



Assessment of the effects of climate change on the exploitation of surface water resources and aquifers (Study area: Dehloran study area)

Ali Pour Ahmad,¹ Mohsen Soliymani babersad,^{2*} Hossein Eslami,³ Saeb khoshnavaz,⁴ Mahmoud Jazayeri⁵

1. Department of Water Sciences, Shushtar Branch, Islamic Azad University. Email: ali.pourahmad94@gmail.com
2. Assistant professor of hydraulic science, Department of Water Sciences, Shushtar Branch, Islamic Azad university. Email: Mohsen.solb@gmail.com
3. Assistant professor of hydraulic science, Department of Water Sciences, Shushtar Branch, Islamic Azad university. Email: eslamyho@gmail.com
4. Assistant professor of hydraulic science, Department of Water Sciences, Shushtar Branch, Islamic Azad university. Email: s.khoshnavaz@iau-shoushtar.ac.ir
5. Assistant professor of hydraulic science, Department of Water Sciences, Shushtar Branch, Islamic Azad university. Email: m.jazayeri@hotmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received July 17, 2025

Received in revised form

August 03, 2025

Accepted September 14, 2024

Available online September 23, 2025

Keywords:

Climate change,
MODFLOW,
Water budget,
Regression,
Groundwater front

ABSTRACT

Research Topic: Climate change and its effects on components influencing the groundwater balance are critically important for sustainable water resource management under conditions of water supply instability.

Objective: Investigating the exploitation of groundwater resources as a sustainable resource in climate change conditions.

Method: Among 14 climate models, the most suitable models for simulating precipitation and temperature were selected based on statistical indicators. Considering the importance of precipitation in groundwater recharge, surface water behavior was estimated through regression relationships.

Results: Climate simulation results identified the AWI-CM-1-1-MR model as the best for future precipitation projections and HadGEM3-GC31-MM for temperature projections. In contrast, temperature is expected to increase across all three scenarios. Based on regression relationships between precipitation and streamflow at three hydrometric stations, two components—recharge from surface runoff and aquifer drainage—were calculated for the groundwater balance. Groundwater inflow and outflow were estimated numerically in relation to aquifer water level changes.

Conclusions: Climate change significantly affects the quantitative dynamics of the aquifer, particularly due to the high sensitivity of groundwater outflow and water table levels. Moreover, the findings reveal that groundwater abstraction has a relatively smaller impact compared to climate change effects, suggesting that well-planned abstraction policies could lead to effective adaptation strategies under future climate scenarios.

Cite this article: Pour Ahmad, A., Soliymani babersad, M., Eslami, H., khoshnavaz, S., Jazayeri, M. (2024). Assessment of the effects of climate change on the exploitation of surface water resources and aquifers (Study area: Dehloran study area). *ECOHYDROLOGY*, 12(3), 883-898. <http://doi.org/10.22059/IJE.2025.403140.1885>



© Ali Pour Ahmad, Mohsen Soliymani babersad, Hossein Eslami, Saeb khoshnavaz, Mahmoud Jazayeri.
Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/IJE.2025.403140.1885>

Introduction

Groundwater plays a vital role in sustaining ecosystems and supporting human adaptation to extreme environmental changes. Climate change, driven by global warming and greenhouse gas emissions, significantly affects hydrological systems, especially groundwater. These systems are complex and sensitive, requiring a systemic approach to assess their responses. Rising temperatures, altered precipitation patterns, and increased evaporation intensify pressure on limited water resources, leading to overexploitation and groundwater depletion.

Method

Based on the objective of this study, the methodology is defined around the evaluation of 14 climate models to select the most appropriate climate model. Additionally, groundwater simulation and quantitative behavior assessment are conducted using the MODFLOW model. Finally, the impact of climate change on the quantitative behavior of the Dehloran aquifer is evaluated. This study is carried out in six steps according to the flowchart in Figure 1.

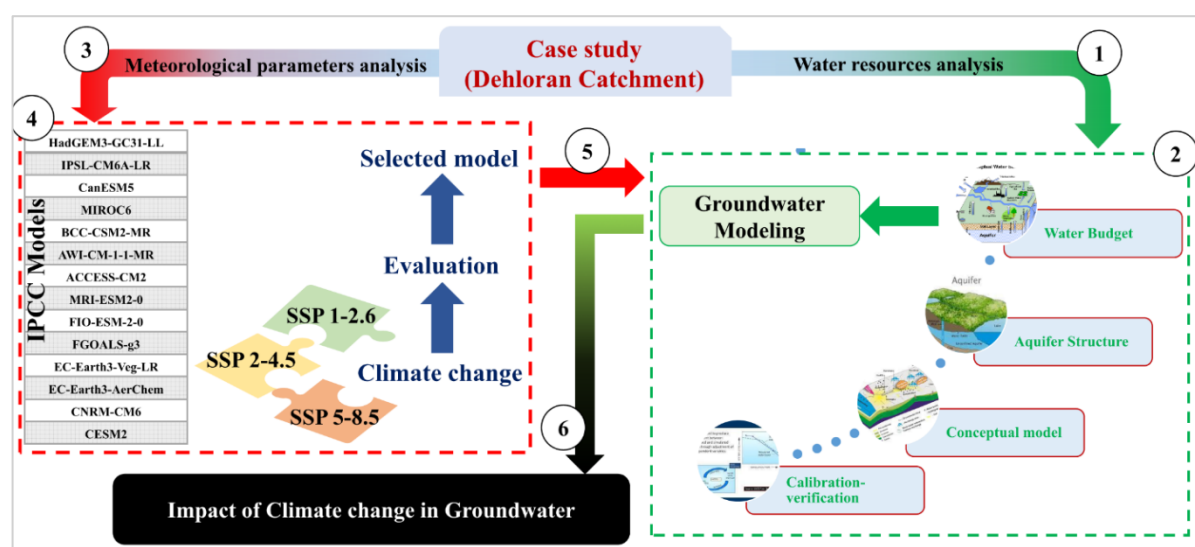


Figure 1. Research step

Case study

The Dehloran study area is located in western Iran within the second-order border watershed, covering 2,729 km². It features alluvial aquifers primarily fed by surface and groundwater flows draining westward into the Tigris basin in Iraq. The region has significant agricultural potential due to ample water resources and fertile soils. Geologically, it lies on folded Zagros zone units, with carbonate and non-carbonate formations influencing its hydrogeology and groundwater quality.

Simulation

a) MODFLOW

Groundwater quantitative assessment was conducted using MODFLOW, a widely accepted groundwater modeling tool. The conceptual model incorporated topography, initial water table, and bedrock over a 5-year simulation period (2015–2020) with 60 time steps. A grid resolution of 250 meters and General Head Boundary (GHB) conditions were applied. Model calibration used the first 3 years, with the last 2 years reserved for validation, based on observations from 15 monitoring wells.

b) Climate change

This study utilizes climate models and scenarios from the IPCC Sixth Assessment Report, combining RCP and SSP frameworks to assess future climate impacts on groundwater. Fourteen climate models were evaluated against historical data using RMSE, MAE, and correlation coefficients to select the best-performing models. Three scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5) were applied to project temperature and precipitation changes for 2020–2040. A delta method was used to downscale climate

variables for the Dehloran synoptic station. Future temperature and precipitation were calculated by adjusting observed data with model-derived changes to analyze climate impacts on groundwater resources.

Results

Based on the groundwater balance of the Dehloran aquifer, the effects of climate change on key water balance parameters were analyzed under the assumption of no regional development. Surface and subsurface inflows, particularly from runoff and upstream drainage, were modeled using regression methods and MODFLOW under three climate scenarios. The selected AWI-CM-1-1-MR model simulated changes in surface infiltration and discharge. Total recharge to the aquifer was estimated at approximately 123.35 MCM, while external discharge was around 64.4 MCM. A net inflow of 31.17 MCM and an estimated upstream drainage outflow of 25.22 MCM were identified. Model results show that increased precipitation under SSP1-2.6 could improve aquifer conditions, while reduced rainfall in SSP2-4.5 and SSP5-8.5 worsens groundwater decline. Among balance components, the greatest variability was observed in groundwater outflow, sensitive to minor changes in water table levels. The hydrograph indicates that SSP1-2.6 leads to the least drawdown, whereas other scenarios accelerate groundwater depletion.

