



Original Article

Investigating the Effects of Climate Change on Water Resources in the Chahardoli Plain

Abobakr Rahimi^{1*} 

1- Department of Water Science and Engineering, Sa.C., Islamic Azad University, Sanandaj, Iran. Email:

Received: June 21, 2025
Revised: August 22, 2025

Accepted: August 26, 2025
Published online: September 22, 2025

*Corresponding Author's Email: Ab.Rahimi1349@iau.ac.ir

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Chahardoli Plain,
MODFLOW Groundwater
level,
Unit Hydrograph

Introduction

Global warming caused by the increase in greenhouse gases, which leads to climate change, is known—based on various studies—to be a result of industrialization. One of the consequences of climate change is the alteration of water resources as well as changes in the general circulation of the atmosphere, temperature, and precipitation. Iran, located in the arid and semi-arid belt, is not exempt from this phenomenon. Since most of Iran's surface water resources are rapidly declining due to population growth and agricultural expansion, the pressure on groundwater resources is increasing. Climate change reports and modeling efforts in this regard can assist researchers in simulating the current and future states of aquifers and surface water resources, enabling them to make informed decisions regarding their management.

Materials and Methods

In this study, to assess the condition of groundwater resources in the Chahardoli plain during the period 2006–208 (most likely 2006–2080), the MODFLOW hydrological model was used. For climatic components such as precipitation and maximum and minimum temperature, the GFDL-ESM4 and MIROC-ES2L climate models were applied, using observed data covering 1988–2018 under two scenarios: SSP126 and SSP585. The long-term monthly averages of climatic parameters (precipitation, maximum and minimum temperature) were compared between observed and simulated data. In this research, the groundwater level for the coming months was simulated for all piezometers, and the unit hydrograph of the Chahardoli aquifer was plotted for the current state as well as for the reference and SSP126 and SSP585 scenarios.

Results and Discussion

In this study, the sixth assessment report of the Climate Model Intercomparison Project (CMIP6) was used to predict future temperature and precipitation. To validate and evaluate the accuracy of general circulation models and their data fitting, the statistical indices RMSE, MAE, and NS were employed. Considering model uncertainty, a single model is not sufficient for validation and enhancing prediction

How to cite:

Rahimi, A. *Investigating the Effects of Climate Change on Water Resources in the Chahardoli Plain*. Journal of Hydraulics and Water Science, 35 (3):51-65.

<https://doi.org/10.22034/hws.2025.67753.1028>



This is an open-access article under the CC BY NC license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)



accuracy; therefore, two models—GFDL-ESM4 and MIROC-ES2L—were applied under two scenarios, SSP126 (optimistic) and SSP585 (pessimistic).

The analysis of climate change impacts over the region indicated that precipitation will decrease while maximum and minimum temperatures will increase during the upcoming period (2026–2040). Simulated groundwater levels under different scenarios for 19 piezometers in the Chahardoli aquifer revealed that, in the SSP585 climate change scenario, groundwater levels in the central and southern parts of the aquifer were lower compared to the other scenarios. This decline corresponds to reduced precipitation and continuous extraction from 954 existing wells. Furthermore, when analyzing groundwater level decline and plotting the unit hydrograph of the Chahardoli aquifer under various scenarios, the SSP585 (pessimistic) scenario showed the greatest decline about 3 MCM. The simulation results demonstrated that the aquifer deficit is expected to increase by approximately 0.15 million cubic meters over the next 14-year period, with the aquifer water balance remaining negative.

Conclusion

The results regarding aquifer depletion are consistent with previous studies conducted on the Qorveh, Dehghan, and Chahardoli aquifers. Moreover, a comparison between the obtained results and earlier studies carried out in other regions of the country and around the world indicates that climate change, together with human activities, has contributed to the decline in groundwater levels. If the current trend of excessive groundwater extraction continues, along with reduced recharge due to decreasing precipitation in future years, aquifers in all regions are likely to continue facing depletion relative to their present conditions. Given these changes, proper water resource management considering agricultural, domestic, industrial, and environmental aspects can mitigate the adverse effects of human activities and climate change on regional water resources. In recent years, numerous studies have examined the impacts of climate change on groundwater levels across different parts of the world, confirming the undeniable influence of climatic variations and the choice of climate models and emission scenarios on groundwater resources.

Keywords: Chahardoli Plain, MODFLOW, Groundwater Level, Unit Hydrograph.



بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب دشت چهاردولی

ابوبکر رحیمی^{۱*}

۱- گروه علوم ومهندسی آب، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵
تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

چکیده

بخش کشاورزی در شمال غربی ایران حدود ۹۵ درصد از منابع آب موجود منطقه را مصرف می‌کند و نزدیک به ۹۸ درصد از آب سفره‌های زیرزمینی را تشکیل می‌دهد. با وجود اینکه این مناطق از نظر منابع آب غنی هستند، اما در حال حاضر این منابع به سرعت در حال کاهش است. دشت چهاردولی در شرق استان کردستان دارای سفره آزاد با مساحت ۳۲۱ کیلومتر مربع است که منابع آب آن مصارف بخش کشاورزی، خانگی و صنعت را تأمین می‌کند. در این پژوهش از مدل هیدرولوژیکی MODFLOW برای بررسی وضعیت منابع آب زیرزمینی منطقه برای دوره ۲۰۰۶-۲۰۱۸ تحت عنوان سناریوی مرجع شبیه‌سازی شد. سپس تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی در سال‌های ۲۰۲۶-۲۰۳۸ تحت سناریوهای SSP126 و SSP585 نیز ارزیابی شد. نتایج نشان داد که در شرایط اقلیمی شرایط بدبینانه (SSP585) کاهش بارندگی و افزایش دمای حداکثر و حداقل بیشتر بوده و افت سطح آب زیرزمینی در این سناریو نیز به طبع بیشتر مشاهده گردید. همچنین مشاهده گردید سطح آب زیرزمینی در پی‌زومترهای واقع در مرکز آبخوان و بخش جنوبی افت بیشتری را داشته است. در ترسیم هیدروگراف واحد آبخوان چهاردولی میزان افت آب سطحی در دوره ۱۵ سال در سناریوی مرجع ۱/۶۸ میلیون مترمکعب، سناریوی تغییر اقلیم SSP126 ۲/۷۷ میلیون مترمکعب و برای سناریوی تغییر اقلیم (SSP585) ۲/۹۲ میلیون مترمکعب بدست آمد. مقدار بیلان در شرایط بدبینانه (سناریو SSP585) در دوره ۱۴ ساله آینده ۰/۱۵- میلیون مترمکعب محاسبه شد. با توجه به نتایج بدست آمده پیشگیری از عواقب احتمالی ناشی از تغییر اقلیم و کاهش نفوذ بارندگی نیازمند پیش‌بینی‌های مدیریتی و تصمیمات مناسب برای مقابله با چالش‌های آبی است. کلمات کلیدی: دشت چهاردولی، Modflow، سطح آب زیرزمینی، هیدروگراف واحد.

