

Research Paper

Evaluating the Effect of Climate Change on Groundwater Level Changes in the Sari-Neka Coastal Aquifer

Sajad Najafi¹,Ahmad Sharafati^{2*},Hamid Kardan Moghaddam³

¹ MSc, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. (sajad.najafi@srbiau.ac.ir)

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. (*Correspondence: asharafati@gmail.com)

³ Assistant Professor, Water Research Institute, Ministry of Energy Water Research Institute, Tehran, Iran. (hkardan@ut.ac.ir)



10.22125/IWE.2022.162660

Received:
May 25, 2021
Accepted:
August 31, 2021
Available online:
December 11, 2022

Keywords:
Climate Change,
CMIP5, Coastal
Aquifer,
Groundwater,
MODFLOW

Abstract

Climate change is inevitable and has different effects on water resources in each region. Due to the large population and high exploitation potentials in terms of agriculture, drinking, industry, etc., the study of the effects of climate change on the groundwater level of the Sari-Neka coastal aquifer is of great importance. In this regard, initially using the MODFLOW model, the quantitative model of groundwater in the region for the base period (from October 2010 to September 2014) was calibrated. The correlation coefficient of 0.98 in the unsteady state showed the high accuracy of quantitative modeling of the aquifer. Then, the LARS-WG model was calibrated for the base period (2000-2019). The correlation coefficient for precipitation, minimum temperature, and maximum temperature was 0.97, 0.99, and 0.99, respectively. Indicates the high accuracy of the calibrated model. To simulate the above climate parameters using CMIP5 models including HadGEM2-ES, MIROC5, MPI-ESM-MR, EC-EARTH, and GFDL-CM3 under two emission scenarios RCP4.5 and RCP8.5 for the next period (2040-2021) was paid. In general, the results showed an increase in rainfall in most months of the year and relative changes in temperature in the future. Finally, the impact of climate change on the groundwater level of the region under different models and scenarios of CMIP5 for the future (2021-2040) was investigated. The results showed that in 8 of 10 cases, the groundwater level in the future period will be higher than the base period, which can be used for the development of agriculture and industry in the region.

* **Corresponding Author:** Ahmad Sharafati

Address: Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Email: asharafati@srbiau.ac.ir
Tel: +989122861557

1. Introduction

Developments have led to an increase in greenhouse gases and climate change. Climate change has caused a change in the spatial and temporal distribution of precipitation and some changes in this hydrological cycle (Hamze et al, 2018). Water resources are one of the most important sectors that have been affected by the phenomenon of climate change and have created direct and indirect effects (Ahmed, 2020). Therefore, it is very important to study and evaluate this situation to make decisions in the future of groundwater resource management. This issue becomes important when the average rainfall of the country in the global average is less and more the volume of exploitation of groundwater resources. Groundwater resources are less affected by climate change in the short term due to their discharge and feeding conditions (Amanambu et al, 2020).

The purpose of this study is to evaluate the effects of climate change on the status of groundwater resources using CMIP5 models for the Sari-Neka coastal aquifer. Although this aquifer is located in the northern part of Iran, the high volume of water resources exploitation in this region has caused a decreasing trend in groundwater level. On the other hand, studies conducted in this region have shown that there is a trend of increasing rainfall in future periods. Therefore, the condition of the aquifer should be examined to make a decision based on changes in the groundwater level, which has been studied in this regard.

2. Materials and Methods

In this study, LARS-WG v 6 was initially used by entering daily data on precipitation, minimum temperature, maximum temperature, and solar radiation for 20 years of the base period (2000-2019), and the model was calibrated. Then using HadGEM2-ES, MIROC5, MPI-ESM-MR, EC-EARTH, and GFDL-CM3 models under 2 emission scenarios RCP4.5 and RCP8.5 were used to simulate climate variables for the future period (2021-2040). Then the results were analyzed. After climate simulation, groundwater flow simulation in the aquifer was performed using the MODFLOW model in GMS v 10 software. In this regard, model calibration for groundwater level was performed from October 2010 to September 2014 in 48 monthly time steps. The calibrated model was validated using available information from October 2014 to September 2015 for groundwater level. Then we evaluated the effects of climate change in this aquifer for the future period based on CMIP5 models.

