

Research Paper

Assessing the Impact of Climate Change Scenarios (SSP) on Groundwater Level Fluctuations in the North Ahvaz Plain (Khuzestan Province, Southwest Iran) Using LARS-WG and MODFLOW Models

Soheila Mojadam¹,Seyed Yahya Mirzaee Arjenaki^{2*}

¹, PhD student in Hydrogeology, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Email: Soheilamojadam17@gmail.com

² Yahya Mirzaee, Associate Professor of Hydrology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Corresponding author. Email: Yahyamirzee@scu.ac.ir, Phone: 09163096940.

[10.22125/iwe.2026.585872.1927](https://doi.org/10.22125/iwe.2026.585872.1927)

Received:
November 10, 2025
Accepted:
March 12, 2026
Available online:
June 25, 2026

Keywords:
Climate Change,
Groundwater Modeling,
MODFLOW, LARS-
WG, SSP Scenarios,
North Ahvaz Plain.

Abstract

Climatic transformations, through the modification of temperature and precipitation dynamics, pose a challenge to the hydrological equilibrium and the cohesive efficiency of water resource systems. This study aims to investigate the impacts of climate change on groundwater resources in the Northern Ahvaz Plain aquifer, Khuzestan Province, Iran. For this purpose, outputs of coupled atmosphere–ocean general circulation models under the SSP2.6, SSP4.5, and SSP8.5 scenarios were downscaled for the Ahvaz synoptic station using the LARS-WG stochastic weather generator (version 7.0). Changes in minimum temperature, maximum temperature, and precipitation were then analyzed for the baseline period 2000–2025 and the future period 2026–2045. The climate simulation results indicate that the annual mean minimum and maximum temperatures are projected to increase during the future period under all scenarios relative to the baseline period. The largest increases in maximum and minimum temperatures were estimated at 2.29°C and 1.65°C, respectively, under the SSP8.5 scenario, while the smallest increases—2.05°C for maximum temperature and 1.56°C for minimum temperature—were projected under the SSP2.6 and SSP4.5 scenarios. Conversely, the annual mean precipitation is expected to decrease in the future period compared to the baseline period, with reductions of 3.91%, 8.6%, and 11% under the SSP4.5, SSP2.6, and SSP8.5 scenarios, respectively. Subsequently, to assess the impacts of these climatic changes on groundwater resources, a numerical groundwater flow model was developed using the MODFLOW code within the Groundwater Modeling System (GMS, version 10.8). Simulation results reveal a general decline in groundwater levels during the future period across all scenarios. The maximum groundwater level decline, reaching approximately 7.5 m, was observed under the SSP8.5 scenario, indicating a more critical condition of the aquifer compared to the other scenarios. This research, beyond extracting regional numerical results, presents a hybrid methodology for the quantitative assessment of aquifer sensitivity to climate change based on GCMs and fluid flow simulation, which can be utilized as a model for managerial decision-making in similar basins.

* Corresponding Author: Seyed Yahya Mirzaee Arjenaki

Address: Department of Geology,
Shahid Chamran University of Ahvaz

Email: Yahyamirzee@scu.ac.ir

Tel: 09163096940

1) Introduction

Climate change, through its direct influence on temperature, precipitation, and evapotranspiration patterns, has significantly altered hydrological processes and intensified pressure on groundwater resources, particularly in arid and semi-arid regions. Groundwater aquifers in such regions play a critical role in sustaining agricultural, urban, and industrial activities; however, they are highly vulnerable to climatic variability and excessive abstraction.

The Northern Ahvaz Plain, located in Khuzestan Province within the Karun River basin, represents one of the most important groundwater-dependent regions in southwestern Iran. In recent decades, increasing water demand combined with climatic stresses has led to continuous groundwater level decline in this plain. Therefore, assessing the potential impacts of future climate change scenarios on groundwater dynamics is essential for sustainable water resources management.

The main objectives of this study are: (1) to evaluate future changes in temperature and precipitation under different Shared Socioeconomic Pathway scenarios during the period 2026–2045, and (2) to investigate the response of groundwater levels in the Northern Ahvaz Plain to these climatic changes by integrating climate modeling and numerical groundwater flow simulation.

2) Materials and Methods

Study Area

The Northern Ahvaz Plain is located in the central part of Khuzestan Province and is recognized as one of the most important alluvial aquifers of the province. The plain is situated at approximately 48°02' E longitude and 30°31' N latitude and, from a hydrological perspective, lies within the Karun River basin. The aquifer system of this plain mainly consists of Quaternary alluvial deposits, including alternating layers of gravel, sand, silt, and clay, forming an unconfined to semi-confined aquifer.

Climate Change Modeling

Future climatic variables were generated using the LARS-WG stochastic weather generator (version 7.0). Initially, the model was calibrated and validated using observed daily data from the Ahvaz synoptic station for the baseline period of 2000–2025. Model performance was evaluated using statistical indicators such as the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), and Nash–Sutcliffe efficiency (NSE). Subsequently, future climate variables were produced for the period 2026–2045 under three Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios representing low, medium, and high emission conditions.

Groundwater Flow Modeling

A numerical groundwater flow model was developed using a finite-difference approach implemented in the MODFLOW code, and the model setup, pre-processing, and visualization were carried out using the Groundwater Modeling System (GMS, version 10.8) to simulate groundwater dynamics in the Northern Ahvaz Plain aquifer. The model domain was discretized into a regular grid and calibrated under both steady-state and transient conditions using observed groundwater level data. The generated future climate time series were subsequently incorporated into the MODFLOW–GMS integrated modeling framework to assess changes in groundwater levels under different climate change scenarios.

3) Results

The climate projections indicate an overall increase in air temperature and a decrease in annual precipitation during the future period compared to the baseline. The highest increase in maximum and minimum temperatures, reaching 2.29 °C and 1.65 °C respectively, was observed under the high-emission scenario. Annual precipitation is projected to decrease by approximately 3.9%, 8.6%, and 11% under the low-, medium-, and high-emission scenarios, respectively. Groundwater simulation results reveal a continuous decline in groundwater levels across all future scenarios. The average groundwater level decline during the 2026–2045 period was estimated to be approximately 3 m under the low-emission scenario, 6 m under the medium-emission scenario, and up to 7.5 m under the high-emission scenario. Spatial analysis shows that groundwater depletion is more severe in the central and northern parts of the plain, where groundwater abstraction is more intensive.

4) Discussion and Conclusion

The combined effects of increasing temperature and decreasing precipitation are expected to intensify groundwater stress in the Northern Ahvaz Plain by reducing natural recharge and increasing water demand. The results clearly demonstrate that groundwater level decline persists even under optimistic climate scenarios, while more severe emission pathways substantially accelerate aquifer depletion.

These findings highlight the critical role of adaptive groundwater management strategies, including controlled abstraction, improved irrigation efficiency, and continuous monitoring of groundwater levels. Without effective management interventions, climate change impacts are likely to exacerbate groundwater depletion and threaten long-term water security in the study area.

5) Six important references

- 1) Akhtar, M., N. Ahmad and M.J. Booij. 2008. The impact of climate change on the water resources of the Hindukush–Karakorum region under different glacier coverage scenarios. *J. Hydrol.*, 355, 148–163. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.015>
- 2) Anderson, M.P., W.W. Woessner and R.J. Hunt. 2015. Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport. *Academic Press*. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21563-7>
- 3) Boughariou, E., N. Allouche, I. Jmal, N. Mokadem, B. Ayed, S. Hajji, H. Khanfir and S. Bouri. 2018. Modeling aquifer behavior under climate change and high consumption: Case study of the Sfax region, southeast Tunisia. *J. Afr. Earth Sci.*, 141, 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.02.006>
- 4) IPCC. 2021. Climate change 2021: The physical science basis. AR6, Summary for policymakers. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- 5) Harbaugh, A.W. 2005. MODFLOW-2005: The U.S. Geological Survey modular groundwater model – The groundwater flow process. USGS TM 6-A16. <https://doi.org/10.3133/tm6A16>
- 6) Semenov, M.A. and P. Stratonovitch. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Clim. Res.*, 4, 1–14. <https://www.jstor.org/stable/24895285>

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



ارزیابی تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم (SSP) بر نوسانات تراز آب زیرزمینی دشت اهواز شمالی (استان خوزستان، جنوب غرب ایران) با استفاده از مدل‌های MODFLOW و LARS-WG

سهیلا مجد م^۱، سید یحیی میرزایی^۲

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۸/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۱

مقاله پژوهشی

چکیده

تحولات اقلیمی، با تغییر الگوهای دینامیکی دما و بارش، تعادل هیدرولوژیک و کارایی یکپارچه سامانه‌های آبی را به چالش می‌کشند. هدف این پژوهش بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت اهواز شمالی در استان خوزستان است. بدین منظور، داده‌های خروجی مدل‌های گردش عمومی جو- اقیانوس تحت سناریوهای SSP2.6, SSP4.5, و SSP8.5 با استفاده از مدل مولد داده‌های اقلیمی LARS-WG نسخه ۷.۰ در ایستگاه سینوپتیک اهواز ریزمقیاس‌نمایی شد. سپس تغییرات دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش در دوره پایه (۲۰۰۰-۲۰۲۵) و دوره آتی (۲۰۲۶-۲۰۴۵) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی اقلیمی نشان داد که میانگین سالانه دمای حداقل و حداکثر در دوره آتی تحت تمامی سناریوها نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت؛ به طوری که بیشترین افزایش دمای حداکثر و حداقل به ترتیب ۲.۲۹ و ۱.۶۵ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی SSP8.5 و کمترین مقدار آن به ترتیب ۲.۰۵ و ۱.۵۶ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوهای SSP2.6 و SSP4.5 برآورد شد. در مقابل، میانگین سالانه بارش در دوره آتی نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای SSP2.6, SSP4.5, و SSP8.5 به ترتیب با کاهش ۳.۹۱، ۸.۶ و ۱۱ درصدی همراه خواهد بود. در ادامه، به منظور بررسی اثر این تغییرات بر منابع آب زیرزمینی، مدل جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW در محیط نرم‌افزار GMS نسخه ۱۰.۸ توسعه داده شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از افت سطح آب زیرزمینی در دوره آتی است، به طوری که بیشترین افت سطح آب معادل ۷.۵ متر تحت سناریوی SSP8.5 مشاهده شد که نشان‌دهنده وضعیت بحرانی‌تر آبخوان نسبت به سایر سناریوهاست. این پژوهش، فراتر از استخراج نتایج عددی منطقه‌ای، یک متدولوژی ترکیبی برای ارزیابی کمی حساسیت آبخوان‌ها به تغییرات اقلیمی بر اساس مدل‌های گردش عمومی جو و شبیه‌سازی جریان سیال ارائه می‌دهد، که می‌تواند به عنوان الگویی برای تصمیم‌گیری مدیریتی در حوضه‌های مشابه مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، شبیه‌سازی آب زیرزمینی، MODFLOW، LASRS-WG، سناریوهای SSP، دشت اهواز شمالی

۱- دکتری هیدروژئولوژی، دانشگاه شهید چمران اهواز، Soheilamojadam17@gmail.com، ۰۹۱۰۶۳۶۵۱۶۵

۲- دانشیار هیدروژئولوژی، عضو هیات علمی دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران Yahyamirzee@scu.ac.ir

(نویسنده مسئول)، ۰۹۱۶۳۰۹۶۹۴۰

مقدمه

پایدار منابع آب در دهه‌های آینده مطرح شده است. (2001 IPCC, بر اساس گزارش ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC, 2021)، تغییر اقلیم موجب دگرگونی الگوهای هیدرواقليمی و تشدید تنش‌های مرتبط با منابع آب در مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای شده است. در پاسخ به این شرایط، مدیریت منابع آب از رویکردهای ایستا به سوی چارچوب‌های آینده‌نگر مبتنی بر ارزیابی آسیب‌پذیری و تاب‌آوری سیستم‌ها در برابر سناریوهای اقلیمی سوق یافته است. با توجه به حساسیت بالای مناطق خشک و نیمه‌خشک، انجام مطالعات نظام‌مند و مبتنی بر داده‌های معتبر برای تحلیل پیامدهای تغییر اقلیم بر سامانه‌های آب، به‌ویژه در کشورهایی مانند ایران، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر برای پشتیبانی از تصمیم‌سازی‌های راهبردی محسوب می‌شود. (2021 IPCC,