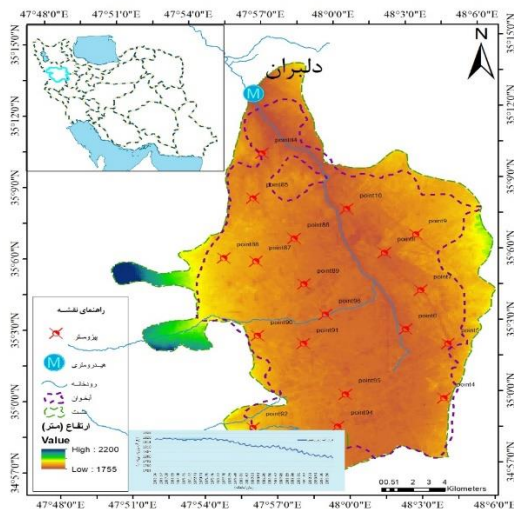
۱- مقدمه

گرمایش جهانی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای به خصوص گاز Co2 که تغییر اقلیم را به دنبال دارد طبق مطالعات و تحقیقات در اثر صنعتی شدن جوامع می‌باشد. یکی از پیامدهای آن تغییر منابع آب است که این کمبود آب جهانی در حال حاضر رو به وخامت است و پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰، ۲/۳۷ میلیارد نفر تحت تأثیر قرار خواهند گرفت (Liu et al., 2021). این تغییرات بر گردش عمومی اتمسفر، دما و بارش اثر می‌گذارد (Ansari et al., 2014, Abbasnouvin pour et al., 2022). کشور ایران با میانگین سالانه ۲۵۰ میلی‌متر بارش یکی از کشورهای خشک و نیمه‌خشک دنیا محسوب می‌شود، آب زیرزمینی حدود ۴ درصد از مجموعه آب‌هایی را که فعالانه در چرخه آب شناختی دخالت دارند، تشکیل می‌دهد. با توجه به کاهش منابع آب سطحی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، منابع آب زیرزمینی به طور فزاینده‌ای مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند (Milan et al., 2023, Hamamouche et al., 2017, Hosseini et al., 2023, Massuel and Riaux, 2017). از آنجایی که بیشتر منابع آب سطحی ایران به دلیل افزایش جمعیت و توسعه کشاورزی به سرعت در حال کاهش هستند، فشار بر منابع آب زیرزمینی در حال افزایش است (Kayhomayoon et al., 2021, Chakraei et al., 2021, Safavi et al., 2010). در عین حال، تغییرات اقلیمی آینده باعث اختلاف بیشتر بین عرضه و تقاضای آب کشاورزی در کشور خواهد شد که کشاورزی ۹۰ تا ۹۵ درصد از کل منابع آب را مصرف می‌کند. لذا استفاده پایدار از این منابع به معنای برداشت منطقی و محدود از آنها است که به دلیل عدم شناخت صحیح و یا عدم درک میزان آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی سهل‌انگاری‌های زیادی صورت گرفته است، بنابراین لزوم توجه به منابع آب زیرزمینی امری حیاتی می‌باشد (Abbasnouvin pour et al., 2022, Goodarzi et al., 2014). بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در سال‌های اخیر باعث به هم خوردن تعادل طبیعی آن شده و تراز آب زیرزمینی در آبخوان‌های بسیاری از نقاط کشور منفی و به منطقه ممنوعه تبدیل شده است. همچنین عدم اعمال مدیریت و یا اعمال مدیریت‌های غیرصحیح در این دشته‌ها باعث بروز مشکلات ناشی از افت آب و یا اثرات ناشی از استفاده‌های غیربهبهینه از این منابع گردیده است. با اعمال روش‌های مدیریتی مناسب در استفاده از منابع آب موجود علاوه بر اینکه می‌توان مخارج سنگین توسعه و بهره‌برداری از این منابع را کاست، میزان استفاده از این منابع را نیز می‌توان بهبود کرد. حوضه آبریز چهاردولی در استان کردستان در ۹۵ کیلومتری شرق سنندج و شمال غرب همدان واقع شده است. این محدوده جزئی از حوضه آبریز رودخانه شور است و یکی از دشتهای موجود در محدوده مطالعاتی قروه-دهگلان است. مدل‌های شبیه‌سازی عددی آب‌های زیرزمینی، مانند MODFLOW، ابزارهای مناسبی برای درک بهتر سفره‌های آب زیرزمینی به عنوان سیستم‌های

جداگانه هستند. تحقیقات زیادی در زمینه شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی با MODFLOW در مناطق مختلف انجام شده است. Hosseinzade Kuhi and Ardestani (2024) وضعیت کمی آب زیرزمینی دشت آسمان در حوزه آبریز گاوخونی با استفاده از مدل MODFLOW را مدل‌سازی نمودند. دوره زمانی مورد بررسی در تحقیق آن‌ها ۱۳۷۶-۱۳۹۰ بود. نتایج مدل‌سازی نشان داد که در طول دوره زمانی ۱۵ سال آبی تراز آب زیرزمینی دچار افت ۷/۵ متری شده است. این امر ناشی از عوامل خشکی زاینده‌رود، برداشت بی‌رویه و وجود کم‌آبی منجر به تشدید آثار نامطلوب محیط زیستی تالاب بین‌المللی گاوخانی شده است. (Shakeri et al., 2023). جریان آب‌های زیرزمینی آبخوان آبرفتی کرج را با استفاده از MODFLOW شبیه‌سازی کردند. نمونه‌برداری برای هشت دوره زمانی فصلی در طول سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۱۸ انجام شد. آنها نشان دادند که کسری آبخوان حدود ۳۳ میلیون متر مکعب بوده و سطح آب‌های زیرزمینی می‌تواند ۱/۷ متر کاهش یابد. (Alioghli and Sattari, 2024). به ارزیابی سناریوهای تخصیص منابع آب حوضه مهاباد تحت تأثیر تغییر اقلیم با استفاده از مدل WEAP پرداختند. به منظور بررسی تغییر اقلیم منطقه داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 استخراج نمودند. در بررسی اثرات تغییر اقلیم در طی دوره آماری ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۹ بر سایت‌های عرضه و تقاضا با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES پیش‌بینی کردند. سپس خروجی‌ها مدل IHACRES را به عنوان ورودی مدل WEAP معرفی و نتایج نشان داد که اولویت تخصیص ابتدا برای شرب و دوم برای کشاورزی مدل MIROC8.5 تحت سناریوی RCP8.5 بیشترین میزان تقاضای برآورد نشده را دارد. همچنین نتایج نشان داد که مدل GFDL4.5 تحت سناریو RCP4.5 با ۷۲ درصد قابلیت اطمینان حجمی و ۴۲ درصد قابلیت اطمینان زمانی، بالاترین قابلیت اطمینان مشاهده گردید.

Allahverdipour and Sattari (2025) اثرات تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به سد ستارخان اهر را با استفاده از مدل IHACRES را ارزیابی نمودند. آن‌ها از سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم مدل HadGEM3-GC31-LL تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 برای پیش‌بینی شرایط اقلیمی آینده استفاده نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش بارش در اکثر ماه‌ها، دمای کمینه و بیشینه نیز افزایش می‌یابد. از مقایسه رواناب دوره پایه و آینده نتایج نشان داد که رواناب ورودی به سد ستارخان کاهش قابل توجهی داشته و در هر دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 متوسط رواناب از ۱/۳۹ (مترمکعب بر ثانیه) به ترتیب به ۱/۳۰ و ۱/۱۳ (مترمکعب بر ثانیه) کاهش یافته است. (Rahimi Jamnanin et al., 2024). اختلاف بین تقاضا و عرضه آب در بخش کشاورزی در شمال غربی ایران با استفاده از WEAP-MODFLOW تحت سناریوی CMIP6 را بررسی کردند. آنها با استفاده از سیستم ارزیابی و برنامه‌ریزی آب و مدل

دو دهه اخیر در چهار دوره پیاپی (طول هر دوره چهار سال) در لیست دشت‌های ممنوعه قرار دهد. موقعیت آبخوان چهاردولی در شکل ۱ ارائه شده است. در محدوده مورد مطالعه ۵ چاه اکتشافی و ۱۹ چاه مشاهداتی وجود دارد که سطح آبخوان را به طور مناسب برای دریافت اطلاعات تعیین ضرایب هیدروپنماتیک آبخوان و تراز آب زیرزمینی سطح آبخوان را پوشش می‌دهند (شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان، ۱۳۹۷).



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی آبخوان چهاردولی و پیژومترهای مشاهداتی

Fig1. Location of study area Chardoli aquifer and peizometers observation

۲-۲- جمع‌آوری اطلاعات هیدروکلیماتولوژی و منابع آب

در پژوهش حاضر از آمار و اطلاعات متوسط (دوره ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸) هواشناسی و آب سطحی، تغییرات طولانی مدت (۱۵ ساله منتهی به سال ۲۰۱۸) سطح آب زیرزمینی و میزان تخلیه آب زیرزمینی منطبق بر آماربرداری شرکت مدیریت منابع آب ایران برای مدل‌سازی آب زیرزمینی دشت چهاردولی استفاده شده است. منابع آب مورد استفاده در این دشت شامل منابع آب زیرزمینی و منابع آب سطحی است. داده‌های آب زیرزمینی شامل موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای، سطح آب زیرزمینی، موقعیت آبخوان و ضرایب هیدروپنماتیک و داده‌های آب سطحی شامل مقاطع خروجی و مقاطع ورودی آبخوان و تخلیه چاه‌های کشاورزی، شرب و صنعت از شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان تهیه گردید. ضرایب هیدروپنماتیک اخذ شده از گزارشات آب منطقه‌ای استان کردستان به صورت سالانه در سال ۱۳۹۷ در جدول ۱ ارائه شده است. نوع آبخوان چهاردولی آزاد بوده و مهمترین جریان‌های ورودی آب

هیدرولوژیکی MODFLOW به همراه یادگیری ماشین برای بررسی وضعیت منابع آب آینده در این منطقه تحت تأثیر تغییرات اقلیمی استفاده کردند. تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی در سال‌های ۲۰۲۶-۲۰۴۵ تحت سناریوهای انتشار SSP2.6 و SSP8.5 ارزیابی کردند و از رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپلاین برای تولید رواناب آینده و از رگرسیون بردار پشتیبان حداقل مربعات (LSSVR) برای پیش‌بینی سطح آب‌های زیرزمینی برای دوره ۲۰۲۶-۲۰۴۵ استفاده نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که تحت سناریوی SSP8.5، میزان بارندگی در آینده حدود ۱۵ درصد در مقایسه با دوره مرجع (۱۹۸۷-۲۰۰۵) کاهش یافته و جریان ورودی به مخزن ۲۵ درصد کاهش می‌یابد که ممکن است سطح آب‌های زیرزمینی را در دوره آینده ۱/۲ متر در سال کاهش می‌یابد. همچنین دریافتند سطح آب‌های زیرزمینی در سفره‌های آب زیرزمینی قروه و دهگلان در دوره ۲۰۰۸-۲۰۲۱ نزدیک به ۲۰ متر کاهش یافته است و هنوز حدود ۵ تا ۲۵ میلیون متر مکعب از تقاضای آب برای بخش کشاورزی تأمین نشده است. اگر روند فعلی ادامه یابد، تا ۶۵ میلیون متر مکعب از تقاضای آب در منطقه در آینده نزدیک تأمین نخواهد شد.

