



## مدیریت بهره‌برداری از آبخوان دشت کاشان با استفاده از سیاست جیره‌بندی دو نقطه‌ای اصلاح‌شده

مرضیه قربانی اقدام<sup>۱</sup>، حسین خزیمه‌نژاد\*<sup>۲</sup>، محسن پوررضا ییلندی<sup>۳</sup>، هدی قاسمیه<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
- ۳- دانشیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

\* نویسنده مسئول: [Hkhozeymeh@birjand.ac.ir](mailto:Hkhozeymeh@birjand.ac.ir)

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۳

### چکیده

مدیریت بهره‌برداری از منابع آب به‌ویژه منابع آب زیرزمینی حائز اهمیت بوده و نیازمند شناخت دقیق خصوصیات آبخوان، تنش‌های وارده به آن و در نهایت بیلان آب زیرزمینی است. مدل‌های شبیه‌ساز-بهینه‌ساز کمک شایانی به مدیران برنامه‌ریز جهت تعیین میزان بهره‌برداری بلندمدت و پایدار از آبخوان می‌نمایند. بدین منظور تغییرات تراز آبی آبخوان دشت کاشان در دوره آماری ۱۳۸۷-۱۳۹۷ توسط مدل GMS برای ۱۲۵ دوره تنش شبیه‌سازی شد. مدل در دو حالت دائمی و غیر دائمی برای دوره (۱۳۸۷-۱۳۹۵) و اسنجی و برای دوره (۱۳۹۵-۱۳۹۷) صحت‌سنجی شد. نتیجه، افت آب زیرزمینی به میزان ۴/۴ متر در طول ۱۰ ساله مطالعاتی بود. به جهت واقع شدن این دشت در کمربند خشک اقلیمی و نبود بارش مؤثر جهت تغذیه مناسب آبخوان، در این مطالعه تمرکز بر روی مدیریت برداشت از آبخوان با استفاده از سیاست جیره‌بندی دو نقطه‌ای اصلاح‌شده بود. این سیاست به خوبی توانست از افت شدید و بحرانی آب زیرزمینی جلوگیری کرده و افت را از ۰/۴۴ به ۰/۳۱ متر در سال کاهش دهد و باعث ذخیره ۲۵۵ میلیون مترمکعب آب در هر سال در آبخوان گردد. اگرچه نیل به این نتیجه باعث کاهش اعتمادپذیری و افزایش عدم تأمین نیازها می‌گردد ولی از بروز خشکی‌ها با شدت زیاد جلوگیری و خسارات جبران‌ناپذیر را کم می‌نماید.

**کلمات کلیدی:** بهره‌برداری پایدار، سیاست جیره‌بندی، مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز آب زیرزمینی، واسنجی، GMS.

### مقدمه

منابع آب زیرزمینی به علت ارتباط بسیار نزدیک با منابع طبیعی و شرایط آب و هوایی، تأثیرات بسیاری را در اثر تغییر در دما و بارندگی و بنابراین تغییر در آب در دسترس مردم مناطق خشک خواهد داشت. با توجه به این تغییرات ادامه روند فعلی تأمین و مصرف آب نمی‌تواند راه‌حل قابل قبولی برای پایداری منابع آب کشور در سطح ملی باشد؛ لذا در سال‌های جاری، برنامه‌ریزی با هدف بهره‌برداری بهینه و پایدار از منابع آب به یک مسأله مهم تبدیل شده است (قربانی اقدام و همکاران، ۱۴۰۲ و موسوی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱).

با توجه به تغییراتی که در میزان و توزیع زمانی و مکانی بارندگی ایجاد می‌شود و نیز اثرات آن بر منابع آب لازم است

در کشور ایران افزایش بی‌رویه جمعیت در سال‌های اخیر، محدودیت منابع آب‌های سطحی و در نتیجه برداشت بیش از حد مجاز از سفره‌های آب زیرزمینی، باعث به وجود آمدن خسارات جبران‌ناپذیری به منابع طبیعی شده است. در نتیجه راهکارهایی جهت جلوگیری از بحرانی‌تر شدن وضعیت کنونی باید اندیشیده شود؛ لذا به‌عنوان یک قانده تجربی، هنگامی که استفاده از یک منبع آب از ۳۰ درصد کل آب ذخیره شده آن تجاوز می‌کند؛ مدیریت منابع آب به‌عنوان عنصر اصلی و مهم در اقتصاد ملی مطرح می‌شود (Vander Bruggen et al., 2003).

مدل بهینه‌سازی، تعریف شده و سرانجام ترکیب دو مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. نقطه قوت این روش در این است که به‌هنگام بهینه‌سازی به‌ازای هر تغییری در متغیرهای تصمیم، مدل شبیه‌سازی دوباره اجرا می‌گردد. روشن است که دیدگاه دوم نسبت به دیدگاه اول از دقت بالاتری بهره‌مند است (صاغی جدید و همکاران، ۱۳۹۸).

در حالت ایده‌آل، تخصیص آب بایستی از نظر اقتصادی، کارآمد و از نظر فنی، عملی و همچنین از نظر اجتماعی، عادلانه باشد. بنابراین نیاز به یک سیستم تخصیص آب مناسب که در آن آب به‌عنوان یک کالای اجتماعی و اقتصادی در نظر گرفته شود، ضروری است (Babel et al., 2005).

ساخت مدل شبیه‌ساز-بهینه‌سازی که بتواند (۱) اثرات برداشت از سفره آب زیرزمینی در تصمیم‌گیری‌های متفاوت را منعکس نماید و (۲) به صورت توأمان تخصیص منابع و مصارف آب را لحاظ کند و یک برنامه مدیریتی مناسب برای آبخوان ارائه دهد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در این راستا مطالعات گوناگونی در خصوص تلفیق مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز و ارائه راهکار مؤثر در جهت تعادل بخشی به منابع آب انجام گرفته است که در ادامه به بخشی از آن اشاره می‌شود.

تقیان و همکاران (۱۳۹۱)، به بررسی عملکرد قاعده چیره‌بندی بر روی سیستم منابع آب رودخانه زهره واقع در جنوب غرب ایران با استفاده از مدل شبیه‌ساز ARSP و تلفیق آن با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک پرداختند. نتایج حاکی از کارایی بالای مدل تلفیقی در کمینه نمودن شدت کمبودها بود. حجتی‌پور و همکاران (۱۳۹۸)، برای یک دوره ۲۸ ساله از مدل تلفیقی (WEAP-MODFLOW) برای بررسی تأثیر سناریوهای مرتبط با میزان تأمین تقاضا و منابع آب موجود، در منطقه بجنورد استفاده نمودند. نتایج نشان داد به کارگیری مدل تلفیقی، بهتر از حالت استفاده بصورت جداگانه، برداشت آب از منابع سطحی و زیرزمینی را کاهش می‌دهد. در پژوهشی دیگر صاغی جدید و همکاران (۱۳۹۸)، سه شاخص پایداری، پرشدگی و احیاء آبخوان نمدان واقع در استان فارس را برای یک دوره ۱۰ ساله با استفاده از مدل شبیه‌سازی عددی MODFLOW و الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج، به ترتیب بیانگر افزایش ۳، ۹/۵ و

با هدف بیشترین افزایش بهره‌وری آب و حفظ رضایت ذی‌نفعان، هر دو بخش منابع و مصارف آب به شکل بهینه مدیریت گردد؛ بنابراین، برای کاهش کمبود در بخش منابع و افزایش بهره‌وری در بخش مصارف لازم است، این دو بخش به صورت توأمان مطالعه شوند و راهکارهای بهینه استخراج گردند. این بدان معنی است که به علت وجود هدف‌های مختلف در آینده، گزینه‌های تصمیم‌گیری از ابتدا باید به صورت چند هدفه توسعه داده شوند. تنها با این روش می‌توان با کمترین هزینه و کمترین پی‌آمدهای اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی و حتی سیاسی، به مدیریت مطلوب عرضه و تقاضای آب دست یافت؛ بنابراین در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت مدیریت تأمین و تقاضای آب، استخراج راهکارهای بهینه امری مهم و اجتناب ناپذیر است.

