

مقاله پژوهشی

مدیریت منابع آب زیرزمینی آبخوان قم- کهک با استفاده از شبیه‌سازی و اعمال گزینه‌های مختلف

مدیریتی

پریساسادات آشفته^{۱*} و سپیده جلیلی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶

۱-دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه قم

۲-دانشجوی ارشد مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ps.ashofteh@qom.ac.ir

چکیده

اعمال گزینه‌های مدیریتی برای استفاده از منابع آب زیرزمینی به منظور جلوگیری از نابودی آبخوان و خسارت‌های ناشی از افت تراز آب ضروری است. در این مطالعه، با استفاده از مدل‌های GCM و GMS، متغیرهای اقلیمی و آبخوان قم-کهک در دوره مشاهداتی ۱۶ ساله (۲۰۰۱-۲۰۱۷) شبیه‌سازی و واسنجی شدند. ۱۰ گزینه مختلف مدیریتی، (۱) افزایش ۱۵ درصد برداشت بدون لحاظ تغییر اقلیم، (۲) افزایش ۱۵ درصد برداشت با لحاظ تغییر اقلیم (HadCM3-A2)، (۳) افزایش ۱۵ درصد برداشت با لحاظ تغییر اقلیم (Hybrid-A2)، (۴) افزایش ۱۵ درصد برداشت با لحاظ تغییر اقلیم (HadCM3-B2)، (۵) افزایش ۱۵ درصد برداشت با لحاظ تغییر اقلیم (Hybrid-B2)، (۶) کاهش ۱۵ درصد برداشت بدون لحاظ تغییر اقلیم، (۷) کاهش ۱۵ درصد برداشت با لحاظ تغییر اقلیم (HadCM3-A2)، (۸) کاهش ۱۵ درصد برداشت با لحاظ تغییر اقلیم (Hybrid-A2)، (۹) کاهش ۱۵ درصد برداشت با لحاظ تغییر اقلیم (HadCM3-B2)، (۱۰) کاهش ۱۵ درصد برداشت با لحاظ تغییر اقلیم (Hybrid-B2) تعریف و اثرات اعمال آنها بر تراز آب زیرزمینی تحلیل شدند. نتایج نشان دادند که گزینه‌های مدیریتی اول و ششم بهترین گزینه‌ها بودند. در گزینه اول با افزایش برداشت، تراز ۲/۱۸ متر و کمتر از بقیه گزینه‌ها کاهش یافت. در گزینه ششم با کاهش برداشت تراز ۲/۱۴ متر و بیش‌تر از سایر گزینه‌ها افزایش یافت. بیش‌ترین کاهش تراز و کم‌ترین افزایش تراز آبخوان در مدت ۱۶ سال به ترتیب مربوط به گزینه‌های سوم و هشتم به اندازه ۲/۳۸ متر و ۱/۹۴ متر بودند. گزینه مدیریتی سوم بیش‌ترین تأثیر را بر کاهش تراز و گزینه ششم بیش‌ترین تأثیر را بر افزایش تراز آبخوان داشت.

واژه‌های کلیدی: سناریوهای انتشار، مدل GMS، مدل GCM، تراز آب زیرزمینی، مدل Hybrid

Groundwater Resources Management of Qom-Kahak Aquifer Using Simulation and Application of Different Management Options

P-S Ashofteh^{1*}, S Jalili²

Received: October 25, 2021

Accepted: February 5, 2022

1-Associ. Prof., Dept. of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran

2-M.Sc. Student, Dept. of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran

* Corresponding Author, Email: PS.Ashofteh@qom.ac.ir

Abstract

Background and Objectives

Previous researches show that the situation of underground water tables in Iran is dire. Therefore, it is necessary to make changes in the current management of water resources. Also, in the discussions related to the application of water resource management options, the effect of climate change and its related uncertainty have either not been considered or have been rarely considered. The aim of this research was to management of underground water resources of Qom-Kahak aquifer under different options. First, the groundwater flow of the study area was simulated and calibrated using GMS software. Then, 10 management options were applied to the model considering the effects of climate change and without considering these effects, and the aquifer balance status was investigated under the effect of these management options. In order to obtain a suitable solution to balance the water of aquifers, the implementation of this research can be of great help to water resource managers and planners.

Methodology

In this study, using GCM and GMS models, climatic variables and Qom-Kahak aquifer were simulated and calibrated in a 16-year observation period (2001-2007). Ten different management options, (1) 15% increase in withdrawal without climate change, (2) 15% increase in harvest withdrawal in terms of climate change (HadCM3-A2), (3) 15% increase in withdrawal in terms of climate change (Hybrid-A2), (4) 15% increase in withdrawal in terms of climate change (HadCM3-B2), (5) 15% increase in withdrawal in terms of climate change (Hybrid-B2), (6) 15% decrease in withdrawal in terms of climate change, (7) 15% decrease in withdrawal in terms of climate change (HadCM3-A2), (8) 15% reduction in withdrawal in terms of climate change (Hybrid-A2), (9) 15% decrease in withdrawal in terms of climate change (HadCM3-B2), (10) 15% reduction in withdrawal in terms of climate change (Hybrid-B2), was defined and the effects of their application on groundwater level were analyzed.

Findings

The results obtained from the application of the management options of 15% increase in harvesting due to the effects of climate change by the developed Hybrid model and the HadCM3 model showed that the reduction of the underground water level under the A2 scenario is more than the reduction of the level obtained under the B2 scenario. Also, by applying the management options of 15% reduction in harvesting due to the effects of climate change, it was determined that the increase in the aquifer level under the A2 scenario is less than the increase in the level under the B2 scenario. This issue is due to the lower predicted rainfall of these models under the A2 emission scenario. Finally, after examining the results of applying the management option without the effects of climate change and assuming the continuation of the current rainfall trend, it was found that with a 15% reduction in harvesting, the increase in water level is more than other options, and by increasing this amount of harvesting, the reduction in water level is less than that of other options. As a result, it can be concluded that among the management options presented in this research, the options of increasing and decreasing the harvest by 15% without considering the effects of climate change are the best management options and the results indicate a positive reaction of the aquifer to this management option, and in contrast to the management option of increasing and harvest reduction in terms of climate change effects by the developed Hybrid model and the HadCM3 model under the A2 scenario are the worst options.

Conclusion

Using the results of these management options, researchers and users of the Qom-Kahak aquifer can understand the effects of reducing and increasing harvesting and take the necessary solutions and decisions to prevent possible losses. According to the obtained results, applying the option of reducing the harvest by only 15% can be considered as a suitable management solution to improve the situation of the Qom-Kahak aquifer. There are solutions to reduce harvesting in the area, which can be mentioned saving and optimal water consumption in the agricultural sector, preventing the harvesting of unauthorized wells and preventing the digging of new wells, artificial recharge of the aquifer through the drilling of injection wells, continuous monitoring of water consumption, making managers and operators aware of the value of underground water resources, using the results of research conducted in the field of water resources management and cultural works such as making people aware of the value of water through national media, including materials in the field of students' awareness to prevent water wastage, preventing water contamination, etc.

In this research, in order to manage the Qom-Kahak aquifer, the underground water flow was first simulated and calibrated using the GMS model during the observation period (2001-2017). Then, with the aim of improving the condition of the aquifer, different management options of crop change without the effect of climate change and considering these effects were evaluated. The results of applying these management options showed the high importance of harvesting on the water level situation in the future periods. Because after applying the management option of 15% reduction in harvest due to climate change and decrease in rainfall, the underground water level in all observation wells increased.

Keywords: Emission scenarios, GMS model, GCM model, Groundwater level, Hybrid model.

مقدمه

با توجه به افزایش روز افزون تقاضای آب و کاهش منابع آب به دلیل پدیده تغییر اقلیم، ارزیابی شدت اثرات این پدیده، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. بروز این پدیده و افزایش نیازهای آبی باعث کاهش شدید تراز آب زیرزمینی دشت‌ها شده و پیامدهای مخرب زیادی را به دنبال خواهد داشت. بنابراین بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی در اثر تغییر اقلیم و ارائه راهکارهای مناسب مدیریتی حائز اهمیت است. بدین منظور مدیریت آب زیرزمینی با در نظر گرفتن برداشت‌های احتمالی و عدم قطعیت‌های ناشی از مدل‌های مختلف اقلیمی مورد نیاز است. در زمینه مدیریت آب زیرزمینی تحقیقاتی انجام شده است که می‌توان به موارد زیر به تفکیک برای کشورهای خارجی و ایران اشاره کرد.

هولرمن و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی بیلان آب را در حوضه اومه-بونو^۱ واقع در کشور بنین^۲ به کمک مدل شبیه‌سازی کردند و اوضاع منابع آب آن را

تحت سناریوهای مختلف توسعه اجتماعی-اقتصادی و تغییر اقلیم تا سال ۲۰۲۵ تحلیل کردند. نتایج بیانگر آن بود که علاوه بر افزایش فشار بر روی منابع آب بنین، رقابت بر سر آب سطحی نیز بیشتر خواهد شد. کاهش جریان ورودی و تغذیه آب زیرزمینی در نتیجه تغییر اقلیم نیز سهم بسزایی در بدتر کردن اوضاع خواهند داشت و تنها با مدیریت مناسب می‌توان از تبعات منفی آن کاست. محرم و همکاران (۲۰۱۲) برای جلوگیری از کاهش سطح آب زیرزمینی و جلوگیری از آسیب رسیدن به آبخوانی در غرب کشور مصر برای به دست آوردن مقدار بهینه پمپاژ و همچنین تعداد بهینه چاه‌ها در منطقه از مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در کنار مدل MODFLOW استفاده کردند. ایشان با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف به بررسی وضعیت آب زیرزمینی منطقه پرداخته و در نهایت با توجه به بررسی سناریوها و انتخاب بهترین سناریو، مقدار بهینه پمپاژ از چاه‌های منطقه تعیین گردید. لی و همکاران (۲۰۱۵) وضعیت اقلیم آینده منطقه بهنا^۳ واقع در کشور چین را با استفاده از مدل WEAP برای ارزیابی پایدار

