همان سناریوی کاهش استخراج از منابع آب زیرزمینی می‌باشد. گام دوم بعد از انجام کامل گام اول، «صفر کردن افت مزمن و ایجاد تعادل جدید در آبخانه» بوده که با سناریوی ایجاد تعادل جدید در آبخانه مشخص شده است. گام سوم بعد از اجرای موفق گام اول و دوم، «احیاء و بازگشت به تعادل اولیه» می‌باشد؛ که هدف نهایی، دستیابی به رویکرد پایایی آب زیرزمینی است.

تحول خواهی و اصلاح نقطه شروع تعادل بخشی

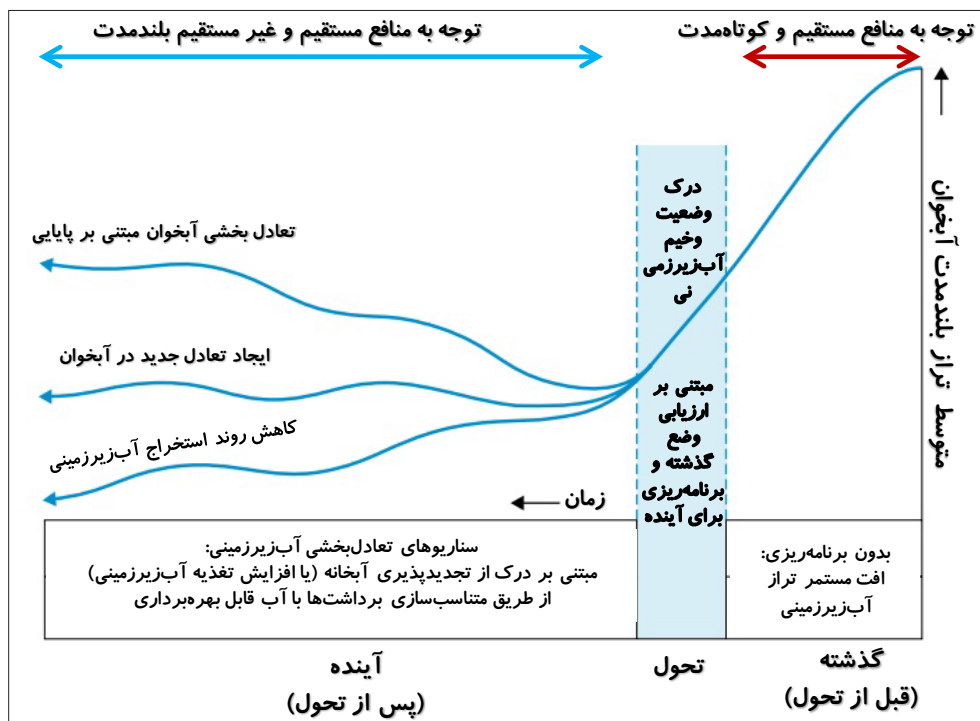
بازخوانی تجارب کشورهای مختلف که دچار اضافه برداشت از ذخایر آب زیرزمینی شده‌اند، گویای این امر است که هر کشوری به فراخور شرایط اقتصادی-اجتماعی خویش راهکارهای متفاوتی برای پایش حفاظت از آب زیرزمینی اتخاذ نموده است. شکل (۵)، وضعیت عمومی کشورهای درگیر با مسأله اضافه برداشت از آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، تا زمانی که بدون برنامه‌ریزی، از آبخوان برداشت می‌شود، تراز آبخوان با افت مستمر روبه رو است. دوره‌ای که در شکل (۵) به صورت رنگی نشان داده شده، دوره تحول خواهی برای تغییر در مدیریت آب زیرزمینی است. در این دوره، کلیه کنشگران حوضه آبریز، به اجماع می‌رسند که مدیریت آب زیرزمینی خویش را متحول نموده، و به سمت

پایایی آب زیرزمینی پیش بروند. به بیان دیگر این دوره، دوره ظرفیت سازی و تحول خواهی برای تغییر وضع موجود منابع آب است. تحول خواهی و ایجاد اجماع در میان کنشگران که هدف اصلی آن تعادل بخشی آب زیرزمینی است، می‌تواند سه سناریو در تحول وضع مدیریت منابع آب زیرزمینی ایجاد کند.

سناریوی کاهش روند استخراج آب زیرزمینی: در این حالت تحول در مدیریت آب زیرزمینی تحولی حداقلی است که هدف اصلی جلوگیری از صدور مجوزهای جدید برداشت از ذخایر آب زیرزمینی و کاهش شیب اضمحلال ذخایر تجدیدناپذیر آب زیرزمینی می‌باشد.

سناریوی ایجاد تعادل جدید در آبخوان: در این حالت تحول مدیریت آب زیرزمینی به اندازه‌ای است که موفق می‌شود تا بین منابع (ظرفیت تجدیدپذیری آب زیرزمینی) و مصارف (مدیریت منافع اقتصادی ناشی از پمپاژ آب) تعادل برقرار نماید. این رویکرد می‌تواند تعادل جدید در تراز آبخوان ایجاد نموده و از برداشت ذخایر تجدیدناپذیر آبخوان جلوگیری نماید. به بیان ساده‌تر هدف اصلی این حالت همگام نمودن تقاضا با ظرفیت تجدیدپذیری آب زیرزمینی، می‌باشد.