در مطالعات گوناگونی مدل‌های آب زیرزمینی با روش‌های مختلف بهینه‌سازی برای تعیین استراتژی مدیریت منابع آب و بهترین مجموعه جواب با توجه به تابع هدف و محدودیت‌ها ترکیب شده‌اند (Ahlfeld et al., 2005). البته مدل‌سازی آب-های زیرزمینی همیشه با عدم قطعیت‌هایی همراه است؛ از جمله عواملی که منجر به ایجاد عدم قطعیت در مدل ریاضی جریان آب زیرزمینی می‌شود، عدم قطعیت ناشی از پیچیدگی مدل مفهومی است که از افزایش پارامترهای مدل ناشی می‌شود. در نظر گرفتن پیچیدگی در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی می‌تواند به انتخاب یک مدل بهینه کمک کرده و از ایجاد این نوع عدم قطعیت و نتیجه‌گیری‌های گمراه‌کننده جلوگیری کند (جباری ملایری و همکاران، ۱۴۰۰). به طور کلی برای بهینه‌سازی مخازن آب زیرزمینی یک منطقه، نخست باید مدل ریاضی آبخوان تهیه شود. دو دیدگاه در استفاده از مدل ریاضی جهت بهینه‌سازی مخزن آب زیرزمینی وجود دارد: (۱) با کاربرد مدل ریاضی (شبیه‌سازی)، رفتار آبخوان از نظر خطی یا غیرخطی بودن مشخص می‌گردد و رابطه بین مقادیر برداشت و افت سطح آب زیرزمینی محاسبه می‌شود و پس از آن بهینه‌سازی سیستم آب زیرزمینی میسر است. (۲) در بهینه‌سازی سفره‌های آب زیرزمینی، از مدل ترکیبی شبیه‌ساز-بهینه‌ساز استفاده می‌کنند. در این دیدگاه پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان پس از واسنجی مدل شبیه‌سازی تعیین شده و همچنین به صورت موازی تابع هدف و قیود برای

میزان نرخ پمپاژ از آبخوان دشت بیرجند، از تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه (AMALGAM) با یک مدل آب زیرزمینی (MODFLOW2005-NWT) با اهداف حداقل نمودن کمبود ناشی از عدم تأمین، شاخص کمبود اصلاح شده و میزان برداشت استفاده نمودند. وی نشان داد که راه حل بهینه پیشنهادی، گزینه‌های پایدار مدیریت آب زیرزمینی را برای تصمیم‌گیرندگان در منطقه خشک فراهم می‌کند.

با توجه به این که منبع اصلی تأمین آب در کاشان منابع آب زیرزمینی می‌باشند و در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت و وقوع خشکسالی با کاهش حجم این منابع روبه‌رو بوده است نیاز به بهره‌برداری بهینه از مخزن می‌باشد تا خسارات ناشی از کمبود آب کمینه شود. برای دستیابی به این مهم لازم است که سیاست‌های برداشت آب از منابع آب زیرزمینی تغییر پیدا کند تا استفاده پایدار از این منابع صورت گیرد. اگرچه ممکن است با اتخاذ این سیاست‌ها در بازه‌ای از زمان با تنش آبی و کاهش عرضه آب رخ دهد ولی نتیجه امر این خواهد بود که با قبول تنش‌هایی با شدت کمتر و تعداد بیشتر از بروز تنش‌هایی بزرگ در آینده کاسته و خسارات نیز به تبع آن کم می‌شود. تاکنون از سیاست جیره‌بندی دو نقطه‌ای اصلاح شده به منظور مدیریت برداشت از آبخوان استفاده نشده است. هدف از انجام این پژوهش بهره‌برداری بهینه از آب زیرزمینی با استفاده از سیاست جیره‌بندی دو نقطه‌ای تعدیل شده توسط مدل‌های شبیه‌ساز-بهینه‌ساز می‌باشد (MODFLOW-ACOA<sup>1</sup>) تا بهترین شکل برداشت به دست آید و با استخراج بهینه آب زیرزمینی، میزان افت کمتر از حالت برداشت تحت سناریوی روند گردد. با اتخاذ این سیاست میزان تنش‌های موجود در تأمین مصارف تعدیل و روند به‌روز شکست یکنواخت‌تر خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

### موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

دشت کاشان به وسعت ۱۷۳۶ مترمربع در دامنه کوه‌های کرکس و حاشیه کویر مرکزی ایران در حدود ۲۴۰ کیلومتری جنوب تهران و بین طول‌های جغرافیایی ۵۱ درجه و ۵ دقیقه و ۵۱ درجه و ۵۴ دقیقه و عرض‌های ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه و

۱۰/۶ متری تراز سطح آب زیرزمینی نسبت به ابتدای دوره بود. آئین و همکاران (۱۳۹۷)، برای افق بلندمدت (۴۱ ساله) با هدف تعیین چارچوب بهینه توسعه منابع آب حوضه آبریز رودخانه حله واقع در جنوب ایران یک مدل هیدرولوژیکی-اقتصادی با رویکرد تلفیقی شبیه‌سازی (WEAP) و بهینه‌سازی الگوریتم دسته ذرات (PSO) ارائه نمودند. نتایج حاکی از افزایش ۱۸ درصدی منافع خالص کل حوضه بود. در مطالعه‌ای سجادی و همکاران (۱۳۹۷)، به منظور بررسی عملکرد سیاست‌های جیره‌بندی تلفیقی تحت تأثیر تغییر اقلیم در حوضه آبریز زاینده‌رود از مدل WEAP به عنوان شبیه‌ساز و از الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) به عنوان بهینه‌ساز استفاده نمودند. نتایج حاصل از اعمال سیاست جیره‌بندی تلفیقی نشان‌دهنده افزایش شاخص پایداری گروهی در تأمین نیازها، به میزان ۱۱ درصد بود. (Shourian and Jamshidi, 2022) عملکرد بهینه مخزن سد ژاوه در غرب ایران را با تلفیق سیاست جیره‌بندی و الگوریتم خفاش مورد مطالعه قرار دادند. کسری تأمین آب توسط سد به عنوان تابع هدف حداقل گردید. نتایج نشان داد اگرچه الگوریتم خفاش، الگوریتم مناسبی برای مدیریت عملکرد بهینه مخزن می‌باشد، مقدار کمبود آب هنگامی که درجه بالاتری از آزادی برای قوانین بهره‌برداری تعریف می‌گردد کاهش می‌یابد. (Zeinali et al., 2020) در منطقه اندیمشک الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA) را با مدل آب سطحی (WEAP) و زیرزمینی (MODFLOW) به منظور تعیین برداشت بهینه از منابع آبی موجود ترکیب نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از این روش تا حدی اطمینان تأمین تقاضا را افزایش داده و به کاهش برداشت آب زیرزمینی در پایان دوره عملیاتی کمک کرده است. (Men et al., 2019) تابع هدف قانون جیره‌بندی در شهر تیانجین چین را با در نظر گرفتن اولویت تأمین آب و کاهش سود حاصل از کمبود آب برای کاربران مختلف، بهبود دادند. ایشان قانون جیره‌بندی بهبود یافته (IHR) را برای تأمین آب شهری به کار بردند. نتایج این مطالعه نشان داد که قانون جیره‌بندی بهبود یافته میزان اطمینان آبرسانی برای آب خانگی را با اولویت بالا افزایش داده و از کمبود مخرب آب در کشاورزی جلوگیری می‌کند. (Sadeghi-Tabas, 2017) برای تعیین

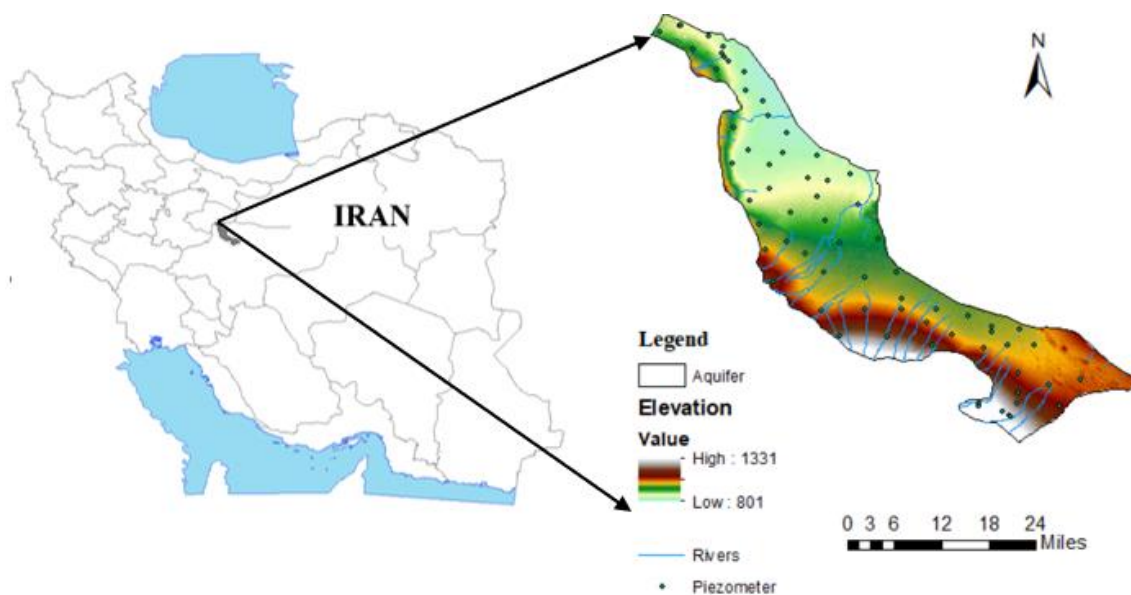
<sup>1</sup> Ant Colony Algorithm

دشت کاشان از سطح دریا ۱۳۰۰ متر در قسمت حاشیه‌های غربی دشت و حداقل ارتفاع آن ۸۰۰ متر در حاشیه کویر است. شکل ۲ تصویری از آبخوان را در مدل آب زیرزمینی GMS نشان می‌دهد. قابل ذکر است واحد محورها در شکل ۲ به متر است.