³ Bhna

¹ Oueme-Bonou Catchment

² Benin

منابع محدود آب و با تنظیم سناریوهای مختلف توسعه اجتماعی و شهرنشینی تا سال ۲۰۲۰ مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. ایشان سه سناریو شامل شهرسازی، تنظیم ساختار صنعتی و تغییر سیاست در تخصیص منابع آب را تعریف کردند. نتایج نشان دادند که فشار بر منابع آب در آینده افزایش خواهد داشت. همچنین چندین پیشنهاد برای کمک به تصمیم‌گیرندگان در برنامه‌ریزی مدیریت آب برای تقاضای آینده در این منطقه مطرح شد. ژو و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل تلفیقی جریان سطحی و زیرزمینی در شمال غربی چین در حوضه آبردیور^۱ را شبیه‌سازی کردند و با استفاده از اطلاعات این مدل، تخصیص بهینه منابع آب در منطقه را براساس اولویت مصرف، برای سال جاری انجام دادند. نتایج نشان دادند که این منابع در حال حاضر برای نیازهای مهم مانند مصارف روزانه، صنعت و محیط زیست کافی بوده، اما آب کافی برای پاسخگویی به نیازهای بخش کشاورزی قابل کشت، به‌طور مداوم و قطعی وجود نخواهد داشت. همچنین نتایج مدل راه‌هایی برای کاهش بهره‌برداری آب‌های زیرزمینی، برنامه‌ریزی کشاورزی و حفاظت از محیط زیست را نشان دادند. اکتِر و اَحمَد (۲۰۲۱) تغییرات تراز آب زیرزمینی را در یک منطقه شهری در بنگلادش مدل سازی نمودند. ایشان مدل MODFLOW-2005 را برای این منظور به‌کار گرفتند. نتایج نشان دادند که تراز آب زیرزمینی به‌میزان ۴/۷۵ متر در سال کاهش خواهد یافت. کِرسیک و پِنْدی (۲۰۲۱) به مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارست ساحلی پرداختند. ایشان در تحقیق خود از کد MODFLOW-USG code استفاده نمودند. نتایج نشان‌دهنده عملکرد موفق مدل در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی داد.

تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه مدیریت آب زیرزمینی برای کشور ایران در ادامه ارائه شده است. برای مثال، یزدان‌پناه و همکاران (۲۰۰۸) برای مدل

کردن تقاضا، مصارف و ارتباط آنها با منابع تأمین آب در راستای مدیریت منابع آب حوضه آبریز ازغند واقع در استان خراسان رضوی از مدل WEAP استفاده کردند. طبق سناریوهای تعریف‌شده نتایج نشان دادند که (۱) با تغییر الگوی کشت و یا کاهش سطح زیر کشت اراضی کشاورزی می‌توان به شرایط تعادل آب زیرزمینی و احیای آبخوان دست یافت؛ (۲) با استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری، در صورت کاهش سطح زیر کشت می‌توان ذخیره آب زیرزمینی را تا حدودی افزایش داد؛ (۳) استفاده از سامانه‌های تحت فشار همراه با افزایش سطح زیر کشت موجب تشدید افت تراز آب زیرزمینی خواهد شد. دانشور و ثوقی و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی تأثیر خشکسالی بر تراز آب زیرزمینی دشت اردبیل در دو دهه اخیر پرداختند. ایشان از آزمون مان-کندال برای بررسی روند تراز آب زیرزمینی استفاده نمودند. نتایج نشان دادند که به‌طور متوسط تراز آب زیرزمینی حدود ۱۸ سانتی‌متر در سال افت داشت. زاده و کیلی (۲۰۱۲) آب زیرزمینی را در حوضه زاینده‌رود ابتدا با مدل Groundwater Vistas شبیه‌سازی کردند. در ادامه با تلفیق مدل WEAP-MODFLOW برای تعامل آب سطحی و زیرزمینی و مدیریت آبخوان، مدل تدوین‌شده را اجرا نمودند. با توجه به نتایج مدل مذکور در هر گام زمانی می‌توان اثرات تخصیص آب سطحی و زیرزمینی را مشاهده نمود. آنها با اجرای سناریوهای مختلف مدیریتی درصد تأمین نیاز شرب، صنعت، کشاورزی و زیست‌محیطی منطقه و سطح ایستابی آبخوان را مورد بررسی قرار دادند و در نهایت با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی^۲ (AHP) بهترین گزینه مدیریتی انتخاب گردید. جنوبی و همکاران (۲۰۱۳) مدیریت سطح آب زیرزمینی را از طریق تلفیق آب‌های سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW در دشت ارومیه بررسی کردند. ایشان برای اعمال سناریوهای مدیریتی ابتدا

² Analytic Hierarchy Process

¹ Aridriver

جریان آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی را در بازه زمانی (۱۳۷۸-۱۳۸۸) شبیه‌سازی و واسنجی کردند. در این راستا، سناریوی کاهش ۲۵ درصدی پمپاژ و قطع پمپاژ در مناطق غربی دشت، به‌ترتیب موجب بالا آمدن سطح آب زیرزمینی به‌طور متوسط به‌اندازه ۰/۵ تا ۴ متر و افزایش ۲۵ و ۵۰ درصدی پمپاژ در مناطق شرقی دشت، به‌ترتیب موجب افت سطح آب زیرزمینی به‌طور متوسط به اندازه ۱ تا ۳/۵ متر شد. حجی‌پور و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر سناریوهای مدیریتی را بر روی منابع آب دشت بجنورد با استفاده از مدل WEAP ارزیابی کردند. ایشان سناریوهای مختلف مدیریتی از جمله تأمین آب شرب بجنورد، افزایش آب برگشتی، سطح زیر کشت ثابت و سناریوی ترکیبی برای کاهش تقاضای آب را مطرح کردند و اثرات آن را بر روی منابع آب حوضه بررسی کردند. نتایج نشان دادند که استفاده از سناریوی ترکیبی که به‌کارگیری هم‌زمان راهبردهای مختلف مدیریت مصرف آب است، بهتر از حالت استفاده منفرد از هر کدام از آنها است. امیری و همکاران (۲۰۱۶) وضعیت آبخوان دشت میداود-دالون واقع در استان خوزستان را تحت اعمال سناریوهای مختلف مدیریتی با استفاده از مدل GMS بررسی کردند. ایشان جریان آب زیرزمینی را در بازه زمانی مهر ۱۳۹۰ تا اسفند ۱۳۹۱ شبیه‌سازی و واسنجی کردند. در نهایت با اعمال سناریوهای مدیریتی شامل ۱۵ درصد کاهش پمپاژ و ۱۵ درصد افزایش پمپاژ، واکنش آبخوان به تنش واردشده در شرایط ترسالی و خشکسالی، بررسی شد. قبادیان و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از نرم‌افزار GMS نوسانات سطح آب در دشت خزل-نھاوند را برای ۱، ۳ و ۱۰ سال آینده با شرایط کنونی و سناریوی مدیریتی کاهش ۱۰ درصدی پمپاژ چاه‌ها پیش‌بینی کردند. نتایج آن‌ها نشان دادند که با اعمال این سناریوها افت سطح آب زیرزمینی از مقدار ۱/۸۲، ۳/۶، ۸/۲ متر برای ۱، ۳ و ۱۰ سال آینده به‌ترتیب به ۰/۵۲، ۲/۷، ۷/۰۷ متر کاهش خواهد یافت. پورحقی و همکاران (۲۰۱۶) وضعیت

آبخوان دشت نورآباد (استان فارس) را به‌منظور مدیریت بهره‌برداری از آبخوان با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی کردند. اجرای مدل آنها در شرایط خشک‌سالی نشان داد که سطح آب زیرزمینی در دو سال آینده به‌طور متوسط ۲/۰۵- متر افت خواهد کرد که با کاهش ۲۰ درصدی آبدهی چاه‌های بهره‌برداری، این افت به ۱/۳- متر کاهش خواهد یافت. پنجعلی زاده و کمالی (۲۰۱۷) جریان آب زیرزمینی را با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW، در دشت کرمان در بازه زمانی (۱۳۷۸-۱۳۹۰) شبیه‌سازی کردند. پس از شبیه‌سازی، سناریوهای مختلف مدیریتی از قبیل کاهش نرخ برداشت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی به مدل اعمال شد. نتایج حاکی از افزایش تراز آب زیرزمینی در منطقه شهری و همچنین سیر نزولی به‌دلیل برداشت بی‌رویه در سایر قسمت‌های منطقه می‌باشد. کریمی و همکاران (۲۰۲۰) به مدیریت تلفیقی آب‌های سطحی و زیرزمینی دشت مرند (آذربایجان شرقی) پرداختند. ایشان با به‌کارگیری دو مدل WEAP و MODFLOW مصارف آب را ارزیابی نمودند. نتایج نشان دادند که به‌کارگیری هم‌زمان راهبردهای مختلف مدیریتی، بهتر از حالت استفاده مجزا از هر کدام از آن‌ها بود.

تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که وضعیت سفره‌های آب زیر زمینی در ایران وخیم است که به نمونه‌هایی از آن در بالا اشاره شد. بنابراین لازم است در مدیریت فعلی منابع آب تغییر ایجاد نمود. همچنین، در مطالعات و تحقیقات گذشته، در مباحث مربوط به اعمال گزینه‌های مدیریت منابع آب، اثر تغییر اقلیم و عدم قطعیت مربوط به آن، یا در نظر گرفته نشده و یا به ندرت مورد توجه قرار گرفته است. هدف این تحقیق مدیریت منابع آب زیرزمینی آبخوان قم-کهک تحت گزینه‌های مختلف است. ابتدا جریان آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی با استفاده از نرم‌افزار GMS شبیه‌سازی و واسنجی شد. سپس ۱۰ گزینه مدیریتی با در نظر گرفتن اثرات تغییر اقلیم و بدون در نظر گرفتن

وجود آب دائمی تأثیری بر منابع آب زیرزمینی نداشته و تبادلی بین منابع آب سطحی و زیرزمینی وجود ندارد (بی‌نام ۲۰۱۳). به دلیل آن که پارامتر رودخانه در تغذیه منابع آب زیرزمینی آبخوان قم-کهنک تأثیری ندارد، این پارامتر در محاسبات آب زیرزمینی لحاظ نشده است. مهم‌ترین منبع تخلیه آبخوان، چاه‌های بهره‌برداری هستند و این آبخوان جبهه خروجی ندارد. از راه‌های دیگر تخلیه آبخوان، تبخیر و زهکشی از آبخوان است. به دلیل آن که در آبخوان قم-کهنک هیچ‌گونه زهکشی انجام نمی‌شود و به دلیل آن که فاصله تراز سطح ایستابی آب زیرزمینی تا سطح زمین بیش از ۶ متر است و چون آب موجود در آبخوان تا عمق ۵ متری به‌طور مستقیم تبخیر می‌شود، بنابراین تبخیری از آبخوان صورت نمی‌گیرد و این دو پارامتر نیز در محاسبات لحاظ نشده است. بنابراین تنها راه برداشت آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی قم-کهنک چاه‌های بهره‌برداری هستند. کل تعداد چاه‌های بهره‌برداری که برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعت در محدوده آبخوان قم-کهنک مورد استفاده قرار می‌گیرند، حدود ۱۷۰۰ حلقه چاه است که سالانه حجمی معادل ۲۴۸/۵۷۲ میلیون مترمکعب در سال از آبخوان توسط آنها برداشت می‌شود (بی‌نام ۲۰۱۳). بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی برای مصارف کشاورزی، شرب، صنعت و سایر مصارف دیگر عمده‌ترین عامل در کاهش حجم منابع آبی موجود در هر محدوده می‌باشد. براساس اطلاعات جمع‌آوری شده در محدوده طرح، حجم اصلی برداشت از آبخوان قم-کهنک توسط چاه‌های بهره‌برداری یا چاه اصلی انجام می‌شود. لازم به ذکر است که تعداد چاه‌های مجاز در محدوده مورد نظر حدود ۷۷۰ حلقه می‌باشد، این در حالی است که تعداد چاه‌های غیرمجاز حدود ۱۱۷۲ حلقه است، البته بنظر نگارندگان ۹۵/۷ درصد از کل حجم تخلیه توسط چاه‌های مجاز برداشت می‌شود. چاه‌های مشاهده‌ای

این اثرات بر مدل اعمال شدند و وضعیت تراز آبخوان تحت اثر این گزینه‌های مدیریتی مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور به‌دست آوردن راه‌حل مناسب برای ایجاد تعادل در بیلان آبی سفره‌های آبدار، اجرای این تحقیق می‌تواند به مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب کمک شایانی نماید.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

آبخوان قم-کهنک با وسعت حدود ۱۸۱۶۰۰ هکتار در مرکز ایران و در بخش جنوبی استان قم قرار دارد. این محدوده از شمال و غرب، به سایر بخش‌های استان قم محدود شده، از جنوب به شهر کاشان (در استان اصفهان) و از شرق به دریاچه نمک محدود است. این منطقه بین طول‌های شرقی ۵۰ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۲ دقیقه و عرض‌های شمالی ۳۴ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۴۲ دقیقه قرار گرفته است (شکل ۱). ایستگاه سینوپتیک قم و ایستگاه تبخیرسنجی سالاریه مهم‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی داخل محدوده می‌باشند که از اطلاعات آنها به‌عنوان ایستگاه‌های معرف به همراه آمار و اطلاعات سایر ایستگاه‌های مجاور استفاده شد. در این تحقیق اثر پارامتر اقلیمی بارندگی بر وضعیت آب زیرزمینی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. با توجه به این که در داخل محدوده مورد مطالعه ایستگاه سینوپتیک قم و تبخیرسنجی سالاریه قرار دارد و از آنجا که آمار سالاریه مشاهده‌شده و واقعی می‌باشند (بی‌نام ۲۰۱۲)، در این تحقیق از اطلاعات ایستگاه سالاریه که معرف ایستگاه باران‌سنجی در منطقه مورد نظر می‌باشد از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۷ برای انجام محاسبات مربوط به تغذیه آب‌های زیرزمینی از طریق بارش (در مقیاس ماهانه) استفاده شد. بارندگی، مهم‌ترین منبع تغذیه آبخوان است. نفوذ از بستر رودخانه‌ها از عوامل طبیعی دیگر تغذیه سفره آب زیرزمینی هستند و بنظر می‌رسد که رودخانه قمرود در محدوده مطالعاتی قم-کهنک به دلیل فصلی بودن و عدم

شرایط مرزی یک سامانه آبخوان و مشخصات شرایط سطح اولیه سامانه جریان آب زیرزمینی را به صورت ریاضی نشان می دهد. در جریان های پایدار سمت راست رابطه ۱ برابر صفر خواهد بود. یکی از شرایط حل معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر جریان آب زیرزمینی به روش عددی، تقسیم آبخوان به اجزای کوچکتر (سلول های تفاضل محدود) می باشد. در واقع با شبکه بندی آبخوان، محدوده مدل سازی مشخص می شود. برای شبکه بندی آبخوان از ماژول 3D Grid استفاده شد. اندازه سلول های مدل ۵۰۰×۵۰۰ متر در نظر گرفته شده و تعداد سلول های فعال این آبخوان برابر ۱۷۵۰ سلول بود. در این تحقیق با استفاده از روش سعی و خطا مشخص شد که مقادیر ۵۰۰×۵۰۰ برای آبخوان مورد نظر مناسب است.

اعمال مدل های اقلیمی به مدل واسنجی شده GMS

در این تحقیق به منظور مدیریت آبی آبی های زیرزمینی تحت اثر تغییر اقلیم، از داده های بارش پیش بینی شده پنج مدل اقلیمی AOGCM شامل HadCM3، CCSR-NIES، CSIRO-MK2، CGCM2 و GFDL R30 تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 استفاده شده است. بدین منظور از سایت مرکز توزیع داده IPCC (IPCC-DDC 1988)، داده های سری زمانی ماهانه بارش در دوره آبی و پایه از مدل های پنج گانه برای حوضه مورد نظر (با ارائه طول و عرض جغرافیایی محل) قابل دانلود بودند. هرکدام از مدل های اقلیمی AOGCM دارای سلول های محاسباتی شبکه بندی شده ای هستند که بسته به دقت محاسبات شبکه بندی ها با یکدیگر متفاوتند. مقایسه میانگین بلندمدت متغیرهای اقلیمی شبیه سازی شده با داده های مشاهداتی، باعث حذف اغتشاشات درونی مدل های بزرگ مقیاس اقلیمی می شود.

آبخوان که در تمام محدوده سفره آب زیرزمینی پراکنده شده اند، ۲۸ حلقه چاه هستند.

شبیه سازی آبخوان

در این تحقیق با هدف شبیه سازی آبخوان از نظر کمی، از کد MODFLOW تحت نرم افزار GMS استفاده شده است. برای دستیابی به این هدف آبخوان قم- کهک در بازه زمانی (۲۰۰۱-۲۰۱۷) برای شرایط پایدار (اکتبر ۲۰۰۱) و ناپایدار (اکتبر ۲۰۰۱ تا سپتامبر ۲۰۱۷) در گام زمانی ماهانه شبیه سازی و واسنجی شد. مدل GMS پس از دریافت ورودی هایی از قبیل داده های چاه های مشاهداتی، چاه های بهره برداری، داده های بارش و آب برگشتی از چاه های شرب، صنعت و کشاورزی، هدایت هیدرولیکی، اطلاعات زمین شناسی و مرزهای ورودی آبخوان، براساس معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی، محاسبات را انجام داده و نتایج را به صورت تراز آب زیرزمینی ارائه می دهد. MODFLOW معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی را در شرایط پایدار^۱ و ناپایدار^۲ به روش عددی تفاضل محدود در حالت سه بعدی حل می نماید (قدرتی و برزگری ۲۰۱۶). حرکت سه بعدی آب زیرزمینی در محیط متخلخل با رابطه دیفرانسیل جزئی زیر توصیف می شود (بی نام ۲۰۰۰):

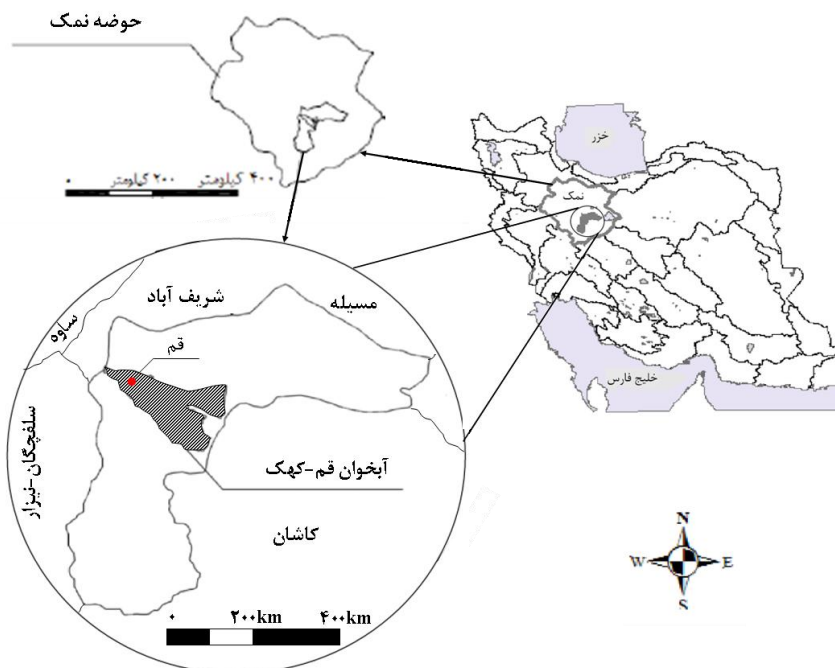
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [1]$$

که در آن، K_{xx} ، K_{yy} و K_{zz} = ضرایب هیدرولیکی در راستاهای x ، y و z برحسب واحد طول بر زمان (L/T) ؛ h = سطح آب برحسب واحد طول (L) ؛ W = میزان تخلیه برحسب حجم؛ S_s = ضریب ذخیره برحسب درصد؛ t = زمان (ماهانه)، هستند.