Based on the integrated approach using groundwater balance and the MODFLOW model, the results indicate that aquifer behavior under climate change is influenced not only by rainfall variations but also by the complex interactions among water balance components. While increased precipitation can enhance aquifer recharge and improve groundwater conditions, decreased rainfall leads to the opposite effect. The most climate-sensitive parameter is groundwater outflow, which shows significant variability. Although rainfall changes affect storage deficit and hydrograph behavior, high extraction rates are the main driver of depletion. Therefore, effective groundwater management—such as adopting suitable cropping patterns and modern irrigation technologies—can help adapt to climate change impacts by reducing groundwater withdrawals.

Conclusions

One key approach to sustainable groundwater management is evaluating various climate and usage scenarios. In the Dehloran aquifer, quantitative behavior was assessed using 14 climate models from the IPCC Sixth Assessment Report. A combined application of water balance analysis and the MODFLOW model was used to evaluate climate change impacts on aquifer components. The AWI-CM-1-1-MR model was selected for rainfall, and HadGEM3-GC31-MM for temperature based on statistical indicators. Among three climate scenarios, SSP1-2.6 (optimistic) projects increased rainfall and temperature, while SSP5-8.5 (pessimistic) indicates decreased rainfall and rising temperatures. Under SSP1-2.6, aquifer deficit improves to -1.01 MCM, whereas under SSP5-8.5, it worsens to -4.52 MCM. Results show that the most climate-sensitive component is the groundwater outflow front, influenced by fine-grained layering and bedrock structure. Overall, climate change significantly affects groundwater balance, while management practices have a limited impact unless stakeholder behavior and coordinated planning are addressed.

Author Contributions

Ali Pour Ahmad: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Writing-Original Draft.

Mohsen Soliymani babersad: Writing-Review & Editing, Formal analysis, Supervision.

Hossein Eslami: Methodology, Software

Saeb khoshnavaz: Writing-Review & Editing

Mahmoud Jazayeri: Writing-Review & Editing

Data Availability Statement

Authors have no restrictions on sharing data.

Acknowledgements

No

Ethical considerations

Relevant research content in this study was in accordance with the ethical standards of the institutional and national research committees.

Funding

The authors did not receive support from any organization for the submitted work.

Conflict of interest

All Authors declare that they have no conflict of interest.

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در بهره‌برداری از منابع آب سطحی و آبخوان (منطقه مورد مطالعه: محدوده مطالعاتی دهلران)

علی پوراحمد^۱، محسن سلیمانی بابرصاد^{۲*}، حسین اسلامی^۳، صائب خوش‌نواز کومله^۴، سید محمود جزایری^۵

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شوشتر، شوشتر، ایران. رایانامه: Ali.pourahmad94@gmail.com
۲. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شوشتر، شوشتر، ایران. رایانامه: Mohsen.solb@gmail.com
۳. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شوشتر، شوشتر، ایران. رایانامه: Eslamyho@gmail.com
۴. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شوشتر، شوشتر، ایران. رایانامه: S.khoshnavaaz@iau-shoushtar.ac.ir
۵. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شوشتر، شوشتر، ایران. رایانامه: M.jazayeri@hotmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

موضوع: تغییر اقلیم و اثرات آن بر مؤلفه‌های مؤثر بر بیلان آب زیرزمینی به‌منظور مدیریت منابع آب در شرایط ناپایداری تأمین آب بسیار حائز اهمیت است.

مقاله پژوهشی

هدف: بررسی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یک منبع پایدار در شرایط تغییر اقلیم است.

روش تحقیق: در این مطالعه با استفاده از بیلان منابع آب زیرزمینی محدوده و آبخوان با تلفیق مدل عددی MODFLOW، شبیه‌سازی رفتار آبخوان تحت شرایط تغییر اقلیم بررسی گردید. با استفاده از شاخص‌های آماری از بین ۱۴ مدل، مدل منتخب برای شبیه‌سازی بارش و دما انتخاب شد. با توجه به بیلان آب زیرزمینی و نقش بارش، رفتارسنجی آب سطحی با استفاده از روابط رگرسیونی تعیین گردید.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

یافته‌ها: نتایج شبیه‌سازی اقلیمی نشان داد که مدل AWI-CM-1-1-MR برای شبیه‌سازی بارش و مدل HadGEM3-MM برای شبیه‌سازی دما در دوره آتی انتخاب شد. با توجه به رابطه رگرسیونی بین بارش و آب‌دهی در ۳ ایستگاه هیدرومتری منطقه، دو مؤلفه نفوذ از جریان سطحی و زهکشی آبخوان برای بیلان محاسبه و با شبیه‌سازی عددی میزان جریان زیرزمینی ورودی و خروجی با توجه به تغییرات تراز آبخوان محاسبه گردید.

کلیدواژه‌ها:

تغییر اقلیم،

مدل MODFLOW،

بیلان آبخوان،

رابطه رگرسیونی،

جریان زیرزمینی آبخوان.

نتیجه‌گیری: تغییر اقلیم در تغییرات کمی آبخوان با تحلیل مؤلفه‌ها نشان داد که جریان زیرزمینی خروجی با توجه به حساسیت بالای این مؤلفه و تراز آبخوان بسیار حائز اهمیت است. از طرفی، نتایج نشان داد که حجم بهره‌برداری نسبت به اثرات تغییر اقلیم محدودتر بوده و اعمال سیاست‌های بهره‌برداری می‌تواند نتایج مناسبی را در راستای سازگاری با تغییر اقلیم داشته باشد.

استناد: پوراحمد، علی؛ سلیمانی بابرصاد، محسن؛ اسلامی، حسین؛ خوش‌نواز کومله، صائب؛ جزایری، سید محمود. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در بهره‌برداری از منابع آب سطحی و آبخوان (منطقه مورد مطالعه: محدوده مطالعاتی دهلران). مجله اکوهیدرولوژی، ۱۲ (۳)، ۸۹۸-۸۸۳.

<http://doi.org/10.22059/IJE.2025.403140.1885>



© علی پوراحمد، محسن سلیمانی بابرصاد، حسین اسلامی، صائب خوش‌نواز کومله، سید محمود جزایری.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

منابع آب زیرزمینی نقشی حیاتی در حفظ اکوسیستم‌ها و تضمین سازگاری انسان با تغییرات شدید و غیرمنتظره محیطی جهانی ایفا می‌کند؛ به‌ویژه هنگامی که سیستم‌های آب‌های سطحی در مواجهه با رشد سریع جمعیت و تغییرات آب‌وهوایی ناپایدارتر می‌شوند (امانیو^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). آب‌های زیرزمینی جزء مهمی از سامانه‌های هیدرولوژیکی است که در راستای اثرات بالقوه تغییرات اقلیمی تا حد زیادی تأثیرپذیر و ازطرفی ناشناخته است (لیسجه و ورنش، ۲۰۱۹)^۲؛ زیرا این سیستم‌ها بسیار پیچیده بوده و با شبکه‌ای از تعاملات و بازخوردهای پیچیده و اندرکنش‌های متعدد با عوامل درونی و بیرونی در ارتباط است (موندی^۳ و همکاران، ۲۰۱۷). در این شرایط، ارزیابی اثرات عوامل مختلف و ارتباطات، مستلزم نگاه سیستمی به چرخه و فرایندهای مربوط است. یکی از عوامل تأثیرگذار بر چرخه آب و به‌ویژه منابع آب زیرزمینی، اثرات تغییر اقلیم در نتیجه گرمایش زمین است که در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)^۴ بنا به هدف و ساختار تشکیل‌شده، بررسی روند تغییرات اقلیمی و نقش آن بر چرخه حیات را مورد کاوش قرار داده و اثرات قابل توجهی را بر سیستم‌های مختلف منابع آب، کشاورزی، اکولوژی و منابع طبیعی ارائه داده است (دهقانی و همکاران، ۱۴۰۳). نتایج ارائه‌شده نشان داده که افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای اثرات مخرب را تشدید کرده و در افزایش دما تأثیر مستقیمی داشته است. مطابق محاسبات IPCC، دمای متوسط جهانی از سال ۱۸۶۱ حدود ۰/۴ تا ۰/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است و در طول ۱۰۰ سال آینده نیز به‌طور متوسط ۲ تا ۴ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت (آرنل^۵ و همکاران، ۲۰۱۹). در کنار افزایش دما، تغییر اقلیم باعث تغییر در فرایند بارش و تبخیر نیز می‌گردد. در این شرایط با کاهش بارش، تغییر در تعداد وقایع بارندگی و افزایش شدت بارش باعث از دست رفتن مقادیر زیادی از منابع آب می‌شود. این موضوع در کنار افزایش تبخیر به‌واسطه تغییر در دما و کاربری اراضی نیز تشدید می‌گردد. در چنین شرایطی، بهره‌برداری از منابع آب سطحی محدودتر و فشار بر منابع آب زیرزمینی تشدید می‌شود، زیرا میزان برداشت همواره بیشتر از میزان تغذیه بوده و افت مداوم سطح آب رخ خواهد داد و خسارات جبران‌ناپذیری به دنبال خواهد داشت (دائو^۶ و همکاران، ۲۰۲۴).

