

Projection of The Relationship Between Climate Change Groundwater Resources Based on The MODFLOW Model

F. Boomeh¹, M.H. Mokhtari^{2*}, A. Talebi³, M. Goodarzi⁴

1. Ph.D. Candidate, Combating Desertification, Faculty of Natural Resources and Eremology, Yazd University, Yazd, Iran.
2. Associate Professor of Department of Arid Lands and Desert Management, Faculty of Natural Resources and Eremology, Yazd University, Yazd, Iran.
3. Professor of Department of Rangeland and Watershed, Faculty of Natural Resources and Eremology, Yazd University, Yazd, Iran.
4. Associate Professor, Department of drought and climate change, SCWMRI, AREEO, Tehran, Iran.

* Corresponding Author: mh.mokhtari@yazd.ac.ir

Received date: 07/09/2024

Accepted date: 09/12/2024

 [10.22034/JDMAL.2024.2040564.1480](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2024.2040564.1480)

Abstract

Climate change, a phenomenon that has been occurring since ancient times, has accelerated in recent years. This study investigates the impact of climate change on groundwater resources using the MODFLOW model. To achieve this, the water balance was first calculated, and then temperature and precipitation data for the near future (2031–2050), mid-term (2051–2070), and long-term (2071–2090) periods were estimated using global climate data. These estimated temperature and precipitation values were input into the MODFLOW 2005 model. The results showed that, under two climate change scenarios—shared socioeconomic pathways (SSPs) SSP2-4.5 and SSP5-8.5—the monthly averages of both minimum and maximum temperatures are expected to increase across all months of the year. In the optimistic scenario (SSP2-4.5), precipitation and aquifer recharge are projected to remain at current levels on average; however, groundwater levels are anticipated to decline by approximately 22 meters by 2089, with annual and seasonal fluctuations persisting in the long term. In contrast, the pessimistic scenario (SSP5-8.5) predicts a significant reduction in both precipitation and aquifer recharge, leading to a more pronounced decrease in groundwater levels. In this scenario, groundwater levels are expected to drop by about 30 cm per year in the long term, largely due to changes in precipitation patterns and aquifer recharge rates.

Keywords: Climate change; MODFLOW; Groundwater; Kor River

How to cite this article

boomeh, F., Mokhtari, M.H. and Talebi, A. (2024). Prediction of the relationship between climate change and groundwater resources based on modflow model. *Desert Management*, 12(4), 1-20. DOI: [10.22034/JDMAL.2024.2040564.1480](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2024.2040564.1480)



Extended Abstract

Introduction

Climate change, a phenomenon that has been occurring since ancient times, has notably accelerated in recent years. In the current context, both the rate and intensity of this acceleration have significantly increased. Groundwater resources, which are essential for human life and the environment, are under threat, with factors such as weather playing a critical role in their availability and stability in terms of both quantity and quality. Studies on the impacts of climate change on groundwater resources in the Mekong Delta, Vietnam, have shown a projected decrease in groundwater levels over the short, medium, and long term. Similarly, research on the fluctuations of groundwater levels in Hashtgerd has revealed an annual decline of 73 cm at present, with an anticipated increase in the rate of decline in the future, leading to a shift of the aquifer from a critical state to a super-critical state. Furthermore, an examination of the relationship between meteorological drought and groundwater levels in Dasht Al-Shatar demonstrated a strong correlation between drought conditions and the drop in groundwater levels. These findings highlight the need for an early warning system to mitigate the effects of groundwater drought in the future. Groundwater also serves as an archive of past climate variability and provides insights into changes in water quality, including nutrient levels, chemical composition, and isotopic evolution within an aquifer. Given the expansion of human communities over groundwater aquifers and the substantial alterations humans have made to natural hydrological systems, it is anticipated that the response of groundwater to future climate changes will intensify. In this study, the impact of climate change on water balance components in the Kor River catchment area has been analyzed using remote sensing data. It is assumed that the effects of climate change, in the near, medium, and long term, will lead to a reduction in groundwater reserves. The objective of this research is to estimate the volume of groundwater using the current MODFLOW model and to project its future trends in light of anticipated climate changes.

Material and Methods

This research was conducted in the watershed of the Kor River, one of the main rivers in Iran, covering an area of 16,500 square kilometers. To investigate the impact of climate change on precipitation and temperature, data for three future periods were considered: near future (2031–2050), medium future (2051–2070), and far future (2071–2090). The data were obtained from three climate models—GFDL-ESM4, HadGEM3-GC31-LL, and ACCESS-CM2—under two climate scenarios, SSP2-4.5 and SSP5-8.5. The analysis was carried out for seven climate stations: Ahmadabad, Chahardange, Chamriz, Chobkhole, Jamal Beg Shirin, Khosro Shirin, Sedeh, and Dorudzan Dam. In this study, the long-term optimistic and pessimistic scenarios regarding groundwater recharge were examined for the Aspas, Bekan, and Khosroshirin plains, which are located in close proximity to one another. These plains, which serve as important groundwater sources, were analyzed using the MODFLOW model.

Results

Changes in monthly precipitation, based on TRMM satellite data for the period from 2000 to 2019, indicate a decreasing trend in precipitation during the studied period. The monthly discharge variations at the Dehkadeh Sefid and Chamriz hydrometric stations, under two scenarios—SSP2-4.5 and SSP5-8.5—reveal that the largest increase in discharge compared to the base period occurs in October across all future periods. This is consistent with the observation that the highest increase in precipitation compared to the base period at the adjacent climate stations also occurs in October, making this result fully justified. These findings align with the results of other studies (1, 7). The highest increase in discharge at both the Dehkadeh Sefid and Chamriz hydrometric stations occurs in October under the SSP2-4.5 scenario during the period from 2051 to 2070, where the average flow rate at both stations increases by 2.39 and 2.34 times, respectively, compared to the base period. Under the SSP5-8.5 scenario, this increase will occur in the period from 2031 to 2050, with the average flow rate at Dehkadeh Sefid and Chamriz hydrometric stations rising by 2.34 and 2.61 times, respectively, in October compared to the base period. Changes in near-surface air temperature, based on NOAA gauges, show an upward trend in temperature. Additionally, the average minimum and maximum monthly temperatures under both SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios in the studied area are projected to increase in all months in the future. Under the optimistic scenario (SSP2-4.5), precipitation and aquifer recharge are expected to remain at current levels on average; however, the groundwater level is anticipated to continue decreasing over the long term, with annual and seasonal fluctuations. Proper resource management could mitigate the effects of reduced water resources and prevent land subsidence. In contrast, under the pessimistic scenario (SSP5-8.5), precipitation and aquifer recharge are projected to decrease significantly, leading to a decline in groundwater levels. This

reduction will vary among aquifers, with the Aspas aquifer experiencing the greatest decrease, followed by the Bakan and Khosro Shirin aquifers. Factors influencing groundwater levels include precipitation, aquifer recharge, water extraction, and evaporation/transpiration. These changes could result in reduced water resources, land subsidence, and other environmental challenges.

Discussion and Conclusion

The groundwater levels in the three studied aquifers over the long term were significantly influenced by precipitation and aquifer recharge scenarios. In the optimistic scenario, the groundwater level is expected to follow a decreasing trend, although it will remain relatively stable on average. In the pessimistic scenario, however, the groundwater level is projected to decline significantly. Sustainable water resource management, reduced water extraction, and enhanced aquifer recharge are key solutions to mitigate the impacts of these changes and ensure the preservation of these valuable resources for future generations. Thus, it can be concluded that the primary factor influencing groundwater level changes in these aquifers is water extraction from wells.

Keywords: Climate change; MODFLOW; Groundwater; Kor River

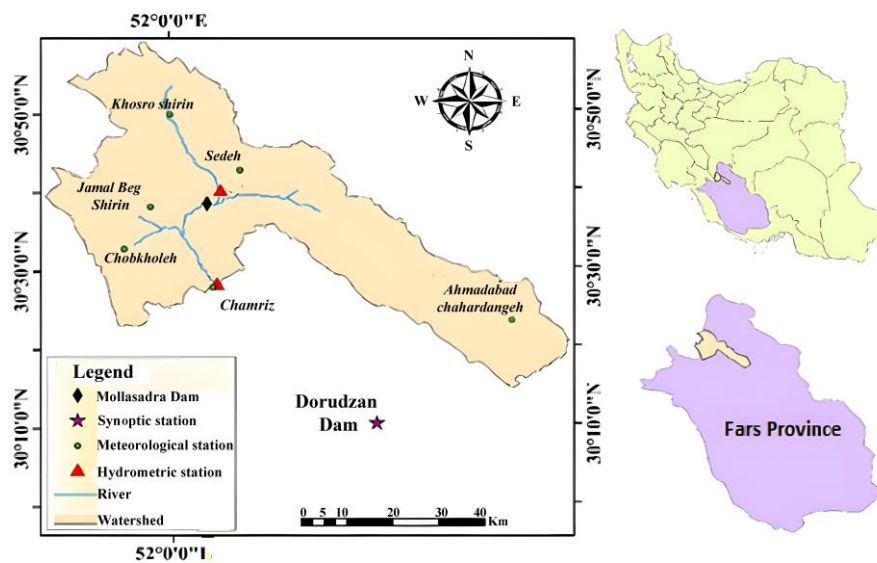


Fig 1. Location of the study are in a) Iran, B) Fars Province and C) the Kor River catchment area

