

Research Article

Modeling the effects of climate change on the groundwater resources of Golgir Plain using the GMS model

Seyed Yahya Mirzaee Arjenaki^{1*}, Soheila Mojadam¹, Manuchehre Chitsazan¹

1- Department of Geology, Shahid Chamran University of Ahvaz

Keywords: *Groundwater Simulation, Golgir Plain, Hadgem2-ES Model, LARS-WG Model*

1-Introduction

Improper distribution of surface water resources in Iran has increased the extraction of groundwater resources. In addition to population growth, industrial development, and agricultural decline, groundwater resources have become a global concern (Ouyang et al. 2021; Farrokhi et al. 2021; Ghanbari-Adivi et al. 2022). The evidence shows that we are in a period of climate change that has caused an increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere. Continuing this phenomenon may significantly change global and local climate characteristics, including temperature and precipitation (Kumar 2012). Observed data and climate projections provide abundant evidence that freshwater sources, both surface and groundwater resources, are vulnerable and have the potential to be severely affected by climate change with wide-ranging consequences for society and the ecosystem (Bates et al. 2008). These predictions show that water resources will be affected by climate change, and due to the increase in the lack of surface water affected by climate change, underground water will probably become more critical, especially in arid and semi-arid environments. Therefore, predicting the changes in the underground water level due to the impact of climate change can become an essential issue for the sustainable management of water resources (Ghazavi and Ebrahimi, 2018) The investigation of groundwater resources in Iran shows that the increase in demand and climate change has affected the groundwater level, especially in Khuzestan province's aquifers. Based on this, it is necessary to quantitatively examine the effects of climate change and predict the future conditions it affects by integrating climate forecasting models and water resources management models. In this study, the Golgir Plain aquifer was selected with the aim of quantitative modeling of changes in underground water resources affected by climate change in the base period (2003-2021) and the mentioned period, the effects of climate change in different scenarios on the underground water resources of this aquifer were investigated using the GMS model (Fig 1).

2-Material and methods

In this study, using the output data of the HadGEM2-ES general circulation model under three climate change scenarios RCP4.5, RCP2.6, and RCP8.5, the LARS_WG statistical model was scaled at the synoptic station of Masjid Sulaiman and the resulting results It was evaluated in the base period of 2003-2021 and the future period of 2022-2040 for temperature and rainfall parameters. After climate simulation, the MODFLOW model was used in GMS10.6 software to simulate the groundwater flow in the Golgir Plain aquifer, and the prediction of the future conditions of the aquifer was evaluated considering the current development conditions of the region under three climate scenarios (Fig 2).

3- Results and discussions

General circulation models (AOGCM) are the most reliable models and one of the best available tools for evaluating the effects of climate change (Graham et al. 2007). In this research, we study climate change from the general circulation model of the fifth report known as HadGEM2-ES, which has a spatial

* Corresponding author: Yahyamirzaee@scu.ac.ir

DOI: 10.22055/aag.2024.45373.2419

Received: 2023-11-25

Accepted: 2024-03-04

resolution of 1.85×88.RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 release scenarios have been used. Since the output of general circulation models for checking climate parameters at the scale of a region or local station has low resolution, it is necessary to scale the output of general circulation models. The LARS-WG statistical model is one of the most reliable tools for investigating the exponential downscaled simulation climate variables that can predict climate parameters at the local scale (Semenov and Stratonovitch, 2010). The results obtained from the evaluation of the data produced using the LARS-WG exponential downscaled model and

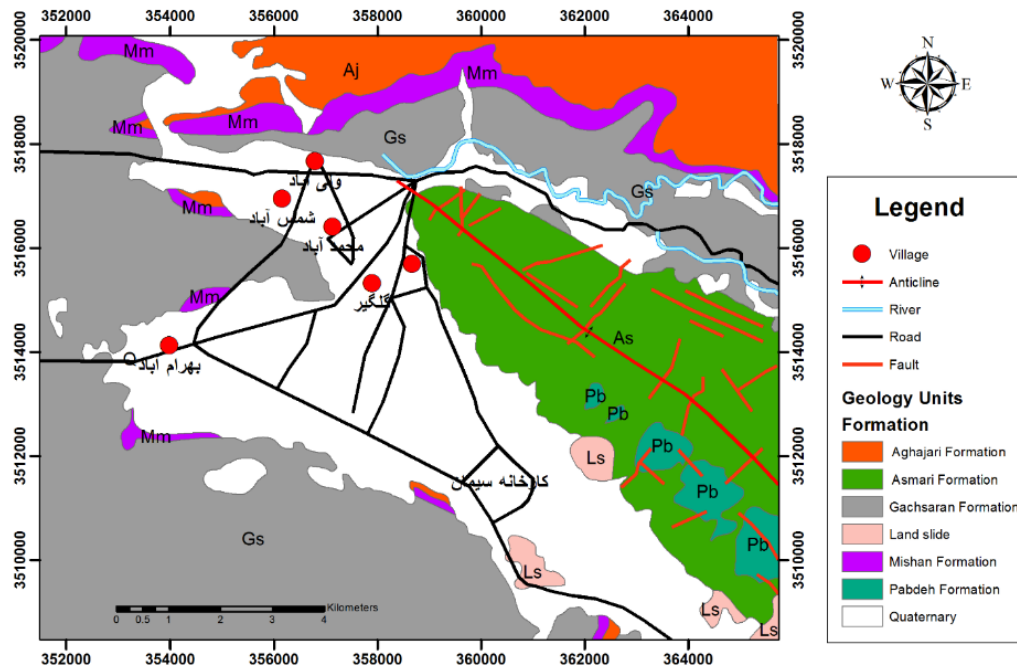


Fig. 1. Location of Golgir Plain in Iran.

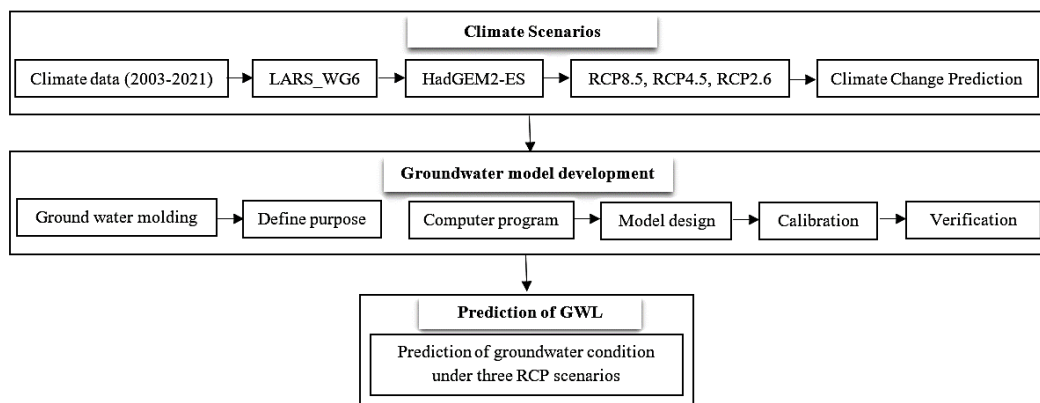


Fig. 2. Methodology framework of the research.

the observed data of the base period (2003-2021) for the climatic parameters of maximum temperature, minimum temperature, and precipitation using statistical indicators indicate It was that R2 values for all

parameters are significant and high, as well as RMSE values are low. MAE is close to zero for all parameters. As a result, it can be said that the performance capability of the LARS-WG model in simulating climate parameters is proven. The model forecast results in the future period indicate an increase in the maximum and minimum temperature for all months and scenarios in the studied area compared to the base period. Suppose the monthly average rainfall in the future period was associated with fluctuation. In the modeling of the Golgir Plain aquifer, to create a uniform network, the dimensions of the networks (cells) were used according to the size of the area and the amount of statistics and information available in cells with dimensions of 500 x 500 meters. The hydraulic conductivity layer of Golgir Plain was obtained by dividing the interpolation layer of the specific transferability obtained from the pumping test on the saturation thickness layer in GIS software. Also, the initial values of the specific drainage were obtained from the well logs and geophysical studies. Model calibration was done in two steady-state and unsteady-state modes. The model calibration for the steady state was done in October 2017, which had good stability in the underground water level. Furthermore, for the unsteady state, it was recalibrated for ten years. The amount of RMSE and MAE error in the steady state is in the acceptable range in the next step for the unsteady state in different time steps after model recalibration; in all months, it is in the acceptable range, which indicates the proper performance of the modeling (Fig 3).

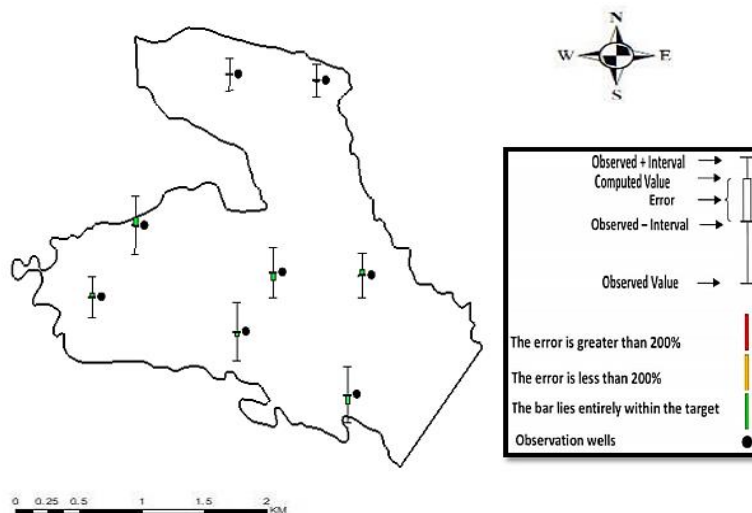


Fig 3. Simulation of Golgir Plain Aquifer's groundwater level in the unsteady state's last step.

In order to validate the Golgir Plain model, the groundwater level was predicted for three years. The RMSE and MAE values obtained indicate the accuracy of the simulation model acceptance. After simulating rainfall and temperature parameters under RCP8.5, RCP4.5, and RCP2.6 scenarios, the effects of these parameters were applied to the groundwater simulation model of Galgir Plain. The groundwater level map was prepared in the last step under all three climate scenarios in the coming period from 2022 to 2040. Under the three scenarios RCP8.5, RCP4.5, and RCP2.6, the groundwater level of Galgir Plain will decrease from 2022 to 2040 in the entire aquifer area.