جهت دستیابی به اهداف مطالعه حاضر، از بسته GMS واقع در مدل عددی دوبعدی MODFLOW برای شبیه‌سازی رفتار واقعی سیستم آب زیرزمینی آبخوان آزاد دشت کاشان بهره برده شد. در ادامه، با استفاده از ترکیب مدل شبیه‌سازی با الگوریتم جامعه مورچگان در محیط متلب الگویی جهت دستیابی به مدل تصمیم‌گیری قابل کاربرد برای آبخوان دشت کاشان تهیه و تحلیل گردید. شکل ۳ فرایند مطالعه را به صورت مختصر ارائه می‌دهد.

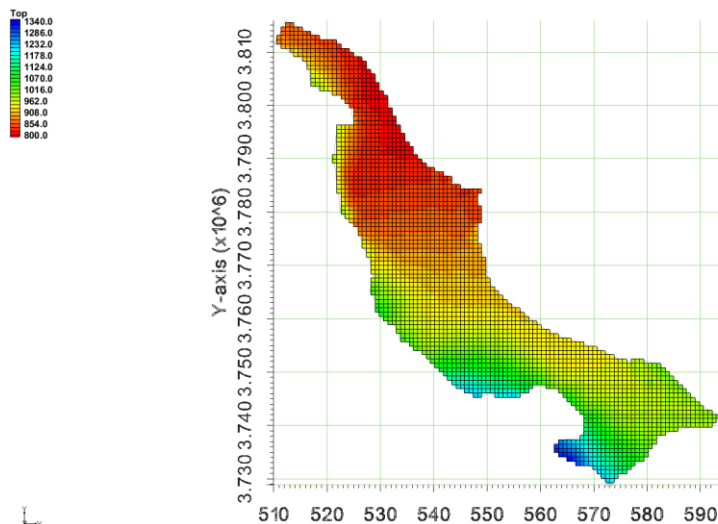
۳۴ درجه و ۲۳ دقیقه قرار دارد. با توجه به روش دومارتن دشت کاشان با ضریب خشکی ۴/۸ جزء مناطق خشک محسوب می‌گردد. از سوی دیگر نواحی کوهستانی جنوب دشت کاشان از نقطه نظر طبقه‌بندی دومارتن جزء مناطق نیمه‌خشک محسوب می‌شود. تقریباً تمام بهره‌برداری از آبخوان آبرفتی دشت کاشان نیز در همین محدوده انجام می‌گیرد. دشت کاشان تقریباً به صورت یک دره باریک که دارای امتداد شمال غربی-جنوب شرقی است. عرض این دره حدوداً ۲۰ کیلومتر بوده که از شمال به دشت قم، از جنوب به ارتفاعات مجاور منطقه نطنز، از غرب به ارتفاعات مویه و از شرق به محدوده دریاچه نمک مشرف است.

آبخوان دشت کاشان عمدتاً شامل رسوبات کواترنری و از نوع آزاد است (فتحی و نوربان بیدگی، ۱۴۰۰). موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. حداکثر ارتفاع



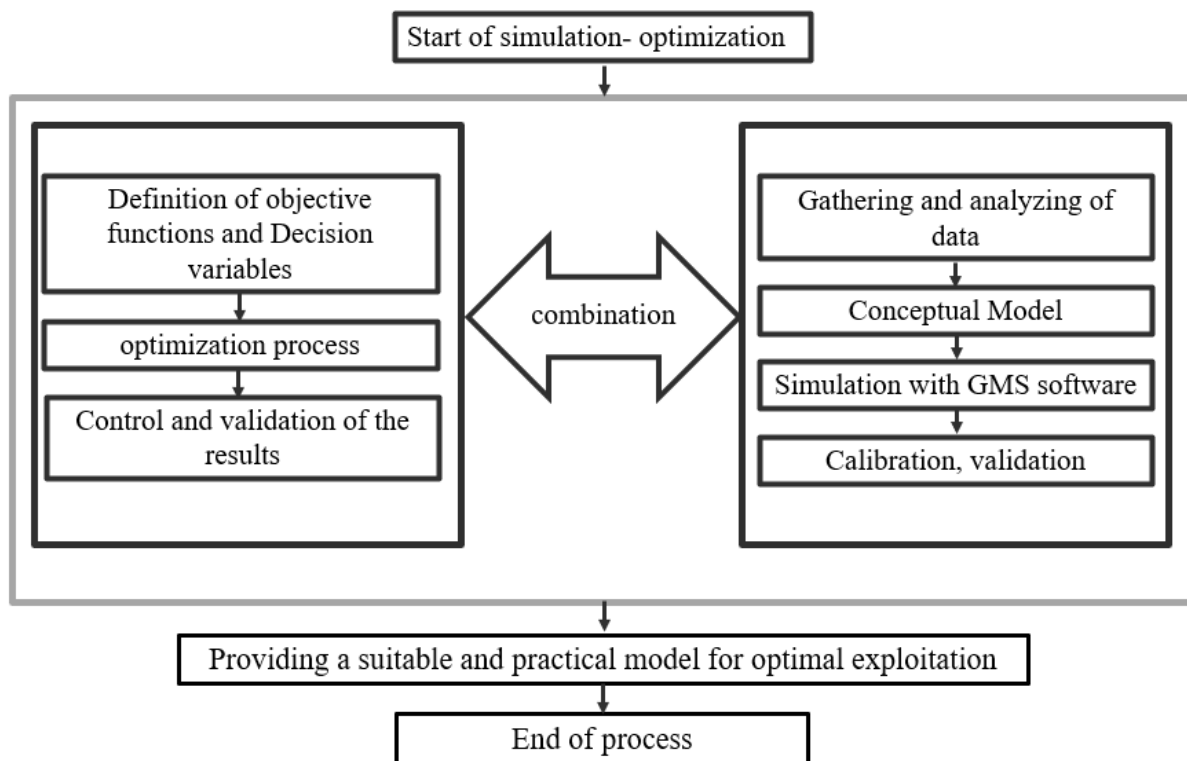
شکل ۱- زیر حوضه آبریز کاشان و دشت کاشان.

Figure 1- Sub basin of kashan and plain of kashan.



شکل ۲- تصویری از ارتفاع آبخوان.

Figure 2- A picture of aquifer.



شکل ۳- الگوی کلی مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی-تلفیقی.

Figure 3- General pattern of integrated simulation-optimization model.