پیشینه پژوهش

مطالعات درخصوص ارزیابی تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی مبتنی بر استفاده از مدل‌های عددی بسیار مورد توجه قرار گرفته و در این راستا حنیفه‌لو و همکاران در سال ۱۴۰۲ با رویکرد استفاده از مدل زنجیره مارکوف و مدل عددی MODFLOW شبیه‌سازی رفتار آبخوان هشتگرد را در دوره‌های آتی با رویکرد تغییرات کاربری اراضی مورد بررسی قرار داد. نتایج ارائه‌شده نشان داد که وضعیت این آبخوان با ادامه روند کنونی بحرانی و با خشک شدن بخش‌هایی از آبخوان مواجه می‌شود (حنیه‌لو و همکاران، ۱۴۰۲). مطالعات متعددی درخصوص تحلیل وضعیت آبخوان در شرایط تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گرفته که نجفی، شرافتی، و مقدم (۱۴۰۳)، کی‌همایون و همکاران (۱۴۰۳)، بانرجی، گانگولی و کوشکاوا^۷ (۲۰۲۴) و میزان^۸ و همکاران (۲۰۲۵) ازجمله این مطالعات هستند که روند تغییرات را مورد شبیه‌سازی و رویکردهای مدیریتی درخصوص مدیریت منابع آب زیرزمینی ارائه دادند.

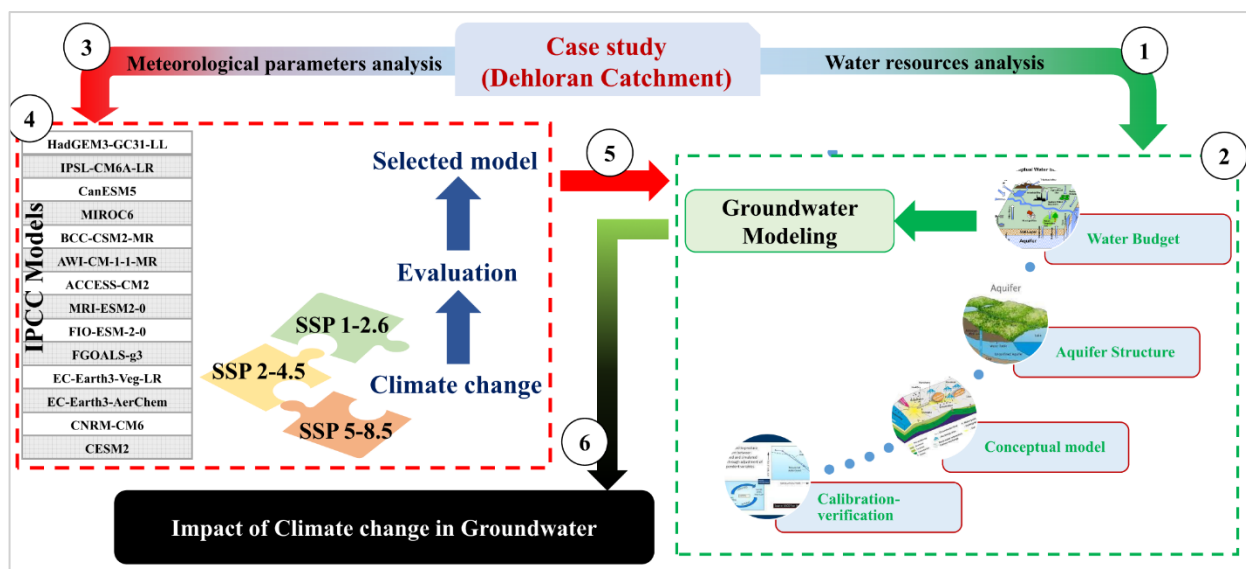
بررسی فرایندمحور نقش تغییر اقلیم بر چرخه هیدرولوژیکی به‌خصوص بر مؤلفه آب زیرزمینی با رویکرد مبتنی بر مؤلفه‌های بیان می‌تواند جنبه‌های تأثیرگذاری را بهتر نمایان سازد. این رویکرد، تأثیرگذاری اثرات مثبت و منفی را در این چرخه مورد تحلیل قرار می‌دهد و قابلیت ارائه راهکار به‌منظور افزایش تاب‌آوری را بهتر فراهم می‌کند. در این راستا در این مطالعه، ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی آبخوان دهلران مبتنی بر بیان با استفاده از مدل MODFLOW بررسی شده است. نتایج این مطالعه در روند بهره‌برداری و تخصیص منابع آب در شرایط توسعه دارای کارایی مناسبی است.

1. Amanambu
2. Liesch & Wunsch
3. Munday
4. Intergovernmental Panel on Climate Change
5. Arnell
6. Dao
7. Banerjee, Ganguly & Kushwaha
8. Mizan

مواد و روش‌ها

روش‌شناسی پژوهش

با توجه به هدف این پژوهش، روش‌شناسی مبتنی بر ارزیابی ۱۴ مدل اقلیمی در جهت انتخاب مدل اقلیمی مناسب تعریف شده است. از طرفی نیز با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی آبخوان و رفتارسنجی کمی مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رفتار کمی آبخوان دهلران بررسی شده است. این پژوهش در ۶ گام مطابق طرح‌واره شکل ۱ انجام شده است.



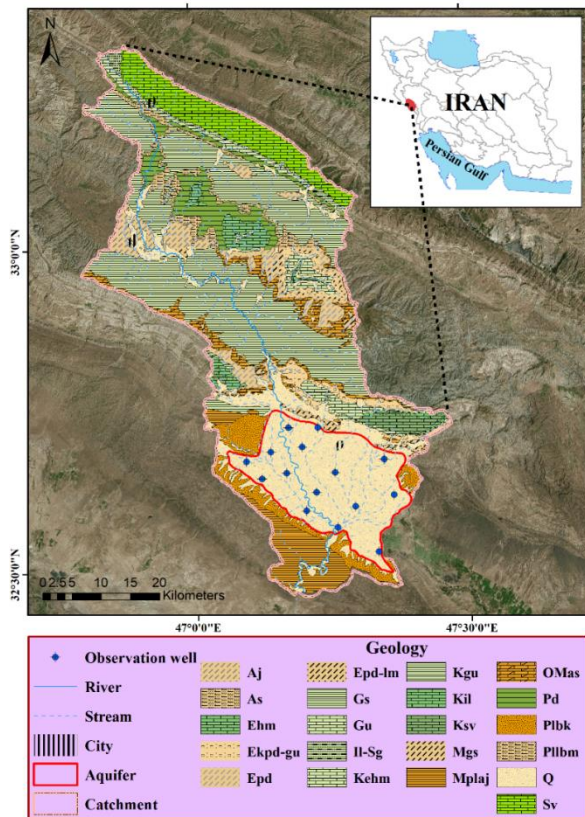
شکل ۱. روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی دهلران در غرب ایران و در حوضه آبریز درجه دوم مرزی غرب واقع شده است. این محدوده در عرض جغرافیایی $33^{\circ}30'$ تا $33^{\circ}45'$ و طول جغرافیایی $47^{\circ}00'$ تا $47^{\circ}25'$ واقع شده است. مساحت کل محدوده مطالعاتی دهلران ۲۷۲۹ کیلومتر مربع است. جریانات آب سطحی و زیرزمینی این محدوده از بخش غربی خارج و وارد حوزه آبریز دجله در کشور عراق می‌شود. بخش غربی این محدوده که از رسوبات آبرفتی تشکیل شده، آبخوان این محدوده را تشکیل داده است. رودخانه میمه با طول ۱۶۰ کیلومتر در بخش مرکزی این محدوده، زهکشی سطحی و زیرزمینی این محدوده را انجام می‌دهد. این محدوده دارای پتانسیل بالای کشاورزی با توجه به حجم منابع آب مناسب و حاصلخیزی خاک را دارا است. اطراف این محدوده از سازندهایی با مقاومت کم تشکیل شده و به‌صورت تپه‌ماهور از محدوده‌های اطراف جدا شده است. آبخوان دهلران در نواحی شمال شرقی، غربی و ناحیه جنوبی، به‌دلیل تغذیه مناسب از جریان ورودی از زیرحوضه‌ها و سازند بختیاری و دانه‌بندی درشت تا متوسط رسوبات، از نظر ارزش هیدرودینامیکی و هیدروژئولوژیکی دارای شرایط مناسبی است. براساس گزارش بیلان آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی، تغییرات حجم مخزن آبخوان ($-2/36$ MCM) است. بیشترین تغذیه آبخوان با استفاده از تغذیه از جریان‌های ورودی زیرزمینی معادل $31/17$ MCM با توجه به جریان سطحی در رودخانه این محدوده، حجمی بالغ بر $30/26$ میلیون متر مکعب نیز تغذیه از جریانات سطحی انجام می‌گیرد. بیشترین مقدار تخلیه نیز توسط چاه‌های بهره‌برداری معادل $62/09$ MCM صورت می‌گیرد. در جدول ۱ بیلان آبخوان آبرفتی که مبنای مدل‌سازی عددی آبخوان است ارائه گردید (وزارت نیرو، ۱۳۹۴).