رابطه ۱ جریان آب زیرزمینی را در یک محیط غیرهمگن و تحت شرایط ناپایدار در راستای محورهای اصلی توصیف می کند. همچنین مشخصات جریان یا

¹ Steady State

² Transient



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی آبخوان قم-کهنک.

تغییر اقلیم بارش به مقادیر بارش در دوره فعلی (۲۰۱۷-۲۰۰۱) اضافه می‌شود.

پس از شبیه‌سازی داده‌های بارش آینده توسط مدل‌های اقلیمی مذکور برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، ابتدا مدل‌ها با استفاده از روش میانگین مشاهداتی بارش وزندهی می‌شوند. این وزندهی براساس اختلاف میانگین بارش شبیه‌سازی‌شده توسط مدل‌های اقلیمی نسبت به میانگین داده‌های فعلی است. سپس مقادیر وزن مدل‌ها و سناریوی تغییر اقلیم وارد نرم‌افزار Simlab شده و از سناریوهای تغییر اقلیم با استفاده از روش تولید نمونه تصادفی که مهم‌ترین روش تولید نمونه در روش شبیه‌سازی مونت کارلو است، ۱۰۰ نمونه به صورت تصادفی انتخاب شد. در نهایت با تکرار عمل تولید نمونه و اجرای مدل به تعداد زیاد، محدوده تغییرات خروجی سامانه که نشان‌دهنده عدم قطعیت خروجی به‌ازای عدم قطعیت‌های پارامترهای ورودی است، به دست آمد و مدل توسعه‌یافته Hybrid که ترکیبی از مدل‌های مختلف اقلیمی است، ساخته شد.

بنابراین از میانگین بلندمدت داده‌های مستخرج از AOGCM استفاده شد. برای محاسبه سناریوی تغییر اقلیم در هر مدل از نسبت میانگین بلندمدت بارش هر ماه در دوره آتی (۲۰۶۹-۲۰۵۴) به میانگین بلندمدت بارش دوره شبیه‌سازی‌شده پایه (۲۰۱۷-۲۰۰۱) توسط همان مدل استفاده گردید (جونز و هولم ۱۹۹۶):

$$\Delta P_i = \left(\frac{\bar{P}_{GCM, fut, i}}{\bar{P}_{GCM, base, i}} \right) \quad [2]$$

که در آن، ΔP_i = سناریوی تغییر اقلیم بارش برای هر ماه، $\bar{P}_{GCM, fut, i}$ = میانگین بلندمدت ۱۶ ساله شبیه‌سازی‌شده توسط AOGCM در دوره آتی (در اینجا ۲۰۶۹-۲۰۵۴) برای هر ماه، $\bar{P}_{GCM, base, i}$ = میانگین بلندمدت ۱۶ ساله بارش شبیه‌سازی‌شده توسط AOGCM در دوره مشاهداتی (۲۰۱۷-۲۰۰۱) برای هر ماه می‌باشد.

در این تحقیق برای ریزمقیاس‌نمایی از روش عامل تغییر استفاده شده است. برای به دست آوردن مقادیر بارش آینده (۲۰۶۹-۲۰۵۴)، مقادیر سناریوی

نشان‌دهنده سازگاری مدل شبیه‌سازی شده با نمونه واقعی آن در طبیعت است. اکنون این مدل تدقیق شده برای حالت مشاهداتی، قابلیت پیش‌بینی وضعیت آینده و اعمال گزینه‌های مدیریتی را دارد. قبل از اعمال گزینه‌های مدیریتی با لحاظ کردن اثر تغییر اقلیم، باید سری زمانی بارش در دوره آتی توسط مدل‌های اقلیمی شبیه‌سازی شود. برای دستیابی به این هدف، ابتدا کارآئی این مدل‌ها با استفاده از معیارهای ارزیابی خطای MAE ، $RMSE$ و r برای تمام مدل‌ها تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- معیارهای ارزیابی خطا در مدل‌های اقلیمی تحت سناریوی A2 و B2.

A2			
Model	MAE (mm)	RMSE (mm)	r (بدون بعد)
HadCM3	۶/۴	۹/۸	۰/۷۷
CCSR-NIES	۸/۵	۹/۴	۰/۶۲
CSIRO-MK2	۱۰/۹	۱۶/۹	۰/۵۹
CGCM2	۲۳/۲	۳۴/۳	۰/۵۸
GFDL R30	۹/۷	۱۴/۴	۰/۷۶
B2			
Model	MAE (mm)	RMSE (mm)	r (بدون بعد)
HadCM3	۵/۵	۷/۱	۰/۸۲
CCSR-NIES	۸/۸	۱۰/۱	۰/۵۸
CSIRO-MK2	۱۱/۷	۱۵/۵	۰/۵۶
CGCM2	۲۱/۱	۳۱/۵	۰/۵۶
GFDL R30	۱۰/۰	۱۲/۱	۰/۸۳

وضعیت آبخوان در دوره آتی پس از اعمال هر یک از گزینه‌های مدیریتی بررسی شد. در ادامه یافته‌های حاصل از اعمال گزینه‌های مختلف مدیریتی بر تراز آب زیرزمینی آینده آبخوان قم-کهک ارائه شده است.

(۱) افزایش ۱۵ درصد برداشت با لحاظ اثرات تغییر اقلیم توسط مدل HadCM3 (تحت سناریوی A2 و B2) در این گزینه مدیریتی فرض شد به دلیل افزایش جمعیت و خشک‌سالی، تقاضا افزایش یافته و پدیده تغییر اقلیم، بارش را تغییر داده است. بنابراین مقدار برداشت تمام چاه‌های بهره‌برداری آبخوان مورد نظر در تمام گام‌های زمانی ماهانه به مقدار ۱۵ درصد افزایش داده شد و بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل

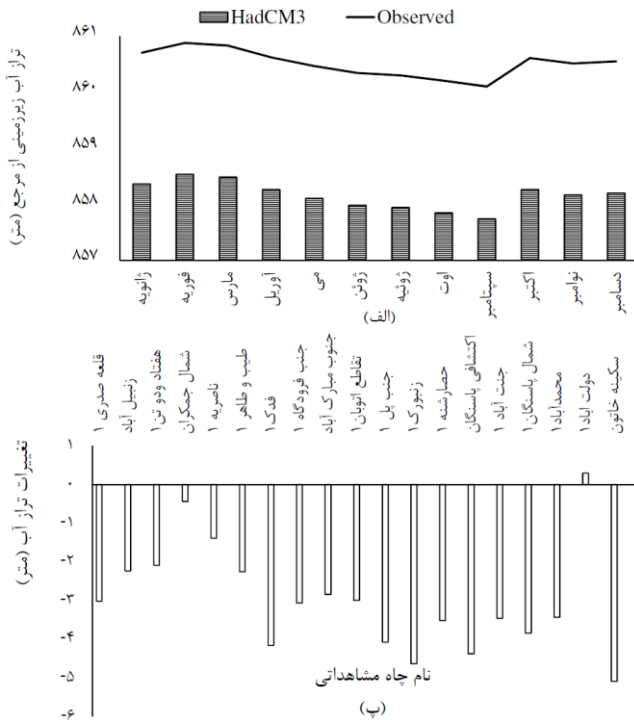
با این کار عدم قطعیت مربوط به مدل‌های اقلیمی سنجیده شد.

نتایج و بحث

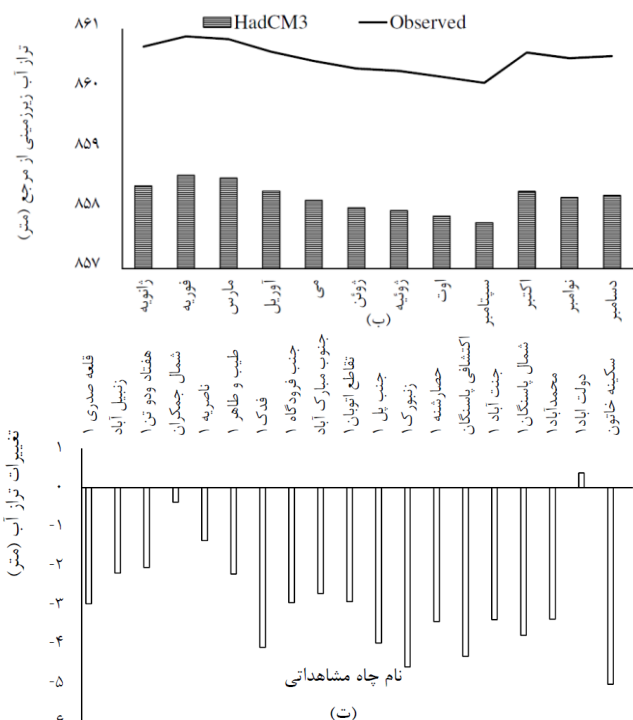
همانطور که اشاره شد، به منظور مدیریت منابع آب زیرزمینی ابتدا جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل GMS در دو حالت پایدار و ناپایدار شبیه‌سازی و واسنجی شد. پس از واسنجی مدل GMS، مقادیر معیارهای ارزیابی خطای MAE ، $RMSE$ و ME برای حالت پایدار به ترتیب برابر با ۰/۵۴، ۰/۴۸ و ۰/۰۴- و برای حالت ناپایدار به ترتیب برابر با ۱/۴۵، ۱/۲۵ و ۰/۰۲- بر حسب متر به دست آمد. این مقادیر

همانطور که در جدول ۱ مشخص است، از بین مدل‌های اقلیمی مذکور، مدل HadCM3 تحت هر دو سناریوی انتشار A2 و B2 بهترین کارآئی را نسبت به دیگر مدل‌ها داشته و داده‌های اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط این مدل شباهت زیادی با داده‌های اقلیمی مشاهداتی دارند. بنابراین در این تحقیق، برای مدیریت آب‌های زیرزمینی از مدل HadCM3 (بهترین مدل اقلیمی) و مدل توسعه یافته Hybrid (برای تحلیل عدم قطعیت) تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 استفاده شده است. در نهایت پس از ساخت مدل توسعه یافته Hybrid، گزینه‌های مختلف مدیریتی با لحاظ اثر تغییر اقلیم و بدون لحاظ این اثرات، به مدل GMS معرفی شد و

۲۰۶۹-۲۰۵۴) نسبت به این گزینه مدیریتی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲).