سناریوی تعادل بخشی آبخوان مبتنی بر پایایی: در این سناریو هدف اصلی تعادل بخشی و بازگشت به تراز اولیه آبخوان است. در این حالت کاهش مصارف (مدیریت منافع اقتصادی ناشی از پمپاژ آب) و یا افزایش تغذیه آبخوان تا حدی انجام می‌شود که میزان برداشت خیلی کمتر از منابع (ظرفیت تجدیدپذیری آب زیرزمینی) گردد؛ و لذا این فرصت فراهم می‌شود تا تعادل بخشی و بازگشت به تراز اولیه آبخوان امکان پذیر گردد. به بیان دیگر از این حالت، حرکت به سمت پایایی آب زیرزمینی نیز یاد می‌گردد.



شکل ۵- وضعیت عمومی کشورهای درگیر با مشکل افت تراز آبخوان و نحوه برخورد با مسأله تعادل بخشی آبخوان (Foster و همکاران، ۲۰۰۵)

دستیابی به تعادل بخشی آبخوان، باید عزمی راسخ در تمام سطوح کنشگران مرتبط با آبخوان پدید آید؛ که این ظرفیت سازی امری زمان بر و طاقت فرسا است و نیازمند توجه ویژه به اصل تفویض اختیار، باعث ارتقاء جایگاه جوامع محلی شده، که زیرساخت توانمندسازی ایشان را برای مدیریت مشارکتی و یکپارچه حوضه ای فراهم می کند. بدیهی است که توانمندسازی جوامع محلی برای حل پیچیدگی های مدیریت آبخوان، ضرورتی اجتناب ناپذیر می باشد.

هم اکنون اکثر محدوده های مطالعاتی کشور، از ذخایر تجدیدناپذیر آبخوان برداشت می نمایند و در شرایط مرحله ۵ (شکل ۴) قرار دارند. بدیهی است که الزامات قرارگیری در مرحله ۵ استفاده از تمامی ابزارهای مدیریتی (حسابداری آب، مدل سازی چندمعیاره، تخصیص مبتنی بر رعایت پایایی آبخوان و...) و از همه مهم تر جلب مشارکت آبران برای کاهش برداشتها می باشد. این در حالی است که افت افسارگسیخته منابع آبخوان ناشی از شکاف نظام حکمرانی و بهره برداری، در حال خشک نمودن سفره های آبخوان مطابق با آنچه در مرحله پنجم (شکل ۴) در حال تجربه شدن است، می باشد؛ ولی ساختارهای مدیریت آبخوان و تعادل بخشی این منبع حیاتی، بسیار ساده انگارانه تنظیم شده، که متناسب با قرارگیری برداشت در شرایط مرحله ۱ (شکل ۴) است. این وضعیت مانع از

مدیریت آبخوان کشورمان هنوز وارد مرحله درک وضعیت وخیم منابع آبخوان مبتنی بر ارزیابی وضع گذشته و برنامه ریزی برای آینده نشده است. لذا مادامی که مدیریت آبخوان در مرحله قبل از تحول قرار دارد، بدیهی است که همان رفتار اشتباه گذشته را تکرار می کند و افت مستمر بدون کاهش شیب تراز بلندمدت در حال وقوع است. تعادل بخشی هم در فهم مسأله و هم در اجرای آن دچار نقص جدی است. دلیل نقص در فهم این است که هنوز هم تعادل بخشی به عنوان یک مسأله چند وجهی مبتنی بر بهینه نمودن منافع اقتصادی-اجتماعی-محیط زیستی نمی باشد. در حوزه اجرا، اگرچه که وضعیت مدیریت آبخوان در وضعیت ۵ در شکل (۴) قرار دارد، ولی الزامات پیاده سازی تعادل بخشی در حد و اندازه الزامات وضعیت ۱ در شکل (۴) است.

جمع بندی

بازخوانی تجارب کشورهای موفق در مدیریت و تعادل بخشی آبخوان، گویای این امر بدیهی است که مدیریت پایایی آبخوان یکی از پیچیده ترین موضوعات است؛ به گونه ای که حل مسأله تعادل بخشی آبخوان در هم تکاملی با سایر مدیریت ها تعریف می گردد. باید اذعان نمود که تعادل بخشی آبخوان، مسأله ای میان رشته ای بوده و مبتنی بر مدیریت آبخوان در یک دوره بلندمدت (بین نسلی) می باشد. برای

نتیجه یافتن اقدامات تعادل بخشی آب زیرزمینی شده که از آن به اصطلاح «تعادل بخشی آب زیرزمینی سهل ممتنع» به عنوان یک ناسازگرا (پارادوکس) می توان یاد نمود.

امروزه ساختار موجود مدیریت آب زیرزمینی در مقایسه با وضعیت مطلوب (رویکرد پایایی آب زیرزمینی) فاصله بسیار زیاد دارد. این فاصله بسیار زیاد به گونه ای است که می توان طرح های مرتبط با تعادل بخشی آب زیرزمینی را «سیل وعده ها، اما تحقق قطره چکانی» نامید. شاید بتوان امر را شالوده پاسخ به این سوال که چرا در عرصه عمل، تعادل بخشی کارایی لازم را نداشته و همچنان کشور با افت مستمر تراز آبخوان مواجه می باشد؟ دانست. به بیان ساده تر این دستیابی بسیار کم نسبت به رویکرد پایایی آب زیرزمینی ناشی از ساده انگاری در حل مسأله چندوجهی و پیچیده تعادل بخشی آب زیرزمینی، «مسأله سهل ممتنع» را یادآوری می نماید.