جدول ۱. بیلان آبخوان آبرفتی دهلران - MCM

حجم	پارامترهای بیلان	
۳۱/۱۷	جریان آب زیرزمینی	عوامل ورودی
۵/۵۹	نفوذ از بارش	
۳۰/۲۶	نفوذ از جریان سطحی	
۲۸/۷	نفوذ از آب زراعی	
۲/۹۹	نفوذ از پساب شرب و صنعت	
۹۸/۷۱	تغذیه	عوامل خروجی
۶۲/۰۹	تخلیه از چاه، چشمه و قنات	
۳۵/۲۶	زهکشی	
۱/۱۹	تبخیر از آب زیرزمینی	
۲/۵۳	جریان آب زیرزمینی خروجی	
۱۰۷/۰۷	تخلیه	تغییرات حجم
-۲/۳۶		



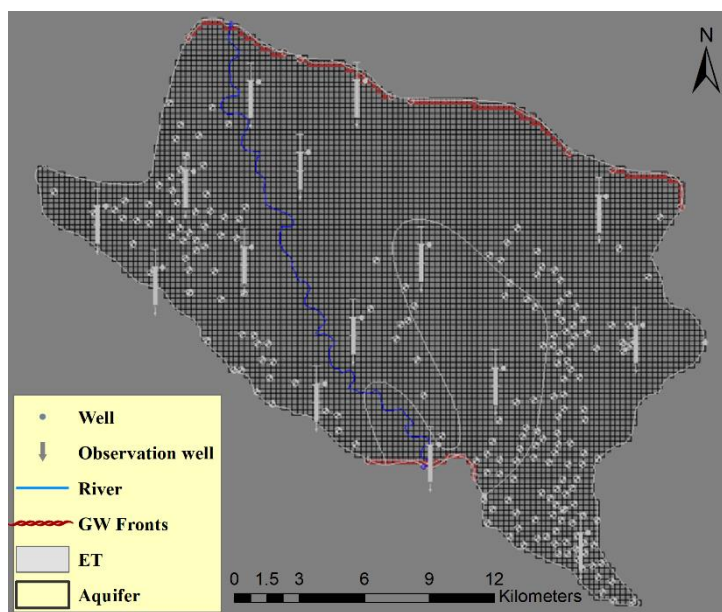
شکل ۲. محدوده مطالعاتی دهلران

محدوده مطالعاتی دهلران براساس تقسیم‌بندی واحدهای ساختمانی ایران در حاشیه جنوبی زون زاگرس چین‌خورده واقع شده است. تاقدیس کبیرکوه در شمال، تاقدیس‌های سمند، یساکوه و انلران در ناحیه میانی و تاقدیس دهلران در جنوب و جنوب غرب شناسایی شده است. دشت دهلران به شکل یک ناودیس در بین تاقدیس اناران و سیاه‌کوه در شمال و تاقدیس دهلران در جنوب قرار دارد. سازندهای منطقه از قدیم به جدید شامل سروک، سورگاه، ایلام، گورپی، پابده، آسماری، گچساران، آغاچاری و بختیاری است. سازندهای زمین‌شناسی در این محدوده مطالعاتی عمدتاً از جنس سنگ‌های کربناته، مارن، ماسه‌سنگ، کنگلومرا، شیل و گچ بوده هستند. در این منطقه، سازندهای کربناته آسماری، ایلام، سروک و بخش آهکی گورپی به دلیل شرایط مساعد، آبخوان کارستی تشکیل شده است. همچنین سازندهای غیرکربناته نظیر سازندهای کنگلومرا بختیاری در تغذیه آبخوان آبرفتی مؤثر است. از نظر تأثیر بر کیفیت آب زیرزمینی سازندهای شورکننده مارن‌های گچ و نم‌دار، به‌ویژه سازندهای گچساران و آغاچاری، عامل اصلی شوری آب‌های سطحی و زیرزمینی است. در شکل ۲، موقعیت آبخوان و تقسیم‌بندی سازندهای زمین‌شناسی ارائه شده است.

شبیه‌سازی آبخوان

یکی از رویکردها در جهت ارزیابی وضعیت کمی در منابع آب زیرزمینی، شبیه‌سازی آبخوان است که استفاده از کد MODFLOW به‌عنوان معتبرترین روش مورد استفاده قرار گرفت (هارینهان و شینکار، ۲۰۱۷). بر این اساس، با توجه به بیلان آبخوان، ساختار آبخوان شامل توپوگرافی، تراز آب زیرزمینی اولیه و سنگ بستر براساس دوره شبیه‌سازی ۵ ساله در مدل مفهومی تعریف شد. به‌منظور شبیه‌سازی یک دوره ۵ ساله شامل ۶۰ گام زمانی از مهر ۱۳۹۴ تا شهریور ۱۳۹۹ در مدل تعریف شد. ابعاد مدل از نظر شبکه‌بندی با

توجه به در نظر گرفتن روش تفاضل محدود برای شبیه‌سازی ۲۵۰ متری در نظر گرفته شد. با توجه به منحنی‌های تراز آبخوان، مرزهای جریان از نظر تبادل جبهه زیرزمینی در مدل از نوع GHB تعریف شد. سایر پارامترهای مربوط به بیلان آبخوان نیز در مدل تعریف و شبیه‌سازی در دو حالت ماندگار و غیرماندگار انجام گرفت. از طرفی، دوره ۳ ساله اول برای دوره واسنجی مدل و ۲ سال انتهایی به عنوان دوره صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. با توجه به شبکه رفتارسنجی کمی آبخوان، تعداد ۱۵ چاه مشاهده‌ای به عنوان نقاط شاهد در واسنجی تعریف شد. در شکل ۳ مدل مفهومی آبخوان ارائه شده است.



شکل ۳. مدل مفهومی آبخوان دهلران

تغییر اقلیم

برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی از مدل‌ها و سناریوهای گزارش ششم IPCC استفاده شده است. این گزارش، آخرین گزارش موجود در بررسی سناریوهای اقلیمی است که توسعه یافته گزارش پنجم IPCC است. سناریوهای جدید گزارش ششم، با همان طیف RCPها توسعه داده شده است ولی شکاف‌های اساسی برای سطوح واداشت میانی (متوسط) را پر می‌کنند. سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم (جدول ۲) چگونگی تغییرات اقلیمی را به کمک ترکیب سناریوهای RCPs و SSPs بررسی می‌کنند. در واقع، سناریوهای آینده باید علاوه بر توصیف اقلیم‌های مختلف آینده، پیشرفت‌های اقتصادی و اجتماعی مختلف ممکن را نیز در بر گیرند. خطوط سیر اقتصادی اجتماعی (SSPs) در کنار خطوط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCPs) با تمرکز بر واداشت تابشی برای تحلیل بازخوردهای بین تغییر اقلیم و عوامل اقتصادی و اجتماعی مانند رشد جمعیت جهان، توسعه اقتصادی و پیشرفت فناوری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این دو سناریو در کنار هم، موقعیت‌هایی را توصیف می‌کنند که در آن‌ها می‌توان تسکین، سازگاری و آسیب‌های اقلیمی باقی‌مانده را ارزیابی کرد. همان‌طور که گفته شد، در سناریوهای SSPs بر مدل‌سازی چگونگی تغییر شرایط اجتماعی اقتصادی مثل جمعیت، رشد اقتصادی، آموزش، شهرنشینی، میزان توسعه و فناوری تأکید شده است. این سناریوها عبارت‌اند از: SSP1: جهان متمرکز بر پایداری؛ SSP2: جهانی که به‌طور گسترده‌ای روند الگوهای تاریخی خود را دنبال می‌کند؛ SSP3: جهانی پراکنده از توسعه ناهمگن منطقه‌ای؛ SSP4: جهان نابرابری در حال افزایش؛ SSP5: جهان رشد سریع و بدون محدودیت درآمد اقتصادی و مصرف انرژی. در ادامه، توصیف سه مورد از سناریوهای مورد نظر در این تحقیق به اختصار بیان می‌شوند (موس^۱ و همکاران، ۲۰۱۰). یکی از موارد بهبود مدل‌های CMIP6 نسبت به سناریو CMIP5 بهبود تعداد لایه‌های

عمودی است که چشم‌انداز دقیق‌تری در استراتوسفر دارد و همچنین تعداد سناریوهای دوره آینده گسترش قابل توجهی یافته است (تبلیدی^۱ و همکاران، ۲۰۲۱).

