تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۲ | اسفند ۱۴۰۰ (ص ۲۹۶۵-۲۹۵۱)

https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.334895.669149

(مقاله علمی - پژوهشی)

Decision Model Based on Sustainability Indicators for Groundwater Resources Management (Application to the Case Study of Namdan Plain Located in Fars Province)

FARZANEH KHANMOHAMMADI[1], HAMED KETABCHI[1*]

1. Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

(Received: Dec. 1, 2022- Revised: Jan. 7, 2022- Accepted: Jan. 12, 2022)

ABSTRACT

Human is under threat due to the shortage of fresh water, its deteriorating quality, and rising water stress around the world. Proper management of water resources is very important to ensure the sustainable social and economic development in any country in the world. In order to sustain freshwater resources, they must be used efficiently without compromising the needs of future generations. The present study was conducted to ensure the sustainable management of groundwater resources. For this purpose, four indicators of vulnerability, resilience, reliability, and combined stability, each of which includes aspects of sustainability, were used as the objective function of management issues. Using the combined simulation-optimization model of Namdan plain aquifer and the ant colony optimization algorithm, a decision model was created. The results indicate the effectiveness of four indicators of vulnerability, resilience, reliability and combined stability to increase groundwater level and positive changes of water storage. So that the aquifer storage change under each scenario was 11.7, 13, 12.3 and 12.4 million cubic meters, respectively. According to the results obtained from four management issues, analyzed in this study, the most important effect in improving the aquifer with a significant reduction in pumping from well while the such reduction should be measured at the aquifer level.

Keywords: Groundwater, Sustainability Indicator, Simulation-Optimization, Sustainable Management.

*Corresponding Author's Email: h.ketabchi@modares.ac.ir

مدل تصمیم مبتنی بر نشانگرهای پایداری برای مدیریت منابع آب زیرزمینی (به‌کارگیری در مطالعه موردی دشت نمدان واقع در استان فارس)

فرزانه خان‌محمدی[1]، حامد کتابچی[1*]

۱. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۱۰- تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۷- تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۰/۲۲)

چکیده

بشریت به دلیل کمبود آب شیرین، پایین بودن کیفیت آن و افزایش تنش آبی در سراسر جهان در معرض تهدید است. مدیریت صحیح منابع آب برای حصول اطمینان از توسعه اجتماعی و اقتصادی پایدار در هر کشوری بسیار مهم است. به‌منظور حفظ منابع آب شیرین به‌صورت پایدار، باید از آنها به شیوه‌ای کارآمد و بدون به خطر انداختن نیازهای نسل آینده استفاده کرد. مطالعه حاضر به‌منظور مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی انجام شده است. بدین منظور چهار نشانگر آسیب‌پذیری، تاب‌آوری، قابلیت اطمینان و پایداری ترکیبی که هرکدام جنبه‌هایی از پایداری را در برمی‌گیرند به‌عنوان تابع هدف مسائل مدیریتی مورداستفاده قرار گرفته‌اند. با استفاده از مدل تلفیقی شبیه‌سازی - بهینه‌سازی آبخوان دشت نمدان و الگوریتم فراکاوشی جامعه مورچه‌ها، مدل تصمیم موردنیاز ایجاد شد. نتایج حاکی از اثربخشی چهار نشانگر آسیب‌پذیری، تاب‌آوری، قابلیت اطمینان و پایداری ترکیبی در افزایش سطح آب زیرزمینی و تغییرات مثبت بیلان بوده است؛ طوری که تغییرات ذخیره آبخوان تحت اجرای هر سناریو به ترتیب ۱۱/۷، ۱۳، ۱۲/۳ و ۱۲/۴ میلیون مترمکعب شده است. باتوجه‌به نتایج کسب شده از چهار مسئله مدیریتی که در این مطالعه مورد تحلیل قرار گرفت، بیشترین اثرگذاری بر روی بهبود آبخوان با کاهش قابل‌توجه پمپاژ از چاه‌ها برآورده می‌شود و بایستی تمهیداتی در سطح آبخوان به‌منظور کاهش برداشت‌ها در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، نشانگر پایداری، شبیه‌سازی - بهینه‌سازی، مدیریت پایدار.

مقدمه

در چند دهه گذشته افزایش جمعیت جهان، استاندارد زندگی، الگوی مصرف و کشاورزی آبی باعث افزایش تقاضای جهانی آب شده است. تغییرات آب‌وهوایی و فعالیت‌های انسانی خطر کاهش کمیت و کیفیت آب را افزایش می‌دهد. در سال ۲۰۲۰ سازمان ملل متحد، اجلاس توسعه پایدار زمین را تشکیل داد که در این جلسه منابع آبی، انرژی، بهداشت، کشاورزی و تنوع زیستی به‌عنوان پنج مسئله اصلی که انسان قرن ۲۱ باید با آن روبرو شود مطرح شد و منابع آب به‌عنوان موضوع اصلی در نظر گرفته شد (Chen et al., 2020). کاهش جریان پایه به رودخانه‌ها، تالاب‌ها، دریاچه‌ها؛ کاهش سطح منابع آب زیرزمینی، عدم تعادل ذخیره‌سازی آب زیرزمینی، اختلال در هیدرولوژی تالاب‌ها و دریاچه‌ها و فرونشست زمین حاکی از عدم مدیریت پایدار آب زیرزمینی است. مدیریت آب مجموعه‌ای از سیستم‌های سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و اداری است که مدیریت یکپارچه منابع آب[1] را ممکن می‌سازد (Pires et al., 2017). هدف مدیریت یکپارچه منابع آب به حداکثر رساندن مزایای اقتصادی و رفاه اجتماعی در استفاده از آب بدون آنکه پایداری اکوسیستم به خطر بیفتد، است. به‌عنوان اولین گام در تدوین سیاست‌ها و گزینه‌های کارآمد مدیریت آب زیرزمینی نیاز به دانش و درک عمیق از وضعیت فعلی و وضعیت پیش‌بینی‌شده از منابع آب زیرزمینی است (Smith et al., 2016; Lachaal & Gana, 2016). بدون داده‌های معتبر و کافی برای کمیت و کیفیت آب زیرزمینی، مدیریت و توسعه سیاست‌ها قابل تحقق نیست (Wu et al., 2016). به‌منظور توصیف وضعیت فعلی و روند کمیت و کیفیت آب زیرزمینی از طریق نشانگرهای معرف وضعیت آب زیرزمینی به اطلاعات مدیریتی قابل‌توجهی می‌توان دست‌یافت. نشانگرهای ارزیابی منابع آب زیرزمینی ارائه‌شده در منابع مختلف روی کمیت منابع آب زیرزمینی، بیلان کاهش سطح آب زیرزمینی، حجم بهره‌برداری، تغذیه آب زیرزمینی، ارتباط آب‌های زیرزمینی با آب‌های سطحی، آسیب‌پذیری ذاتی، وسعت شبکه پایش (تراکم چاه‌های مشاهداتی)، وابستگی جمعیت به منابع آب زیرزمینی، تغییر در

* نویسنده مسئول: h.ketabchi@modares.ac.ir

1. Integrated Water Resources Management (IWRM)

کاربری زمین، فرونشست زمین و ردپای آب زیرزمینی، متمرکز هستند (Hosseini et al., 2019; Anbazhagan and Jothibasu, 2016; Senent-Aparicio et al., 2016; Mattas et al., 2014). به‌منظور تخصیص بهتر منابع آب زیرزمینی، از نشانگرهای استفاده و مدیریت آب می‌توان بهره گرفت. با این وجود جهت تدوین این نشانگرها، علاوه بر توجه به موضوع فنی آن‌ها باید جنبه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی، نهادی و اقتصادی مربوط به پایداری مورد توجه قرارگیرد. برای پایداری چهار معیار پایداری اجتماعی (اطمینان از دسترسی به آب باکیفیت و مقدار لازم برای نیازهای انسان)، پایداری اقتصادی (اطمینان از استفاده و بهره‌برداری آب با ترویج توسعه شهری و روستایی)، پایداری زیست‌محیطی (اطمینان از حفاظت مناسب از منابع طبیعی) و پایداری نهادی (اطمینان از یک چارچوب نهادی مناسب برای ترویج اصول مدیریت یکپارچه منابع آب) مطرح‌شده است (Pires et al., 2017).

نشانگرهایی که معیارهای پایداری را در بر می‌گیرند، به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای شناسایی و نظارت بر مشکلات آب، تعریف راه‌حل‌ها و ارزیابی دستاوردها یا عدم موفقیت سیاست‌ها، طرح‌ها و برنامه‌ها استفاده می‌شوند (WWAP, 2009). به‌طور مثال Bui et al. (2016) جهت ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی یکسری شاخص‌های زیست‌محیطی را معرفی نمودند. Bui et al. (2018) در تحقیقی دیگر به ارزیابی پایداری اجتماعی منابع آب زیرزمینی از طریق معرفی یک سری شاخص در این زمینه پرداخته‌اند. Hosseini et al. (2019) با ایجاد یک نشانگر زیست‌محیطی یکپارچه، به بررسی وضعیت سی آبخوان کشور پرداختند. این نشانگر بر اساس تجمع وزنی سیزده نشانگر اتخاذشده از طریق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تهیه‌شده است و وضعیت کنونی، روند تغییر کیفیت و کمیت آب زیرزمینی را مشخص می‌کند. نتایج مطالعه آن‌ها نیز برای سی سفره آب زیرزمینی ایران، حاکی از وضعیت ناپایدار مدیریت آب زیرزمینی بود. در مناطقی با منابع آب سطحی محدود، رشد بخش‌های کشاورزی و گردشگری که عمده مصرف‌کنندگان آب هستند به مدیریت پایدار آب بستگی دارد. Kourgialas et al. (2018) به‌منظور ایجاد برنامه‌های مدیریتی در این مناطق رویکرد جدیدی را در راستای برآورد ردپای آب زیرزمینی پیشنهاد کردند. روش پیشنهادی آنان شامل ایجاد یک رویکرد یکپارچه برای ارزیابی ردپای آب زیرزمینی در مقیاس آبخوان بود که کمبود و آلودگی آب را نشان می‌دهد. بر اساس این نشانگر هرچه مقدار نشانگر بالاتر از یک باشد، تنش آبخوان بیشتر می‌شود. به‌منظور بررسی نحوه عملکرد نشانگرهای مرتبط با مدیریت آب در برابر مجموعه ای از معیارهای پایداری Pires et al. (2017) ، ۱۷۰ نشانگر را مشخص نمودند. آن‌ها توسط یک هیئت بین‌المللی از متخصصان نیز به ارزیابی نشانگرها پرداختند و بررسی نمودند که آیا نشانگرها چهار معیار پایداری (اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی و نهادی) را رعایت می‌کنند یا خیر. آن‌ها بیان نمودند که تنها ۲۴ نشانگر، اکثر معیارهای پایداری را شامل می‌شوند. برای برآورد سطح پایداری عرضه و تقاضا در حوضه رودخانه آهاچای در شمال غربی ایران Karamouz et al. (2017)، یک رویکرد سه‌گانه ارائه دادند. در روش اول، جریان‌های داخلی و منشأ و استفاده نهایی از کل منابع برای هر زیرسیستم تخمین زده می‌شود و برنامه‌ریزی برای نشانگر پایداری با محاسبه آب موجود تعیین می‌شود. در روش دوم یک مدل شبیه‌سازی ارائه شد که برای برآورد قابلیت اطمینان، تاب‌آوری، آسیب‌پذیری و حداکثر کسری جهت تعیین نشانگر پایداری استفاده گردید. درنهایت جهت ارزیابی حرکت به سمت پایداری، یک نشانگر را که پارامترهای تفاوت بین عرضه و تقاضا، درصد تقاضای رضایت‌بخش، بهره‌وری منابع آب و نشانگری برای ارزیابی کاهش ذخیره آبخوان‌ها را شامل می‌شود، ایجاد نمودند.