3. Results

The results indicate an increase in rainfall in most months of the year and relative changes in minimum and maximum temperature in the coming period. Using the results obtained from the climate change conditions of the region, the simulation of the groundwater level under different models and scenarios of the fifth climate change report for the future period (2021-2040) was done. The results showed that in 8 of 10 investigated cases, the groundwater level will increase in the future period compared to the base period, and only according to the prediction of the MPI-ESM-MR model under the RCP8.5 scenario, its trend will decrease. While the MIROC5 model under the RCP8.5 scenario simulated the groundwater level for the future period with almost no change compared to the base period.

In general, due to the uncertainty of climate models and scenarios, the level of groundwater in the Sari-Neka coastal aquifer may increase for the coming period (2021-2040), which can be used for the development of agriculture and industry in the region.

4. Discussion and Conclusion

1- Calibration of LARS-WG model:

Using the LARS-WG model, precipitation, minimum temperature, and maximum temperature were simulated for the base period (2000-2019). The results were analyzed. There was little difference between the observed and simulated data.

2- Simulation of climate parameters for the next period (2021-2040):

Simulations for the next period (2021-2040) were performed using CMIP5 models including HadGEM2-ES, MIROC5, MPI-ESM-MR, EC-EARTH, and GFDL-CM3 under two emission scenarios RCP4.5 and RCP8.5. The results of precipitation simulations for the next period show that the average monthly precipitation for March, May, June, July, October, November, and December is significantly higher than the base period. In other months of the year, according to most models and scenarios, an

increase in rainfall is forecast in the future. Also, according to most of the models and scenarios used, in the next period, there will be a relative increase in the average monthly minimum temperature and maximum temperature. After examining the changes in climate parameters under different models and scenarios, it is concluded that the average monthly rainfall will increase in the next period (2021-2040).

3- The impact of climate change on the groundwater level of the Sari-Neka aquifer for the future period (2021-2040):

At this stage, using climatic data for the next period, the status of groundwater resources in the Sari-Neka region was analyzed. The aquifer hydrograph was studied to evaluate the effect of climate change on its quantitative status. Despite the downward trend of groundwater level in the base period, according to EC-EARTH, GFDL-CM3 and HadGEM2-ES models under both RCP4.5 and RCP8.5 scenarios and MIROC5 and MPI-ESM-MR models under the RCP4.5 scenario, in the next period (2021-2040) the groundwater level in the aquifer will increase. The MIROC5 model under the RCP8.5 scenario predicts a similar trend to the base period and the MPI-ESM-MR model under the RCP8.5 scenario predicts a downward trend compared to the base period. In general, it can be concluded that the groundwater level of the Sari-Neka coastal aquifer will increase in the coming period (2021-2040). These findings can be used for the development of agriculture and industry in the region.

5. Six important references

- 1) Ahmed, M., 2020. Introduction to Modern Climate Change. Andrew E. Dessler: Cambridge University Press, 2011, 252 pp, ISBN-10: 0521173159. The Science of the Total Environment, 734, p.139397.
- 2) Amanambu, A.C., Obarein, O.A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S.S., Balogun, O., Oyebamiji, A. and Ochege, F.U., 2020. Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. Journal of Hydrology, p.125163.
- 3) Hamze, S., Bagherpoor, Z., Delghandi, M. and KardanMoghaddam, H., 2018. Risk assessment of the effects of climate change on groundwater level (Case study: Gotvand-Aghili aquifer). Journal of Echo Hydrology. 5 (1): 111-122 in Persian.
- 4) Nasiri, M., Hamidi, M. and KardanMoghaddam, H., 2020. Simulation of saline water progression in coastal aquifers (Case study: South shores of the Caspian Sea. Journal of Water and Soil. 34 (2): 269-286 in Persian.
- 5) Toure, A., Diekkrüger, B. and Mariko, A., 2016. Impact of climate change on groundwater resources in the Klela basin, southern Mali. Hydrology, 3(2): 17.
- 6) Wang, S. J., Lee, C. H., Yeh, C. F., Choo, Y. F., & Tseng, H. W. (2021). Evaluation of climate change impact on groundwater recharge in groundwater regions in Taiwan. Water (Switzerland), 13(9).

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

Not applicable.

ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر تغییرات تراز آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی ساری نکا

سجاد نجفی^۱، احمد شرافتی^{۲*}، حمید کاردان مقدم^۳

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۰۳/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹

مقاله پژوهشی

چکیده

تغییر اقلیم امری اجتناب ناپذیر است و تاثیرات متفاوتی بر منابع آب هر منطقه دارد. به دلیل جمعیت زیاد و پتانسیل‌های بالای بهره‌برداری از نظر کشاورزی، شرب، صنعت و غیره بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی آبخوان ساحلی ساری-نکا از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا، در ابتدا با استفاده از مدل MODFLOW، آب زیرزمینی منطقه برای دوره پایه (از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۳) و اسنچی شد که ضریب تبیین ۰/۹۸ در حالت غیرماندگار نشان از دقت بالای مدل‌سازی کمی آبخوان داشت. سپس به واسنچی مدل LARS-WG برای دوره پایه (۲۰۱۹-۲۰۰۰) پرداخته شد که مقدار ضریب تبیین برای پارامترهای بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر به ترتیب برابر با ۰/۹۷، ۰/۹۹ و ۰/۹۹ بدست آمد که این مقادیر بیانگر دقت بالای مدل واسنچی شده می‌باشد. در ادامه به شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی مذکور با استفاده از مدل‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم شامل HadGEM2-ES، MIROC5، MPI-ESM-MR، EC-EARTH و GFDL-CM3 تحت ۲ سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) پرداخته شد. به طور کلی نتایج حاکی از افزایش مقدار بارندگی در اکثر ماه‌های سال و تغییرات اندک مقدار دما در دوره آتی بود. در نهایت به بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی منطقه تحت مدل‌ها و سناریوهای مختلف گزارش پنجم تغییر اقلیم برای دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) پرداخته شد. نتایج نشان داد که در ۸ حالت از ۱۰ حالت بررسی شده، تراز آب زیرزمینی در دوره آتی نسبت به دوره پایه افزایشی خواهد بود که از این امر می‌توان در جهت توسعه کشاورزی و صنعت در منطقه بهره برد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان ساحلی، آب زیرزمینی، تغییر اقلیم، مدل‌های CMIP5، مدل MODFLOW

^۱ کارشناس ارشد - گروه مدیریت ساخت و آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. (sajad.najafi@srbiau.ac.ir)
۰۹۱۹۳۳۶۵۱۶۵

^۲ استادیار - گروه مدیریت ساخت و آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. (* نویسنده مسئول مکاتبات: asharafati@gmail.com)، ۰۹۱۲۲۸۶۱۵۵۷

^۳ استادیار، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران. (hkardan@ut.ac.ir)، ۰۹۱۵۵۶۱۱۹۱۲



مقدمه

رشد و توسعه‌های انجام گرفته با افزایش گازهای گلخانه‌ای سبب وقوع تغییر اقلیم شده است. تغییر اقلیم با توجه به ذات افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در جو، باعث تغییر در توزیع مکانی و زمانی بارش و تغییرات حدی در این چرخه هیدرولوژی شده است (حمزه و همکاران، ۱۳۹۷). منابع آب یکی از مهم‌ترین بخش‌هایی است که تحت تأثیرات این پدیده قرار گرفته و تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم را ایجاد کرده است. تغییرات ایجاد شده در مناطق خشک که بارش یکی از فرآیندهای اصلی در تامین منابع آب است، بسیار تاثیرگذار بوده و سبب کاهش و در برخی نقاط افزایش حجم بارش‌ها شده است (Ahmed, 2020). لذا بررسی و ارزیابی این وضعیت جهت تصمیم‌گیری در شرایط آبی بسیار حائز اهمیت است. اهمیت این موضوع زمانی مشخص می‌شود که متوسط بارش کشور از میانگین جهانی کمتر و بیشتر حجم بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی است. منابع آب زیرزمینی با توجه به شرایط تخلیه و تغذیه آن، در کوتاه‌مدت کمتر تحت تاثیر تغییر اقلیم قرار می‌گیرند اما در دوره‌های میان‌مدت و بلندمدت تاثیر می‌پذیرند (Amanambu et al., 2020).

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی حوضه Klela توسط Toure et al. (2016) انجام شد. بدین منظور از مدل MODFLOW برای شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی و از سناریوی RCP4.5 برای بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر آبخوان مورد نظر استفاده شد. تغذیه آبخوان مورد مطالعه با استفاده از مدل EC-EARTH به میزان ۱۶۵/۳ میلی‌متر در سال برآورد و از آن به عنوان عامل ورودی به مدل آب زیرزمینی استفاده شد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل آب زیرزمینی، سناریوی RCP4.5 بر مدل اعمال شد. نتایج نشان داد که تراز آب زیرزمینی در طول زمان افت کرده و باعث کسری مخزن آب زیرزمینی می‌شود.