HadCM3, یکبار تحت سناریوی انتشار A2 و بار دیگر تحت سناریوی انتشار B2 به مدل معرفی شد. پس از اجرای مدل، وضعیت تراز آبخوان در دوره آتی

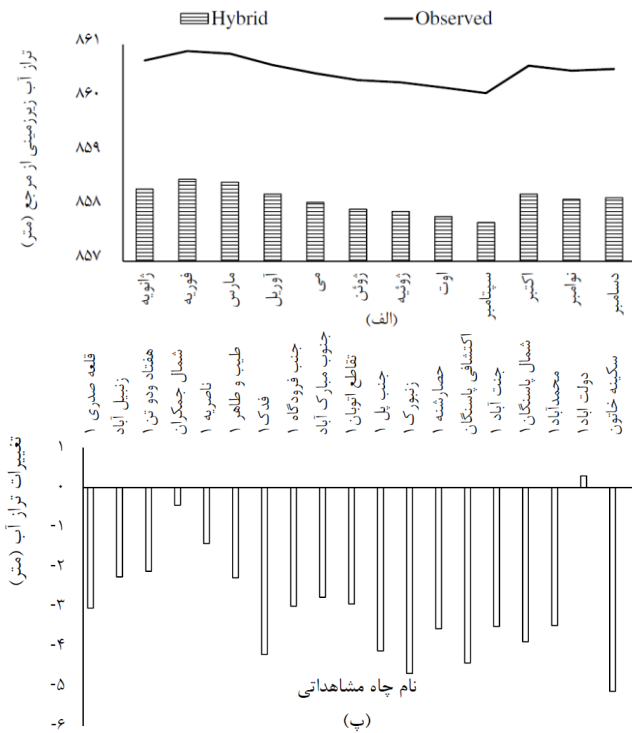


شکل ۲- اعمال گزینه مدیریتی ۱۵ درصد افزایش برداشت با لحاظ اثرات تغییر اقلیم توسط مدل HadCM3 (الف) هیدروگراف واحد آبخوان قم-کهک تحت سناریوی انتشار A2، (ب) هیدروگراف واحد آبخوان قم-کهک تحت سناریوی انتشار B2، (پ) میزان افت تراز آب زیرزمینی در بازه آتی نسبت به بازه فعلی تحت سناریوی انتشار A2 و (ت) میزان افت تراز آب زیرزمینی در بازه آتی نسبت به بازه فعلی تحت سناریوی انتشار B2.

همچنین در شکل ۲ (پ) و (ت) میزان افت تراز آب در تمام چاه‌های مشاهداتی تحت اعمال گزینه مدیریتی اول نشان داده شده است. در این گزینه مدیریتی در دوره آتی (۲۰۶۹-۲۰۵۴)، دامنه تغییرات میزان افت چاه‌های مشاهداتی تحت سناریوی انتشار A2 از $+0/29$ تا $-0/08$ متر و تحت سناریوی انتشار B2 از $+0/37$ تا $-0/02$ متر در تغییر است. با توجه به شکل ۳ کمترین میزان افت تحت هر دو سناریوی انتشار در چاه مشاهداتی شمال جمران در ناحیه غربی آبخوان و بیشترین میزان افت در هر دو سناریو در چاه مشاهداتی سکینه خاتون در جنوب شرقی آبخوان رخ داده است. پس از اعمال این گزینه‌های مدیریتی بیشترین محدودده دارای افت در ناحیه جنوب شرقی آبخوان و اطراف روستای پاسنگان رخ داده است.

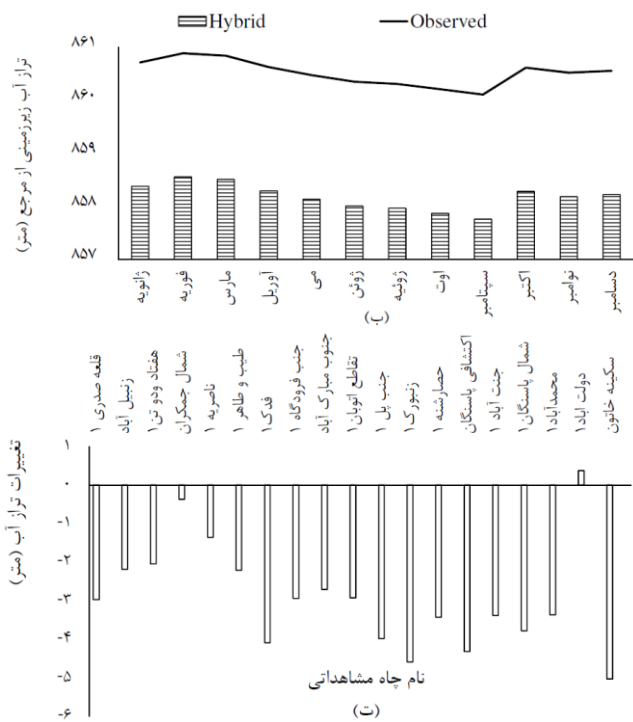
با توجه به شکل ۲ (الف) و (ب) با اعمال این گزینه مدیریتی تحت هر دو سناریوی انتشار A2 و B2 تراز آب زیرزمینی نسبت به وضعیت فعلی پایین آمده است. همان‌طور که مشخص است بیشترین میزان افت تراز مربوط به ماه‌های گرم و خشک سال می‌باشد. مقدار میانگین بلندمدت تراز آب زیرزمینی در حالت ۱۵ درصد افزایش برداشت با لحاظ کردن اثر تغییر اقلیم تحت سناریوی A2 و B2 به ترتیب به میزان $2/36$ متر و $2/33$ متر نسبت به عدم اعمال گزینه‌های مدیریتی کاهش یافته است. در بخش‌هایی از نمودار شکل ۲ که تراز آب زیرزمینی مقداری افزایش یافته است، به این علت است که در آن ماه بارش افزایش یافته است و به این دلیل تراز آب زیرزمینی افت کمتری داشته است.

درصد افزایش یافته و بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل توسعه‌یافته Hybrid تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 به منظور لحاظ کردن اثر تغییر اقلیم وارد نرم‌افزار GMS شده است تا واکنش آبخوان تحت این گزینه مدیریتی بررسی شود [شکل ۳ (الف) و (ب)].



(۲) افزایش ۱۵ درصد برداشت با لحاظ اثرات تغییر اقلیم توسط مدل توسعه‌یافته Hybrid (تحت سناریوی A2 و B2)

در این گزینه مدیریتی نیز با فرض افزایش تقاضا در آینده و برداشت از چاه‌های غیرمجاز آبخوان مقدار برداشت تمام چاه‌ها به صورت ماهانه، به میزان ۱۵



شکل ۳- اعمال گزینه مدیریتی ۱۵ درصد افزایش برداشت با لحاظ اثرات تغییر اقلیم توسط مدل Hybrid (الف) هیدروگراف واحد آبخوان قم- کهک تحت سناریوی انتشار A2، (ب) هیدروگراف واحد آبخوان قم- کهک تحت سناریوی انتشار B2، (پ) میزان افت تراز آب زیرزمینی در بازه آتی نسبت به بازه فعلی تحت سناریوی انتشار A2 و (ت) میزان افت تراز آب زیرزمینی در بازه آتی نسبت به بازه فعلی تحت سناریوی انتشار B2.

مدیریتی دوم ارائه شده است. در این گزینه مدیریتی دامنه تغییرات میزان افت چاه‌های مشاهداتی تحت سناریوی انتشار A2 از $+0/29$ تا $-0/12$ متر و تحت سناریوی انتشار B2 از $+0/37$ تا $-0/03$ متر در تغییر است. در این گزینه مدیریتی مانند گزینه مدیریتی اول، کم‌ترین میزان افت تحت هر سناریوهای انتشار A2 و B2 در چاه مشاهداتی شمال جمکران به ترتیب برابر $-0/44$ متر و $-0/37$ متر می‌باشد. همچنین بیش‌ترین میزان افت در هر سناریوهای انتشار A2 و B2 در چاه

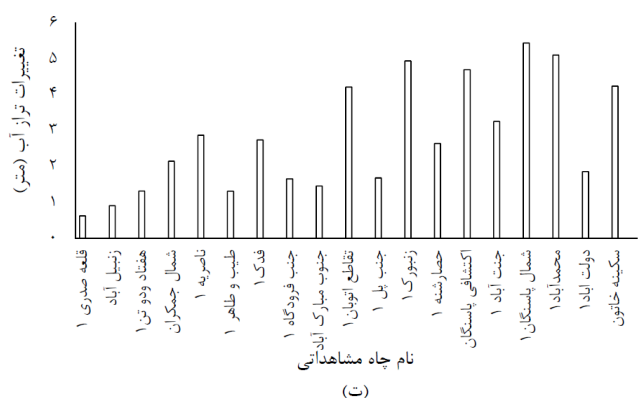
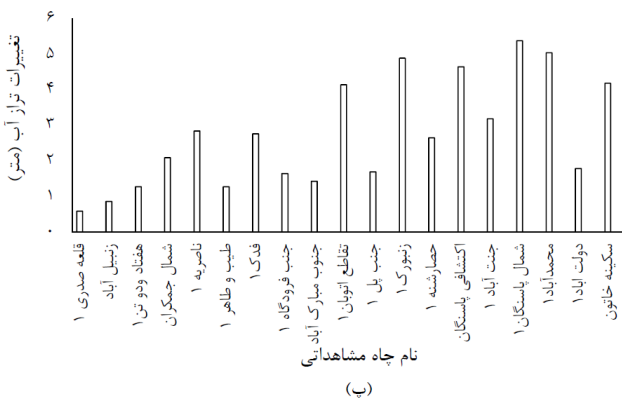
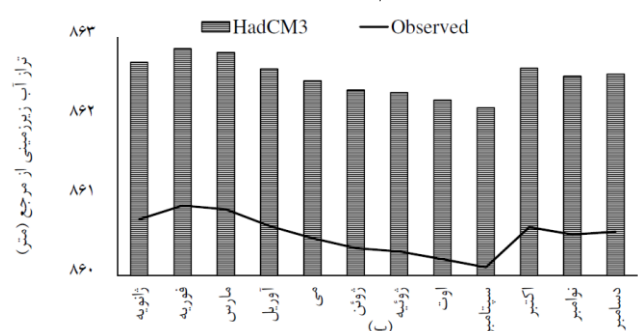
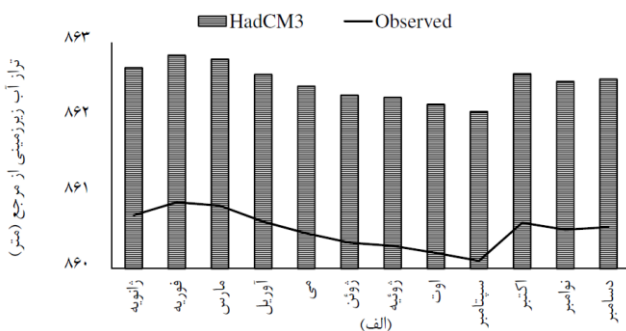
همان‌طور که در شکل ۳ (الف) و (ب) مشخص است در اثر اعمال این گزینه مدیریتی نیز تراز آب زیرزمینی به‌ویژه در فصل تابستان افت می‌کند. مقدار میانگین بلندمدت تراز آب زیرزمینی در حالت ۱۵ درصد افزایش تراز و با در نظر گرفتن اثر تغییر اقلیم تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 به ترتیب به میزان $2/38$ متر و $2/33$ متر نسبت به وضعیت موجود و عدم اعمال گزینه‌های مدیریتی کاهش خواهد یافت.