پیشنهادهات

با توجه به موارد پیش گفته برخی پیشنهادها به شرح زیر ارائه می گردد:

- تبدیل تمرکزگرایی به تفویض (اخذ تصمیمات در پایین ترین سطح تا جای ممکن): میزان تمرکزگرایی در مدیریت آب بسیار زیاد است. شاید بتوان برخی از چالش های مرتبط با آب را به صورت متمرکز حل نمود. اما مسأله تعادل بخشی آب زیرزمینی مسأله ای محلی بوده و در هر منطقه به فراخور شرایط، راه حل ها بسیار متفاوت خواهد بود. برای تعادل بخشی آب زیرزمینی ضروری است تا رویکرد دستیابی به پایایی آب زیرزمینی مطابق شکل (۳) مورد توجه قرارگیرد. مطابق این تعریف، رویکرد پایایی آب زیرزمینی به دنبال بهینه کردن منافع اقتصادی جوامع بشری در کنار حفظ محیط زیست است. لذا نهادهای دولت مانند وزارت نیرو از نهاد مسئول و مجری تعادل بخشی، به نهاد تسهیل گر تبدیل گردد. بنابراین ضروری است تا بر اساس اصل تفویض اختیار، مسئولیت های خویش را به شورای حوضه های آبریز و سپس به جوامع مردمی/ محلی واگذار نماید؛ تا با ایجاد ظرفیت سازی و کمک به بهره برداران بتوان به سمت پایایی آب زیرزمینی حرکت نمود.

- بعد از انجام تفویض اختیار برای رشد نهادهای مردمی فراتسهیل گری لازم است: برای اینکه کنشگران متفرق بتوانند از شرایط موجود به شرایط مطلوب (ساختار و سازماندهی مردم محلی) برسند، جلب مشارکت مبتنی بر اعتمادسازی برای اجماع و افزایش مهارت برای حل مسائل گوناگون لازم است. در این شرایط نهادهای دولتی در سطح محلی نقش تسهیل گر را بازی نموده و در سطح حوضه آبریز برای ایجاد اجماع و یکپارچگی در سیاست های حوضه آبریز، باید نقش فراتسهیل گری را داشته باشند.

- لزوم بسترسازی در نظام حکمرانی کنونی برای ایجاد عزم سیاسی در تحول مدیریت آب: بدیهی است که حرکت از شرایط کنونی (حاکمیت نهادهای دولتی) به شرایط مطلوب (مدیریت یکپارچه و مشارکتی در سطح حوضه آبریز) مسیری پیچیده و طاقت فرسا است. این بسیار ساده انگارانه است که فرآیندی تعادل بخشی که مبتنی بر تکامل و تحول می باشد را واقعه و یا رخدادی ناگهانی پنداشت. بنابراین اساسی ترین اقدام برای شروع دوره تحول خواهی، ایجاد بسترهای قانونی برای یاری گیری بهره برداران و شروع فرآیند تحول در مدیریت آب زیرزمینی است.

- توجه به چرخه دمیگ^۵ (برنامه ریزی، ارزیابی، یادگیری و در نهایت پیاده سازی) در برنامه تعادل بخشی آب زیرزمینی: متأسفانه مدیریت آب زیرزمینی دارای چرخه یک طرفه و ناقص است، به گونه ای که رابطه بالا به پایین و با اعمال قانون توسط سازمان دولتی بدون رابطه پایین به بالا و دریافت بازخورد از بهره برداران، سالیان متوالی است که در حال اجرا است؛ در حالی که در رویکرد پایایی مبتنی بر مصرف بهینه، و تقویت سرمایه اجتماعی و مشارکت بهره برداران می باشد. برنامه ریزی مبتنی بر جلب مشارکت بهره برداران در پیاده سازی اقدامات و توجه به نحوه استمرار این مدیریت (پایش و ارزیابی اقدامات انجام شده) توسط نهادهای تسهیل گر (مانند وزارت نیرو و جهاد کشاورزی) می تواند در بهبود تعادل بخشی آب زیرزمینی، مفید واقع شود.

- توجه به پیچیدگی های برنامه زمان بندی بلندمدت (راهبردی): اگرچه که تاکنون طرح های تعادل بخشی آب زیرزمینی که تصویب و ابلاغ شده اند، از نظر کارشناسی و تئوری قابل قبول و مناسب هستند، اما واقعیت هایی که حل مسأله پیچیده آب با آن مواجه است را مورد غفلت قرار داده اند. در برخی از موارد سیاست گذاران از واقعیت روشن (بهره برداران غیرمجاز، تغییرات اقلیمی و ...) غفلت نموده، و لذا طبیعتاً نمی توان از طرح انتظار موفقیت داشت. واقعیت این است که در اجرای تعادل بخشی، محدودیت های جدی وجود دارد. محدودیت های اعتباری و مالی (جهت تأمین به موقع اعتبارات مورد نیاز در دستورالعمل های مختلف)، محدودیت های اجتماعی (بیکاری و معرفی نشدن فرصت های شغلی جایگزین برای بهره برداران غیرمجاز، فقدان پذیرش بهره برداران برای مشارکت در حفظ منابع آب، فقدان سرمایه اجتماعی و ...)، محدودیت های نهادی و ساختاری (تداخل وظایف و اختیارات و اثر غیرقابل انکار مراجع تصمیم گیری خارج از سازمان آب و ...) و محدودیت های فنی (در زمینه تکنولوژی های استفاده بهینه از آب و ...) از جمله برخی از این محدودیت ها می باشند. این محدودیت ها، برای تمام مدیران و کارشناسان ملموس و آشنا هستند. لازم است تا این محدودیت ها در برنامه بلندمدت مدیریت آب زیرزمینی پیش بینی شده و برای مواجهه با آنها برنامه ریزی گردد، تا بتوان به سمت پایایی آب زیرزمینی حرکت نمود.