اثرات تغییر اقلیم بر تغییرات آب زیرزمینی در جنوب شرق اروپا توسط Nistor et al. (2019) ارزیابی شد. مدل‌های آب و هوایی و داده‌های پوشش زمین در دو زمان حال حاضر (۲۰۱۱-۲۰۴۰) و آینده (۲۰۴۱-۲۰۷۰)، برای ارزیابی اثر آب و هوا در منابع آب زیرزمینی استفاده شده است. روش "اجرای جدید فضایی - زمانی بر مناطق - تأثیر آب و هوا بر روی آب زیرزمینی-NISTOR" (CEGW) برای این مطالعه پیشنهاد شده است. در آینده، مناطقی با تأثیر آب و هوایی بسیار زیاد در افزایش آب‌های زیرزمینی عمدتاً در ضلع شمالی، شرقی و جنوب شرقی منطقه جنوب شرقی اروپا قرار دارند. دیناریک و کوه‌های آلپ مناطقی با تأثیر آب و هوای کم و بسیار کم بر آب‌های زیرزمینی هستند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که حدود نیمی از قلمرو اروپای جنوب شرقی با خشکسالی روبرو است و محیط زیست، آب زیرزمینی و اکوسیستم‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی برانگیخته می‌شوند.

در تحقیقی که Rodríguez-Huerta et al. (2020) انجام دادند، تأثیر تغییر اقلیم در تغذیه آب‌های زیرزمینی در شبه جزیره یوکاتان در مکزیک مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش از داده‌های تاریخی مربوط به سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۰ و مدل‌های اقلیمی از پنج مدل گردش عمومی و سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 برای بررسی تغییر اقلیم در افق نزدیک (۲۰۱۵-۲۰۳۹) استفاده شد. با توجه به عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی تحت سناریوهای مختلف RCP و تبخیر و تعرق، متوسط ماهانه تغذیه آب زیرزمینی در دوره آبی تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۲۳ و ۲۰ درصد کاهش را نشان می‌دهد. نتیجه‌ای که تعادل اجتماعی-اکولوژیکی منطقه را تهدید می‌کند.

تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی در تایوان توسط Wang et al. (2021) بررسی شد. در این مطالعه تغذیه آب زیرزمینی در ۱۰ منطقه آب زیرزمینی در تایوان، تحت سناریوهای مختلف اقلیمی برآورد شد. همچنین معادلات رگرسیون بین بارندگی و تغذیه آب‌های زیرزمینی

هدف از انجام این پژوهش ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم برای آبخوان ساحلی ساری-نکا است. این آبخوان اگرچه در بخش شمالی کشور قرار دارد اما حجم بالای بهره‌برداری از منابع آب در این منطقه، سبب روند کاهشی تراز آب زیرزمینی شده است. از طرفی با توجه به مطالعات ذکر شده، تغییر اقلیم می‌تواند سبب افزایش میزان بارش و به دنبال آن افزایش تراز آب زیرزمینی در دوره‌های آتی نیز باشد. بنابراین باید وضعیت کمی آبخوان جهت تصمیم‌گیری براساس تغییرات تراز آب زیرزمینی مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد که این مطالعه در این راستا انجام شده است.