همچنین در شکل ۳ (پ) و (ت) میزان افت تراز آب در هر یک از چاه‌های مشاهداتی تحت اعمال گزینه

کاهش یافته است. علاوه بر کاهش برداشت، میزان بارش فعلی تغییر یافته و بارش شبیه‌سازی شده توسط HadCM3 تحت دو سناریوی انتشار A2 و B2 به مدل معرفی شده است. پس از اعمال این گزینه مدیریتی، وضعیت تراز آبخوان مورد بررسی قرار گرفت [شکل ۴ (الف) و (ب)].

مشاهداتی سکینه خاتون به ترتیب برابر با ۵/۱۲- متر و ۵/۰۳- متر پیش‌بینی شده است.

(۳) کاهش ۱۵ درصد برداشت با لحاظ اثرات تغییر اقلیم توسط مدل HadCM3 (تحت سناریوی A2 و B2) در این گزینه مدیریتی فرض شده است که به دلیل مدیریت برداشت از آبخوان و صرفه‌جویی در مصرف، برداشت از تمام چاه‌ها به میزان ۱۵ درصد



شکل ۴- اعمال گزینه مدیریتی ۱۵ درصد کاهش برداشت با لحاظ اثرات تغییر اقلیم توسط مدل HadCM3 (الف) هیدروگراف واحد آبخوان قم-کهک تحت سناریوی انتشار A2، (ب) هیدروگراف واحد آبخوان قم-کهک تحت سناریوی انتشار B2. (پ) میزان افت تراز آب زیرزمینی در بازه آبی نسبت به بازه فعلی تحت سناریوی انتشار A2 و (ت) میزان افت تراز آب زیرزمینی در بازه آبی نسبت به بازه فعلی تحت سناریوی انتشار B2.

آب زیرزمینی تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 به ترتیب به میزان ۱/۹۶ متر و ۱/۹۹ متر نسبت به وضعیت کنونی و قبل از اعمال گزینه مدیریتی افزایش تراز خواهیم داشت.

همچنین در شکل ۴ (پ) و (ت) وضعیت تراز تمام چاه‌های مشاهداتی پس از اعمال گزینه مدیریتی آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، با کاهش ۱۵ درصدی برداشت تحت اثر تغییر اقلیم و با وجود کاهش بارندگی در آینده، تراز تمام چاه‌های مشاهداتی

با توجه به شکل ۴ (الف) و (ب) با کاهش برداشت تحت اثر تغییر اقلیم، تراز آب زیرزمینی افزایش یافت. در این گزینه مدیریتی متوسط بارش پیش‌بینی شده توسط مدل HadCM3 تحت هر دو سناریوی انتشار، کمتر از متوسط بارش آبخوان است ولی با کاهش برداشت، تراز آب زیرزمینی افزایش یافته است. این موضوع بیانگر تأثیر قابل توجه برداشت بر روی تراز آب زیرزمینی آبخوان قم-کهک می‌باشد. پس از اعمال این گزینه مدیریتی مقدار میانگین بلندمدت تراز

مشاهداتی تحت سناریوی انتشار A2 از ۰/۵۶ تا ۰/۳۲+ متر و تحت سناریوی انتشار B2 از ۰/۶۱ تا ۰/۳۸+ متر در تغییر است. در این گزینه مدیریتی کم‌ترین افزایش تراز تحت هر سناریوهای انتشار A2 و B2 در چاه مشاهداتی قلعه صدی ۱ به ترتیب برابر ۰/۵۶+ متر و ۰/۶۱+ متر می‌باشد. هم‌چنین بیش‌ترین افزایش تراز در هر سناریوهای انتشار A2 و B2 در چاه شمال پاسنگان به ترتیب برابر با ۰/۳۲+ متر و ۰/۳۸+ متر پیش‌بینی شده است.

(۵) وضعیت تراز آبخوان بدون لحاظ اثرات تغییر اقلیم (تحت افزایش و کاهش برداشت)

با توجه به اعمال گزینه‌های مدیریتی کاهش برداشت با در نظر گرفتن اثرات تغییر اقلیم، مشخص شد که با وجود کاهش بارندگی در دوره‌های آتی، کاهش برداشت باعث بهبودی وضعیت آبخوان شده و تراز آب زیرزمینی در تمام چاه‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه می‌توان دریافت که برداشت از آبخوان قم-کهک مهم‌ترین عامل تغییر تراز آب زیرزمینی در این منطقه می‌باشد. بنابراین برای بررسی بیش‌تر برداشت از آبخوان، گزینه‌های مدیریت دیگری تحت عنوان افزایش و کاهش برداشت با فرض تغذیه ثابت بدون در نظر گرفتن اثر تغییر اقلیم مطرح شد. شکل ۶ (الف) و (ب) وضعیت آبخوان را در نتیجه اعمال این گزینه‌های مدیریتی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۶ (الف) و (ب) مشخص است، با اعمال گزینه مدیریتی افزایش ۱۵ درصدی برداشت، میانگین بلندمدت تراز آب زیرزمینی به میزان ۲/۱۸ متر نسبت به وضعیت فعلی پایین آمده و با کاهش ۱۵ درصدی برداشت میانگین بلندمدت تراز آبخوان به میزان ۲/۱۴ متر نسبت به عدم اعمال گزینه‌های مدیریتی افزایش یافته است. در شکل ۶ (پ) و (ت) دامنه تغییرات تراز چاه‌های مشاهداتی در حالت افزایش و کاهش برداشت، آورده شده است. با توجه به شکل ۶ (پ) با افزایش ۱۵ درصدی برداشت با فرض تغذیه ثابت، تراز آب در تمام چاه‌ها کاهش یافته است و

افزایش یافته و وضعیت آبخوان بهبود یافته است. بنابراین در بحث مدیریت آبخوان قم-کهک، کاهش دست‌کم ۱۵ درصد برداشت از آبخوان موردنظر می‌تواند تأثیر مثبتی در وضعیت تراز آب زیرزمینی آینده داشته باشد. با توجه به شکل ۷ پس از اعمال این گزینه مدیریتی، تحت سناریوی انتشار A2 و B2 بیش‌ترین افزایش تراز در چاه مشاهداتی شمال پاسنگان ۱ به ترتیب برابر با ۰/۳۷+ و ۰/۴۳+ متر و کم‌ترین افزایش تراز در چاه قلعه صدی ۱ به ترتیب برابر با ۰/۵۸+ و ۰/۶۸+ متر می‌باشد.

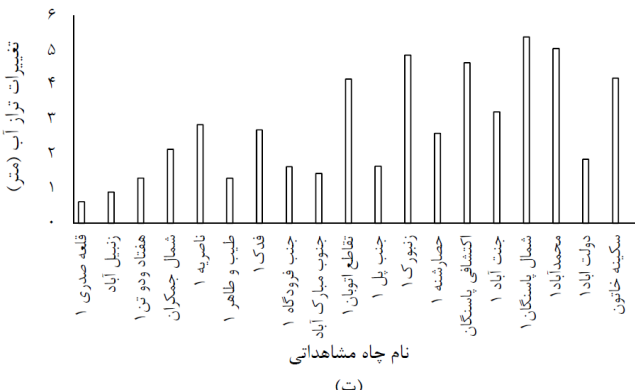
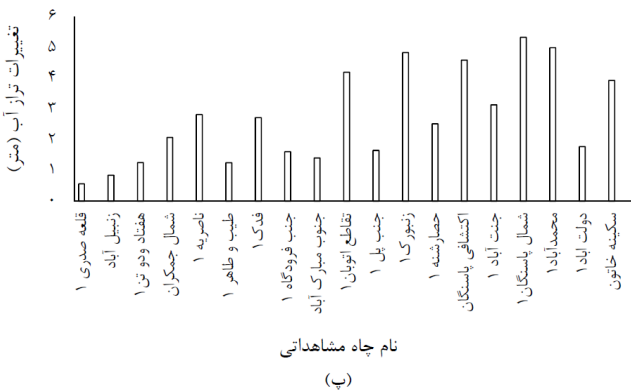
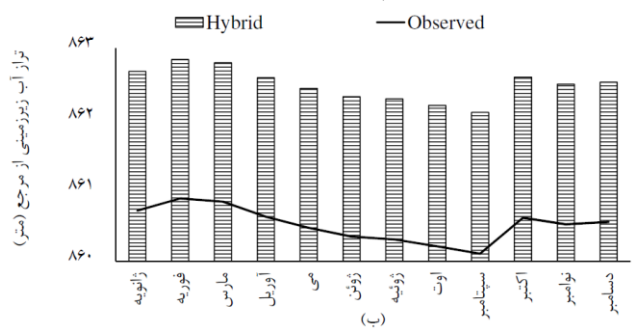
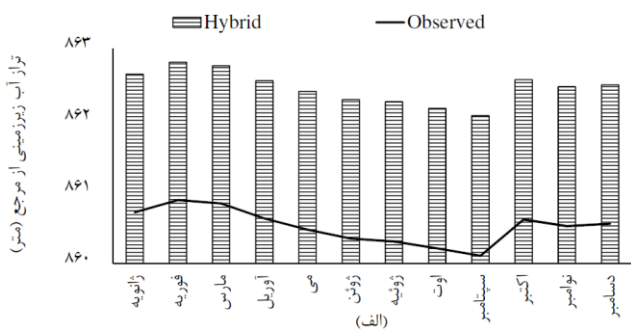
(۴) کاهش ۱۵ درصد برداشت با لحاظ اثرات تغییر اقلیم توسط مدل توسعه‌یافته Hybrid (تحت سناریوی A2 و B2)