4-Conclusion

The run of the LARS-WG model for the daily data of minimum temperature, maximum temperature, and precipitation at the synoptic station of Masjid Sulaiman indicates the high capability of the meteorological model to generate daily data of the mentioned parameters. The maximum annual average increase of maximum temperature and minimum temperature is 2.49 and 1.87 under the RCP8.5 scenario, and the minimum annual increase of maximum and minimum temperature is 2.16 degrees Celsius and 1.35 degrees, respectively, under the RCP8.5 scenario. RCP4.5 was observed. Suppose the annual average precipitation in the future will decrease compared to the base period under the RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios,

respectively, 5.2, 9.6, and 12.6 percent. After climate simulation, the MODFLOW model was used in GMS10.6 software to simulate the groundwater flow in the Golgir Plain aquifer. The results of rainfall and temperature changes under three RCP scenarios were applied to the groundwater model. The results indicated that the underground water level of the Golgir Plain aquifer would decrease in the future period under the climate change phenomenon so that in the RCP8.5 scenario, the Golgir Plain aquifer will have a more critical situation than the RCP2.6 and RCP4.5 scenarios. The results show the necessity of preventing excessive exploitation of the underground water level of Golgir Plain to prevent water shortage in the future.

5-References

- Farrokhi, A., Farzin, S., Mousavi, S. F., 2021. Meteorological drought analysis in response to climate change conditions, based on combined four-dimensional vine copulas and data mining (VC-DM). *Journal of Hydrology* 603, 127-135. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127135>
- Ghanbari - Adivi, E., Ehteram, M., Farrokhi, A., Sheikh Khozani, Z., 2022. Combining radial basis function neural network models and inclusive multiple models for predicting suspended sediment loads. *Water Resources Management* 36, 1–30. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03256-4>.
- Graham, P., Hagemann, S., Juan, S., Beniston, M., 2007. On interpreting hydrological change from regional climate models. *Journal of Climate Change* 81, 97-122. <http://doi.org/10.1007/s10584-006-9217-0>.
- Kumar, C., 2012. Climate change and its impact on groundwater resources. *International Journal of Engineering and Science* 1(5), 43-60. <https://doi.org/10.1007/S10040-004-0411-8>
- Semenov, M.A., Stratonovitch, P., 2010. Use of Multi- model Ensembles from Global Climate Model for Assessment of Climate Change Impacts *Climate Research* 4, 1-14. <https://www.jstor.org/stable/24895285>.
- Ouyang, Y., Wan, Y., Jin, W., Leininger, T.D., Feng, G., Han, Y., 2021. Impact of climate change on groundwater resource in a region with a fast depletion rate: the Mississippi. *Journal of water and Climate Change* 12(6), 2245-2255. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.09.0355>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Mirzaee Arjenaki, Y., Mojadam, S., Chitsazan, M., 2024. Modeling the effects of climate change on the groundwater resources of Golgir Plain using the GMS model, *Adv. Appl. Geol.* 14(3), 694-712.

DOI: 10.22055/aag.2024.45373.2419

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_19148.html

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

مدل سازی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی دشت گلگیر خوزستان، جنوب غرب ایران، با استفاده از مدل GMS

سید یحیی میرزایی ارجنکی*

دانشکده علوم زمین، گروه زمین شناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

سهیلا مجدم

دانشکده علوم زمین، گروه زمین شناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

منوچهر چیت سازان

دانشکده علوم زمین، گروه زمین شناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

* Yahyamirzaee@scu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۴

چکیده

تغییرات اقلیمی، همراه با تغییر نرخ تغذیه، افزایش تقاضای و کاهش دسترسی به آب می تواند باعث کاهش ذخایر آب قابل مصرف گردد. در اقلیم های خشک و نیمه خشک، پیش بینی تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر نوسانات سطح آب زیرزمینی می تواند منجر به ایجاد راه کارهای مناسب برای مدیریت پایدار منابع آب شود. برای بررسی تأثیر تغییرات اقلیم بر منابع آب زیرزمینی، دشت گلگیر در استان خوزستان انتخاب گردید. در این مطالعه، ابتدا، داده های خروجی مدل گردش عمومی HadGEM2-ES در سه سناریوی تغییر اقلیم RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 بر روی داده های ایستگاه سینوپتیک مسجد سلیمان به وسیله مدل LARS-WG6.0 ریزمقیاس نمایی شد و نتایج بدست آمده در دوره پایه ۲۰۲۱-۲۰۰۳ و دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۲۲ برای پارامترهای دما و بارندگی ارزیابی شد. نتایج مدل در دوره آتی، بیانگر افزایش دمای حداکثر و حداقل برای تمام ماه ها، نسبت به دوره پایه است. بیشترین و کمترین افزایش میانگین سالانه دمای حداکثر و حداقل، به ترتیب، در سناریوی RCP8.5 و RCP4.5 برآورد شد. بررسی داده های میانگین سالانه بارش، در دوره آتی، نسبت به دوره پایه، در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، به ترتیب ۵/۲، ۹/۶ و ۱۲/۶ درصد کاهش نشان داد. برای بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی دشت گلگیر، مدل MODFLOW در نرم افزار GMS10.6 در یک دوره ده ساله و اسنجی و صحت سنجی شد. بکارگیری نرخ بارندگی و دمای بدست آمده از سناریوی های RCP بر روی مدل آب زیرزمینی نشان داد که تراز آب زیرزمینی آبخوان گلگیر، در دوره آتی متأثر از پدیده تغییر اقلیم کاهش می یابد. از این رو، در سناریوی RCP8.5، آبخوان گلگیر با افت ۶/۷ متری، وضعیت بحرانی تری نسبت به سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 خواهد داشت. نتایج این پژوهش، بایستگی مدیریت منابع آب زیرزمینی دشت گلگیر برای جلوگیری از چالش تأمین آب در آینده را نشان می دهد.

واژه های کلیدی: شبیه سازی آب زیرزمینی، دشت گلگیر، مدل HadGEM2-ES، مدل LARS-WG6.0

۱-مقدمه

آب زیرزمینی نمود آشکارتری نسبت به سایر اقلیم ها داشته و این عامل باعث افت شدید تراز آب های زیرزمینی و کاهش کیفیت آب زیرزمینی در این مناطق می گردد (Malekinezhad and Bandkooki, 2018; Mirzaee et al., 2020). امروزه، بسیاری از نقاط جهان، از جمله آسیای مرکزی، شمال آمریکا، استرالیا، شمال چین و شمال آفریقا با چالش کاهش منابع آب زیرزمینی روبرو هستند (Konikow and Kendy, 2005; Garduno and Foster, 2010; Feng et al., 2013; Doll et al., 2014; Dalin et al., 2017;

کاهش دسترسی به منابع آب سطحی هم چنین ویژگی های خاص منابع آب زیرزمینی، به همراه افزایش بهره برداری از این منابع به دلیل رشد جمعیت، پیشرفت صنعت و کشاورزی، تبدیل به یک نگرانی مهم در سراسر جهان، به ویژه کشورهای در حال توسعه شده است (Ouyang et al., 2021; Farrokhi et al., 2021; Ghanbari-Adivi et al., 2022). در پهنه های خشک و نیمه خشک، اثرات افزایش برداشت از منابع

تغییرات اقلیم تحت سناریوهای اقلیمی را بر منابع آب زیرزمینی حوزه Geer در کشور بلژیک بررسی کردند و دریافتند که تا سال ۲۰۸۵ اثرات اقلیمی با شدت بیشتری نسبت به تغییرات اقلیمی طبیعی خواهد بود. Boucefiane و Meddi (۲۰۱۳) به ارزیابی تغییرات اقلیمی بر آب‌های زیرزمینی در حوضه Cheliff-Zahrez در کشور الجزایر در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۵۰ پرداختند. برآورد آن‌ها نشان داد که سطح آب زیرزمینی با کاهشی در سال ۲۰۲۰ به میزان ۴/۴ تا ۶/۶ درصد و در سال ۲۰۵۰ به میزان ۹/۷ تا ۱۲/۸ درصد همراه خواهد بود. Shrestha و همکاران (۲۰۱۶) در Mekong Delta به بررسی کنش تغییرات اقلیم بر سطح آب زیرزمینی با مدل جریان آب زیرزمینی MODFLOW و ۵ مدل گردش عمومی GCM تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 پرداختند. نتایج این تحقیق حاکی از روند کاهشی سطح آب زیرزمینی و افزایش دما در همه فصول و نوسان افزایشی و کاهشی بارش در فصول تر و خشک بود. Boughariou و همکاران (۲۰۱۸) به مطالعه مدل‌سازی رفتار آبخوان تحت تأثیر اقلیم در جنوب شرق تونس با استفاده از مدل GCM و سیستم آب زیرزمینی با مدل جریان آب زیرزمینی MODFLOW با استفاده از سناریوهای انتشار در دوره زمانی ۲۰۲۰-۲۰۵۰ پرداختند. نتایج مدل اقلیمی حاکی از انتظار افزایش میانگین سالانه دما در سال ۲۰۲۰ به میزان ۱/۱ درجه سانتی‌گراد و در سال ۲۰۵۰ به میزان ۲/۱ درجه سانتی‌گراد، همراه با کاهش کلی بارندگی و کاهش سطح ایستابی در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۵۰ به ترتیب ۰/۵ و ۱ متر خواهد بود. Tanachaichoksirikun و همکاران (۲۰۱۸) 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 شبیه‌سازی آب زیرزمینی MODFLOW طی دوره ۲۰۳۶-۲۰۱۷ در حوضه Chao Phraya تایلد پرداختند. یافته‌ها نشان داد که در سناریوی RCP4.5 بالاترین میانگین بارندگی و پایداری آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهد. Tigabu و همکاران (۲۰۲۱) تأثیرات اقلیمی بر ارزیابی Lake Tana basin in Ethiopia را ارزیابی کردند و دریافتند که سطح آب در سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 کاهش، ولی رواناب سطحی افزایش می‌یابد. Ehteram و همکاران (۲۰۲۲) به پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی آینده با استفاده از سناریوهای انتشار RCP4.5