مواد و روش‌ها

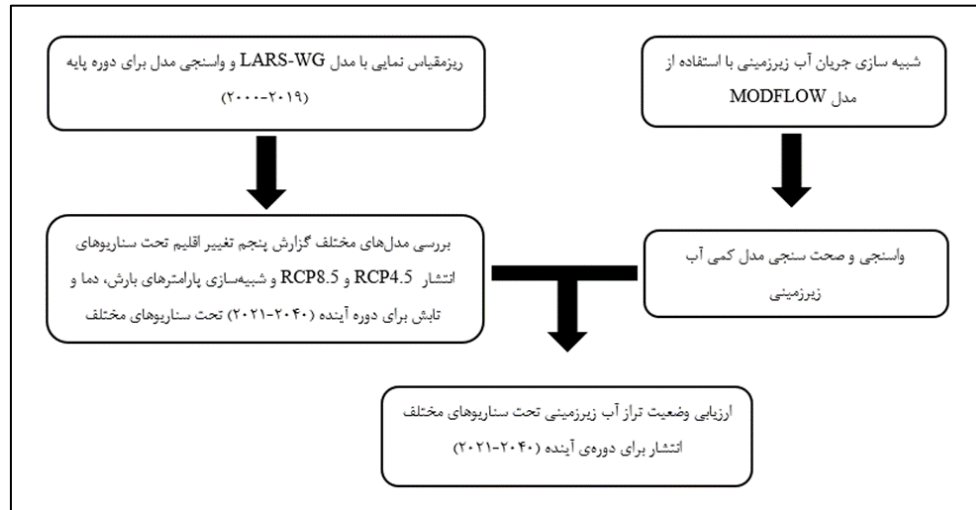
روش تحقیق

با توجه به هدف این پژوهش، روش تحقیق به صورت شکل (۱) ارائه می‌شود. بر این اساس، پس از بررسی منطقه مورد مطالعه، به کمک مدل مولد داده LARS-WG متغیرهای اقلیمی برای دوره‌ی پایه (۲۰۰۰-۲۰۱۹) آنالیز شده و سپس با استفاده از مدل‌های مختلف گزارش پنجم تغییر اقلیم و تحت سناریوهای مختلف انتشار برای دوره‌ی آینده در سال‌های (۲۰۲۱-۲۰۴۰) شبیه‌سازی می‌شوند. پس از شبیه‌سازی اقلیمی، شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان با استفاده از مدل MODFLOW در نرم‌افزار GMS v 10 انجام می‌شود. در نهایت با استفاده از نتایج ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های اقلیمی تحت سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای، پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی انجام می‌گیرد.

برای این مناطق ایجاد شد. نتایج برآورد تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد که میزان تغذیه آب زیرزمینی با توجه به مدل‌ها و سناریوهای مختلف تغییر اقلیم می‌تواند به طور متوسط ۳۲/۶ درصد افزایش یا ۲۸/۹ درصد کاهش نسبت به دوره پایه را تجربه کند. بنابراین تأثیر تغییرات اقلیمی در سیستم‌های آب زیرزمینی ممکن است مثبت باشد.

رسایی و همکاران (۱۳۹۹) به ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های تغییر اقلیم در شبیه‌سازی تراز آبخوان هشتگرد پرداختند و نتایج نشان داد که میزان عدم قطعیت در سناریوهای بدبینانه نسبت به سناریوهای خوشبینانه افزایش دارد. نتایج کلی بدست آمده نشان می‌دهد که مطالعات در راستای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بوده و ارزیابی راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم انجام نشده است.

امرایی (۱۳۹۹)، در تحقیقی به بررسی تأثیر خشکسالی‌های ناشی از تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی دشت بیرجند پرداخت. در این راستا پارامترهای اقلیمی برای دوره (۲۰۶۵-۲۰۸۰) با استفاده از خروجی مدل HadGEM2-ES از طریق مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG برای موقعیت ایستگاه بیرجند تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 شبیه‌سازی شد و براساس مدل رگرسیون توسعه داده شده، سطح ایستابی آب شهرستان بیرجند نیز شبیه‌سازی شد. نتایج بیانگر آن بود که در دوره پایه (۱۳۷۰-۱۳۹۵) سطح ایستابی آب منطقه با شیب سالانه ۴۷ سانتی‌متر در سال روند کاهشی داشته است. همچنین نتایج مدل ریزمقیاس‌نمایی اجرا شده روی داده‌های HadGEM2-ES بیانگر آن بود که در دوره (۲۰۳۵-۲۰۶۵) تحت هر دو سناریوی مذکور سطح آب زیرزمینی منطقه بین ۱۰ تا ۱۳ متر نسبت به دوره پایه افت خواهد داشت که ناشی از افزایش تبخیر و تعرق و به تبع آن کاهش بارش موثر خواهد بود.