Ideas For Groundwater Management. International Union for Conservation of Nature (IUCN), ISBN: 978-90-79658-01-5.

Elshall AS., Arik AD., El-Kadi AI., Pierce S., Ye M., Burnett KM., Wada CA., Bremer LL. and Chun G. 2020. Groundwater sustainability: A review of the interactions between science and policy. *Environmental Research Letters*, 15(9): 1-57.

Foster S., Nanni M., Kemper K., Garduño H. and Tuinhof A. 2005. Utilization of Non-Renewable Groundwater: A Socially-Sustainable Approach to Resource Management. The World Bank, Washington DC. (GWMTE Briefing Note Series, Note 11).

Gleeson T., Cuthbert M., Ferguson G. and Perrone D. 2020. Global Groundwater Sustainability, Resources, and Systems in the Anthropocene. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251>. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48: 431-463.

Hardin G. 1968. The tragedy of the commons: the population problem has no technical solution; it requires a fundamental extension in morality. *science*. American Association for the Advancement of Science, 162(3859): 1243-1248.

Llamas M.R. and Martínez-Santos P. 2005. Intensive Groundwater Use: Silent Revolution and Potential Source of Social Conflicts. *American Society of Civil Engineers Journal of Water Resources Planning and Management*, 131: 337-341.

Margat J. and van der Gun J. 2013. Groundwater around the World: A Geographic Synopsis. CRC Press/Balkema. Leiden.

Noori R., Maghrebi M., Mirchi A., Tang Q., Bhattarai R., Sadegh M., Noury M., Torabi Haghighi A., Kløve B. and Madani K. 2021. Anthropogenic depletion of Iran's aquifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. National Acad Sciences, 118(25): e2024221118.

- متناسب نمودن برنامه‌ها با واقعیت‌های جامعه: ذینفعان، صاحبان و محافظان اصلی آب، آحاد مردم هستند. اما روح حاکم بر قوانین تعادل‌بخشی که توسط بخش دولتی تدوین شده است؛ نگاه حاکمیتی در تمام بخش‌های آن دیده می‌شود. بر اساس رویه‌های پیشنهادی حکمرانی مطلوب آب، دستورالعمل‌ها و اقدامات حفاظتی آب باید منبعث و مستخرج از اراده مردم باشند تا ضمانت اجرایی و پایداری در استمرار طرح، فراهم گردد. از این رو باید از دیدگاه بهره‌برداران آب نیز دستورالعمل‌ها مورد ارزیابی، نظرسنجی، بازنگری و اصلاح قرار گیرد تا در نهایت بتواند بین آنان مقبولیت داشته باشد.

- اصلاح نظام سیاست‌گذاری تعادل‌بخشی: متأسفانه به دلیل عدم پایش نظام سیاست‌گذاری، برخی از سیاست‌ها مانند آبیاری تحت فشار، تخصیص پساب و... اگرچه ظاهراً به عنوان سیاست‌های تعادل‌بخشی آب‌زیرزمینی یاد می‌شوند، اما در واقع پیاده‌سازی به گونه‌ای است که افت آب‌خانه را شتاب بیشتری می‌بخشد. این سیاست‌ها را می‌توان به ضرب‌المثل معروف «از قضا سرکنگبین صفرافزود؛ روغن بادام خشکی می‌نمود» تشبیه کرد.

سیاسگزاری

از جناب آقای دکتر کامران داوری که در تدوین ساختار یادداشت تحلیلی و همچنین جناب آقای مهندس امین فخرمحمدی که از نظرات ارزشمندشان در بهبود یادداشت استفاده شده است، قدردانی می‌گردد.

پی‌نوشت

- 1-Groundwater Sustainability
- 2-Ratio of consumption to renewability
- 3-Actors
- 4-subsidiarity
- 5-Deming cycle

منابع

شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی. ۱۴۰۰. گزارش سیمای آب استان خراسان رضوی. مشهد.

Chevalking S., Knoop L. and van Steenberg F. 2008.



هادی میرابوالقاسمی؛

کارشناس ارشد منابع آب و عضو هیات مدیره مهندسین مشاور آب خاک تهران

و عضو کارگروه آب معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری

Shm393@gmail.com



در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی آغاز شده است. پس از آن، حفر بی ضابطه چاه‌های عمیق تا سال ۱۳۴۵ که نخستین قانون حفظ و حراست از آب‌های زیرزمینی وضع شد، ادامه یافت.

براساس گزارش خانم ملتون، در سال ۱۳۲۷ حدود ۳۰ چاه تلمبه‌ای در حوالی یزد حفر شده و با توجه به افزایش یافتن آب، قیمت آب کمی پایین آمده بود. صاحبان این چاه‌ها بیشتر شهرنشین بودند و امیدوار بودند که سرمایه حفر هر حلقه چاه (حدود ۹۰۰۰۰ ریال) را طی یک یا دو سال بازبایند. وی تأکید می‌کند که این کار، یعنی حفر چاه و افزایش آب را دهقانان بی چون و چرا نمی‌پذیرفتند و می‌ترسیدند که مبادا صاحبان چاه‌ها بعدها قیمت آب را افزایش دهند و باغ‌ها و اراضی توسعه یافته آنها، به دلیل گرانی آب و بی‌آبی نابود شود. ملتون قیمت آب ۳ حلقه چاه تلمبه‌ای موجود در کاشمر را تقریباً ساعتی ۱۰۰ ریال گزارش کرده است. هم چنین در بخشی از گزارش خود آورده که شرایط واگذاری اراضی خالصه به کشاورزان در استان خوزستان آن بوده که متصرف در زمین خود تلمبه‌ای نصب کند (ملتون، ۱۳۷۷) که نشان می‌دهد توسعه استفاده از تلمبه‌ها، از سیاست‌های اصلی و حمایتی دولت‌های وقت بوده است.

