



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۱

صفحه‌های ۲۱۳-۲۲۹

DOI: 10.22059/jwim.2022.332573.931

مقاله پژوهشی:

ارزیابی وضعیت تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های پایداری

پدرام کریمیان^۱، مجتبی شوریان^{۲*}، حمید کاردان مقدم^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳. استادیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۲۶

چکیده

یکی از رویکردهای ارزیابی تعادل بخشی استفاده از شاخص‌های کمی و کیفی است که می‌تواند ابزار مناسبی باشد. در این مطالعه به منظور ارزیابی سناریوهای تعادل بخشی در آبخیز هشتگرد از دو شاخص آسیب‌پذیری ذاتی آبخیز و شاخص پایداری کمی آبخیز استفاده شد. پنج سناریو براساس طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی در منطقه تعریف و با استفاده از مدل عددی MODFLOW شبیه‌سازی شد. با تلفیق سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی در سناریوهای مختلف تعادل بخشی محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی و اعمال سناریوهای مختلف نشان داد که با کاهش برداشت آب به میزان ۱۵ درصد بیش‌ترین میزان پایداری در سیستم آبخیز ایجاد شده و میزان پایداری سیستم از مقدار ۵۵ درصد تا ۸۷ درصد افزایش دارد. میزان تغییرات شاخص پایداری آبخیز به صورت توزیعی در چاه‌های مشاهده‌ای نیز حاکی از این موضوع است که بخش میانی آبخیز بیش‌ترین وضعیت بهبود شاخص پایداری را دارد. این منطقه با تراکم بالای چاه‌های بهره‌برداری بیش‌ترین تأثیر را از کاهش برداشت از آبخیز می‌پذیرد. نتایج به‌دست‌آمده از شاخص پایداری آبخیز با توجه به پراکنش مکانی، امکان‌پذیری پیاده‌سازی سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. از طرفی نیز با توجه به اهمیت توسعه و استفاده از شاخص‌های آسیب‌پذیری، شاخص دراستیک در سطح منطقه تحلیل شد. نتایج نشان داد بخش بالادست آبخیز با توجه به ویژگی‌های هیدروژئولوژی دارای بیش‌ترین میزان آسیب‌پذیری بوده و در جهت جریان آب زیرزمینی میزان آسیب‌پذیری کاهش یافته است.

کلیدواژه‌ها: آبخیز، آسیب‌پذیری، تعادل بخشی، شاخص پایداری آبخیز، مدل‌سازی توزیعی.

Assessment of the Groundwater Resources Balancing Using Sustainability Indicators

Pedram Karimiyan¹, Mojtaba Shourian^{2*}, Hamid Kardan Moghaddam³

1. M.Sc. Graduate, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2. Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3. Research Assistant Professor, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran.

Received: October 18, 2021

Accepted: January 06, 2022

Abstract

One of the approaches to equilibrium assessment is the use of quantitative and qualitative indicators that can be a good tool. In this study, in order to evaluate the equilibrium scenarios in Hashtgerd aquifer, two indicators of intrinsic vulnerability of the aquifer and quantitative stability index of the aquifer were used. Five scenarios were defined based on the groundwater resources balancing scheme in the region and simulated using the MODFLOW numerical model. Equilibrium was calculated by combining three indicators of reliability, vulnerability and desirability of groundwater system stability index in different scenarios. The simulation results and application of different scenarios showed that by reducing the water withdrawal by 15 percent, the highest level of stability is created in the aquifer system and the system stability rate increases from 55 percent to 87 percent. The extent of changes in the aquifer stability index as a distribution in the observation wells also indicates that the middle part of the aquifer has the highest status of improving the stability index. This region, with its high density of exploitation wells, is most affected by the reduction of aquifer withdrawals. The results obtained from the aquifer stability index, considering the spatial distribution, show the feasibility of implementing different scenarios. On the other hand, due to the importance of development and the use of vulnerability indicators, the drastic index was analyzed at the regional level. The results showed that the upstream part of the aquifer has the highest level of vulnerability due to hydrogeological characteristics and the level of vulnerability has decreased in the direction of groundwater flow.

Keywords: Groundwater, Hashtgerd aquifer, MODFLOW, Vulnerability.

مقدمه

منابع آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب در مناطق خشک به‌ویژه در نواحی که با کمبود آب سطحی مواجه است، می‌باشد (Malmir et al., 2021). این کمبود در کنار تنش‌های اقلیمی سبب شده تا سیستم بهره‌برداری از منابع آب با پیچیدگی همراه شود. پیچیدگی‌های سیستم‌های منابع آب در کنار بهره‌برداری بدون برنامه‌ریزی از منابع آب زیرزمینی و وابستگی شدید قشر بهره‌بردار به آب برای گذران زندگی باعث شده تا نیاز به تدوین یک رویکرد سیستمی در مدیریت عرضه و تقاضای آب به‌منظور توسعه روشن باشد. با توجه به افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی، مدیریت برداشت از این منابع و کنترل سطح برداشت بسیار مهم بوده و بسیاری از سناریوهای تعادل‌بخشی آبخوان برای تأمین این هدف مطرح شده‌اند. مدیریت آب‌های زیرزمینی در سراسر جهان با رشد جمعیت، تغییرات آب و هوا، رشد اقتصادی-اجتماعی و حکمرانی نامناسب آب، مختل شده است (Frija et al., 2015). از طرفی، مصرف آب بدون برنامه‌ریزی در بخش کشاورزی به‌ویژه در مناطق خشک که تنها منبع تأمین آن منابع زیرزمینی هستند، سبب افت شدید آبخوان‌ها شده است (Kayhomayoon et al., 2021). این موضوع باعث شده تا متولیان آب کشور طرح‌های تعادل‌بخشی و برون‌رفت از بحران آب زیرزمینی را جهت کنترل این شرایط ارائه دهند. ارائه سناریوهای مختلف جهت تعادل‌بخشی بدون توجه به میزان اثرگذاری و ارزیابی پایداری آبخوان نمی‌تواند موجب بهبود مدیریت آبخوان شود. چارچوب‌های مختلف ارائه‌شده در بحث کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی در طرح تعادل‌بخشی بسیار حائز اهمیت است به‌گونه‌ای که می‌باید موردارزیابی قرار گیرد. یکی از ابزارهای مهم در جهت ارزیابی طرح تعادل‌بخشی یا هر رویکرد سازگاری،

استفاده از شاخص است. شاخص یک معیار آماری است که بیانگر تغییرات نسبی یک یا چند متغیر است. استفاده از شاخص می‌تواند شناسایی وضعیت سیستم، عوامل تأثیرگذار در شرایط سیستم، تصمیم‌گیری و اولویت‌بندی را برای متولیان آب فراهم سازد (Juwana et al., 2010). امروزه استفاده از شاخص جهت تحلیل وضعیت منابع آب زیرزمینی بسیار کاربرد داشته و ارزیابی مناسبی از تغییرات وضعیت کمی و کیفی آبخوان به‌کمک آن موردارزیابی قرار می‌گیرد. شناسایی و توسعه شاخص‌ها در زمینه ارزیابی منابع آب زیرزمینی در سال ۲۰۰۷ توسط برنامه ارزیابی آب سازمان ملل متحد^۱ با حمایت آژانس بین‌المللی انرژی اتمی^۲، انجمن بین‌المللی هیدروژئولوژی و کارشناسان یونسکو انجام شده است (Lipponen, 2007). شاخص زیربنایی پایداری آب زیرزمینی (GSII) توسط Pandey et al. (2011) به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی تعریف شده است. (Shahedy & Talebi, 2014) چهار شاخص فالکن مارک برای آب تجدیدپذیر حوضه، نسبت آب مصرفی به آب تجدیدپذیر، حداکثر اراضی فاریاب و شاخص تجاوز سطح اراضی فاریاب را به‌عنوان شاخص‌های تعادل منابع آب و توسعه پایدار در حوضه قره‌قوم معرفی کردند. Bui et al. (2016) شاخص‌های محیط زیستی را جهت ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار دادند. Shahbazi et al. (2020) شبیه‌سازی آبخوان هشتگرد را با مدل MODFLOW و شبیه‌سازی انتقال املاح را با مدل MODPATH انجام دادند. نتایج شبیه‌سازی با اعمال سناریوهای مختلف تعادل‌بخشی نشان داد که ایجاد محدودیت برای بهره‌برداری از چاه‌های غیرمجاز منطقه می‌تواند در راستای طرح تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی باشد. Rezaei et al. (2021) استفاده از بازی تعاونی سوسیالیستی را برای تمایل به همکاری و بهبود سود خالص تجمعی کشاورزی و تحریک بخش بهره‌بردار به رعایت