سال از مهر ۱۳۸۷ تا مهر ۱۳۹۷ انجام شد. جهت این مدل‌سازی از ۱۲۵ دوره تنش با گام زمانی ماهانه استفاده گردیده است. تعداد کل سلول‌های به وجود آمده حاصل از شبکه ۱۱۵ سطری و ۱۲۰ ستونی ۱۳۸۰۰ می‌باشد که از این تعداد ۱۱۰۷۶ سلول غیرفعال و ۲۷۲۴ عدد سلول فعال می‌باشد. اندازه‌گیری سطح آب در کاشان از سال ۱۳۴۴ با تعداد ۱۰۰ حلقه پیزومتر شروع شده ولیکن در حال حاضر براساس آخرین آمار در این

### مدلسازی کمی آبخوان دشت کاشان

مدل مفهومی آبخوان کاشان براساس عوامل تأثیرگذار و مؤثر مانند منابع تغذیه و تخلیه آبخوان، مرز محدوده مدل-سازی، مناطق تغذیه در مدل MODFLOW با شبکه‌بندی ۵۰۰×۵۰۰ متری در دو حالت دائمی و غیردائمی برای ۱۰

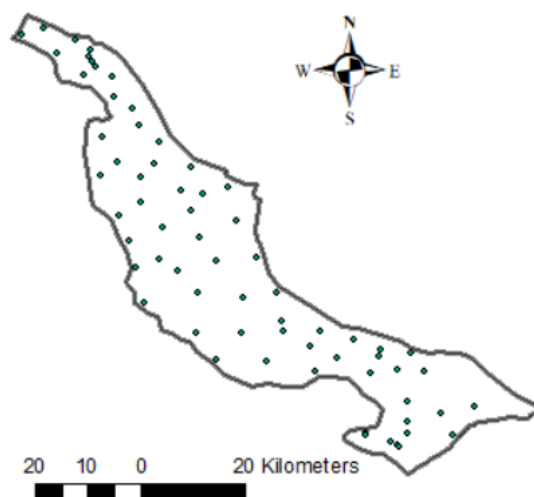
تنها تغذیه سطحی در مدل ناشی از آب برگشتی مصارف شهری و کشاورزی به میزان ۸۰ و ۱۵ درصد می‌باشد. منابع بهره‌برداری‌کننده از آب‌های زیرزمینی در این محدوده مطالعاتی شامل ۱۹۵۸ حلقه چاه، ۲۶۸ دهنه چشمه و ۵۴۰ رشته قنات می‌باشد که سهم هر کدام از ارتفاعات و دشت به تفکیک در جدول ۱ به همراه میزان برداشت از هر یک از این منابع آورده شده است.

با استفاده از داده‌های هواشناسی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی، ساختار اصلی مدل مفهومی آبخوان دشت کاشان شامل: لایه-های مرز آبخوان (که از داده‌های ژئوفیزیک سنگ کف، زمین‌شناسی و همچنین چاه‌های پیزومتری تعیین می‌شود)، تراز ارتفاعی سطح زمین، تراز سنگ کف آبخوان، چاه‌های بهره‌برداری، چاه‌های مشاهده‌ای، هدایت هیدرولیکی و تغذیه سطحی ایجاد گردید.

دشت، تعداد ۵۶ حلقه پیزومتر فعال وجود دارد. شکل ۴ موقعیت پیزومترهای پراکنده در منطقه را نشان می‌دهد.

### شرایط مرزی و اولیه مدل

یکی از مراحل اساسی که قادر است بیشترین خطا را در مدلسازی وارد کند تعیین شرایط مرزی است. از این جهت تعیین شرایط مرزی که با واقعیت نزدیکی زیادی داشته باشد، گام مهمی در ساخت مدل‌های عددی می‌باشد (صاغی جدید، ۱۳۹۸). داده‌های زمین‌شناسی، هیدرولوژی (منحنی‌های همتراز سطح آب) و توپوگرافی از معیارهایی هستند که برای تعیین شرایط مرزی از آن‌ها بهره برده می‌شود. تراز اولیه آب زیرزمینی که شرایط اولیه برای اجرای مدل می‌باشد براساس آمار و اطلاعات چاه‌های پیزومتری تعیین شده است.



شکل ۴- پراکندگی و موقعیت پیزومترها در منطقه مطالعاتی.

Figure 4- Distribution and location of piezometers in the study area.

جدول ۱- تعداد و تخلیه منابع آب زیرزمینی (میلیون مترمکعب).

Table 1- The number and discharge of groundwater resources (mcm).

Aquifer		Total range		Highlands		Plain		Resource
Discharge	Number	Discharge	Number	Discharge	Number	Discharge	Number	
239.42	961	267.36	1958	25.86	987	241.5	971	Well
0	0	27.90	268	27.90	268	0	0	Spring
6.46	33	97.37	540	88	504	250.9	36	Qanat

معیارها می‌باشند.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (h_o - h_s)_i}{n} \quad (1)$$

$$bR^2 = \frac{n(\sum h_o \times h_s) - (\sum h_o)(\sum h_s)}{\sqrt{[n \sum h_o^2 - (\sum h_o)^2][n \sum h_s^2 - (\sum h_s)^2]}} \quad (2)$$

پس از تهیه مدل شبیه‌ساز جهت بررسی و ارزیابی درستی مدل از معیارهای میانگین خطا (ME)، ضریب رگرسیون اصلاح شده (bR2) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بهره برده شده است که رابطه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ بیانگر این



فراکوشی کلونی مورچه‌ها، یافتن احتمالی جواب‌ها بر پایه فرمون است.

تلفیق دو مدل شبیه‌ساز GMS و الگوریتم بهینه‌ساز کلونی مورچه‌ها در محیط متلب انجام گرفت.

### قوانین جیره‌بندی

در این مطالعه از قوانین جیره‌بندی که تاکنون از آن‌ها برای بهره‌برداری از مخازن سدها استفاده می‌شده است به‌منظور مدیریت بهره‌برداری از آبخوان استفاده شده است. این قوانین توسط Hashimoto et al., (1982) به صورت مفهومی مطرح و با گذر زمان تکمیل گردید. این قوانین در ابتدا از منحنی سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) ناشی می‌شوند به این ترتیب که در این روش نحوه رهاسازی از مخزن به گونه‌ای اصلاح می‌گردد که حجم ذخیره‌ای برای دوره‌های خشکسالی محتمل در آینده باقی بماند و به عبارتی کمبودهای شدید در طول زمان بهره‌برداری با کمبودهای کوچک اما طولانی‌تر جایگزین شود. در این راستا قوانین جیره‌بندی متفاوتی تهیه شده است که می‌توان آن‌ها را به دسته‌های زیر تقسیم‌بندی نمود:

جیره‌بندی یک نقطه‌ای: در این قانون مقدار رهاسازی همانند سیاست (SOP) از مقدار صفر شروع شده و تا مقدار رهاسازی مورد نظر به صورت خطی ادامه می‌یابد.

جیره‌بندی دو نقطه‌ای: از نقطه نخست شروع شده و به صورت خطی به نقطه دوم می‌رسد که در آن شیب خط کمتر از یک بوده و در نقطه دوم با مقدار رهاسازی هدف تقاطع دارد.

جیره‌بندی سه نقطه‌ای: در این قانون یک نقطه به جیره‌بندی دو نقطه‌ای در فاصله بین دو نقطه اضافه می‌شود به گونه‌ای که به دو قسمت خطی با شیب‌های متفاوت تبدیل می‌شود. شکل ۵ قوانین جیره‌بندی یک نقطه‌ای دو نقطه‌ای و سه نقطه‌ای را نشان می‌دهد.

جیره‌بندی پیوسته: در این قانون شیب قسمت جیره‌بندی می‌تواند به صورت پیوسته تغییر کند.

جیره‌بندی ناحیه‌ای: که در آن رهاسازی به صورت نسبت‌هایی از نیاز هدف تعریف می‌شود که در هر ناحیه متفاوت است. شکل ۶ قوانین جیره‌بندی پیوسته و ناحیه‌ای را نشان می‌دهد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_o - h_s)_i^2}{n}} \quad (3)$$

در روابط فوق  $h_o$  تراز مشاهداتی،  $h_s$  تراز محاسباتی حاصل از شبیه‌سازی و  $b$  ضریب رگرسیون می‌باشد.

مدل ریاضی با توجه به فرایند ساده‌سازی‌ها، کمبودهای داده، عدم قطعیت بازسازی رقوم مفقود، محدودیت خود مدل و بسیاری عوامل دیگر، نیاز به واسنجی داشت که پس از مجموع چندین دوره کلی تکرار در گام‌های پایدار و ناپایدار (۹۴ ماهه) و با بیش از ده‌ها متغیر به صورت پایلوت، با استفاده از موتور محاسباتی PCGN، دو پارامتر آبدی و ویژه و هدایت هیدرولیکی واسنجی گردید. جهت ارزیابی مقادیر پارامترهای بهینه (دوره واسنجی ۱۳۹۵-۱۳۸۷)، دوره صحت‌سنجی با ۳۱ دوره تنش ماهانه (۱۳۹۷-۱۳۹۵) انجام شد. پس از انجام فرایند واسنجی و صحت‌سنجی مدل و اطمینان از درستی عملکرد آن، به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در طی دوره مطالعاتی ۱۳۸۷-۱۳۹۷ (۲۰۱۹-۲۰۰۸) پرداخته شد. در مرحله بعد متغیرهای تصمیم؛ قیودات، توابع هدف و محدودیت‌های مدل در بهینه‌ساز وارد گردید و ترکیب دو مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی رخ انجام شد. این روش به دلیل آنکه که به‌زای هر تغییر در بردار متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌ساز، مدل شبیه‌ساز مجدداً تکرار می‌شود، از دقت بالاتری برخوردار است.