در این پژوهش براساس گزارش ششم تغییر اقلیم تغییرات پارامترهای بارندگی و دمای حداقل و حداکثر در سناریوهای SSP126 و SSP585 برای دوره آبی ۲۰۲۶-۲۰۴۰ برآورد گردید. و سپس در محیط GMS10.8.1 سطح آب زیرزمینی در سه سناریوی تعریف شده شبیه‌سازی و در نهایت هیدروگراف واحد آبخوان و میزان افت سطح آب زیرزمینی در سطح آبخوان برای دوره‌ی مرجع (۲۰۰۶-۲۰۱۸) و دوره‌ی آبی (۲۰۲۶-۲۰۳۸) ترسیم و محاسبه شد.

با توجه به ممنوعه بودن دشت مورد مطالعه، هدف اصلی از اجرای مدل پیش‌بینی وضعیت تراز آب زیرزمینی در صورت ادامه روند برداشت آب فعلی و با تغییر شرایط اقلیمی در آینده در سه سناریوی مذکور از دیگر اهداف این پژوهش هستند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دشت چهاردولی در شرق استان کردستان با مساحت ۳۲۱ کیلومتر مربع آبخوان در بین ۵۷' ۳۵° تا ۱۵' ۳۶° عرض شمالی و ۴۷' ۵۱° تا ۴۸' ۰۶° طول شرقی واقع شده است. نواحی شرق و شمال شرق دارای ارتفاع ۱۷۵۵ تا ۲۲۰۰ متر و مناطق مرکزی که در برگیرنده آبخوان می‌باشد دارای ارتفاع ۱۸۰۰ تا ۱۹۰۰ متر می‌باشد. منطقه شمال محدوده که خروجی آن محسوب می‌شود (ایستگاه هیدرومتری دلیران) تقریباً دارای ارتفاع ۱۷۸۰ متر می‌باشد. این دشت به دلیل برداشت‌های بی‌رویه از آبخوان و حفر چاه‌های غیرمجاز و کف‌شکنی‌های غیرمجاز وزرات نیرو آن را در در

گرفت. به منظور اجرای مدل در شرایط ناپایدار، از آمار تراز سطح آب زیرزمینی در یک دوره زمانی (اکتبر ۲۰۰۶ تا مارس ۲۰۰۷) با گام زمانی ماهانه استفاده گردید. طی واسنجی مدل به منظور حداقل سازی اختلاف سطح آب زیرزمینی محاسباتی با مشاهداتی با تغییر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه به صورت کاهشی و افزایشی مدل اجرا و تحلیل حساسیت شد و میزان خطای اجرای مدل آن مورد محاسبه قرار گرفت.

۲-۵- صحت‌سنجی

هدف از تعیین صحت مدل، ایجاد اطمینان بیش‌تر در مدل با استفاده از مجموعه مقادیر پارامترهای واسنجی شده و لایه‌های اطلاعاتی دوره دیگر است. اگر پارامترهای مدل واسنجی شده نظیر شرایط مرزی، تنش‌ها و توزیع خصوصیات هیدروژئولوژیکی (نفوذپذیری، قابلیت انتقال، تخلخل مؤثر) صحیح باشند، مجموعه داده‌های مستقل صحرایی باید به‌طور نزدیک شرایط مرزی و تنش‌های جدید مدل را برازش کنند. اگر مدل اجرا شده با شرایط تغییر یافته مذکور توزیع بار هیدرولیکی را ایجاد کند که به‌طور نزدیک با مجموعه داده‌های مذکور سازگار باشد، مدل صحت‌سنجی شده است (Kresic, 2007).

۲-۶- استخراج داده‌های اقلیمی و تولید سناریوهای تغییر

اقلیم

استفاده از مدل‌های هیدروژئولوژیکی در ترکیب با خروجی‌های مدل جهانی آب و هوا برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی منابع آب، رویکرد مؤثری برای تخمین مصرف آب است. هیات بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش ششم خود از سناریوهای جدید SSP تحت عنوان نماینده‌های خطوط مسیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. پیش‌بینی‌های اقلیمی CMIP6 نتایج قابل قبول‌تری نسبت به مسیرهای غلظت در سناریوهای (RCPs) که قبلاً استفاده می‌شدند، ارائه می‌دهند (Xu et al., 2024). امروزه تهیه و استخراج داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو از طریق مراکز مختلف تحقیقاتی قابل دسترس است. یکی از این مراکز سایت <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/> است. باید در نظر داشت که قدرت تفکیک مدل‌های اقلیمی مختلف و در حقیقت طول و عرض جغرافیایی سلولی که ایستگاه مورد نظر در آن قرار گرفته با یکدیگر متفاوت است. از بین مدل‌های متنوعی که در گزارش ارزیابی ششم به کار رفته است، دو مدل (GFDL-ESM4) و (MIROC-ES2L) انتخاب قرار گرفت. گزارش ششم این هیات که در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است در سال

زیرزمینی شامل نفوذ از بارندگی، تغذیه زیرزمینی و آب برگشتی کشاورزی می‌باشد. جهت عمومی جریان آب زیرزمینی از سمت جنوب غربی به سمت نواحی مرکزی و سپس به سمت نواحی شمالی و شمال غربی دشت در جریان بوده و از توپوگرافی سطحی تبعیت می‌نماید. داده‌های هواشناسی که شامل بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه است، از سازمان هواشناسی استان کردستان تهیه گردیده است. دمای متوسط سالانه (۱۳۹۹) در دشت چهاردولی در ایستگاه دوسر حدود ۹/۱۶ درجه سانتیگراد و متوسط بارندگی سالانه حدود ۲۹۲/۰۶ میلیمتر برآورد شده است (شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان، ۱۳۹۷).

جدول ۱- ضرایب هیدرودینامیک برای آبخوان دشت چهاردولی
Table2. Hydrodynamic coefficients for the Chahardoli Plain aquifer

ضریب قابلیت انتقال (m/day)	۲۲۶-۸۱۵
T(m/day)	
ضریب ذخیره S	۰/۱۵
جریان ورودی به آبخوان (میلیون مترمکعب/سالانه) Qin	۲۶/۲۱
جریان خروجی زیرزمینی (میلیون مترمکعب/سالانه) Qout	۱/۸۴

۲-۳- مدل مفهومی و عددی آبخوان چهاردولی

در این پژوهش برای حل معادلات جریان آب زیرزمینی در آبخوان چهاردولی از مدل عددی MODFLOW استفاده شده است. MODFLOW به عنوان یک شبیه‌ساز سه‌بعدی جریان آب زیرزمینی متداول بوده و به‌طور گسترده در بسیاری از مطالعات هیدروژئولوژیک استفاده می‌شود. این مدل در واقع حل تفاضل محدود برای معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر جریان آب زیرزمینی است. به منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در سفره‌هایی با شرایط مرزی مشخص و با فرض مقادیر لازم جهت هدایت هیدرولیکی و دیگر پارامترهای سفره کاربرد دارد (Hoaglund et al., 2002).