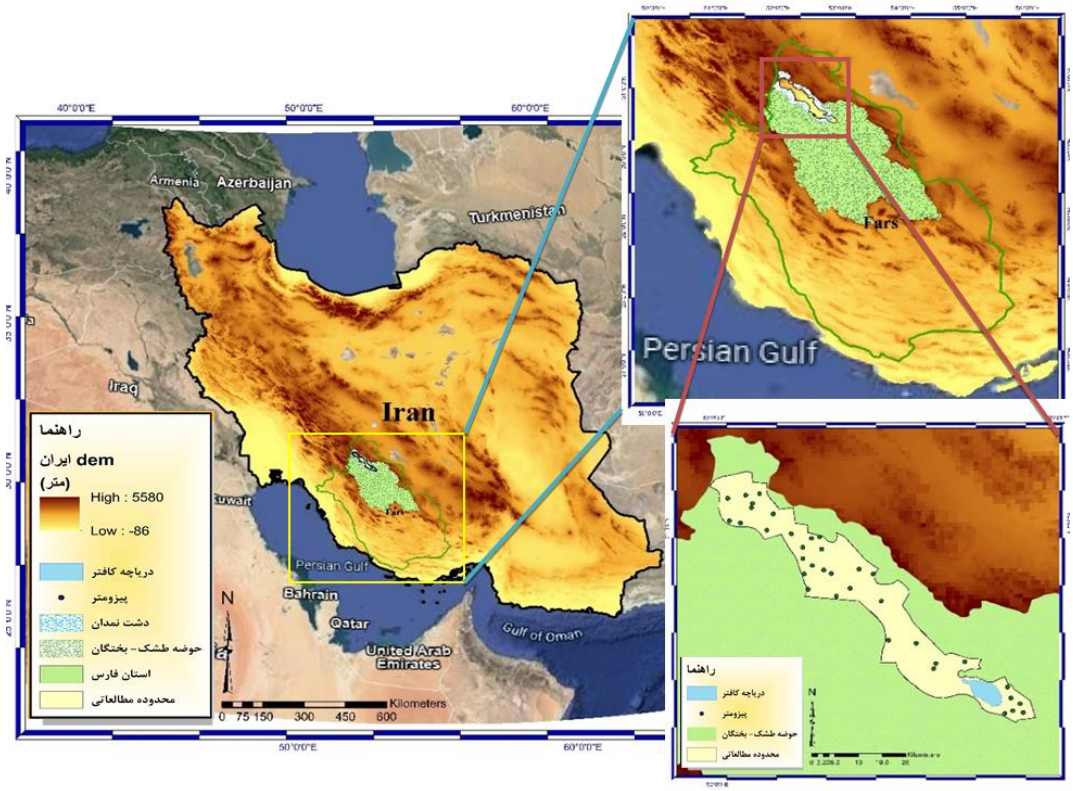
همان‌طور که ملاحظه گردید در غالب مطالعات انجام‌گرفته تنها با اندازه‌گیری نشانگرهای متناسب با اهداف، به ارزیابی وضعیت منابع آب زیرزمینی پرداخته‌اند و تاکنون ابزاری برای تدوین و بررسی تصمیم‌گیری‌ها در راستای اهداف مدیریت یکپارچه منابع آب زیرزمینی به‌عنوان مبنا در نظر گرفته نشده‌اند. در این تحقیق تلاش شده است تا به‌منظور تصمیم‌گیری در راستای مدیریت پایدار برای آبخوان دشت نمدان که از محدوده‌های مهم حوضه طشک - بختگان در استان فارس است، مدل تصمیمی بر مبنای نشانگرهای پایداری آب زیرزمینی که شامل نشانگر پایداری ترکیبی، قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری است، در قالب مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی پیاده شود تا تصمیم‌گیری‌های لازم برای منطقه بر مبنای این نشانگرها صورت گیرد و بررسی‌های لازم به عمل آید. معیارهای پایداری نشانگرهای بیان شده در این مطالعه نیز بر اساس تعریف Pires et al., (2017) تعیین شده‌اند.

مواد و روش‌ها

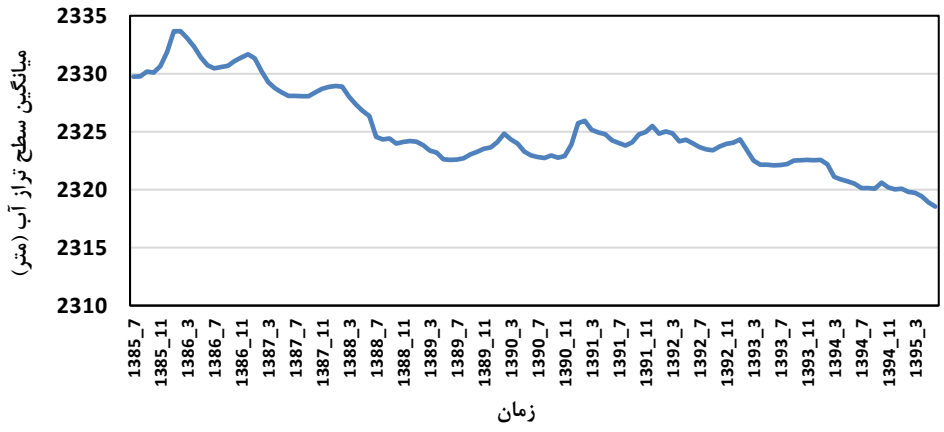
مطالعه موردی

حوضه آبریز دریاچه‌های طشک - بختگان و مهارلو با مساحت ۳۱۴۵۲ کیلومترمربع در استان فارس واقع‌شده است. این حوضه در راستای شمال غربی - جنوب شرقی و به‌موازات رشته‌کوه زاگرس گسترش‌یافته است. دشت نمدان یک زیر حوضه درجه ۴

است در مختصات جغرافیایی '۵۳ °۵۱ تا '۵۶ °۵۲ طول شرقی و ' ۲۷ °۳۰ تا ' ۱۵ °۳۱ عرض شمالی قرار گرفته است، واقع در این حوضه آبریز است. دریاچه کافتر به‌عنوان یکی از معدود دریاچه‌های فصلی و شیرین استان فارس با مساحت ۷/۵۵ کیلومترمربع بوده که در انتهای این دشت قرار داشته و سالیانی است که خشک شده است. این دشت مساحتی بالغبر ۲۸۰۳ کیلومترمربع را در برمی‌گیرد. از مجموع این مساحت ۱۷۹۹/۲ کیلومترمربع آن را دشت، ۹۵۷/۴ کیلومترمربع آن را ارتفاعات و ۴۶/۴ کیلومترمربع آن را دریاچه کافتر تشکیل داده است. محدوده در نظر گرفته‌شده در این دشت، بخشی از آبخوان نمدان با مساحت ۱۳۲۴ کیلومترمربع است (شکل ۱). در این محدوده مطالعاتی نوسانات تراز آب زیرزمینی توسط ۳۶ حلقه چاه مشاهده‌ای برآورد شده است. شکل (۲) هیدروگراف آبخوان نمدان را برای دوره آماری مهرماه ۱۳۸۵ تا شهریورماه ۱۳۹۶ نشان می‌دهد که مطابق این هیدروگراف، مقدار افت سطح آب زیرزمینی در پایان دوره آماری برابر با ۱۱/۲۱ متر است. بر اساس آمار موجود، مجموع تغذیه ورودی به آبخوان نمدان ۳۸۵/۸ میلیون مترمکعب در سال و مجموع تخلیه از منابع آب زیرزمینی آبخوان ۴۳۰/۹ میلیون مترمکعب در سال است (Fars Regional Water Authority, 2016).



شکل ۱- محدوده مطالعاتی دشت نمدان، حوضه آبریز طشک - بختگان، استان فارس، ایران



شکل ۲- هیدروگراف واحد آبخوان نمدان

بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی نمدان عمدتاً از طریق چاه‌های بهره‌برداری عمیق و نیمه‌عمیق و همچنین به میزان اندک، توسط چشمه‌ها و قنوات صورت می‌گیرد. تعداد کل چاه‌های بهره‌برداری موجود در محدوده مطالعاتی نمدان ۲۶۰۵ حلقه چاه هست. از این تعداد تنها ۱۷۰۲ حلقه چاه بهره‌برداری در محدوده آبخوان دشت نمدان واقع‌شده است. از مجموع ۱۷۰۲ حلقه چاه بهره‌برداری، تعداد ۹۲۹ حلقه چاه حفرشده فاقد مجوز بهره‌برداری هستند. میزان کل مصارف در بخش کشاورزی ۴۷۵/۶ میلیون مترمکعب، در بخش شرب ۵/۲ میلیون مترمکعب و در بخش صنعت ۲ میلیون مترمکعب است (Fars Regional Water Authority, 2016).