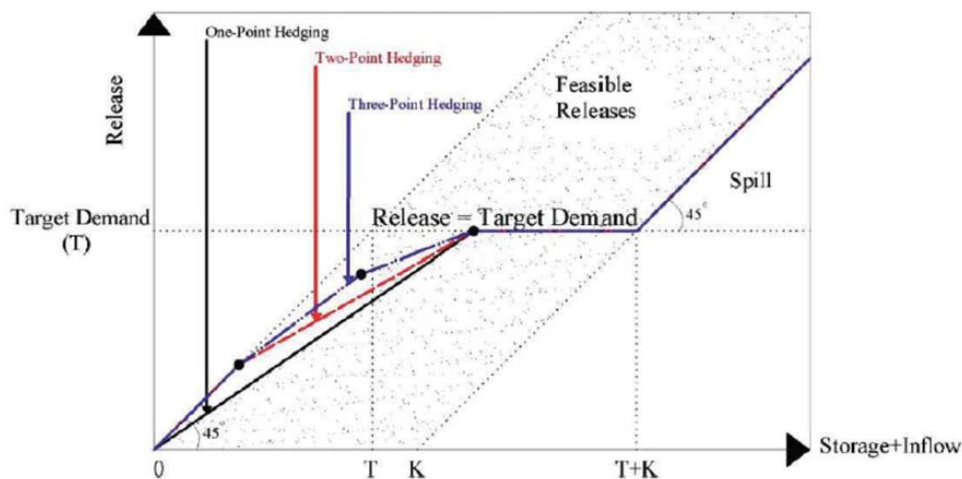
### الگوریتم بهینه‌سازی

بهینه‌سازی الزاماً به دست آوردن مطلوب‌ترین پاسخ برای تصمیم‌گیری در مورد مدیریت بهره‌برداری از آبخوان‌ها نمی‌باشد. دلیل آن وجود عدم قطعیت در حل مسائلی از این دست و همچنین مفهوم‌سازی و ساده‌سازی‌ها می‌باشد که دسترسی به بهترین جواب را ناممکن می‌سازد (Nguyen et al., 2014).

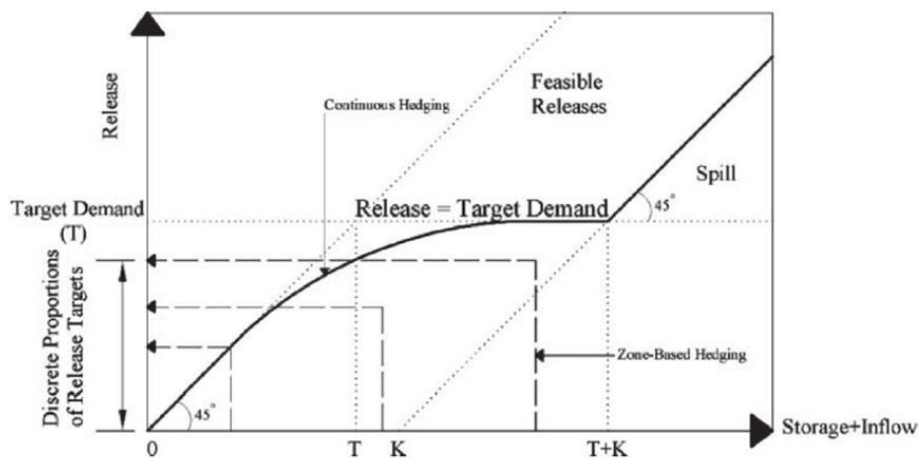
در سال‌های گذشته و در حوزه‌های مختلف بخصوص حوزه مدیریت منابع آب از الگوریتم‌های فراکوشی برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده شده است (Ketabchi and Ataie, 2015a) براساس مطالعات انجام شده توسط Ataie-Ashtiani, (2015c) الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها، از جمله کارآمدترین روش‌های بهینه‌سازی در این حوزه می‌باشد. هدف اصلی در حل الگوریتم بهینه‌سازی

بزرگ‌تر از EWA باشد جیره‌بندی متوقف شده و بهره‌برداری نرمال ادامه پیدا می‌کند. در شرایطی هم که آب در دسترس بین SWA و EWA باشد جیره‌بندی بکار برده می‌شود و بخشی از تقاضا به جهت افزایش ذخیره پاسخ داده می‌شود. در جیره‌بندی دو نقطه‌ای تعدیل شده علاوه بر تعیین مقادیر SWA و EWA مقدار فاکتور جیره‌بندی<sup>۴</sup> (HF) مشخص می‌گردد. شکل ۷ جیره‌بندی دو نقطه‌ای تعدیل شده را نشان می‌دهد. در حقیقت فاکتور جیره‌بندی مقدار سهمیه‌بندی آب را به علاوه SWA و EWA مشخص می‌کند. این فاکتور جواب سؤال‌های "چه مقدار جیره‌بندی؟" و زمان شروع و پایان دوره جیره‌بندی را می‌دهد (Bhatia et al., 2018).

با توجه به مطالعات انجام شده قوانین جیره‌بندی دو نقطه‌ای نتایج بهتری در مقایسه با سایر قوانین دارد. در برخی موارد نیز قوانین جیره‌بندی سه نقطه‌ای در کنار دو نقطه‌ای نتایج قابل قبول‌تری نسبت به سایر قوانین جیره‌بندی داشته است (سجادی و همکاران، ۱۳۹۷). ولیکن در این تحقیق به جهت مدیریت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی از قوانین جیره‌بندی دو نقطه‌ای تعدیل شده استفاده شد. شروع سیاست جیره‌بندی دو نقطه‌ای با مقدار اولیه آب موجود<sup>۲</sup> (SWA) و اتمام استفاده از این سیاست با مقدار آب موجود نهایی<sup>۳</sup> (EWA) نمایش داده می‌شود. هنگامی که آب در دسترس به زیر مقدار SWA می‌رسد تمامی آب در دسترس برای تأمین تقاضا رهاسازی می‌گردد. اگر آب در دسترس



شکل ۵- قوانین جیره‌بندی یک نقطه‌ای دو نقطه‌ای و سه نقطه‌ای.  
Figure 5- One point, Two point and Three point hedging rule.



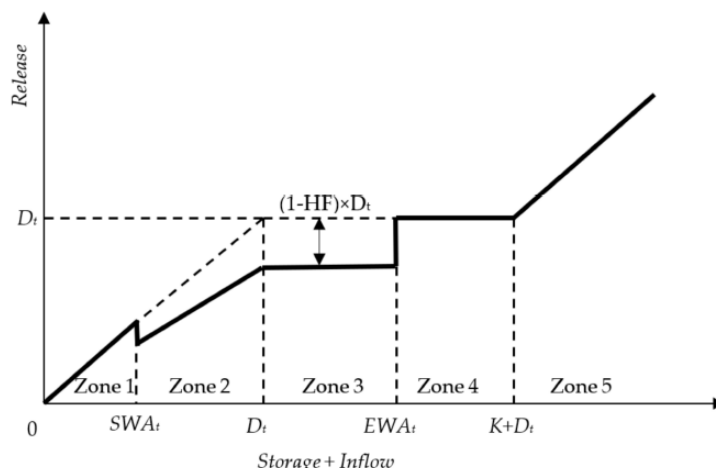
شکل ۶- قوانین جیره‌بندی پیوسته و ناحیه‌ای.  
Figure 6- Continuous and Zone Based hedging rule.

<sup>4</sup> Hedging Factor

<sup>2</sup> Start Water Available

<sup>3</sup> End Water Available





شکل ۷- سیاست جیره‌بندی دو نقطه‌ای تعدیل شده.

Figure 7- Modified two-point hedging rule.

صفر و  $D$  داشته باشد.  $EWA_t$  حجم آب نهایی در زمان  $t$  است و می‌تواند مقادیری بین  $D$  و  $D + 0.7 \times GS_{max}$  داشته باشد.  $GS_{max}$  ظرفیتی از آبخوان می‌باشد که با در نظر گرفتن تراز عمق ریشه (۲ متر از سطح) به عنوان حداکثر عمق آب محاسبه شده است.