در تحقیق حاضر، برای بارش و دما، ۱۴ مدل اقلیمی در نظر گرفته شد. داده‌های تاریخی (۱۹۹۵-۲۰۱۴) این مدل‌ها بعد از دریافت و استخراج، با استفاده از سه معیار RMSE^۲، MAE^۳ و CC^۴ (معادلات ۱ تا ۳) با داده‌های مشاهداتی مقایسه شد و هر مدلی که داده‌های تاریخی آن تطابق بیشتری با داده‌های مشاهداتی داشت، سناریوهای آن شامل سه سناریو (SSP1.26، SSP2.45 و SSP5.85) برای بررسی تغییرات دما و بارش در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۰) استفاده می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_o - x_m)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_o - x_m}{x_o} \right| \quad \text{رابطه ۲}$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_o - \bar{x}_o)(x_m - \bar{x}_m)}{\sum_{i=1}^n (x_o - \bar{x}_o)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (x_m - \bar{x}_m)^2} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن X_o مقادیر مشاهده‌شده، X_m مقادیر مدل‌های اقلیمی در دوره پایه و n تعداد نمونه‌هاست. هرچه RMSE و MAE کمتر و CC بالاتر باشد، عملکرد مدل بهتر است.

پس از استخراج داده‌ها در مدل‌های مختلف، با استفاده از روش دلتا یا عامل تغییر برای ایستگاه سینوپتیک دهلران که در بخش مرکزی این محدوده واقع شده است، ریزمقیاس‌نمایی انجام می‌گیرد. با استفاده از این روش می‌توان تغییرات متغیر اقلیمی مورد نظر را در دوره‌های آتی نسبت به دوره قبل محاسبه کرد. در این حالت از اختلاف بین دو متغیر برای دما استفاده می‌شود و برای بارندگی از نسبت بین آن‌ها استفاده می‌شود. در مطالعه حاضر، این مقادیر برای سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۴۰ برآورد شده است.

$$\Delta P = \frac{P_{future} - P_{base}}{P_{base}} \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\Delta T = T_{future} - T_{base} \quad \text{رابطه ۵}$$

ΔP و ΔT به ترتیب سناریوی تغییر اقلیم، بارش و دما را در دوره بعدی در هر ماه نشان می‌دهند. T_{future} میانگین دمای ۲۰ ساله آینده شبیه‌سازی‌شده توسط مدل‌های گردش عمومی جو-اقیانوس (AOGCM) در دوره بعدی برای هر ماه، T_{base} میانگین دمای ۲۰ ساله شبیه‌سازی‌شده توسط AOGCM در دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۴) در هر ماه است. P_{base} و P_{future} نیز به ترتیب میانگین ۲۰ سال بارش شبیه‌سازی‌شده در آینده و خط پایه مشاهده‌شده را نشان می‌دهند. داده‌های دما و بارش تولیدشده در سناریوهای آتی برای بارش و دما به ترتیب از معادله (۶) و (۷) محاسبه می‌شود (گروس^۵، ۲۰۲۳).

$$P = P_{obs} \times \Delta P \quad \text{رابطه ۶}$$

$$T = T_{obs} + \Delta T \quad \text{رابطه ۷}$$

که در آن، P_{obs} و T_{obs} به ترتیب نشان‌دهنده سری زمانی دما و بارندگی ماهانه داده‌های مشاهداتی هستند. P و T به ترتیب نشان‌دهنده سری زمانی دما و بارش ناشی از تغییرات آب‌وهوایی در آینده و تحت یک سناریوی تغییر مقیاس آب‌وهوا هستند.

1. Tebaldi
2. Root Mean Squared Error
3. Mean Absolute Error
4. Coefficient Correlation
5. Grose

نتایج

ارزیابی رفتارسنجی آب زیرزمینی

با استفاده از مدل مفهومی تدوین شده برای آبخوان دهلران، شبیه‌سازی آبخوان در دو حالت ماندگار و غیرماندگار مبتنی بر تعریف دو دوره واسنجی (۳ سال) و صحت‌سنجی (۲ سال) انجام گرفت. در ابتدا واسنجی مدل ماندگار مبتنی بر آنالیز حساسیت انجام شده برای دو پارامتر جبهه‌های آب زیرزمینی ورودی براساس حجم جریان و هدایت هیدرولیکی انجام گرفت. در ادامه واسنجی مدل غیرماندگار مبتنی بر دوره ۳۶ ماهه انجام گرفت. در مدل غیرماندگار میزان آب‌دهی ویژه که اساس معادله حرکت آب زیرزمینی است، مورد واسنجی قرار گرفت. مبنای خطای شبیه‌سازی برای مدل‌سازی در طول دوره مدل‌سازی، اختلاف کمتر از ۵۰ سانتی‌متر بین تراز آب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده می‌باشد که در مجموع خطای مدل کمتر از ۱ درصد است. در نهایت نیز برای دوره صحت‌سنجی (۲۴ گام زمانی ماهانه) براساس مدل غیرماندگار انجام گرفت. شاخص‌های آماری در ۳ حالت مدل ماندگار، غیرماندگار در دوره واسنجی و غیرماندگار در دوره صحت‌سنجی به صورت جدول ۲ محاسبه گردید.

جدول ۲. نتایج ارزیابی مدل آب زیرزمینی آبخوان دهلران - متر

Model State	میانگین مجذور خطا RMSE	میانگین مطلق خطا Abs Error	میانگین خطا Mean Error
Steady	0.24	-0.07	0.18
Unsteady (Calibration)	0.47	0.63	0.47
Unsteady (Verification)	0.49	0.42	0.37

بررسی رفتار آبخوان نیز نشان داد که مسیر حرکت آب زیرزمینی به صورت عمومی از شمال به سمت جنوب و در راستای حرکت آب سطحی در این آبخوان است.

ارزیابی شبیه‌سازی تغییر اقلیم

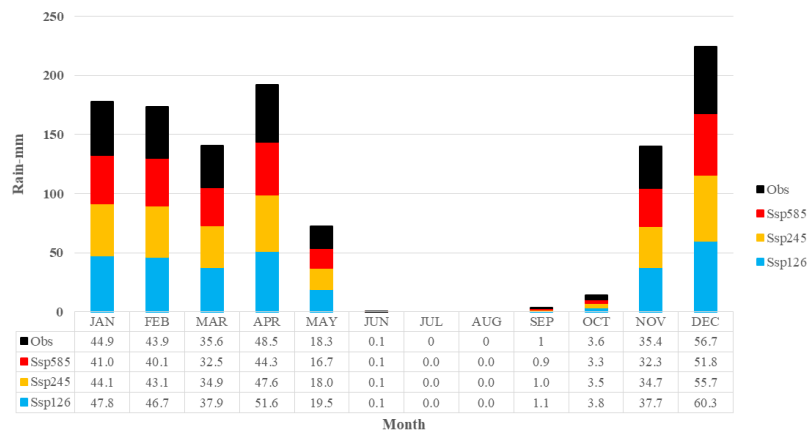
داده‌های تاریخی براساس مختصات جغرافیایی در محدوده مطالعاتی دهلران براساس ۱۴ مدل اقلیمی انتخابی اخذ گردید و در مرحله اول با توجه به داده‌های مشاهداتی در ایستگاه سینوپتیک دهلران مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی انجام گرفته برای دوره تاریخی مطابق جدول ۳ مورد آنالیز قرار گرفته است.