مدل تلفیقی شبیه‌سازی - بهینه‌سازی

شرایط مختلف تأثیرگذار بر منابع آب زیرزمینی موجب تغییراتی در حجم ذخیره و سطح آب سفره‌های آبی می‌شود. به‌منظور برنامه‌ریزی، کنترل و مدیریت باید این شرایط تحت نظارت دقیق و پیش‌بینی‌های به‌موقع قرار گیرند. تاکنون تعاریف گوناگونی برای مدل، مدل‌سازی و شبیه‌سازی ارائه‌شده است؛ هر سیستم یا شیئی که بتواند رفتارهای یک شیء یا سیستم دیگر را ارائه نماید مدل آن سیستم یا شیء نامیده می‌شود. به عبارت ساده‌تر مدل یک ابزار طراحی‌شده برای نمایش نوع سیستم واقعی است (Wang and Anderson, 1982). مدل‌های عددی آب‌های زیرزمینی ابزاری مهم برای مدیریت منابع آب در آبخوان‌ها می‌باشد که از سال ۱۹۶۰ به طور گسترده از آن‌ها بهره جسته می‌شود (Ahlfeld et al., 2005). از این مدل‌ها می‌توان جهت تخمین پارامترهای هیدرولیکی منطقه از قبیل هدایت هیدرولیکی ساختارهای زمین‌شناسی و همچنین مدیریت منابع آب و پیش‌بینی چگونگی تغییرات رفتار یک آبخوان در مقابل تغییرات آب‌وهوایی و پمپاژ استفاده شوند (Regli et al., 2003). روش تفاضل محدود، یکی از روش‌های حل عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل است که در این روش مشتق توابع با تفاضلات معادل آن‌ها تقریب زده می‌شود. در این تحقیق برای شبیه‌سازی سیستم کمی آبخوان موردمطالعه از کد عددی MODFLOW استفاده شده است.

امروزه به‌منظور اتخاذ تصمیم‌های علمی صحیح، در بسیاری از شاخه‌های علوم مهندسی از مدل‌های تصمیم بهره می‌برند (Ataie-Ashtiani and Ketabchi, 2011). یکی از پرکاربردترین روش‌ها در فرآیند تصمیم‌گیری و ارائه یک برنامه کارآمد و مطلوب جهت مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی، مدل‌های تلفیقی شبیه سازی ـ بهینه‌سازی است که در این پژوهش مورداستفاده قرار گرفته است.

در مسائل مدیریت آبخوان‌های زیرزمینی به دلیل عدم‌قطعیت‌های موجود، ساده‌سازی‌ها و مفهوم‌سازی‌های که شده است، دستیابی به بهترین جواب، مقدور نیست. بهینه‌سازی لزوماً به معنای یافتن بهترین جواب‌ها نیست بلکه در بهینه‌سازی بهینه-ترین جواب ممکن و قابل‌دستیابی، یافته می‌شود (Nguyen et al., 2014). در دهه‌های اخیر، برای حل مسائل بهینه‌سازی در حوزه مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی از الگوریتم‌های فراکاوشی با درجات مختلفی از پیچیدگی استفاده می‌شود (Ketabchi and Ataie-Ashtiani, a, b, c). بر اساس مطالعات انجام‌شده توسط Ataie-Ashtiani and Ketabchi (2015c)، CACO[1] یکی از موفق‌ترین روش‌های بهینه‌سازی در حوزه مدیریت آبخوان‌های زیرزمینی است. در این مطالعه نیز به دلیل بهره‌گیری از مدل عددی برای شبیه‌سازی آبخوان موردمطالعه، برای حل مسائل بهینه‌سازی از CACO و به‌منظور کاهش زمان محاسبات از رویکرد پردازش موازی بهره گرفته خواهد شد که برگرفته از Saghi-Jadid and Ketabchi (2021) است. روش‌شناسی مطالعه حاضر در شکل (۳) ارائه شده است.

در این مطالعه، مدل شبیه‌سازی کمی برای آبخوان دشت نمدان با فرض ادامه شرایط حاکم بر آبخوان به مدت ۱۰ سال (۱۴۰۵-۱۳۹۵) انجام‌گرفته است. در مدل شبیه‌سازی اطلاعات سال آبی (۱۳۹۵-۱۳۹۴) مبنا قرار گرفته است. بدین معنی که الگوی کشت، الگوی بارش و سایر ویژگی و مشخصات منطقه به طور ثابت فرض شده است. همچنین تراز آبی سال ۱۳۸۶-۱۳۸۵ نیز به‌عنوان تراز مطلوب نیز در نظر گرفته شده است.

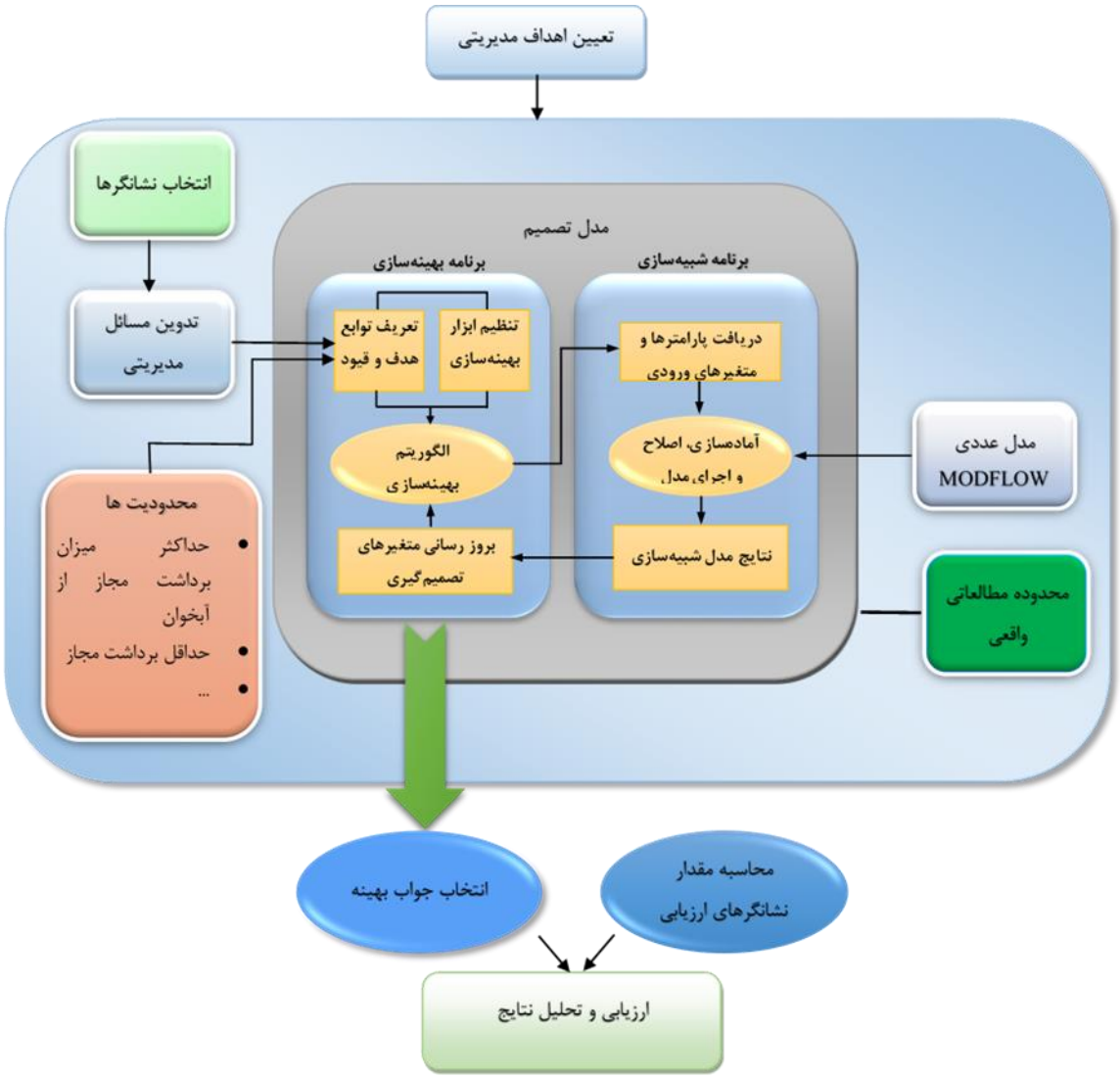
نشانگرهای آب زیرزمینی

نشانگرها نشان‌دهنده ارتباط انسان با محیط پیرامون هستند که می‌توانند پیچیدگی‌های زیاد دنیای اطراف را به اطلاعات معنی‌دار و قابل مدیریت تبدیل کنند (IISD, 1999). عملکرد اصلی نشانگرها ساده‌سازی، کمی‌سازی، ارتباطات، ترتیب دادن و امکان مقایسه کشورها و مناطق مختلف و جنبه‌های مختلف است. نشانگرها اطلاعاتی درباره سیستم یا فرایند مورد بررسی را به روشی قابل‌فهم ارائه می‌دهند.

نشانگرهای آب زیرزمینی، بر اساس برنامه‌های نظارت و ارزیابی، از مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی پشتیبانی می‌کنند، اطلاعات خلاصه‌ای در مورد وضعیت فعلی و روند سیستم‌های آب زیرزمینی ارائه می‌دهند، به تجزیه‌وتحلیل روند فرآیندهای طبیعی و تأثیرات انسانی بر سیستم آب زیرزمینی در فضا و زمان کمک

1 Continuous ant colony optimization

می‌کنند و ارتباطات و مشارکت عمومی در برنامه‌ریزی منابع و تولید سیاست‌ها و نشانگرها را تسهیل می‌بخشند.