در این گزینه مدیریتی نیز مقدار برداشت از تمام چاه‌های بهره‌برداری در تمام گام‌های زمانی به میزان ۱۵ درصد کاهش یافت و بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل توسعه‌یافته Hybrid تحت دو سناریوی انتشار A2 و B2 به مدل معرفی شد. پس از اجرای مدل واکنش آبخوان نسبت به اعمال این گزینه مورد بررسی قرار گرفت [شکل ۵ (الف) و (ب)]. با توجه به شکل ۵ (الف) و (ب)، در اثر اعمال این گزینه مدیریتی نیز تراز آب زیرزمینی افزایش یافته است و بیش‌ترین افزایش تراز مربوط به فصول پاییز و زمستان می‌باشد. مقدار میانگین بلندمدت تراز آب زیرزمینی در حالت ۱۵ درصد کاهش برداشت و با در نظر گرفتن اثر تغییر اقلیم تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 به ترتیب به میزان ۱/۹۴ متر و ۱/۹۷ متر نسبت به شرایط عدم اعمال گزینه‌های مدیریتی افزایش خواهد یافت. در ادامه در شکل ۵ (پ) و (ت) میزان افزایش تراز آب در هر یک از چاه‌های مشاهداتی تحت اعمال این گزینه‌های مدیریتی ارائه شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، در این گزینه مدیریتی نیز در اثر کاهش برداشت و کاهش بارش آینده، تراز آب زیرزمینی در تمام چاه‌ها افزایش یافته است. دامنه تغییرات میزان افزایش تراز چاه‌های

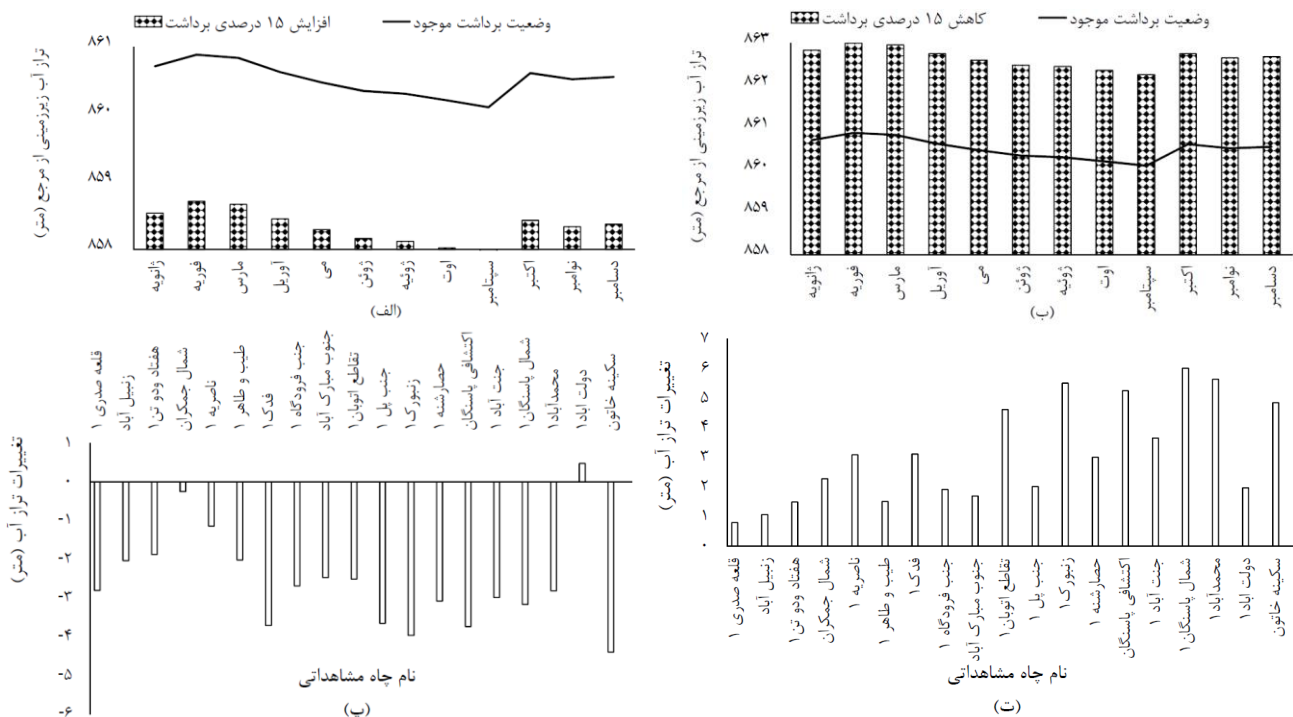
غیر این صورت خسارات زیادی ناشی از افت شدید تراز آب زیرزمینی آبخوان در سال‌های آتی وجود دارد. فتاحی (۲۰۱۴) در تحقیقی به بررسی روند تغییرات منابع آب سطحی و زیرزمینی استان قم پرداختند. نتایج بررسی ایشان نشان دادند که تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت قم، تا قبل از سال ۱۳۷۰ حدود ۵ درصد متر در سال افت داشته است که در مجموع، افتی معادل ۹ متر را نسبت به قبل از دوره بررسی (سال ۱۳۷۰) نشان داد و به‌طور متوسط، افتی برابر با ۱/۶ متر در سال داشته و بیلان آب زیرزمینی، کاهش قابل توجهی را نشان داد. ایشان در تحقیق خویش اثر تغییر اقلیم را لحاظ نمودند. این در حالی است که تغییر اقلیم با تغییر در متغیرهای اقلیمی می‌تواند میزان تغذیه به آبخوان‌ها را کاهش دهد. به‌عنوان مثال، مقدم و همکاران (۲۰۲۱) اثرات تغییر اقلیم بر میزان تغذیه آبخوان تحت چهار سناریوی B2-2040-2069، A2-2040-2069، A2-2070-2099، B2-2040-2069، 2040-2069 را بررسی نمودند. نتایج نشان دادند که تغذیه آبخوان تحت چهار سناریوی مذکور به ترتیب به میزان ۱/۴۳، ۵/۷۱، ۲/۸۶، ۷/۱۴ درصد کاهش را نشان دادند.

تنها در چاه مشاهداتی دولت آباد به مقدار جزئی ۰/۴۸ متر افزایش تراز مشاهده می‌شود. دامنه تغییرات میزان افت چاه‌های مشاهداتی از ۰/۴۸ تا ۴/۳۸- متر در تغییر است. بیش‌ترین کاهش تراز مانند سایر گزینه‌های مدیریتی، مربوط به چاه سکینه خاتون در جنوب شرقی آبخوان می‌باشد. هم‌چنین شکل ۶ (ت) وضعیت آبخوان را نسبت به اعمال گزینه مدیریتی ۱۵ درصد کاهش برداشت بدون تغییر بارش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در گزینه مدیریتی کاهش برداشت، تراز در تمام چاه‌ها بالا آمده و آبخوان بهبود یافته است. دامنه تغییرات افزایش تراز چاه‌های مشاهداتی در این گزینه مدیریتی از ۰/۷۹+ تا ۶/۰۲+ متر در تغییر است. بنابراین، کاهش تنها ۱۵ درصد برداشت می‌تواند تأثیر بسیار مطلوبی بر وضعیت آب زیرزمینی آینده آبخوان قم-کهنک داشته باشد.

با توجه به شناخت اهمیت میزان برداشت بر وضعیت آبخوان و تأثیر کم بارش در منطقه مورد نظر، ضروری است که مدیران و مسئولان منابع آب قم به‌منظور بهبود وضعیت آبخوان قم-کهنک، تصمیمات لازم در راستای مدیریت بهره‌برداری از چاه‌های مجاز و جلوگیری از برداشت چاه‌های غیرمجاز اتخاذ کنند. در



شکل ۵- اعمال گزینه مدیریتی ۱۵ درصد کاهش برداشت با لحاظ اثرات تغییر اقلیم توسط مدل Hybrid (الف) هیدروگراف واحد آبخوان قم-کهک تحت سناریوی انتشار A2، (ب) هیدروگراف واحد آبخوان قم-کهک تحت سناریوی انتشار B2، (پ) میزان افت تراز آب زیرزمینی در بازه آتی نسبت به بازه فعلی تحت سناریوی انتشار A2 و (ت) میزان افت تراز آب زیرزمینی در بازه آتی نسبت به بازه فعلی تحت سناریوی انتشار B2.



شکل ۶- اعمال گزینه مدیریتی بدون لحاظ اثرات تغییر اقلیم (الف) هیدروگراف واحد آبخوان قم-کهک در شرایط افزایش ۱۵ درصدی برداشت، (ب) هیدروگراف واحد آبخوان قم-کهک در شرایط کاهش ۱۵ درصدی برداشت، (پ) میزان افت تراز آب زیرزمینی در بازه آتی نسبت به بازه فعلی در شرایط افزایش ۱۵ درصدی برداشت و (ت) میزان افزایش تراز آب زیرزمینی در بازه آتی نسبت به بازه فعلی در شرایط کاهش ۱۵ درصدی برداشت.