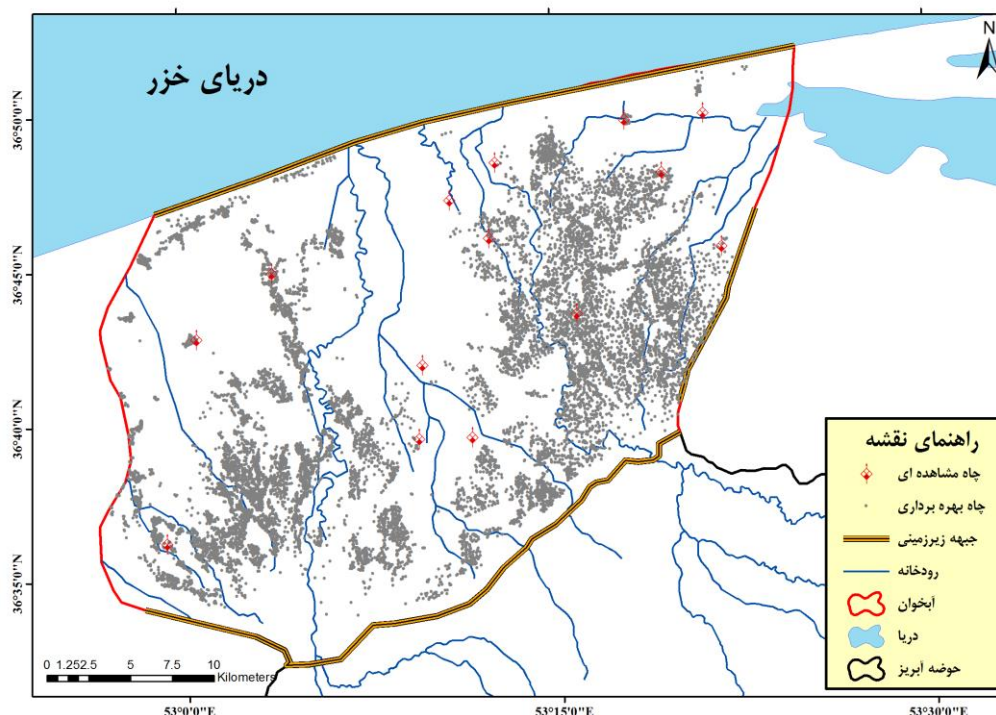


شکل (۱): روش تحقیق

آب زیرزمینی بالا است و به سمت شمال در اراضی میانی دشت و پایاب دشتی فواصل منحنی‌ها افزایش یافته و شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. سد مخزنی گلورد در استان مازندران، ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی شهر نکا، بر روی رودخانه نکارود واقع شده است. این سد در منطقه‌ای با مشکلات جدی آب قرار دارد؛ منطقه شرق مازندران منطقه‌ای کم‌آب است و تنها دشت ممنوعه‌ی آب زیرزمینی شمال کشور در این منطقه قرار گرفته‌است و به واسطه‌ی همین محدودیت‌ها، سه شهرستان بهشهر، نکا و گلوگاه همواره مشکلات آب شرب و کشاورزی داشته‌اند (Nasiri et al, 2021). موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است.

منطقه‌ی مورد مطالعه

محدوده‌ی مطالعاتی ساری-نکا بین طول‌های جغرافیایی ۵۲°۳۴ تا ۵۴°۴۴ شرقی و ۳۵°۵۶ تا ۳۶°۵۲ شمالی در شمال کشور ایران قرار دارد. مساحت این محدوده ۶۹۳۸/۵ کیلومترمربع است که ۹۷۰ کیلومترمربع آن دشت و بقیه (۵۸۷۷/۸ کیلومترمربع) اراضی آن ارتفاعات است. سه رودخانه‌ی اصلی تجن، نکارود و سیاهرود آبخوان ساحلی را تغذیه می‌کنند. منحنی‌های تراز آب زیرزمینی در این دشت شرقی- غربی بوده و فواصل منحنی‌های هم‌تراز سطح آب زیرزمینی در اراضی مخروط افکنه‌ای و جنوبی دشت کم بوده و شیب هیدرولیکی



شکل (۲): منطقه مورد مطالعه ساری-نکا

شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی و ریزمقیاس نمایی

بررسی مدل‌های GCM، سناریوهای ارائه شده در مجامع علمی و شبیه‌سازی آینده بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم از جمله ضروریات اولیه پژوهش‌های مرتبط با تغییر اقلیم است (Hamidov et al, 2020). یکی از مدل‌هایی که می‌تواند این تغییرات را بررسی کند و شبیه سازی برای آینده را انجام دهد، مدل LARS-WG است. این مدل از روش‌های آماری تولید داده‌های اقلیمی استفاده می‌کند. این مدل از دسته مدل‌های weather generator می‌باشد که با استفاده از زنجیره مارکف به تولید داده می‌پردازد.

مدل LARS-WG برای شبیه‌سازی وضع هوا به مقادیر روزانه بارندگی، دمای حداقل، دمای حداکثر و تابش خورشید (یا ساعات آفتابی) نیاز دارد (Guevara-Ochoa et al, 2020). ابتدا مشخصات آماری مقادیر روزانه داده‌های مشاهداتی در مکان معین تحلیل شده و سپس از این مشخصات به همراه یک مولد اعداد شبه تصادفی برای ساخت سری‌های درازمدت داده‌های روزانه

این پارامترها با توجه به مدل‌ها و سناریوهای مختلف استفاده می‌شود.