۲-۴- واسنجی و تحلیل حساسیت

واسنجی عبارت است از تنظیم و تعدیل پارامترهای ورودی مدل، به‌طوری که اختلاف تراز آب زیرزمینی محاسباتی توسط آن با مقادیر اندازه‌گیری شده صحرایی کمینه گردد. در طول واسنجی در شرایط پایدار براساس داده‌های تراز آب زیرزمینی مشاهداتی سال ۲۰۰۶ تخمین زده شد. مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی واسنجی شده و تراز سطح ایستابی محاسباتی در این مرحله، مبنای شبیه‌سازی واسنجی در شرایط ناپایدار قرار

Table 2. Result index climate change MIROC-ES2L model

شاخص / پارامتر	SSP126	SSP585	هواشناسی
ضریب همبستگی	0.81	0.82	Precipitation
R^2			
RMSE	16.01	15.18	
نش ساتکلیف	0.61	0.65	
NS			
ضریب همبستگی	0.65	0.63	T_{max}
R^2			
RMSE	23.78	23.48	
نش ساتکلیف	0.91	0.82	
NS			
ضریب همبستگی	0.46	0.46	T_{min}
R^2			
RMSE	17.76	17.65	
نش ساتکلیف	0.64	0.64	
NS			

جدول ۳- نتایج شاخص ارزیابی مدل GFDL-ESM4 تغییر

اقلیم

Table 3. Result index climate change MIROC-ES2L model

شاخص / پارامتر	SSP126	SSP585	هواشناسی
ضریب همبستگی	0.84	0.86	Precipitation
R^2			
RMSE	16.48	13.47	
نش ساتکلیف	0.59	0.73	
NS			
ضریب همبستگی	0.62	0.60	T_{max}
R^2			
RMSE	16.48	19.92	
نش ساتکلیف	0.97	0.98	
NS			
ضریب همبستگی	0.53	0.54	T_{min}
R^2			
RMSE	10.87	11.11	
نش ساتکلیف	0.81	0.80	
NS			

۳-۱- واسنجی مدل ماندگار و غیرماندگار

برای واسنجی و عملکرد صحیح شبیه‌سازی مدل آبخوان چهاردولی، کالیبراسیون مدل برای یک دوره ۱۸ ماهه (اکتبر ۲۰۰۶ تا مارس ۲۰۰۷) انجام شد. در طول مرحله کالیبراسیون، پارامترهای ورودی مدل، شامل داده‌های هیدرولیکی و هیدرودینامیکی، به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که بین سطح آب زیرزمینی مشاهده شده در

۲۰۲۱ ارائه شده است. این گزارش آخرین پیشرفت‌ها در علوم آب وهوایی، مشاهدات، دیرینه اقلیم‌شناسی و شبیه‌سازی‌های اقلیمی را گرد هم می‌آورد تا به‌روزترین درک علوم فیزیکی از تغییرات آب‌وهوا را ارائه دهد. همچنین، این گزارش تأثیرات انسانی بر وضعیت فعلی آب‌وهوا و چگونگی تأثیرگذاری آب‌وهوای آینده بر مناطق مختلف در سراسر جهان را تشریح می‌کند. یافته‌های این گزارش به ارائه درک درستی از وضعیت آب‌وهوای فعلی و آینده می‌پردازد و عملاً آنچه را برای محدودکردن پیامدهای تغییرات آب‌وهوایی در کره زمین لازم است، توصیف می‌کند. این سناریوها شامل ۵ مسیر کلیدی با نام‌های SSP۱، SSP۲، SSP۳، SSP۴ و SSP۵ می‌باشند. در پژوهش حاضر از دو سناریو ۵-۸/۵ SSP و ۴-۴/۵ SSP استفاده شده است که میزان واداشت تابشی این دو سناریو تا سال ۲۱۰۰ میلادی به ترتیب ۸/۵ و ۴/۵ وات بر متر مربع عنوان شده است. در این پژوهش داده‌های بارش و دما برای سناریوهای SSP126، SSP370 و SSP585 مدل CanESM5 از طریق مدل SDSM ریزمقیاس نمایی شدند.

۷-۲- ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی

پس از ریزمقیاس نمایی با مقایسه داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک دوسر و شبیه‌سازی شده در دوره پایه، برای صحت سنجی عملکرد مدل‌های اقلیمی از شاخص‌های آماری ضریب تبیین R^2 ، نش — ساتکلیف (NS) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

به منظور استفاده از مؤلفه‌های اقلیمی بارش و دما برای استفاده اقلیمی مدل‌های GFDL-ESM4 و MIROC-ES2L از داده‌های بارش و دمای ایستگاه باران‌سنج دوسر در بازه زمانی ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ برای دو سناریوی SSP126 و SSP585 استفاده شد و مقایسه میانگین بلندمدت ماهانه مؤلفه‌های اقلیمی (بارش، حداکثر و حداقل دما) مشاهده و شبیه‌سازی شد.

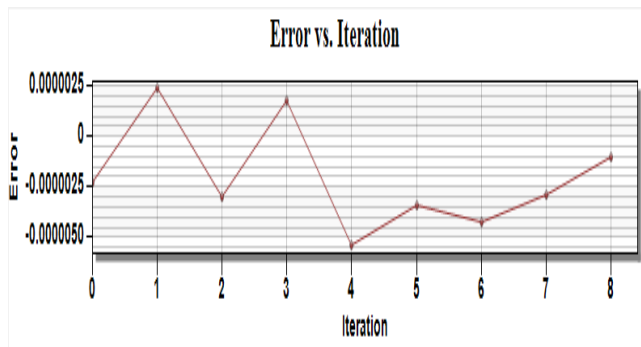
با توجه به نتایج جداول ۲ و ۳ ضرایب NS برای ارزیابی شبیه‌سازی بارندگی براساس هر دو مدل در حد خوب و برای دمای حداکثر در حد خوب و برای دمای حداقل شبیه‌سازی برای مدل GFDL-ESM4 در حد خوب و برای مدل MIROC-ES2L در حد قابل قبول می‌باشد.

جدول ۲- نتایج شاخص ارزیابی مدل MIROC-ES2L تغییر

اقلیم

شکل ۲- موقعیت پیزومترهای کالیبره شده در حالت پایدار
آبخوان چهاردولی

Fig 2. Location peizometer calibration in the steady state Chahardoli aquifer



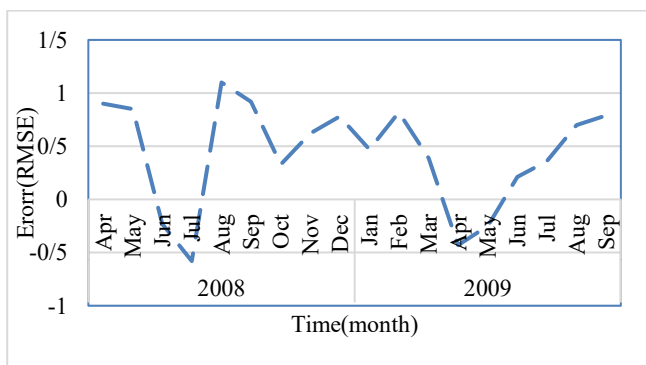
شکل ۳- میزان خطای مدل در مرحله واسنجی

Fig 3. Error model in the calibration step

جدول ۴- پارامترهای ارزیابی مدل در مرحله واسنجی

Table 4. model evaluation parameters in calibration step

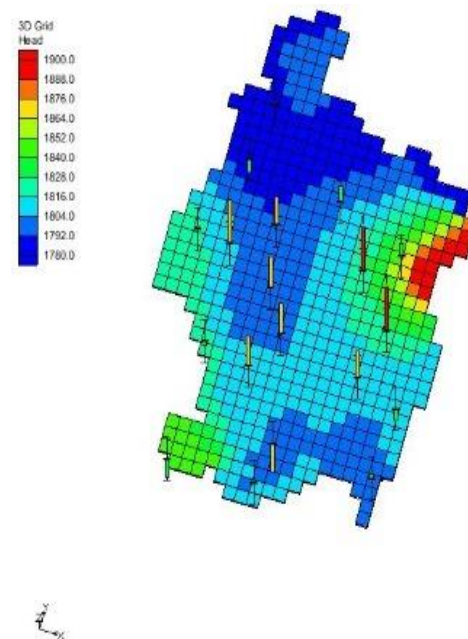
Property	Value
Mean Residual (Head)	-0.61
Mean Absolute Residual (Head)	0.98
Root Mean Squared Residual (Head)	1.19
Mean Residual (Flow)	0.00
Absolute Residual (Flow)	0.00
Root Mean Squared Residual (Flow)	0.00
Mean Weighted Residual (Head+Flow)	-1.19
Mean Absolute Weighted Residual (Head+Flow)	1.92
Root Mean Squared Weighted Residual (Head+Flow)	2.34
Sum of Squared Weighted Residual (Head+Flow)	103.61
Displayed Precision	2