راه کارهای تعادل بخشی ضروری است. این مطالعه ارزیابی تعادل بخشی آبخوان را با در نظرگیری شاخص پایداری کمی آبخوان به صورت توزیعی پایداری را با شاخص آسیب پذیری دراستیک مورد بررسی قرار می دهد. این مطالعه نسبت به مطالعه Kardan Moghaddam et al. (2016) از این حیث اهمیت دارد که بحث آسیب پذیری ذاتی آبخوان نیز در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است. استفاده هم زمان دو شاخص که در بخش تغییرات عمق آب زیرزمینی متضاد است می تواند ضمن بررسی طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی وضعیت آسیب پذیری آبخوان را نیز مدنظر قرار دهد. همچنین استفاده از رویکرد توزیعی در ارائه شاخص پایداری برای سناریوهای مختلف تعادل بخشی می تواند محدوده تحت تاثیر هر سناریو را به صورت کمی ارائه دهد، لذا این رویکرد می تواند ارزیابی مناسبی از وضعیت آبخوان در شرایط بحرانی منابع آب زیرزمینی و استفاده از راه کارهای تعادل بخشی را ارائه دهد.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی هشتگرد دارای وسعت ۱۱۷۰/۶ کیلومتر مربع دارای یک آبخوان آبرفتی با مساحت ۴۱۰/۷ کیلومتر مربع است. رودخانه کردان مهم ترین منبع آب سطحی این منطقه از بخش شمالی سرچشمه گرفته و پس از عبور از مناطق مرکزی دشت از بخش جنوبی خارج می شود. عموم بهره برداری از منابع آب این منطقه توسط چاه های منطقه انجام می شود که سالانه ۳۲۸ میلیون مترمکعب آب از آبخوان برداشت می شود که بیش تر مصارف آن در بخش کشاورزی است. آبخوان آبرفتی دشت هشتگرد در اراضی مخروط افکنه ای از نوع آزاد بوده که به سمت جنوب آبخوان چند لایه شده و کیفیت آب

تعادل بخشی آبخوان را پیشنهاد دادند. Kardan Moghaddam et al. (2021) با استفاده از مفهوم انعطاف پذیری در مخازن سد، شاخص پایداری کمی و کیفی آبخوان را به صورت سیستمی ارائه دادند. تلفیق سه شاخص اعتماد پذیری، آسیب پذیری و مطلوبیت در تراز آب زیرزمینی آبخوان به صورت توزیعی به عنوان شاخص پایداری کمی و دو شاخص آسیب پذیری و مطلوبیت به عنوان شاخص پایداری کیفی آبخوان معرفی و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مطالعه آنها نشان داد که استفاده از این شاخص ها ضمن ارزیابی مناسب تغییرات تراز آب زیرزمینی به صورت توزیعی قابلیت مناسبی در جهت تدوین راه کارهای تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی ارائه می دهد. مطالعات مختلفی در زمینه تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی و تعریف سناریوهای سازگاری انجام گرفته است که از آن جمله رویکردهای استفاده از طرح های تغذیه مصنوعی، بهینه سازی در شبیه سازی جریان آب زیرزمینی توسط Rezaei et al. (2021) و تعریف الگوی کشت بهینه با استفاده از رویکرد PSO در حداقل بهره برداری از منابع آب زیرزمینی توسط Akbari et al. (2021) اشاره داشت.

با توجه به رشد و توسعه انجام گرفته شده در سال های اخیر توسعه شهر جدید هشتگرد و لزوم تأمین پایدار آب شرب برای این منطقه باعث شده تا حجم بهره برداری از این آبخوان افزایش زیادی داشته باشد و این موضوع سبب افت آبخوان و مشکلات کیفی نیز در منابع آب زیرزمینی این منطقه شود. لذا تدوین یک چارچوب که بتواند ارزیابی مناسبی از وضعیت کمی و کیفی آبخوان ارائه دهد می تواند به عنوان یک ابزار مدیریتی برای منابع آب زیرزمینی این منطقه باشد (Samani et al., 2021). مطالعات مختلف برای پایداری آبخوان ها و ارزیابی آنها با استفاده شاخص ها نشان داده که این موضوع بسیار حائز اهمیت است و کمی سازی وضعیت آبخوان برای اعمال

با استفاده از مدل عددی MODFLOW شبیه‌سازی شده و به منظور کمی‌کردن میزان اثربخشی سناریوهای مختلف از شاخص پایداری کمی آبخوان و شاخص آسیب‌پذیری دراستیک در آبخوان استفاده می‌شود. در نهایت با توجه به میزان شاخص پایداری کمی آبخوان و مقدار نسبی شاخص آسیب‌پذیری دراستیک، اولویت‌بندی سناریوهای تعادل‌بخشی ارزیابی می‌شود. در شکل (۲) مراحل این پژوهش نمایش داده شده است.

یکی از مدل‌های شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی مدل MODFLOW 2005 است که با استفاده از نرم‌افزار GMS v10 مورد استفاده قرار می‌گیرد. چگونگی به تعادل‌رساندن بیلان آبخوان، بررسی صحت و سقم داده‌های مدل مفهومی و پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان تحت سناریوهای مختلف هیدرولوژیکی به‌عنوان اهداف مدل‌سازی عددی یک آبخوان معرفی می‌شود (Kayhomayoon et al., 2021).

زیرزمینی در لایه‌های محبوس زیرین، بهتر از لایه آزاد است. در شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه و پارامترهای مورد نیاز برای سناریوهای تعادل‌بخشی که در ادامه معرفی شده، نشان داده شده است. بیشتر مصارف آب در سطح آبخوان هشتگرد مربوط به فعالیت‌های کشاورزی است که در بخش مرکزی آبخوان واقع شده است و روند افت آب زیرزمینی در این آبخوان مشکلات متعدد کمی و کیفی و در سال‌های اخیر بحث نشست زمین را نیز به وجود آورده است (Shemshakli et al., 2011). لذا این محدوده مطالعاتی از نظر بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی دارای حساسیت بالایی بوده و لزوم احیا و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی حائز اهمیت است.

روش تحقیق

با توجه به هدف این مطالعه، ارزیابی وضعیت کمی آبخوان هشتگرد تحت اعمال سناریوهای تعادل‌بخشی