در این پژوهش از نرم‌افزار LARS-WG v6 استفاده شد. ابتدا داده‌های روزانه بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و ساعات آفتابی برای ۲۰ سال دوره پایه بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ وارد مدل شد. با توجه به مرکزیت ایستگاه سینوپتیک ساری که دارای سری زمانی مناسب آمار هواشناسی است، از آمار این ایستگاه جهت تحلیل وضعیت تغییر اقلیم استفاده شد.

همچنین در فایل‌ها با فرمت (.st) مشخصات منطقه مورد مطالعه شامل طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع را مشخص می‌کنیم تا مدل LARS-WG با استفاده از این اطلاعات به ریزمقیاس‌نمایی و تولید داده‌های اقلیمی بپردازد. در این مرحله به واسنجی مدل می‌پردازیم و نتایج حاصل از شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی را با مقادیر مشاهداتی مقایسه می‌کنیم. سپس با استفاده از گزارش پنجم تغییر اقلیم (CMIP5)، از مدل‌های HadGEM2-



صحت‌سنجی شد. ۱۴ حلقه چاه مشاهده‌ای به عنوان نقاط شاهد در آبخوان با داشتن سری زمانی مناسب در نظر گرفته شد. بخش جنوبی آبخوان جبهه‌های ورودی و بخش شمالی منتهی به دریا بخش خروجی جریان زیرزمینی با مرز آبخوان تعریف شد.

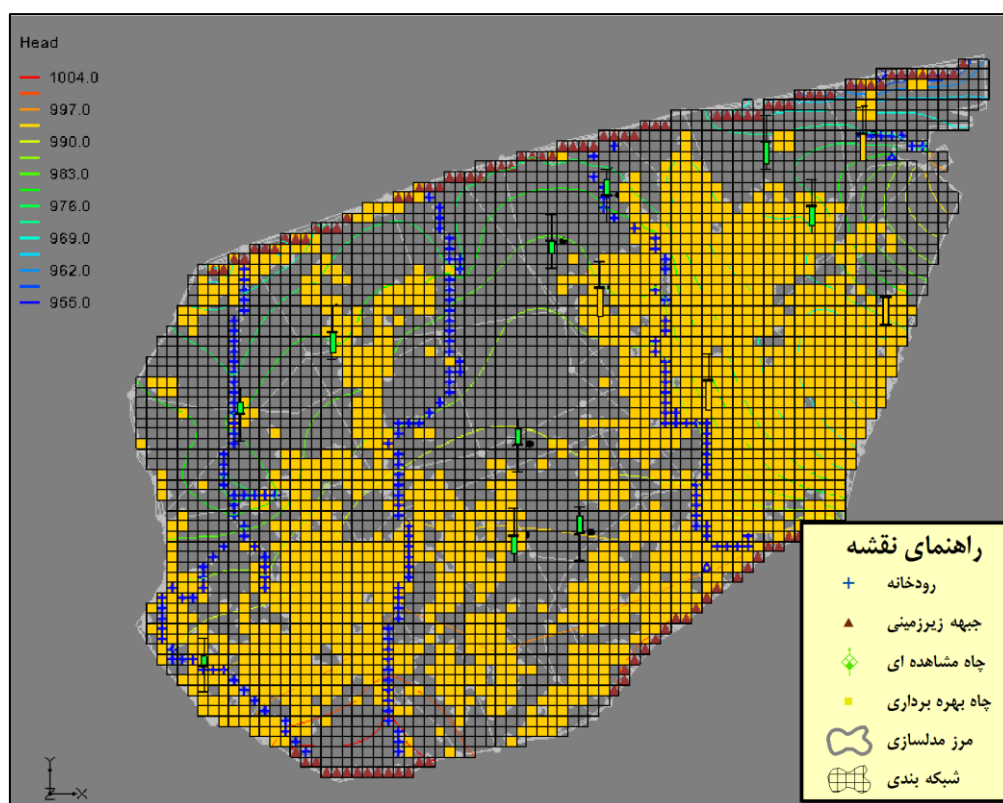
تعداد ۱۶۷۹۲ حلقه چاه بهره‌برداری در این محدوده وجود دارد که سالانه حجم بالغ بر ۱۸۰ MCM آب زیرزمینی از آن‌ها برداشت می‌شود. محاسبات بیلان منابع و مصارف این آبخوان به عنوان چارچوب کمی مدل مفهومی آبخوان در نظر گرفته شده است (گزارش بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی ساری-نکا، ۱۳۹۳).