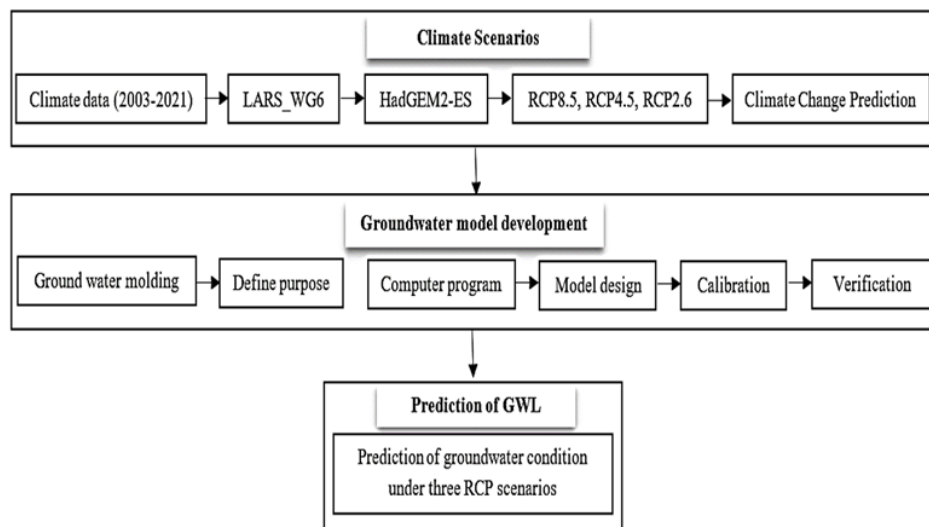
(Ouyang et al., 2019). شواهد و نشانه‌ها بیانگر دوره‌ای از تغییرات اقلیم، برآمده از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در هوا کره است. ادامه این پدیده می‌تواند منجر به تغییر ویژگی اقلیم جهانی و محلی، از جمله دما و بارش شود (Kumar, 2012). داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی‌های اقلیمی شواهد فراوانی ارائه می‌دهند که منابع آب شیرین سطحی و زیرزمینی نسبت به نمایه‌های اقلیمی آسیب‌پذیر هستند و این تغییرات پیامدهای گسترده زیست محیطی، اجتماعی، اقتصادی و بهداشتی به همراه خواهند داشت (Bates et al. 2008). با نگرش به مطالب بیان شده، چنین برآورد می‌شود که پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی، ناشی از تغییر اقلیم، برای مدیریت پایدار منابع آب اهمیت فراوان دارد (Ghazavi and Ebrahimi, 2018). در این زمینه Dehn و همکاران (۲۰۰۰) در پژوهشی به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی در بخش شمالی ایتالیا پرداختند. یافته‌ها آن‌ها نشان داد که چشم‌گیرترین تغییرات در بهار، با کاهش شدید سطح آب زیرزمینی و در نتیجه کاهش نرخ جابه‌جایی رخ می‌دهد. Scibek و Allen (۲۰۰۶) در پژوهشی، اثر تغییرات اقلیمی بر تغذیه و تراز آب زیرزمینی کانادا را با استفاده از MODFLOW (Modulate Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater) مدل‌سازی و پیش‌بینی نمودند. آن‌ها از مدل گردش عمومی AOGCM (Global Circulation Models) و برای استخراج پارامترهای تغییر دما و بارش از مدل (Long Ashton Research Station LARS-WG Weather Generator) استفاده نمودند. یافته‌ها بیانگر این امر بود که آب و هوای پیش‌بینی شده برای پهنه پژوهشی منجر به تغذیه بیشتر از فصل بهار تا تابستان خواهد شد. Akhtar و همکاران (۲۰۰۸) تأثیر تغییر اقلیم را در Hindoukush-Karakorum basin در رشته‌کوه هیمالیا را برای دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۰ مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که دما و بارش در حوضه مورد مطالعه افزایش خواهد داشت. Doll و همکاران (۲۰۰۹) به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر آسیب‌پذیری جهانی منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر پرداختند، آن‌ها دریافتند که مدل تغذیه تحت سناریوهای اقلیمی B2 و A2 تا سال ۲۰۵۰، در حاشیه دریای مدیترانه در شمال آفریقا بیشترین آسیب‌پذیری و در شمال برزیل و جنوب غربی آفریقا، آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد خواهد داشت. Goderniaux و همکاران (۲۰۱۱) اثرات

مطالعات پیشین انجام شده در سازمان آب و برق خوزستان بر روی آبخوان‌های استان خوزستان از جمله آبخوان گلگیر نشان می‌دهد، عمده‌ی تغذیه این آبخوان از طریق نفوذ از بارندگی و تغذیه زیرزمینی صورت می‌گیرد و در همین حال قسمت عمده تخلیه آبخوان از طریق خروجی‌های زیرزمینی انجام می‌شود. لذا با توجه به اثر پذیری آبخوان گلگیر از تغذیه سطحی، این دشت جهت بررسی تأثیر تغییرات اقلیم انتخاب و در یک دوره پایه (۲۰۲۱-۲۰۰۳) اثرات تغییر اقلیم در سناریوهای مختلف با استفاده از مدل ریاضی GMS مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

در شکل ۱ مراحل انجام این مطالعه شامل: برآورد پارامترهای آب و هوایی متأثر از سناریوهای اقلیمی، شبیه‌سازی آبخوان با مدل GMS و درنهایت بررسی اثرات تغییر اقلیم در سناریوهای مختلف بر روی مدل مدیریت منابع آب زیرزمینی و پیش‌بینی شرایط آبی آبخوان ارائه شده است (شکل ۱).

RCP8.5 در دوره‌های ۲۰۲۰-۲۰۵۹ و ۲۰۶۰-۲۰۹۹ برآوردهای آنان بیانگر افزایش دما و کاهش بارندگی در دوره‌های آبی تحت سناریوهای انتشار بود. آنان همچنین دریافتند که سطح آب زیرزمینی در دوره آبی ۲۰۲۰-۲۰۵۹ در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب به اندازه ۸۸/۶۰-۰/۰ متر و ۸۰/۱۶-۰/۱ متر و در دوره آبی ۲۰۶۰-۲۰۹۹ به ترتیب ۱/۴۹-۱/۷۹ متر و ۱/۷۵-۱/۹۸ متر کاهش می‌یابد. در ایران، افزایش تقاضای آب ناشی از افزایش جمعیت، تغییر سبک زندگی، رشد کشاورزی و صنعت، مدیریت نادرست و فرسوده بودن برخی زیرساخت‌ها، به همراه تغییرات اقلیمی، سبب زوال کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی، به ویژه در آبخوان‌های استان خوزستان با اقلیمی گرم و خشک، شده است. بر این پایه، بررسی کمی اثرات همچنین پیش‌بینی شرایط آبی متأثر از تغییرات اقلیمی در غالب تلفیق مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی و مدل‌های مدیریت منابع آب ضروری می‌باشد. بررسی



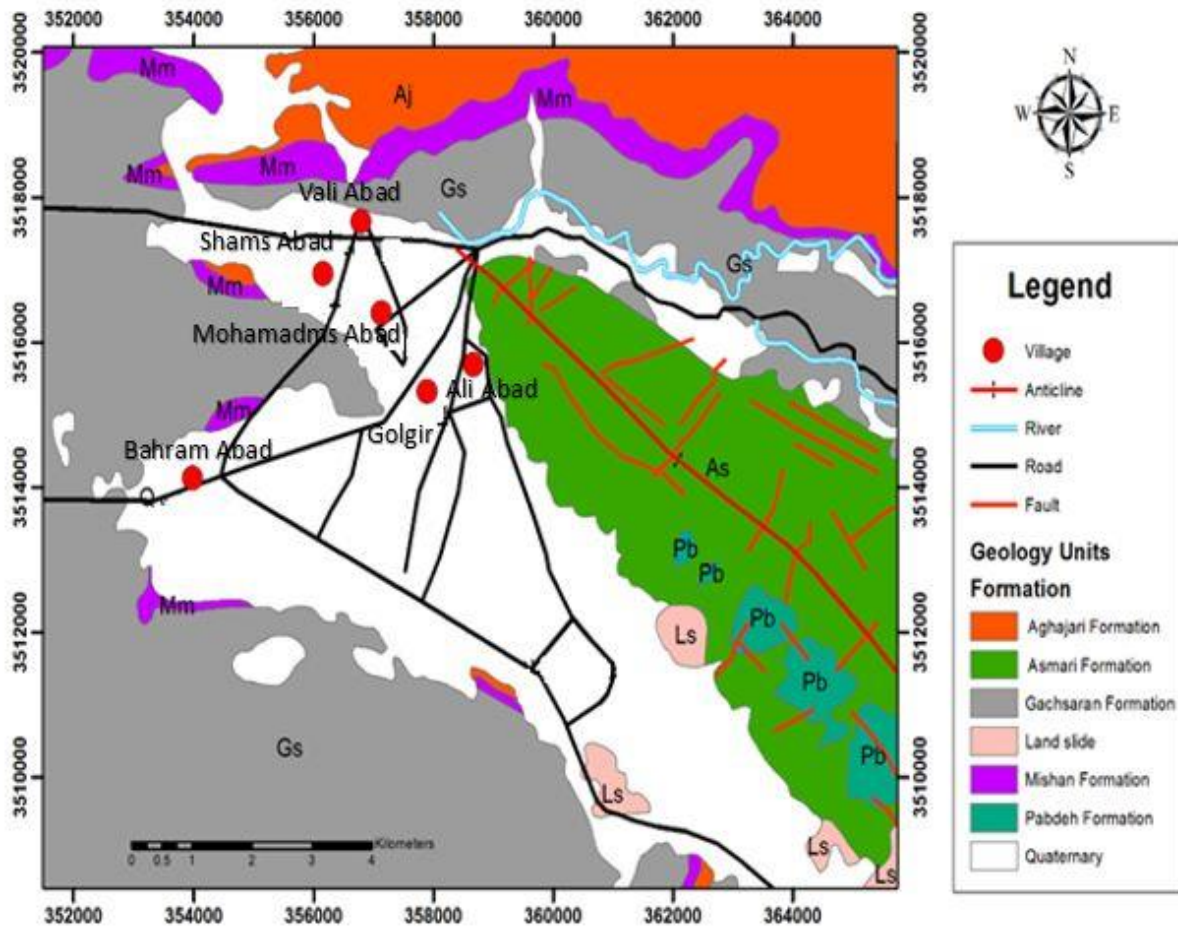
شکل ۱- چارچوب روش‌شناسی پژوهش

Fig. 1. Methodology framework of the research

۱-۲- منطقه مورد مطالعه

زاگرس چین‌خورده می‌باشد. این دشت آبرفتی از فرسایش سازندهای مجاور موجود در دشت تشکیل شده است (شکل ۲). میانگین بارندگی سالانه در دوره پایه (۲۰۲۱-۲۰۰۳) در دشت گلگیر ۳۶۲ میلی‌متر و درجه حرارت ۲۶ درجه سانتی‌گراد و در اقلیم نیمه‌خشک قرار دارد. آبخوان آبرفتی دشت گلگیر، دارای مساحت تقریبی ۲۷/۴۹ کیلومتر مربع است و آب‌های زیرزمینی مهم‌ترین منبع اصلی تأمین آب در منطقه است (Mirzaee et al., 2014).

منطقه مورد مطالعه، دشت گلگیر در ۲۰ کیلومتری شهرستان مسجدسلیمان واقع در استان خوزستان و در زون ۳۹ واقع شده است. این محدوده در طول جغرافیایی ۴۵° ۲۶' تا ۳۳° ۳۲' و ۴۹° درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱° ۴۳' تا ۳۱° ۴۷' درجه شمالی قرار دارد. دشت گلگیر از لحاظ واحدهای چین‌شناسی و زمین‌شناسی ساختمانی ایران بخش از زون



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig 2. Location of the study area.