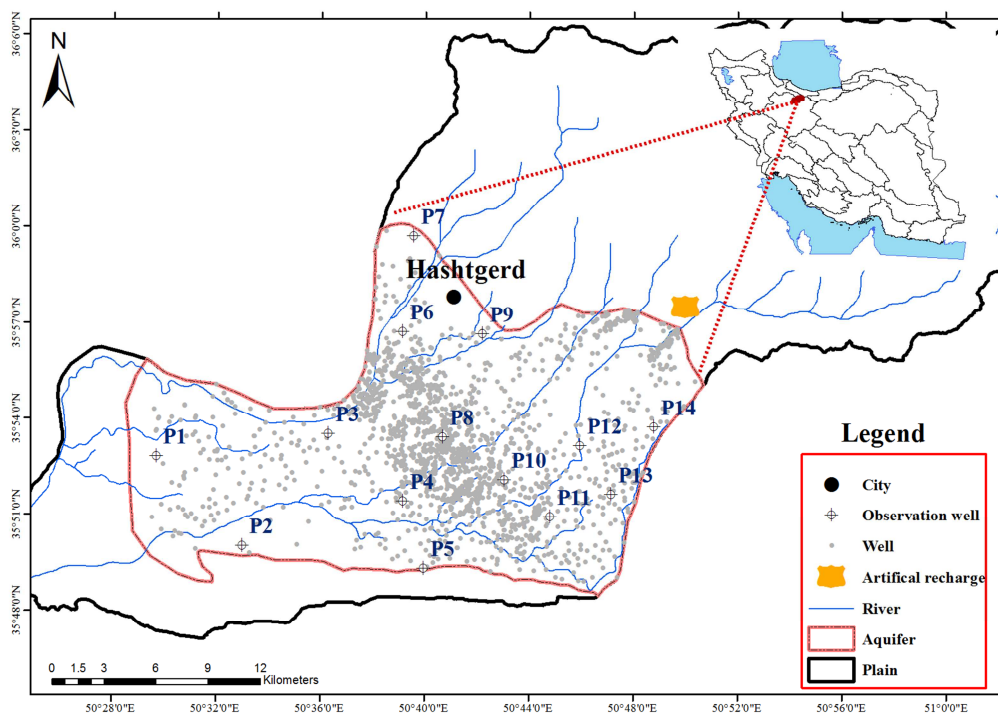


Figure 1. Location of the study area and wells used in water balancing scenarios

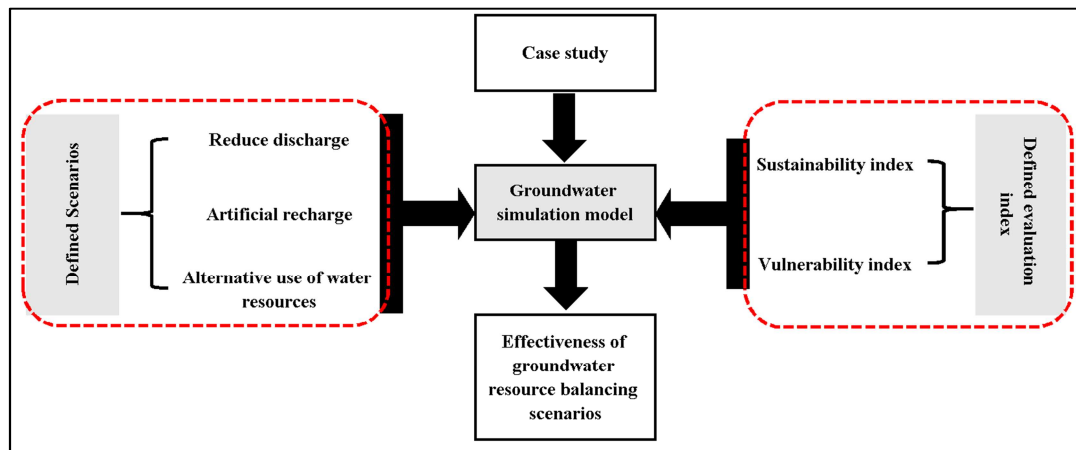


Figure 2. Flowchart of the research

تعریف شد. مدل‌سازی کمی آبخوان براساس پارامترهای بیلان آب زیرزمینی با تعریف ۱۴ حلقه چاه مشاهده‌ای به‌عنوان نقاط شاهد برای ارزیابی دقت مدل انجام گرفت. جبهه‌های آب زیرزمینی ورودی و خروجی به آبخوان از نوع GHB براساس منحنی‌های تراز آب زیرزمینی آبخوان مشخص و به‌صورت یک بسته در مدل مفهومی تعریف شد. میزان بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در قالب بسته Well در مدل مفهومی تعریف و به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر خروجی از آبخوان تعریف شد. میزان آب برگشتی ناشی از مصارف مختلف با توجه به موقعیت و کاربری‌های مختلف با در نظر گرفتن میزان درصد نفوذ در بسته Recharge در مدل مفهومی تعریف شد. همچنین با توجه به شبکه رودخانه آبخوان هشتگرد، اندرکنش بین رودخانه و آبخوان به‌دلیل عدم دائمی بودن رودخانه به‌صورت تغذیه از سطح و در بسته Recharge برای کلیه شبکه در نظر گرفته شد و میزان تغذیه و حجم آب نفوذیافته با توجه به بیلان منطقه در مدل اعمال شد. ساختار آبخوان براساس مدل رقومی ارتفاع (DEM) برای سطح زمین، تراز آب زیرزمینی در مهرماه ۱۳۸۹ به‌عنوان شرایط اولیه مدل‌سازی و سنگ بستر آبخوان با استفاده از تحلیل نتایج ژئوفیزیک در ساختار مدل MODFLOW تعریف شد.

براساس این اهداف، مدل مفهومی آبخوان براساس بیلان منابع آب زیرزمینی منطقه تعریف شد. مدل مفهومی براساس بیلان جریان‌ات ورودی و خروجی به آبخوان محاسبه و پارامترهای موردنیاز جهت شبیه‌سازی در مدل تعریف شد. شرایط مرزی آبخوان شامل جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان، ساختار استراگرافی آبخوان (توپوگرافی، سطح آب و سنگ‌بستر)، میزان تغذیه ناشی از نفوذ از بارندگی و رواناب سطحی، تخلیه منابع آب آبخوان، ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان و ... پارامترهای تشکیل‌دهنده مدل است. تدوین مدل مفهومی آبخوان هشتگرد براساس بیلان ارائه شده در جدول (۱) براساس گام شروع مدل‌سازی ۹۰-۱۳۸۹ آنالیز و مورد استفاده قرار گرفت.

با توجه به آخرین بیلان منابع و مصارف آب در این آبخوان، اولین گام دوره مدل‌سازی مهرماه ۱۳۸۹ انتخاب و به‌عنوان گام ابتدایی مدل ماندگار تعریف شد. با توجه به گام اول دوره شبیه‌سازی، یک دوره هفت‌ساله که پنج سال ابتدایی برای واسنجی مدل و دو سال انتهایی برای صحت‌سنجی است برای شبیه‌سازی انتخاب شد. شبکه‌بندی مدل عددی به‌منظور شبیه‌سازی و حل معادلات جریان آب زیرزمینی با ابعاد ۲۵۰×۲۵۰ مترمربع

Table 1. Summary of the annual water balance in the Hashtgerd aquifer (MCM) [Ministry of Energy, 2011]

Volume changes	Discharge				Recharge						Area (km ²)
	Sum out	G.W outlet	ET from G.W	Discharge from wells	Sum In	Return flow	Return flow Agri	Surface flow	Infiltration from heights	G.W Input	
-19.7	327.3	20.5	0	306.8	307.6	18.3	106.6	58.8	27.3	96.6	410.7

حجم تغذیه منابع آب زیرزمینی معطوف بوده است. براین اساس با توجه به بررسی منطقه مورد مطالعه و وضعیت بیلان منفی آبخوان سه سناریوی کاهش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، تغذیه مصنوعی در بالادست آبخوان و جایگزینی چاه‌های آب شرب از منابع آب زیرزمینی به منابع آب سطحی تعریف و مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به کسری مخزن آبخوان هشتگرد میزان کاهش برداشت آب در منابع آب زیرزمینی به صورت مساوی در چاه‌های کشاورزی منطقه با سه حالت کاهش پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد برداشت آب در نظر گرفته شد (سناریوهای S1، S2 و S3). در این سناریو میزان آب برگشتی ناشی از مصارف کشاورزی نیز با توجه به میزان درصد در نظر گرفته شده در مدل شبیه‌سازی که مبتنی بر بیلان آب زیرزمینی است محاسبه شد. با توجه به گزارش طرح تغذیه مصنوعی منابع آب زیرزمینی آبخوان با بهره‌برداری از رودخانه کردان در زمان سیلابی مشخص شد که حجم ۳۰ میلیون مترمکعب پتانسیل تغذیه مصنوعی وجود دارد که از این حجم، حدود ۸/۷ میلیون مترمکعب تغذیه آبخوان انجام خواهد شد و به‌عنوان سناریوی S4 تعیین شد. با توجه به بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در بخش جنوبی شهر هشتگرد و هشتگرد جدید، سناریوی تأمین آب به میزان ۲۰ میلیون مترمکعب از سد طالقان و جایگزینی آن به‌جای منابع آب زیرزمینی نیز به‌عنوان سناریو S5 معرفی و شبیه‌سازی شد. با توجه به مطالعات منابع آب زیرزمینی در دشت هشتگرد و ارزیابی طرح‌های مختلف تعادل بخشی این پنج سناریو برای پیاده‌سازی در آبخوان منطقه انتخاب شد. با توجه به کسری آبخوان و حجم بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، سناریوهای کاهش برداشت به‌گونه‌ای انتخاب

پس از آماده‌سازی مدل مفهومی و اطلاعات آن شبیه‌سازی در حالت ماندگار و پس از آن برای دوره غیرماندگار هفت‌ساله انجام گرفت. انجام شبیه‌سازی در حالت ماندگار با توجه به ذات مدل برای واسنجی پارامتر هدایت هیدرولیکی آبخوان انجام گرفت. پس از واسنجی و ارزیابی دقت مدل در حالت ماندگار، شبیه‌سازی غیرماندگار برای واسنجی پارامتر آبدهی ویژه و صحت‌سنجی از نحوه شبیه‌سازی برای پیش‌بینی دوره آبی انجام گرفت.

سناریوهای تعادل بخشی

برداشت‌های بی‌رویه از آب زیرزمینی به‌ویژه در طی ۱۵ سال اخیر سبب کاهش حجم استاتیک آبخوان‌های کشور به میزان ۷۵ میلیارد مترمکعب تا پایان سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ شده است (شرکت مدیریت منابع آب، ۱۳۹۳). این کاهش حجم با ۳۵ میلیارد مترمکعب اضافه برداشت قبل از سال ۷۶ برآورد ۱۱۰ میلیارد مترمکعب برداشت مازاد از سفره‌های آب زیرزمینی را در برداشته است. این وضعیت کسری مخازن آب زیرزمینی سبب خشک‌شدن بسیاری از منابع آب زیرزمینی، رودخانه‌ها، تالاب‌ها، باغات و اراضی کشاورز، افت کیفی منابع آب زیرزمینی، نشست زمین، بلااستفاده بیش از ۲۵۰۰۰۰ کیلومتر شبکه آفقا، مهاجرت و حاشیه‌نشینی، به خطر افتادن امنیت سیاسی، افزایش مصرف انرژی و سایر پیامدها را داشته است (برنامه احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور، ۱۳۹۳). برنامه تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی با تعریف ۱۵ پروژه کلان ملی به‌منظور کنترل و بازگشت حجم استاتیک سفره‌های آب زیرزمینی تعریف شد. اهداف کلان این پروژه در دو بعد کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی و افزایش

افزایش تراز آب زیرزمینی نسبت ادامه وضعیت موجود است (β_{EL}) (رابطه ۴).

$$\alpha_{EL} = \frac{n_{EL}}{N_{EL}} \quad (2)$$

$$\gamma_{EL} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_s - W_t)}{\sum_{i=1}^n (W_t - W_{Pr})} \quad (3)$$

$$\beta_{EL} = 100 * \left(\frac{R_{EL} - r_{EL}}{R_{EL} - R_{Pr}} \right) \quad (3)$$

در این روابط n_{EL} تعداد دوره هایی که تراز آب زیرزمینی بالاتر از تراز مطلوب (تراز تعادل) باشد و N_{EL} تعداد کل دوره ها است. W_t تراز آب زیرزمینی مطلوب در هر گام زمانی، W_s تراز آب زیرزمینی شبیه سازی شده در هر دوره زمانی برای هر سناریو، W_{Pr} تراز آب زیرزمینی بدون اعمال سناریو و n تعداد دوره هایی که تراز آب زیرزمینی پایین تر از تراز مطلوب قرار می گیرد. در شرایطی که تراز آب زیرزمینی بالاتر یا برابر با تراز مطلوب باشد مقدار $(W_s - W_t)$ صفر در نظر گرفته می شود. همچنین β_{EL} بیانگر تراز آب زیرزمینی پس از افت، R_{EL} تراز آب زیرزمینی در تراز مطلوب و R_{Pr} تراز آب زیرزمینی مشاهداتی یا پیش بینی شده (بدون اجرای سناریوی تعادل بخشی) است.