نخستین مطالعات پژوهشی در زمینه بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی به دهه ۱۹۹۰ میلادی بازمی‌گردد؛ از آن زمان تاکنون، این حوزه به‌عنوان یکی از محورهای مهم پژوهشی در علوم آب و هیدروژئولوژی مورد توجه گسترده محققان قرار گرفته و مطالعات متعددی با رویکردهای مدل‌سازی، سناریو محور و ارزیابی اثرات اقلیمی در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی انجام شده است. در این زمینه Vaccaro (۱۹۹۲) تاثیر تغییرات آب و هوایی آینده بر تغذیه آبخوان در ایالات متحده را با استفاده از یک مولد آب و هوا (WGEN) و سه مدل آب و هوای جهانی مورد مطالعه قرار داد. Akhtar et al., 2008 در یکی از مطالعات انجام‌شده، اثرات تغییر اقلیم بر حوضه آبریز Hindukush-Karakorum در رشته‌کوه هیمالیا طی دوره زمانی ۲۱۰۰-۲۰۷۰ گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که در دوره آتی، هر دو متغیر دما و بارش در حوضه مورد مطالعه روندی افزایشی خواهند داشت که بیانگر تشدید تغییرات اقلیمی و پیامدهای بالقوه آن بر سامانه‌های هیدروژئولوژیکی منطقه است. Meddi and Boucefiane, 2013 در مطالعه‌ای دیگر،

تحولات اقلیمی، با تغییر الگوهای دینامیکی دما و بارش، تعادل هیدرولوژیک و کارایی یکپارچه سامانه‌های آبی را به چالش می‌کشند. بر اساس گزارش‌های هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC¹), این تغییرات به‌ویژه در جغرافیای نواحی خشک و نیمه‌خشک، پیامدهای سوئی برجسته‌ای داشته و با محدود کردن دسترسی پایدار به منابع آب، چالش‌های جدی را برای مدیریت منابع پدید می‌آورند. در این میان، افت سطح آب‌های زیرزمینی، که تحت تأثیر فشارهای جمعیتی و توسعه‌ی ناپایدار فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی تشدید شده، به یکی از دغدغه‌های اصلی مدیریتی تبدیل گشته است (Ouyang et al., 2021). در دهه‌های اخیر، بسیاری از مناطق جهان با پیامدهای متعددی روبه‌رو شده‌اند که ریشه اصلی آن‌ها به مدیریت ناپایدار و بهره‌برداری غیراصولی از منابع طبیعی، به‌ویژه منابع آب، بازمی‌گردد. این شرایط در کشورهای در حال توسعه و به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک شدت بیشتری یافته و منجر به افزایش فشار بر منابع آب زیرزمینی شده است. پیامد این روند، افت تراز آبخوان‌ها و تنزل کیفیت منابع آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌ها و سامانه‌های آب زیرزمینی گزارش شده است؛ امری که پایداری منابع آب و توسعه بلندمدت این مناطق را با چالش جدی مواجه ساخته است. (Malekinezhad and Bandkooki 2018; Mirzaee et al., 2020). نادیده گرفتن مطالعات مرتبط با تغییر اقلیم در فرایند طراحی، برنامه‌ریزی و مدیریت سامانه‌های منابع آب می‌تواند منجر به اتخاذ تصمیم‌های غیربهبینه و بروز پیامدهای نامطلوب در مقیاس‌های مختلف شود. یافته‌های اخیر هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) نشان می‌دهد که حتی تغییرات نسبتاً جزئی در متغیرهای هیدروژئولوژیکی قادر است دگرگونی‌های معناداری در عملکرد و پایداری سیستم‌های منابع آب ایجاد کند. بر این اساس، پیامدهای تغییر اقلیم و خسارات ناشی از آن به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین چالش‌های پیش‌روی مدیریت

³- Intergovernmental Panel on Climate Change



مدل‌های گردش عمومی (CMIP6) و سناریوهای SSP مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مطالعه، با تکیه بر آمار ۳۰ ساله (۲۰۱۴-۱۹۸۴) در هفت ایستگاه منتخب، توانمندی هفت مدل GCM در شبیه‌سازی منطقه واکاوی شد. پژوهشگران مذکور با به‌کارگیری روش نسبت‌گیری خطی جهت تصحیح سوگیری خروجی‌ها، به این نتیجه دست یافتند که اقلیم منطقه در دهه‌های آتی با تشدید روند کاهشی بارش و افزایش ملموس میانگین دما نسبت به دوره پایه مواجه خواهد بود. Rezaei et al., 2024 در مطالعه‌ای با تمرکز بر ارزیابی توانمندی نسل ششم مدل‌های گردش عمومی جو-اقیانوس (CMIP6) در مقیاس ملی، عملکرد این مدل‌ها در بازنمایی متغیرهای دما و بارش و پیش‌نگری تغییرات آبی آن‌ها تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSPs) در ایران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مقایسه خروجی مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی نشان داد که در میان مجموعه الگوهای ارزیابی‌شده، مدل MPI-ESM1-2-LR بالاترین دقت را در شبیه‌سازی بارش و مدل MRI-ESM2 عملکرد برتری را در بازتولید مؤلفه‌های دمایی در مقیاس کشور از خود نشان داده‌اند. Mirzaee et al., 2024 به پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی دشت گلگیر در آینده با استفاده از سناریوهای انتشار RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 در دوره آینده ۲۰۲۲-۲۰۴۰ پرداختند. برآوردهای آنان بیانگر افزایش دما و کاهش بارندگی در دوره‌های آتی تحت سناریوهای انتشار بود. آنان همچنین دریافتند که سطح آب زیرزمینی در دوره آتی ۲۰۲۲-۲۰۴۰ در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب به اندازه ۴/۶ متر و ۶/۷ متر کاهش می‌یابد. جعفری و همکاران ۱۴۰۴، به مطالعه سطح آب زیرزمینی دشت قزوین را با استفاده از سناریوهای انتشار SSP2.6 و RCP8.5 پرداختند، نتایج آنان حاکی از افزایش دما و کاهش بارندگی در دوره‌های آتی تحت سناریوهای انتشار بود. همچنین دریافتند که سطح آب زیرزمینی در دوره آتی دارای روند افزایشی افت می‌باشد.

بایسته و زارعی ۱۴۰۴، به بررسی اثرات تغییرات اقلیمی تحت سناریوهای SSP2.6 و SSP8.5 بر رواناب حوضه‌های کر و

تغییرات اقلیمی و پیامدهای آن بر منابع آب زیرزمینی در حوضه Cheliff-Zahrez کشور الجزایر برای افق‌های زمانی ۲۰۲۰ و ۲۰۵۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که سطح آب زیرزمینی در سناریوهای آینده با روندی کاهشی مواجه خواهد بود؛ به‌گونه‌ای که میزان افت سطح آب زیرزمینی در سال ۲۰۲۰ بین ۴.۴ تا ۶.۶ درصد و در سال ۲۰۵۰ بین ۷.۹ تا ۱۲.۸ درصد برآورد شده است. این نتایج بیانگر تشدید اثرات تغییر اقلیم بر افت منابع آب زیرزمینی در دوره‌های زمانی بلندمدت است. Boughariou et al., 2018 در مطالعه‌ای دیگر، رفتار آبخوان در جنوب شرق تونس تحت تأثیر تغییرات اقلیمی با بهره‌گیری از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCM¹) و شبیه‌سازی سیستم آب زیرزمینی با استفاده از مدل جریان آب زیرزمینی MODFLOW و سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای، طی دوره زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ مورد مدل‌سازی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی اقلیمی نشان داد که میانگین سالانه دما در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۵۰ به ترتیب حدود ۱.۱ و ۱.۲ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت، در حالی که بارندگی سالانه با روندی کاهشی مواجه است. پیامد این تغییرات، افت سطح ایستابی آب زیرزمینی به میزان تقریبی ۰.۵ متر در سال ۲۰۲۰ و ۱ متر در سال ۲۰۵۰ برآورد شد که بیانگر تشدید فشار اقلیمی بر پایداری منابع آب زیرزمینی منطقه است. Tanachaichoksirikun et al., 2018 به ارزیابی تأثیر تغییرات آب و هوایی بر پایداری آب‌های زیرزمینی در نتیجه تغییرات آب و هوایی با استفاده از سناریوهای RCP2.6, RCP4.5, RCP 8.5 و مدل شبیه‌ساز آب زیرزمینی MODFLOW طی دوره ۲۰۱۷-۲۰۳۶ در حوضه Chao Phraya تایلند پرداختند. یافته‌ها نشان داد که در سناریوی RCP4.5 بالاترین میانگین بارندگی و پایداری آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهد. Afsharinia et al., 2024 پژوهشی با هدف پیش‌نگری مؤلفه‌های هیدرواقلمی دشت کاشان تا افق ۲۱۰۰، اثرات تغییر اقلیم بر مبنای خروجی‌های نسل ششم

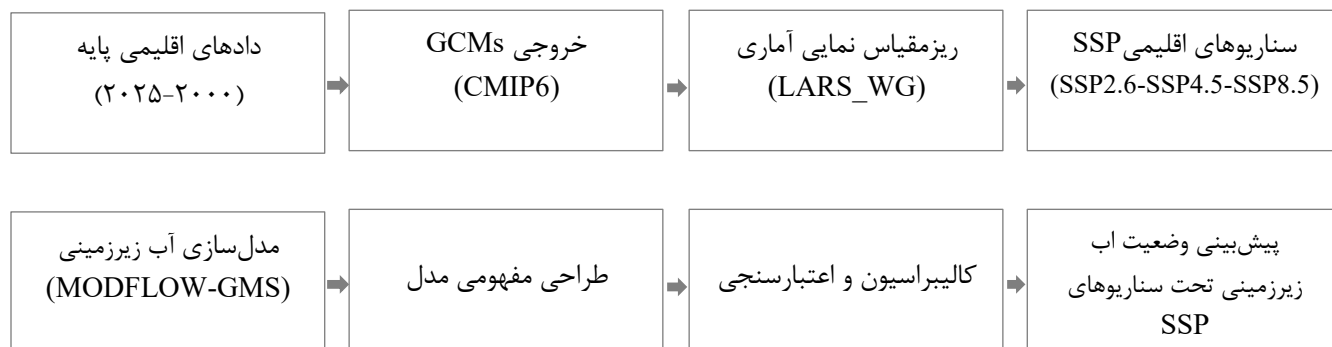
بارندگی در دوره پایه (۲۰۲۵-۲۰۰۰) با استفاده از مدل‌های اقلیمی جهانی ۲- بررسی تغییرات اقلیم بر سطح آب زیرزمینی دشت اهواز شمالی ایران در دوره آتی (۲۰۴۵-۲۰۲۶) تحت سناریوها SSP2.6, SSP4.5, SSP8.5 که می‌تواند به مدیریت آب زیرزمینی کمک کند.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، مراحل انجام مطالعه به صورت یک چارچوب منسجم طراحی شده است. ابتدا پارامترهای اقلیمی و آب‌وهوایی تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی مبتنی بر مسیرهای اجتماعی- اقتصادی مشترک (SSP^۱) برآورد و شبیه‌سازی گردید. سپس، رفتار هیدرودینامیکی آبخوان با استفاده از مدل عددی GMS/MODFLOW شبیه‌سازی شد. در ادامه، اثرات تغییر اقلیم تحت سناریوهای مختلف بر عملکرد سامانه مدیریت منابع آب زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفت و وضعیت آتی آبخوان پیش‌بینی شد. چارچوب کلی و توالی منطقی اجرای مراحل تحقیق به صورت شماتیک در شکل ۱ ارائه شده است.

سیوند در دوره آتی ۲۰۵۰-۲۰۲۱ پراختند، نتایج حاکی از افزایش دما و بارش تحت این سناریوهای انتشار و مدل HadGEM3 و نتایج مدل MPI_ESMI_2_LR نشان از آینده خشک‌تر با کاهش چشمگیر بارش در فصول سرد سال بود.

تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن حاضر، اثرات چشمگیری بر چرخه هیدرولوژیکی و منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی بر جای می‌گذارد. با توجه به آن که پاسخ آبخوان‌ها به تغییرات اقلیمی ماهیتی تدریجی و با تأخیر زمانی دارد، ارزیابی و پیش‌بینی این منابع در راستای تضمین پایداری آن‌ها ضروری است. شواهد علمی نشان می‌دهد که حتی نوسانات محدود در متغیرهای اقلیمی می‌تواند منجر به تغییرات معنی‌دار در تراز، تغذیه و رفتار دینامیکی آبخوان‌ها شود. (Elassaoui et al., 2021). اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی دشت اهواز شمالی ایران تاکنون انجام نشده است و با توجه به شرایط خشکسالی منطقه مورد مطالعه بررسی این تغییرات ضروری است. بنابراین هدف این مطالعه به ۱- مدل‌سازی کمی ارتباط بین منابع آب زیرزمینی و تغییرات اقلیمی دما و



شکل (۱): فلوچارت روش‌شناسی پژوهش

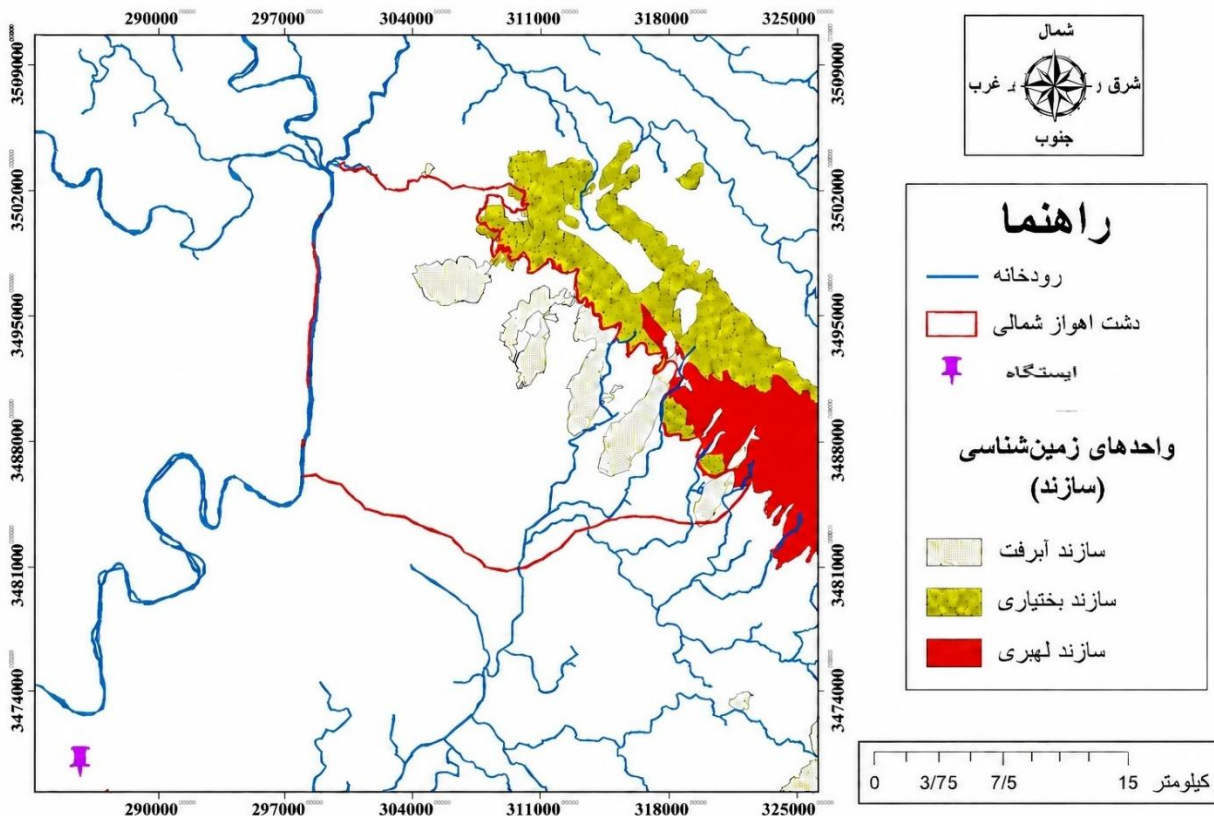
^۱-Shared Socioeconomic Pathways



منطقه مورد مطالعه

سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه در حدود ۳۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد که عمدتاً در ماه‌های زمستانی رخ می‌دهد. تبخیر و تعرق پتانسیل بالا، به‌ویژه در فصول گرم سال، نقش مهمی در تراز آب زیرزمینی منطقه ایفا می‌کند. از نظر هیدروژئولوژیکی، جریان غالب آب زیرزمینی در دشت اهواز شمالی به‌طور کلی از شمال و شمال‌شرق به سمت جنوب و جنوب‌غرب بوده و تخلیه طبیعی آبخوان عمدتاً به رودخانه کارون و همچنین برداشت‌های بهره‌برداری کشاورزی صورت می‌گیرد. کاربری اراضی منطقه غالباً شامل اراضی کشاورزی، باغات (به‌ویژه نخیلات)، و مناطق مسکونی پراکنده است. وابستگی شدید فعالیت‌های کشاورزی به منابع آب زیرزمینی، در کنار افزایش تقاضای آب، موجب شده است که آبخوان اهواز شمالی در سال‌های اخیر با چالش‌هایی نظیر افت سطح آب زیرزمینی و تغییر در رژیم جریان آبخوان مواجه شود. از این‌رو، بررسی و شبیه‌سازی رفتار آبخوان و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی این دشت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (شکل ۲).

دشت اهواز شمالی در بخش مرکزی استان خوزستان واقع شده و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین آبخوان‌های آبرفتی این استان شناخته می‌شود. این دشت در محدوده مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۳۱ دقیقه شمالی قرار دارد و از نظر تقسیمات هیدروژئولوژیکی، در حوضه آبریز رودخانه کارون واقع شده است. مرزهای شمالی دشت به ارتفاعات زاگرس چین‌خورده، مرز جنوبی به بخش‌های مرکزی شهر اهواز، و مرزهای شرقی و غربی آن به دشت‌های مجاور و اراضی آبرفتی وابسته به کارون محدود می‌شود. از دیدگاه زمین‌شناسی، آبخوان اهواز شمالی عمدتاً از رسوبات آبرفتی دوران چهارم شامل لایه‌های متناوب شن، ماسه، سیلت و رس تشکیل شده است که حاصل فعالیت‌های رودخانه‌ای کارون و شاخه‌های فرعی آن می‌باشند. این رسوبات از نفوذپذیری نسبتاً بالایی برخوردار بوده و شرایط مناسبی را برای ذخیره و انتقال آب زیرزمینی فراهم کرده‌اند. ضخامت آبرفت‌ها در بخش‌های مرکزی دشت افزایش یافته و به سمت حاشیه‌ها کاهش می‌یابد. اقلیم منطقه براساس طبقه‌بندی دومارتن، گرم و خشک است. میانگین دمای سالانه حدود ۲۴ تا ۲۶ درجه



شکل (۲): موقعیت جغرافیایی دشت اهواز شمالی

تغییرات اقلیمی و مدل‌های گردش عمومی GCM

متغیر آینده را ندارند. در این چارچوب نوین، بهره‌گیری از مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) به‌عنوان ابزارهای آینده‌نگر، امکان بازنمایی رفتار متغیرهای اقلیمی و تحلیل پیامدهای بالقوه تغییر اقلیم را فراهم می‌سازد و مبنای علمی لازم برای تدوین راهبردهای سازگاری و تصمیم‌گیری پایدار در مدیریت منابع آب را ایجاد می‌کند. (Soltani et al., 2022; Nikkhoo Amiri et al., 2023).

مدل‌های گردش عمومی جو-اقیانوس (GCM) چارچوب‌های عددی پیشرفته‌ای هستند که برای بازنمایی پویایی سامانه اقلیم در مقیاس جهانی توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها با شبیه‌سازی برهم‌کنش‌های پیچیده میان اجزای اصلی سامانه اقلیمی و لحاظ کردن سناریوهای افزایش غلظت گازهای

تغییر اقلیمی به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین چالش‌های قرن بیست و یکم شناخته می‌شود و یکی از عوامل بروز نوسانات در پارامترهای اقلیمی به‌شمار می‌آید. این پدیده به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل محدودیت منابع آب و افزایش خطر خشکسالی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی اقلیمی نشان‌دهنده افزایش قابل توجه دمای جو در مقیاس جهانی می‌باشد (Mirzaee et al., 2024). دگرگونی‌های اقلیمی با ایجاد اختلال در الگوهای پایدار سامانه‌های طبیعی، به‌ویژه چرخه‌های هیدرولوژیکی، چالش‌های نوینی را پیش روی مدیریت منابع آب قرار داده‌اند؛ به‌گونه‌ای که رویکردهای ایستا و مبتنی بر داده‌های گذشته دیگر توان پاسخ‌گویی به شرایط

یک گام ضروری در مطالعات اقلیمی به شمار می‌رود، بلکه مبنای علمی مهمی برای پشتیبانی از تصمیم‌سازی‌های کلان و تدوین راهبردهای پایدار در مدیریت منابع آب فراهم می‌سازد؛ زیرا امکان ارزیابی سناریوهای متنوع اقلیمی و انتخاب آگاهانه الگوی مناسب برای تحلیل‌های آینده‌نگر را فراهم می‌کند. (حسینی وردنجان و همکاران، ۱۴۰۴).

سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای (SSP)

هیئت بین‌المللی تغییر اقلیم (IPCC) جهت پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم در گزارش ارزیابی ششم از سناریوهای مسیره‌های اجتماعی-اقتصادی مشترک SSP استفاده کرده است. جدول ویژگی‌های سناریوهای مسیره‌های اجتماعی-اقتصادی مشترک را نشان می‌دهد.

گلخانه‌ای، امکان تحلیل و پیش‌بینی تغییرات زمانی متغیرهای کلیدی اقلیمی نظیر دمای هوا، الگوهای بارش و میدان‌های باد را فراهم می‌سازند؛ از این رو، GCMها به‌عنوان یکی از معتبرترین ابزارهای علمی در ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم در مطالعات منطقه‌ای و جهانی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند (Ghazvi and Ebrahimi, 2018). ناهمگونی در ساختار، تفکیک مکانی و فرمول‌بندی فیزیکی مدل‌های گردش عمومی جو موجب می‌شود توان بازنمایی فرآیندهای اقلیمی در میان این مدل‌ها یکنواخت نباشد و عملکرد آن‌ها در نواحی مختلف جغرافیایی تفاوت معناداری داشته باشد. میزان اتکاپذیری خروجی‌های هر مدل، تا حد زیادی به توانایی آن در بازتولید الگوهای اقلیمی دوره مرجع و شبیه‌سازی واقع‌بینانه شرایط آبی وابسته است. از این منظر، سنجش و مقایسه عملکرد مدل‌های گردش عمومی‌ها نه‌تنها

جدول (۱): مشخصات سناریوهای مسیره‌های اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) (IPCC, 2021)

سناریو	سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای	توصیف مسیر اجتماعی-اقتصادی	پیامدهای مورد انتظار بر منابع آب
SSP2.6	کم	توسعه پایدار، کاهش نابرابری‌ها و گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر	کمترین فشار اقلیمی و کاهش نسبی ریسک تنش آبی
SSP4.5	متوسط	تداوم روندهای فعلی توسعه اجتماعی-اقتصادی	افزایش تنش آبی و ناپایداری منابع آب
SSP8.5	بسیار زیاد	رشد سریع اقتصادی مبتنی بر مصرف گسترده سوخت‌های فسیلی	بیشترین افت منابع آب سطحی و زیرزمینی و تشدید بحران آب

پیش‌شرط استفاده از سناریوهای اقلیمی در مطالعات کاربردی محسوب می‌شود. در این چارچوب، مدل مولد داده‌های اقلیمی LARS-WG به‌عنوان یکی از ابزارهای پرکاربرد در مطالعات تغییر اقلیم، قابلیت بازتولید و شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی را در مقیاس محلی بر اساس داده‌های مشاهده‌شده داراست. ساختار اجرایی این مدل شامل سه گام اصلی است؛ ابتدا پارامترهای آماری داده‌های اقلیمی ثبت‌شده استخراج و

کالیبراسیون و ارزیابی مدل مولد داده‌های اقلیمی (LARS-WG)

به دلیل ماهیت شبکه‌ای و مقیاس بزرگ خروجی مدل‌های گردش عمومی جو، این داده‌ها به‌طور مستقیم قابلیت تبیین نوسانات اقلیمی در مقیاس‌های محلی و ایستگاهی را ندارند. از این رو، تبدیل اطلاعات بزرگ‌مقیاس به داده‌های سازگار با مقیاس منطقه‌ای از طریق روش‌های ریزمقیاس‌سازی،