۲-۲- تغییر اقلیم

گرمایش زمین یکی از پیچیده‌ترین چالش‌های قرن ۲۱ و یکی از عوامل اصلی در نوسانات پارامترهای اقلیمی می‌باشد. این پدیده به خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل کمبود منابع آب و خطر خشک‌سالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خروجی‌های مدل‌های شبیه‌ساز اقلیمی افزایش شدید دمای اتمسفر در سراسر جهان را نشان می‌دهند. تغییرات اقلیمی خطرات کوتاه مدت تا بلندمدتی را برای سیستم‌های طبیعی از جمله منابع آب به همراه خواهد داشت. لذا تغییر در نگرش مدیریت منابع آب در راستای مواجهه با این پدیده کامل به چشم می‌خورد. به منظور بررسی پارامترهای اقلیمی تحت پدیده تغییر اقلیم عموماً از مدل‌های GCM استفاده می‌شود (Soltani et al., 2022).

۲-۲-۱- مدل‌های گردش عمومی (AOGCM)

AOGCM مدل‌های گردش عمومی آب و هوایی هستند. در حال حاضر این مدل‌ها معتبرترین ابزار طراحی شده برای شبیه‌سازی سری‌های زمانی متغیرهای آب و هوایی از جمله: دمای هوا، بارش، سرعت و فشار باد در مقیاس جهانی با توجه به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو هستند (Ghazavi and Ebrahimi, 2018). لذا این مدل‌ها جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم قابل اعتمادترین و یکی از بهترین ابزار موجود هستند. مدل‌های گردش عمومی جوی اقیانوسی عددی بوده که تغییرات و حرکات اتمسفر، اقیانوس، یخ کره و سطح زمین را به طور سه بعدی شبیه‌سازی می‌کنند. این مدل‌ها برای شبیه‌سازی سری زمانی متغیرهای اقلیمی دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و تابش تحت سناریوهای اقلیمی مختلف استفاده می‌شوند و این مدل‌ها، مدل گردش عمومی جوی و اقیانوسی (OGCM, AGCM) را شامل می‌شوند و در مدل‌های کنونی با عنوان

۲-۲-۲- سناریوهای انتشار

هیئت بین‌المللی تغییر اقلیم (IPCC) جهت پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم در گزارش ارزیابی پنجم از سناریوهای جدید RCP (Representative Concentration Climate Change) استفاده کرده است. جدول ۱ ویژگی‌های سناریوهای RCP را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات سناریوهای مختلف RCP

Table 1. Characteristics different RCP scenarios

Scenario	Radiative forcing	Density CO ₂ (ppm)
RCP2.6	Radiative forcing to the 2/6 (w/m2) it will reach the year 2100.	490 to 2100
RCP4.5	Radiative forcing to the 4/5 (w/m2) it will remain constant until 2100.	750 to 2100
RCP8.5	Radiative forcing to the 2/6 (w/m2) it will reach the year 2100.	1370 to 2100

مرحله سوم و درنهایت یک فایل برای ایجاد و شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی ایجاد می‌شود. این فایل حاوی اطلاعاتی در مورد توزیع‌های نیمه تجربی برای طول سری‌های خشک و تر، بارش حداقل و حداکثر دما و تابش روزانه محاسبه شده است (Semenov and Stratonovitch, 2010) با استفاده از شاخص‌های ضریب همبستگی R² (Coefficient of Determination) رابطه‌ی ۱، جذر میانگین مربعات خط RMSE (Root Mean Square Error) رابطه‌ی ۲، و میانگین خطای مطلق MAE (Mean Absolute Error) رابطه‌ی ۳ اقدام به ارزیابی داده‌های تولیدشده توسط مدل و داده‌های مشاهده شده موجود در دوره پایه می‌شود.

(رابطه ۱)

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

(رابطه ۲)

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

(رابطه ۳)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{n}$$

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

AOGCM عرضه می‌شوند (Graham et al., 2007). در این پژوهش، برای مطالعه تغییر اقلیم از مدل گردش عمومی گزارش پنجم موسوم به HadGEM2-ES که دارای وضوح مکانی ۱/۸۵×۱/۸۸ است همچنین سناریوهای انتشار RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 استفاده شده است.

۲-۲-۳- ریزمقیاس نمایی

با توجه به این که خروجی مدل‌های گردش عمومی برای بررسی پارامترهای اقلیمی در مقیاس منطقه یا ایستگاه محلی از قدرت تفکیک کم برخوردار هستند بنابراین لازم است، خروجی مدل‌های گردش عمومی ریزمقیاس شوند. این مدل‌ها را می‌توان به صورت منطقه‌ای برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی از طریق روش‌های ریزمقیاس نمایی آماری یا دینامیکی به دلیل بزرگ مقیاس بودن اطلاعات خروجی این مدل‌ها ریز گردانی کرد. روش‌های دینامیکی پرهزینه و با محدودیت زمانی روبرو هستند درحالی که در مدت زمان کوتاهی در یک ایستگاه روش‌های آماری می‌توانند ریزمقیاس نمایی را انجام دهند. به منظور ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در دوره‌های آینده ابتدا باید میزان متغیرهای اقلیمی در آینده شبیه‌سازی شود. یکی از قابل اعتمادترین ابزارها برای بررسی اثرات تغییر اقلیم، استفاده از متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های کاهش مقیاس پارامترهای اقلیمی مانند مدل آماری LARS-WG است که می‌تواند پارامترهای اقلیمی را در مقیاس محلی پیش‌بینی کند. در این مدل داده‌های اقلیمی در سه مرحله مجزا تولید می‌شوند. اولین قدم کالیبراسیون مدل می‌باشد، که در آن مجموعه داده‌های مشاهده شده به صورت آماری تجربه و تحلیل می‌شوند. مرحله دوم برای ارزیابی مدل داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده برای هرگونه تفاوت آماری بررسی می‌شوند.

۲-۳- مدل آب زیرزمینی

مخزن آب زیرزمینی (آبخوان) سامانه‌ای پیچیده‌ای است که با عوامل طبیعی یا غیرطبیعی ناشی از فعالیت انسان درکنش است. این عوامل در سطوح زمانی مختلف بر روی لایه‌های آبدار تأثیر می‌گذارند که منجر به نوسانات آب زیرزمینی می‌شود (Chitsazan et al., 2015). مدل‌های جریان آب زیرزمینی بیشتر، در ارزیابی منابع آبی برای تعیین نرخ تغذیه و تخلیه، نشت، آبدهی مجاز جهت حرکت آب زیرزمینی و دوره بلندمدت بهره‌برداری در آبخوان‌های آب زیرزمینی و لایه‌های محبوس کننده استفاده می‌شوند.

GMS یک برنامه کامل برای ساخت و شبیه‌سازی مدل آب زیرزمینی است. یکی از ویژگی‌های این نرم‌افزار عملکرد آن به صورت رابط بین مدل GIS و MODFLOW است. این مدل جریان را به صورت سه بعدی و برای حالت پایدار و ناپایدار شبیه‌سازی می‌کند. درواقع مدل GIS روابطی است که سیستم طبیعی آبخوان آب زیرزمینی و عوامل تغذیه و تغییرات تراز آب زیرزمینی را به صورت زمانی و مکانی نمایش می‌دهد. و بر اساس اطلاعاتی که به آن داده می‌شود شرایط طبیعی سفره آب زیرزمینی را شبیه‌سازی می‌کند. برای شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی در دشت گلگیر از مدل GMS10.6 به منظور ساخت و طراحی مدل مفهومی آبخوان استفاده شد. با توجه به ویژگی‌های کلی برنامه MODFLOW، مدل عناصر سیستم جریان آب زیرزمینی می‌باشد که جریان آب زیرزمینی را در محیط‌های متخلخل با چگالی ثابت به وسیله‌ی آن می‌توان شبیه‌سازی کرد. در ساخت مدل مورد استفاده قرار گرفته است و بر پایه‌ی معادله‌ی حاکم بر آب‌های زیرزمینی با چگالی ثابت و مواد متخلخل با شرایط متعادل که عبارت است از:

(رابطه ۴)

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

که در آن K_{xx} و K_{yy} و به ترتیب بیانگر هدایت هیدرولیکی در راستای x و y ، h بار هیدرولیکی یا پیژومتری، W : حجمی در واحد حجم و نشان‌دهنده منابع یا مخازن آب، S_s ذخیره ویژه مواد متخلخل و t زمان می‌باشد (Harbaugh, 2005). روش عددی به کار گرفته شده در مدل MODFLOW روش تفاضل محدود است. در این روش، سیستم جریان آب زیرزمینی توسط ردیف‌ها،

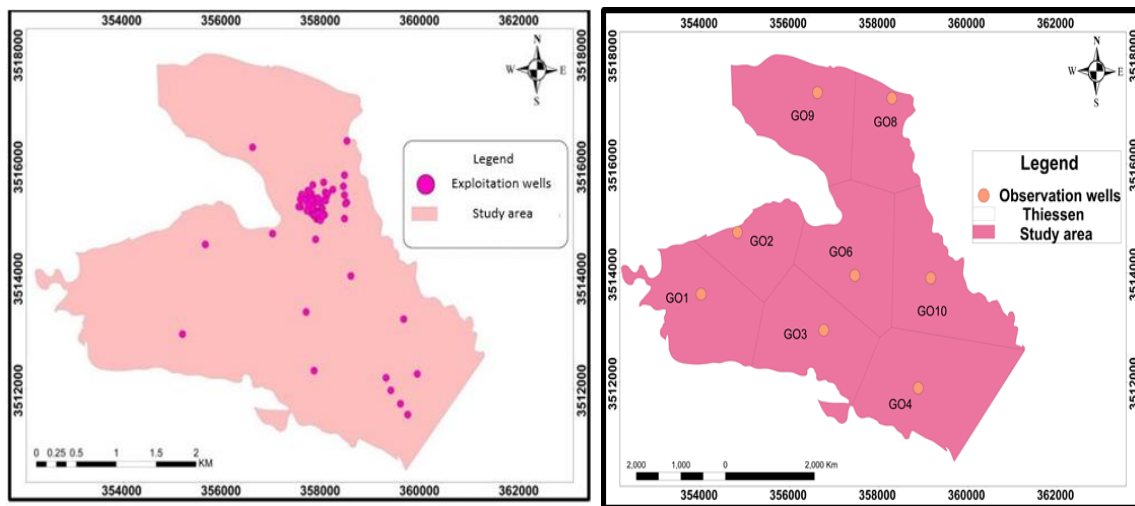
ستون و لایه‌ها به شبکه‌بندی از سلول‌ها تقسیم می‌شود. در هر سلول یک نقطه منفرد به نام گره وجود دارد که در آن تراز آب محاسبه می‌شود. وضعیت هندسی مدل درواقع مبین اندازه، شکل، مرز و شبکه مدل است. برای این که بتوان معادلات دیفرانسیل جزئی را حل کرد، بایستی محیط به اجزای کوچک‌تری که اصطلاحاً سلول می‌نامند، تقسیم کرد. در مدل‌سازی آبخوان دشت گلگیر، برای ایجاد شبکه یکنواخت، ابعاد شبکه‌ها (سلول) با توجه به وسعت منطقه و نیز میزان آمار و اطلاعات موجود سلول‌های با ابعاد 500×500 متر استفاده شد. در دشت گلگیر با توجه به اطلاعات به دست آمده از سازمان آب و برق خوزستان ۸ پیژومتر فعال وجود دارد. تجزیه و تحلیل اطلاعات مربوط به چاه‌های بهره‌برداری دشت گلگیر نشان داد که در منطقه ۸۲ حلقه چاه بهره‌برداری وجود دارد که ۲۰ حلقه جهت کشاورزی، ۶ حلقه شرب و ۴۹ حلقه جهت صنعت استفاده می‌شوند و ۷ حلقه غیرفعال است (شکل ۳). جهت برآورد پارامترهای هیدرولیکی دشت گلگیر از جمله: قابلیت انتقال، هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و آبدهی ویژه از داده‌های آزمون پمپاژ انجام شده در منطقه همچنین مطالعات ژئوفیزیک و لاگ چاه‌های اکتشافی و بهره‌برداری استفاده و در نرم‌افزار GIS آماده سازی گردید (Turkhashqainejad et al., 2015)