شکل ۳- روش‌شناسی مطالعه حاضر

نشانگرهای پیشنهادی در این مطالعه، هرکدام بر جنبه خاصی از سیستم یا فرایند آب زیرزمینی که بر اساس داده‌های کمی و کیفی پایه‌ریزی شده است، تأکید دارند. در این تحقیق از دو سری نشانگر استفاده شده است که سری اول با عنوان نشانگرهای پایداری به‌عنوان هدف مسائل مدیریتی استفاده شدند و سری دوم با عنوان نشانگرهای ارزیابی که از آن‌ها جهت ارزیابی نتایج سناریوهای مدیریتی بهره گرفته شد. در ادامه به بیان تعاریف و مفاهیم عمومی اهم نشانگرهای مورداستفاده در این پژوهش پرداخته می‌شود. به‌منظور محاسبه نشانگرهای مدنظر در ابتدا مقدار D_t^i (کمبود) محاسبه می‌شود (رابطه ۱):

$$D_t^i = \begin{cases} H_{des,t}^i - H_t^i & H_{des,t}^i > H_t^i \\ 0 & H_{des,t}^i \le H_t^i \end{cases} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

نشانگرهای پایداری

نشانگر آسیب‌پذیری[1]

آسیب‌پذیری، شدت شکست را بیان می‌کند. در سیستم‌های منابع آب منظور از شکست، کمبودها می‌باشد (Saghi-Jadid and Ketabchi, 2021; 2019). این نشانگر جنبه زیست‌محیطی پایداری منابع آب زیرزمینی را در برمی‌گیرد و طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$Vul^i = \frac{\sum_t^T D_t^i}{N_{ns}^i \times \sum_t^T D_{dp,t}^i} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

1 Vulnerability indicator

نشانگر تاب‌آوری[1]

نشانگر تاب‌آوری چگونگی بازیابی از یک شکست را بیان می‌کند. بر اساس تعریف Hashimoto و همکاران در سال ۱۹۸۲، تاب‌آوری احتمالی است که یک سیستم می‌تواند از یک دوره شکست بازیابی شود. این نشانگر معیارهای اجتماعی و اقتصادی در سیاست و مدیریت منابع آب زیرزمینی را در بر می‌گیرد (UNESCO, 2007) و طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Saghi-Jadid and Ketabchi, 2021; 2019):

$$Res^i = \sum_t^T \left(\frac{H_t^i - H_{dp,t}^i}{H_{des,t}^i - H_{dp,t}^i}\right)/T \qquad \text{(رابطه ۳)}$$

نشانگر قابلیت اطمینان[2]

قابلیت اطمینان مفهومی است که یک رویکرد منطقی برای تعیین اندازه سیستم دارد، و به‌صورت یک احتمال بدین صورت تعریف‌شده است که؛ یک سیستم قادر خواهد بود طی دوره شبیه سازی تقاضای هدف را در هر دوره زمانی مشخص (اغلب یک سال یا یک ماه) برآورده کند. این نشانگر معیارهای زیست‌محیطی و اقتصادی را در برمی‌گیرد و طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود (Loucks, 1997):

$$Rel^i = 1 - \frac{\sum_t^T D_t^i}{\sum_t^T D_{dp,t}^i} \qquad \text{(رابطه ۴)}$$

نشانگر پایداری ترکیبی[3]

توسعه سناریوهای مختلف برای مدیریت آب باهدف برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب پایدار به شاخص پایداری (SI) بستگی دارد که یکی از رایج‌ترین رویکردها برای تعیین سناریوها و انتخاب بهترین آن‌هاست (Loucks, 1997; ASCE, 1999; Sandoval-Solis et al., 2011). به‌منظور تعیین کمیت پایداری سیستم‌های منابع آب، Loucks (1997) نشانگر SI را باهدف تسهیل ارزیابی و مقایسه سیاست‌های مدیریت آب پیشنهاد کرد. SI یک نشانگر خلاصه است که پایداری سیستم‌های منابع آب را اندازه‌گیری می‌کند. می‌توان از این نشانگر جهت برآورد پایداری برای استفاده‌کنندگان آب و همچنین به‌دست‌آوردن تغییر در پایداری با مقایسه نشانگر، بین چندین سیاست پیشنهادی آب استفاده کرد. این نشانگر به‌جای افزودن عوامل وسیع، پارامترهای اساسی عملکرد مدیریت آب را به طور معنی‌داری خلاصه می‌کند (Sandoval-solis et al., 2011). معیارهای عملکردی مانند آسیب‌پذیری، قابلیت اطمینان مبتنی بر زمان و حجم، حداکثر کسری و تاب‌آوری از اجزای ضروری در فرایند برآورد SI را تشکیل می‌دهند. این نشانگر تمامی معیارهای پایداری در سیاست و مدیریت منابع آب زیرزمینی را در برمی‌گیرد (UNESCO, 2007).

SI دارای دو ویژگی، (۱) مقداری بین صفر و یک و (۲) اگر یکی از معیار عملکرد صفر باشد، پایداری نیز صفر خواهد بود، است. این نشانگر طبق رابطه (۵) تعریف می‌شود (Sandoval-solis et al., 2011):

$$SI^i = [Rel^i \times Res^i \times (1 - Vul^i)]^{1/3} \qquad \text{(رابطه ۵)}$$

نشانگرهای ارزیابی

نشانگر پرشدگی[4]

نشانگر پرشدگی توسط کارگروه یونسکو UNESCO/IAEA/IAG در مورد آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یک نشانگر کاربردی آسان جهت نمایش تغییرات سطح پیزومتریک برای یک دوره زمانی معین در محدوده نوسان پیشنهاد شده است (Van Camp et al., 2010). این نشانگر به‌صورت عامل بین سطح اندازه‌گیری باتوجه‌به حداقل سطح در طول دوره معین و تفاوت بین حداقل و حداکثر سطوح در طول دوره محاسبه می‌شود. این نشانگر جنبه زیست‌محیطی پایداری را در بر می‌گیرد (Saghi-Jadid and Ketabchi, 2021; 2019).

$$Fl^i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \frac{H_t^i - H_{t\,min}^i}{H_{t\,max}^i - H_{t\,min}^i} \qquad \text{(رابطه ۶)}$$

نشانگر احیاء[5]

این نشانگر قابلیت احیاءپذیری آبخوان را نشان می‌دهد و جنبه زیست‌محیطی پایداری را در بر می‌گیرد (UNESCO, 2007). مقدار این نشانگر از طریق رابطه (۷) محاسبه می‌شود (Saghi-Jadid and Ketabchi, 2021; 2019):

$$Rl^i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \frac{H_t^i - H_{des}^i}{H_{des}^i} \qquad \text{(رابطه ۷)}$$

نشانگر پایداری هیدرولیکی

این نشانگر بر اساس شرایط هیدرولیکی و ساختاری سفره آب زیرزمینی می‌باشد و همچنین باتوجه‌به مقادیر تغذیه و برداشت از آبخوان، پایداری آبخوان را مورد ارزیابی قرار می‌دهد و طبق رابطه ۸ محاسبه می‌شود (Saghi-Jadid and Ketabchi, 2021; 2019):

$$SI_{Hyd}^i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \frac{RCH_t^i}{DCH_t^i} \qquad \text{(رابطه ۸)}$$

در روابط فوق (روابط ۱ تا ۸) منظور از N_{ns}^i تعداد دفعات زمانی است که مقدار D_t^i بیشتر از صفر وT تعداد دوره‌هایی است که سطح تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی، پایین‌تر از تراز مطلوب

1 Resilience indicator
2 Reliability indicator
3 Sustainability index
4 Filling indicator
5 Restoration indicator

باشد. $H^i_{dp,t}$ تراز آب زیرزمینی بدون اعمال سناریو، $H^i_{des,t}$ تراز مطلوب آب زیرزمینی و H^i_t تراز آب زیرزمینی به‌دست‌آمده تحت سناریوی مدیریتی در ماه i است. RCH^i_t، مقدار تغذیه آبخوان و DCH^i_t مقدار تخلیه از آبخوان در ماه i است. n تعداد کل فواصل زمانی، $H^i_{t\,min}$ حداقل تراز آب زیرزمینی تحت سناریو مدیریتی و $H^i_{t\,max}$ حداکثر تراز آب زیرزمینی تحت سناریو مدیریتی در ماه i است.

سناریوهای مدیریتی

بر اساس مدیریت یکپارچه، به‌حداقل‌رساندن آسیب‌پذیری و به حداکثر رساندن تاب‌آوری، قابلیت اطمینان و پایداری ترکیبی، به‌عنوان تابع هدف مدل بهینه‌سازی تعریف‌شده و در قالب مسائل بهینه‌سازی جداگانه حل‌شده است.

سناریو ۱: حداقل کردن آسیب‌پذیری

نشانگر آسیب‌پذیری، میزان آسیب‌پذیری آبخوان را بیان می‌کند. باتوجه‌به اینکه این نشانگر جنبه زیست‌محیطی سیاست و مدیریت منابع آب زیرزمینی را در برمی‌گیرد، هدف کاهش آسیب‌پذیری آبخوان است که در مسئله بهینه‌سازی به‌صورت رابطه (۹) در نظر گرفته می‌شود:

(رابطه ۹)

$$\text{Minimize Vul}_{\text{total}} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} Vul_k$$
$$\text{Subject to} \quad Q_k^o < Q_k^r < Q_k^p \qquad k = 1, \dots, m$$

سناریو ۲: حداکثر کردن تاب‌آوری

تاب‌آوری احتمالی است که یک سیستم می‌تواند از یک دوره شکست بازیابی شود. ازآنجایی‌که این نشانگر معیارهای اجتماعی و اقتصادی در سیاست و مدیریت منابع آب زیرزمینی را در برمی‌گیرد، هدف افزایش تاب‌آوری آبخوان است که در مسئله بهینه‌سازی به‌صورت رابطه (۱۰) در نظر گرفته می‌شود:

(رابطه ۱۰)

$$\text{Maximize} \qquad \text{Res}_{\text{total}} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} Res_k$$
$$\text{Subject to} \quad Q_k^o < Q_k^r < Q_k^p \qquad k = 1, \dots, m$$