نرخ تغذیه و تخلیه، نشت، میزان برداشت مجاز، جهت و الگوی جریان آب زیرزمینی و همچنین تحلیل بهره‌برداری بلندمدت از آبخوان‌ها و لایه‌های محبوس‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند. نرم‌افزار GMS یک محیط یکپارچه و کاربرپسند برای توسعه و اجرای مدل‌های عددی آب زیرزمینی است که به‌عنوان واسطی میان داده‌های مکانی و مدل MODFLOW عمل می‌کند. این نرم‌افزار با امکان شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان آب زیرزمینی در شرایط پایدار و ناپایدار، رفتار هیدرودینامیکی آبخوان و تغییرات زمانی- مکانی تراز آب زیرزمینی را بازنمایی می‌کند (اقبالی و شهربانوزاده، ۱۴۰۴). در این پژوهش، به‌منظور شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در دشت اهواز شمالی، از نسخه 10.8 GMS برای طراحی و توسعه مدل مفهومی آبخوان استفاده شد. با توجه به قابلیت‌های مدل MODFLOW، این مدل به‌عنوان هسته اصلی شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی به کار گرفته شد و امکان مدل‌سازی جریان در محیط‌های متخلخل با چگالی ثابت را فراهم ساخت. مدل MODFLOW بر پایه معادله (رابطه ۴) حاکم جریان آب زیرزمینی در محیط‌های متخلخل اشباع و در شرایط تعادل بنا شده است.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

در این معادله، ضرایب K_{xx} و K_{yy} به ترتیب بیانگر هدایت هیدرولیکی در راستاهای افقی x و y هستند، h نشان‌دهنده هد هیدرولیکی یا بار پیزومتری، W معرف منابع و مصارف حجمی آب در واحد حجم، S_s ذخیره ویژه محیط متخلخل و t بیانگر زمان است (Harbaugh, 2005). روش عددی مورد استفاده در MODFLOW، روش تفاضل محدود است که در آن سامانه جریان آب زیرزمینی به شبکه‌ای متشکل از ردیف‌ها، ستون‌ها و لایه‌ها تقسیم می‌شود. هر سلول شبکه شامل یک گره محاسباتی است که مقدار تراز آب زیرزمینی در آن تعیین می‌شود. هندسه مدل شامل مشخصات ابعادی، شکل، شرایط مرزی و ساختار شبکه محاسباتی است. به‌منظور

مدل برای شرایط پایه واسنجی می‌شود. سپس، کارایی مدل از طریق مقایسه آماری داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نهایت، با استفاده از پارامترهای بهینه‌شده، سری‌های زمانی اقلیمی برای دوره‌های آبی تولید می‌شود که اطلاعاتی از جمله توزیع طول دوره‌های خشک و تر، بارش، دمای حداقل و حداکثر و تابش روزانه را در بر می‌گیرد. بدین ترتیب، داده‌های خروجی LARS-WG مبنای مناسبی برای تحلیل پیامدهای تغییر اقلیم و ارزیابی سناریوهای آینده در مطالعات منابع آب فراهم می‌کند. (Semenov and Stratonovitch, 2010).

به‌منظور ارزیابی دقت داده‌های تولیدشده توسط مدل و مقایسه آن‌ها با داده‌های مشاهده‌شده در دوره پایه در ایستگاه هواشناسی اهواز، از شاخص‌های آماری شامل ضریب همبستگی R^2 (Coefficient of Determination) رابطه‌ی ۱، جذر میانگین مربعات خط (RMSE Root Mean Square Error) رابطه‌ی ۲، و NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) رابطه‌ی ۳ استفاده شد.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

در این رابطه‌ها S_i داده‌های شبیه‌سازی شده، O_i داده‌های مشاهداتی، \bar{O} میانگین داده‌های مشاهداتی، n تعداد داده‌های مشاهداتی می‌باشد.

مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی با MODFLOW

آبخوان‌ها سامانه‌هایی پیچیده و پویا هستند که برهم‌کنش فرآیندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی، در مقیاس‌های زمانی متفاوت، موجب تغییرپذیری و نوسان تراز آب زیرزمینی در آن‌ها می‌شود (Chitsazan et al., 2015). مدل‌های جریان آب زیرزمینی ابزارهای کارآمدی برای ارزیابی منابع آب محسوب می‌شوند و به‌طور گسترده در تعیین مؤلفه‌هایی نظیر

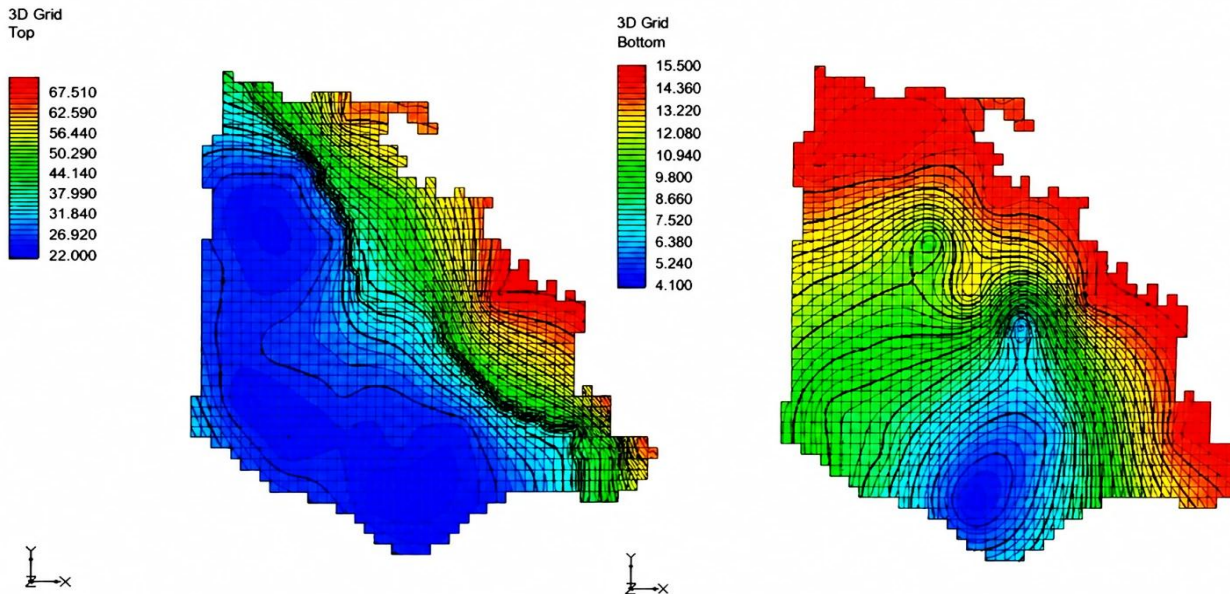
از این رو، سطح زمین به عنوان مرز بالایی مدل و معرف توپوگرافی منطقه لحاظ گردید. به منظور تهیه لایه توپوگرافی (DEM)، داده‌های ارتفاعی منطقه در محیط GIS به نقاط رقومی ارتفاعی تبدیل و سپس به صورت فایل متنی (Text) استخراج شدند. این فایل با استفاده از ماژول 2D Scatter Point در محیط نرم‌افزار GMS 10.8 وارد مدل شد. در ادامه، داده‌های توپوگرافی با انتخاب محیط سه‌بعدی و به کارگیری روش درون‌یابی مناسب، به سطح شبکه مدل تعمیم داده شدند (شکل a ۳). همچنین، توپوگرافی کف آبخوان دشت اهواز شمالی بر اساس اطلاعات سونداژهای ژئوفیزیکی و و تحلیل داده‌های هیدروژئولوژیکی استخراج گردید. این اطلاعات نیز پس از تبدیل به فایل متنی، از طریق ماژول 2D Scatter Point در نرم‌افزار GMS 10.8 فراخوانی شدند و در همان محیط با استفاده از روش کریجینگ درون‌یابی گردیده و مقادیر حاصل به سلول‌های شبکه مدل MODFLOW تخصیص داده شد (شکل b ۳).

a

حل معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم، محیط پیوسته آبخوان به اجزای کوچکتری موسوم به سلول تفکیک می‌شود.

در مدل‌سازی آبخوان دشت اهواز شمالی، ابعاد سلول‌های شبکه عددی به صورت 500×500 متر تعریف شد. انتخاب این ابعاد بر اساس وسعت محدوده، تراکم داده‌های موجود و ضرورت ایجاد تعادلی میان دقت مکانی و زمان محاسبات انجام گرفت. استفاده از سلول‌های 500 متری امکان نمایش مناسب ناهمگنی‌های منطقه و در عین حال پایداری محاسبات MODFLOW را فراهم کرد. پس از تعریف شبکه و مشخص کردن سلول‌های فعال، پارامترهای اصلی شامل تراز سنگ کف آبخوان، توپوگرافی سطح زمین و بار هیدرولیکی اولیه به مدل اختصاص داده شد. از آنجا که درون‌یابی این پارامترها صرفاً بر مبنای سلول‌های فعال انجام می‌گیرد، تنها بخش‌های فعال آبخوان در فرآیند محاسبات و تخصیص مقادیر پارامترها لحاظ شدند. آبخوان دشت اهواز شمالی به صورت یک آبخوان آزاد و تک‌لایه‌ای تعریف می‌شود؛

b



شکل (۳): توپوگرافی سطح زمین (a) و سنگ کف (b) آبخوان دشت اهواز شمالی مورد استفاده در مدل MODFLOW

واسنجی و اعتبارسنجی مدل آب زیرزمینی

واسنجی و ارزیابی مدل مستلزم انتخاب یک ترکیب بهینه از پارامترهای ورودی است (Seifi et al., 2020). واسنجی مدل به فرآیند تعدیل و بهینه‌سازی پارامترهای هیدروژئولوژیکی اطلاق می‌شود که با هدف دستیابی به بازنمایی واقع‌بینانه از رفتار سامانه آبخوان و کاهش اختلاف میان بار هیدرولیکی شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده در شرایط صحرائی انجام می‌گیرد. در این مرحله، پارامترهایی نظیر هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و شرایط مرزی به صورت تکرار شونده تنظیم می‌شوند تا انطباق قابل قبولی میان نتایج مدل و داده‌های مشاهداتی حاصل شود. با این حال، یکی از چالش‌های اساسی در فرآیند واسنجی، مسئله ناپذیرتایی پاسخ یا هم‌ارزی پارامترها است؛ به این معنا که مجموعه‌های متفاوتی از مقادیر پارامترهای مدل می‌توانند منجر به نتایج مشابه از نظر شاخص‌های آماری شوند. این ویژگی موجب می‌شود که دستیابی به یک راه‌حل یکتا امکان‌پذیر نباشد و تفسیر نتایج واسنجی مستلزم دقت و اتکای هم‌زمان بر معیارهای آماری، قضاوت هیدروژئولوژیکی و شناخت میدانی از آبخوان باشد (Anderson et al., 2015). با توجه به ماهیت ناپذیرتایی فرآیند واسنجی و امکان هم‌ارزی پارامترها، دستیابی به اختلاف اندک میان مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بار هیدرولیکی، به‌تنهایی نمی‌تواند تضمین‌کننده دقت مناسب مدل در بازنمایی سایر پارامترهای هیدروژئولوژیکی و مؤلفه‌های فیزیکی سامانه آبخوان باشد. از این رو، در طول مراحل واسنجی، ضروری است که تغییرات و رفتار سایر اجزای مؤثر مدل از جمله نرخ‌های تغذیه، شارهای مرزی، تبادلات آبخوان-رودخانه و مؤلفه‌های بیلان آب به صورت هم‌زمان و یکپارچه مورد ارزیابی قرار گیرند تا از بروز خطاهای ساختاری در مدل جلوگیری شود. بدیهی است اتکای صرف بر شاخص‌های آماری تطابق بار هیدرولیکی، بدون تحلیل رفتار هیدرودینامیکی سیستم، می‌تواند منجر به برداشت نادرست از عملکرد واقعی آبخوان گردد (باقری و فیجانی، ۱۴۰۴؛ Huang and Tun Lee, 2025).

بر این اساس، پس از تکمیل فرآیند واسنجی، اجرای مرحله صحت‌سنجی مدل به منظور ارزیابی قابلیت اعتماد آن در شبیه‌سازی تنش‌های وارد بر سامانه آب زیرزمینی امری ضروری تلقی می‌شود. در این مطالعه، واسنجی مدل ابتدا در حالت ماندگار و برای بازنمایی شرایط هیدرودینامیکی آبخوان در مهرماه ۱۳۹۲ انجام شد تا تعادل اولیه سیستم به درستی شبیه‌سازی شود. سپس، به منظور بررسی رفتار زمانی آبخوان و پاسخ آن به تنش‌های طبیعی و انسانی، مدل در حالت ناماندگار برای بازه زمانی مهر ۱۳۹۱ تا پایان شهریور ۱۴۰۱ به مدت ۱۲۰ ماه (۱۰ سال) اجرا گردید. در ادامه، مدل مفهومی آبخوان از حالت ماندگار به ناماندگار انتقال داده شد تا فرآیندهای زمانی نظیر تغییرات تغذیه، برداشت و نوسانات سطح آب زیرزمینی به صورت پویا در شبیه‌سازی لحاظ شوند.