شکل ۴- میزان خطای مدل در مرحله اعتبارسنجی

Fig 4. Error model in the validation step

پیزومترها و سطح آب زیرزمینی محاسبه شده توسط مدل، تطابق قابل قبولی وجود داشته باشد. مدل در دو حالت پایدار و گذرا کالیبره می‌شود. در حالت پایدار، یک ماه (April) با سطح آب زیرزمینی پایدار انتخاب شده و مدل در این حالت کالیبره می‌شود (شکل ۲). جریان‌های ورودی به آبخوان از طریق پارامتر آبدی (Sy) آبخوان محاسبه شده و به صورت پهنه‌بندی با روش دستی آزمون و خطا برای کالیبره کردن مدل وارد مدل می‌شوند. در حالت گذرا، تغییرات ماهانه آبخوان بررسی شده و خروجی مدل در حالت پایدار (هدایت هیدرولیکی) به عنوان مبنای حالت گذرا تعیین می‌شود. پارامترهای آبدی و تغذیه ویژه در ۱۹ پیزومتر به مدت ۱۸ ماه کالیبره می‌شوند و مقادیر خطای نهایی شبیه‌سازی در محل هر پیزومتر به دست می‌آیند. برای هر دو حالت پایدار و گذرا، میزان خطای شاخص‌های RMSE و MAE به دست می‌آید. شکل ۳ انطباق قابل قبول نتایج شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی در مدل با داده‌های میدانی در مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی را نشان می‌دهند. میزان خطا در حالت پایدار پس از کالیبراسیون مدل در محدوده قابل قبول قرار دارد. برای حالت گذرا، مقادیر خطا در گام‌های زمانی مختلف (۱۸ ماه) پس از کالیبراسیون مدل در جدول ۴ مشاهده می‌شود و اجرای مدل در محدوده قابل قبول قرار دارد که نشان دهنده عملکرد مناسب مدل است. برای تأیید عملکرد مدل، مدل برای یک دوره ۱۸ ماهه (سپتامبر ۲۰۰۹ تا آوریل ۲۰۰۸) اعتبارسنجی شده است و مقادیر شاخص‌های RMSE و MAE به دست آمده (شکل ۴) نشان دهنده دقت معقول مدل شبیه‌سازی است. مقادیر خطا در گام‌های زمانی مختلف (۱۸ ماه) در طول اعتبارسنجی مدل در شکل ۴ ارائه شده است و در تمام ماه‌ها در محدوده قابل قبول قرار دارد که نشان دهنده انطباق مناسب مدل شبیه‌سازی شده با شرایط طبیعی آبخوان چهاردولی است.



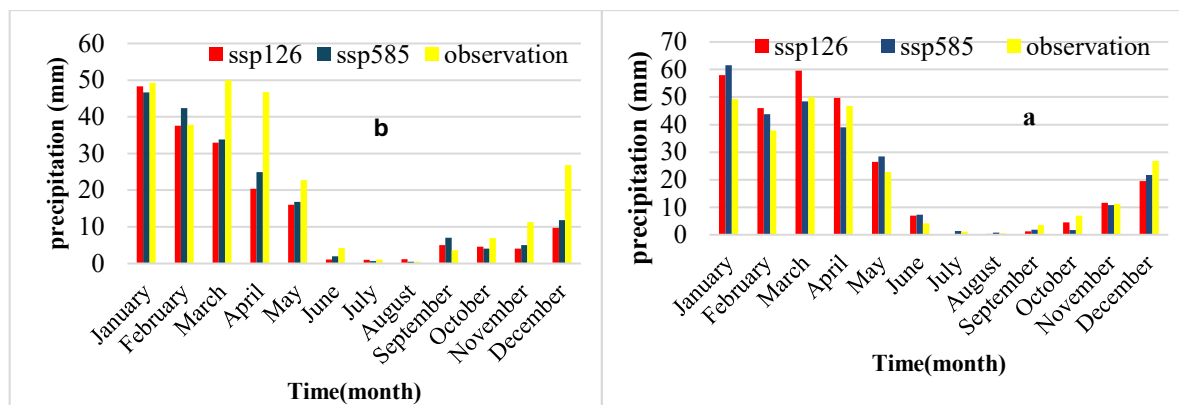
۲-۳- شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی

شکل‌های داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی ماهیانه پارمترهای اقلیمی در دوره (۲۰۲۶-۲۰۴۰) در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که بارندگی در مدل GFDL-ESM4 سناریوهای SSP126 و SSP585 در ماه‌های مهر، آبان و آذر کاهشی و براساس مدل MIROC-ES2L در هر دو سناریو بارندگی در تمامی ماه‌ها کاهش می‌یابد. بیشترین تغییرات بارندگی در دوره آبی مربوط به مدل MIROC-ES2L سناریوی SSP585 در فروردین ماه به میزان ۴۷ درصد کاهشی است. بارندگی در مدل GFDL-ESM4 در سناریوی SSP126 نسبت به مقادیر مشاهداتی و مدل MIROC-ES2L افزایشی بوده است. بیشترین تغییرات دمای حداکثر در هر دو مدل مربوط به ماه‌های تیر، مرداد و شهریور به میزان ۵۰ درصد، ۷۰/۴ درصد و ۶/۵ درصد افزایشی است. بیشترین تغییرات دمای حداقل در دوره‌ی آبی هر دو مدل مربوط به ماه‌های مهر، آبان، آذر و دی حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد افزایشی است.

۳-۳- روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و اثرات

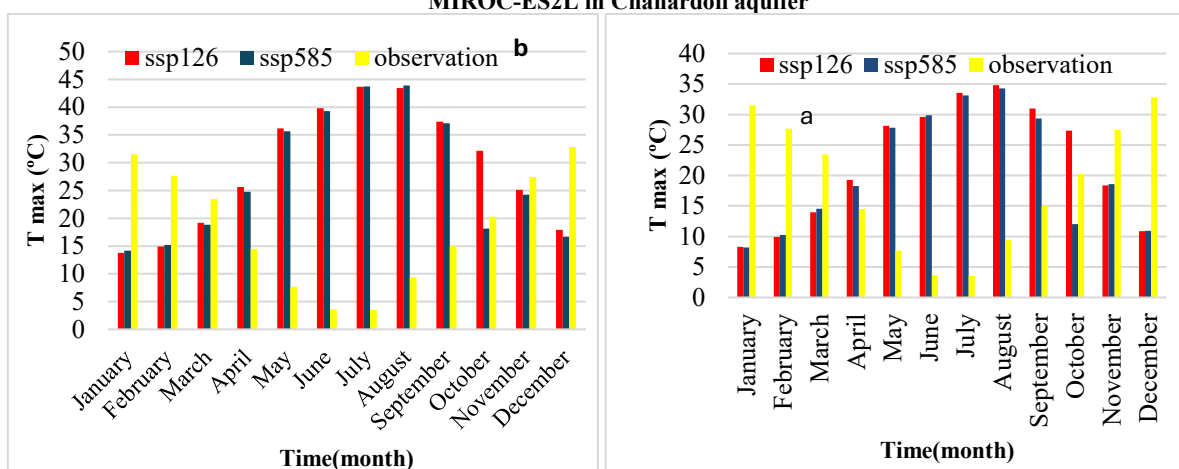
تغییر اقلیم بر سطح آب در دوره آینده

در این پژوهش برای بررسی اثرات فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی دو سناریوی مرجع و سناریوی تغییرات اقلیم در دو سناریوی SSP126 و SSP585 برای مدل GFDL-ESM4 که از نظر ارزیابی عملکرد بهتری داشت، انجام شد. سناریوی مرجع با فرض ادامه شرایط بهره‌برداری از چاه‌های موجود و عدم تغییر شرایط اقلیمی در سال‌های آینده (از ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۸) تدوین شد. این سناریو دقیقاً تأثیر عوامل انسانی را بدون تغییر شرایط اقلیمی را بررسی می‌کند. در سناریوی دوم که شامل دو سناریوی تغییر اقلیم و تحت تأثیر عوامل انسانی در دوره‌ی آبی (۲۰۲۶ تا ۲۰۳۸) مدل اجرا شد و هیدروگراف واحد آبخوان چهاردولی و تغییرات سطح آب زیرزمینی در هر پیزومتر مورد مقایسه قرار گرفت.



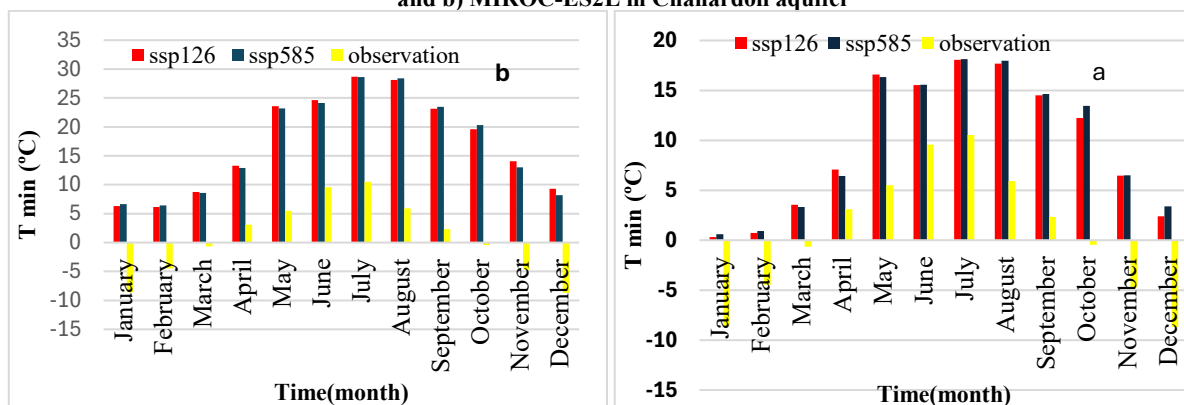
شکل ۵- مقایسه بارش (میلیمتر) پایه و شبیه سازی شده با سناریوهای تغییر اقلیم مدل های (الف) GFDL-ESM4 و (ب) MIROC-ES2L در آبخوان چهاردولی