برای محاسبه شاخص پایداری آبخوان نیاز به تعریف و محاسبه تراز مطلوب آب زیرزمینی است که با توجه به مطالعات Kardan Moghaddam *et al.* (2019)، این تراز می باید با توجه به هدف تعادل بخشی آبخوان در جهت برگشت تراز آب زیرزمینی به شرایط اولیه برگردد (Ministry of Power, 2014).

شدند که میزان کسری آبخوان در سه سطح کم تر از کسری آبخوان، تقریباً برابر کسری و بیش از کسری آبخوان انتخاب شدند. دو سناریوی دیگر نیز براساس اهداف مطالعات تأمین آب شهر جدید هشتگرد انتخاب شده است. این سناریوها به عنوان سناریوهای تعادل بخشی این محدوده به صورت جدول (۲) ارائه شده است.

شاخص های ارزیابی وضعیت آبخوان الف) شاخص پایداری آبخوان

برای ارزیابی پایداری سیستم آب زیرزمینی از شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی مطابق رابطه (۱) استفاده می شود (Kardan Moghaddam *et al.*, 2021). این شاخص بیانگر وضعیت توزیعی پایداری منابع آب زیرزمینی در سطح یک آبخوان است که قابلیت ارزیابی در سناریوهای مختلف را نیز دارد.

$$\rho_{EL} = \sqrt[3]{\alpha_{EL} \cdot \beta_{EL} \cdot (1 - \gamma_{EL})} \quad (1)$$

در این رابطه ρ_{EL} شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی، α_{EL} شاخص اعتماد پذیری، β_{EL} شاخص مطلوبیت و γ_{EL} شاخص آسیب پذیری است. نسبت تعداد دوره هایی که تراز آب زیرزمینی بالاتر از تراز مطلوب (تراز تعادل) باشد به تعداد کل دوره به عنوان شاخص اعتماد پذیری (α_{EL}) معرفی می شود (رابطه ۲). میزان آسیب پذیری کمی در آبخوان برابر است با نسبت میزان تراز آب زیرزمینی در گام های زمانی که پایین تر از تراز مطلوب باشد به میزان کل فاصله تراز آب زیرزمینی نسبت به تراز مطلوب (γ_{EL}) (رابطه ۳). میزان مطلوبیت کمی در آبخوان نشان دهنده میزان درصد

Table 2. Equilibrium scenarios considered in the Hashtgerd aquifer

Scenario				
S5	S4	S3	S2	S1
Drinking water supply from Taleghan Dam and replacement of underground resources	Artificial recharge along the Kordan River	15% reduction in the operation of agricultural wells	10% reduction in the operation of agricultural wells	5% reduction in the operation of agricultural wells

جهت بررسی و آنالیز آسیب پذیری آبخوان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول (۴) تقسیم‌بندی شاخص از نظر آسیب‌پذیری در سطح آبخوان ارائه شده است.

Table 3. Classification of the DRASTIC index based on vulnerability

Classification Vulnerability	Class	Classification Vulnerability	Class
Can be ignored	46>	High vulnerability	137-184
Low vulnerability	47-92	Very high vulnerability	>185
Medium vulnerability	93-136		

پارامتر عمق تا سطح آب زیرزمینی براساس آمار سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای در آبخوان و پهنه‌بندی آنها به دست می‌آید. با توجه به نقشه شیب، نفوذپذیری خاک و بارش در منطقه میزان تغذیه آبخوان در هر بخش محاسبه می‌شود. با استفاده از لوگ‌های حفاری در منطقه سه پارامتر خاک در لایه سطحی دو متری، محیط آبخوان و محیط غیراشباع استخراج می‌شود. سپس با استفاده از تیسرن‌بندی لوگ‌های حفاری، پهنه‌بندی و رتبه‌بندی پارامترها تعیین می‌شود. به منظور برآورد پارامتر شیب، از مدل رقومی ارتفاعی منطقه استفاده و نقشه شیب در محیط GIS استخراج می‌شود.

نتایج و بحث

ارزیابی مدل جریان آب زیرزمینی

پس از شبیه‌سازی اولیه جریان آب زیرزمینی در آبخوان هشتگرد، واسنجی مدل ابتدا در حالت ماندگار براساس بیلان آب زیرزمینی و تغییر پارامتر هدایت هیدرولیکی با هدف حداقل‌سازی میزان اختلاف بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده انجام گرفت. لوگ‌های حفاری موجود در منطقه، نتایج آزمایش پمپاژ و برآورد قابلیت انتقال، نوع سازندهای زمین‌شناسی و مطالعات پیشین به‌عنوان منابع استفاده در واسنجی و ارزیابی دقت

رفتار تغییرات تراز آب زیرزمینی در آبخوان بیانگر شرایط تعریف تراز مطلوب آب زیرزمینی است. در صورت داشتن یک رفتار نوسانی از منحنی سری فوریه استفاده و در صورت داشتن رفتار افت ثابت از منحنی خطی استفاده خواهد شد. با توجه به رفتار نوسانی هیدروگراف آبخوان و چاه‌های مشاهده‌ای با استفاده از منحنی سری فوریه (رابطه ۵) تراز مطلوب آب زیرزمینی محاسبه می‌شود.

$$f(x) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos(nx)) + \sum_{n=1}^{\infty}(b_n \sin(nx)) \quad (5)$$

در این رابطه، $F(x)$ تابع سیگنال، a_0 اندازه سیگنال با فرکانس صفر و دو تابع سینوسی و کسینوسی، توابع نوسانی می‌باشد.

ب) شاخص آسیب‌پذیری

عبارت آسیب‌پذیری در هیدروژئولوژی برای اولین بار توسط Margat در سال ۱۹۷۰ مورد استفاده قرار گرفته است. وی آسیب‌پذیری آبخوان را امکان نفوذ و بخش آلودگی از سطح زمین به سطح آب مخازن طبیعی در شرایط طبیعی تعریف می‌کند (Aller, 1985). یکی از رویکردهای ارزیابی وضعیت آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی، استفاده از شاخص در این موضوع است. شاخص آسیب‌پذیری دراستیک به‌عنوان سیستمی استاندارد برای ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی نسبت به آلودگی ارائه شده است. این شاخص برای ارزیابی چگونگی انجام فعالیت‌ها در پایش منابع آب زیرزمینی در یک منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرد (Yousefi et al., 2021). در ارزیابی پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی با استفاده از این شاخص هفت پارامتر عمق تا سطح ایستابی، تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، محیط غیراشباع و هدایت هیدرولیکی آبخوان

ارزیابی وضعیت تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های پایداری

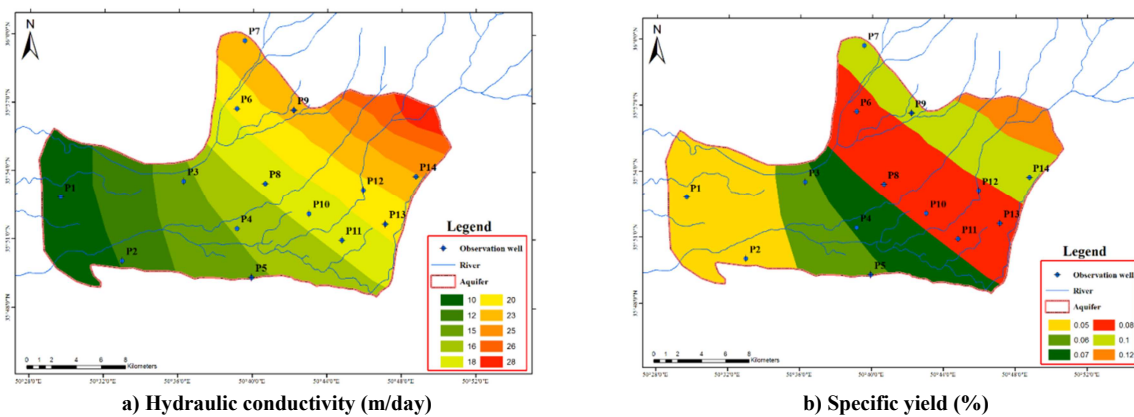
خطا مطابق جدول (۴) در سه حالت ماندگار، غیرماندگار و آسنجی و صحت‌سنجی آنالیز شد. ارزیابی مدل براساس ۱۴ حلقه چاه مشاهده‌ای در منطقه انجام گرفت. این ۱۴ حلقه چاه با توجه به سری زمانی چاه‌های مشاهده‌ای، پراکنش مکانی و تکمیل بودن داده‌ها انتخاب و در مدل نیز از آنها استفاده شده است. در شکل (۴) هیدروگراف آبخوان در شرایط شبیه‌سازی و مقایسه آن با تراز مشاهداتی در آبخوان مقایسه شده است.