با ورود و توسعه تلمبه‌ها، پس از ۳۰۰۰ سال، مدیریت منابع آب زیرزمینی با سرعت و بدون برنامه‌ریزی، از بهره‌برداران سنتی (کشاورزان و مالکان اراضی) به دولت و فن‌سالاران (تکنوکرات‌ها) منتقل و به مرور زمان به ابزاری برای گسترش قدرت و نفوذ آنان و مراودات غیرتخصصی تبدیل شد و واگذاری بخشی از مالکیت این منابع به صاحبان سرمایه، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی را به تجارتی سودمند تبدیل کرد.

تداوم این دولت سالاری -که کماکان ادامه دارد- و نداشتن برنامه‌های مبتنی بر جامع‌نگری و آمایش سرزمین، باعث شد طی کمتر از ۸۰ سال، حدود ۹۰۰ هزار حلقه چاه (حدود ۳۵۰ هزار حلقه غیرمجاز و ۵۵۰ هزار حلقه مجاز (زارع، ۱۴۰۰)) حفر و بهره‌برداری شود و اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی از مرز بحران عبور کند و به مرز فاجعه نزدیک شود. بیش از ۹۳ درصد این چاه‌ها (حدود ۸۴۰ هزار حلقه) بعد از سال ۱۳۵۷ حفر شده‌اند و نکته مهم این است که دولت‌ها طی این سال‌ها حدود ۵۰۰ هزار پروانه بهره‌برداری برای چاه‌هایی صادر کرده‌اند که بخش زیادی از آنها در دشت‌ها و محدوده‌های ممنوعه قرار داشته و خلاف مقررات و غیرمجاز هستند. روند صدور این گونه پروانه‌ها نوعی سرمشق و چارچوب فکری و فرهنگی -به عبارتی نوعی الگوواره (پارادایم)- در بهره‌برداران آب‌های زیرزمینی ایجاد کرده و اغلب آنها اقدامات خلاف قانون خود -مانند اضافه برداشت و به‌ویژه حفر و توسعه چاه‌های غیرمجاز- را با استناد به همین رویه، تحلیل و توصیف یا توجیه می‌کنند.

بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی از مشخصه‌های نظام کهن آبیاری در فلات خشک ایران است و علاوه بر قنات‌ها که شهرت جهانی دارند، آبکشی از چاه با استفاده از روشی که به گاو چاه معروف شده نیز در بخش‌های حاصلخیز این فلات، پیشینه‌ای بسیار طولانی دارد. این روش را نخستین بار بلوتارک (حدود ۴۶-۱۲۷ میلادی) ثبت کرده است (محبی، ۱۳۸۳).

حدود ۹۰۰ سال بعد، کرجی در کتاب معروف خود آورده: آب‌هایی که در زیرزمین قرار دارند نیز در بعضی مواضع مانند دریا ساکن و آرام هستند. بیشتر آب‌های ساکن در زیر صحرای پهن‌آور و پست قرار دارند، و دسترسی به آنها در ژرفای معین امکان‌پذیر است (کرجی، ۱۳۷۳). این مطلب بر شناخت خوب دانشمندان ایرانی نسبت به منابع آب زیرزمینی دلالت دارد و نشان می‌دهد آن زمان، از این منابع بهره‌برداری می‌شده است. پس از کرجی، حدود یکصدسال پیش وولف گزارش کرده که در زمین‌های آبرفتی فلات ایران، بیشتر خانه‌ها و باغ‌ها چاه مخصوص به خود دارند و در زمین‌های زراعتی، آب این‌گونه چاه‌ها را دو نفر آبکش به کمک دوگاو یا دو قاطر می‌کشند. هر آبکشی که ۲۵۰ دلو آب بکشد، کار روزانه خود را با موفقیت انجام داده و چون هر دلو ۵۶ لیتر می‌گیرد، ۱۴۰۰ لیتر آب برای آبیاری چند قطعه زمین صیفی‌کاری تأمین می‌شود. وی متوسط سطح آب زیرزمینی در اصفهان را ۵ متر، در شیراز ۱۶ متر و در یزد و کرمان ۵۰ تا ۶۰ متر گزارش کرده که ارقامی جالب توجه‌اند (وولف، ۱۳۷۲). بعد از وولف، خانم ملتون نیز گزارش کرده گاو چاه‌ها در نقاط بسیار پراکنده و دور از هم، مانند خوزستان، سواحل خلیج فارس، ایالت فارس، اصفهان و برخی نواحی شرقی و نواحی ساحلی دریاچه رضاییه دیده می‌شود (ملتون، ۱۳۷۷).