Fig 5. Compared precipitation (mm) based and Simulated in climate change scenarios models a) GFDL-ESM4 and b) MIROC-ES2L in Chahardoli aquifer



شکل ۶- دمای حداکثر (سانتیگراد) پایه و شبیه سازی شده با سناریوهای تغییر اقلیم مدل های (الف) GFDL-ESM4 و (ب) MIROC-ES2L در آبخوان چهاردولی

Fig 6. Compared Tepercute maximum (°C) based and Simulated in climate change scenarios models a) GFDL-ESM4 and b) MIROC-ES2L in Chahardoli aquifer



شکل ۷- دمای حداقل (سانتیگراد) پایه و شبیه سازی شده با سناریوهای تغییر اقلیم دو مدل (الف) GFDL-ESM4 و (ب) MIROC-ES2L در آبخوان چهاردولی

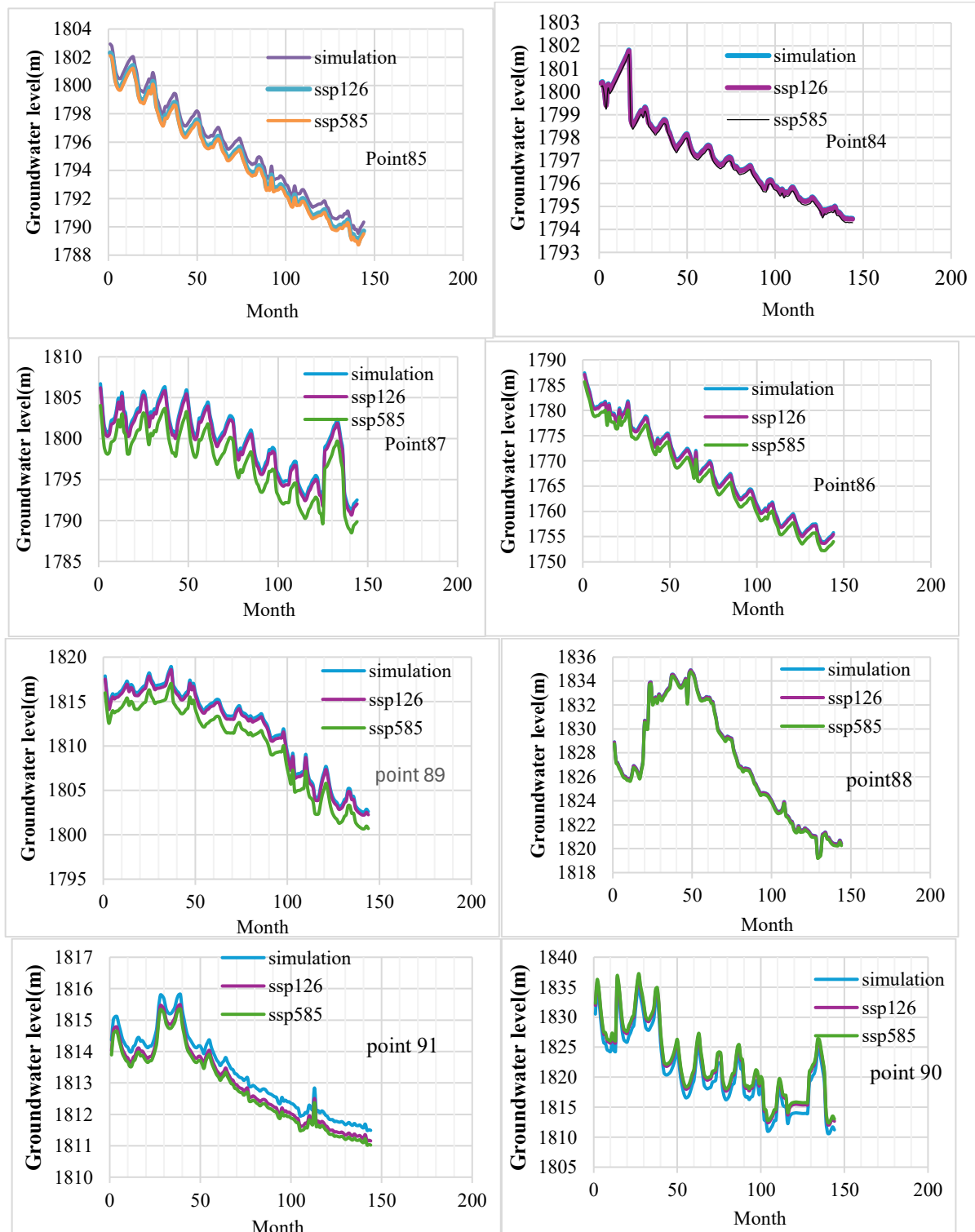
Fig 7. Compared Tepercute minimum (°C) based and Simulated in climate change scenarios models a) GFDL-ESM4 and b) MIROC-ES2L in Chahardoli aquifer

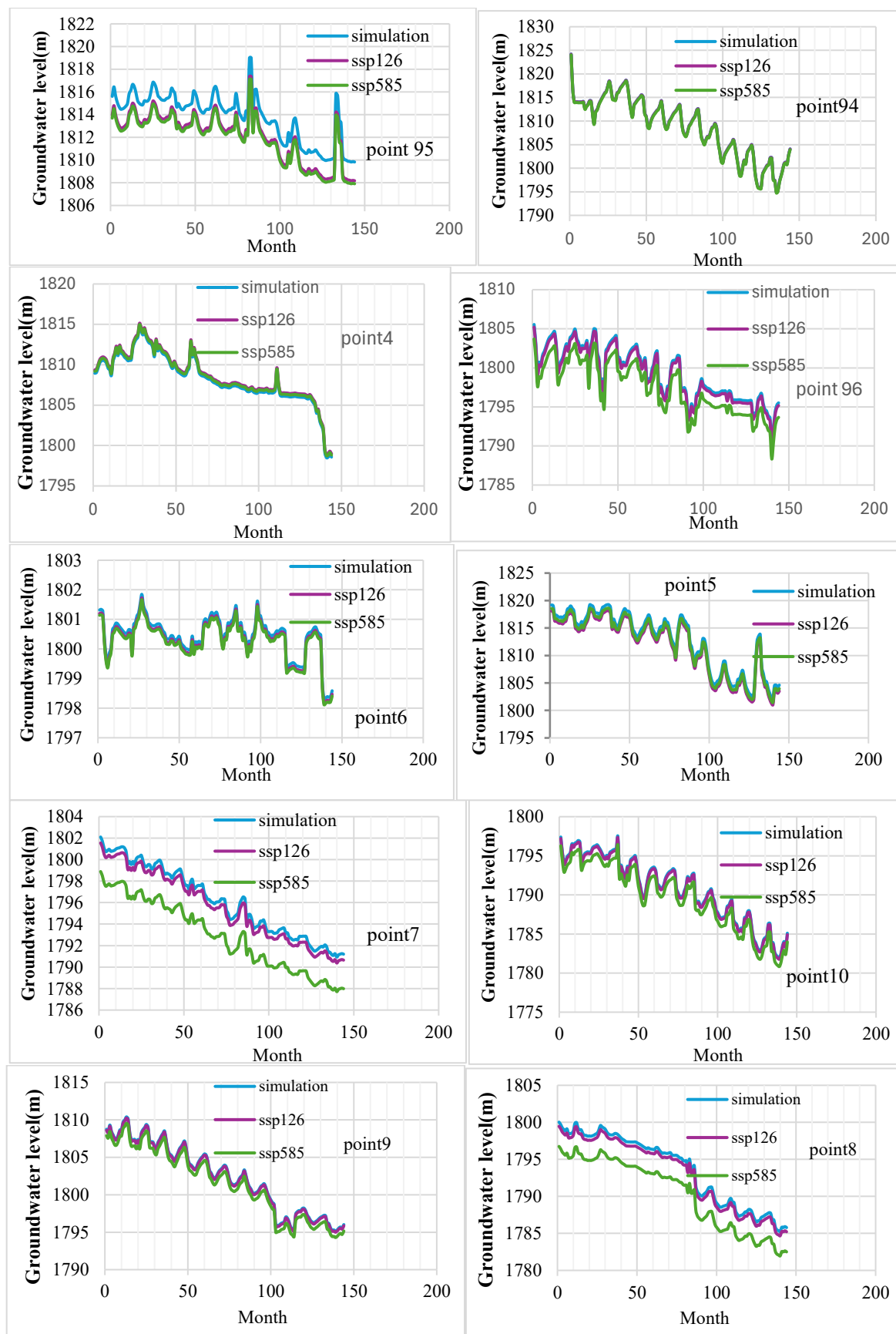
شماره ۹۱ در بخش مرکزی آبخوان چهاردولی و بیشترین افت مربوط به پیزومتر شماره ۹۴ در قسمت جنوبی می باشد. تغییرات سطح آب زیرزمینی در سناریوی تغییر اقلیم SSP126

براساس نتایج بدست آمده تغییرات سطح آب زیرزمینی در ۱۹ پیزومتر مورد بررسی بین ۴ تا ۳۰ متر افت مشاهده گردید، این تغییرات مطابق شکل ۸ کمترین افت مربوط به پیزومتر

تغییر اقلیم SSP585 که بارندگی‌ها نسبت به سناریوی SSP126 کمتر بوده تراز سطح آب زیرزمینی بیشتر کاهش یافته است و این امر در پیزومترهای ۸۷، ۹۱، ۹۵، ۹۶، ۷ و ۸ بیشتر نمایان است..