۲-۳-۱- واسنجی و صحت سنجی مدل آب زیرزمینی

واسنجی و ارزیابی مدل نیاز به انتخاب ترکیبی بهینه از پارامترهای ورودی دارد (Seifi et al., 2020) به فرایند تغییر در بعضی از پارامترهای مدل برای تطبیق و عملکرد در یک بازه قابل قبول به منظور به حداقل رساندن اختلاف بین بارهیدرولیکی شبیه‌سازی شده توسط مدل و بار هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در صحرا واسنجی گفته می‌شود. یکی از مشکلات اصلی مرحله واسنجی عدم وجود یک پاسخ واحد در این مرحله است به این معنا که مقادیر مختلفی از پارامترهای موجود در مدل می‌توانند باعث ایجاد پاسخ یکسانی شوند (Anderson et al., 2015). بنابراین در طول فرایند واسنجی باید به این نکته دقت کرد که کم بودن اختلاف بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده بار هیدرولیکی به معنی کم بودن این اختلاف بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی سایر پارامترهای مدل نیست. لذا باید در طی مراحل به تغییرات سایر پارامترها مانند تغذیه از مرزها نیز دقت شود و علاوه بر این حتماً باید بعد از واسنجی، مدل صحت سنجی نیز شود. واسنجی مدل در حالت ماندگار برای شبیه‌سازی آبخوان در مهرماه ۱۳۸۷ و در حالت نا ماندگار در نا ماندگار از آبان ماه ۱۳۸۷ تا اواخر مهر ۱۳۹۷ به مدت

آن کمتر از میزان استاندارد تعیین شده در مرحله واسنجی باشد به این معناست که پارامترهای هیدرودینامیکی مدل از دقت کافی و ترکیب مناسب برای شبیه‌سازی رفتار آبخوان برخوردار هستند. در غیر این صورت باید فرایند واسنجی و صحت‌سنجی را دوباره انجام داد (Anderson et al., 2015). پس از تکمیل واسنجی جهت اطمینان و اعتبار و ارزیابی دقیق مدل و همچنین اثبات قابلیت پیش‌بینی‌های صحیح مدل و این‌که نشان دهد که یک مدل واسنجی شده یک مدل معتبر است صحت‌سنجی به صورت اتوماتیک از آبان ۱۳۹۷ تا شهریور ۱۴۰۰ صورت گرفت.

۱۰ سال برای مدل تعریف گردید و مدل مفهومی از حالت ماندگار به حالت نا ماندگار تغییر یافت. به دلیل وجود عدم قطعیت‌های فراوان در فرایند شبیه‌سازی، گاهی با وجود واسنجی بودن مدل به دلیل ترکیب نامناسب پارامترهای مختلف به ویژه ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان، به خوبی نمی‌توان از مدل برای شبیه‌سازی تنش‌های وارد بر سیستم استفاده کرد. از این رو برای بررسی صحت تنش‌های وارد بر سیستم در مدل باید بدون تغییر شرایط مرزی، هدایت هیدرولیکی، ضریب آبدهی ویژه، اطلاعات بیلان را برای یک دوره مستقل از دوره شبیه‌سازی (قبل یا بعد از مدل‌سازی) وارد مدل و مدل را اجرا کرد. در صورتی که بعد از اجرای مدل میزان خطا



شکل ۳- موقعیت چاه‌های منطقه مورد مطالعه

Fig 3. The location of the wells in the study area.

۲ ارائه شده است. طبق این جدول مقادیر R2 برای همه ی پارامترها از مقدار قابل توجهی و بالای برخوردار است. همچنین پایین بودن مقادیر RMSE و نزدیک به صفر بودن MAE برای همه پارامترها، در نتیجه می‌توان گفت که توانمندی عملکرد مدل LARS-WG در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی به اثبات می‌رسد.

۳- نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از ارزیابی داده‌های تولیدشده با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG و داده‌های مشاهده شده دوره پایه ۲۰۲۱-۲۰۲۳ برای پارامترهای اقلیمی دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش با استفاده از شاخص‌های آماری در جدول

جدول ۲- نتایج شاخص‌های آماری برای ارزیابی پارامترهای شبیه‌سازی شده در مدل LARS-WG

Table 2. The results of Statistical indicators to evaluate the simulated parameters in the LARS_WG model

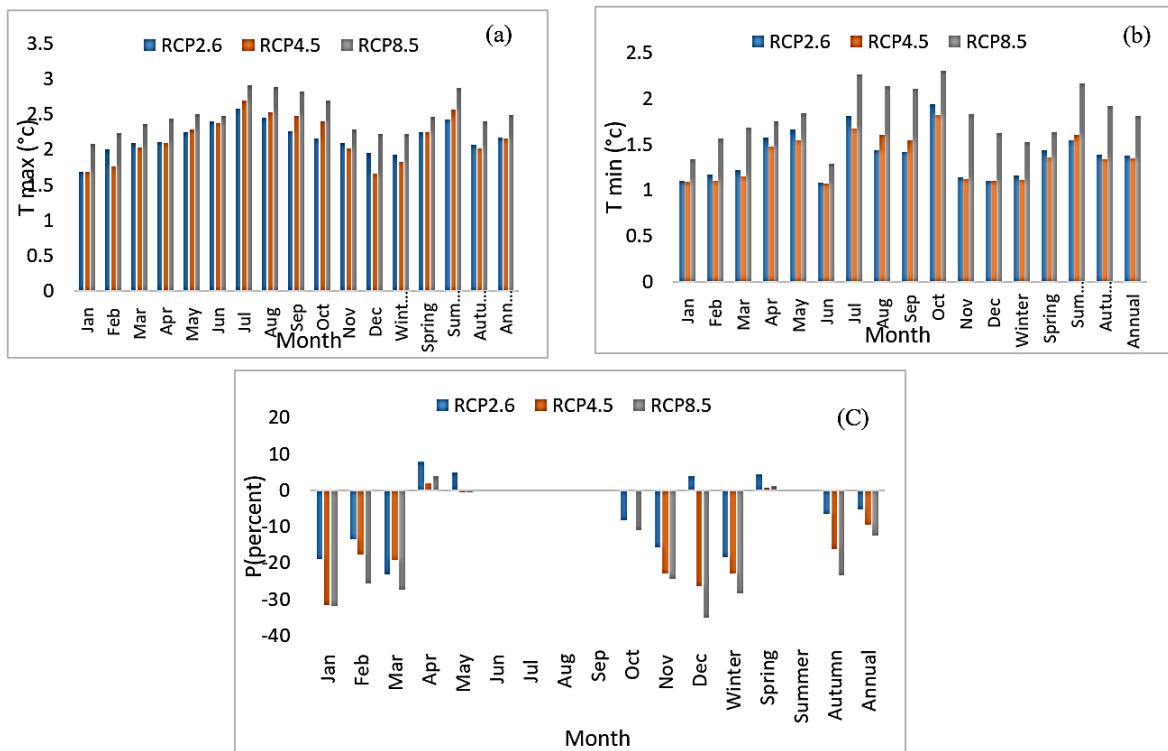
Parameter	R2	RMSE	MAE
Temperature Mix	0.99	0.23	0.99
Temperature Min	0.99	0.23	0.04
Rainfall	0.99	0.95	0.10

بیشترین تغییرات در ماه‌های میانی و گرم سال در فصل تابستان است. شکل b5 بیانگر تغییرات پیش‌بینی شده از میانگین دمای حداقل در دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰) در مقایسه با دوره پایه (۲۰۲۱-۲۰۰۳) در سناریوهای انتشار مشابه با تغییرات دمای حداکثر است بیانگر کاهش تغییرات کمتر در دمای حداقل نسبت به دمای حداکثر است. دمای حداقل در همه ماه‌ها و در هر سه سناریو افزایش را نشان می‌دهد و همانند تغییرات دمای حداکثر، کم‌ترین تغییرات در ماه‌های نخستین و پایان سال و بیشترین تغییرات در ماه‌های وسط و گرم سال در فصل تابستان است. شکل c5 تغییرات برآورد شده از پیش‌بینی میانگین بارندگی در دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰) در مقایسه با دوره پایه (۲۰۲۱-۲۰۰۳) تحت سناریوهای انتشار نشان می‌دهد. بر پایه این شکل، روی هم رفته میزان بارندگی در بیش‌تر ماه‌های سال با کاهش همراه خواهد بود.

۳-۱- نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل آب زیرزمینی
در این مطالعه، برای عملکرد مناسب شبیه‌سازی مدل، واسنجی مدل برای شبیه‌سازی آبخوان دشت گلگیر انجام گرفت. واسنجی مدل در دو حالت ماندگار و ناماندگار صورت پذیرفت. در جدول ۳ مقادیر شاخص‌های آماری خطا در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی نشان داده شده است. واسنجی مدل برای حالت ماندگار برای مهرماه ۱۳۸۷ که ثبات خوبی در سطح آب زیرزمینی داشت انجام شد. مقایسه بین بار هیدرولیکی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در حالت ماندگار در شکل ۶ نشان داده شده است. و برای حالت ناماندگار از آبان ۱۳۸۷ تا مهر ۱۳۹۷ به مدت ۱۰ سال واسنجی شد. شکل ۷ شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت گلگیر در گام آخر حالت ناماندگار را نشان می‌دهد. میزان خطای RMSE و MAE در حالت ماندگار در دامنه قابل قبول قرار دارد. در گام بعد برای حالت ناماندگار مقادیر خطاها در گام‌های زمانی مختلف پس از واسنجی مدل، در همه‌ی ماه‌ها در محدوده‌ی قابل قبول قرار دارد که حاکی از عملکرد مناسب مدل‌سازی انجام شده است. جهت مرحله‌ی صحت‌سنجی مدل دشت گلگیر از آبان ۹۷ تا شهریور ۱۴۰۰ پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی صورت پذیرفت و مقدار شاخص‌های RMSE و MAE به دست آمده نشان دهنده‌ی دقت قابل قبول مدل شبیه‌سازی است.