جدول ۳. معیارهای ارزیابی خطای مدل‌های CMIP6 در مقایسه با داده‌های مشاهده بارش

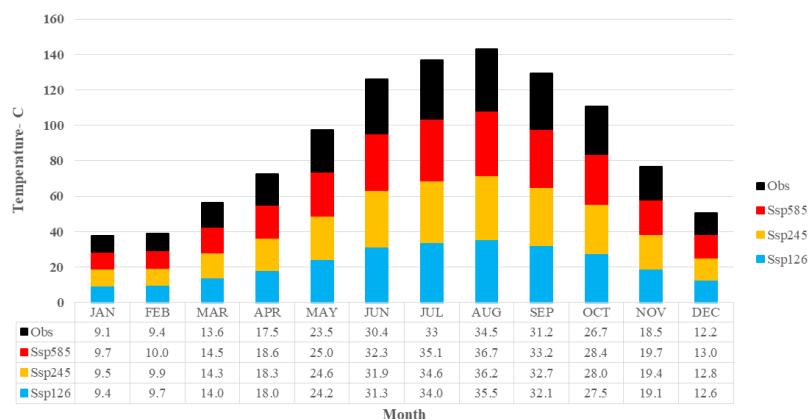
Parameters: Temperature				Parameters: Rain			
CC	MAE (mm)	RMSE (mm)	Models	CC	MAE (mm)	RMSE (mm)	Models
0.99	4.82	5.19	ACCESS-CM2	0.91	16.55	24.59	ACCESS-CM2
0.99	8.16	8.48	AWI-CM-1-1-MR	0.94	11.58	15.53	AWI-CM-1-1-MR
0.99	5.67	5.95	BCC-CSM2-MR	0.91	15.01	18.27	BCC-CSM2-MR
0.99	4.24	4.44	CNRM-CM6-1-HR	0.91	28.36	39.05	CNRM-CM6-1-HR
0.99	2.97	3.34	EC-Earth3-AerChem	0.74	17.36	25.79	EC-Earth3-AerChem
0.99	3.48	3.81	FGOALS-g3	0.91	31.10	43.29	FGOALS-g3
0.99	9.74	10.04	FIO-ESM-2-0	0.89	16.42	21.99	FIO-ESM-2-0
0.99	6.11	6.22	GISS-E2-1-H	0.78	17.29	26.42	GISS-E2-1-H
0.99	4.48	4.74	HadGEM3-GC31-LL	0.90	20.52	24.61	HadGEM3-GC31-LL
0.99	1.90	2.14	HadGEM3-GC31-MM	0.84	23.41	35.31	HadGEM3-GC31-MM
0.99	5.71	5.94	IPSL-CM6A-LR	0.86	14.82	20.85	IPSL-CM6A-LR
0.99	14.48	14.93	MIROC6	0.83	21.53	30.33	MIROC6
0.99	7.16	7.37	MRI-ESM2-0	0.87	26.88	35.24	MRI-ESM2-0
0.99	6.37	6.72	NorCPM1	0.84	23.41	35.31	NorCPM1

نتایج نشان داد که همبستگی مناسبی بین داده‌های مدل‌های اقلیمی و داده‌های مشاهداتی، به خصوص برای پارامتر دما وجود دارد. بر این اساس، مدل اقلیمی AWI-CM-1-1-MR با معیارهای آماری همبستگی ۹۴ درصد، میانگین مجذور خطا ۱۵/۵

میلی‌متر و میانگین مطلق خطای ۱۱/۵۸ میلی‌متر برای پارامتر بارش و مدل HadGEM3-GC31-MM با معیارهای آماری همبستگی ۹۹ درصد، میانگین مجذور خطا ۲/۱۴ سانتی‌گراد و میانگین مطلق خطای ۱/۹ سانتی‌گراد برای پارامتر دما انتخاب شد. با توجه به انتخاب این ۲ مدل اقلیمی برای تحلیل بارش و دما، شبیه‌سازی بارش و دما براساس ۳ سناریوی انتشار SSP 1.26، SSP 2.45 و SSP 5.85 برای دوره آتی ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ انجام گرفت. در شکل ۴، تغییرات بارش و دما در دو مدل منتخب تحت شبیه‌سازی ۳ سناریوی انتشار ارائه شده است.



الف) بارش



ب) دما

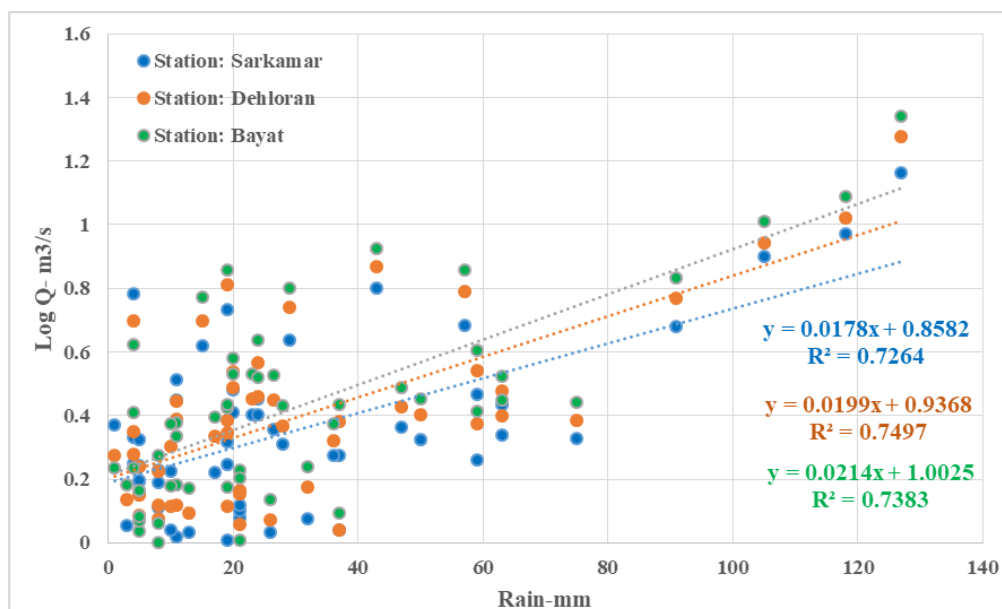
شکل ۴. نتایج شبیه‌سازی تغییرات بارش و دما در دوره آتی

نتایج شبیه‌سازی اقلیمی در ۳ سناریوی انتشار نشان می‌دهد که سناریو SSP126، به‌عنوان سناریو خوش‌بینانه با افزایش ۱۸/۴ میلی‌متری بارش همراه بوده و دو سناریوی دیگر با کاهش بارش همراه است. نتایج نشان می‌دهد که دوره بارندگی در منطقه از نوامبر آغاز شده و در ماه می به پایان می‌رسد. در این دوره بارش، میزان نزولات بیشتر تمرکز بر زمستان داشته و این دوره بیشتر حساسیت را در سناریوهای اقلیمی از نظر افزایش و کاهش نشان داد. تغییرات دما در دوره آتی حاکی از افزایش دما در هر ۳ سناریوی اقلیمی بوده که به‌طور متوسط در سه سناریو به‌ترتیب ۰/۶۵، ۱/۰۵ و ۱/۳۸ درجه سانتی‌گراد افزایش به دست آمده است.

ارزیابی تغییر اقلیم بر رفتار آبخوان

با توجه به بیان آبخوان آبرفتی دهلران و هدف این مطالعه از ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رفتار کمی آبخوان، تغییرات بارش و دما بر پارامترهای بیان با رویکرد فرایندهای مؤثر بر بیان مورد آنالیز قرار گرفت. با در نظر گرفتن عدم شرایط توسعه در منطقه، میزان نفوذ از جریانات برگشتی و تخلیه از آبخوان، ثابت فرض می‌شود. به‌منظور تعیین سهم سایر پارامترها در مدل آب زیرزمینی آبخوان،

میزان نفوذ از جریان سطحی و جریان زیرزمینی آبخوان بسیار مهم است. سایر پارامترهای بیلان در مدل شبیه‌سازی با توجه به تغییرات تراز آب زیرزمینی تحلیل و تعیین می‌گردد. به منظور تعیین میزان جریان سطحی، با استفاده از آمار بارش در ایستگاه سینوپتیک دهلران و سه ایستگاه هیدرومتری جاده دهلران (۲۱-۰۹۵)، بیات (۲۱-۰۹۷) و سرکمر (۲۱-۳۸۴)، با استفاده از مدل رگرسیونی شبیه‌سازی بارش و جریان سطحی به صورت ماهانه انجام گرفت (شکل ۵).