با توجه به وجود عدم قطعیت‌های ذاتی در فرآیند مدل‌سازی آب زیرزمینی، در برخی موارد علی‌رغم دستیابی به واسنجی آماری رضایت‌بخش، ترکیب نامناسب پارامترها به‌ویژه ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان نظیر هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدهی ویژه می‌تواند توانایی مدل را در بازنمایی صحیح پاسخ سیستم به تنش‌های اعمال شده محدود سازد. چنین شرایطی ممکن است موجب شود مدل، علی‌رغم تطابق مناسب در دوره واسنجی، در پیش‌بینی شرایط آینده یا تحلیل سناریوهای مدیریتی عملکرد قابل اعتمادی نداشته باشد. از این رو، به منظور ارزیابی صحت شبیه‌سازی تنش‌ها و اطمینان از پایداری ساختار پارامتری مدل، مرحله صحت‌سنجی با اجرای مدل برای یک دوره زمانی مستقل از دوره واسنجی (قبل یا بعد از آن) انجام شد، به‌گونه‌ای که در این مرحله هیچ‌گونه تغییری در شرایط مرزی، مقادیر هدایت هیدرولیکی، ضریب آبدهی ویژه و مؤلفه‌های بیلان آبخوان اعمال نگردد. در صورتی که نتایج حاصل از اجرای مدل در این دوره مستقل، منجر به مقادیر خطا در محدوده آستانه‌های استاندارد تعریف شده در مرحله واسنجی شود، می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای هیدرودینامیکی مدل از دقت، پایداری و ترکیب



داده‌های بارگیری شده از فایل‌های (NC) با استفاده از نرم‌افزار GIS استخراج شد. سپس میانگین بلندمدت ماهانه متغیرهای اقلیمی حاصل از مدل‌های GCM با داده‌های مشاهده‌ای متناظر مورد مقایسه قرار گرفت. برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از شاخص‌های آماری Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)، Root Mean Square Error (RMSE) و R^2 استفاده شد (جدول ۲). نتایج نشان داد که در میان مدل‌های مورد بررسی، مدل MRI-ESM2 دارای بهترین تطبیق با داده‌های مشاهداتی بوده که این موضوع نیز در مطالعات Rahimi et al., 2023 در ارزیابی ۹ مدل CMIP6 در حوزه کارون نشان دادند که مدل MRI-ESM2 از نظر شاخص‌های NSE و RMSE عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. همچنین Gohari et al., 2022 در بررسی مدل‌های CMIP6 برای پیش‌بینی بارش ایران، MRI-ESM2 را به عنوان یکی از دقیق‌ترین مدل‌ها معرفی کردند.

مناسی برای شبیه‌سازی رفتار واقعی آبخوان برخوردارند. در غیر این صورت، فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی مدل نیازمند بازنگری، اصلاح پارامترها و تکرار مراحل مذکور خواهد بود. (Anderson et al., 2015). در نهایت، پس از تکمیل واسنجی و به‌منظور افزایش اطمینان، اعتبارسنجی و ارزیابی دقیق عملکرد مدل، همچنین اثبات توانایی آن در انجام پیش‌بینی‌های قابل اعتماد، مرحله صحت‌سنجی به‌صورت خودکار برای دوره زمانی مهر ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۰۴ انجام گرفت.

نتایج و بحث

به‌منظور شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی، ابتدا داده‌های تاریخی مربوط به دو متغیر بارش و دما از شش مدل اقلیمی عمومی (GCM) بر اساس گزارش‌های مجموعه‌ی ششم تغییر اقلیم (CMIP6) از پایگاه ESGF دریافت گردید. در مرحله‌ی بعد،

جدول (۲): نتایج شاخص‌های ارزیابی عملکرد برای مدل‌های GCM

دمای حداکثر			دمای حداقل			بارش			مدل
R^2	RMSE	NSE	R^2	RMSE	NSE	R^2	RMSE	NSE	
۰/۸۹	۱/۰۹	۰/۶۱	۰/۹۱	۱/۱۱	۰/۶۵	۰/۷۵	۳/۶۱	۰/۳۲	MRI-ESM2
۰/۲۷	۵/۶۷	-۰/۳۱	۰/۰۶۴	۵/۴۳	-۰/۲۱	۰/۳۲	۵/۵۵	-۱/۷۸	CanESM5
۰/۰۵۴	۶/۳۹	۰/۳۴	۰/۰۵۹	۶/۱۸	-۰/۱۴	۰/۲۵	۵/۸۴	-۰/۷۴	ACCESS_ESM1-5
۰/۰۱۹	۷/۴۳	-۰/۱۹	۰/۰۷۶	۳/۳۲	-۰/۳۲	۰/۳۸	۵/۷۲	-۰/۰۱	Miroc6
۰/۷۱	۲/۹۸	۰/۴۱	۰/۷۶	۲/۷۶	۰/۴۴	۰/۵۴	۴/۲۳	۰/۲۳	HadGEM3-GC31-LL
۰/۳۸	۶/۲۳	۰/۱۲	۰/۲۱	۵/۵۶	-۰/۱۰	۰/۴۱	۶/۱۲	-۱/۲۳	BCC-CSM2-MR

دمای حداقل و بارش، با استفاده از شاخص‌های آماری در جدول ۳ ارائه شده است. طبق این جدول بررسی‌های صورت گرفته، اعتبارسنجی دقیقی بر کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی ارائه می‌دهد.

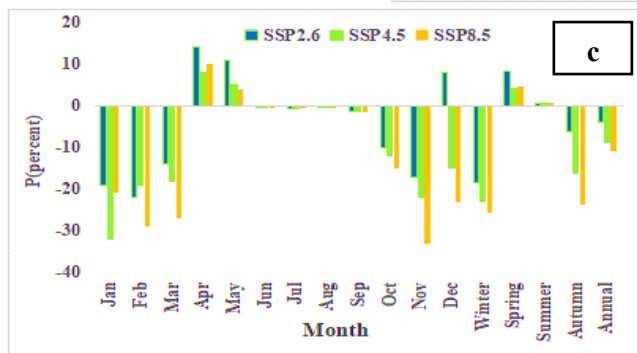
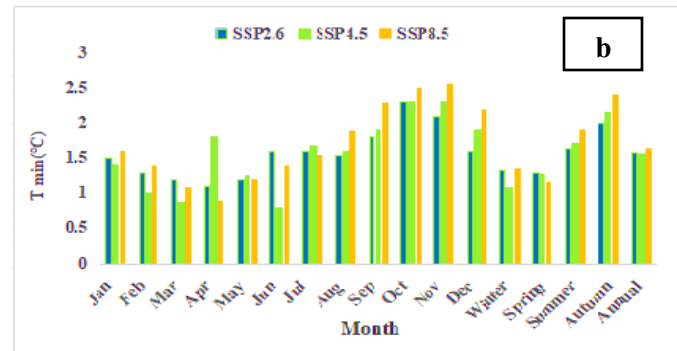
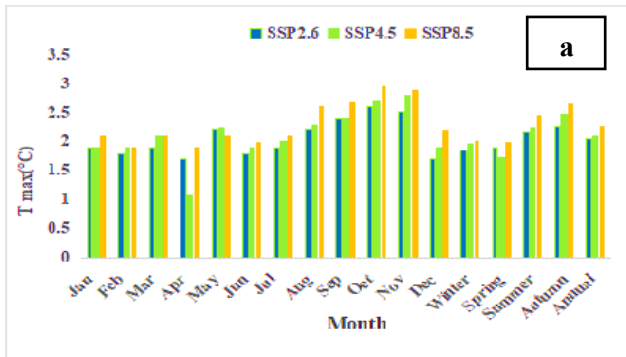
پس از انتخاب بهترین مدل GCM، نتایج به دست آمده از ارزیابی داده‌های تولیدشده توسط مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG و مقایسه آن‌ها با داده‌های مشاهده‌شده دوره پایه ۲۰۰۰-۲۰۲۵ برای پارامترهای اقلیمی دمای حداکثر،

جدول (۳): نتایج شاخص‌های آماری ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی

پارامتر	RMSE	R ²	NSE
دمای حداکثر	۰/۱۶	۰/۹۹	۰/۹۹
دمای حداقل	۰/۱۲	۰/۹۹	۰/۹۹
بارش	۱/۰۵	۰/۹۸	۰/۹۹

که بیش‌ترین افزایش دمای کمینه ۲.۵۷ درجه سانتی‌گراد در ماه نوامبر تحت سناریوی SPP8.5 و کم‌ترین افزایش ۱.۰۷ درجه سانتی‌گراد در ماه ژوئن تحت سناریوی SSP4.5 مشاهده شد. در مجموع، بیش‌ترین افزایش دمای حداقل سالانه ۱.۶۵ درجه سانتی‌گراد در سناریوی SPP8.5 و کم‌ترین مقدار ۱.۵۶ درجه سانتی‌گراد در سناریوی SSP4.5 در ایستگاه اهواز ثبت شد. بر اساس شکل ۴، میزان بارش نیز در دوره آبی در ایستگاه اهواز نسبت به دوره پایه دچار تغییراتی در تمام ماه‌ها شده است. در دوره ۲۰۲۶-۲۰۴۵، بارش در سناریوی SSP2.6 در ماه‌های آوریل، می و دسامبر روند افزایشی دارد، در حالی‌که در سایر ماه‌ها کاهش مشاهده می‌شود. در سناریوهای SSP4.5 و SPP8.5 نیز بارش تنها در ماه آوریل افزایش و در دیگر ماه‌ها کاهش یافته است. بیش‌ترین افزایش و کاهش بارش به ترتیب ۱۴ درصد و ۳۳ درصد در ماه‌های آوریل و نوامبر، تحت سناریوهای SSP2.6 و SPP8.5 رخ داده است. به‌طور تجمعی، بارش سالانه در سناریوهای SSP2.6، SSP4.5 و SPP8.5 به ترتیب ۳.۹، ۸.۶ و ۱۱ درصد کاهش خواهد یافت.

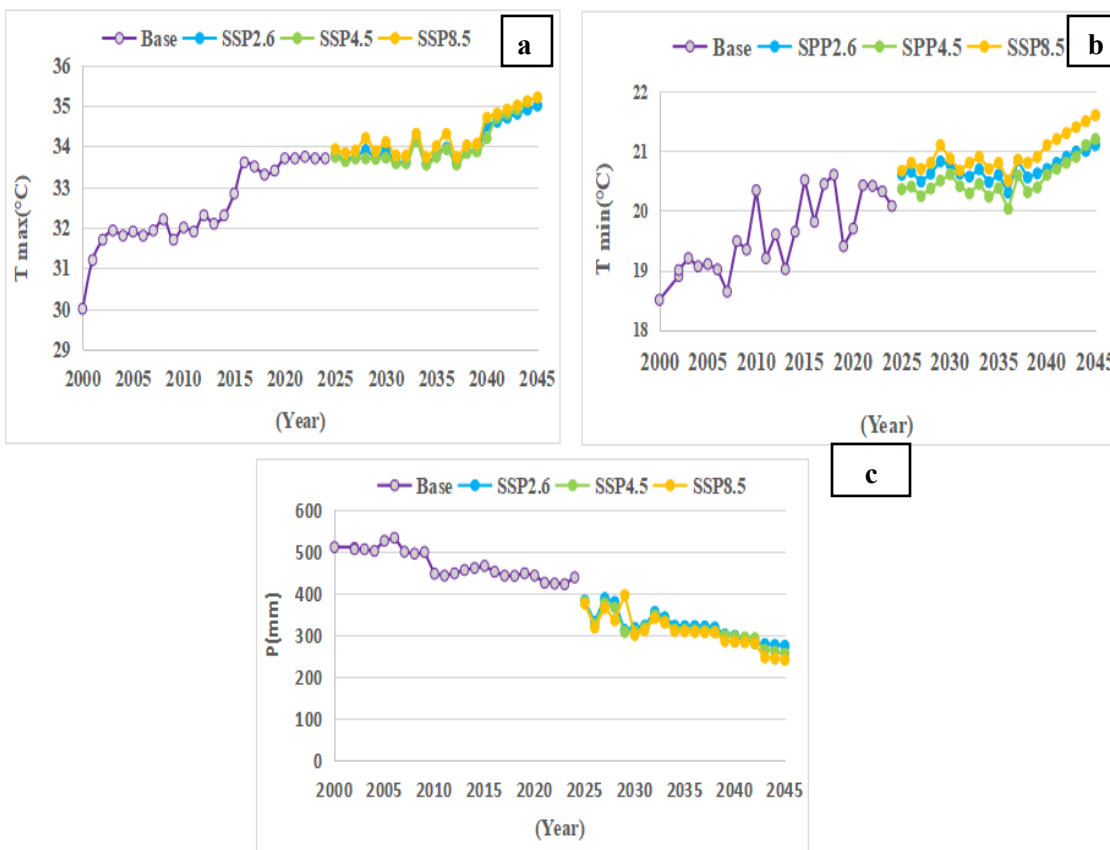
پس از اعتبارسنجی دقیقی بر کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG متغیرهای اقلیمی برای یک دوره ۲۰ ساله (۲۰۲۶-۲۰۴۵) تحت سه سناریوی اقلیمی SSP2.6، SSP4.5 و SPP8.5 در ایستگاه اهواز پیش‌بینی شد. شکل ۴ بیانگر نتایج پیش‌بینی مدل در دوره آبی ۲۰۲۶-۲۰۴۵ نسبت به دوره پایه ۲۰۰۰-۲۰۲۵ است که بر اساس آن، دمای حداکثر در تمامی ماه‌ها و تحت تمام سناریوهای انتشار SSP، در ایستگاه هواشناسی اهواز روند افزایشی را نشان می‌دهد. بیش‌ترین افزایش دمای حداکثر به میزان ۲.۹۵ درجه سانتی‌گراد در ماه اکتبر تحت سناریوی SPP8.5 مشاهده شد؛ در حالی‌که کم‌ترین افزایش دمای حداکثر به میزان ۱.۰۷ درجه سانتی‌گراد در ماه آوریل تحت سناریوی SSP4.5 در ایستگاه اهواز ثبت گردید. همچنین، بیش‌ترین افزایش دمای حداکثر سالانه ۲.۲۹ درجه سانتی‌گراد در سناریوی SSP8.5 و کم‌ترین آن ۲.۰۵ درجه سانتی‌گراد در سناریوی SSP2.6 رخ داد. شکل ۴ نشان‌دهنده تغییرات دمای حداقل در ایستگاه اهواز در دوره آبی ۲۰۲۶-۲۰۴۵ نسبت به دوره پایه ۲۰۰۰-۲۰۲۵ است. نتایج حاکی از آن است که دمای حداقل نیز در تمامی سناریوهای انتشار روند افزایشی دارد، به‌گونه‌ای