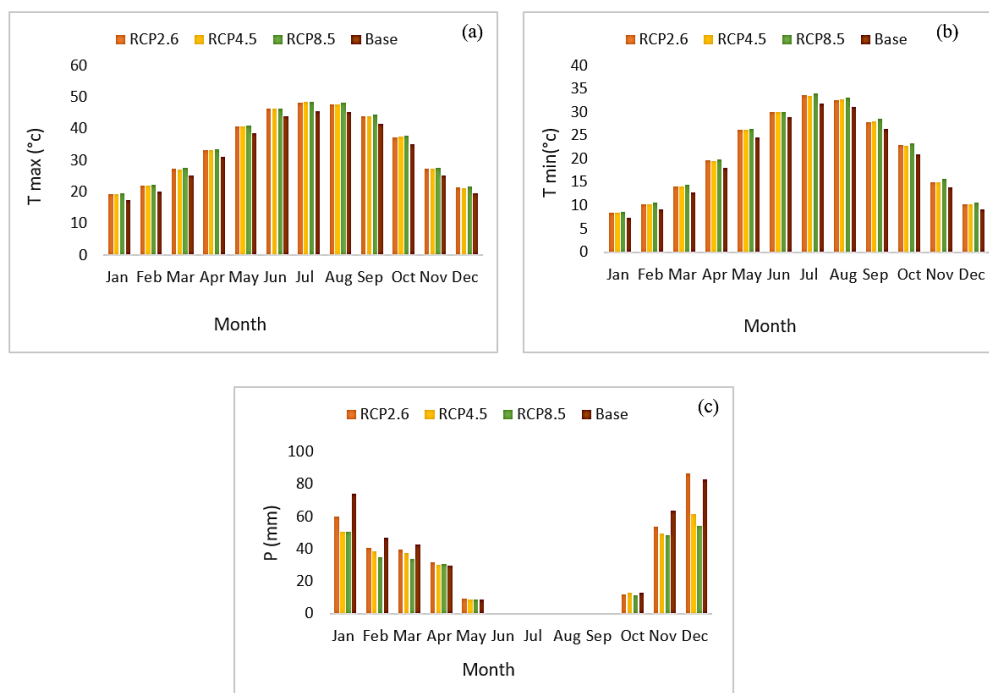
شکل ۴ a نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل در دوره در دوره آتی ۲۰۲۲-۲۰۴۰ نسبت به دوره پایه ۲۰۲۱-۲۰۰۳ حاکی از افزایش دمای حداکثر برای تمام ماه‌ها و همه سناریوها در منطقه مورد مطالعه نسبت به دوره پایه است. بیشینه افزایش دمای حداکثر ۲/۹۱ درجه سانتی‌گراد در ماه‌های جولای تحت سناریوی RCP8.5 مشاهده شد و کم‌ترین افزایش دمای حداکثر ۱/۶۶ و ۱/۰۷ درجه سانتی‌گراد در ماه دسامبر تحت سناریوی RCP4.5 مشاهده شد و بیش‌ترین افزایش دمای حداکثر سالانه به اندازه ۲/۴۹ در سناریوی RCP8.5 کم‌ترین افزایش دمای حداکثر سالانه به میزان ۲/۱۶ درجه سانتی‌گراد در سناریوی RCP4.5 بود. شکل b4 دمای حداقل در سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۴۰ نسبت به دوره پایه ۲۰۲۱-۲۰۰۳ افزایش را نشان داد و این میزان در سناریوهای انتشار مختلف، گوناگون است. بیش‌ترین افزایش دمای حداقل در ماه اکتبر به میزان ۲/۳۱ درجه سانتی‌گراد در سناریوی RCP8.5 و کم‌ترین افزایش دمای حداقل به میزان ۱/۰۷ درجه سانتی‌گراد در ماه ژوئن و در سناریوی RCP4.5 دیده شد. بیش‌ترین افزایش دمای حداقل سالانه به میزان ۱/۸۷ درجه سانتی‌گراد در سناریوی RCP8.5 کم‌ترین افزایش دمای حداقل سالانه به میزان ۱/۳۵ درجه سانتی‌گراد در سناریوی RCP4.5 مشاهده شد. بر پایه شکل c4، نرخ بارش نیز در دوره آتی نسبت به دوره پایه در همه ماه‌ها دچار تغییر شده است به گونه‌ای که در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۲، میزان بارش در سناریوی RCP2.6 در ماه‌های آوریل، می و دسامبر روند افزایشی را نشان می‌دهد و در سایر ماه‌ها روند کاهشی داشته است. این مقادیر، در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در ماه آوریل افزایشی و در بقیه ماه‌ها روند کاهشی می‌باشد و بیش‌ترین افزایش و کاهش به میزان ۸ و ۳۵/۱ درصد به ترتیب در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در ماه‌های آوریل و دسامبر رخ می‌دهد و بارش سالانه در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۵/۲، ۹/۶ و ۱۲/۶ درصد کاهش خواهد یافت.

شکل ۵ a5 نیز تغییرات به دست آمده از پیش‌بینی میانگین دمای حداکثر در دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰) در مقایسه با دوره پایه (۲۰۲۱-۲۰۰۳) در سناریوهای انتشار نشان داده شده است. که بیانگر از افزایش دمای حداکثر در همه ماه‌ها و هر سه سناریو است که کم‌ترین تغییرات در ماه‌های نخست و پایانی سال و



شکل ۴- پیش‌بینی دمای حداکثر (a)، دمای حداقل (b) و بارش (c) در دوره آینده (۲۰۲۲-۲۰۴۰) تحت سناریوهای RCP

Fig 4. Prediction of maximum temperature (a), minimum temperature (b) and precipitation (c) in the Future period (2022-2040) under RCP scenarios.



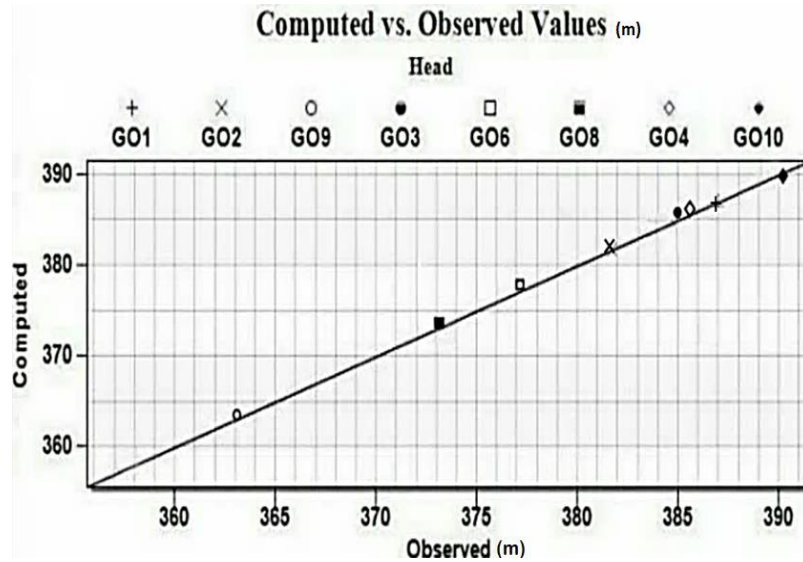
شکل ۵- پیش‌بینی میانگین دمای حداکثر (a)، دمای حداقل (b) و بارش (c) در دوره آینده (۲۰۲۲-۲۰۴۰) در مقایسه با دوره پایه (۲۰۰۳-۲۰۲۱) تحت سناریوهای RCP

Fig 5. Prediction of average maximum temperature (a), minimum temperature (b) and precipitation (c) in the Future period (2022-2040) compared the base period (2003-2021) under RCP scenarios.

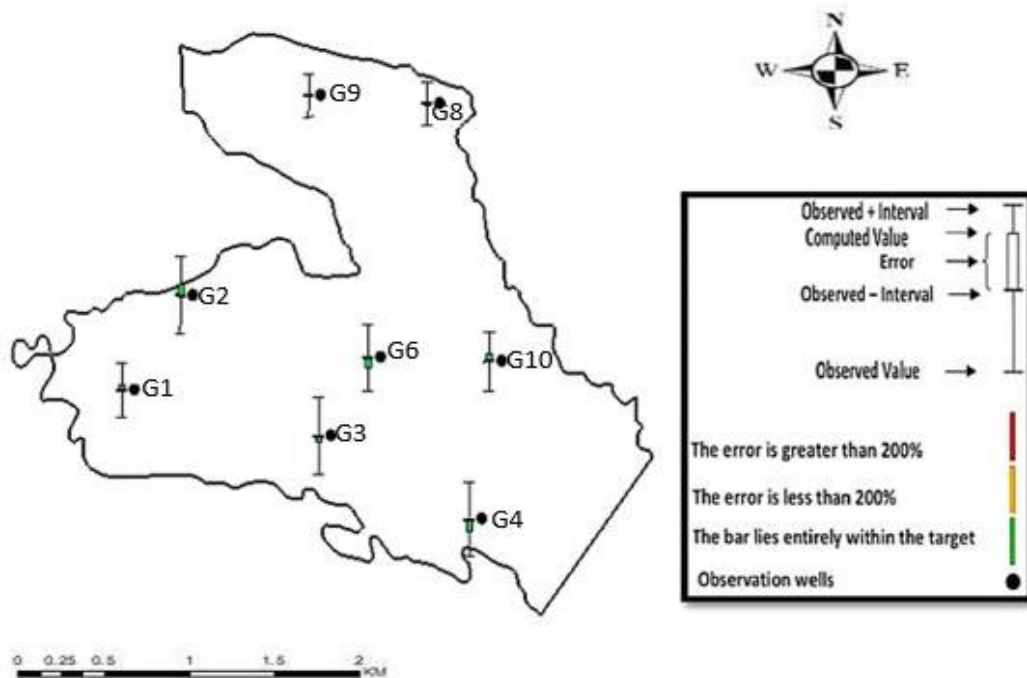
جدول ۳- میزان شاخص‌های MAE، ME و RMSE در مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی

Table 3. The amount of ME, MAE and RMSE indicators in the calibration and verification stage

Step	ME	RMSE	MAE
Calibration steady	-0.05	0.34	0.29
Calibration unsteady	-0.09	0.39	0.33
Verification	0.15	0.99	0.75



شکل ۶- نمودار مقایسه بین بارهیدرولیکی مشاهده‌ای و محاسبه شده در فرایند واسنجی مدل در حالت ماندگار
Fig 6. Comparison chart between observed and calculated heads in steady state model calibration process.