شکل ۵. رابطه رگرسیونی بارش و ایستگاه‌های هیدرومتری

بر این اساس، با توجه به رابطه رگرسیونی محاسبه‌شده میزان جریان سطحی و نفوذ از جریان سطحی براساس ضریب در نظر گرفته‌شده در بیلان آبخوان، در ۳ سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای با استفاده از مدل اقلیمی منتخب AWI-CM-1-1-MR محاسبه گردید. از طرفی، با توجه به موقعیت دو ایستگاه هیدرومتری جاده دهلران (۲۱-۰۹۵) و بیات (۲۱-۰۹۷) که ورودی و خروجی آبخوان را ثبت می‌کنند، میزان زهکشی آبخوان مورد محاسبه قرار می‌گیرد. براساس رابطه رگرسیونی، میزان جریان دو ایستگاه محاسبه و براساس اختلاف مقادیر، میزان زهکشی محاسبه می‌شود.

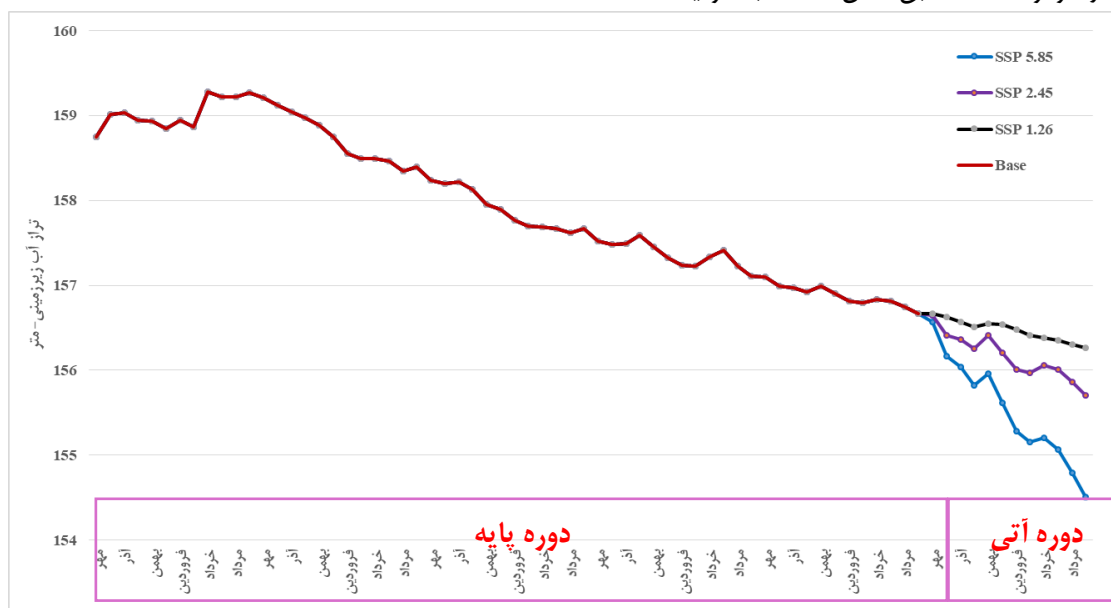
براساس میزان جریان سطحی برآوردشده و نفوذ ناشی از جریان سطحی با در نظر گرفتن زهکشی ارتفاعات، میزان جریان زیرزمینی ورودی به آبخوان تعیین می‌شود. در این شرایط، زهکشی در ارتفاعات از اختلاف بین نفوذ در ارتفاعات و میزان برداشت محاسبه می‌شود. با توجه به اختلاف میزان نفوذ در کل محدوده که از بیلان هیدروکلیماتولوژی محاسبه شده و نفوذ در داخل آبخوان دهلران، میزان نفوذ در خارج آبخوان محاسبه گردید. در این شرایط، حجمی بالغ بر ۶۸ میلیون متر مکعب به‌عنوان میزان نفوذ در خارج از آبخوان برآورد گردید. حجم آب برگشتی در خارج از آبخوان نیز براساس اختلاف کل آب برگشتی در محدوده (۴۳/۱۷ میلیون متر مکعب) و آب برگشتی در داخل آبخوان، حجمی بالغ بر ۱۱/۵ میلیون متر مکعب محاسبه می‌شود. از طرفی نیز اختلاف بین کل نفوذ آب سطحی (۷۳/۸۶ میلیون متر مکعب) در محدوده و نفوذ از آب سطحی در آبخوان، میزان نفوذ در خارج از آبخوان حجمی بالغ بر ۴۳/۶ میلیون متر مکعب محاسبه می‌شود. بر این اساس، حجمی بالغ بر ۱۲۳/۳۵ میلیون متر مکعب به‌عنوان تغذیه محدود تعیین گردید. از طرفی نیز تخلیه خارج از آبخوان با توجه به اختلاف بین برداشت از کل محدوده مطالعاتی (۱۲۶/۵۲ میلیون متر مکعب) و آبخوان (۶۲/۰۹ میلیون متر مکعب) برابر با ۶۴/۴ میلیون متر مکعب محاسبه شد. با توجه به بیلان آبخوان و جبهه‌های زیرزمینی ورودی براساس شبکه تراز آب زیرزمینی حجم ۳۱/۱۷ میلیون متر مکعب به‌عنوان جریان زیرزمینی ورودی و در نهایت از توازن ورودی‌ها و خروجی‌ها حجم ۲۵/۲۲ میلیون متر مکعب به‌عنوان زهکشی ارتفاعات به‌عنوان خروجی بالادست آبخوان برآورد می‌گردد. با توجه به مدل مفهومی و بیلان آبخوان در شرایط تغییر اقلیم در سه سناریوی انتشار مدل شبیه‌سازی و مقادیر پارامترهای بیلان محاسبه گردید. نتایج پارامترهای بیلان در جدول ۴ ارائه گردید.

جدول ۴. بیلان آبخوان آبرفتی دهلران در شرایط تغییر اقلیم

SSP 5.85	SSP 2.45	SSP 1.26	دوره پایه	پارامترهای بیلان	
۲۹/۶۸	۳۰/۳۸	۳۱/۴۲	۳۱/۱۷	جریان آب زیرزمینی	عوامل ورودی
۵/۰۹	۵/۲۷	۵/۸۶	۵/۵۹	نفوذ از بارش	
۲۸/۶	۲۹/۴	۳۱/۷	۳۰/۲۶	نفوذ از جریان سطحی	
۲۸/۷	۲۸/۷	۲۸/۷	۲۸/۷	نفوذ از آب زراعی	
۲/۹۹	۲/۹۹	۲/۹۹	۲/۹۹	نفوذ از پساب شرب و صنعت	
۹۵/۰۶	۹۶/۷۴	۱۰۰/۶۷	۹۸/۷۱	تغذیه	عوامل خروجی
۶۲/۰۹	۶۲/۰۹	۶۲/۰۹	۶۲/۰۹	تخلیه از چاه، چشمه و قنات	
۳۴/۲۱	۳۴/۷۹	۳۵/۶۵	۳۵/۲۶	زهکشی	
۱/۰۱	۱/۰۷	۱/۲	۱/۱۹	تبخیر از آب زیرزمینی	
۲/۳۷	۲/۳۶	۲/۷۴	۲/۵۳	جریان آب زیرزمینی خروجی	
۹۹/۵۸	۱۰۰/۳۱	۱۰۱/۶۸	۱۰۷/۰۷	تخلیه	
-۴/۵۲	-۳/۵۷	-۱/۰۱	-۲/۳۶	تغییرات حجم	

بررسی نتایج بیلان آبخوان، که با تلفیق مدل رگرسیونی و مدل MODFLOW پارامترهای آن در شرایط تغییر اقلیم محاسبه گردید، نشان داد که افزایش میزان بارش که در سناریوی اقلیمی SSP 1.26 شبیه‌سازی شده است، با در نظر گرفتن عدم توسعه، قابلیت بهبود وضعیت کمی آبخوان دهلران را دارد. ازطرفی نیز کاهش میزان بارش که در دو سناریوی SSP 2.45 و SSP 5.85 شبیه‌سازی شده، در پارامترهای مختلف بیلان آبخوان تأثیرگذار بوده است. بررسی مؤلفه‌های بیلان آبخوان نشان می‌دهد که جریان آب زیرزمینی خروجی، بیشترین تغییرات را در سناریوهای مختلف اقلیمی داشته که حاکی از تأثیر تغییرات تراز آب زیرزمینی در بخش خروجی آبخوان است که با تغییرات کم تراز در این محدوده، حجم آب خروجی تغییر می‌کند. بافت ریزدانه این محدوده آبخوان، تأثیر مهمی در فرایند خروج آب دارد.