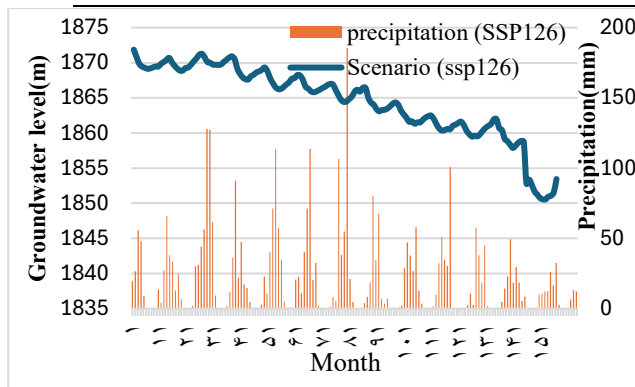
در پیزومترهای شماره ۸۷، ۸۹، ۹۱، ۹۵، ۷ و ۸ نسبت به سناریوی تغییر اقلیم SSP585 دارای خطای کمتر نسبت به داده‌های مشاهداتی و تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در دوره مرجع داشته است. همچنین مشاهده گردید در سناریوی





شکل ۱۱- تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در دوره مرجع و سناریوهای تغییر اقلیم (SSP126, SSP585)

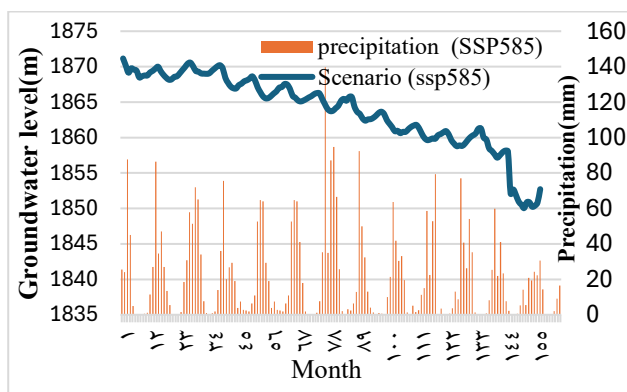
Fig 11. Groundwater level simulated in period based and scenarios climate change (SSP126 , SSP585)



شکل ۱۱- هیدروگراف واحد آبخوان براساس داده‌های شبیه‌سازی سناریوی تغییر اقلیم (SSP126)

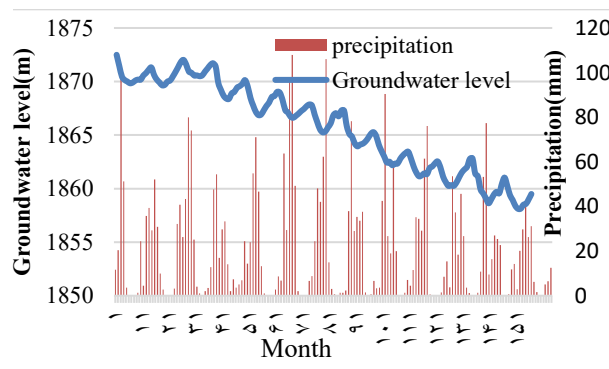
Fig 11. Unit Hydrograph aquifer for simulation data in climate change scenario (SSP126)

همچنین از دیگر نتایج بدست آمده هیدروگراف واحد آبخوان چهاردولی در سناریوی مرجع و سناریوی تغییرات اقلیمی ترسیم و در شکل‌های ۹ تا ۱۲ ارائه شده است. طبق شکل‌های ترسیم شده و محاسبه افت در ماه آوریل در ابتدای دوره و انتهای دوره‌ی آماری داده‌های مشاهداتی، دو سناریوی مورد مطالعه به میزان $10/75$ متر (دوره مشاهداتی)، $10/85$ - متر (سناریوی مرجع)، $17/82$ - متر (سناریوی تغییر اقلیم SSP126) و $18/81$ - متر (سناریوی تغییر اقلیم SSP585) بوده است، از این مقادیر تغییرات متوسط سالانه حجم آبخوان چهاردولی برای دوره‌ی ۱۴ ساله در سطح آبخوان 321 کیلومتر مربع و با ضریب ذخیره آبخوان $0/015$ ، در سناریوی مرجع $1/68$ میلیون مترمکعب، سناریوی تغییر اقلیم SSP126 به میزان $2/77$ میلیون مترمکعب و سناریوی تغییر اقلیم SSP585 به میزان $2/92$ میلیون مترمکعب بدست آمد.



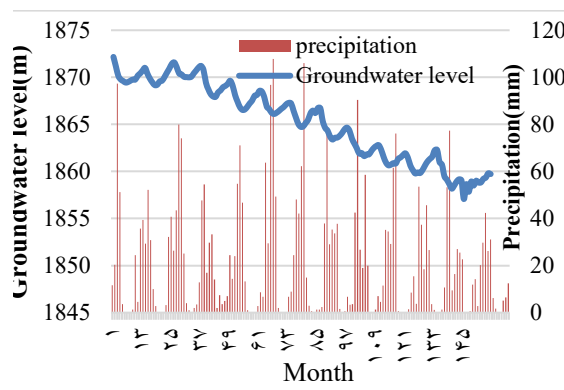
شکل ۱۲- هیدروگراف واحد آبخوان براساس داده‌های شبیه‌سازی سناریوی تغییر اقلیم (SSP585)

Fig 12. Unit Hydrograph aquifer for simulation data in climate change scenario (SSP585)



شکل ۹- هیدروگراف واحد آبخوان براساس داده‌های مشاهداتی

Fig 9. Unit Hydrograph aquifer for observation data



شکل ۱۰- هیدروگراف واحد آبخوان براساس داده‌های شبیه‌سازی سناریوی مرجع

Fig 10. Unit Hydrograph aquifer for simulation data in scenario based

۴- نتیجه‌گیری نهایی

نقش ترکیبی عوامل انسانی و تغییرات اقلیمی در تشدید افت آب‌های زیرزمینی و تفکیک نقش هر یک در کاهش ذخایر آب‌های زیرزمینی، یکی از مباحث اساسی در مدیریت منابع آب است و تخمین آن در مدیریت صحیح آبخوان در آینده بسیار ضروری است. در این مطالعه برای پیش‌بینی دما و بارش در آینده، از گزارش ششم تغییر اقلیم CMIP6 استفاده شد. برای اعتبارسنجی و ارزیابی دقت مدل‌های گردش عمومی جو و برازش داده‌ها، از شاخص‌های RMSE، MAE و NS استفاده شد. در ارزیابی عدم قطعیت، یک مدل برای اعتبارسنجی و افزایش دقت نتایج پیش‌بینی کافی نیست. بنابراین از دو مدل SSP126 و MIROC-ES2L در دو سناریوی GFDL-ESM4 (خوش‌بینانه) و SS9P585 (بدبینانه) استفاده شد. نتایج بررسی تغییرات اقلیمی در منطقه نشان داد که بارندگی در دوره‌ی آتی

Effects on Inflow to Sattarkhan Reservoir, Ahar, using the IHACRES Model. *Journal of Hydraulics and Water Science*, 37(3), 39-50, doi: [10.22034/hws.2025.66652.1021](https://doi.org/10.22034/hws.2025.66652.1021). (In Persian)

Abbasnouvin pour A, Karimi F, Rezaee 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), 63-75, doi: [10.22034/ws.2021.30465.2197](https://doi.org/10.22034/ws.2021.30465.2197). (In Persian)

Ansari S, Messah Bavani AR and Rozbahani A, 2014. Effect of climate change on groundwater recharge (Case study: Sefid Dasht Plain). *Journal Water and Soil*, 30(2), 416-431, doi: [10.22067/jsw.v30i2.39574](https://doi.org/10.22067/jsw.v30i2.39574). (In Persian)

Bayazidi M, Kaki M, 2021. Storage Volume and Exploitation Changes of Aquifers in the Eastern Plains of the Kurdistan Province. *ECO hydrology*, 8(1), 57-72, doi: [10.22059/ije.2021.307139.1360](https://doi.org/10.22059/ije.2021.307139.1360). (In Persian)

Chakraei I, Safavi H, Dandy G, Golmohammadi M.H, 2021. Integrated Simulation-Optimization Framework for Water Allocation Based on Sustainability of Surface Water and Groundwater Resources. *Journal of water resources planning and management*. 147(3), doi: [10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001339](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001339).