Table 4. Groundwater flow simulation error analysis (m)

Error parameters	Steady model	Un steady model	
		Calibration	Verification
Mean Error	-0.185	-0.274	-0.033
Abs Error	0.789	1.28	1.9
RMSE	0.932	1.76	2.4

مدل در حالت ماندگار انتخاب شد. پس از شبیه‌سازی حالت ماندگار، در دوره آسنجی مدل غیرماندگار، پارامتر آب‌دهی ویژه و آسنجی شد. و آسنجی مدل کمی آب زیرزمینی به دو صورت سعی و خطا و روش اتوماتیک PEST انجام گرفت. نتایج نشان داد که با حرکت به سمت خروجی آبخوان، از میزان هدایت هیدرولیکی و آب‌دهی ویژه کاسته می‌شود که این نتایج با استفاده از جنس سازندهای زمین‌شناسی نیز قابل اثبات است. نقشه توزیعی دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و آب‌دهی ویژه در آبخوان هشتگرد به صورت شکل (۳) ارائه شده است.

به منظور ارزیابی میزان خطای شبیه‌سازی براساس میزان تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی آنالیز



a) Hydraulic conductivity (m/day) **b) Specific yield (%)**
Figure 3. Calibration distribution parameters in the Hashtgerd aquifer



Figure 4. Comparison of the aquifer hydrograph simulation results with the observed data

پیش‌بینی و تعیین تراز آستانه آب زیرزمینی

با توجه به در نظر گرفتن شاخص‌های پایداری کمی آبخوان و تدوین سناریوهای تعادل بخشی وضعیت آبخوان هشتگرد برای یک دوره پنج‌ساله با ادامه روند موجود پیش‌بینی شد. این پیش‌بینی تا پایان سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ با در نظر گرفتن ادامه روند موجود از نظر اقلیمی و بهره‌برداری انجام گرفت. نتایج ارائه شده حاکی از افت آبخوان را به میزان ۱۶۳ از ابتدای دوره شبیه‌سازی (مهرماه ۱۳۸۹) تا انتهای دوره پیش‌بینی (شهریورماه ۱۴۰۱) را نشان می‌دهد. با تحلیل روند تغییرات افت آب زیرزمینی در هر چاه مشاهده‌ای و با هدف رسیدن تراز

آب زیرزمینی به تراز اولیه براساس طرح تعادل بخشی، تراز مطلوب آب زیرزمینی در آبخوان هشتگرد آنالیز شد. روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در آبخوان هشتگرد کاهشی و دارای رفتار نوسانی بوده، لذا از سری فوریه جهت تعیین تراز مطلوب در هر چاه مشاهده‌ای و کل آبخوان استفاده شد. بر این اساس تراز مطلوب در چاه‌های مشاهده‌ای منطقه و آبخوان برای محاسبه شاخص پایداری آب زیرزمینی به صورت جدول (۵) محاسبه شد. در شکل (۵) تغییرات تراز آب زیرزمینی آبخوان هشتگرد در شرایط پیش‌بینی در ادامه شرایط موجود و منحنی تراز مطلوب نمایش داده شده است.

Table 5. Equation for determining the optimal groundwater level in observation wells and aquifers

COD	Observation well	Equation of optimal G.w level	RMSE-m
P1	Mohammad Abad	$WT=1140-0.25\cos(0.4X)+0.42\sin(0.4X)$	0.052
P2	Korosh yeylaghi	$WT=1151.5-0.69\cos(0.48X)+0.46\sin(0.48X)$	0.082
P3	Tankeman	$WT=1154-0.76\cos(0.5X)+0.85\sin(0.5X)$	0.052
P4	Hossein Abad	$WT=1172-0.04\cos(0.52X)-0.01\sin(0.52X)$	0.002
P5	Serah Zaki	$WT=1189.5+0.45\cos(0.6X)-0.21\sin(0.6X)$	0.053
P6	Ghaley Azari	$WT=1201.6-0.37\cos(0.4X)+0.46\sin(0.4X)$	0.047
P7	Arab Abad	$WT=1181-0.35\cos(0.42X)+0.51\sin(0.42X)$	0.038
P8	Namak alan	$WT=1210.6-0.18\cos(0.53X)+0.49\sin(0.53X)$	0.018
P9	Ghasem Abad bozorg	$WT=1176.6-0.78\cos(0.12X)+0.17\sin(0.12X)$	0.018
P10	Ghasem Abad	$WT=1225.8-0.14\cos(0.43X)+0.27\sin(0.43X)$	0.003
P11	Lashkar Abad	$WT=1224.5-0.33\cos(0.47X)+0.42\sin(0.47X)$	0.002
P12	Seyf Abad	$WT=1175.2-0.31\cos(0.51X)+0.76\sin(0.51X)$	0.007
P13	Sanghar Abad	$WT=1188.2-0.11\cos(0.4X)+0.36\sin(0.4X)$	0.034
P14	Morghak	$WT=1180.3-0.33\cos(0.17X)+0.36\sin(0.17X)$	0.005
Hashtgerd Aquifer		$WT=1178.7-0.21\cos(0.34X)+0.45\sin(0.34X)$	0.007

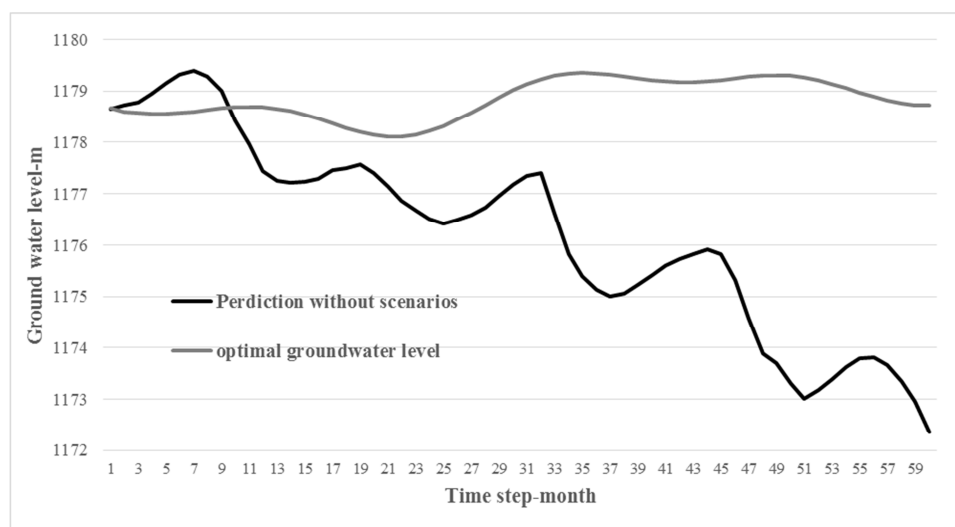


Figure 5. Variation of the aquifer level during five years forecasted along with the optimal groundwater level

ارزیابی شاخص پایداری در سناریوی تعادل بخشی

داده شد تا نتایج مناسبی به دست آید. حجم تغذیه مصنوعی در بالادست آبخوان براساس مطالعات انجام گرفته و برآورد شرکت اب منطقه ای البرز به میزان ۳۰ میلیون مترمکعب در سال تعیین شده که با توجه به ضریب نفوذپذیری این منطقه مشخص شد که حجم ۸/۷ میلیون مترمکعب وارد آبخوان می شود. در سناریوی جایگزینی منابع آب شرب نیز حجم ۲۰ میلیون مترمکعب از نیاز شرب منطقه از سد طالقان تأمین و جایگزین برداشت از منابع آب زیرزمینی که بیش تر در بخش شمال غربی آبخوان قرار دارند شود. با اجرای این پنج سناریوی تعادل بخشی، شاخص پایداری آبخوان به صورت جدول (۶) محاسبه و ارائه شد.