هانری گرپلو فرانسوی شاید اولین کارشناس مسائل آب باشد که بنا به دعوت دولت ایران در سال ۱۳۱۹ برای تنظیم برنامه بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی، به ایران آمده است. وی در ابتدای ورود به ایران، آن‌گونه که خودش گفته، سیستم استفاده از آب‌های زیرزمینی به وسیله قنات‌ها را به استهزا می‌گیرد و با گسترش این شیوه، مخالفت می‌کند (گوبلو، ۱۳۷۱). هرچند بعدها یکی از مهم‌ترین منابع در رابطه با قنات‌ها را نگاشت؛ ولی، به احتمال بسیار زیاد مخالفت وی با قنات‌ها آگاهانه و در جهت توجیه و سرعت بخشیدن به استفاده از تلمبه‌ها بوده است؛ زیرا در همین ایام و در سال ۱۳۲۳ نخستین چاه عمیق کشاورزی ایران با همکاری یک مهندس آمریکایی حفر شد و فصل جدیدی

در حال حاضر مصرف بخش کشاورزی عامل اصلی و حتی تنها عامل برهم خوردن تعادل بین تغذیه و تخلیه منابع آب زیرزمینی تلقی می شود. آیا همین گونه است؟

تا بهمن ماه سال ۱۳۹۵، تعداد ۱۶۵ سد مخزنی با حجم کل حدود ۵۱ میلیارد مترمکعب در ایران به بهره برداری رسیده است و سالانه حدود ۲ تا ۳ میلیارد مترمکعب آب به صورت تبخیر از دریاچه این سدها تلف می شود (مظاهری و عبدالمنافی، ۱۳۹۵). چنانچه تلفات ناشی از بستر و دیواره این سدها نیز در نظر گرفته شود، انتظار می رود به طور متوسط سالانه حدود ۳ تا ۴ میلیارد مترمکعب آب از طریق سدها تلف شود. در گزارشی هم که از سوی کمیسیون جهانی سدها منتشر شده، اثر احداث سد بر تغییر اکوسیستم دشت های سیل گیر مورد تأکید قرار داده شده و آمده: به علت تغییر رژیم هیدرولوژیکی رودخانه و قطع سیلاب ها، تغذیه آب زیرزمینی در دشت های سیل گیر به مقدار بسیار زیادی کاهش می یابد (کدیور، ۱۳۸۶). به یقین افزایش تبخیر و کاهش تغذیه، می تواند اثرات نامطلوبی بر بیلان آب های زیرزمینی - به ویژه در اقلیم های خشک و نیمه خشک - داشته باشد و این مهم است که تعداد زیادی از سدهای مخزنی ایران در بالادست دشت های حاصلخیز با آبخوان های گسترده، احداث شده اند.

در سه دهه گذشته، احداث تونل های زیرزمینی بسیار توسعه یافته و تنها توسط یکی از پیمانکاران بزرگ کشور، تاکنون ۴۵۰ کیلومتر تونل طویل انتقال آب طراحی و اجرا شده است و این روند همچنان ادامه دارد. موارد بسیار متعددی از اثر منفی تونل ها بر منابع آب زیرزمینی در مناطق مختلف جهان گزارش شده است. به عنوان نمونه، دبی ورودی به قسمتی از تونل زاگرس کرمانشاه در ناحیه ای که از یک تاقیدس آهکی عبور می کرده، ۸۰۰ لیتر در ثانیه گزارش شده، چشمه ۸۰۰ ساله و تاریخی تهران (چشمه علی شهر ری) در اثر حفر خط ۶ تونل مترو تقریباً خشک شده و با اجرای سد و تونل کوه رنگ، ۳۳ چشمه کم آب و ۱۳ چشمه، کاملاً خشک شده است. توسعه شهرها، افزایش فضای سبز شهری، توسعه باغ شهرها و احداث شهرهای جدید از دیگر موارد اثرگذار بر بیلان منابع آب زیرزمینی اند که تاکنون مورد توجه قرار داده نشده اند. تعداد شهرهای ایران از ۲۰۰ شهر در سال ۱۳۵۵ به حدود ۱۵۰۰ شهر افزایش یافته و بسیاری از این شهرها در کوهپایه ها و بر روی آبرفت ها و مناطق تغذیه کننده آب های زیرزمینی توسعه یافته و می یابند.

آخرین آمار ارائه شده از مصرف آب در بخش شرب و بهداشت، نشان می دهد که در سال ۱۳۹۹ مصرف آب شهری و روستایی کشور، حدود ۸/۴ میلیارد مترمکعب بوده که حدود ۲/۴ میلیارد مترمکعب آن از دست رفته و تلف شده است (شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، ۱۴۰۰). در بخش صنعت هم، صنایع آب بر - اعم از صنایع فولاد، مواد غذایی، چوب و کاغذ، پتروشیمی، شیمیایی و مواد شوینده،

آلومینیوم، فرش، کاشی - و معادن در دهه های اخیر، توسعه قابل توجه داشته اند و مصرف آب آنها به نحو قابل ملاحظه ای افزایش یافته است. به عنوان نمونه، عموم منابع تخصصی، مصرف آب برای تولید هر تن فولاد در دنیا را حدود ۸ تا ۲۵ مترمکعب و در ایران را بسیار بیشتر از این ارقام و حجم تولید سالانه ایران را حدود ۵۰ میلیون تن ارائه کرده اند. به عبارتی تنها، بخش فولاد بیش از ۱/۲ میلیارد مترمکعب در سال، آب مصرف می کند که بخش عمده آن تبخیر و تلف می شود.

علیرغم ویژگی های ارزشمند طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور، عدم توجه به موارد زیر در تدوین چارچوب های طرح را می توان از نقاط ضعف آن دانست:

- تجربه های تاریخی در زمینه مدیریت منابع آب زیرزمینی.

- کاهش تصدی گری دولت و دولت سالاری.

- عوامل غیر کشاورزی اثرگذار بر بیلان منابع آب زیرزمینی.