سناریو ۳ : حداکثر کردن قابلیت اطمینان

این نشانگر احتمال آنکه سیستم بتواند شرایط مطلوب در دوره زمانی مدنظر را تأمین کند را بیان می‌کند. ازآنجایی‌که این نشانگر نیز معیارهای زیست‌محیطی و اقتصادی را در برمی‌گیرد، هدف افزایش قابلیت اطمینان در آبخوان است. این نشانگر طبق رابطه (۱۱) در مسئله بهینه‌سازی بیان می‌شود:

$$\text{Maximize} \quad \text{Rel}_{\text{total}} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} Rel_k \qquad \text{(رابطه ۱۱)}$$
$$\text{Subject to:} \quad Q_k^o < Q_k^r < Q_k^p \qquad k = 1, \dots, m$$

سناریو ۴: حداکثر کردن پایداری ترکیبی

این نشانگر تمام معیارهای پایداری در سیاست و مدیریت منابع آب زیرزمینی را شامل شده و ازآنجایی‌که هدف در این تحقیق افزایش پایداری آبخوان در راستای مدیریت پایدار است، SI طبق رابطه (۱۲) در مسئله بهینه‌سازی اعمال‌شده است:

$$\text{Maximize SI}_{\text{total}} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} SI_k \qquad \text{(رابطه ۱۲)}$$
$$\text{Subject to} \quad Q_k^o < Q_k^r < Q_k^p \qquad k = 1, \dots, m$$

در روابط بالا، i تعداد ماه، k تعداد سال، n تعداد ماه‌های یک سال و m تعداد سال‌های اجرای مدل برای اعمال مدیریت (۱۰ سال)، Q_k^r میزان برداشت بهینه سالانه، Q_k^p حداکثر میزان برداشت مجاز سالانه از آبخوان، Q_k^o حداقل میزان برداشت مجاز سالانه است. حداقل میزان برداشت مجاز سالانه از آبخوان باتوجه‌به گیاه استراتژیک (گیاه گندم که حدود ۶۳ درصد از مساحت زمین‌های کشاورزی را به خود اختصاص داده است) و نیاز آبی این گیاه (۱۲۲ میلیون مترمکعب در سال) تعیین شد. همچنین حداکثر میزان برداشت سالانه باتوجه‌به حجم آب زیرزمینی تجدید پذیر (۳۲۳ میلیون مترمکعب در سال) برآورد شده بر اساس UNESCO (2007) مشخص شد (Saghi-Jadid and Ketabchi, 2021).

تنظیم پارامترهای الگوریتم فراکاوشی

جهت دستیابی به مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم فراکاوشی بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها، مدل با تعداد جمعیت‌های مختلف، چندین بار اجراشده و جهت انتخاب مقادیر بهینه، دو آزمون روی نتایج این اجراها انجام می‌شود. این دو آزمون برگرفته از مطالعات Ketabchi and Ataie-Ashtiani (2015a, b) هستند: (۱) نرخ همگرایی مقادیر تابع هدف در دو نسل متوالی به کمتر از ۰،۰۱ درصد برسد و (۲) نسبت تعداد نسل‌های بدون بهبود جواب به تعداد کل نسل‌ها است، از ۱۰٪ کمتر نشود. به‌منظور تنظیم جمعیت مورچه‌ها و تعداد تکرار بهینه، ابتدا مدل برای جمعیت‌های ۳۰، ۵۰ ، ۷۰ و ۱۰۰ با تعداد ۱۵۰ تکرار تنظیم‌شده و هریک به تعداد کافی اجرا شد. با بررسی نتایج توسط دو شرط نسبت نسل‌ها و نرخ همگرایی، همچنین با مقایسه مقادیر تابع هدف در جمعیت‌های مختلف، کفایت جمعیت ۵۰، تأیید شد. با افزایش تعداد جمعیت از ۳۰ تا ۵۰ ابتدا مقدار تابع هدف (کمینه) کاهش‌یافته و پس از آن با افزایش تعداد جمعیت تغییر محسوسی در مقدار تابع هدف مشاهده نشد؛ لذا به‌عنوان پارامترهای بهینه الگوریتم فراکاوشی تعداد جمعیت ۵۰ و تعداد تکرار ۱۵۰ در نظر گرفته شده‌اند.

نتایج و بحث

مقدار بهینه نشانگر آسیب‌پذیری تحت اجرای سناریو یک (کاهش

آسیب‌پذیری آبخوان) ۰/۰۳، مقدار بهینه نشانگر تاب‌آوری تحت اجرای سناریو دو (افزایش تاب‌آوری آبخوان) ۰/۶۹، مقدار بهینه نشانگر قابلیت اطمینان تحت اجرای سناریو سه (افزایش قابلیت اطمینان آبخوان) ۰/۶۸ و مقدار بهینه نشانگر پایداری ترکیبی تحت اجرای سناریو چهار (افزایش پایداری آبخوان) ۰/۷۶ شده است.

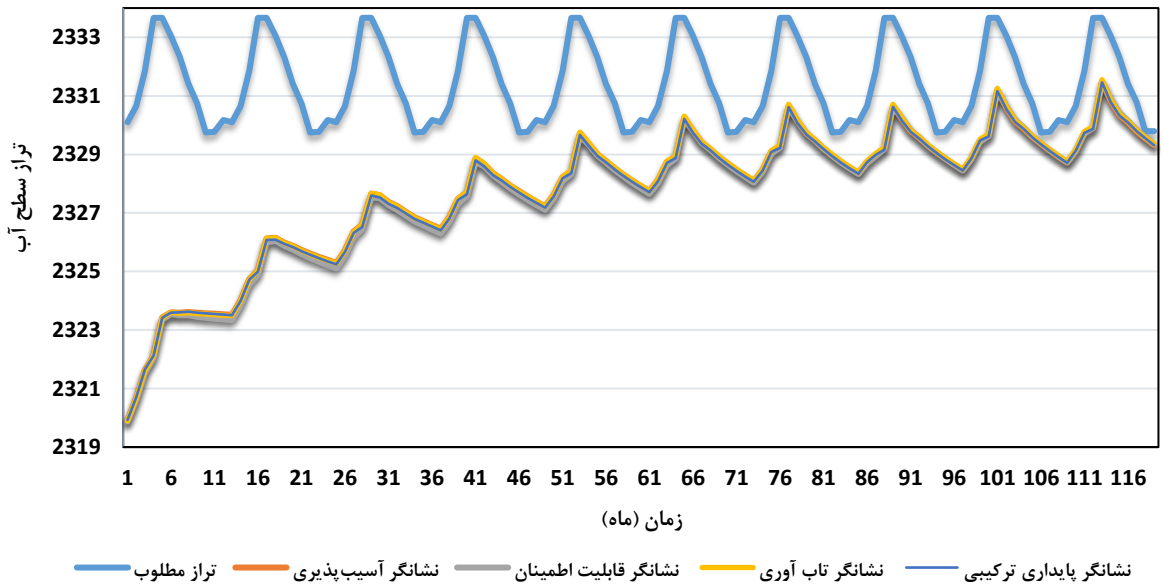
نتایج بیلان حاصل از اجرای ۴ سناریو بهینه‌کردن (۱) نشانگر آسیب‌پذیری، (۲) نشانگر تاب‌آوری، (۳) نشانگر قابلیت اطمینان و (۴) نشانگر پایداری در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با اعمال هر چهار نشانگر، تغییرات ذخیره آبخوان مثبت شده و آبخوان افزایش حجم ذخیره را تجربه کرده است. حالت پایه، به معنی ادامه وضع موجود در طول ۱۰ سال دوره مدیریتی، بدون تغییری در سیاست‌های برداشت آب زیرزمینی در منطقه است.

جدول ۱- مقایسه بیلان آبخوان دشت نمدان (ارقام برحسب میلیون مترمکعب)

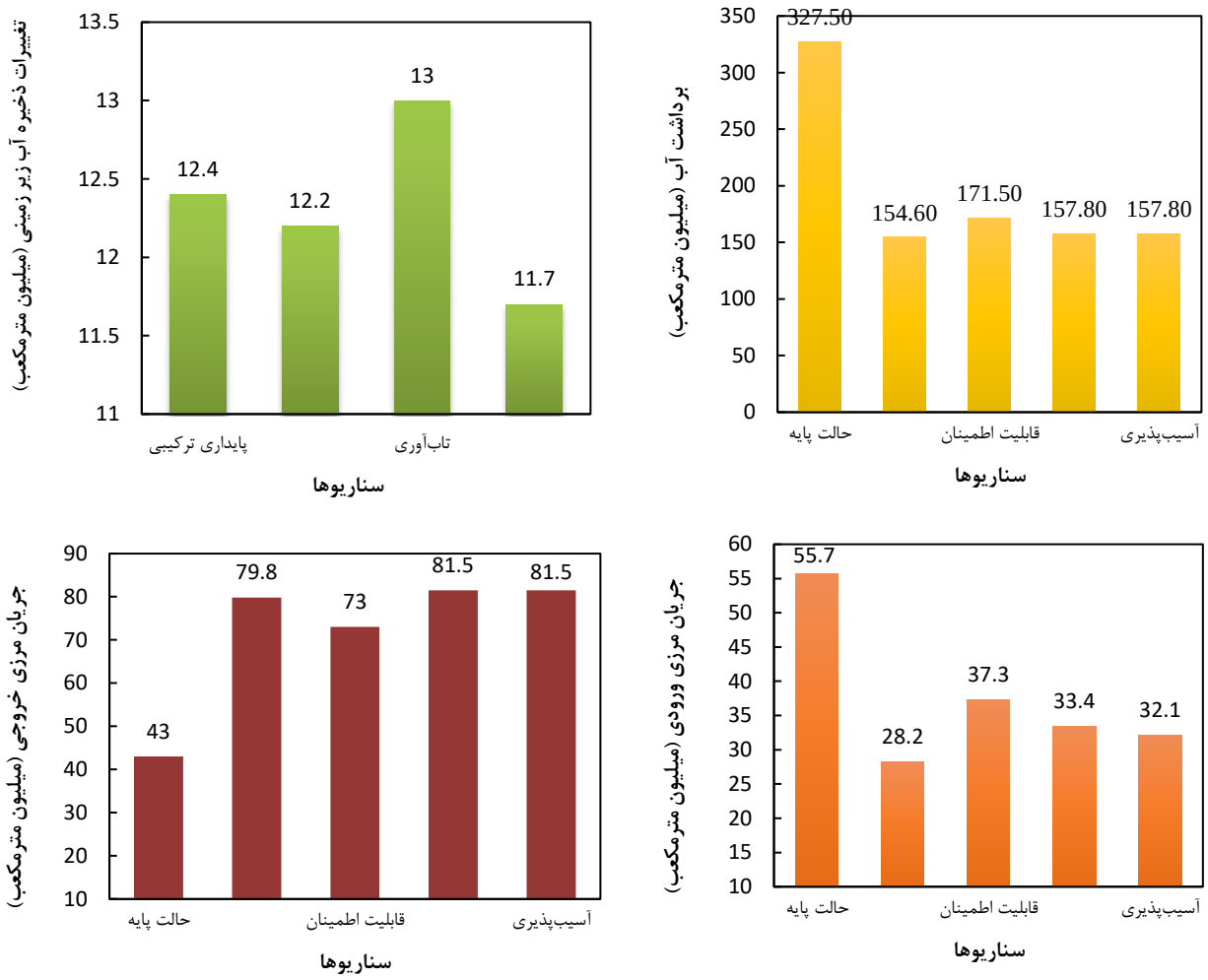
مسائل مدیریتی	جریان خروجی			جریان ورودی			تغییرات ذخیره آبخوان
	مجموع جریان خروجی	جریان مرزی خروجی	برداشت از چاه	مجموع جریان ورودی	تغذیه	جریان مرزی ورودی	
حالت پایه	۳۷۰/۵	۴۳	۳۲۷/۵	۳۰۷/۷	۲۵۲	۵۵/۷	-۶۲/۸
پایداری ترکیبی	۲۳۴/۴	۷۹/۸	۱۵۴/۶	۲۶۴/۸	۲۱۸/۶	۲۸/۲	۱۲/۴
قابلیت اطمینان	۲۴۴/۵	73	۱۷۱/۵	۲۵۶/۸	۲۱۹/۵	۳۷/۳	۱۲/۲
تاب‌آوری	۲۳۹/۳	۸۱/۵	۱۵۷/۸	۲۵۲/۳	۲۱۸/۹	۳۳/۴	13
آسیب‌پذیری	۲۳۹/۳	۸۱/۵	۱۵۷/۸	۲۵۱	۲۱۸/۹	۳۲/۱	۱۱/۷