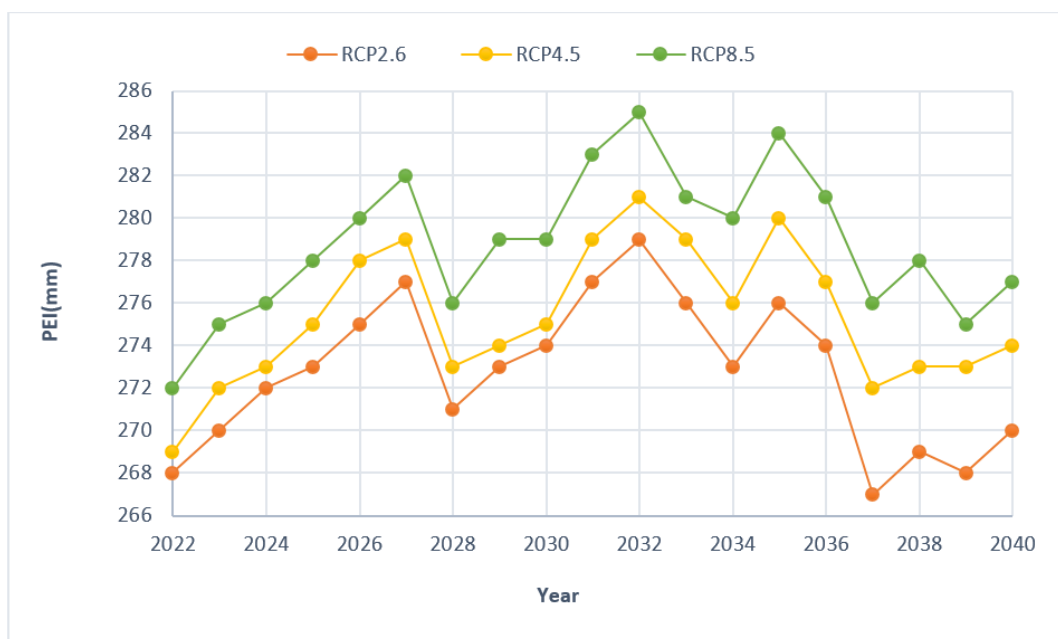
شکل ۷- شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت گلگیر در آخرین گام حالت ناماندگار
Fig 7. Simulation of the groundwater level of Golgir plain aquifer the last step of unsteady state.

سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5 و اثرات این پارامترها بر روی مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی دشت گلگیر اعمال شد. نقشه سطح آب زیرزمینی در آخرین گام تحت هر سه سناریوی اقلیمی در دوره آتی ۲۰۲۲ تا ۲۰۴۰ تهیه شد. و مقایسه‌ی بین سطح آب زیرزمینی دشت گلگیر در آخرین گام سال ۲۰۱۸ شکل a۹ و آخرین گام سال ۲۰۴۰ تحت هر سه سناریوی اقلیمی مورد استفاده انجام شد. سطح آب زیرزمینی دشت گلگیر تحت سناریوی RCP2.6 در دوره آتی ۲۰۲۲ تا ۲۰۴۰ در کل ناحیه آبخوان کاهش می‌یابد. میزان کاهش سطح آب زیرزمینی تحت سناریوی RCP2.6 در دوره آتی ۳/۴ متر می‌باشد شکل b۹. سطح آب زیرزمینی تحت سناریوی RCP4.5 در دوره آتی به میزان ۴/۶ متر کاهش می‌یابد شکل c۹ همچنین جهت پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی تحت سناریوی RCP8.5 سطح آب زیرزمینی تحت سناریوی RCP8.5 بیش‌تر از سناریوهای دیگر با افت همراه بود. میزان کاهش آب زیرزمینی تحت سناریوی RCP8.5 در دوره آتی ۲۰۲۲-۲۰۴۰ به میزان ۶/۷ متر کاهش می‌یابد. شکل d۹. در هر سه سناریوی اقلیمی سطح آب زیرزمینی دشت گلگیر نسبت به سطح آب زیرزمینی در آخرین گام سال ۲۰۱۸ با کاهش همراه بود که در هر سه سناریوی اقلیمی بیش‌ترین کاهش سطح ایستابی در قسمت جنوبی و مرکزی آبخوان دشت گلگیر بود.

۳-۲- تأثیر تغییر اقلیم بر وضعیت آبخوان در دوره آتی در گام بعد از صحت سنجی مدل، پیش‌بینی وضعیت آتی آبخوان تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره آتی ۲۰۲۲-۲۰۴۰ با استفاده از مدل انجام گرفت. برای این منظور نتایج تغییرات بارندگی و دما تحت سناریوهای RCP8.5، RCP4.5 و RCP2.6 بر روی مدل آب زیرزمینی اعمال شد. برای این کار پس از تغییرات ایجاد شده در پارامترهای مختلف که بارش و دما بر آن‌ها تأثیر گذاشته‌اند، از جمله تغذیه آبخوان، تبخیر آب زیرزمینی و برداشت از چاه‌های آب زیرزمینی آبخوان، مدل مفهومی دوباره اجرا شبیه‌سازی برای دوره آتی انجام گرفت. میزان تبخیر و تعرق پتانسیل به روش Torrent White بر اساس رابطه‌ی ۵ تحت هر سناریوی RCP محاسبه شد میزان تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شده طی دوره آتی ۲۰۲۲ تا ۲۰۴۰ تحت سه سناریوهای RCP افزایش می‌یابد که این افزایش در RCP8.5 بیش‌تر از سایر سناریوهاست (شکل ۸).

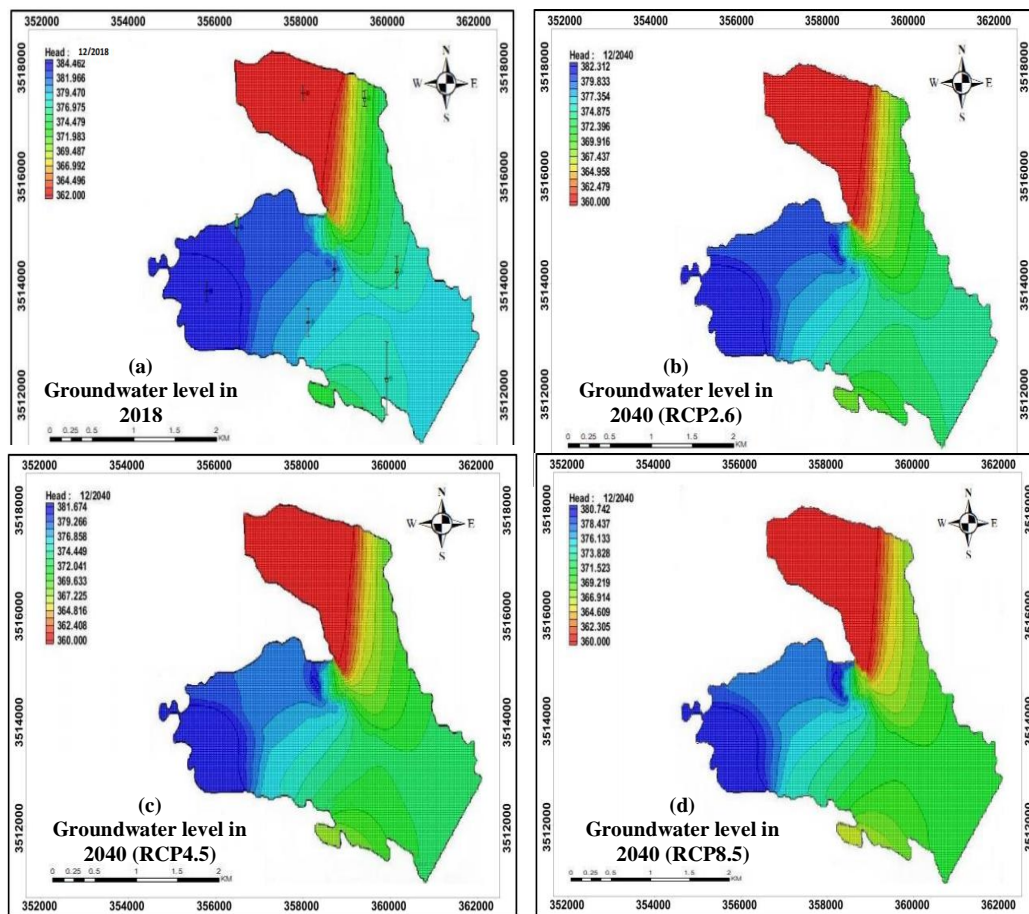
$$ET_0 = 16N_m \left(\frac{10T_m}{I} \right)^a \quad (\text{رابطه ۵})$$

در این معادله ET_0 ، تبخیر و تعرق ماهانه برحسب میلی‌متر، T_m ، متوسط درجه حرارت در ماه مورد نظر، I ، شاخص حرارتی سالانه، N_m ، ضریب اصلاحی و a ، وابسته شاخص حرارتی سالانه می‌باشد. پس از شبیه‌سازی پارامترهای بارندگی و دما تحت

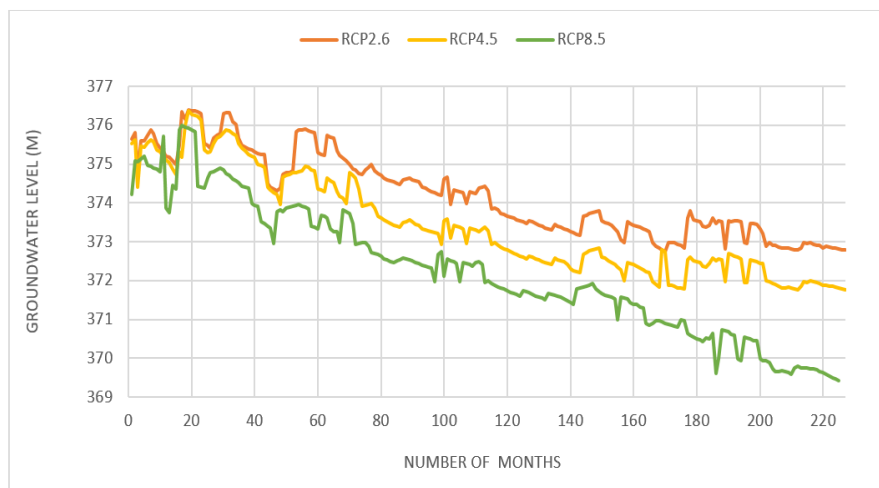


شکل ۸- روند میانگین تغییرات تبخیر و تعرق سالانه تحت سناریوهای RCP

Fig 8. Trends in mean annual evapotranspiration changes under RCP scenarios.



شکل ۹- مقایسه سطح آب زیرزمینی بین سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۴۰ تحت سه سناریوی اقلیمی
 Fig 9. Comparison of groundwater level between 2018 and 2040 under all three climate scenarios



شکل ۱۰- سطح آب زیرزمینی در دوره آتی (۲۰۲۲-۲۰۴۰) تحت سناریوهای RCP
 Fig 10. Groundwater level in the future period of 2022-2040 under RCP scenarios.