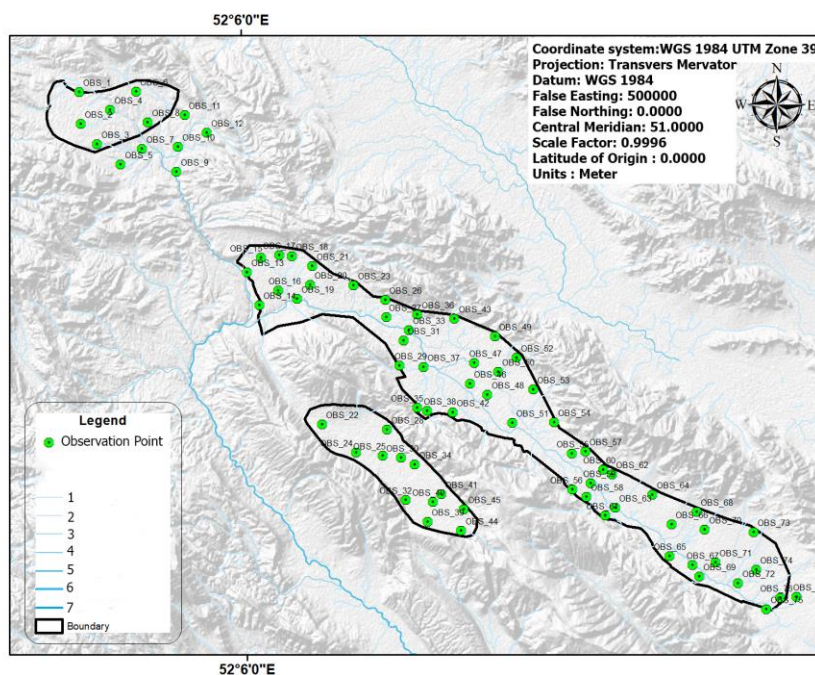


Fig 2. Location of the observation wells in the study area

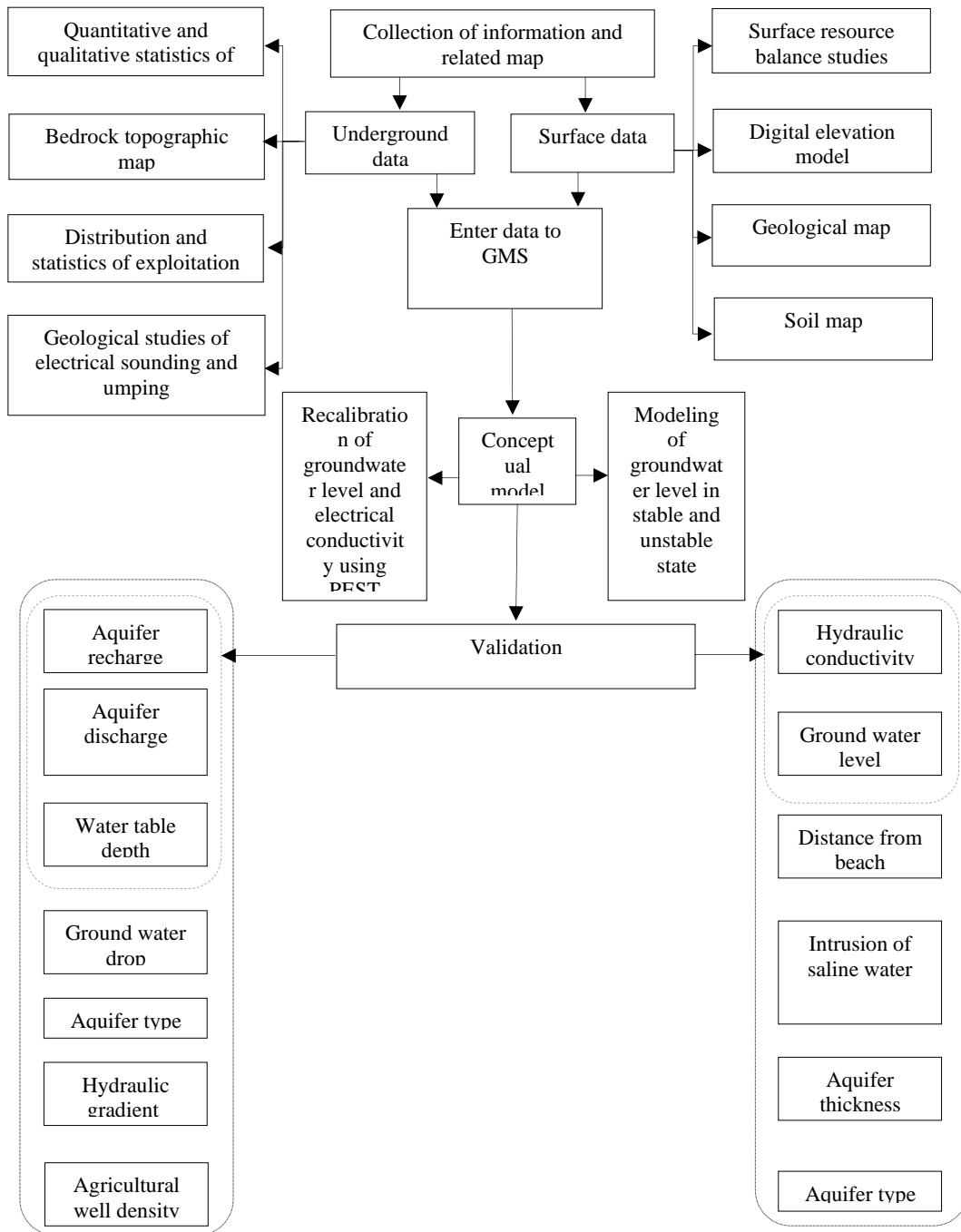


Fig 3. Diagram of ground water flow modeling

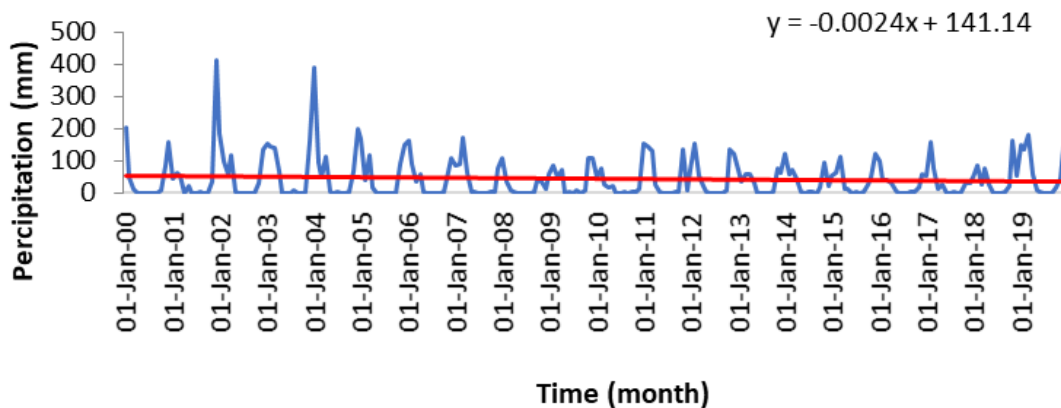


Fig 4. Monthly precipitation changes based on TRMM satellite data

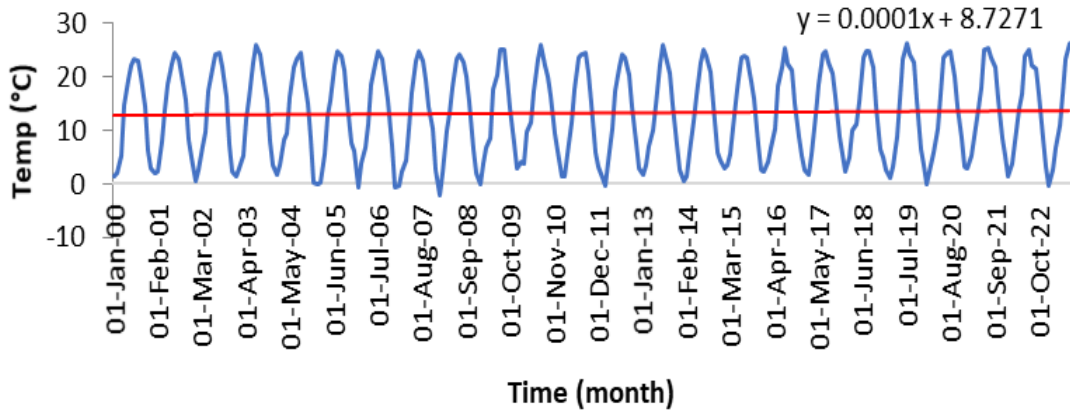


Fig 5. Changes in near-surface air temperature based on NOAA gauge data

Table 1. Timing of the maximum decrease and increase in rainfall compared to the base period at different stations

Dorudzan dam	Sedeh	Khosro Shirin	Jamal Beg Shirin	Chobkhole	Chamriz	Ahmadabad	Chahardange	changes
Sep	Oct	Dec	Oct	Nov	Oct		Oct	Maximum decrease
Mar	May	Mar	Mar	Feb	Apr		Apr	Maximum increase

Table 2. The maximum decrease and increase in rainfall compared to the base period at different stations

Dorudzan dam	Sedeh	Khosro Shirin	Jamal Beg Shirin	Chobkhole	Chamriz	Ahmadabad Chahardange	Time duration	
	%168	%130	%108		%149		2031-2050	Maximum decrease
%261	%172	%119	%105	%114	%151	%189	2051-2070	
%38	%35	%35	%35	%22		%35	2031-2050	
%22	%75	%45			%48	%33	2051-2070	Maximum increase
	%72		%24		%51		2071-2090	

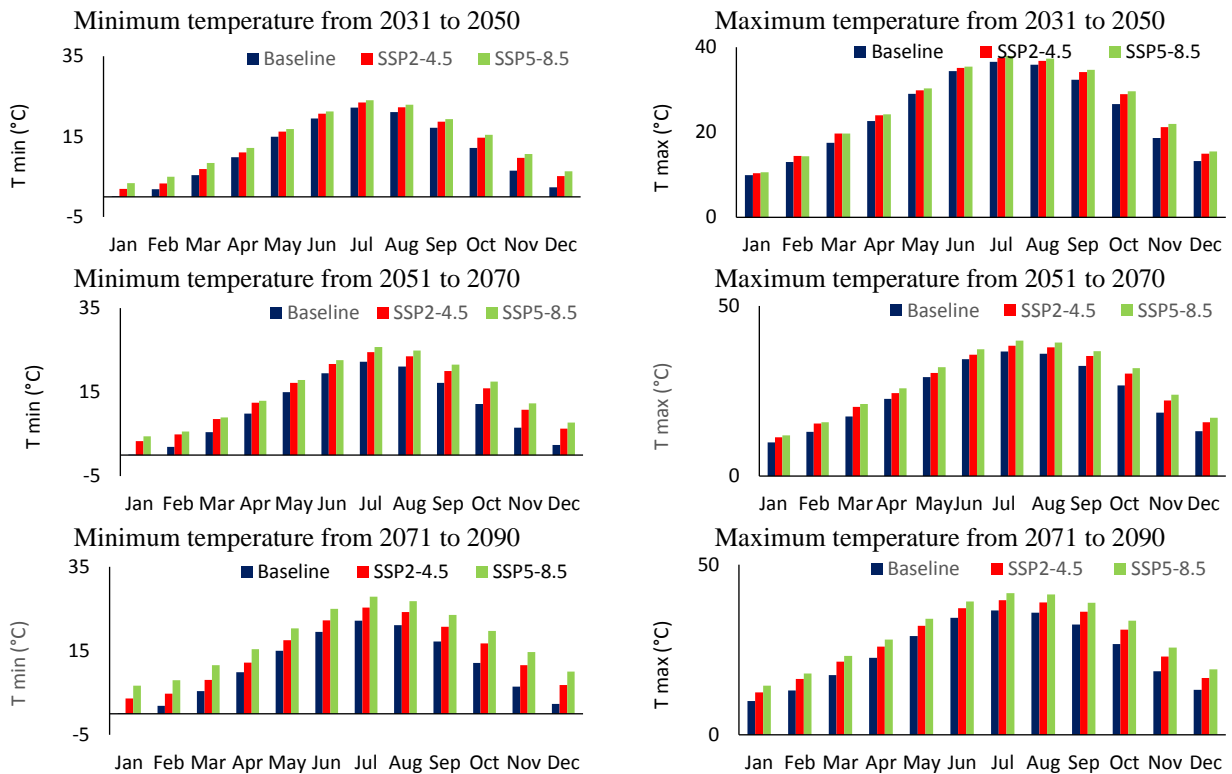


Fig 6. Long-term average of maximum and minimum temperatures at synoptic stations for the future period (2030–2090) under two scenarios: SSP2-4.5 and SSP5-8.5

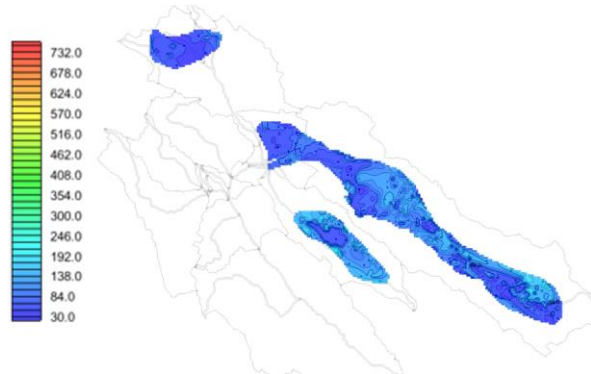


Fig 7. Zoning of alluvial thickness in the study's saturated aquifer.