از آنجایی‌که هدف این تحقیق، تصمیم‌گیری مبتنی بر نشانگرهای بیان‌شده به‌منظور رسیدن به مدیریت پایدار بوده است، ازاین‌رو، لازم است چگونگی رسیدن به هدف مدنظر توسط هرکدام از نشانگرها مورد بررسی قرار گیرد.

هیدروگراف آبخوان در اثر اجرای چهار سناریو مدیریتی در شکل (۴) مقایسه شده است. در اثر اعمال هر چهار نشانگر، افزایش تراز آبخوان مشاهده می‌شود. با اعمال نشانگرهای آسیب‌پذیری، تاب‌آوری، قابلیت اطمینان و پایداری ترکیبی، تراز آبخوان در انتهای دوره مدیریتی ۱۰ ساله به تراز مطلوب نزدیک شده است.



شکل ۴- مقایسه نمودار هیدروگراف آبخوان نمدان بر اساس چهار شاخص پایداری ترکیبی، قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری برای دوره مدیریتی ۱۰ ساله

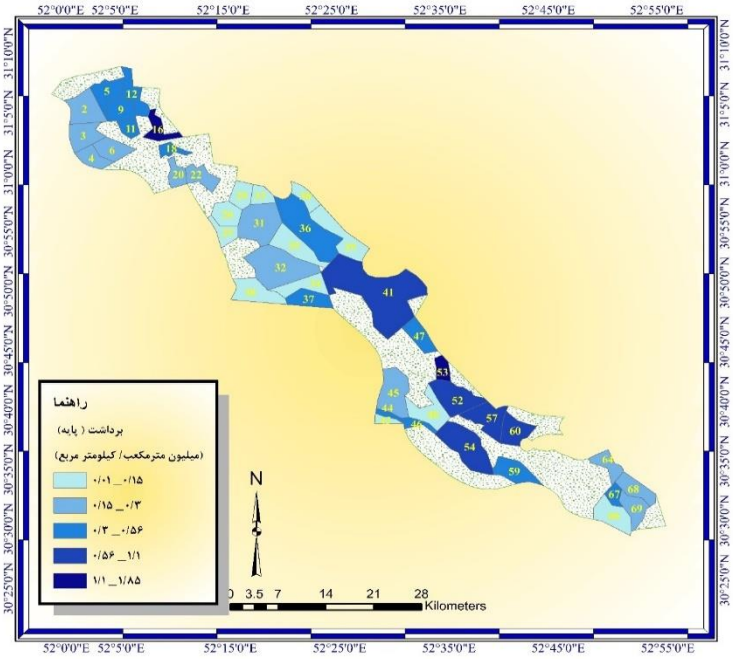


شکل ۵- مقایسه اجزای بیلان بر اساس چهار شاخص پایداری ترکیبی، قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری برای دوره مدیریتی ۱۰ ساله

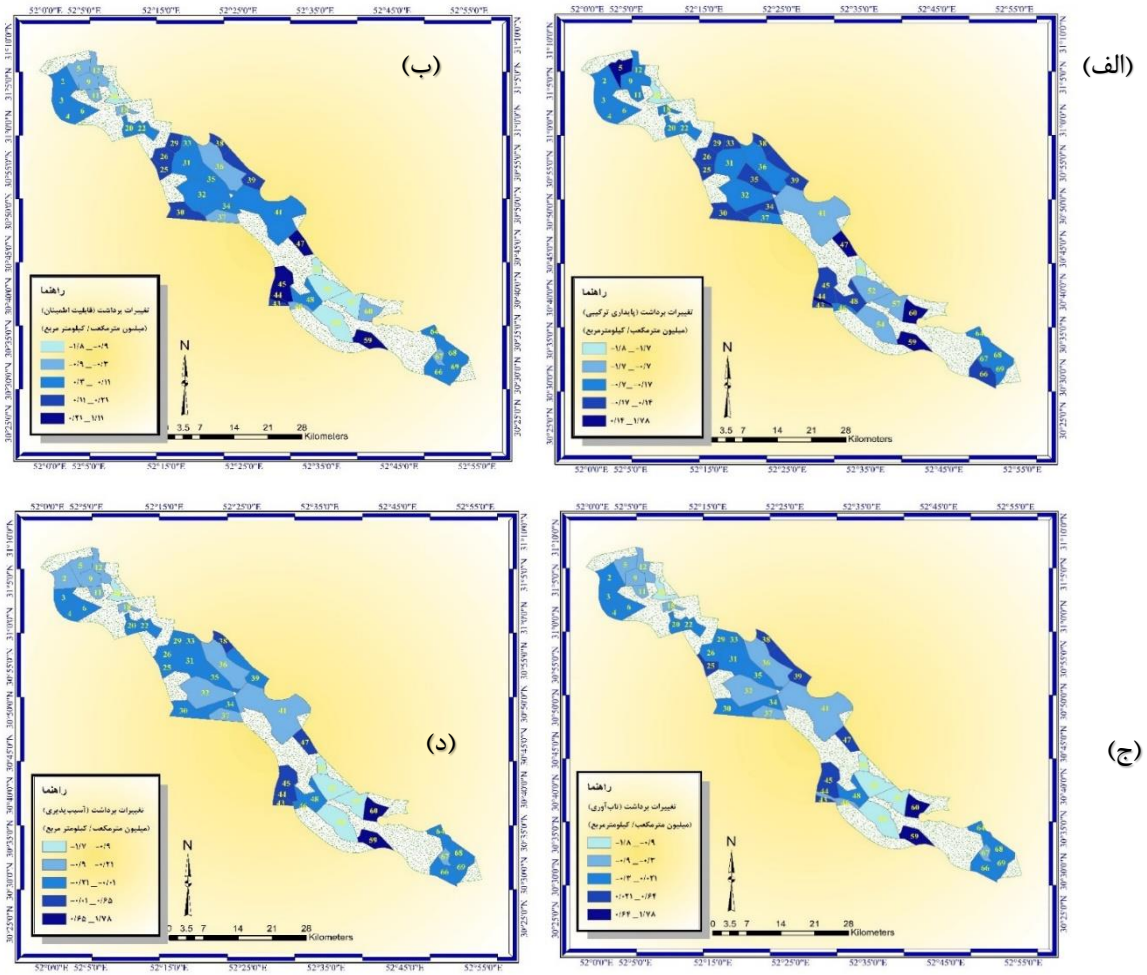
با مقایسه جریان ورودی به آبخوان مطابق شکل (۵) مشاهده می‌شود که جریان ورودی به آبخوان بر اساس نشانگر پایداری کمترین مقدار (۲۸/۲ میلیون مترمکعب) و بر اساس نشانگر قابلیت اطمینان بیشترین مقدار (۳۷/۳ میلیون مترمکعب) را دارا است. همچنین، جریان خروجی از آبخوان بر اساس نشانگر قابلیت اطمینان کمترین مقدار (۷۳ میلیون مترمکعب) و بر اساس نشانگر تاب‌آوری و آسیب‌پذیری بیشترین مقدار (۸۱/۵ میلیون مترمکعب) است. با تغییرات سطح آب زیرزمینی، جریان ورودی و خروجی به آبخوان تغییر می‌کند، طوری که با کاهش سطح، جریان ورودی بیشتر و جریان خروجی کمتر و با افزایش سطح جریان ورودی کمتر و جریان خروجی بیشتر می‌شود؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که سطح آب زیرزمینی تحت اعمال نشانگر قابلیت اطمینان دارای بالاترین تراز می‌باشد.

میزان برداشت سالانه از ۴۳ ناحیه در حالت پایه در شکل (۶) نشان‌داده‌شده است. برداشت از آبخوان با اجرای نشانگرهای پایداری ترکیبی، قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری به ترتیب به میزان ٪۵۲، ٪۴۸، ٪۵۱ و ٪۵۱ نسبت به وضعیت فعلی کاهش پیدا کرده و به مقدار ۱۵۴/۶، ۱۷۱/۵، ۱۵۷/۸ و ۱۵۷/۸ میلیون مترمکعب در سال رسیده است.