زیرزمینی آبخوان دشت گلگیر در نرم افزار GMS10.6، نشان از کاهش سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت گلگیر در دوره آتی تحت پدیده تغییر اقلیم دارد، به گونه‌ای که آبخوان دشت گلگیر، در سناریوی RCP8.5 وضعیت بحرانی تری نسبت به دیگر سناریوها خواهد داشت. بر پایه یافته‌ها، میزان افت سطح آب زیرزمینی، در بهترین حالت در سناریوی RCP2.6 به میزان ۳/۴ متر و در سناریوی RCP4.5 به میزان ۴/۶ متر و در بدترین حالت در منطقه در دوره آتی تحت سناریوی RCP8.5 به میزان ۶/۷ متر خواهد بود. برآوردها، برای بهبود کیفی و کمی منابع آب منطقه همچنین، کاهش تنش برآمده کمبود آب زیرزمینی در آینده، جلوگیری از بهره‌برداری بیش از اندازه از منابع آب زیرزمینی دشت گلگیر را نشان می‌دهد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله لازم می‌دانند از سازمان آب و برق و سازمان هواشناسی استان خوزستان جهت در اختیار قرار دادن داده‌های این تحقیق همچنین دانشگاه شهید چمران اهواز جهت در اختیار نهادن حمایت مالی در غالب پژوهانه شماره SCU.EG1401.77 تقدیر و تشکر نمایند.

هیدروگراف سطح آب زیرزمینی در دوره آتی تحت این سه سناریوی اقلیمی تهیه شد (شکل ۱۰). تغییر در میانگین بارندگی و دما در دشت گلگیر منجر به اثرگذاری بر جنبه‌های مختلفی از اکوسیستم و باعث آسیب به منابع پایه می‌شود، از جمله این منابع آسیب‌پذیری خاک و آب زیرزمینی است.

۴- نتیجه گیری

اجرای مدل LARS-WG برای داده‌های روزانه دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش در ایستگاه سینوپتیک مسجدسلیمان، بیانگر توانمندی بالای مدل هواشناسی برای تولید داده‌های روزانه پارامترهای یادشده است. بررسی تغییرات دما و بارش ماهیانه در دوره ۲۰۲۲-۲۰۴۰ و مقایسه آن با دوره پایه در مدل LARS-WG نشان داد که مقادیر دمای حداقل و حداکثر در طی دوره آتی در ایستگاه مورد مطالعه افزایش خواهد یافت، در صورتی که میانگین ماهانه بارش نیز در دوره آتی در همه‌ی ماه‌ها تغییر داشته و میانگین سالانه بارش در دوره آتی نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 به ترتیب ۵/۲، ۹/۶ و ۱۲/۶ درصد، کاهش خواهد یافت. اعمال تغییرات بارندگی و دما تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره آتی ۲۰۲۲-۲۰۴۰ در سه سناریوی RCP بر روی مدل آب

مراجع

- Akhtar, M., Ahmad, N., Booi, M.J., 2008. The impact of climate change of the water resources of Hidukush-Karakorum region under different glacier coverage scenarios. *Journal of Hydrology* 355, 148-163. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.015>.
- Anderson, M.P., Woessner W.W., Hunt R.J., 2015. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport: Academic press 555 P. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21563-7>.
- Bates, B., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Palutikof, J., 2008. Climate change and water, technical paper VI of the Intergovernmental panel on Climate Change. Intergovernmental panel on Climate Change Secretariat Geneva, 210 P.
- Boughariou, E., Allouche, N., Jmal, I., Mokadem, N., Ayed, B., Hajji, S., Khanfir H. Bouri, S., 2018. Modeling aquifer behavior under climate change and high consumption: Case study of the Sfax region, southeast Tunisia. *Journal of African Earth Sciences* 141, 118-129. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.02.006>.
- IPCC. 2014 Synthesis Report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change 151(10.1017).
- Chitsazan, M., Rahmani, G. Neyamadpour, A., 2015. Forecasting groundwater level by artificial neural networks as an alternative approach to groundwater modeling. *Journal of the Geological Society of India* ۸۵, ۹۸-۱۰۶. <https://doi.org/10.1007/s12594-015-0197-4>.
- Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T. Puma, M.J., 2017. Groundwater depletion embedded in international food trade. *Nature* 543, 700-704. <https://doi.org/10.1038/nature24664>.
- Dehn, M., Bürger, G., Buma, J., Gasparotto, P., 2000. Impact of climate change on slope stability using expanded downscaling. *Engineering Geology* 55(3), 193-204. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00123-4).

- Doll, P., 2009. Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment. *Environmental Research Letters*. 4, 036006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/3/035006>.
- Doll, P., Müller, S.H., Schuh, C., Portmann, F.T., Eicker, A., 2014. Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites. *Water Resource* 50, 5698–5720. <https://doi.org/10.1002/2014WR015595>.
- Ehteram, M., Kalantari, Z., Ferreira, C.S., Chau, K.W., 2022. Prediction of future groundwater levels under representative concentration pathway scenarios using an inclusive multiple models coupled with artificial neural network. *Journal of water and Climate Change* 13(10), 20-36. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.198>.
- Farrokhi, A., Farzin, S., Mousavi, S. F., 2021. Meteorological drought analysis in response to climate change conditions, based on combined four-dimensional vine copulas and data mining (VC-DM). *Journal of Hydrology* 603, 127-135. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127135>.
- Feng, W., Zhong, M., Lemoine, J.M., Biancale, R., Hsu, H.T., Xia, J., 2013. Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements. *Water Resource* 49, 2110–2118. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20192>.
- Ferguson, G., Gleenson, T., 2012. Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Journal of Climate Change* 2, 342–345. <https://doi.org/10.1038/nclimate1413>.
- Garduno, H., Foster, S., 2010. Sustainable groundwater irrigation approaches to reconciling demand with resources. *GW•MATE (Groundwater Management Advisory Team), Strategic Overview Series Number 4* <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.010>.
- Ghanbari - Adivi, E., Ehteram, M., Farrokhi, A., Sheikh Khozani, Z., 2022. Combining radial basis function neural network models and inclusive multiple models for predicting suspended sediment loads. *Water Resources Management* 36, 1–30. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03256-4>.
- Ghazavi, R., Ebrahimi, H. 2018. Predicting the impacts of climate change on groundwater recharge in an arid environment using modeling approach. *International Journal of Climate Change Strategies and Management* 11, 88-99. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-04-2017-0085>.
- Goderniaux, P., Brouyère, S., Blenkinsop, S., Burton, A., Fowler, H.J., Orban, P., Dassargues, A., 2011. Modeling climate change impacts on groundwater resources using transient stochastic climatic scenarios. *Water Resources Research* 47, W12516. <http://doi.org/10.1029/2010WR010082>.
- Graham, P., Hagemann, S., Juan, S., Beniston, M., 2007. On interpreting hydrological change from regional climate models. *Journal of Climate Change* 81, 97-122. <http://doi.org/10.1007/s10584-006-9217-0>.
- Harbaugh, A.W., 2005. MODFLOW-2005: The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model – The Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Modular Techniques and Methods 6-A16, USGS Numbered Series. Report Citation for MODFLOW-2005. <https://doi.org/10.3133/tm6A16>.
- Konikow, L. F., Kendy, E., 2005. Groundwater depletion: a global problem. *Hydrogeology Journal* 13, 317-320.
- Kumar, C., 2012. Climate change and its impact on groundwater resources. *International Journal of Engineering and Science* 1(5), 43-60. <https://doi.org/10.1007/S10040-004-0411-8>.
- Malekinezhad, H., Bandkooki, F.B., 2018. Modeling impacts of climate change and human activities on groundwater resources using MODFLOW. *Journal of Water and Climate Change* 9(1), 156-177. <https://doi.org/10.2166/WCC.2017.147>.
- Meddi, M., Boucefiane A., 2013. Climate change impact on groundwater in Cheliff-Zahrez Basin (Algeria). *APCBEE Procedia* 5, 446-450. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2013.05.077>.
- Mirzaee, S.Y., Amiri, R., Chitsazan, M., Nadri, N., 2020. The Combination of Mathematical and Stochastic Models to Improve the Results of Groundwater Models. *Irrigation Sciences and Engineering (JISE)* 43(3), 57-70. <https://doi.org/10.22055/jise.2018.22820.1629>.
- Mirzaee, S.Y., Zarasvandi, A., Orang, M., 2014. Geochemical effect of Asmari oil reservoirs on Masjid Sulaiman karst water resources. *Advanced Applied Geology* 5(4), 1-14.
- Scibek, J., Allen D., 2006. Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels. *Water Resources Research* 42(11), 205-263. <https://doi.org/10.1029/2005WR004742>.

- Seififi, A., Ehteram, M., Soroush, F., Haghighi, A.T., 2022. Multi-model ensemble prediction of pan evaporation based on the Copula Bayesian model averaging approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 114, 105-124. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105124>.
- Semenov, M.A., Stratonovitch, P., 2010. Use of Multi- model Ensembles from Global Climate Model for Assessment of Climate Change Impacts *Climate Research* 4, 1-14. <https://www.jstor.org/stable/24895285>.
- Soltani, F., Javadi, S., Roozbahani, A., Massah Bavani, A.R., Lotfifi, S., 2022. Simulation of surface water-groundwater interaction using MODFLOW-OWHM (case study: Shazand plain). *Iranian journal of Ecohydrology* 9(1), 199–210. <https://doi.10.22059/IJE.2022.336586.1595>.
- Shrestha, S., Bach, T.V., Pandey, V.P., 2016. Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Environmental Science & Policy* 61, 1-13. <https://doi.10.1016/j.envsci.2016.03.010>.
- Tanachaichoksirikun, P., Seeboonruang, U., Saraphirom, P., 2018. Impact of climate change on the groundwater sustainability in the lower Chao Phraya basin, Thailand. *MATEC Web of Conferences, EDP Sciences*. <https://doi.10.1088/1757-899X/639/1/012032>.
- Tigabu, T.B., Wagner, P.D., Hörmann, G., Kiesel, J., Fohrer, N., 2021. Climate change impacts on the water and groundwater resources of the Lake Tana Basin, Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change* 12(5), 1544-156. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.126>.
- Turkghashqainejad, S., Chitsazan, M., Mirzaee, S.Y., 2015. Estimation of hydrodynamic parameters of aquifer using geoelectrical studies (case study: Golgir aquifer, Khuzestan). *Journal of Hydrogeology* 1(2), 24-37.
- Ouyang, Y., Jin, W., Grace, J., Obalum, S.E., Zipperer, W. C., Huang, X., 2019. Estimating impact of forest land on groundwater recharge in a humid subtropical watershed of the Lower Mississippi River Alluvial Valley. *Journal of Hydrogeology: Regional Studies* 26, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100631>.
- Ouyang, Y., Wan, Y., Jin, W., Leininger, T. D., Feng, G., Han, Y., 2021. Impact of climate change on groundwater resource in a region with a fast depletion rete: the Mississippi. *Journal of water and Climate Change* 12(6), 2245-2255. <https://Doi.org/10.2134/jeq2013.09.0355>