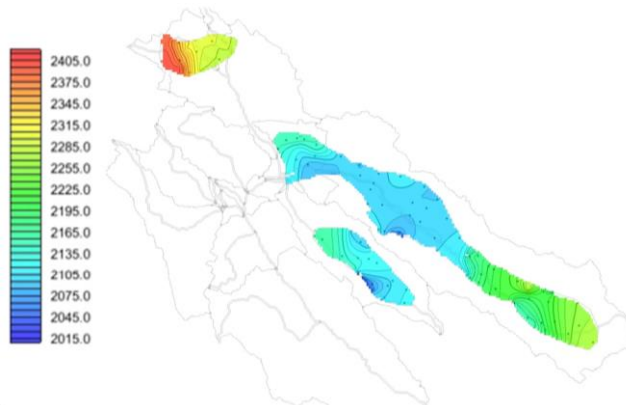


Fig 8. The groundwater level of the study aquifer at the final time step of the 126-month interval, assuming the continuation of the current well withdrawal process

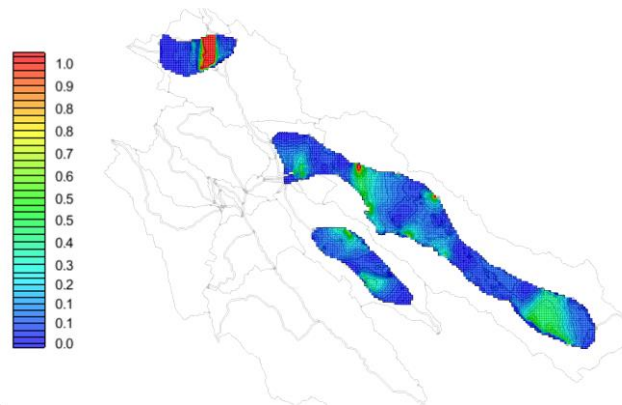


Fig 9. Magnitude of the flow velocity of the final model of the study plain

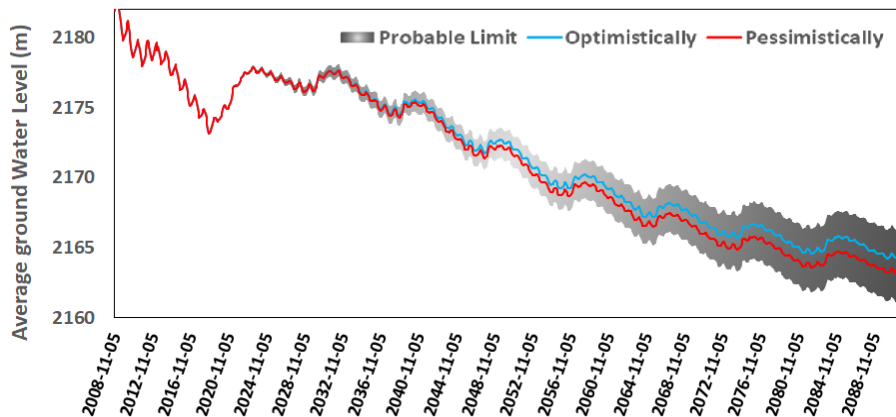


Fig 10. Changes in groundwater level until 2090 under the optimistic and pessimistic scenarios



پیش‌یابی رابطه بین تغییر اقلیمی و منابع آب زیرزمینی بر پایه مدل MODFLOW

فاطمه بومه^۱، محمد حسین مختاری^{۲*}، علی طالبی^۳، مسعود گودرزی^۴

۱. دانشجوی دکتری مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
 ۲. دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
 ۳. استاد گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
 ۴. دانشیار گروه خشکسالی و تغییر اقلیم، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران.
- * نویسنده مسئول: mh.mokhtari@yazd.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹

doi [10.22034/JDMAL.2024.2040564.1480](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2024.2040564.1480)

چکیده

پدیده تغییر اقلیم براساس شواهد موجود، از زمان‌های بسیار دور وجود داشته است. حال آن‌که در شرایط کنونی سرعت و شتاب آن بیش‌تر شده است. پژوهش حاضر به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی بر اساس مدل MODFLOW می‌پردازد. به‌این منظور، در آغاز بیلان آب محاسبه شد و سپس با بهره‌گیری از داده‌های جهانی متغیرهای دما و بارش برای سال‌های آینده نزدیک ۲۰۳۱-۲۰۵۰ (۱۴۲۸-۱۴۰۹)، میانی ۲۰۵۱-۲۰۷۰ (۱۴۴۸-۱۴۲۹) و دور ۲۰۹۰-۲۰۷۱ (۱۴۶۸-۱۴۴۹) برآورد و به‌عنوان ورودی مدل MODFLOW 2005 مورد استفاده قرار گرفتند. مطابق با نتایج، میانگین ماهانه دمای کمینه و بیشینه بر پایه دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در تمام ماه‌های سال در آینده افزایش خواهد داشت. در سناریو خوش‌بینانه، بارش و تغذیه آبخوان‌ها به‌طور متوسط در سطح فعلی باقی می‌ماند، ولی تراز آب زیرزمینی با حفظ نوسان‌های سالانه و فصلی در بلندمدت تا سال ۲۰۸۹ (۱۴۶۷) به‌طور متوسط حدود ۲۲m کاهش خواهد یافت. اما در سناریو بدبینانه، بارش و تغذیه آبخوان‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که موجب کاهش تراز آب زیرزمینی می‌شود. تراز آب زیرزمینی در دوره بلند مدت به‌طور قابل توجهی زیر تأثیر سناریوهای بارش و تغذیه آبخوان‌ها قرار خواهد گرفت و در حدود سالی ۳۰cm افت خواهد داشت.

واژگان کلیدی: بارش؛ بیلان آب؛ تغذیه آبخوان، دما؛ رود کر

استناد به این مقاله

بومه، فاطمه، مختاری، محمد حسین، طالبی، علی، مسعود گودرزی. (۱۴۰۳). پیش‌بینی رابطه بین تغییرات اقلیمی و منابع آب زیرزمینی بر اساس مدل MODFLOW. مدیریت بیابان، ۱۲(۴)، ۱-۲۰. DOI: [10.22034/JDMAL.2024.2040564.1480](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2024.2040564.1480)



■ مقدمه

پدیده تغییر اقلیم براساس شواهد موجود، از زمان‌های بسیار دور وجود داشته است. حال آن‌که در شرایط کنونی سرعت و شتاب آن بیش‌تر شده است. در حال حاضر تغییر اقلیم در حال وقوع است و در آینده نیز ادامه خواهد داشت (۱۴). از طرفی منابع آب زیرزمینی، در بیشتر مناطق جهان، از نظر تأمین آب، جایگاه ویژه‌ای دارند. اما در دسترس بودن آن با کمیت و کیفیت پایدار با عوامل مختلفی تهدید می‌شود که در این بین آب و هوا مهمترین نقش را دارا می‌باشد (۸). تغییرات اقلیمی با تغییر در رژیم جریان می‌توانند بر اکوسیستم‌های رودخانه‌ای تأثیرگذار باشند اما اثر آن بر جریان‌های زیرزمینی به طور قابل توجهی پیچیده است (۱۱). باوجود تأثیر غیرمستقیم و کندتر تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی ولی این منابع تحت تأثیر شرایط اقلیمی بلندمدت نظیر تغییرات بارش باران یا برف، دما، ذوب شدن یخچال‌ها و تغییرات کاربری اراضی قرار خواهند گرفت (۱۲، ۱۰).

بررسی تأثیر تغییر اقلیم در دلتای میکونگ^۱ بر منابع آب زیرزمینی نشان داد که در آینده شاهد افزایش $1/5^{\circ}\text{C}$ میانگین دمای سالانه خواهیم بود. همچنین نتایج نشان داد بارش در آینده در فصل مرطوب و خشک به ترتیب دارای افزایش و کاهش خواهد شد و سطح آب زیرزمینی در کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت کاهش خواهد یافت (۱۶).

همچنین تأثیر پدیده تغییر اقلیم روی نوسان سطح آب زیرزمینی هشتگرد حاکی از آن است که سالانه 73cm افت داشته، از طرفی افزایش میزان افت در آینده و تبدیل آبخوان از حالت بحرانی به حالت فوق بحرانی را تجربه خواهد کرد (۶). بیان آب کاربرد مهمی در موضوع‌های مختلفی از جمله بررسی منابع آب و پیش‌بینی سیلاب دارد. محاسبه و برآورد مقادیر اجزای بیان آب در حوضه‌های آبخیز در حال حاضر و در آینده با در نظر گرفتن تغییر اقلیم می‌تواند به مدیریت مطلوب منابع آب و برنامه‌ریزی عملیاتی هر چه بهتر کمک کند (۱۳). نکته قابل توجه آن است که برآورد اجزای اصلی بیان آب فرآیند پیچیده‌ای است که باید از همه ابعاد مورد بررسی قرار گیرد زیرا فاکتورهای ورودی و خروجی متعددی در محاسبات بیان آب دخیل هستند (۲۰).

تجزیه و تحلیل ویژگی‌ها و عملکرد آب‌های زیرزمینی در گذشته و آینده نیاز به درک مناسبی از خشکسالی‌های هواشناسی دارد. استفاده از فناوری‌ها قوی مدل‌سازی امکان پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی و تغییرات اقلیمی را فراهم می‌کند. بررسی تأثیر خشکسالی هواشناسی در دشت الشتر بر آب‌های زیرزمینی نشان دهنده همبستگی قوی بین افت سطح تراز آب‌های زیرزمینی و خشکسالی ناشی از پارامترهای هواشناسی است. به طور کلی، این نتایج نشان دهنده یک سیستم هشدار اولیه برای مواجهه با پایین رفتن سطح تراز آب‌های زیرزمینی و کاهش تأثیر آن در آینده است (۱۷).

بررسی‌ها نشان می‌دهد تغذیه منابع آب زیرزمینی به آب و هوای گرم‌تر در مناطق کوهستانی نسبتاً کمتر بوده و بستگی به کاربری زمین دارد (۱۸). در دشت‌ها تغذیه منابع آب زیرزمینی در آب و هوای گرم بستگی به آب‌آبیاری داشته و تا حد زیادی تحت تأثیر میزان نفوذ آب‌آبیاری است. مدل‌های کاربردی در تخمین تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی توانایی پیش‌بینی تأثیر تغییرات اقلیمی بر نوسان‌های کمی و کیفی آب زیرزمینی را دارند. صحت خروجی این مدل‌ها به موقعیت جغرافیایی و هیدرولوژیک، زیستی وابسته است (۱۳). استفاده از مدل MODFLOW در استان داک لک نشان می‌دهد که، علیرغم داده‌های محدود، به ویژه داده‌های حفاری برای تحقیقات آب زیرزمینی، نتایج محاسبات مدل قابلیت اطمینان و پتانسیل بزرگ آن را برای استفاده در سایر مکان‌های مشابه نشان داده است. استفاده از مدل در ارتباط با سایر ماژول‌های استخراج داده، ورودی مفیدی برای ایجاد نقشه‌های مدول جریان زیرزمینی برای دوره‌های زمانی مختلف است. تأثیر زیاد تغذیه و تبخیر بر منابع آب زیرزمینی و تعادل آب در منطقه تحقیقاتی با شبیه‌سازی سناریوهای تغییر اقلیم ۴.۵RCP و ۸.۵RCP نشان داده شده است (۳).

بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل WEAP- MODFLOW مهاباد کارآمدی مدل پیشنهادی را برای شبیه‌سازی رواناب تأیید کرد. به‌علاوه نتایج نشان داد که به‌دلیل تغییرات آب و هوایی

¹ Mekong

می‌شود. هدف این پژوهش برآورد حجم آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW در زمان حال و پیش‌بینی برای آینده با توجه به تغییرات اقلیمی در سه آبخوان بکان، خسرو شیرین و آسیاس به صورت هم‌زمان و جامع است. پژوهش حاضر دید مدیریتی جامع را برای کارشناسان و تصمیم‌گیران بخش آب فراهم خواهد کرد تا بتوانند با واکاوی روند بهره‌برداری منابع از گذشته تا آینده، تصمیم‌های اصولی گرفته شود.

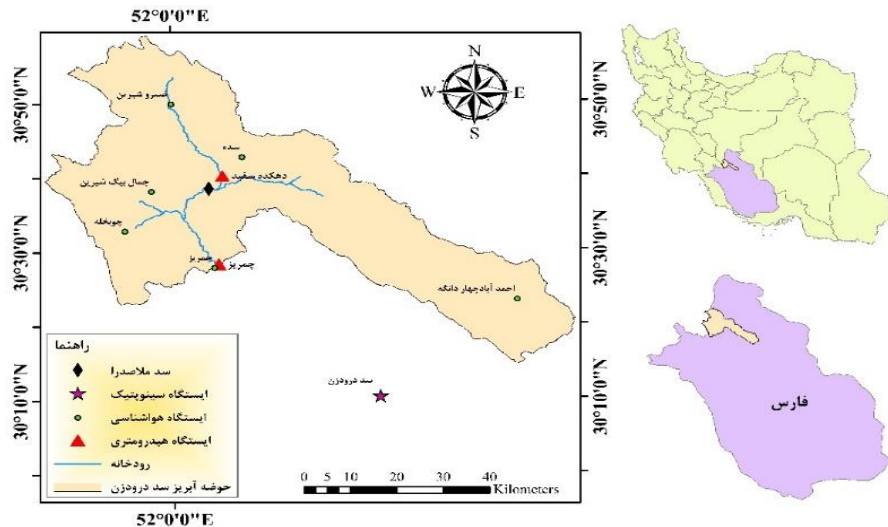
■ مواد و روش

پژوهش حاضر در حوزه‌آبخیز رودخانه کر به‌عنوان یکی از رودخانه‌های اصلی ایران با مساحت 16500 km^2 انجام شده است (شکل ۱). در دشت آسیاس دو رودخانه وجود دارد. رودخانه کر از کوه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد از دشت بکان عبور می‌کند و به سمت جنوب شرقی از دشت آسیاس عبور می‌کند. رودخانه بوجان از شمال دشت آسیاس سرچشمه می‌گیرد و به رودخانه کر می‌پیوندد. همچنین رودخانه بوانات از غرب دشت بکان سرچشمه می‌گیرد و به رودخانه کر می‌پیوندد. رودخانه‌های دشت خسرو شیرین نیز شامل رودخانه کر و تنگ‌چنار است. رودخانه کر از دشت خسرو شیرین عبور می‌کند و به سمت جنوب‌شرقی جریان می‌یابد و رودخانه تنگ‌چنار از شمال دشت خسرو شیرین سرچشمه می‌گیرد و به رودخانه کر می‌پیوندد. برای پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم بر دما و بارندگی از سال ۲۰۳۰، سه دوره زمانی ۲۰ ساله برای آینده نزدیک ۲۰۳۱-۲۰۵۰ (۱۴۲۸-۱۴۰۹)، آینده میانی ۲۰۵۱-۲۰۷۰ (۱۴۴۹-۱۴۲۹) و آینده دور ۲۰۹۰-۲۰۷۱ (۱۴۶۸-۱۴۴۹) در نظر گرفته شده است و از مدل GFDL-ESM4، سناریو خوشبینانه SSP2-4.5 و بدبینانه SSP5-8.5 برای ACCESS-CM2 و GC31-LL HadGEM3 تحت تأثیر دو ایستگاه اقلیمی احمدآباد چهاردانگه، چمریز، چوبخوله، جمال بیگ‌شیرین، خسرو شیرین، سده و سد درودزن استفاده شده است. بدین منظور از پایگاه داده کوپرنیک و نرم‌افزار QGIS3.12.2 استفاده شد. در دشت آسیاس، بکان و خسرو شیرین به‌عنوان منابع آب زیرزمینی که در مجاورت یکدیگر قرار دارند، سناریوهای بلندمدت خوشبینانه و بدبینانه تغذیه با استفاده از شبیه‌سازی مورد بررسی واقع شدند.

در دوره مورد بررسی، آب‌های زیرزمینی حدود $1/6 \text{ m}$ - کاهش یافته است (۱۵).

تحلیل کمی و مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از MODFLOW در معادن زغال‌سنگ نیمه گرمسیری واقع در شمال غربی بنگلادش کاهش تدریجی سطح آب زیرزمینی به دلیل عدم شارژ مجدد، بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی و تأثیرات معدن زغال سنگ زیرزمینی را نشان داد (۹). پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی دشت قروه با استفاده از MODFLOW نشان داد که با همین روند برداشت از آبخوان و بارش تحت سناریو A1B، سطح آب زیرزمینی سالانه در حدود ۶۰ سانتیمتر افت می‌کند. همچنین با افزایش ده درصدی حجم برداشتی از چاه‌ها و اعمال بارش پیش‌بینی شده از سناریو A2 میزان افت سطح ایستابی بطور چشم‌گیری افزایش یافته و سالانه در حدود ۱۱۷ سانتیمتر کاهش در سطح ایستابی دشت خواهیم داشت. با کاهش ۱۰ درصدی حجم برداشت شده از چاه‌ها در سالهای آتی و اعمال بارش پیش‌بینی شده از سناریو B1، مقدار افت سطح ایستابی نسبت به سال‌های گذشته کاهش یافته و سالانه در حدود ۳۳ سانتیمتر کاهش سطح ایستابی محاسبه گردیده است (۲).

آب زیرزمینی بایگانی از تنوع آب و هوایی در گذشته و تغییرات مقدار تغذیه آب و یا مواد شیمیایی و تاریخیچه تکاملی ایزوتوپی آبخوان را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد با گسترش جوامع انسانی بر روی آبخوان‌های زیرزمینی و تغییرات گسترده‌ای که بشر بر رژیم‌های هیدرولوژیکی طبیعی وارد می‌آورد، عکس‌العمل آب‌های زیرزمینی به تغییرات آب و هوایی آینده تشدید خواهد شد (۱۳). پژوهش حاضر با رویکردی جامع به برنامه‌ریزی پایدار منابع آب به بررسی اثر تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های بیلان آب در حوزه آبخیز رودخانه کر با استفاده از مدل MODFLOW و شناخت قابلیت‌ها و محدودیت‌های منابع آبی می‌پردازد. به هر حال تغذیه آب زیرزمینی ارتباط نزدیکی با تغییرات پیش‌بینی شده در بارش دارد (۱۹). در خصوص تأثیر تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های بیلان در کشور پژوهش‌های محدودی انجام شده است. فرض بر این است که تأثیر تغییر اقلیم در آینده نزدیک، میانی و دور موجب کاهش ذخایر آب زیرزمینی



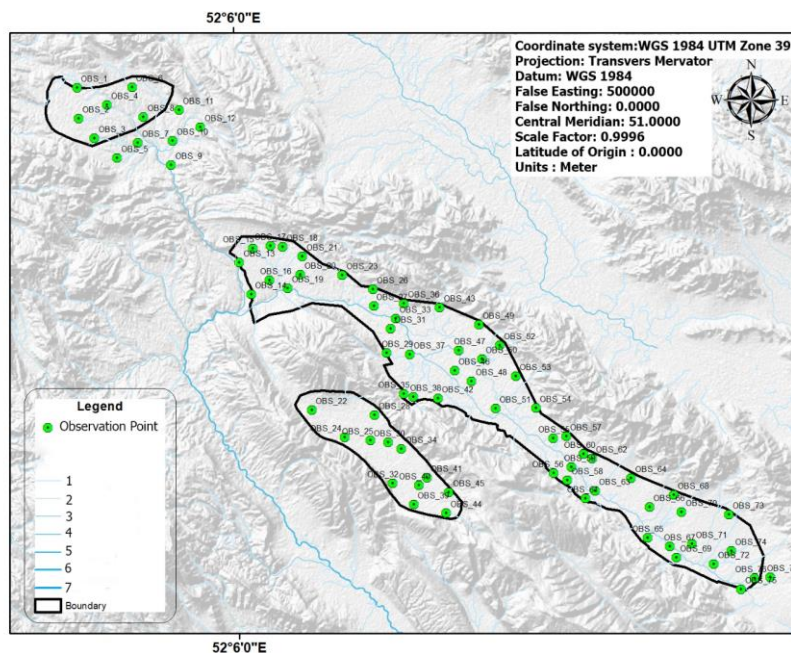
شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

منحنی‌های هم‌دما و بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی مقادیر سالیانه دمای منطقه مورد مطالعه در ارتفاع و دشت محاسبه شد.

در محدوده مطالعاتی در مجموع ۷۷ چاه مشاهداتی مورد بررسی و به‌عنوان پایه‌های واسنجی مدل انتخاب شده است. اطلاعات سری زمانی در این چاه‌ها به روش رگرسیون بازسازی شده است. چاه‌های پیزومتریک نقشی مهمی در مدل‌سازی آب‌زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW ایفا می‌کنند. موقعیت مختصاتی و پراکنش این چاه‌ها در شکل زیر مشاهده می‌شود (شکل ۲).

همچنین احتمال وجود عدم قطعیت بر روی دشت نیز مد نظر بوده و در نتیجه مقدار تراز آب زیرزمینی مستخرج از این بررسی می‌تواند در یک آستانه احتمالاتی مورد بررسی واقع شود.

برای بررسی رژیم حرارتی محدوده مطالعاتی و بررسی تحولات زمانی و مکانی و مقادیر حدی، گردآوری و تجزیه و تحلیل آمار درجه حرارت آن در مطالعات بیلان وزرات نیرو انجام پذیرفته است. در این مطالعات از آمار درجه حرارت ثبت شده در ایستگاه‌های همدیدی و کلیماتولوژی تحت پوشش سازمان هواشناسی کشور و ایستگاه‌های تبخیرسنجی وزارت نیرو استفاده شده است. با استفاده از



شکل ۲. موقعیت چاه‌های مشاهداتی محدوده مطالعاتی

است. همچنین نشان می‌دهد که روند بارش ماهانه طی دوره مورد بررسی نزولی بوده است (شکل ۴). تغییر دمای هوای نزدیک سطح زمین سنجنده NOAA، نشان می‌دهد که بیشینه دمای هوا ۲۳ ساله $26/385^{\circ}\text{C}$ و کمینه دمای هوا ۲۳ ساله $2/019^{\circ}\text{C}$ بوده است. خط برازش بر روی نمودار دما نشان‌دهنده روند صعودی دمای هوا است (شکل ۵). نتایج نشان می‌دهد که براساس سناریوهای خوشبینانه و بدبینانه مورد ارزیابی در پژوهش حاضر در هر ایستگاه اقلیمی بیشترین مقدار کاهش و افزایش بارندگی در مقایسه با دوره پایه ۱۹۸۸-۲۰۱۴ مربوط به چه ماهی از سال بوده است (جدول ۱). لازم به ذکر است که داده‌های دما و بارش در تمام ایستگاهها با استفاده از آزمون همگنی نرمال استاندارد مورد بررسی قرار گرفت و نرمال شدند.