شکل (۴): پیش‌بینی تغییرات دمای حداکثر (a)، دمای حداقل (b) و بارش (c) در دوره آینده (۲۰۲۶-۲۰۴۵) تحت سناریوهای SSP

بیش‌ترین میزان افزایش دمای حداقل را در سال‌های آینده نسبت به دوره پایه برآورد می‌کند، در حالی که دو سناریوی SSP4.5 و SSP2.6 افزایش ملایم‌تری را نشان می‌دهند. این روند افزایشی دمای حداقل در شکل ۵ به خوبی قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهد که بارندگی در دوره آتی ۲۰۴۵-۲۰۲۶ نسبت به دوره پایه با روند کاهشی همراه خواهد بود. بررسی سناریوهای مختلف حاکی از آن است که بیش‌ترین میزان کاهش بارندگی در دوره پیش‌بینی تحت سناریوی SSP8.5 رخ می‌دهد، در حالی که کم‌ترین مقدار کاهش بارش مربوط به سناریوی SSP2.6 است. این تفاوت در شدت کاهش بارندگی میان سناریوها، بیانگر تأثیر فزاینده سطوح بالاتر انتشار گازهای گلخانه‌ای بر الگوی بارش منطقه بوده و نتایج آن در شکل ۵ c به وضوح قابل مشاهده است.

نتایج تغییرات میانگین سالانه دمای حداکثر نشان می‌دهد که هر سه سناریوی مورد بررسی، روند افزایشی دمای بیشینه را تا سال ۲۰۴۵ نسبت به دوره پایه (۲۰۲۵-۲۰۲۰) در ایستگاه اهواز را پیش‌بینی می‌کنند. در این میان، سناریوی SSP8.5 بیش‌ترین مقدار افزایش دمای حداکثر را نشان می‌دهد، در حالی که سناریوهای SSP4.5 و SSP2.6 افزایش ملایم‌تری را برآورد کرده‌اند. بر اساس نتایج، مقدار افزایش دمای حداکثر در سناریوی SSP8.5 در سال ۲۰۴۵ نسبت به سایر سال‌های دوره پیش‌بینی، بیش‌تر بوده و این روند در شکل ۵ به وضوح قابل مشاهده است (شکل ۵a). همچنین، بررسی روند تغییرات میانگین سالانه دمای حداقل در دوره آتی ۲۰۴۵-۲۰۲۶ نشان می‌دهد که الگوی تغییرات آن در هر سه سناریوی مورد مطالعه، مشابه روند تغییرات دمای حداکثر بوده و به‌طور کلی افزایشی است. نتایج بیانگر آن است که سناریوی SSP8.5



شکل (۵): تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده دمای حداکثر (a)، دمای حداقل (b) و بارش (c) در دوره آینده (۲۰۲۶-۲۰۴۵) نسبت به دوره پایه (۲۰۰۰-۲۰۲۵) تحت سناریوهای SSP

تمامی داده‌های ورودی وابسته به زمان، شامل اطلاعات تراز ایستابی چاه‌های مشاهده‌ای، میزان تغذیه، مقادیر برداشت از چاه‌های بهره‌برداری، تراز مرز بسته نوع GHB (General Head Boundary) و مقادیر کنداکتانس رودخانه برای دوره‌ای به مدت ۱۲۰ ماه آماده‌سازی و به مدل وارد شد. در مرحله‌ای از فرآیند مدل‌سازی، واسنجی مدل به دو روش دستی (Trial and Error) و خودکار با استفاده از ابزار PEST انجام گرفت. در هر دو روش، مقادیر هدایت هیدرولیکی (Hydraulic Conductivity)، آبدهی ویژه (Specific Yield) و همچنین جریان‌های ورودی و خروجی سیستم آبخوان تعدیل و بهینه‌سازی شدند تا بهترین همخوانی با داده‌های مشاهداتی حاصل شود.

نتایج ارزیابی عملکرد مدل آب زیرزمینی در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی و آنالیز حساسیت

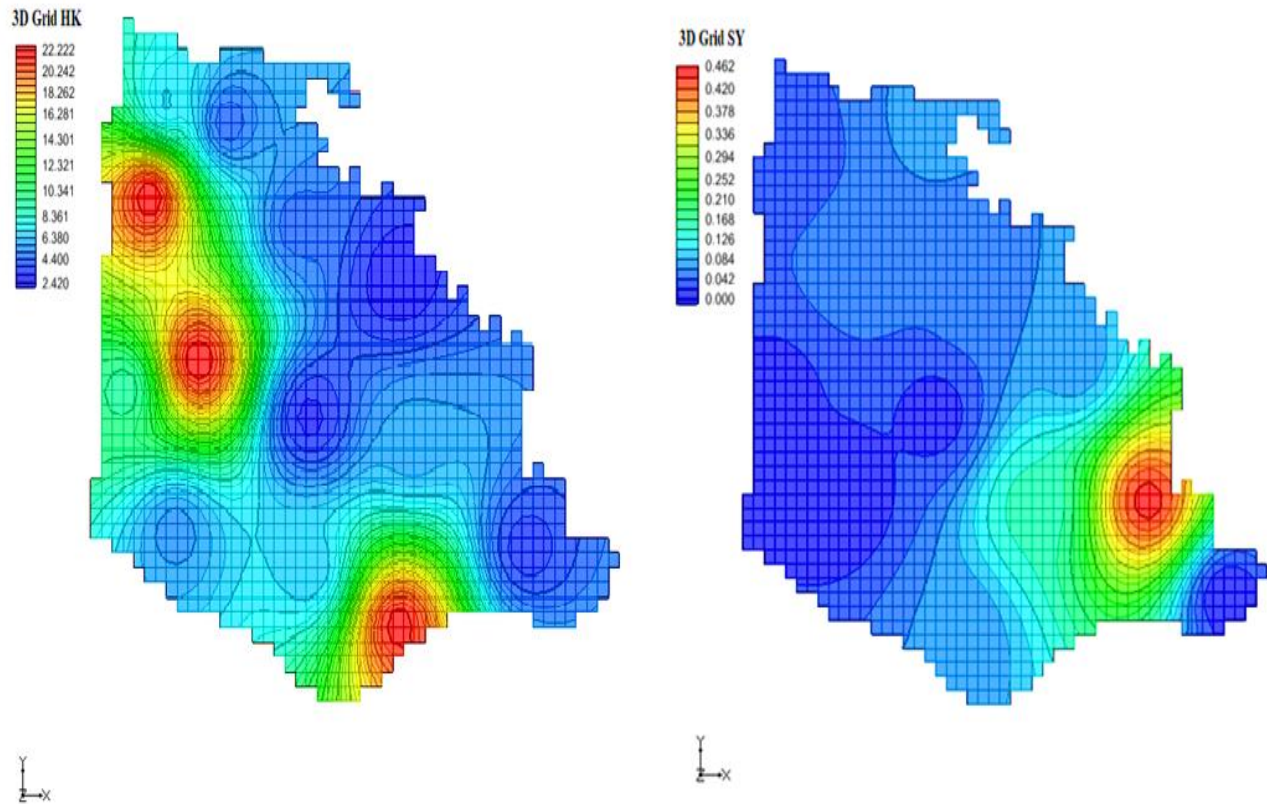
در این پژوهش، به منظور دستیابی به عملکرد بهینه در فرآیند شبیه‌سازی، مدل آبخوان دشت اهواز شمالی مورد واسنجی قرار گرفت. عملیات واسنجی در دو حالت ماندگار و ناماندگار انجام شد. در حالت ماندگار، واسنجی مدل برای مهرماه ۱۳۹۱، که در آن پایداری قابل توجهی در سطح آب زیرزمینی مشاهده می‌شد، صورت گرفت.

پس از انجام واسنجی مدل در حالت پایدار، شبیه‌سازی مدل برای حالت ناماندگار نیز طی یک دوره زمانی ۱۰ ساله (از مهر ۱۳۹۲ تا شهریور ۱۴۰۱) اجرا گردید. در شرایط ناماندگار،



عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رفتار دینامیکی آبخوان اهواز شمالی می‌باشد.

مقادیر نهایی پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه برای زون‌های مختلف مدل در شکل ۶ نمایش داده شده است که نشان‌دهنده انطباق مناسب پارامترهای کالیبره‌شده و



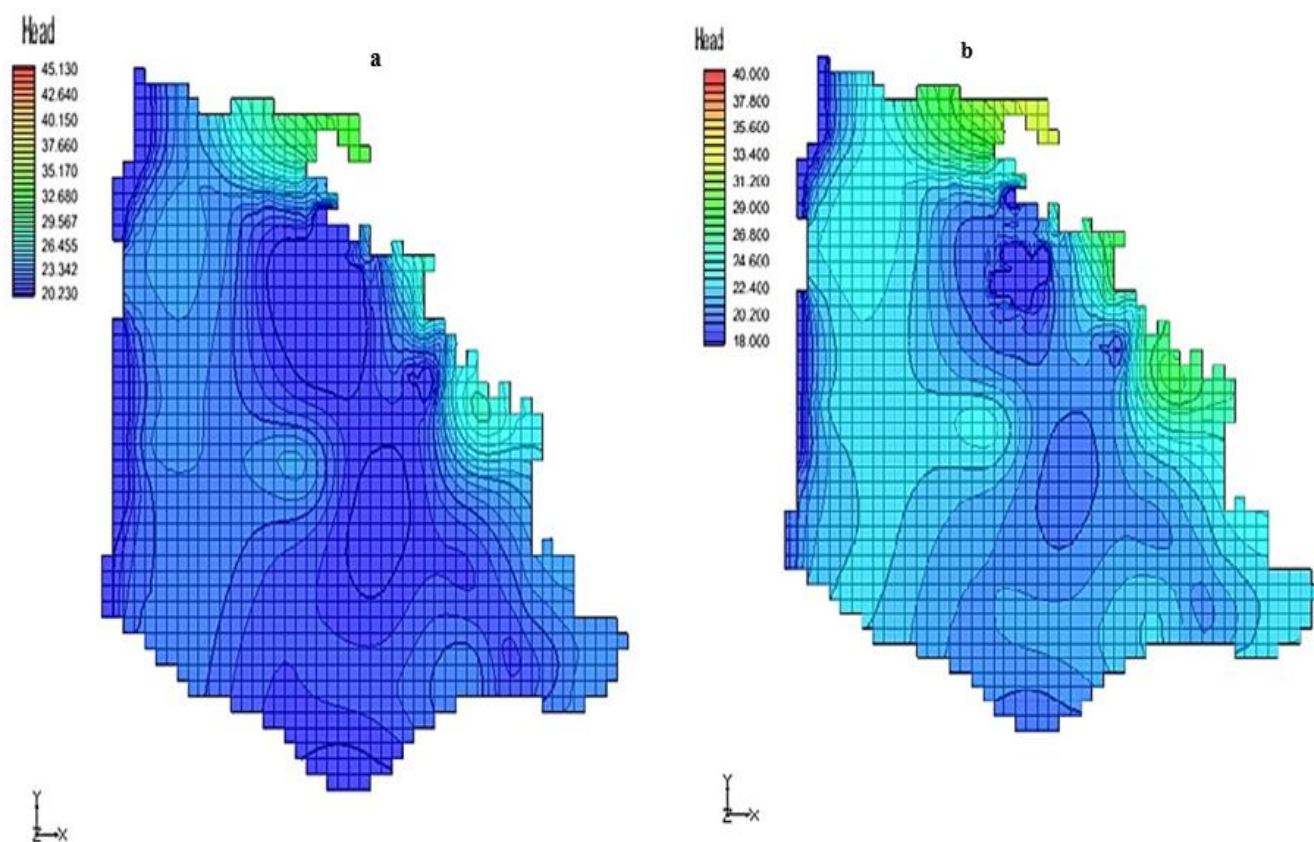
شکل (۶): مقادیر نهایی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه آبخوان دشت مرکزی اهواز شمالی بعد از مرحله واسنجی

سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت اهواز شمالی در گام اول مرحله واسنجی (a) و گام آخر مرحله صحت‌سنجی (b) را نشان می‌دهد. مطابق این شکل بیشترین نوسانات سطح آب در قسمت‌های میانی و شمالی دشت به دلیل وجود تعداد زیاد چاه‌های کشاورزی و همچنین چاه‌های صنعتی رخ میدهد.