Epting J, Michel A, Affolter A, Huggenberger P, 2021. Climate change effects on groundwater recharge and temperatures in Swiss alluvial aquifers. *Journal Hydrol X*, 11(3), 100071, doi: [10.1016/j.hydroa.2020.100071](https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2020.100071).

Eckhardt K and Ulbrich U, 2002. Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. *Journal of Hydrology*, 284, 244-252, doi: [10.1016/j.jhydrol.2003.08.005](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.08.005).

Fallahi M.M, Shabanlou S, Rajabi A, Yousefvand F, 2023. Effects of climate change on groundwater level variations affected by uncertainty (case study: Razan aquifer). *Applied Water Science*, 13:143, doi: [10.1007/s13201-023-01949-8](https://doi.org/10.1007/s13201-023-01949-8).

Goodarzi M, Hosseini A and Mesgari I, 2015. *Meteorological Models*, Zanjan: Azarkalak Publications. (In Persian)

Hosseinzade Kuhi H, Ardestani M, 2024. Modeling and quantitative investigation of the groundwater condition of the South Mehyar-Dasht Asman aquifer using the MODFLOW model. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(1), 1-17, doi: [10.22098/mmws.2022.11807.1172](https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11807.1172). (In Persian)

Hamamouche M.F, Kuper M, Riaux J, Leduc, 2017. Conjunctive use of surface and ground water resources in a community-managed irrigation system — The case of the Sidi Okba palm grove in the Algerian Sahara. *Agricultural Water Management*, 193, 116-130, doi: [10.1016/j.agwat.2017.08.005](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.005).

Hosseini F.S, Choubin B, Bagheri-Gavkosh M, Karimi O, 2023. Susceptibility Assessment of Groundwater Nitrate Contamination Using an Ensemble Machine Learning Approach. *Ground water*, 61(4), 510-516, doi: [10.1111/gwat.13258](https://doi.org/10.1111/gwat.13258).

Hoaglund III J R, Huffman G C, Grannemann N G, 2002. Michigan basin regional ground water flow discharge to

۲۰۲۶-۲۰۴۰ کاهش و دمای حداکثر و حداقل افزایشی می‌باشد. تراز سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در سناریوهای مختلف برای ۱۹ پیرومتر آبخوان چهاردولی نشان داد که سطح آب زیرزمینی در سناریوی تغییر اقلیم SSP585 در پیرومترهای مرکزی آبخوان و قسمت جنوبی با کاهش بارندگی‌ها و میزان برداشت از ۹۵۴ چاه بهره‌برداری موجود نسبت به دو سناریوی دیگر پایین‌تر بوده است و همچنین در بررسی افت سطح آب زیرزمینی در سطح آبخوان چهاردولی برای سناریوهای مختلف و ترسیم هیدروگراف واحد آبخوان مشاهده گردید سناریو SSP585 (شرایط بدبینانه) بیشترین افت حدود ۳ میلیون مترمکعب وجود داشته است. نتایج حاصل از اجرای شبیه‌سازی نشان داد که کسری آبخوان در دوره‌ی ۱۴ ساله آینده حدود ۰/۱۵ میلیون مترمکعب بیشتر شده و همچنان بیلان آبخوان منفی بوده است. نتایج کسری آبخوان با مطالعات پیشین که در آبخوان‌های قروه، دهگلان و چهاردولی صورت گرفته است (Bayazidi and kaki, 2021) مطابقت داشته و همچنین از مقایسه نتایج بدست آمده و مطالعات پیشین در سایر نقاط کشور و دنیا نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی همراه با فعالیت‌های انسانی در کاهش سطح آب زیرزمینی تأثیر داشته و در صورت افزایش میزان برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی با کاهش میزان تغذیه حاصل از بارش در سال‌های آتی نسبت به وضعیت موجود در هر منطقه آبخوان‌ها همچنان با کسری مواجه باشند. با توجه به این تغییرات، با مدیریت صحیح منابع آب و در نظر گرفتن کلیه جنبه‌های کشاورزی، شرب، صنعت و زیست‌محیطی، می‌توان اثرات نامطلوب عوامل انسانی و تغییرات اقلیمی را بر منابع آب منطقه کاهش داد. در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری در بحث تغییر اقلیم و اثر آن بر سطح آب زیرزمینی در مناطق مختلف دنیا صورت گرفته است که نشان‌دهنده تأثیر غیرقابل انکار تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی و تأثیر انتخاب مدل اقلیمی و سناریوی انتشار بر کار است (Fallahi et al., Rahimi Jamnanin et al., 2024, Epting et al., 2021, 2023). در این تحقیقات شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در پیرومترهای موجود در آبخوان برای سناریوهای مختلف ترسیم نشده و همچنین هیدروگراف واحد آبخوان محاسبه نگردیده است، اینها از موارد برجسته انجام شده در این تحقیق می‌باشد.

منابع

Alioghli S, Sattari MT, 2024. Evaluation of Water Resources Allocation Scenarios of Mahabad Basin under the Influence of Climate Change using WEAP Model. *Journal of Hydraulics and Water Science*, 35(2), 47-64, doi: [10.22034/hws.2024.18685](https://doi.org/10.22034/hws.2024.18685). (In Persian)

Allahverdipour P, Sattari MT, 2025. Application of the CMIP6 Approach for Determination of Climate Change

- three Great Lakes. Groundwater, 40(4), 390-406, doi: [10.1111/j.1745-6584.2002.tb02518.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2002.tb02518.x)
- Kayhomayoon Z, Arya Azar N, Ghordoyee Milan S, Kardan Moghaddam H, Berndtsson R, 2021. Novel approach for predicting groundwater storage loss using machine learning. Journal of Environmental Management, 296, doi: [10.1016/j.jenvman.2021.113237](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113237)
- Kresic N, 2007. Grounwater chemistry, Hydrogeology and groundwater modeling. Taylor and Francis Group, Boca Raton, 828 pages.
- Kurdistan Province Regional Water Company. 2018. Report on groundwater resources in the eastern plains of Kurdistan Province. (In Persian)
- Liu Q, Liu L, Zhang Y, Wang Z, Wu J, Li L, Li S, Paudel B, 2021. Identification of impact factors for differentiated patterns of NDVI change in the headwater source region of Brahmaputra and Indus, Southwestern Tibetan Plateau. Ecol Indic., doi: [10.1016/j.ecolind.2021.107604](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107604)
- Massuel S, Riaux J, 2017. Groundwater overexploitation: why is the red flag waved? Case study on the Kairouan plain aquifer (central Tunisia). Hydrogeology Journal, 25(5575), doi: [10.1007/s10040-017-1568-2](https://doi.org/10.1007/s10040-017-1568-2).
- Milan S.G, Roozbahani A, Banihabib M. E, 2018. Fuzzy optimization model and fuzzy inference system for conjunctive use of surface and groundwater resources. Journal of hydrology, 566, 421-434, doi: [10.1016/j.jhydrol.2018.08.078](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.078).
- Rahimi Jamnanin M, Kayhomayoon Z, Arya Azar N, Ghordoyee Milan S, Najafi Marghmaleki S, Berndtsson, R, 2024. Large discrepancy between future demand and supply of agricultural water in northwestern Iran; evidence from WEAP-MODFLOW-machine learning under the CMIP6 scenario. Computers and Electronics in Agriculture, 216, doi: [10.1016/j.compag.2023.108505](https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108505).
- Safavi H.R, Darzi F, Maino M.A, 2010. Simulation-Optimization Modeling of Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater. Water Resources Management, 24(10), 1965-1988, doi: [10.1007/s11269-009-9533-z](https://doi.org/10.1007/s11269-009-9533-z).
- Shakeri R, Nassery H.R, Ebadi T, 2023. Numerical modeling of groundwater flow and nitrate transport using MODFLOW and MT3DMS in the Karaj alluvial aquifer, Iran. Environment Monitoring and Assessment, 195(1), doi: [10.1007/s10661-022-10881-4](https://doi.org/10.1007/s10661-022-10881-4)
- Xu F, Qu Y, Bento V A, Song H, Qiu J, Qi J, Wan L, Zhang R, Miao L, Zhang X, Wang Q, 2024. Understanding climate change impacts on drought in China over the 21st century: a multi-model assessment from CMIP6. Climate and Atmospheric Science, 7(32), doi: [10.1038/s41612-024-00578-5](https://doi.org/10.1038/s41612-024-00578-5)