در هر ایستگاه مقدار افزایش یا کاهش بارندگی در مقایسه با دوره پایه ۱۹۸۸-۲۰۱۴ مشخص شده است (جدول ۲). در ایستگاه چمریز بیشترین مقدار افزایش بارندگی در مقایسه با دوره پایه بر اساس سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در ماه اکتبر است. بطوریکه میانگین میزان بارش در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ در ماه اکتبر تحت سناریوی SSP2-4.5، $3/03$ برابر نسبت به دوره پایه افزایش یافته است و میانگین میزان بارش در دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ در ماه اکتبر تحت سناریوی SSP5-8.5، $2/98$ نسبت به دوره پایه افزایش یافته است.

در این ایستگاه تبخیرسنجی، بیشترین مقدار کاهش بارندگی در مقایسه با دوره پایه بر پایه سناریوی SSP24.5 در ماه آوریل است به‌طوریکه میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۷۱ تا ۲۰۹۰ در ماه آوریل تحت سناریوی SSP2-4.5، 51% نسبت به دوره پایه کاهش یافته است و میانگین مقدار بارندگی در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ در ماه آوریل زیر سناریوی SSP5-8.5، 48% نسبت به دوره پایه کاهش یافته است. در ایستگاه چوبخوله بیشترین افزایش بارندگی در مقایسه با دوره پایه در ماه نوامبر قابل مشاهده است. به‌طوریکه میانگین میزان بارش در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ در ماه نوامبر تحت سناریوی SSP2-4.5، $2/23$ برابر نسبت به دوره پایه افزایش یافته است و تحت سناریوی SSP58.5، $2/29$ برابر نسبت به دوره پایه افزایش یافته است.

پتانسیل آبدهی چاه‌های آبخوان که بیانگر قابلیت آبدهی آبخوان است. بر اساس آمار موجود، چاه‌ها و چشمه و قنات‌ها به‌عنوان منابع موثر بر آبخوان‌ها به‌صورت عوامل استحصال می‌باشند.

در آغاز بیلان آبی با استفاده از Flow_Budget محاسبه شد. Flow_Budget توسط USGS بر پایه روابط ریاضی برای محاسبه بیلان آبی در مدل MODFLOW توسعه یافته است. پس از آن با استفاده از داده‌های جهانی اقلیم متغیرهای دما و بارش برای سال‌های آینده نزدیک، میانی و دور برآورد و به‌عنوان ورودی مدل MODFLOW مورد استفاده قرار گرفتند.

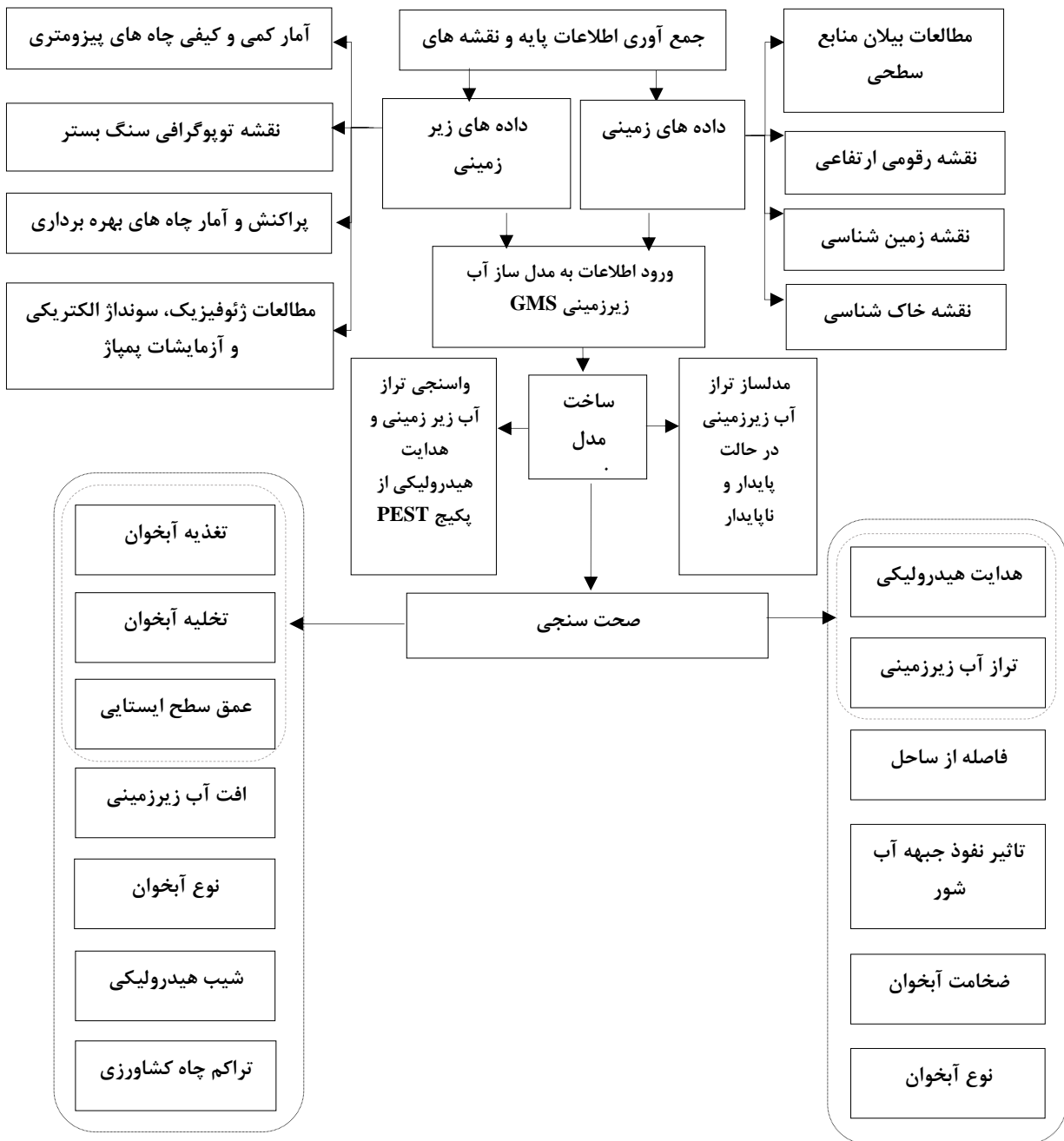
برای مدیریت و شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی از مدل ریاضی MODFLOW به وسیله نرم افزار GMS^1 در آبخوان انجام می‌شود. مدل ریاضی MODFLOW به‌عنوان ابزاری کارآمد برای بررسی مدیریت آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ویژگی‌های مختلف هواشناسی، هیدرولوژیک، زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیک برای ورودی‌های مدل در نظر گرفته خواهد شد. این نرم‌افزار مدل ریاضی است که ترکیبی از مدل آب زیرزمینی MODFLOW و GIS است که با استفاده از روش عددی تفاضل محدود، تراز آب زیرزمینی را شبیه‌سازی می‌کند. GMS نرم‌افزار جامعی برای مدل‌سازی آبهای زیرزمینی است. در پژوهش حاضر بر اساس مدل مفهومی تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی می‌شود. پس از تهیه مدل مفهومی و تعیین شرایط مرزی و اولیه، شبیه‌سازی در شرایط پایدار انجام و سپس مدل واسنجی و صحت‌سنجی خواهد شد (شکل ۳).

■ نتایج

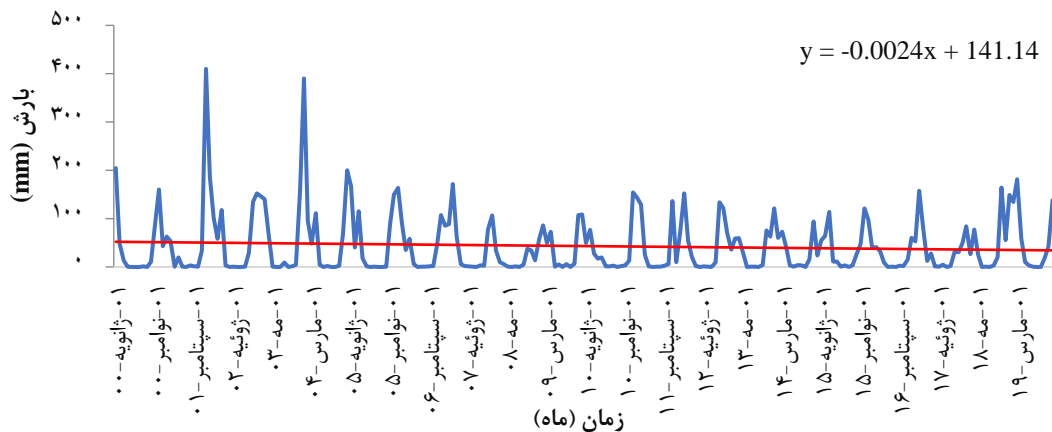
بررسی وضعیت حوضه در شرایط تغییر اقلیم

روند تغییرات ماهیانه بارش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای TRMM برای دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ (۱۳۷۸-۱۳۹۷) با کمک نمودار نشان داده شده است. روند تغییرات ماهانه دوره‌های زمانی مورد بررسی با داده‌های واقعی مقایسه شده و همسو بوده است. کمینه بارش در این دوره صفر mm و بیشینه بارش ۱۹ ساله $409/9\text{mm}$ بوده

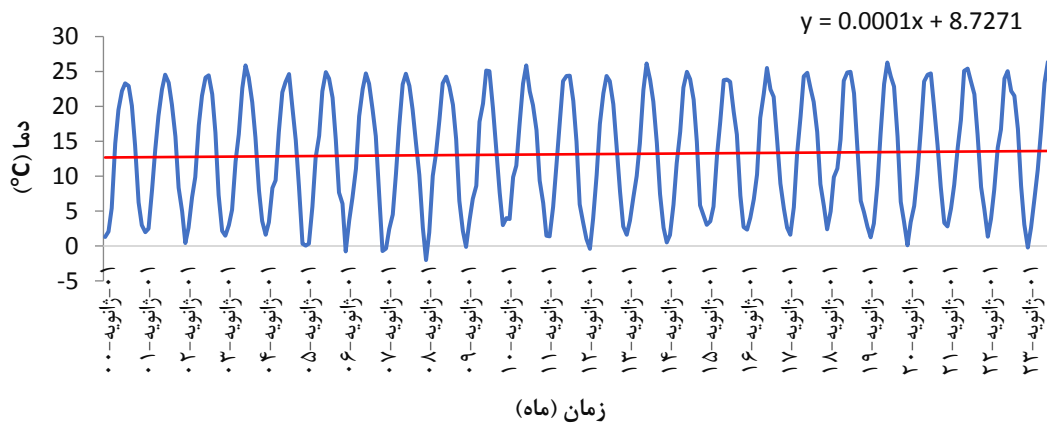
¹ Groundwater Modeling System



شکل ۳. نمودار جریانى مدل سازى جریان آب زیرزمینی



شکل ۴. تغییرات بارش ماهانه با استفاده از داده‌های ماهواره ای TRMM



شکل ۵. تغییرات دمای هوای نزدیک سطح زمین سنجنده NOAA

جدول ۱. زمان بیشترین مقدار کاهش و افزایش بارندگی در مقایسه با دوره پایه در ایستگاه‌های مختلف

تغییرات	احمد آباد چهاردانگه	چمریز	چوبخوله	جمال بیگ شیرین	خسرو شیرین	سده	سد درودزن
بیشترین افزایش	اکتبر	اکتبر	نوامبر	اکتبر	دسامبر	اکتبر	سپتامبر
بیشترین کاهش	آوریل	آوریل	فوریه	مارچ	مارچ	می	مارچ

جدول ۲. بیشترین مقدار کاهش و افزایش بارندگی در مقایسه با دوره پایه در ایستگاه‌های مختلف

دوره زمانی	احمد آباد چهاردانگه	چمریز	چوبخوله	جمال بیگ شیرین	خسرو شیرین	سده	سد درودزن
بیشترین افزایش	۲۰۳۱-۲۰۵۰	%۱۴۹	%۱۱۴	%۱۰۸	%۱۳۰	%۱۶۸	
	۲۰۵۱-۲۰۷۰	%۱۸۹	%۱۱۴	%۱۰۵	%۱۱۹	%۱۷۲	%۲۶۱
	۲۰۳۱-۲۰۵۰	%۳۵	%۲۲	%۳۵	%۳۵		%۳۸
بیشترین کاهش	۲۰۵۱-۲۰۷۰	%۳۳	%۴۸		%۴۵	%۷۵	%۲۲
	۲۰۷۱-۲۰۹۰	%۵۱	%۵۱	%۲۴		%۷۲	

یافته است و میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۷۱ تا ۲۰۹۰ نسبت به دوره پایه ۲۴٪ کمتر است. در این ایستگاه باران سنجی، بیشترین کاهش بارندگی در ماه آوریل تحت سناریو SSP5-8.5، ۲۴٪ نسبت به دوره پایه کاهش یافته است.