در صورتی که  $SWA$  یا  $EWA$  مقداری برابر با  $D$  داشته باشد مکانیزم جیره‌بندی عمل نمی‌کند و قانون بهره‌برداری همان سیاست نرمال بهره‌برداری خواهد بود. این دو پارامتر به عنوان آستانه برای شروع و اتمام جیره‌بندی می‌باشد و می‌تواند مقادیر مختلفی در بازه ذکر شده اختیار کند که با توجه به آن قوانین جیره‌بندی متفاوتی ایجاد می‌شود. در این مطالعه این دو پارامتر به علاوه ضرایب جیره‌بندی به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده و با استفاده از بهینه‌سازی مقادیر بهینه این پارامترها به دست می‌آید.

تابع هدف در بهینه‌سازی به حداقل رساندن افت سطح آب زیرزمینی و همچنین شاخص اصلاح شده کمبود می‌باشد که روابط این دو تابع هدف به‌صورت روابط ۸ و ۹ آورده شده است.

$$\text{minimize DrawDown} = \bar{H}_0 - \bar{H}_{\text{end}} \quad (8)$$

$$t=1,2,3,\dots,T \text{ minimize MSI} = \frac{100}{T} \sum_{t=1}^n \left( \frac{GE_t - D_t}{D_t} \right)^2 \quad (9)$$

در روابط فوق،  $\bar{H}_0$  میانگین هد آب در سطح آبخوان در ابتدای دوره شبیه‌سازی،  $\bar{H}_{\text{end}}$  میانگین هد آب در سطح آبخوان در انتهای دوره شبیه‌سازی،  $D_t$  نیاز آبی متوسط ماهانه از آبخوان در دوره  $t$ ام و  $T$  بازه زمانی مورد بررسی می‌باشد. با وجود توان دو در معادله ۹، به کمبودهای شدیدتر جریمه بالاتری تعلق می‌گیرد که این خود باعث توزیع بهتر کمبودها گردیده و با سرعت بیشتری کاهش می‌یابند.

### روابط قانون جیره‌بندی دو نقطه‌ای تعدیل شده بهره‌برداری از آبخوان

با توجه به اینکه این قانون برای مدیریت منابع آب سطحی و به طور دقیق‌تر مخازن سدها به کار رفته است، بنابراین به منظور استفاده از این قوانین جهت مدیریت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی تغییراتی متناسب با محدودیت‌های آبخوان در آن‌ها در نظر گرفته شده است. در جیره‌بندی آب‌های زیرزمینی این منابع به صورت مخزن در نظر گرفته می‌شوند؛ اما با توجه به ماهیت، این مخازن با مخازن سد متفاوت هستند؛ زیرا در مخازن سد با رهاسازی حجم معینی آب می‌توان از روی منحنی‌های حجم-ارتفاع، تراز آب را به دست آورد؛ اما در منابع آب زیرزمینی خصوصیت‌های خاک نیز در این موضوع دخیل بوده و کار را پیچیده‌تر می‌سازد (سجادی و همکاران، ۱۳۹۷). معادلات مورد استفاده در قانون جیره‌بندی تعدیل شده برای بهره‌برداری از آبخوان در روابط ۴ تا ۷ به شرح زیر است:

$$GE_t = 0.7 \times GS_t + I_t \quad \text{if } (0.7 \times GS_t + I_t) \leq SWA_t \quad (4)$$

$$GE_t = (0.7 \times GS_t + I_t) * (1 - HF) \quad \text{if } SWA_t \leq (0.7 \times GS_t + I_t) \leq EWA_t \quad (5)$$

$$GE_t = D_t * (1 - HF) \quad \text{if } D_t \leq (0.7 \times GS_t + I_t) \leq EWA_t \quad (6)$$

$$GE_t = D \quad \text{if } (0.7 \times GS_{max} + D_t) \leq (0.7 \times GS_t + I_t) \quad (7)$$

در روابط فوق  $GE_t$  حجم قابل برداشت از آبخوان در زمان  $t$ ،  $GS_t$  حجم آبخوان در زمان  $t$ ،  $I_t$  تغذیه آبخوان،  $0.7$  ضریب برداشت مجاز از آبخوان،  $D$  نیاز آبی متوسط ماهانه از آبخوان،  $SWA_t$  حجم آب اولیه در زمان  $t$ ، که می‌تواند مقداری بین

### شاخص‌های مورد استفاده در آب زیرزمینی

توجه به این نتایج و کم بودن میزان اختلاف سطح ایستابی مشاهداتی با محاسباتی می‌توان دریافت که مدل قادر به شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان در حد قابل قبولی بوده است. پس از اطمینان از درستی مدل شبیه‌ساز، مدل شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در طی دوره مطالعاتی ۱۳۸۷-۱۳۹۷ (۲۰۱۹-۲۰۰۸) انجام شد. تراز آب زیرزمینی در مهر ۱۳۸۷ برابر با ۸۸۷/۶۸۳ متر و در مهر ۱۳۹۷ به مقدار ۸۸۳/۲۶۰ متر رسید که حاکی از افت ۴/۴ متری سطح ایستابی در طی ۱۰ سال بود. این رقم بیانگر این است که با روند برداشت کنونی هر سال به طور متوسط آبخوان افت ۰/۴۴ متری را تجربه کرده است.

در ادامه شبیه‌سازی با توجه به سه سناریوی، روند کنونی برداشت، ۱۵ درصد افزایش و ۱۵ درصد کاهش برداشت آب زیرزمینی، تغییرات سطح ایستابی در دشت کاشان تا سال ۱۴۰۷ معادل ۲۰۲۹ میلادی شبیه‌سازی گردید. شکل ۸ روند تغییرات آب زیرزمینی را با توجه به سناریوهای مختلف نشان می‌دهد.

در جدول ۳ نیز خلاصه نتایج حاصل از شبیه‌سازی رفتار آبخوان تحت سه سناریوی برداشت ذکر شده است. طبق خروجی مدل GMS و آنچه که واضح است سطح ایستابی با افزایش (کاهش) ۱۵ درصدی برداشت و عدم تغذیه و ورودی به آبخوان با توجه به نوع اقلیم منطقه و متکی بودن تغذیه به بارش‌های ناچیز و آب برگشتی حاصل از کشاورزی، شرب و صنعت، افت ۱۱/۸ (۶/۹) متری را در طول ۲۰ سال (۱۳۸۷-۱۴۰۷) تجربه خواهد کرد. در صورت برداشت بصورت روند کنونی در انتهای سال ۱۴۰۷ افت ۹/۸ متر اتفاق خواهد افتاد.

شاخص‌های آب زیرزمینی پایداری این منابع را بر اساس برنامه‌های پایشی، ارزیابی می‌کنند. این شاخص‌ها اطلاعاتی را در خصوص وضعیت حال حاضر و آینده سیستم آب زیرزمینی ارائه می‌دهند. این شاخص‌ها چه در بعد زمانی و چه در بعد مکانی میزان دخالت انسانی و تأثیرات فرایندهای طبیعی را بر سیستم آب زیرزمینی مورد بررسی قرار می‌دهند. استفاده از این شاخص‌ها تسهیل در رسیدن به نتایج را سبب شده و ارتباط و کارایی بین سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی را افزایش می‌دهد (UNESCO, 2007). رابطه‌های ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب شاخص‌های آسیب‌پذیری<sup>۵</sup>، اعتمادپذیری<sup>۶</sup>، برگشت‌پذیری<sup>۷</sup> و پایداری<sup>۸</sup> مورد استفاده در این پژوهش می‌باشند.

$$Vul = \frac{\sum_{t=1}^T (D_t - GE_t | GE_t < D_t)}{[\sum_{t=1}^T (GE_t < D_t)] \sum_{t=1}^T D_t} \quad (10)$$

$$Rel = \frac{\sum_{t=1}^T (GE_t > D_t)}{T} \quad (11)$$

$$Res = \frac{N_{t=1}^T (D_{t+1} \leq GE_{t+1} | GE_t < D_t)}{N_{t=1}^T (GE_t < D_t)} \quad (12)$$

$$SI = \sqrt[3]{(1 - Vul) * Res * Rel} \quad (13)$$

### نتایج و بحث

پس از ساخت مدل شبیه‌ساز رفتار آبخوان دشت کاشان و معرفی تمامی داده‌ها، شرایط مرزی و اولیه به مدل GMS، شبیه‌سازی با ۱۲۵ گام زمانی و واسنجی و صحت‌سنجی پارامترهای هیدرودینامیکی جهت اطمینان از دقت کارکرد مدل شبیه‌ساز انجام شد.

نتایج حاصل از مقایسه بین مقادیر محاسباتی و مشاهده‌ای در دوره واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۲ آورده شده است. با

جدول ۲- معیارهای ارزیابی خطا در مدل شبیه‌سازی.

Table 2- Error evaluation criteria in the simulation model.