سه سناریوی کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی، تغذیه مصنوعی در بالادست رودخانه کردن و جایگزینی آب شرب در منطقه از سد طالقان به جای منابع آب زیرزمینی مورد آنالیز قرار گرفت. به منظور ارزیابی نتایج این آنالیز، از شاخص پایداری کمی آبخوان استفاده شد. بر این اساس سناریوی کاهش برداشت آب از منابع آب زیرزمینی در سه سطح کاهش پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد در مدل اعمال شد و با توجه به تغییرات تراز آب زیرزمینی، شاخص پایداری محاسبه شد. با اعمال این سناریو در سطوح مختلف، میزان آب برگشتی ناشی از مصارف کشاورزی نیز در مدل کاهش

Table 6. Assessment of the aquifer stability in equilibrium scenarios

Observation wells	S1				S2				S3			
	Reliability	Vulnerability	Desirability	Sustainability	Reliability	Vulnerability	Desirability	Sustainability	Reliability	Vulnerability	Desirability	Sustainability
Mohammad Abad	1	0	0.95	0.98	1	0.00	0.95	0.98	1	0	0.92	0.97
Korosh yeylaghi	0.48	-0.13	0.80	0.70	0.53	-0.11	0.82	0.73	0.55	-0.13	0.92	0.76
Tankeman	0.15	-0.35	0.61	0.39	0.17	-0.28	0.66	0.43	0.58	-0.21	0.84	0.73
Hossein Abad	0.35	-0.12	0.77	0.62	0.53	-0.09	0.80	0.73	0.77	-0.08	0.91	0.86
Serah Zaki	0.10	-1.00	0.01	0.00	0.15	-0.81	0.13	0.16	0.53	-1.00	0.60	0.00
Ghaley Azari	0.25	-0.09	0.84	0.58	0.37	-0.06	0.86	0.67	0.78	-0.05	0.93	0.89
Arab Abad	0.20	-0.23	0.71	0.48	0.53	-0.19	0.74	0.69	0.55	-0.27	0.88	0.71
Namak alan	0.10	-0.24	0.79	0.39	0.12	-0.20	0.81	0.43	0.33	-0.17	0.91	0.63
Ghasem Abad bozorg	0.17	-0.58	0.35	0.29	0.18	-0.46	0.43	0.35	0.55	-0.47	0.73	0.60
Ghasem Abad	0.12	-0.20	0.79	0.42	0.12	-0.16	0.82	0.43	0.60	-0.14	0.91	0.78
Lashkar Abad	0.17	-0.27	0.62	0.43	0.18	-0.20	0.67	0.46	0.72	-0.15	0.85	0.80
Seyf Abad	0.47	-0.21	0.45	0.55	0.58	-0.16	0.52	0.64	0.83	-0.14	0.78	0.82
Sanghar Abad	0.15	-0.43	0.47	0.34	0.17	-0.34	0.53	0.39	0.70	-0.21	0.78	0.76
Morghak	0.13	-0.58	0.25	0.24	0.15	-0.44	0.34	0.31	0.77	-0.35	0.69	0.70
Aquifer	0.27	-0.32	0.60	0.46	0.34	-0.25	0.65	0.53	0.66	-0.24	0.83	0.72

Continued table 6. Assessment of the aquifer stability in equilibrium scenarios

Observation wells	S4				S5			
	Reliability	Vulnerability	Desirability	Sustainability	Reliability	Vulnerability	Desirability	Sustainability
Mohammad Abad	1	0	0.95	0.98	1	0	0.95	0.98
Korosh yeylaghi	0.48	-0.49	0.80	0.59	0.50	-0.46	0.81	0.84
Tankeman	0.15	-1.30	0.61	0.00	0.17	-1.20	0.63	0.62
Hossein Abad	0.33	-0.43	0.77	0.53	0.40	-0.39	0.78	0.76
Serah Zaki	0.10	-3.66	0.00	0.00	0.12	-3.40	0.05	0.30
Ghaley Azari	0.23	-0.33	0.83	0.51	0.28	-0.29	0.84	0.68
Arab Abad	0.20	-0.84	0.70	0.28	0.27	-0.78	0.72	0.70
Namak alan	0.10	-0.88	0.78	0.22	0.10	-0.82	0.79	0.53
Ghasem Abad bozorg	0.17	-2.12	0.34	0.00	0.17	-1.96	0.37	0.57
Ghasem Abad	0.12	-0.74	0.79	0.29	0.12	-0.69	0.80	0.54
Lashkar Abad	0.15	-1.00	0.62	0.06	0.17	-0.90	0.64	0.59
Seyf Abad	0.45	-0.79	0.45	0.35	0.55	-0.71	0.47	0.77
Sanghar Abad	0.13	-1.60	0.46	0.00	0.15	-1.46	0.49	0.57
Morghak	0.13	-2.13	0.24	0.00	0.13	-1.93	0.28	0.48
Aquifer	0.27	-1.16	0.60	0.27	0.29	-1.07	0.62	0.64

۱۵ درصد بهره‌برداری از چاه‌های بخش کشاورزی بیش‌ترین میزان پایداری آبخوان را نشان می‌دهد. اگرچه میزان پایداری آبخوان در این سناریو نسبت به سایر سناریوها افزایش قابل‌توجهی دارد، اما روند افت شدید آبخوان در سال‌های قبل و حجم بالای کسری سبب می‌شود که روند کاهش هیدروگراف آبخوان وجود داشته باشد. بر این اساس با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مدل کمی، هیدروگراف آبخوان با اعمال سناریوهای تعادل‌بخشی به‌صورت شکل (۷) محاسبه شده است.

بررسی شاخص پایداری آبخوان در ۱۴ چاه مشاهده‌ای حاکی از این موضوع است که راه‌کارهای مختلف سبب بهبود وضعیت پایداری آبخوان شده و این موضوع در چاه‌های مشاهده‌ای بخش‌های مرکزی آبخوان بیش‌تر دیده می‌شود. بر این اساس مطابق شکل (۶) تغییرات شاخص پایداری آبخوان در ۱۴ حلقه چاه مشاهده‌ای تحت اعمال سناریوهای تعادل‌بخشی نشان داده شده است. بررسی نتایج به‌دست‌آمده از شاخص پایداری کمی آبخوان حاکی از این موضوع است که سناریوی کاهش

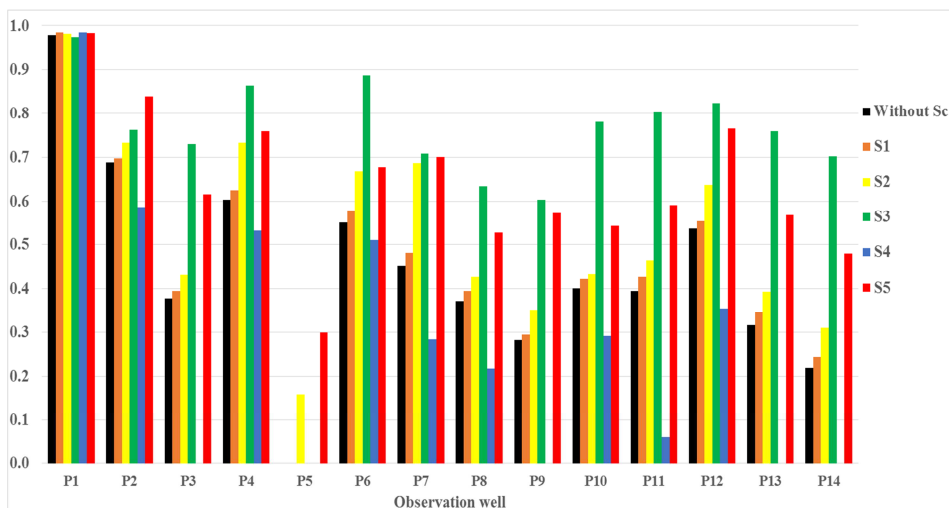


Figure 6. Variation of the quantitative stability index in the observation wells under equilibrium scenarios

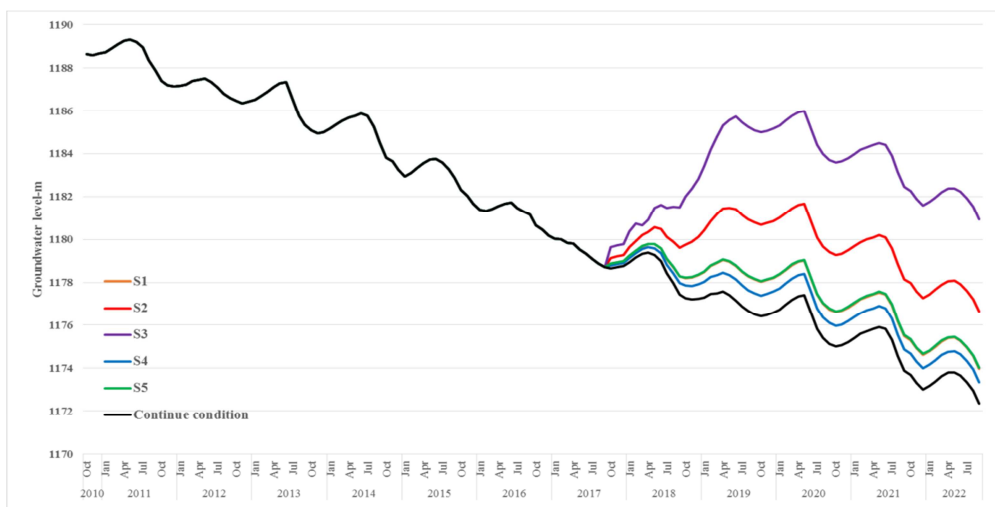


Figure 7. Groundwater hydrograph in five equilibrium scenarios

بالا بودن عمق آب زیرزمینی و بافت درشت دانه در لوگ های حفاری منطقه دارای آسیب پذیری بالاتری است. بررسی اثر سناریوهای مختلف در تعادل بخشی آبخوان در شاخص آسیب پذیری دراستیک نشان داد که تغییرات ایجاد شده در تراز آب زیرزمینی و میزان تغذیه آبخوان بسیار ناچیز بوده و عملاً تأثیر چندانی بر این شاخص ندارد.