این طرح شامل پانزده پروژه است که باید توسط وزارتخانه های نیرو، جهاد کشاورزی، صنعت، معدن، تجارت و کشور، در گستره ای به وسعت کل ایران اجرا شوند. چارچوب کلی طرح، مبتنی بر افزایش قدرت نظارت و کنترل دولت بر منابع است و یک نظام دیوان سالاری گسترده، شامل بیش از ۳۵۰ تا ۴۰۰ نفر اعضای شورای سیاست گذاری، شورای راهبری و کارگروه های استانی به اضافه یک مهندس مشاور ملی و ۳۱ مهندس مشاور استانی برای سیاست گذاری، اجرا و نظارت بر اجرای آن، در نظر گرفته شده است (وزارت نیرو، ۱۳۹۴). لازمه موفقیت در چنین طرح گسترده ای، تأمین امکانات مالی و سازمانی گسترده می باشد که از قرار معلوم حاصل نشده است.

از پانزده پروژه طرح، هفت پروژه شامل: ایجاد و استقرار بازار محلی آب، ساماندهی و کنترل شرکت های حفاری، خرید چاه های کم بازده، تقویت و استقرار گروه های گشت و بازرسی، تهیه و نصب کنترلر حجمی و هوشمند آب و برق، کنترل، نظارت و مسلوب المنفعه کردن چاه های فاقد پروانه و ایجاد تشکلهای آب بران، پروژه هایی هستند که لازم است به منظور کنترل بحران و احیای منابع، در کمترین زمان ممکن، اجرا شوند و سایر پروژه ها شامل: حفر و تجهیز چاه های پیژومتری در دشت ها، تهیه و به هنگام سازی بیلان منابع آب، به روز نمودن سند ملی آب، جایگزینی پساب با چاه های کشاورزی، اجرای پروژه های تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب، مطالعه و اجرای طرح های آبخیزداری، پهنه بندی و بررسی مخاطرات ناشی از فرونشست زمین، از وظایف ذاتی وزارتخانه ها هستند. بودجه مورد نیاز برای اجرای طرح، حدود ۲۰ هزار میلیارد تومان و اعتبار تخصیص یافته به آن، طی سال های ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۰، ۲۲۴۷ میلیارد تومان است که حدود ۶۰ درصد آن برای پروژه های تقویت و استقرار گروه های گشت و بازرسی صرف شده و بر اساس شواهد موجود، توفیق چندانی در اجرای این طرح حاصل نشده است.

به نظر می‌رسد چنانچه توان سازمانی و کارشناسی صرف شده و بودجه هزینه شده برای این طرح، صرفاً در زمینه ایجاد، نهادینه کردن و استقرار تشکلهای بهره‌برداران و پیاده‌سازی مدیریت مشارکتی منابع آب زیرزمینی صرف می‌شد و با درس‌آموزی از تجربه‌های تاریخی و در جهت کاهش دولت‌سالاری، بخشی از وظایف مدیریت آب‌های زیرزمینی شامل مراحل صدور و تمدید پروانه و اجرای هفت پروژه اول به این تشکلهای واگذار می‌شد، نتایج بهتری حاصل شده بود.

منابع

محبی، پ. ۱۳۸۳. فنون و منابع در ایران، ترجمه آرام قریب، نشر اختران، چاپ اول، تهران. ص ۱۳۷.

کرجی، ا. ۱۳۷۳. استخراج آب‌های پنهانی. ترجمه حسین خدیوچم، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی، تهران. ص ۳۷.

وولف، ه. ۱۳۷۲. صنایع دستی کهن ایران. ترجمه سیروس ابراهیم‌زاده. انتشارات و آموزش انقلاب اسلامی. چاپ اول. تهران. صص ۲۳۱-۲۳۲.

لمتون، ا.ک.س. ۱۳۷۷. مالک و زارع در ایران. ترجمه منوچهرامیری. شرکت انتشارات علمی و فرهنگی. چاپ چهارم. تهران. ص ۴۰۹.

گوبلو، ه. ۱۳۷۱. قنات، فنی برای دستیابی به آب. ترجمه ابوالحسن سروقدم و محمدحسین پاپلی یزدی. معاونت فرهنگی آستان قدس رضوی. چاپ اول. مقدمه مترجم.

زارع، م. ۱۴۰۰. چاه‌های آب، فرونشست زمین و برنامه هفتم توسعه. روزنامه شرق. شماره ۴۱۱۵.

مظاهری، م. و عبدالمنافی، ن. ۱۳۹۵. بررسی وضعیت سدها و عملکرد سدسازی در کشور. مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی. شماره گزارش ۱۵۰۹۲.

کدیور، م. س. ۱۳۸۶. سدها و توسعه، چارچوب جدیدی برای تصمیم‌گیری (نگارش کمیسیون جهانی سدها؛ مدیر پروژه و سردبیر). موسسه عالی آموزش و پژوهش مدیریت و برنامه‌ریزی. تهران. صص ۲۲۲-۲۲۴.

شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور. ۱۴۰۰. سالنامه آماری شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور. نشریه شهرآب. شماره ۶۶۹. مرداد ۱۴۰۰.

وزارت نیرو. ۱۳۹۴. طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی، دستورالعمل دوم: اطلاع‌رسانی، آموزش و فرهنگ‌سازی. دفتر نظام‌های بهره‌برداری و حفاظت آب و آبفا.