در مرحله‌ی صحت‌سنجی، مدل آبخوان دشت اهواز شمالی برای دوره‌ی مهر ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۰۴ اجرا شد تا روند پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی بررسی شود. نتایج حاصل از شاخص‌های آماری MAE، RMSE و ME در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۴ ارائه شده است که نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رفتار آبخوان در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه است. شکل ۷ شبیه‌سازی

جدول (۴): نتایج شاخص‌های خطای آماری (MAE، ME و RMSE) در فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی مدل آب زیرزمینی

گام	RMSE	ME	MAE
واسنجی پایدار	۰/۵۴	-۰/۰۱۴	۰/۵۱
واسنجی ناپایدار	۰/۵۱	-۰/۰۹	۰/۴۷
صحت‌سنجی	۰/۹۱	۰/۱۲	۰/۹۸



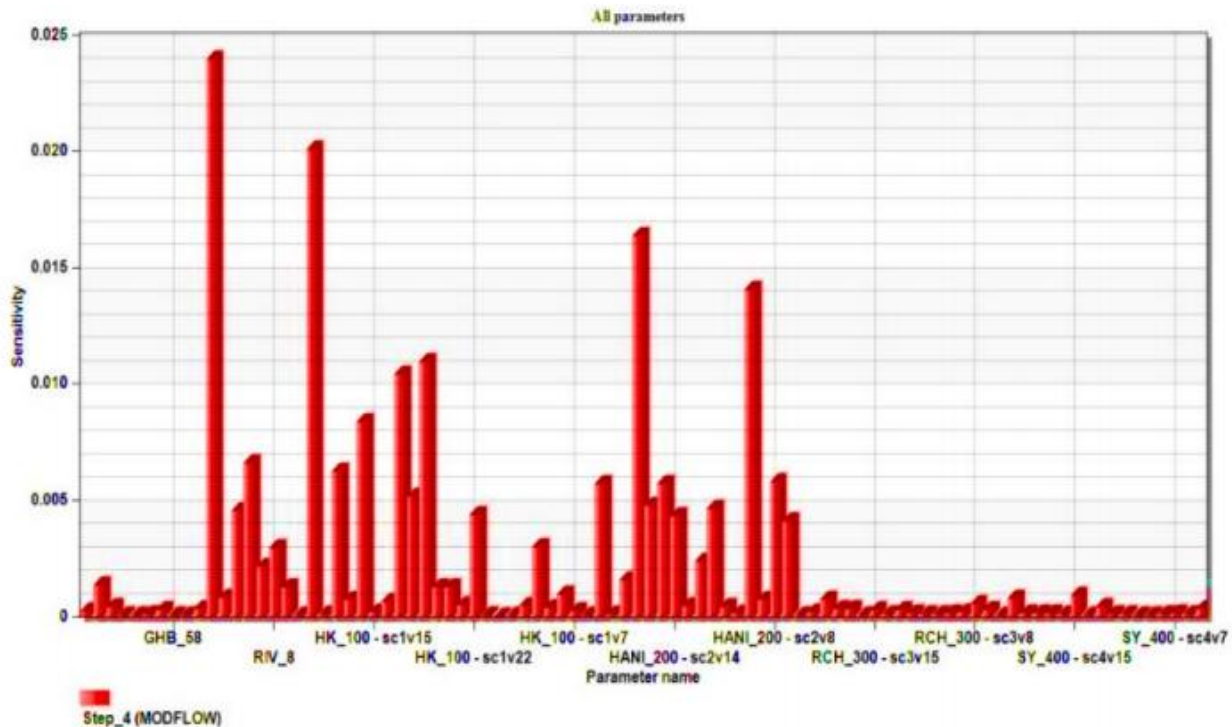
شکل (۷): شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت اهواز شمالی در گام اول مرحله واسنجی (a) و آخرین گام مرحله صحت‌سنجی (b)

مدل بیشترین حساسیت را نسبت به پارامترهای هدایت هیدرولیکی (Hydraulic Conductivity)، ناهمسانی هدایت هیدرولیکی (Hydraulic Conductivity Anisotropy; HANI) و کنداکتانس رودخانه (River Conductance) از خود نشان می‌دهد. این موضوع بیانگر

در مرحله آنالیز حساسیت، حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامترها و داده‌های ورودی مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس، چنانچه تغییرات اندک در مقادیر یک پارامتر منجر به تغییرات قابل توجه در خروجی مدل شود، آن پارامتر به‌عنوان پارامتر حساس شناخته می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل آبخوان دشت اهواز شمالی نشان می‌دهد که



نقش تعیین کننده این پارامترها در رفتار هیدرودینامیکی
آبخوان بوده و نتایج آن در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل (۸): نمودار آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف در مرحله‌ی واسنجی ناپایدار

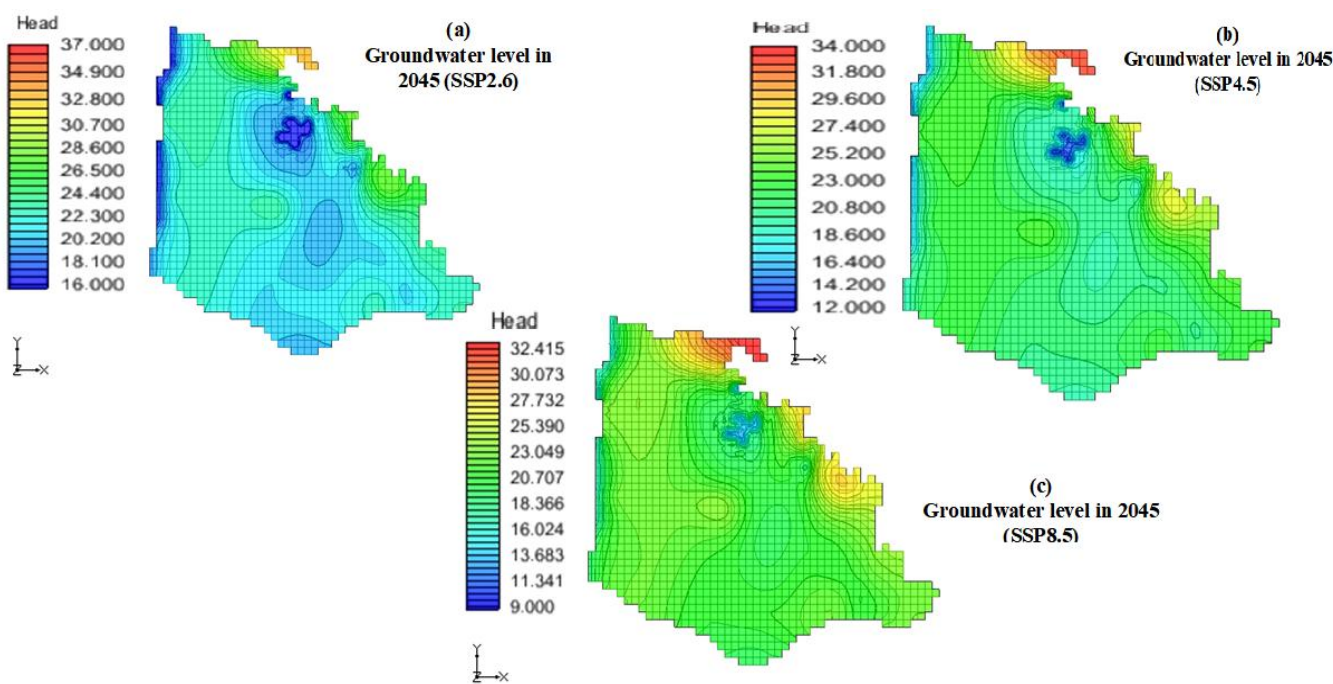
سطح آب زیرزمینی و الگوی برداشت از چاه‌های بهره‌برداري اعمال شد و پس از به‌روزرسانی این مؤلفه‌ها، مدل مفهومی مجدداً برای دوره آتی اجرا گردید. پس از شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی تحت سناریوهای SSP2.6، SSP4.5 و SSP5.8، اثرات این تغییرات به‌صورت یکپارچه در مدل جریان آب زیرزمینی دشت اهواز شمالی پیاده‌سازی شد. در ادامه، نقشه‌های تراز آب زیرزمینی برای بازه زمانی ۲۰۲۶ تا ۲۰۴۵ تحت هر سه سناریوی اقلیمی تهیه گردید (شکل ۹) و با وضعیت تراز آب زیرزمینی در دوره پایه (۲۰۰۰-۲۰۲۵) مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۷). نتایج این مقایسه نشان داد که در تمامی سناریوهای اقلیمی مورد بررسی، تراز آب زیرزمینی آبخوان دشت اهواز شمالی نسبت به آخرین گام زمانی دوره پایه (سال ۲۰۲۴) روند کاهشی معناداری را تجربه می‌کند. بر اساس نتایج حاصل، میزان افت

تأثیر تغییر اقلیم بر وضعیت آبخوان در دوره آتی تحت سناریوهای اقلیمی

در گام بعد و پس از تکمیل مرحله صحت‌سنجی مدل، پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان دشت اهواز شمالی تحت تأثیر تغییر اقلیم برای دوره آینده ۲۰۲۶ تا ۲۰۴۵ با استفاده از مدل آب زیرزمینی انجام گرفت. بدین منظور، خروجی‌های مربوط به تغییرات دما و بارندگی حاصل از سناریوهای اقلیمی SSP2.6، SSP4.5 و SSP5.8 به‌عنوان ورودی‌های اقلیمی به مدل آب زیرزمینی اعمال شدند تا پاسخ آبخوان به شرایط اقلیمی جدید مورد ارزیابی قرار گیرد. به‌منظور بازنمایی دقیق اثرات تغییر اقلیم بر سامانه آب زیرزمینی، تغییرات ناشی از دما و بارندگی بر پارامترهای مؤثر مدل، از جمله تغذیه طبیعی آبخوان، تبخیر از

بالاتر نسبت به کاهش بارندگی و افزایش دما، بیشترین تأثیر را از تغییرات اقلیمی متحمل می‌شوند. تداوم این روند می‌تواند منجر به تشدید تنش‌های هیدرودینامیکی آبخوان، کاهش ذخایر استاتیک و افزایش مخاطراتی نظیر فرونشست زمین و افت پایداری بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در منطقه گردد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که حتی در خوش‌بینانه‌ترین سناریوی اقلیمی (SSP2.6) نیز آبخوان دشت اهواز شمالی با افت قابل توجه تراز آب زیرزمینی در دوره آینده مواجه خواهد بود و در سناریوهای میانی و بدبینانه، شدت این افت به‌مراتب افزایش می‌یابد. این یافته‌ها ضرورت بازنگری در راهبردهای مدیریت منابع آب زیرزمینی، کنترل برداشت‌ها و اتخاذ رویکردهای سازگاری با تغییر اقلیم را به‌منظور کاهش پیامدهای منفی بر پایداری آبخوان منطقه برجسته می‌سازد.