ارزیابی پایداری آبخوان در سناریوی برتر

نتایج به دست آمده از دو شاخص پایداری کمی آبخوان و شاخص آسیب پذیری حاکی از این موضوع است که سناریوی S3 که کاهش ۱۵ درصد بهره برداری از آبخوان است بیشترین کارایی را داشته است. بر این اساس و با توجه به نتایج به دست آمده از سناریوی S3 در مدل کمی آبخوان، پهنه بندی توزیعی شاخص پایداری (اعتماد پذیری، آسیب پذیری و برگشت پذیری) در شکل (۹) و شاخص آسیب پذیری دراستیک به صورت شکل (۱۰) ارائه شده است.

ارزیابی شاخص آسیب پذیری دراستیک

با توجه به پارامترهای استاتیک و دینامیک تعریف شده در شاخص آسیب پذیری دراستیک، براساس تعریف پنج سناریوی تعادل بخشی این پارامترها مورد آنالیز قرار گرفت. بررسی ها نشان داد که دو پارامتر عمق آب زیرزمینی و تغذیه آبخوان تحت اعمال سناریوهای تعادل بخشی به صورت دینامیک بوده و براساس نتایج مدل عددی MODFLOW تغییر می کند. پارامتر هدایت هیدرولیکی آبخوان نیز با توجه به نتایج واسنجی شده مدل عددی در شاخص آسیب پذیری مورد استفاده قرار گرفت. سه پارامتر خاک، محیط آبخوان و محیط غیر اشباع براساس لوگ های حفاری و اطلاعات موجود استخراج و پهنه بندی گردید. با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاعی، پهنه بندی و کلاس بندی شیب آبخوان انجام گرفت. پس از محاسبه پارامترهای شاخص آسیب پذیری در شکل (۸) پهنه بندی آسیب پذیری دراستیک ارائه شده است. بررسی نتایج حاصل از شاخص آسیب پذیری دراستیک نشان داد که بخش بالادست آبخوان با توجه به

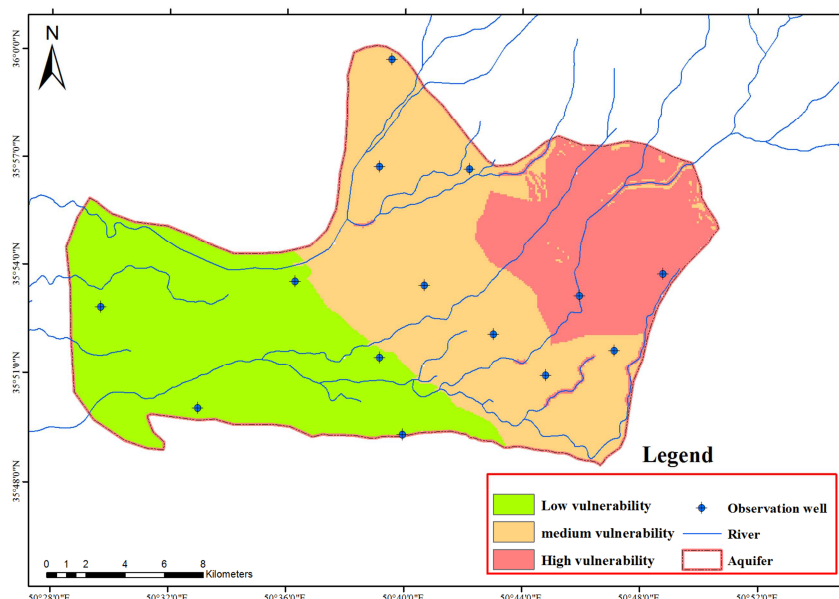


Figure 8. Vulnerability index of Hashtgerd aquifer

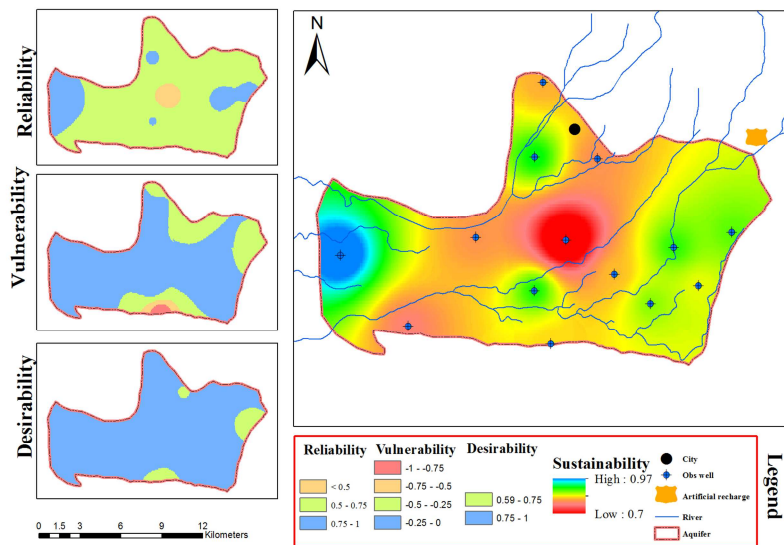


Figure 9. Aquifer's stability situation in scenario S3

آبخوان نیز با توجه جریانات تغذیه‌ای و نوسانات کم‌تر آبخوان نسبت به بخش میانی آبخوان که تحت تأثیر چاه‌های بهره‌برداری قرار دارد، اعمال سناریوهای تعادل‌بخشی نقش مهمی در بهبود پایداری آبخوان داشته است.

اعمال سناریوی تعادل‌بخشی کاهش بهره‌برداری آبخوان به میزان ۱۵ درصد سبب بهبود وضعیت کمی آبخوان شده است که این موضوع سبب بهبود وضعیت کمی عمق آب زیرزمینی می‌شود. بر این اساس پارامتر عمق آب زیرزمینی در شاخص آسیب‌پذیری دراستیک تغییر یافته و در نتیجه میزان آسیب‌پذیری دراستیک تغییر کرده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که میزان آسیب‌پذیری در بخش‌های میانی آبخوان از کلاس زیاد به کلاس متوسط به اندازه یک درصد کاهش داشته است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از این موضوع است که اعمال سناریوهای تعادل‌بخشی بر میزان آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان با توجه به وابسته‌بودن آن به عوامل مختلف کم است. بررسی توزیعی نتایج به‌دست‌آمده از دو شاخص پایداری آبخوان و دراستیک نشان داد که پارامتر عمق آب

نتایج به‌دست‌آمده از شاخص پایداری آبخوان تحت اعمال سناریوی S3 نشان می‌دهد که شاخص اعتماد‌پذیری نسبت به دو شاخص برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری مقدار کم‌تری بهبود داشته است و این موضوع با توجه به نوسانات آب زیرزمینی و تغییرات آن است. این شاخص در هر گام زمانی در محاسبه شاخص تأثیرگذار بوده و نسبت به دو شاخص آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری دارای حساسیت بیش‌تری است. بررسی نتایج شاخص برگشت‌پذیری حاکی از این موضوع است که در اکثر بخش‌های آبخوان تراز آب زیرزمینی به تراز مطلوب نزدیک شده و اعمال سناریوی S3 توانسته در این بهبود نقش مهمی داشته باشد. این وضعیت در تغییرات شاخص آسیب‌پذیری آبخوان نیز مشاهده می‌شود. تلفیق سه شاخص که شاخص پایداری آبخوان را ارائه می‌دهد. نتایج شاخص پایداری آبخوان حاکی از بالابودن پایداری آبخوان در بخش خروجی و پس از آن در بخش ورودی آبخوان است. در بخش خروجی آبخوان تغییرات تراز آب زیرزمینی کم بوده و با اعمال سناریوی تعادل‌بخشی، پایداری آبخوان به‌سرعت بهبود می‌یابد. در بخش ورودی