A2 می‌باشد. در نهایت پس از بررسی نتایج حاصل از اعمال گزینه مدیریتی بدون اثرات تغییر اقلیم و با فرض ادامه روند بارش فعلی مشخص شد که با کاهش ۱۵ درصد برداشت، افزایش تراز بیش‌تر از سایر گزینه‌ها بوده و با افزایش این مقدار برداشت، کاهش تراز آب کم‌تر از دیگر گزینه‌ها می‌باشد. در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که از بین گزینه‌های مدیریتی مطرح‌شده در این پژوهش گزینه‌های افزایش و کاهش ۱۵ درصد برداشت بدون لحاظ اثرات تغییر اقلیم بهترین گزینه‌های مدیریتی بوده و نتایج حاکی از واکنش مثبت آبخوان به این گزینه مدیریتی است، و در مقابل گزینه مدیریتی افزایش و کاهش برداشت با لحاظ اثرات تغییر اقلیم توسط مدل

نتیجه‌گیری کلی

نتایج به‌دست‌آمده از اعمال گزینه‌های مدیریتی ۱۵ درصد افزایش برداشت با لحاظ اثرات تغییر اقلیم توسط مدل توسعه‌یافته Hybrid و مدل HadCM3 نشان دادند که کاهش تراز آب زیرزمینی تحت سناریوی A2، بیش‌تر از کاهش تراز به‌دست‌آمده تحت سناریوی B2 می‌باشد. همچنین با اعمال گزینه‌های مدیریتی ۱۵ درصد کاهش برداشت با لحاظ اثرات تغییر اقلیم توسط مدل‌های اقلیمی مذکور مشخص شد که افزایش تراز آبخوان تحت سناریوی A2 کم‌تر از افزایش تراز تحت سناریوی B2 است. این موضوع به‌دلیل بارش پیش‌بینی‌شده کم‌تر این مدل‌ها تحت سناریوی انتشار

غیرمجاز و ممانعت از حفر چاه جدید، تغذیه مصنوعی آبخوان از طریق حفر چاه‌های تزریق، نظارت مداوم بر مصرف اصولی آب، آگاه‌سازی مدیران و بهره‌برداران از ارزش منابع آب زیرزمینی، استفاده از نتایج تحقیقات انجام‌شده در زمینه مدیریت منابع آب و کارهای فرهنگی از قبیل آگاه‌سازی مردم از ارزش آب از طریق رسانه‌های ملی، گنجاندن مطالبی در زمینه آگاهی دانش‌آموزان برای جلوگیری از هدر دادن آب، جلوگیری از آلوده شدن آب و غیره اشاره کرد.

در این تحقیق به منظور مدیریت آبخوان قم-کهک، ابتدا جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل GMS در دوره مشاهداتی (۲۰۱۷-۲۰۰۱) شبیه‌سازی و واسنجی شد. سپس با هدف بهبود وضعیت آبخوان، گزینه‌های مختلف مدیریتی تغییر برداشت بدون اثر تغییر اقلیم و با در نظر گرفتن این اثرات مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از اعمال این گزینه‌های مدیریتی نشان‌دهنده اهمیت بالایی میزان برداشت بر وضعیت تراز آبخوان در دوره‌های آتی بود. چرا که پس از اعمال گزینه مدیریتی کاهش ۱۵ درصدی برداشت در اثر تغییر اقلیم و کاهش بارش، تراز آب زیرزمینی در تمام چاه‌های مشاهداتی روند افزایشی داشتند.

توسعه‌یافته Hybrid و مدل HadCM3 تحت سناریوی A2، بدترین گزینه‌ها هستند. محرم و همکاران (۲۰۱۲) نیز برای بررسی وضعیت آب زیرزمینی، با در نظر گرفتن گزینه‌های مختلف مدیریتی بهترین گزینه و مقدار بهینه برداشت را تعیین کردند.

در نتیجه با توجه به تأثیر قابل توجه برداشت در تغییر تراز آب زیرزمینی به منظور مدیریت آبخوان قم-کهک، می‌توان با وجود میزان بارندگی کم در آینده با اعمال گزینه‌های مدیریتی کاهش برداشت از افت شدید تراز آب زیرزمینی و نابودی آبخوان جلوگیری کرد. پژوهش‌گران و بهره‌برداران از آبخوان قم-کهک با استفاده از نتایج این گزینه‌های مدیریتی می‌توانند به اثرات ناشی از کاهش و افزایش برداشت پی ببرند و راهکارها و تصمیمات لازم را برای جلوگیری از خسارات احتمالی اتخاذ کنند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده اعمال گزینه کاهش تنها ۱۵ درصد برداشت را می‌توان راهکار مدیریتی مناسبی برای بهبودی وضعیت آبخوان قم-کهک دانست. راهکارهایی برای کاهش برداشت در منطقه مورد نظر وجود دارد که می‌توان به صرفه‌جویی و مصرف اصولی و بهینه آب در بخش کشاورزی، جلوگیری از برداشت چاه‌های

منابع مورد استفاده

- Akter A and Ahmed Sh, 2021. Modeling of groundwater level changes in an urban area. *Sustainable Water Resources Management* 7 (7): 1-20.
- Amiri R, Mirzaei SY, Chitsazan M and Nadri A, 2016. Investigation of the status of aquifer of Medavad-Dalun plain under applied management scenarios using the GMS model. In: *Proceedings of the First National Water Management Congress with the Approach of Optimal Water Use in Agriculture*, Hamedan Regional Water Company, Hamedan, Iran, 12 Aug. (In Persian with English abstract).
- Anonymous, 2000. U.S. Geological Survey World Petroleum Assessment-Description and Results: U.S. Geological Survey Digital Data Series DDS-60, version 1.1, four CD-ROM set.
- Anonymous, 2012. Semi-detailed studies of groundwater in Qom area, Entesharat of Regional Water of Qom Province, Qom. (In Persian with English abstract).
- Anonymous, 2013. Semi-detailed studies of groundwater resources in Qom Kahak study area, Entesharat of Regional Water of Qom Province, Qom. (In Persian with English abstract).
- Daneshvar Vousoughi F, Dinpazhoh Y and Aalami M, 2011. Effect of drought on groundwater level in the past two decades (Case study: Ardebil Plain). *Water and Soil (Science)* 21 (4): 165-179. (In Persian with English abstract).
- Fattahi MM, 2014. A study of changes in surface and groundwater resources in Qom Province, The First National Conference on Water Crises and Challenges in the Salt Lake Basin, Qom, June 10. (In Persian with English abstract).

- Ghobadian R, Bahrami Z and Dabagh Bagheri S, 2016. Applied management scenario to predict fluctuations in groundwater levels with MODFLOW conceptual and mathematical models (Case Study: Khazal-Nahavand Plain). *Journal of Ecohydrology* 3 (3): 303-319. (In Persian with English abstract).
- Ghodrati M and Barzegari F, 2016. *Groundwater models, GMS model applied training* (2th ed.). Tehran: Entesharat Simaye Danesh.
- Hojipour M, Zakerinia M, Ziaei A and Hesam M, 2014. Assessing the impact of management scenarios on Bojnoord plain water resources using the WEAP Model. In: *Proceedings of the Second National Congress on Water Crisis (Climate change, Water and Environment)*, Shahrekord Unversity, Shahrekord, Iran, 9-10 Sep. (In Persian with English abstract).
- Hollermann B, Giertz S and Diekkruger B, 2010. Benin 2025-Balancing future water availability and demand using the WEAP 'Water Evaluation and Planning system' system. *Water Resources Management* 24 (13): 3591-3613.
- Intergovernmental Panel on Climate Change – Data Distribution Center (IPCC-DDC), 1988. <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>.
- Jones PD and Hulme M, 1996. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: Methods and illustrations. *International Journal of Climatology* 16 (4): 361-377.
- Jonubi R, Rezaei H and Behmanesh J, 2013. Groundwater level management through surface and subsurface water conjunctive using MODFLOW model (Case study: Urmia Plain). *Journal of Water Management and Irrigation* 3 (1): 49-68. (In Persian with English abstract).
- Karimi O, Asadi E, Fakheri Fard A and Dinpazhoh Y, 2020. Integrated management and underground water for the recovery of aquifers (Case study: Marand plain). *Iranian Water Researches Journal* 14 (4): 123-140. (In Persian with English abstract).
- Kresic N, and Panday S, 2021. Modeling of groundwater flow and transport in coastal karst aquifers. *Hydrogeology Journal* 29: 249-258.
- Li X, Zhao Y, Shi Ch, Sha J, Wang Zh L and Wang Y, 2015. Application of water evaluation and planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal Binhai New Area, China. *Ocean & Coastal Management* 106: 97-109.
- Moghadam SH, Ashofteh PS and Loáiciga HA, 2021. Use of surface water and groundwater under climate-change: Khoramabad basin, Iran. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*. Doi: 10.1680/jwama.19.00011.
- Moharram SH, Gad MI, Saafan TA and Khalaf Allah S, 2012. Optimal groundwater management using genetic algorithm in El-Farafra Oasis, Western Desert, Egypt. *Water Resources Management* 26 (4): 927-948.
- Panjali Zadeh A and Kamali N J, 2017. Analysis and evaluation of groundwater operation using MODFLOW software in Kerman. *International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development of Contemporary IRAN*, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 16 Aug. (In Persian with English abstract).
- Pourhaghi A, Akhondali A, Radmanesh F and Mirzaee Y, 2016. Manage the groundwater sources exploration of the Nourabad Plain in the drought conditions with MODFLOW modeling. *Journal of Eco Hydrology* 3 (3): 303-319. (In Persian with English abstract).
- Yazdan Panah T, Khodashenas SR, Davari K and Ghahraman B, 2008. Water resources management using the WEAP model (Case Study: Azghand Basin). *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology)* 22 (1): 213-222. (In Persian with English abstract).
- Zadeh Vakili N, 2012. Formulation of surface resource and groundwater resource allocation policies using conjunctive operation model; Case study: Zayandehrood River Basin. MSc Thesis, Isfahan University of Technology. (In Persian with English abstract).
- Zhou L, Quan J, Wu X Ch, Wu HW, Li Y T and Li G Y, 2016. Establishing a model of conjunctive regulation of surface water and groundwater in the arid regions. *Agricultural Water Management* 174: 30-38.