در ایستگاه خسرو شیرین ماکسیمم افزایش بارندگی در ماه دسامبر است. بطوریکه میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ در ماه دسامبر زیر سناریوی SSP2-4.5، ۳۸٪ برابر نسبت به دوره پایه افزایش یافته است و میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ در ماه دسامبر تحت سناریو SSP5-8.5، ۶۱٪ نسبت به دوره پایه افزایش یافته است. در این ایستگاه باران سنجی، بیشترین کاهش بارندگی در ماه آوریل تحت سناریوی SSP2-4.5، ۲۴٪ نسبت به دوره پایه کاهش یافته است و میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ در ماه آوریل تحت سناریوی SSP5-8.5، ۲۴٪ نسبت به دوره پایه کاهش یافته است.

در این ایستگاه باران سنجی، بیشترین کاهش بارندگی در ماه آوریل تحت سناریوی SSP2-4.5، ۲۴٪ نسبت به دوره پایه کاهش یافته است.

در ایستگاه جمال بیگ شیرین بیشترین افزایش بارندگی در مقایسه با دوره پایه بر پایه سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در ماه اکتبر است. بطوریکه میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ در ماه اکتبر در سناریوی SSP2-4.5، ۱۰٪ برابر نسبت به دوره پایه افزایش یافته است و میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ در ماه اکتبر تحت سناریو SSP5-8.5، ۱۷٪ نسبت به دوره پایه افزایش یافته است. در این ایستگاه باران سنجی، بیشترین کاهش بارندگی در مقایسه با دوره پایه بر اساس سناریوی SSP2-4.5 در ماه مارچ می‌باشد به‌طوریکه میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ در ماه مارچ تحت سناریوی SSP2-4.5، ۳۵٪ نسبت به دوره پایه کاهش یافته است.

میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ در ماه آوریل تحت سناریوی SSP2-4.5، ۳۵٪ نسبت به دوره پایه کاهش یافته است و میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ در ماه آوریل تحت سناریوی SSP5-8.5، ۳۳٪ نسبت به دوره پایه کاهش یافته است.

افزایش میانگین بیشترین و کمینه دمای ماهیانه بر اساس دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در تمام ماه‌های سال در دوره آینده در شکل زیر نشان داده شده است (شکل ۶). همچنین، هم در خصوص بارش، و هم دمای بیشینه و دمای کمینه مقادیر میانگین بلند تخمینی از هر دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه بیشتر بوده است.

نتایج مدل‌سازی آب زیرزمینی

توپوگرافی ضخامت آبخوان در مطالعات اکتشافی موجود است. اطلاعات به‌دست آمده عمدتاً شامل مقاطع سنگ شناختی چاه، ضخامت اشباع آبخوان، گسترش نواحی با تراوایی زیاد، نوع آبخوان و یک یا چند لایه‌ای بودن آبخوان است. چنین اطلاعاتی می‌توانند برای تعیین مقدار پارامترهای هیدرودینامیک به شیوه‌های مختلفی مورد استفاده قرار گیرند. یکی از مهمترین اطلاعاتی که از چاه‌های اکتشافی به دست می‌آید، ضخامت آبخوان است. نیز لایه پهنه‌بندی ضخامت آبرفت آبخوان اشباع منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش درون‌یابی نزدیکترین همسایه در شکل زیر نشان داده شده است (شکل ۷).

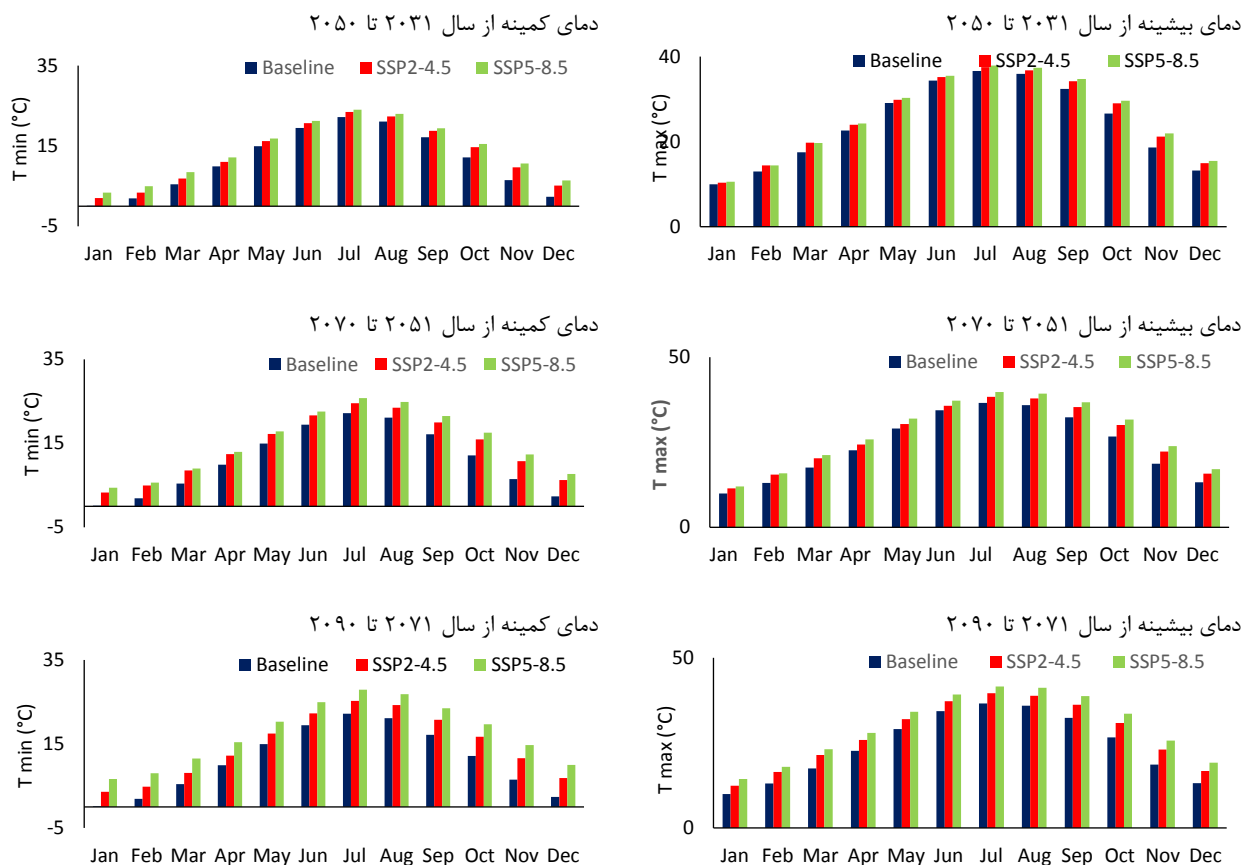
در بخش‌های پراکنده حاشیه رود به دلیل رسوبگذاری، آبخوان‌ها از نوع منحصر بوده و امکان تشکیل آبخوان تحت فشار به صورت محدود محتمل است؛ در قسمت مرکزی دشت مطالعاتی نیز ساختار از نوع دانه متوسط تا ریز توسعه یافته، تناوبی از لایه‌های آبرفتی با دانه بندی متفاوت در عمق آبخوان تشکیل شده است. آبخوان در دشتک‌ها و دره‌های آبرفتی ارتفاعات، بسیار محدود و از نظر ویژگی‌های هیدروژئولوژیک منفصل از آبخوان دشت اصلی مطالعاتی می‌باشند. از لایه کاربری‌اراضی موجود می‌توان برای استخراج نواحی مستعد به نفوذ بیشتر و زون‌های بالقوه استفاده کرد. به‌علاوه در تحلیل شاخص آسیب آبخوان در برابر کم آبی نیز قابل تحلیل آماری می‌باشد.

بارش در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ در ماه آوریل تحت سناریوی SSP5-8.5، ۴۵٪ نسبت به دوره پایه کاهش یافته است.

در ایستگاه سده بیشترین افزایش بارندگی در مقایسه با دوره پایه بر اساس سناریوی SSP2-4.5 در ماه اکتبر است. به‌طوریکه میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ در ماه اکتبر تحت سناریوی SSP2-4.5 ۳/۴۴ برابر نسبت به دوره پایه افزایش یافته است و میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ در ماه اکتبر تحت سناریوی SSP5-8.5، ۳/۳۷ برابر نسبت به دوره پایه افزایش یافته است. در این ایستگاه باران سنجی، بیشترین کاهش بارندگی در مقایسه با دوره پایه بر اساس سناریوی SSP2-4.5 در ماه می می‌باشد به‌طوریکه میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۷۱ تا ۲۰۹۰ در ماه می تحت سناریوی SSP2-4.5، ۷۲٪ کاهش یافته است و میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ در ماه می تحت سناریوی SSP5-8.5، ۷۵٪ نسبت به دوره پایه کاهش یافته است.

در ایستگاه درودزن بیشترین افزایش بارندگی در مقایسه با دوره پایه بر اساس سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در ماه سپتامبر است. به‌طوریکه میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ در ماه سپتامبر تحت سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5، ۵/۲۲ برابر نسبت به دوره پایه افزایش یافته است. در این ایستگاه همدیدی، بیشترین کاهش بارندگی در مقایسه با دوره پایه بر اساس سناریوی SSP2-4.5 در ماه مارچ می‌باشد به‌طوریکه میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ در ماه مارچ تحت سناریوی SSP2-4.5، ۳۸٪ کاهش یافته است و میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۱ در ماه مارچ تحت سناریوی SSP5-8.5، ۲۲٪ نسبت به دوره پایه کاهش یافته است.