ME(m)	RMSE(m)	bR <sup>2</sup>	step
0.64	0.34	0.95	calibration
0.82	0.41	0.89	validation

جدول ۳- نتایج حاصل از شبیه‌سازی آب زیرزمینی تحت سه سناریوی برداشت

Table 3- results of groundwater simulation with three release scenarios

15 Percent decrease in extraction	15 Percent increase in extraction	Current extraction trend
-----------------------------------	-----------------------------------	--------------------------

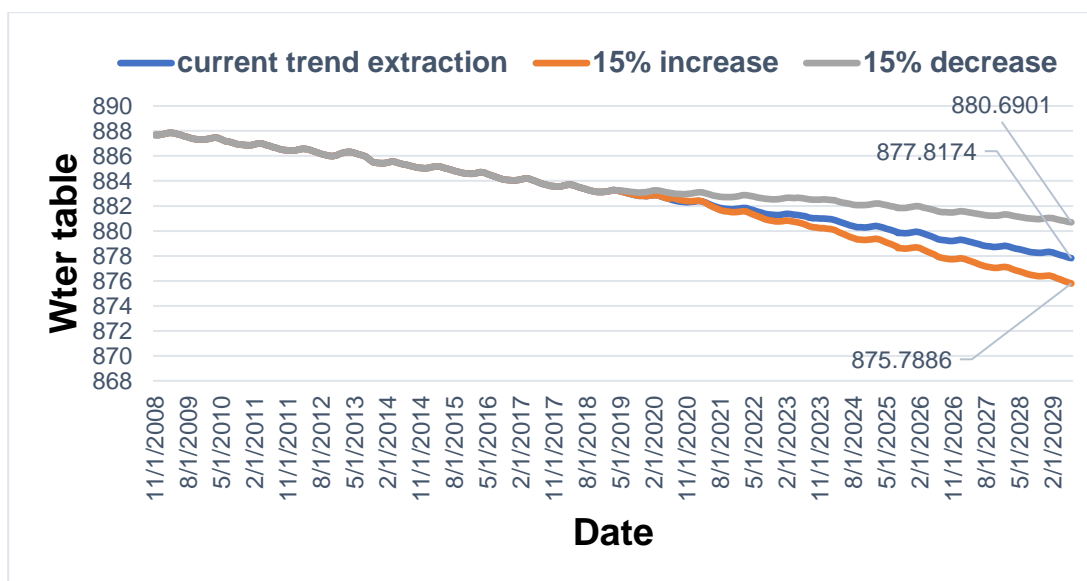
<sup>7</sup> Resilience index

<sup>8</sup> Sustainability index

<sup>5</sup> Vulnerable Index

<sup>6</sup> Reliability Index

887.6	887.6	887.6	Water table of the first month
880.6	875.78	887.81	Water table of the first month
-6.9	-11.9	-9.8	Groundwater drop



شکل ۸- روند تغییرات تراز آب زیرزمینی دشت کاشان تحت سناریوهای مختلف برداشت از آبخوان (۲۰۰۸-۲۰۲۹).

Figure 8- trend of groundwater level changes in Kashan plain under different scenarios of aquifer withdrawal (2008-2029).

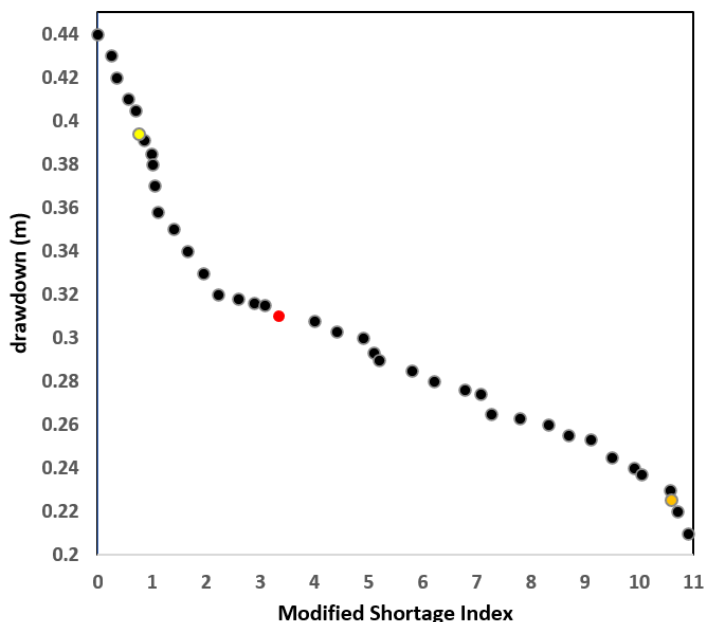
انتخاب گردید چون بعد از این نقطه روند افزایش شاخص کمبود اصلاح شده سرعت بیشتری به خود می‌گیرد و بکارگرفتن مدیریت جیره‌بندی را عملاً نشدنی می‌کند. جدول ۴ ضرایب جیره‌بندی نقطه منتخب (۰/۳۱ و ۳/۳۵) در جبهه پارتو را به همراه شروع و پایان جیره‌بندی نشان می‌دهد. همان‌گونه که از جدول مشخص است در ماه‌های گرم سال مقادیر ضرایب جیره‌بندی به بیشترین مقدار خود می‌رسد و این یعنی بیشترین کمبود در تامین نیازها در این ماه‌ها رخ می‌دهد. عکس این حالت برای ماه‌های سرد سال رخ می‌دهد. به جهت پایش نتایج در این نوع مدیریت برداشت (سیاست جیره‌بندی دونقطه‌ای اصلاح شده)، رصد هر سطح از نتایج مستلزم استفاده از شاخص می‌باشد. جهت ارزیابی عملکرد سیستم از دیدگاه منابع، از معیارهای عملکرد قابلیت اطمینان در حجم، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و شاخص پایداری در طول دوره مورد مطالعه، استفاده شده است. هر کدام از این شاخص‌ها در قالب یک مسئله بهینه‌سازی جداگانه حل شدند. نتایج حاصل از شاخص‌های ارزیابی در جدول ۵ آورده شده است.

گرچه اعتمادپذیری در سیاست جیره‌بندی دونقطه‌ای اصلاح- شده کاهش می‌یابد، ولیکن شدت کمبودها در طول دوره مورد

پس از طی مراحل بالا، الگوریتم کلونی مورچه جهت بهینه- سازی سیاست جیره‌بندی دو نقطه‌ای اصلاح شده، در متلب با مدل شبیه‌ساز تراز آب زیرزمینی تلفیق شد. برای مدل تلفیقی دو تابع هدف کمینه نمودن افت آب زیرزمینی و شاخص کمبود اصلاح شده تعریف گردید. دو تابع هدف ذکر شده با یکدیگر متناقض بوده و کاهش یکی با افزایش دیگری همراه خواهد بود. در چنین مسائلی به ندرت یک جواب بهینه و در عوض مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه که به اصطلاح به آن جبهه پارتو گفته می‌شود وجود دارد.

شکل ۹ مجموعه جواب‌های بهینه بدست آمده حاصل از ۳۰۰۰ بار تکرار مدل تلفیقی را نشان می‌دهد. همین‌طور که در شکل پیداست در جایی که افت آب زیرزمینی برابر ۰/۴۴ متر باشد هیچ‌گونه کمبودی در تامین نیازها وجود ندارد ولی باگذر زمان و اتخاذ سیاست جیره‌بندی گرچه افت به مرور کاهش می‌یابد که مطلوب می‌باشد ولی همزمان، با کمبود در تامین نیازها روبرو شده که نامطلوب می‌باشد. چون تنها منبع برداشت آب در دشت کاشان آبخوان می‌باشد و منبعی دیگر برای تامین آب وجود ندارد. نقطه‌ای در جبهه پارتو که افت متوسط در سطح آبخوان به میزان ۰/۳۱ متر در سال و شاخص کمبود اصلاح شده به میزان ۳/۳۵ می‌رسد به عنوان نقطه بهینه نسبی

مطالعه کاهش می‌یابد و این خود باعث کاهش خسارت ناشی از عدم تامین نیاز می‌گردد.



شکل ۹- جبهه پارتو حاصل از مقادیر توابع هدف توسط الگوریتم کلونی مورچه.

Figure 9- Pareto fronts for objective functions by ant colony algorithm.

جدول ۴- مقادیر پارامترهای جیره‌بندی دو نقطه ای اصلاح شده.

Table 4-parameters of Modify two point Hedging.