تراز آب زیرزمینی تحت سناریوی SSP2.6 به‌طور متوسط حدود ۳ متر تا سال ۲۰۴۵ برآورد شد، در حالی که تحت سناریوی SSP4.5 این مقدار به حدود ۶ متر افزایش می‌یابد (شکل‌های a9 و b9). بیشترین میزان افت تراز آب زیرزمینی مربوط به سناریوی SSP5.8 است، به‌طوری که در این سناریو کاهش متوسطی در حدود ۷/۵ متر برای تراز آب زیرزمینی در پایان دوره آتی پیش‌بینی گردید (شکل c9). این نتایج بیانگر حساسیت بالای آبخوان دشت اهواز شمالی نسبت به تشدید شرایط اقلیمی گرم‌تر و خشک‌تر در سناریوهای انتشار بالاتر است. تحلیل الگوی مکانی افت تراز آب زیرزمینی نشان می‌دهد که کاهش سطح آب در بخش‌های مرکزی و شمالی آبخوان شدت بیشتری دارد. این نواحی به دلیل تمرکز بالاتر برداشت‌های آب زیرزمینی، وابستگی بیشتر به تغذیه طبیعی و آسیب‌پذیری



شکل ۹- تغییرات سطح آب زیرزمینی در دوره آتی تحت سناریوهای SSP

اقلیمی را ارائه می‌دهد. شواهد حاصل از مدل‌سازی نشان‌دهنده‌ی یک روند روشن در افزایش دمای متوسط و کاهش بارش‌ها در بازه زمانی آینده (۲۰۲۶ تا ۲۰۴۵) است. بر اساس سناریوهای SSP2.6, SSP4.5 و SSP8.5 میانگین

نتیجه‌گیری

بررسی‌های صورت گرفته، اعتبارسنجی دقیقی بر کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG در شبیه‌سازی متغیرهای



به دلیل تمرکز بالاتر برداشت از چاه‌های بهره‌برداری، وابستگی بیشتر به تغذیه طبیعی و آسیب‌پذیری بالاتر نسبت به کاهش بارندگی و افزایش دما، بیشترین تأثیر را از تغییرات اقلیمی متحمل می‌شوند.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تداوم شرایط اقلیمی پیش‌بینی‌شده، حتی در سناریوی خوش‌بینانه، می‌تواند منجر به افت قابل توجه تراز آب زیرزمینی در دشت اهواز شمالی شود. تشدید این افت در سناریوهای میانی و بدبینانه، ضرورت اتخاذ راهبردهای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، کنترل برداشت‌های بی‌رویه و برنامه‌ریزی سازگار با تغییر اقلیم را به‌عنوان یک اولویت مدیریتی در منطقه برجسته می‌سازد.

بارش سالانه نسبت به دوره پایه به ترتیب با ۳.۹، ۸.۶ و ۱۱ درصد کاهش مواجه خواهد شد. با اعمال این تغییرات اقلیمی در مدل آب زیرزمینی خروجی‌های مدل GMS نسخه ۱۰.۸ برای آبخوان دشت اهواز، همواره حاکی از کاهش مستمر تراز آب تحت تمامی سناریوهای تغییر اقلیم (SSP2.6, SSP4.5 و SSP8.5) می‌باشد. یافته‌ها نشان می‌دهد که تحت سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 آبخوان با بیشترین افت تراز به میزان ۷.۵ متر مواجه شده و در وضعیت بحرانی قرار خواهد گرفت. همچنین میزان افت برای سناریوهای SSP2.6 و SSP4.5 به ترتیب ۳ و ۶ متر برآورد شده است. تحلیل فضایی نتایج حاکی از آن است که افت تراز آب زیرزمینی در تمامی سناریوها به‌صورت یکنواخت توزیع نشده و بخش‌های مرکزی و شمالی آبخوان بیشترین میزان کاهش را تجربه می‌کنند. این نواحی

قدردانی: نویسندگان این مقاله از سازمان آب و برق خوزستان جهت همکاری در ارائه داده‌های مورد نیاز این تحقیق تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

- افشاری‌نیا، م.، ف. پناهی و م. احترام. ۱۴۰۲. ارزیابی تغییرات اقلیمی با استفاده از برون‌داد مدل‌های CMIP6 (مطالعه‌ی موردی: دشت کاشان). فصلنامه‌ی علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۱۴، شماره ۲، ص ۲۵۶-۲۳۷.
- اقبالی، ی. و م. شهربان‌نواده. ۱۴۰۴. مدیریت تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از روش تفاضل محدود (مطالعه‌ی موردی: دشت دهلران، منطقه فرخ‌آباد). نشریه‌ی علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۱۶، شماره ۶۱، ص ۵۶-۴۱.
- باقری، م. و ا. فیجانی. ۱۴۰۴. شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در دشت دامغان با استفاده از مدل‌سازی عددی. نشریه‌ی علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۱۵، شماره ۵۹، ص ۲۹۶-۲۷۶.
- بایسته، م. و ح. زارعی. ۱۴۰۴. بررسی اثر همزمان تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر آینده‌ی جریان رودخانه‌ی کر و سیوند با استفاده از مدل SWAT. نشریه‌ی علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۱۶، شماره ۶۱، ص ۹۲-۷۲.
- جعفری، ا.، ا. شرافتی، ا. نشاط، س. ر. حسینی و ع. ۱۴۰۴. چالش‌های حکمرانی منابع آب تحت تأثیر تغییر اقلیم و انتقال آب. نشریه‌ی اکوهیدرولوژی، دوره ۱۲، شماره ۲، ص ۷۹۴-۷۸۳.



رضائی، ح، ح. پاشاپور و ف. صادقی. ۱۴۰۳. ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 و پیش‌نگری تغییرات دما و بارش تحت سناریوهای خط‌سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) در ایران. فصلنامه‌ی آینده‌پژوهی راهبردی، دوره ۳، شماره ۱۰، ص ۲۸-۷.

حسینی‌وردجانی، س.، م. خوش‌روش، م. فتاحی نافچی، ر. نوروزولاشدی، ر. پورمحمد و ی. ۱۴۰۴. اثر تغییر اقلیم بر دما و بارش در دو اقلیم متفاوت با استفاده از مدل‌های CMIP6 و سناریوهای حدی SSP. فصلنامه‌ی علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۱۵، شماره ۵۹، ص ۲۲۸-۲۱۷.

Akhtar, M., N. Ahmad and M.J. Booij. 2008. The impact of climate change on the water resources of the Hindukush-Karakorum region under different glacier coverage scenarios. *J. Hydrol.*, 355, 148-163. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.015>

Anderson, M.P., W.W. Woessner and R.J. Hunt. 2015. *Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21563-7>

Bates, B., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J. Palutikof. 2008. *Climate change and water: Technical paper VI of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.

Boughariou, E., N. Allouche, I. Jmal, N. Mokadem, B. Ayed, S. Hajji, H. Khanfir and S. Bouri. 2018. Modeling aquifer behavior under climate change and high consumption: Case study of the Sfax region, southeast Tunisia. *J. Afr. Earth Sci.*, 141, 118-129. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.02.006>

IPCC. 2001. *The scientific basis of climate change: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC*. Cambridge Univ. Press.

IPCC. 2021. *Climate change 2021: The physical science basis. AR6, Summary for policymakers*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Chitsazan, M., G. Rahmani and A. Neyamadpour. 2015. Forecasting groundwater level by artificial neural networks as an alternative approach to groundwater modeling. *J. Geol. Soc. India*. <https://doi.org/10.1007/s12594-015-0197-4>

Dehn, M., G. Bürger, J. Buma and P. Gasparetto. 2000. Impact of climate change on slope stability using expanded downscaling. *Eng. Geol.*, 55(3), 193-204. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00123-4)

El Assaoui, N., A. Sadok and I. Merimi. 2021. Impacts of climate change on Morocco's groundwater resources: State of art and development prospects. *Mater. Today, Proc.*, 45, 7690-7696.

Ferguson, G. and T. Gleeson. 2012. Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nat. Clim. Change*, 2, 342-345. <https://doi.org/10.1038/nclimate1413>

Ghazavi, R. and H. Ebrahimi. 2018. Predicting the impacts of climate change on groundwater recharge in an arid environment using modeling approach. *Int. J. Clim. Change Strateg. Manage.* <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-04-2017-0085>



Gohari, A., G. Rakhshandehroo and J. Abedi-Koupai. 2022. Assessment of CMIP6 GCMs for rainfall and temperature projections across Iran. *Theor. Appl. Climatol.*, 149, 1201–1216.

Graham, P., S. Hagemann, S. Juan and M. Beniston. 2007. On interpreting hydrological change from regional climate models. *Clim. Change*, 81, 97–122. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9217-0>

Harbaugh, A.W. 2005. MODFLOW-2005: The U.S. Geological Survey modular groundwater model – The groundwater flow process. USGS TM 6-A16. <https://doi.org/10.3133/tm6A16>

Huang, P.C. and K.T. Lee. 2025. Developing an alternative data-driven model to resemble geomorphologic rainfall–runoff models. *Geomatics Nat. Hazards Risk*, 16(1), 2516725. <https://doi.org/10.1080/19475705.2025.2516725>

Malekinezhad, H. and F.B. Bandkooki. 2018. Modeling impacts of climate change and human activities on groundwater resources using MODFLOW. *J. Water Clim. Change*, 9(1), 156–177. <https://doi.org/10.2166/wcc.2017.147>

Meddi, M. and A. Boucefiane. 2013. Climate change impact on groundwater in Cheliff–Zahrez Basin (Algeria). *APCBEE Proc.*, 5, 446–450. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2013.05.077>

Mirzaee, S.Y., R. Amiri, M. Chitsazan and N. Nadri. 2020. The combination of mathematical and stochastic models to improve groundwater models. *Irrig. Sci. Eng.*, 43(3), 57–70. <https://doi.org/10.22055/jise.2018.22820.1629>.

Mirzaee, S.Y., S. Mojadam and M. Chitsazan. 2024. Modeling the effects of climate change on groundwater resources of the Golgir Plain using GMS. *J. Adv. Appl. Geol.*, 14(3), 694–712. <https://doi.org/10.22055/aag.2024.45373.2419>

Nikkhoo Amiri, S., M. Khoshravesh and R. Norooz Valashedi. 2023. Assessing the effect of climate and land-use changes on hydrologic regimes in the upstream of Tajan River Basin using SWAT. *Appl. Water Sci.*, 13(6), 1–13.

Rahimi, J., M. Sadegh and A. Aghakouchak. 2023. Evaluation of CMIP6 climate models for precipitation and temperature simulation over Iran. *Clim. Dyn.*, 60(2), 1453–1471.

Scibek, J. and D. Allen. 2006. Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels. *Water Resour. Res.*, 42(11), 205–263. <https://doi.org/10.1029/2005WR004742>

Seififi, A., M. Ehteram, F. Soroush and A.T. Haghighi. 2022. Multi-model ensemble prediction of pan evaporation based on the Copula Bayesian model averaging approach. *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 114, 105124. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105124>

Semenov, M.A. and P. Stratonovitch. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Clim. Res.*, 4, 1–14. <https://www.jstor.org/stable/24895285>



Soltani, F., S. Javadi, A. Roozbahani, A.R. Massah Bavani and S. Lotfifi. 2022. Simulation of surface water-groundwater interaction using MODFLOW-OWHM (case study: Shazand plain). *Iran. J. Ecohydrol.*, 9, 199–210. <https://doi.org/10.22059/IJE.2022.336586.1595>

Tanachaichoksirikun, P., U. Seeboonruang and P. Saraphirom. 2018. Impact of climate change on groundwater sustainability in the lower Chao Phraya Basin, Thailand. *MATEC Web Conf.* <https://doi.org/10.1088/1757-899X/639/1/012032>

TurkQashqainejad, S., M. Chitsazan and S.Y. Mirzaee. 2015. Estimation of hydrodynamic parameters of aquifer using geoelectrical studies: Case study of Golgir aquifer, Khuzestan. *J. Hydrogeol.*, 1(2), 24–37.

Vaccaro, J.J. 1992. Sensitivity of groundwater recharge estimates to climate variability and change: Columbia Plateau, Washington. *J. Geophys. Res.*, 97(D3), 2821–2833.

Ouyang, Y., Y. Wan, W. Jin, T.D. Leininger, G. Feng and Y. Han. 2021. Impact of climate change on groundwater resources in a region with fast depletion rate: The Mississippi. *J. Water Clim. Change*, 12(6), 2245–2255. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.09.0355>