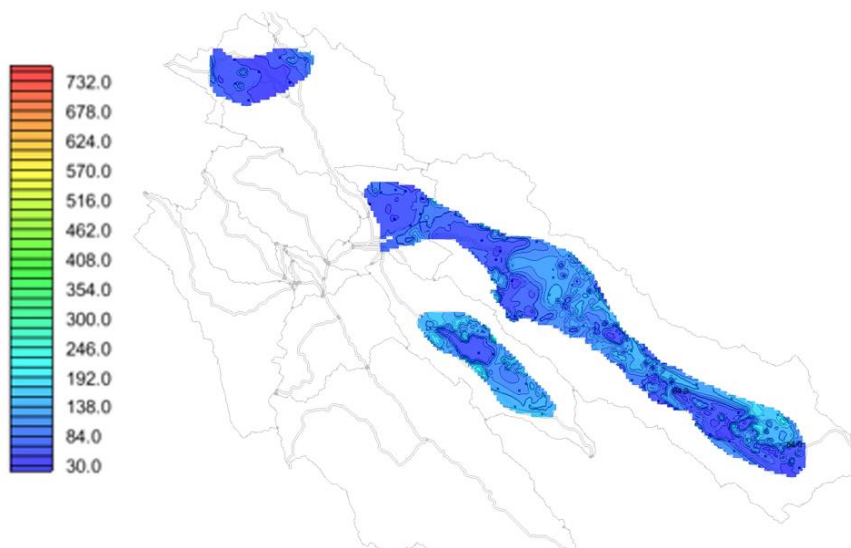
بیشترین افزایش بارندگی در مقایسه با دوره پایه بر اساس سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در ایستگاه احمد آباد چهاردانگه در ماه اکتبر است. به‌طوریکه میانگین مقدار بارش در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ در ماه اکتبر تحت سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5، بترتیب ۳/۷۳ و ۳/۷۸ برابر نسبت به دوره پایه افزایش یافته است. در این ایستگاه باران سنجی، بیشترین کاهش بارندگی در مقایسه با دوره پایه بر اساس سناریوی SSP2-4.5 در ماه آوریل می‌باشد به‌طوریکه



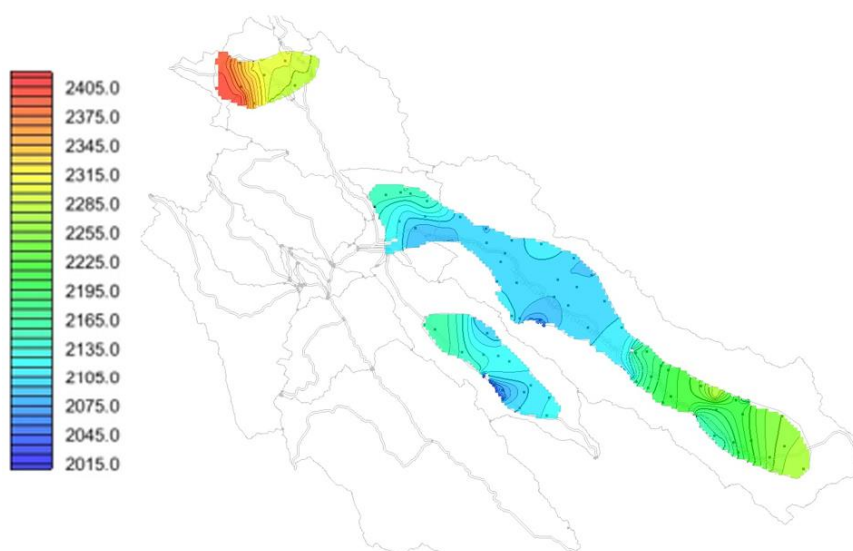
شکل ۶. میانگین بلند مدت دمای بیشینه و کمینه در ایستگاه‌های سینوپتیک برای دوره آینده ۲۰۳۰ تا ۲۰۹۰ تحت دو سناریو SSP5-8.5 و SSP2-4.5

زیاد و در حدود $500 \text{ m}^2/\text{day}$ برآورد می‌شود. در این مناطق مقدار آبدهی چاه‌های مورد بهره برداری نیز قابل توجه است؛ که خود گواهی بر صحت برآورد مقادیر بالای قابلیت انتقال است. همچنین مقدار قابلیت انتقال آبخوان در قسمت‌های حاشیه جنوبی آبخوان اندک است و در حدود $100 \text{ m}^2/\text{day}$ برآورد شده است. در بخش‌های میانی آبخوان نیز مقدار قابلیت انتقال آبخوان در حدود 200 تا $400 \text{ m}^2/\text{day}$ است. نتایج حاصل از مدل واسنجی شده MODFLOW نشان می‌دهد که روزانه به‌طور میانگین مقدار مشخصی از حجم ذخیره آبخوان کاهش یافته است. از طرفی به دلیل افت سطح آب در آبخوان مورد نظر، طی دوره ۱۰ ساله کاهش آب مخزن رخ داده است. سطح تراز آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعاتی در پایان بازه زمانی ۱۲۶ ماهه مورد مطالعه نشان داده شده است (شکل ۹). این نتایج در مقایسه با نتایج ابتدای دوره نشان‌دهنده افت سطح تراز در طول دوره مطالعاتی است.

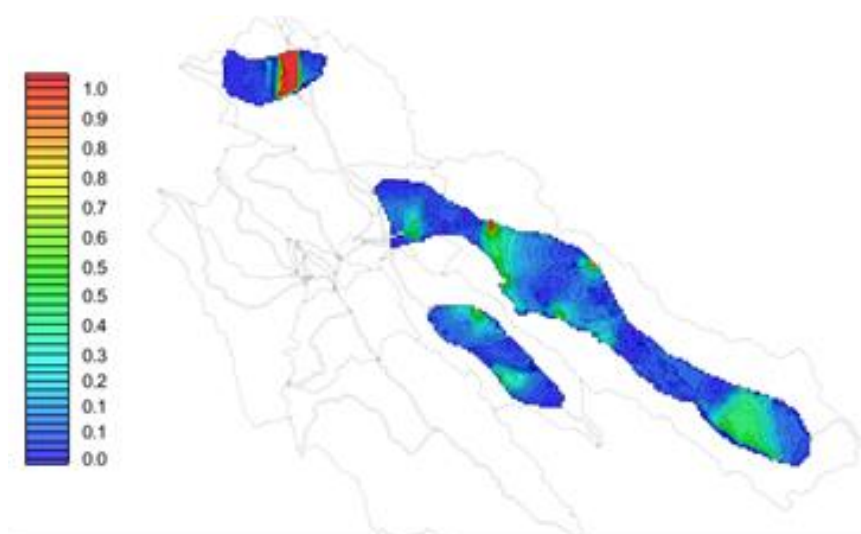
با بهره‌گیری از مجموع نتایج بدست آمده و تعیین مقادیر قابل قبول و ترسیم منحنی‌های هم‌قابلیت انتقال آبخوان هم‌ضریب ذخیره آبخوان بازه تغییرات قابلیت انتقال آبخوان آبرفتی در حدود $100 \text{ m}^2/\text{day}$ تا $500 \text{ m}^2/\text{day}$ و تغییرات مقدار ضریب ذخیره آبخوان در حدود ۲ تا ۷٪ برآورد می‌شود. بر این اساس و با متوسط گیری قابلیت انتقال و ضریب ذخیره آبخوان نسبت به سطح و ضخامت آبخوان، میانگین قابلیت انتقال برابر $300 \text{ m}^2/\text{day}$ و مقدار متوسط ضریب ذخیره برابر ۵٪ در گستره آبخوان آبرفتی تعیین می‌شود. پس از برآورد مقادیر قابلیت انتقال آبخوان با بهره‌گیری از روش‌های مختلف، ضرایب هیدرودینامیک حاصل با شرایط زمین شناسی مشتمل بر جنس، دانه بندی غالب ضخامت اشباع آبخوان و آبدهی ویژه چاه‌های بهره‌برداری بررسی و مقایسه شد. ارقام نهایی برای ترسیم خطوط هم ارزش قابلیت انتقال آبخوان استفاده شده است. مقدار ضریب قابلیت انتقال آبخوان در قسمت‌های مرکز آبخوان



شکل ۷. پهنه بندی ضخامت آبرفت آبخوان اشباع مطالعاتی



شکل ۸. تراز آب زیرزمینی آبخوان مطالعاتی در آخرین گام زمانی بازه ۱۲۶ ماهه با ادامه روند برداشت حاضر از چاه ها



شکل ۹. بزرگی سرعت جریان مدل نهایی دشت مطالعاتی

در این دوره میانگین مقدار دبی در ایستگاه هیدرومتری دهکده سفید و ایستگاه هیدرومتری چمریز به ترتیب ۲/۳۹ و ۲/۳۴ برابر نسبت به دوره پایه افزایش یافته است و تحت سناریوی SSP5-8.5، در دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ اتفاق می افتد بطوریکه میانگین مقدار دبی در ایستگاه هیدرومتری دهکده سفید و ایستگاه هیدرومتری چمریز در این دوره در ماه اکتبر به ترتیب ۲/۳۴ و ۲/۶۱ برابر نسبت به دوره پایه افزایش یافته است.

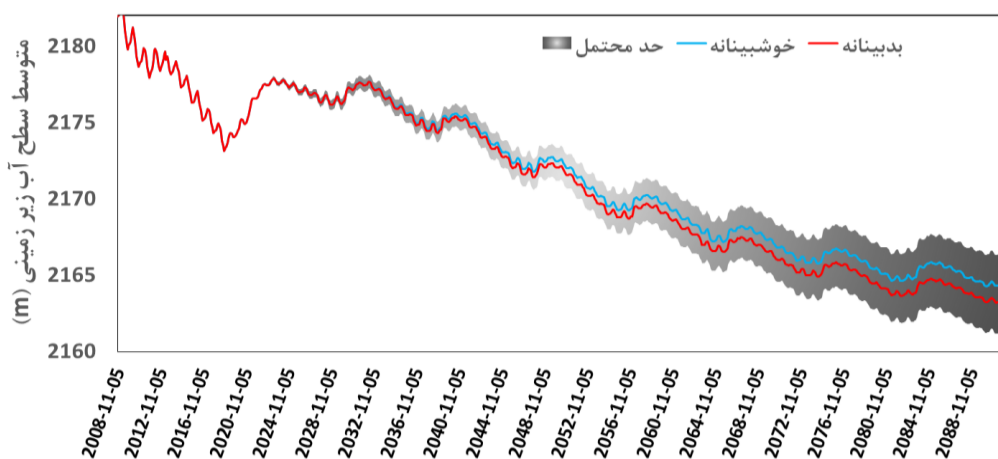
با توجه به داده‌های ارائه شده، مشخص شد که در دوره‌های زمانی آینده تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5، متوسط دمای ماهیانه ماکسیمم و مینیمم و همچنین میانگین مقدار بارندگی در برخی ایستگاه‌ها و ماه‌های خاص افزایش یافته یا کاهش پیدا کرده است. این تغییرات می‌تواند به دلیل عوامل مختلفی از جمله تغییرات اقلیمی و تحول جوی در آینده رخ خواهد داد. به عنوان نتیجه، می‌توان استنباط کرد که تغییرات اقلیمی و تحولات جوی با تأثیرهای مختلف بر روی الگوی بارش و دما در ایستگاه‌ها مواجه هستند. افزایش بارش در برخی مناطق و ماه‌های خاص می‌تواند منجر به مشکلات آبی و سیلاب‌های جدید شود، در حالی که کاهش بارش نیز ممکن است منجر به خشکسالی‌ها و کاهش منابع آبی شود به منظور مدیریت بهینه منابع آبی و سایر منابع طبیعی در آینده، توصیه می‌شود که برنامه‌ریزی‌ها و سیاست‌های مناسب برای سازگاری با این تغییرات اقلیمی اتخاذ شود این اقدامات شامل بهبود مدیریت آب، انجام پژوهش‌های بیشتر در حوزه اقلیم و تغییرات آن، آموزش و آگاهی‌بخشی به جامعه در مورد اهمیت حفظ منابع طبیعی و محیط زیست می‌باشد. این نتایج با پژوهش‌های سایرین (۴، ۵) در تطابق است.