با توجه به دوره ۵ ساله شبیه‌سازی آبخوان با مدل MODFLOW، هیدروگراف آبخوان تحت سه سناریو برای متوسط دوره بیلان در نظر گرفته شده مطابق شکل ۶ محاسبه گردید.



شکل ۶. تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی در دوره آتی تحت سناریوهای مختلف انتشار

بررسی هیدروگراف آبخوان با توجه به نتایج به دست آمده از مدل و تحلیل بیلان نشان داد که در سناریوی SSP 1.26 که با در نظر گرفتن عدم توسعه و افزایش بارش همراه است، میزان تراز آبخوان توانسته روند کاهشی کمتری را نشان دهد و این روند افزایش افت در سایر سناریوها تشدید شده است.

بحث

با توجه به رویکرد در نظر گرفته شده برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی مبتنی بر تلفیق بیلان آبخوان و استفاده از مدل MODFLOW، نتایج نشان داد که رفتارسنجی آبخوان در این شرایط، فقط مربوط به اثرات بارش نبوده و تحلیل مؤلفه‌های بیلان و اندرکنش بین این پارامترها، جنبه‌های مختلف تأثیرگذاری را نشان می‌دهد. بررسی تحلیل نتایج نشان داد که افزایش میزان بارش با تغییرات در منابع تغذیه آبخوان، قادر به افزایش توان آبخوان برای بهبود وضعیت کمی بوده و کاهش بارش دقیقاً در خلاف آن. بررسی نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تأثیرات تغییر اقلیم که در مؤلفه بارش منعکس شده، در جریان آب زیرزمینی خروجی آبخوان دارای حساسیت و تغییرات بیشتری است. از طرفی نیز، تحلیل پارامترهای کمی آبخوان نشان می‌دهد که تغییرات بارش اگرچه تأثیر بر کسری مخزن و رفتار هیدروگراف دارد، با توجه به حجم بالای تخلیه از آبخوان، مدیریت بهره‌برداری در این منطقه می‌تواند شرایط سازگار با تغییر اقلیم را ایجاد کرده و با تدوین رویکردهایی نظیر الگوی کشت مناسب و استفاده از فناوری در فرایند کشاورزی، کاهش برداشت آب از آبخوان جبران می‌شود.

نتیجه‌گیری

یکی از رویکردهای مدیریتی در بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی، شناسایی و ارزیابی سناریوها مختلف اعم از اقلیمی و بهره‌برداری است. بر این اساس، در آبخوان دهلران رفتارسنجی کمی آبخوان تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی با استفاده از ۱۴ مدل گزارش ششم مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ارزیابی از تلفیق مدل بیلان و MODFLOW به صورت توأمان برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های مختلف استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل اقلیمی AWI-CM-1-1-MR برای شبیه‌سازی بارش و مدل اقلیمی HadGEM3-GC31-MM برای شبیه‌سازی دما در دوره آبی انتخاب شد. مبنای انتخاب، شاخص‌های آماری است. نتایج شبیه‌سازی اقلیم در مدل‌های منتخب در ۳ سناریوی اقلیمی نشان داد که سناریوی SSP 1.26 به عنوان سناریوی خوشبینانه که با افزایش بارش و دما در منطقه و سناریوی SSP 5.85 که با کاهش بارش بارش و افزایش دماست، به عنوان سناریوی بدبینانه در نظر گرفته شد. با تحلیل بیلان آبخوان مبتنی بر محاسبه زهکشی ارتفاعات در بیلان آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی، پارامترهای بیلان برای مدل‌سازی با در نظر گرفتن عدم شرایط توسعه تحلیل و شبیه‌سازی کمی آبخوان انجام گرفت. نتایج رفتارسنجی کمی آبخوان نشان داد که در خوشبینانه‌ترین شرایط، کسری مخزن از ۲/۳۶ میلیون متر مکعب به ۱/۰۱ میلیون متر مکعب تقلیل یافته و در بدبینانه‌ترین شرایط، کسری مخزن ۴/۵۲ میلیون متر مکعب افزایش خواهد داشت. ارزیابی وضعیت آبخوان دهلران با توجه به نتایج به دست آمده نشان داد که بیشترین حساسیت در تغییرات تحت شرایط تغییر اقلیم مربوط به جبهه‌های آب زیرزمینی خروجی است که با توجه به ساختار سنگ بستر و لایه‌بندی ریزدانه آبخوان در این منطقه با توجه به تغییرات تراز آب زیرزمینی در تغییر است. نتایج این مطالعه نشان داد که تغییر اقلیم به واسطه تغییر در مقادیر بارش و دما بر مؤلفه‌های مختلف بیلان آبخوان و تراز آب زیرزمینی تأثیرگذار بوده و در مقابل مدیریت آبخوان، از نظر بهره‌برداری سهم کمی را دارد. لذا برنامه‌ریزی در جهت تعادل بخشی آبخوان مبتنی بر رویکردهای در نظر گرفتن رفتارشناسی ذی‌نفعان و ذی‌مدخلان می‌تواند کارایی مؤثری داشته باشد.

References

- وزارت نیرو. ۲۰۱۴. گزارش بیان منابع آب محدوده مطالعاتی دهلران.
- Amanambu, A. C., Obarein, O. A., Mossa, J., Li, L., Ayeini, S. S., Balogun, O., ... & Ochege, F. U. (2020). Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. *Journal of Hydrology*, no. 589, 125163.
- Arnell, N.W., Lowe, J.A., Challinor, A.J., & Osborn, T.J. (2019). Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. *Climatic Change*, no. 155, 377-391.
- Banerjee, D., Ganguly, S., & Kushwaha, S. (2024). Forecasting future groundwater recharge from rainfall under different climate change scenarios using comparative analysis of deep learning and ensemble learning techniques. *Water Resources Management*, 38(11), 4019-4037.
- Dao, P. U., Heuzard, A. G., Le, T. X. H., Zhao, J., Yin, R., Shang, C., & Fan, C. (2024). The impacts of climate change on groundwater quality: A review. *Science of the Total Environment*, no. 912, 169241.
- Dehghani, S., Massah Bavani, A., Roozbahani, A., & Sahin, O. (2024). Assessment of climate change-induced water scarcity risk by using a coupled system dynamics and Bayesian network modeling approaches. *Water Resources Management*, 38(10), 3853-3874.
- Grose, M. R., Narsey, S., Trancoso, R., Mackallah, C., Delage, F., Dowdy, A., ... & Takbash, A. (2023). A CMIP6-based multi-model downscaling ensemble to underpin climate change services in Australia. *Climate Services*, no. 30, 100368.
- Hariharan, V., & Shankar, M. U. (2017, November). A review of visual MODFLOW applications in groundwater modelling. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 263, No. 3, p. 032025). IOP Publishing.
- Hanifehlou, A., Javadi, S., Hosseini, A., & Sharafati, A. (2023). Simulation of the impacts of climate and land-use change on groundwater level in the Hashtgerd plain, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(7), 428.
- Kayhomayoon, Z., Jamnani, M. R., Rashidi, S., Milan, S. G., Azar, N. A., & Berndtsson, R. (2023). Soft computing assessment of current and future groundwater resources under CMIP6 scenarios in northwestern Iran. *Agricultural Water Management*, no. 285, 108369.
- Liesch, T., & Wunsch, A. (2019). Aquifer responses to long-term climatic periodicities. *Journal of Hydrology*, no. 572, 226-242.
- Mizan, S. A., Sikka, A., Chakraborty, S., Laing, A., Urfels, A., & Krupnik, T. J. (2025). Modelling groundwater futures under climatic uncertainty for local policy and planning: A case of quantification of groundwater resources at sub-regional level in the Ganges basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, no. 59, 102315.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.
- Munday, P. L., Donelson, J. M., & Domingos, J. A. (2017). Potential for adaptation to climate change in a coral reef fish. *Global change biology*, 23(1), 307-317.
- Najafi, S., Sharafati, A., & Moghaddam, H. K. (2023). Impact of climate change adaptation strategies on groundwater resources: a case study of Sari-Neka coastal aquifer, Northern Iran. *Environmental Earth Sciences*, 82(23), 571.
- Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., ... & Ziehn, T. (2021). Climate model projections from the scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*, 12(1), 253-293.