در شکل (۷) نیز تفاوت میزان برداشت از چاه‌های بهره‌برداری در سال آخر شبیه‌سازی با حالت پایه تحت اجرای سناریوهای افزایش پایداری ترکیبی، افزایش قابلیت اطمینان، افزایش تاب‌آوری و کاهش آسیب‌پذیری نیز ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نواحی ۵۹ و ۶۰ بیشترین افزایش را نسبت به حالت پایه، با اجرای سناریوها دارند. کمترین میزان برداشت نیز در نواحی ۱۶ و ۵۳ با اجرای هر سناریو مشاهده شد.



شکل ۶- نقشه میزان برداشت از ناحیه‌های تعریف شده آبخوان در حالت پایه (سال آخر شبیه‌سازی)



شکل ۷- نقشه تغییرات میزان برداشت از ناحیه‌های تعریف شده آبخوان تحت سناریوهای (الف) افزایش پایداری ترکیبی، (ب) افزایش قابلیت اطمینان، (ج) افزایش تاب‌آوری، (د) کاهش آسیب‌پذیری و حالت پایه در سال آخر شبیه‌سازی

در شکل (۸) نیز تغییرات تراز هر نشانگر نسبت به نشانگرهای دیگر مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاکی از نزدیک بودن مقادیر تراز سطح آب حاصل از اجرای سناریوها بود اما با اختلاف کمی ارتفاع آب بر اساس نشانگر تاب‌آوری افزایش بیشتری نسبت به ارتفاع آب سایر نشانگرها دارد.

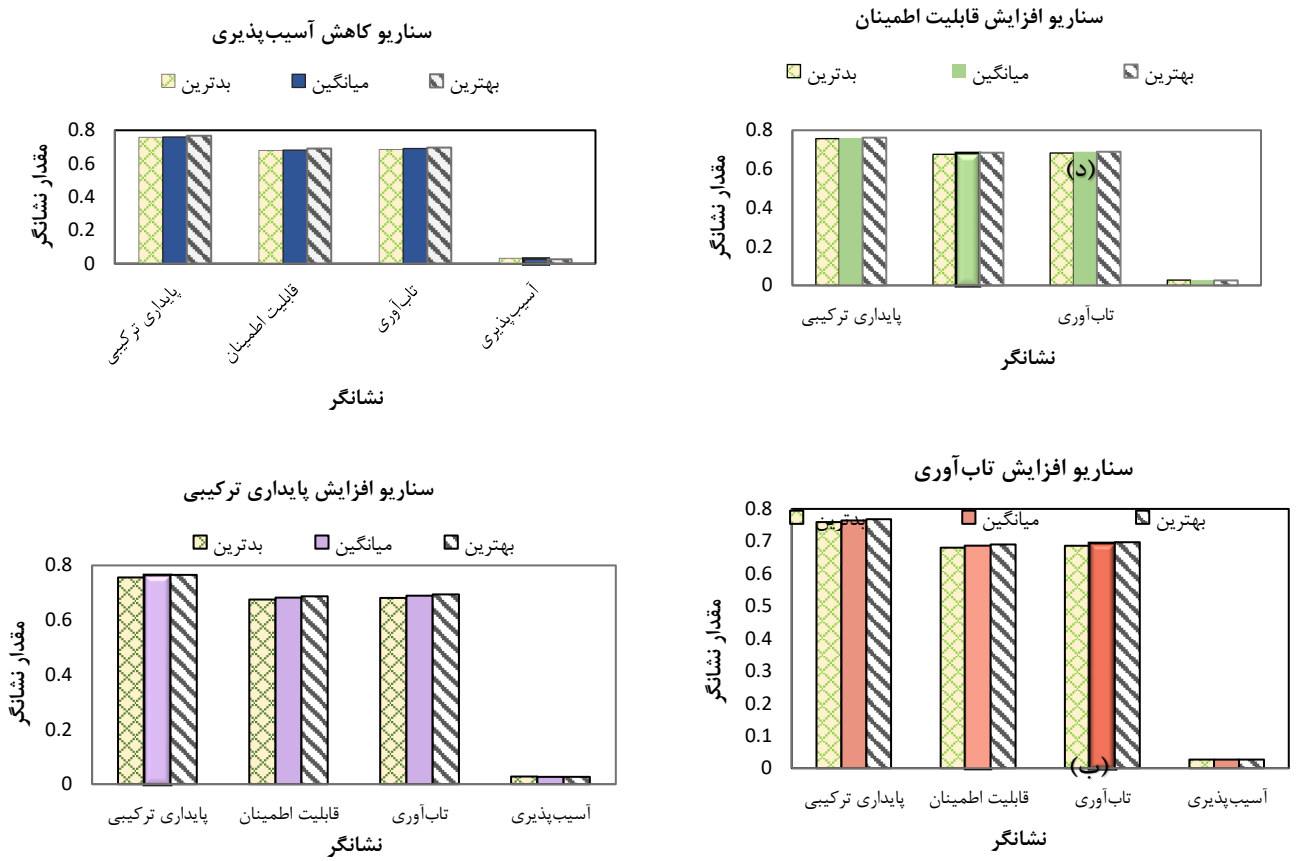
شکل ۸- مقایسه خطوط هم تغییرات تراز آب زیرزمینی در سناریوهای مختلف مدیریتی

مطابق با رویکرد مدیریت پایدار، سعی شد آبخوان ناپایدار به پایداری برسد. به همین جهت شاخص پایداری به کمک مدل تلفیقی شبیه‌سازی - بهینه‌سازی اجرا و نتیجه مدنظر حاصل شد. در همین راستا نشانگر آسیب‌پذیری جهت کاهش آسیب‌پذیری آبخوان کمینه شد، نشانگر تاب‌آوری به‌منظور بازگرداندن تراز آبخوان به تراز مطلوب و نشانگر قابلیت اطمینان به‌منظور تأمین شرایط مطلوب در دوره زمانی مدنظر بیشینه شدند. مقایسه این نشانگرها با بررسی مقادیر هر نشانگر نسبت به هم در شکل (۹) ارائه شده است.

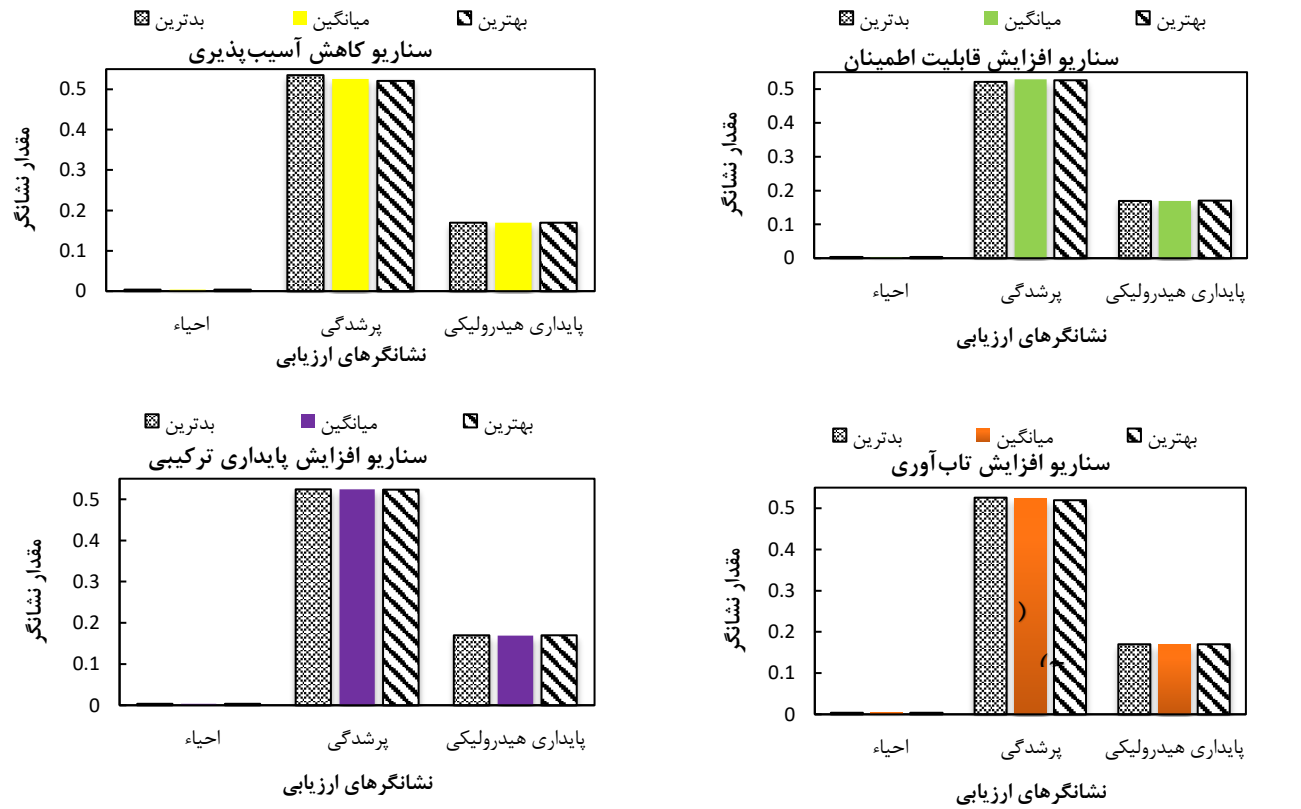
جهت ارزیابی نتایج هر سناریو از چهار نشانگر پایداری ترکیبی، قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری استفاده‌شده است، علاوه بر این موارد جهت ارزیابی نتایج از سه نشانگر پایداری هیدرولیکی، پرشدگی و احیاء آبخوان نیز استفاده شد که در ادامه به نتایج حاصله پرداخته می‌شود.

نشانگر احیاء آبخوان قابلیت احیاء شدن آبخوان را اندازه می‌گیرد، نشانگر پرشدگی میزان پرشدگی آبخوان را نشان می‌دهد و نشانگر پایداری بر اساس میزان تغذیه و تخلیه پایداری آبخوان را اندازه می‌گیرد. مقایسه این نشانگرها با بررسی مقادیر هر نشانگر نسبت به هم در شکل (۱۰) ارائه شده است.