پی‌نوشت

- ۱- اسفندیاریگانگی fa.wikipedia.org/wiki/
- 2- dolat.ir/detail/288886
- ۳- روزنامه دنیای اقتصاد، شماره ۵۶۱۹، دوشنبه ۲۱ آذر ۱۴۰۱
- 4- Research.basu.ac.ir/-pages/research.aspu?ID=1042085
- ۵- خبرگزاری تسنیم: ۲۲ آبان ۱۴۰۱: چشمه علی دامغان، باز هم خشک شد (نقل از: خبرگزاری فارس، ۲۲ آبان ۱۴۰۰) 6-ghatreh.com/news/nn61460921
- ۷- صنایع فولادی و آبی که مصرف می‌شود، روزنامه اطلاعات، ۱ مرداد ۱۴۰۱
- ۸- خانه آب ایران <https://waterhouse.ir/content/166>
- ۹- تراژدی آب‌های زیرزمینی، روزنامه دنیای اقتصاد، شماره ۵۴۷۷، ۲۹ خرداد ۱۴۰۱

In the Name of Allah

Journal of Water and Sustainable Development

Volume 9 - Issue 3 (Serial No. 25) - Autumn 2022

Due to certificate no. 3/18/126631 dated 20/9/2015 from the scientific publications review Commission of the Ministry of Science, Research and Technology and also Due to registration number no76766 dated 25/1/2016 from the Ministry of Culture and Islamic Guidance, this journal has been licensed to publish. This journal is an output of joint scientific activities between Ferdowsi University of Mashhad and the Hydraulic Association of Iran.

Grantee
Manager in Charge
Editor in Chief

College of Agriculture , Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Shahnooshi Foroushani, N. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Davary, K. Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board

Alidadi, H. Prof., Mashhad University of Medical Sciences
Ansari, H. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Bagheri, A. Asso. Prof., Tarbiat Modares University
Esmaili, K. Asso. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Jolaini, M. Asso. Prof., Agricultural and Natural Resources Research Center of Khorasan Razavi
Morid, S. Prof., Tarbiat Modares University
Nassery, H.R. Prof., Shahid Behesti University, Tehran

Guiding Council

Sayahi, A., Assistance of research and industrial relations center of National Water and Wastewater Engineering Company (Chairman of the council)
Esmailian, H., Managing director of Mashhad Water & Wastewater Company
Taheri, A., Managing director of Khorasan Razavi Province's Regional Water Company
Mousavi, S. Y., Secretary of water Think tank at 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
Sajadifar, S.H., Representative of National Water & Wastewater Company
Kolahi, M., Ferdowsi University of Mashhad
Kalaei, GH., Representative of Mashhad Water & Wastewater Company
Tavakoli Aminian, S., Representative of Mashhad Water & Wastewater Company

Executive Expert
Editor
Graphic
Order of publication
Publisher
ISSN
Website/E-Mail
Address
Sponsor

Shahedi, M., Talebi Hossein Abad, F.
Quchanian, M., Shahedi, M., Oskouhi, M.
Shaikhi, M.R.
Quarterly
Ferdowsi University of Mashhad
2423-5474
<https://jwsd.um.ac.ir/> Email: jwsd@um.ac.ir
Department of Water Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. P.O.Box: 91775- 1163
Mashhad Water & Wastewater Company

Articles in issue:

- **Methodology for Groundwater Monitoring Network Assessment and Design, Part 2: Iran Evaluation of Monitoring Network by Acceptance Probability Method; Case Study: Shirvan Aquifer, North Khorasan, Iran**
Sh. Gholizadeh Sarabi, A. Joodavi, M. Majidi Khalilabad
A. Ebrahimi, A. Ronaghi
- **A Review of the Relationships Between the Hydrological Components of the Water Balance in the Assessment of Rainfall Losses**
Z. Eslami, Kh. Abdollahi
- **Investigating the Effectiveness of the Implementation of the Reclamation and Balancing Plan and the Vulnerability of the Plan Projects (Case Study: Ardestan Plain- Isfahan Province)**
Z. Keyhomayoon, M. Hajizade, F. Alijani
- **The Study of the Effects of Restoration and Resilience Plan on Groundwater of Qaleh Tol Plain, North East Khuzestan**
F. Alijani, S. F. Musavi, H. Mohammadi
- **Assessment of the Groundwater Rehabilitation and Balancing with Emphasis on Smart Meters in Shahriar Plain**
M. Khodadadi Benis, H. R. Nassery, Y. Nikpeyman
- **Pathology of Water Governance in Yazd**
L. Bonyad, A. Zareshahabadi, M. Parsamehr
- **Assessing the Household's Willingness to Adopt Efficient Water Technologies in District 6 of Tehran**
S. Abedi, F. kamyab, N. Nasiri
- **Investigating the Consequences of Implementing Pressurized Irrigation Projects and Its Effect on Satisfaction and Continuity of Its Use in Qazvin Province**
M. Masoomi, H. Shabanali Fami, H. Varmazyari, S. Kordalivand
- **Optimal Design of Urban Water Distribution Network Using Improved Artificial Bee Colony Algorithm**
M. R. Najjarzadegan, R. Moeini
- **An Analysis of the Salinity Status of Water Resources in Use in the Agricultural Sector**
M.H. Rahimian, H. Gholami
- **Investigating the Appropriate Method of Sludge Dewatering Technology in Wastewater Treatment Plants Using Analytical Hierarchy Process (Case Study: Wastewater Treatment Plant in the South of Tehran)**
F. Golbabaee Kootenaei, N. Mehrdadi, T. Taghizade Firozjaee, A. Fahimi Bandpey, H. Valehi Reikande
- **An Overview of the Technologies Used for Water Purification in Aquaculture Systems with an Emphasis on the Model of Sustainable Development in Iran**
A.R. Radkhah, S. Eagderi, E. Sadeghinejad Masouleh