و بیش از ۳۰۰ میلیون مترمکعب از ذخیره استاتیک این آبخوان برداشت شده است. بر این اساس پنج سناریوی تعادل بخشی که به صورت کاهش بهره‌برداری در سطوح پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد، جایگزینی آب شرب شهری از منابع آب سطحی و طرح تغذیه مصنوعی در مسیر رودخانه کردان از دو منظر شاخص پایداری کمی آبخوان و آسیب‌پذیری ذاتی مورد شبیه‌سازی و آنالیز شد. نتایج به دست آمده از شاخص پایداری کمی آبخوان حاکی از این موضوع است که بخش خروجی آبخوان که تغییرات کم تراز آب زیرزمینی را دارد کم‌ترین حساسیت را داشته و بیش‌ترین میزان پایداری آبخوان را دارد. بخش میانی آبخوان که دارای بیش‌ترین میزان حجم بهره‌برداری را دارد تحت تأثیر سناریوهای تعادل بخشی به‌ویژه سناریوهای کاهش بهره‌برداری عکس‌العمل بیش‌تری نسبت به سایر مناطق داشته و شاخص پایداری در این منطقه افزایش داشته و سناریوی کاهش ۱۵ درصد بیش‌ترین میزان بهبود سیستم پایداری آبخوان را نشان می‌دهد. ارزیابی شاخص آسیب‌پذیری آبخوان با روش دراستیک نیز در آبخوان نشان داد که تقسیم‌بندی آبخوان به سه بخش آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد براساس جهت جریان آب زیرزمینی بوده و بخش ابتدایی آبخوان که دارای عمق کم آب زیرزمینی و لایه‌های درشت‌دانه است نسبت به سایر مناطق دارای آسیب‌پذیری بالاتری بوده و بخش خروجی آبخوان دارای کم‌ترین میزان آسیب‌پذیری است. بررسی نتایج به دست آمده از این مطالعه حاکی از اهمیت ارزیابی طرح‌های تعادل بخشی بوده و لزوم پیاده‌سازی شاخص پایداری کمی آبخوان را نشان می‌دهد. از طرفی نیز آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان وابسته به پارامتر عمق آب زیرزمینی است که بهبود و کاهش عمق آب زیرزمینی در پیاده‌سازی سناریوهای تعادل بخشی باعث افزایش آسیب‌پذیری می‌شود، لذا شناسایی مناطق مستعد

زیرزمینی بسیار حساس بوده و نقش متناقض در دو شاخص را دارد. لذا استفاده هم‌زمان از این دو شاخص، مناطقی که حساسیت بالایی در تغییر عمق آب زیرزمینی را دارند به‌عنوان مناطق مستعد ناپایداری شدید مشخص می‌شود. بررسی‌ها نشان داد که بخش خروجی آبخوان هشنگرد به‌عنوان منطقه مستعد ناپایداری شدید است.

به‌طور کلی، اعمال سناریوهای تعادل بخشی سبب بهبود کمی وضعیت آبخوان در نواحی مختلف می‌شود که این موضوع با استفاده از مدل MODFLOW به صورت توزیعی در سطح آبخوان شبیه‌سازی می‌شود که این بهبود وضعیت کمی آبخوان باعث کاهش عمق آب زیرزمینی می‌شود. عمق آب زیرزمینی در شاخص آسیب‌پذیری دراستیک با دارابودن وزن بالا سبب تغییر در میزان آسیب‌پذیری آبخوان می‌شود و حساسیت بالایی دارد. لذا تلفیق هم‌زمان شاخص پایداری آبخوان و آسیب‌پذیری دراستیک می‌باید به‌گونه‌ای مورد استفاده قرار گیرد که هر دو بعد آسیب‌پذیری که از نقطه‌نظر محیط زیستی و کیفیت منابع آب زیرزمینی اهمیت دارد و پایداری آبخوان که از نظر کمی اهمیت دارد، رعایت شود. لذا اعمال سناریوهای تعادل بخشی در منابع آب زیرزمینی می‌بایست به صورت توزیعی مورد ارزیابی قرار گرفته تا مشکلات کمی و کیفی در این منابع آب به وجود نیاید.

نتیجه‌گیری

بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی در سالیان اخیر با مشکل عدم مدیریت همراه بوده است که این موضوع در کنار رشد جمعیت و تنش‌های اقلیمی سبب شده تا متولیان آب کشور به دنبال پیاده‌سازی طرح‌های تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی در کشور باشند. بر این اساس آبخوان هشنگرد که در حوضه آبریز دریاچه نمک قرار دارد با حجم و پتانسیل بالای بهره‌برداری در طی دو دهه اخیر مواجه بوده

- system. Sustainable Development.
8. Kardan Moghaddam, H., Milan, S.G., Kayhomayoon, Z., & Azar, N.A. (2021). The prediction of aquifer groundwater level based on spatial clustering approach using machine learning. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(4), pp.1-20.
 9. Kardan Moghaddam, H., Kivi, Z.R., Bahreinimotlagh, M., & Alizadeh, M.J. (2019). Developing comparative mathematic models, BN and ANN for forecasting of groundwater levels. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100237.
 10. Kayhomayoon, Z., Ghordoyee Milan, S., Arya Azar, N., & Kardan Moghaddam, H. (2021). A new approach for regional groundwater level simulation: clustering, simulation, and optimization. *Natural Resources Research*, pp.1-21.
 11. Kayhomayoon, Z., Azar, N.A., Milan, S.G., Moghaddam, H.K., & Berndtsson, R. (2021). Novel approach for predicting groundwater storage loss using machine learning. *Journal of Environmental Management*, 296, 113237.
 12. Malmir, M., Javadi, S., Moridi, A., Neshat, A., & Razdar, B. (2021). A new combined framework for sustainable development using the DPSIR approach and numerical modeling. *Geoscience Frontiers*, 12(4), 101169.
 13. Ministry of Power. (2011). Prohibition discharge in Hashtgerd plain. (In Persian)
 14. Ministry of Power. (2014). Report of Reduction program and balance groundwater. (In Persian)
 15. Mortazavi Zadeh, F., & Godarzi, M. (2018). Evaluation of Climate Change Impacts on Surface Runoff and Groundwater Using HadGEM2 Climatological Model (Case Study: Hashtgerd). *Journal of Water and Soil*, 32(2), 433-436. (In Persian)
 16. Pandey, V., Shrestha, S., Chapagain, S., & Kazama, F. (2011). A framework for measuring groundwater sustainability. *Environmental Science & Policy*, 14, 396-407.
 17. Samani, S., Moghaddam, H.K., & Zareian, M.J. (2021). Evaluating time series integrated groundwater sustainability: a case study in Salt Lake catchment, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 80(17), 1-13.
 18. Shahedi, M., & Talebi Hossein Abad, F. (2014). Introducing some indices to evaluate the balance of water resources and sustainable development. *Journal of Water and Sustainable Development*, 1(1), 73-79. (In Persian).

ناپایداری شدید از این منظر بسیار حائز اهمیت است. با توجه به قابلیت توزیعی بودن شاخص پایداری آبخوان، تعیین مناطق مناسب برای پیاده‌سازی راه‌کارهای تعادل‌بخشی بسیار حائز اهمیت است.

پی‌نوشت‌ها

1. World Water Assessment Program
2. International Atomic Energy Agency

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Aller, L. (1985). DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
2. Akbari, F., Shourian, M., & Moridi, A. (2021). Optimum crop pattern planning considering surface and groundwater resources Interaction by coupling SWAT, MODFLOW and PSO. *Iran-Water Resources Research*, 56(1), 136-150. [Persian].
3. 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, 72(5), 137-146.
4. Frija, A., Dhehibi, B., Chebil, A., & Villholth, K.G. (2015). Performance evaluation of groundwater management instruments: The case of irrigation sector in Tunisia. *Groundwater for Sustainable Development*, 1(1), 23-32.
5. Juwana, I., Perera, B., & Muttill, N. (2010). A water sustainability index for West Java-Part 2: refining the conceptual framework using Delphi technique. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 62(7), 1641-1652.
6. Lipponen, A. ed. 2007. Groundwater resources sustainability indicators. Paris: UNESCO,
7. Moghaddam, H.K., Banihabib, M.E., Javadi, S., & Randhir, T.O. (2021). A framework for the assessment of qualitative and quantitative sustainable development of groundwater

19. Shemshaki, A., Mohammadi, Y., & Bolourchi, M.J. (2010). Investigation on Confined Aquifer & its Role on Subsidence Occurrence in Hashtgerd Plain. *Journal of Geoscience*, 20 (79), 137-142.
20. Rasaei, A., Sharafati, A., & Kardan Moghaddam, H. (2020). Analysis of groundwater uncertainty in climate change (Case study: Hashtgerd Plain). *Iranian Journal of Ecohydrology*, 7(3), 815-827.
21. Rezaei, M., Mousavi, S.F., Moridi, A., Eshaghi, M., & Karami, H. (2021). An Optimal Socialist Cooperative Game Theory Model in Agricultural Sector (Case Study: Dezful-Andimeshk Plain). *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, 12(Special Issue), pp.719-731.
22. Rezaei, M., Mousavi, S.F., Moridi, A., Gordji, M.E., & Karami, H. (2021). A new hybrid framework based on integration of optimization algorithms and numerical method for estimating monthly groundwater level. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(11), 1-15.
23. Yousefi, H., Omid, M.J., Moridi, A., & Sarang, A. (2021). Groundwater Monitoring Network Design Using Optimized DRASTIC Method and Capture Zone Analysis. *International Journal of Environmental Research*, pp.1-11.