مقدار نشانگر احیاء در زمان اجرای سناریو افزایش قابلیت اطمینان بهترین نتیجه را در مقایسه با نتایج سایر سناریوها دارد که این نتیجه حاکی از قابلیت بالای احیاء پذیری آبخوان است. همچنین در این سناریو نشانگر پرشدگی نیز نسبت به سایر سناریوها دارای مقدار بهتری است که این امر نیز بیانگر پرشدگی بیشتر آبخوان نسبت به سایر سناریوها است.



شکل ۹- مقایسه مقادیر نشانگرهای آسیب‌پذیری، تاب‌آوری، قابلیت اطمینان و پایداری ترکیبی تحت اجرای سناریو افزایش پایداری ترکیبی (شکل الف)، سناریو افزایش قابلیت اطمینان (شکل ب)، سناریو افزایش تاب‌آوری (شکل ج) و سناریو کاهش آسیب‌پذیری (شکل د)



شکل ۱۰- مقایسه مقادیر نشانگرهای احیاء، پرشدگی و پایداری هیدرولیکی تحت اجرای سناریو افزایش پایداری ترکیبی (شکل الف)، سناریو افزایش قابلیت اطمینان (شکل ب)، سناریو افزایش تاب‌آوری (شکل ج) و سناریو کاهش آسیب‌پذیری (شکل د)

نشانگرها می‌توانند به‌عنوان ابزاری جهت پشتیبانی تدوین و بررسی تصمیم‌گیری‌ها در راستای اهداف مدیریت یکپارچه منابع آب زیرزمینی به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شوند و همان گونه که مشاهده شد می‌توان با استفاده از این نشانگرها، ابعاد مختلفی از تحلیل مؤلفه‌های مختلف آب زیرزمینی را در شرایط مختلف تصمیم داشت و اتخاذ رویکرد نهایی را داشت.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به‌منظور اتخاذ تصمیم‌های مهم مدیریتی در راستای مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی از نشانگرهای پایداری استفاده‌شده است. جهت پیاده‌سازی مدیریت پایدار در آبخوان دشت نمدان طبق معیارهای پایداری، نشانگرهایی در نظر گرفته شد. برای شبیه‌سازی سیستم کمی آبخوان موردمطالعه از کد MODFLOW و جهت بهینه‌سازی از مدل بهینه‌سازی CACO بهره گرفته شد. مقادیر بهینه پارامترهای این الگوریتم فراکاوشی روی ۱۵۰ تکرار و ۵۰ جمعیت (۷۵۰۰ نسل) تنظیم‌شده است. همچنین در اجرای این مدل تلفیقی از فرایند پردازش موازی نیز بهره گرفته‌شده است که موجب کاهش زمان محاسبات مدل شده است. در این پژوهش به‌منظور تصمیم‌گیری‌های مدیریتی از نشانگرهای آسیب‌پذیری، تاب‌آوری، قابلیت اطمینان و پایداری ترکیبی استفاده شد. هریک از این نشانگرها جنبه‌هایی از پایداری را در بر می‌گیرند. پایداری متشکل از چهار معیار اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی و نهادی است. با اجرای چهار سناریو کاهش آسیب‌پذیری، افزایش تاب‌آوری، افزایش قابلیت اطمینان و افزایش پایداری، نتایج حاکی از اثربخشی هر چهار سناریو در افزایش سطح آب زیرزمینی و تغییرات مثبت ذخیره آب زیرزمینی بوده است. باتوجه‌به نتایج کسب شده از چهار مسئله مدیریتی که در این مطالعه مورد تحلیل قرار گرفت، بیشترین اثرگذاری بر روی بهبود آبخوان و برآورده شدن هر یک از نشانگرها با کاهش قابل‌توجه پمپاژ از چاه‌ها برقرار است طوریکه برداشت از ۳۲۷/۶ میلیون مترمکعب در سال در اثر اجرای هر سناریو به میزان ۱۵۷/۸، ۱۷۱/۵، ۱۵۷/۸ و ۱۵۷/۸ میلیون مترمکعب در سال باید کاهش یابد. پیشنهاد می‌شود به‌منظور مدیریت آبخوان با هدف نزدیک شدن به پایداری و معیارهای مختلف آن از این نشانگرها بهره‌گرفته شود. اما نکته قابل‌توجه این امر است که به‌منظور رسیدن به نتایج مطلوب و نزدیک شدن به پایداری کاهش ۵۰ درصدی پمپاژ باید رخ دهد و عملیاتی شدن این موضوع نیازمند سنجیدن تمهیداتی در سطح آبخوان است. بدین منظور می‌توان به اقداماتی همچون بستن چاه‌های غیرمجاز، تغییر الگوی کشت، تغییر مصرف، خرید چاه‌های کم بازده و تعدیل پروانه چاه‌ها اشاره نمود. همچنین به‌منظور ادامه این پژوهش نیز می‌توان به بررسی‌های مکانی در هر ناحیه از نواحی تغذیه‌ای مشخص شده با هدف چگونگی کاهش برداشت و واقعی شدن مقادیر برداشت با استفاده از بررسی‌های میزان منابع و مصارف در هر ناحیه، الگوی کشت و سطح زیر کشت در هر ناحیه، تعیین حداقل و حداکثر برداشت در هر ناحیه با توجه به شرایط آن ناحیه پرداخت.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Ataie-Ashtiani, B. Ketabchi, H., (2011). Elitist continuous ant colony optimization algorithm for optimal management of coastal aquifers. Water Resources Management. 25 (1), 165–190.

Anbazhagan, S., Jothibasu, A., (2016). Groundwater Sustainability Indicators in part of tiruppur and Coimbatore districts, Tami Nadu. journal geological society of India. (87), 161-168.

Bui, N.T., Kawamura, A., Amaguchi, H., Du Bui, D., Truong, N.T., Nakagawa K., (2018). Social sustainability assessment of groundwater resources: A case study of Hanoi, Vietnam. Ecological indicators. 93, 1034-1042.

Bui, N.T., Kawamura, A., Amaguchi, H., Du BUI, D., Truong, N.T., (2016). Environmental Sustainability Assessment of Groundwater Resources in Hanoi, Vietnam by a simple AHP Approach. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research). 72(5), 137-146.

Chen, T.T., Hsu, W.L., Chen, W.K., (2020). An Assessment of Water Resources in the Taiwan Strait Island Using the Water Poverty Index, Journal Sustainability. 12(6), 2351.

Hashimoto, T., Stedinger, J. R., Loucks, D. P., (1982). Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation. Water Resources Research. 18(1), 14–20.

Hosseini, S.M., Parizi, E., Ataie-Ashtiani, B. T,. Simmons, Craig., (2019). Assessment of sustainable groundwater resources management using integrated environmental index: Case studies across Iran. Science of the Total Environment. 676, 792– 810.

Karamouz, M., Mohammadpour, P., Mahmoodzadeh, D., (2017). Assessment of Sustainability in Water Supply-Demand Considering Uncertainties. Water Resources Management. 31, 3761–3778.

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., (2015b). Assessment

management approach for aquifer restoration problems using a combined numerical simulation–parallel evolutionary optimization model. Journal of Hydrology. 574, 125709.

Saghi-Jadid, M., Ketabchi, H., (2019), Restoration Management of Groundwater Resources Using the Combined Model of Numerical Simulation–Evolutionary Ant Colony Optimization. Iran-Water Resources Research. 15(2), 119-133. (in Farsi)

Sandoval-Solis, S., McKinney, D. C., Loucks, D. P., (2011). Sustainability index for water resources planning and management. Journal of Water Resources Planning and Management. 137(5), 381-390.

Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., García-Aróstegui, J., Bielsa-Artero, A., Domingo Pinillos, J., (2015). Evaluating groundwater management sustainability under limited data availability in semiarid zones. Water. 7(8), 4305-4322.

Smith, M., Cross, K., Paden, M., Laban, P., (2016). Managing GW sustainably. IUCN. Gland. Switzerland.

Timani, B., and Peralta, R. (2015). Multi-model groundwater-management optimization: reconciling disparate conceptual models. Hydrogeology Journal. 23(6), 1067-1087.

Wang, H.F. and M.P. Anderson., (1982). Introduction to Groundwater Modeling. W.H. Freeman and Company, San Francisco. CA, 237 p.

Wu, X., Zheng, Y., Wu, B., Tian, Y., Han, F., Zheng, C., (2016). Optimizing conjunctive use of surface water and GW for irrigation to address human-nature water conflicts: a surrogate modeling approach. Agricultural Water Management, 163(C). 380-392.

WWAP., World Water Assessment Programme,)2009(. The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. UNESCO, Paris.

of a parallel evolutionary optimization approach for efficient management of coastal aquifers. Environmental Modelling & Software. 74, 21-38.

Ketabchi, H., Ataie-Ashtiani, B., (2015c). Evolutionary algorithms for the optimal management of coastal groundwater: A comparative study toward future challenges. Journal of Hydrology. 520, 193-213.

Kourgialas, N. N., Karatzas, G. P., Dokou, Z., Kokorogiannis, A., (2018). GW footprint methodology as policy tool for balancing water needs (agriculture & tourism) in water scarce islands-the case of Crete, Greece. Sci Total Environ. 615, 381–389.

Lachaal, F., Gana, S., (2016). Groundwater flow modeling for impact assessment of port dredging works on coastal hydrogeology in the area of Al-Wakrah (Qatar). Modeling Earth Systems and Environment. 2(4), 1–15.

Loucks, D. P., (1997). Quantifying trends in system sustainability. Hydrological Science Journal. 42(4), 513-530.

Mahmoodi, N., Kiesel, J., Wanger, P.D., Fohrer N., (2021). Sustainable use ofwater resources in a Wadi system facing climate change impacts and growing groundwater demand. Hydrology and Earth system Scences, 25(9).

Mattas, C., Voudouris, K., Panagopoulos, A., (2014). Integrated Groundwater Resources Management Using the DPSIR Approach in a GIS Environment Context: A Case Study from the Gallikos River Basin North Greece. Water, 6(4): 1043-1068.

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.

Pires, A., Morato, J., Peixoto, H., Botero, V., Zuluaga, L., Figueroa, A,, (2017). Sustainability Assessment of indicators for integrated water resources management. Science of the Total Environment. 578, 139-147.

Saghi-Jadid, M., Ketabchi, H., (2021), Result-based