در اراضی شمالی منطقه مورد مطالعه مقدار سرعت جریان آب زیرزمینی زیاد است (شکل ۹). بر اساس مشاهدات میدانی، حفر چاه‌های فراوان با مقدار برداشت بالا در نواحی مرکزی و نقش پر رنگ آنها، باعث ساختاری ناهمگن در نقشه سرعت جریان منطقه مورد مطالعه شده است. تراز آب زیرزمینی در سه آبخوان مورد بررسی در دوره بلندمدت به‌طور قابل توجهی زیر تاثیر سناریوهای بارش و تغذیه آبخوان‌ها قرار گرفت و با افت ۱۸m تا ۲۰m مواجه شد (شکل ۱۰). در سناریو خوشبینانه، تراز آب زیرزمینی به‌طور متوسط با روند کاهشی باقی می‌ماند. در سناریو بدبینانه، تراز آب زیرزمینی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

■ بحث و نتیجه‌گیری

تغییرات ماهانه دبی در ایستگاه هیدرومتری دهکده سفید و چمریز تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان می‌دهد که بیشترین افزایش دبی نسبت به دوره پایه در تمامی دوره‌های آینده در ماه اکتبر اتفاق می‌افتد که با توجه به اینکه در ایستگاه‌های اقلیمی همجوار ایستگاه‌های هیدرومتری بیشترین افزایش بارندگی در مقایسه با دوره پایه در ماه اکتبر می‌باشد، این مسئله کاملاً توجیه‌پذیر است. این نتایج با نتایج دیگر بررسی‌های انجام شده در این زمینه در تطابق است (۱، ۷).

بیشترین افزایش دبی در ایستگاه هیدرومتری دهکده سفید و ایستگاه هیدرومتری چمریز در ماه اکتبر تحت سناریوی SSP2-4.5، در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ اتفاق می‌افتد به‌طوریکه



شکل ۱۰. تغییرات تراز آب زیرزمینی تا سال ۲۰۹۰ با دو سناریو خوشبینانه و بدبینانه

کاهش را خواهد داشت، و سپس آبخوان بکان و آبخوان خسرو شیرین تحت تأثیر آن قرار می‌گیرند. عواملی که بر تراز آب زیرزمینی تأثیر دارند عبارتند از بارش، تغذیه آبخوان‌ها، برداشت آب و تبخیر و تعرق. این تغییرات می‌توانند منجر به کاهش منابع آب، فرونشست زمین، و مشکلات دیگری برای منابع آب و محیط زیست شوند. برای مقابله با این تغییرات، می‌توان راهکارهایی از قبیل مدیریت پایدار منابع آب، کاهش برداشت آب، و افزایش تغذیه آبخوان‌ها را ارائه داد. این اقدام‌ها می‌توانند در حفظ تراز آب زیرزمینی و ارزشمندی آن برای نسل‌های آینده کمک کنند و از تأثیرات منفی پیشگیری کند.

تراز آب زیرزمینی در سه آبخوان مورد بررسی در دوره بلند مدت به‌طور قابل توجهی زیر تأثیر سناریوهای بارش و تغذیه آبخوان‌ها قرار گرفت. در سناریوهای خوشبینانه و بدبینانه، تراز آب زیرزمینی از یک روند کاهشی تبعیت می‌کند. همچنین در منطقه مورد بررسی طی دوره ۱۰ ساله با کاهش روزانه حجم ذخیره آبخوان کاهش آب مخزن رخ خواهد داد. مدیریت پایدار منابع آب، کاهش برداشت آب، و افزایش تغذیه آبخوان‌ها از جمله راهکارهای مقابله با تغییرات تراز آب زیرزمینی و حفظ این منابع ارزشمند برای نسل‌های آینده است. بنابراین می‌توان مشخص کرد که الگوی اصلی تغییر تراز در این آبخوان‌ها متأثر از چاه‌های برداشتی می‌باشد.

■ سپاسگزاری

از حمایت‌های مادی و معنوی معاونت آموزشی و پژوهشی دانشگاه یزد تقدیر و تشکر می‌گردد.

ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم در مقیاس‌های منطقه‌ای و حوزه آبخیز در خصوص مدیریت منابع آب، برای تدوین و اجرای سیاست‌هایی برای دست‌یابی به توسعه پایدار مورد توجه می‌باشد. مطابق با نتایج حاصل شده، متوسط دمای کمینه و بیشینه ماهانه بر اساس دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در کل ماه‌های سال در دوره آینده افزایش خواهد یافت. همچنین، تغییرات ماهانه دبی در ایستگاه هیدرومتری دهکده سفید و چمریز تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان می‌دهد که بیشترین افزایش دبی نسبت به دوره پایه در تمامی دوره‌های آینده در ماه اکتبر (مهر ماه) اتفاق می‌افتد که با توجه به اینکه در ایستگاه‌های اقلیمی هم ماکسیمم افزایش بارندگی در مقایسه با دوره پایه در ماه اکتبر می‌باشد، این مسئله کاملاً توجیه پذیر است. با توجه به یافته‌های این مطالعه نتیجه‌گیری می‌شود که با افزایش مقدار بارندگی‌ها در حوزه آبخیز رودخانه کر، اتخاذ راهکارهایی برای نفوذ آب باران و افزایش منابع آب زیرزمینی و کاهش خطرات ناشی از افزایش جریان‌ات سطحی و وقوع سیلاب اجتناب ناپذیر است. راهکارهایی همانند افزایش پوشش طبیعی منطقه و کاشت درختان سریع‌الرشد برای این منطقه بسیار مناسب است.

در سناریو خوشبینانه، بارش و تغذیه آبخوان‌ها به‌طور متوسط در سطح فعلی باقی می‌ماند، ولی تراز آب زیرزمینی در طول دوره بلند مدت به‌طور متوسط کاهشی باقی می‌ماند، با حفظ نوسانات سالانه و فصلی. در صورت مدیریت اصولی منابع، کاهش منابع آب و بروز فرونشست زمین جلوگیری می‌شود. اما در سناریو بدبینانه، بارش و تغذیه آبخوان‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که موجب کاهش تراز آب زیرزمینی می‌شود. این کاهش در هر آبخوان متفاوت خواهد بود، به‌طوری‌که آبخوان اسپاس بیشترین

■ References

1. Abbaszadeh, M., Bazrafshan, O., Mahdavi, R., Sardooi, E. R., & Jamshidi, S. (2023). Modeling Future Hydrological Characteristics Based on Land Use/Land Cover and Climate Changes Using the SWAT Model. *Water Resources Management*, (37)10, 4177-4194. DOI: 10.1007/s11269-023-03545-6
2. Abbasnouvinpour, E., Karimi, F. and Rezaie, H. (2022). The Prediction of Groundwater Level in Ghorve Plain Using MODFLOW Model in Different Scenarios of LARS-WG Climate Change. *Water and Soil Science*, 32(4), 61-73. [In Persian]

3. An, N.N., Nhut, H.S., Phuong, T.A., Huy, V.Q., Hanh, N.C., Thao, G.T.P., Trinh, P.T., Hoa, P.V. and Binh, N.A. (2022). Groundwater simulation in Dak Lak province based on MODFLOW model and climate change scenarios. *Frontiers in Engineering and Built Environment*, Vol. 2 No. 1, pp. 55-67. DOI: <https://doi.org/10.1108/FEBE-11-2021-0055>
4. Askarizadeh, D., Arzani, H., Jaffari, M., Bazrafshan, J., & Prentice, I.C. (2018). Surveying of the past, present and future of vegetation changes in the central Alborz ranges in relation to climate change. *RS & GIS for Natural Resources*, 9(3), 1-18. [In Persian]
5. Clayton, S., & Karazsia, B. T. (2020). Development and validation of a measure of climate change anxiety. *Journal of Environmental Psychology*, 69, Article 101434. DOI: 10.1016/j.jenvp.2020.101434
6. Dong, Y., Li, G. & Xu, H. (2012). An aerial recharge and discharge simulating method for MODFLOW. *Computers & Geosciences*. 42, 203-205. DOI: 10.1016/j.cageo.2011.10.005
7. Goodarzi, M., & Mortazavizadeh, F. S. (2020). Assessing Climate Change Impacts on Groundwater Fluctuations Using RCP Scenarios. *Iranian journal of Eco hydrology*, 7(3), 801- 814. [In Persian]
8. HajiGhasemi, Sh., Zakeri Niri, M., & Najafi Jilani, A. (2021). Investigating of Climate Change Effects on the Surface Runoff with SWAT Model (Case study: Mazlaghan River). *Iranian journal of Irrigation and Drainage*, 15(1), 121-137. [In Persian]
9. Jallili, Kh., Moradi, H.R., & Bozorg haddad, O. (2016). Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources in Islam Abad Aquifer and Land Allocation Optimization. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 5(11), 117-131. [In Persian].
10. Khan, M.S.H., Haque, M.E., Ahmed, M., Mallick, J., Islam, A.R.M.T., & Fattah, A.M. (2024). Quantitative analysis and modeling of groundwater flow using visual MODFLOW: a case from subtropical coal mine, northwest Bangladesh. *Environment Development Sustain*, 26, 12971–12993. DOI: 10.1007/s10668-023-04052-9
11. Liu, W., Bailey, R. T., Andersen, H. E., Jeppesen, E., Nielsen, A., Peng, K., Trolle, D. (2020). Quantifying the effects of climate change on hydrological regime and stream biota in a groundwater-dominated catchment: A modelling approach combining SWAT-MODFLOW with flow-biota empirical models. *Science of The Total Environment*, 745, 140933. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140933>
12. Patil, N. S., Chetan, N. L., Nataraja, M., & Suthar, S. (2020). Climate change scenarios and its effect on groundwater level in the Hiranyakeshi watershed. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 100323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100323>
13. Razavi, S., Davary, K., Shahedi, M., Talebi, F., & Joodavi, A. (2019). An overview on water balance models: mathematical-conceptual water balance models for watershed. *Iranian Water Researches Journal*, 13(4), 125-136 [In Persian].
14. Shahin Rakhsar, P., & Nazmi, A. (2021). *Climate change and its impact on underground water resources*. 11th national conference on sustainable agriculture and natural resources, Tehran. [In Persian].
15. Sheikh Biklo Islam, B. (2018). *The effects of extreme weather events related to climate change: From the past to the present*, The 14th Congress of the Iranian Geographic. Tehran, Iran. [In Persian].
16. Sheikha-BagemGhaleh, S., Babazadeh, H., Rezaie, H. & Saraee-Tabrizi, M. (2023). The effect of climate change on surface and groundwater resources using WEAP-MODFLOW models. *Applied Water Science*. 13, 121. DOI: 10.1007/s13201-023-01923-4.

17. Shrestha, S., Bach, T.V., & Pandey, V.P. (2016). Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Environ. Sci. Policy*, 61, 1-13. DOI: 10.1016/j.envsci.2016.03.010
18. Soleymani Motlagh, M. S., Ghasemieh, H., Talebi, A., & Abdollahi, K. (2017). Identification and analysis of drought propagation of groundwater during past and future periods. *Water Resources Management*, 31(1), 109-125. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1513-5>
19. Taylor, M. (2013). Climate change, relational vulnerability and human security: rethinking sustainable adaptation in agrarian environments. *Climate and Development*, 5(4), 318-327. DOI: <https://doi.org/10.1080/17565529.2013.830954>
20. Zhang, L., Li, X., Han, J., Lin, J., Dai, Y. & Liu, P. (2024). Identification of surface water - groundwater nitrate governing factors in Jianghuai hilly area based on coupled SWAT-MODFLOW-RT3D modeling approach. *Science of The Total Environment*. 912: 168830. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168830