EWA (MCM)	SWA (MCM)	HF	month
207.65	21.2	0.36	October
180.02	13.06	0.22	November
134.89	11.32	0.35	December
101.35	7.89	0.22	January
95.65	10.94	0.26	February
104.87	10.97	0.35	March
115.36	10.69	0.38	April
139.12	14.08	0.48	May
150.23	24.56	0.51	June
208.84	30.21	0.55	July
211.54	33.47	0.64	August
133.62	25.76	0.49	September

جدول ۵- معیارهای عملکرد سیستم در تامین نیازها.

Table 5- System performance criteria in supply demand.

sustainability	vulnerability	resilience	reliability	Selected Optimal solution	
				MSI	drawdown
51	62	46.06	77.46	3.35	0.31

مورد صحت‌سنجی قرار گرفت.

جهت ارزیابی دقت واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز از معیارهای میانگین خطا (ME)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) استفاده شد. با توجه به نتایج، مدل قادر است تا پارامترهای آبخوان را به خوبی تخمین بزند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تغییرات تراز آب زیرزمینی در دوره مطالعاتی ۱۰ ساله، با روند برداشت کنونی

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه از میان مدل‌های شبیه‌ساز رفتار آب زیرزمینی در یک آبخوان از مدل Modflow با رابط کاربرپسند GMS با ورژن ۱۰/۴ جهت شبیه‌سازی تراز آب در آبخوان دشت کاشان برای ۱۲۵ دوره تنش ماهانه (۱۳۹۷-۱۳۸۷) استفاده شد. مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار و با ۹۴ دوره تنش ماهانه مورد واسنجی و سپس برای ۳۱ دوره تنش ماهانه باقیمانده

آینده. گزارش پایانی پروژه تحقیقاتی (کارفرما: شرکت آب و فاضلاب کاشان).

سجادی، م.، صفوی، ح.، بزرگ حداد، ا.، ۱۳۹۷. استخراج قوانین جیره‌بندی تلفیقی برای مدیریت بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، (۳): ۲۲-۱۶-۱.

صاغی جدید، م.، کتابچی، ح.، ۱۳۹۸. مدیریت احیاء منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل تلفیقی شبیه‌سازی عددی-بهبوده‌سازی فراکاووشی جامعه مورچه‌ها. تحقیقات منابع آب ایران، (۲): ۱۵-۱۳۳-۱۱۹.

فتحی، م.، نوریان بیدگلی، م.، ۱۴۰۰. ارزیابی نشست زمین ناشی از افت سطح ایستابی در دشت کاشان. علوم و مهندسی آب و فاضلاب، (۴): ۶-۴۵-۵.

قربانی‌اقدم، م.، خزیمه نژاد، ح.، پوررضا بیلندی، م.، قاسمیه، ه.، ۱۴۰۲. مدیریت برنامه‌ریزی جهت بهره‌برداری از آبخوان آزاد با استفاده از مدل GIS. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، (۵): ۱۷-۹۶۵-۹۵۳.

موسوی‌زاده، س. ر.، معینی، ر.، شانه‌ساززاده، ا.، ۱۴۰۱. تخمین ضریب قابلیت انتقال آبخوان با استفاده از روش‌های دروه‌یابی (مطالعه موردی: آبخوان دامنه-داران). هیدروژئولوژی، (۱): ۷-۱۰۴-۹۱.

Ahlfeld, D. P., et al., 2005. GWM-A ground-water management process for the US Geological Survey modular ground-water model (MODFLOW-2000), US Department of the Interior, USGS, pp. 114.

Babel, M., et al., 2005. "A model for optimal allocation of water to competing demands." *Water resources management* 19(6): 693-712.

Hashimoto, T., Stedinger, JR., Loucks, DP., 1982. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water resources research*, 18(1):14-20.

Ketabchi, H., Ataie-Ashtiani, B., 2015a. Review: Coastal groundwater optimization advances, challenges, and practical solutions. *Journal of Hydrology*, 23:1129-1154.

Ketabchi, H., Ataie-Ashtiani, B., 2015c. Evolutionary algorithms for the optimal management

از آبخوان، حاکی از افت ۴/۴ متری بود. شبیه‌سازی تا افق ۱۴۰۷ (۲۰۲۹) از افت شدید سطح آب زیرزمینی در دشت کاشان تحت سه سناریوی روند کنونی برداشت، افزایش ۱۵ درصدی در برداشت و کاهش ۱۵ درصدی در برداشت خبر داد. نتایج با بررسی‌های خراسانی‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) بر روی وضعیت کمی منابع آب زیرزمینی دشت کاشان انطباق داشته است. ایشان با توجه به سناریوی روند کنونی برداشت از آبخوان نشان دادند که افت آب زیرزمینی حادث می‌گردد و این افت در نواحی غربی به دلیل تمرکز بیشتر چاه‌های بهره‌برداری بیشتر خواهد بود.

با توجه به وضعیت پیش رو و روند کاهش حجم آبخوان یکی از راهکارهای مفید جهت تغذیه آب زیرزمینی و تقویت آبخوان، مدیریت بهینه برداشت با استفاده از سیاست جیره‌بندی دونقطه‌ای اصلاح‌شده می‌باشد. برای این منظور تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی با مدل شبیه‌سازی در محیط متلب انجام گرفت و تمامی توابع هدف و قیود به مسئله وارد گردید. به‌کارگیری این سیاست باعث شد که افت متوسط تراز آب زیرزمینی از ۰/۴۴ متر در سال به ۰/۳۱ متر در سال کاهش پیدا کند که این میزان کاهش در افت باعث ذخیره ۲۲۵ میلیون مترمکعب آب در آبخوان در هر سال می‌گردد.

## منابع

تقیان، م.، رادمنش، ف.، آخوندعلی، ع.، حقیقی، ع.، ۱۳۹۱. بهینه‌سازی قاعده جیره‌بندی در سدهای مخزنی از طریق اتصال الگوریتم ژنتیک به یک مدل شبیه‌سازی علوم و مهندسی آبیاری، (۲): ۳۵-۵۰-۴۱.

جبّاری ملایری، م.، جوادی، سامان.، سامانی، س.، روزبهانی، ع.، ۱۴۰۰. ارزیابی عدم قطعیت ناشی از پیچیدگی مدل در مدل‌سازی آب زیرزمینی. هیدروژئولوژی، (۲): ۶-۱۵۰-۱۳۲.

حجی‌پور، م.، ذاکری‌نیا، م.، ضیائی، ع.، حسام، م.، ۱۳۹۸. مدیریت تلفیقی تقاضای آب در بخش شرب و صنعت به کمک اتصال مدل‌های WEAP-MODFLOW مطالعه موردی شهر بجنورد. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، (۱): ۱۸۷-۲۰۳-۲۰۳.

خراسانی‌زاده، ح.، دلخواه، ع.، مزروعی، ع.، ۱۳۸۶. مطالعه مقایسه‌ای مصارف آب کشاورزی و شهری و بررسی اثرات کمی و کیفی برداشت از منابع زیرزمینی دشت کاشان و پیش‌بینی

of coastal groundwater: A comparative study toward future challenges. *Journal of Hydrology*, 520: 193-213.

Men, B., Wu, Z., Liu, H., Li, Y., Zhao, Y., 2019. Research on hedging rules based on water supply priority and benefit loss of water shortage—A case study of Tianjin, China. *Water*, 11(4), 778.

Nguyen, A. T., Reiter, S., Rigo, P., 2014. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, 113: 1043-1058.

Sadeghi-Tabas, S., Samadi, S. Z., Akbarpour, A., Pourreza-Bilondi, M., 2017. Sustainable groundwater modeling using single-and multi-objective optimization algorithms. *Journal of Hydroinformatics*, 19(1): 97-114.

Saghi-Jadid, M., Ketabchi, H., 2020. Result-based management approach for aquifer restoration problems using a combined numerical simulation–parallel evolutionary optimization model. *Journal of Hydrology*, 137-152.

Shourian, M., Jamshidi, J., 2022. Hedging rule-based optimized reservoir operation using metaheuristic algorithms. *International symposium on hydrology*, 13-18.

Srinivasan, K., Philipose, M.C., 1998. Effect of hedging on over-year reservoir performance. *Water Resour. Manag*, 95-120

UNESCO., 2007. *Groundwater Resources Sustainability Indicators*, pp. 16.

Van der Bruggen, B., Milis, R., Vandecasteele, C., Bielen, P., Van San, E., Huysman, K., 2003. Electrodialysis and nanofiltration of surface water for subsequent use as infiltration water. *Water research*, 37(16): 3867-3874.

Zeinali, M., Azari, A., Heidari, M., 2020. Multiobjective optimization for water resource management in low-flow areas based on a coupled surface water–groundwater model. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(5): 04020020.