پس از تهیه مدل مفهومی آبخوان، ساختار آبخوان که شامل تراز زمین، تراز اولیه آب زیرزمینی و سنگ بستر آبخوان است براساس اطلاعات موجود تهیه می‌شود. لایه سطح فوقانی آبخوان با استفاده از نقشه‌های مدل رقومی ارتفاع منطقه استخراج شده و پس از سه بعدی نمودن آن در مدل وارد شد. لایه سنگ کف آبخوان با استفاده از نقشه‌های ژئوفیزیک منطقه و عمق چاه‌های بهره‌برداری تعریف و در مدل اعمال شد. براساس اولین گام شبیه‌سازی مدل، تراز اولیه آب زیرزمینی به صورت یک لایه Raster در محیط GIS تهیه و به صورت نقاط تراز آب در مدل وارد می‌شود. با تبدیل این نقاط به Scatter و در نهایت Grid به عنوان تراز اولیه آب زیرزمینی در مدل معرفی می‌شود. در شکل (۳) مدل مفهومی آبخوان ساری-نکا نشان داده شده است. شبیه‌سازی آبخوان ساری-نکا براساس مطالعات نصیری و همکاران (۱۳۹۹) توسعه داده شده است.

ES, MIROC5, MPI-ESM-MR, EC-EARTH و GFDL-CM3 تحت ۲ سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 جهت شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی برای دوره آینده بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ استفاده می‌کنیم. در این مرحله برای عدد تصادفی (rand seed) مقدار ۷۸۷ را در نظر می‌گیریم. در نهایت به تحلیل نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی برای دوره آتی می‌پردازیم.

شبیه‌سازی کمی جریان آب زیرزمینی

مدل مفهومی جریان آب زیرزمینی یک چارچوب توصیفی و یکپارچه است که می‌توان با استفاده از آن، داده‌ها و اطلاعات مربوط به هیدرولوژی آب‌های زیرزمینی را تفسیر نمود. تهیه مدل مفهومی مستلزم تلفیق دقیق داده‌ها، اطلاعات و گزارش‌های مربوط به آبخوان و جریان آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی است (Moghaddam et al, 2021). براین اساس با استفاده از مدل MODFLOW در محیط نرم‌افزاری GMS v10 شبیه‌سازی وضعیت کمی آبخوان انجام گرفت. شبکه‌بندی آبخوان ساری-نکا با توجه به سطح آبخوان، اطلاعات موجود از آبخوان و اهداف مورد انتظار از مدل، با ابعاد ۵۰۰ * ۵۰۰ متر شبکه‌بندی شد. شبیه‌سازی آبخوان از مهر ماه ۱۳۸۹ با توجه به آخرین بیلان منابع و مصارف منطقه آغاز و برای مدت ۴ سال که شامل ۴۸ گام زمانی ماهانه است انجام گرفت. اولین گام شبیه‌سازی یعنی مهر ماه ۱۳۸۹ به عنوان حالت ماندگار و در حالت غیرماندگار از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۳ مورد بررسی قرار گرفت. مدل واسنجی شده با استفاده از اطلاعات در دسترس از مهر ۱۳۹۳ تا شهریور ۱۳۹۴ برای تراز آب زیرزمینی



شکل (۳): مدل مفهومی آبخوان ساری-نکا

میزان بارندگی سطح دشت را شامل می‌شود (گزارش بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی ساری-نکا، ۱۳۹۳). همچنین با توجه به بافت خاک دشت، وضعیت کربندی و شیوه آبیاری ۲۰ درصد از نرخ برداشت چاه‌های کشاورزی کاهش داده شد و تحت عنوان تغذیه از طریق آب برگشتی کشاورزی به مدل اعمال شد (وزارت نیرو، ۱۳۹۵).

ضریب همبستگی در مرحله واسنجی ماندگار، غیرماندگار و صحت‌سنجی در مدل کمی به ترتیب برابر ۰/۹۹، ۰/۹۸ و ۰/۹۷ به دست آمد. با توجه به میزان خطای مدل کمی در جدول (۱)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در کلیه ۱۴ چاه مشاهده‌ای مدل در شرایط ماندگار و غیرماندگار به ترتیب کمتر از ۶۲ و ۹۲ سانتی‌متر برآورد شده است. همچنین مقدار جذر میانگین مربعات خطا در مرحله صحت‌سنجی برابر ۹۵ سانتی‌متر به‌دست‌آمده است

پس از شبیه‌سازی اولیه مدل، واسنجی مدل در شرایط ماندگار انجام گرفت. با توجه به آنالیز حساسیت انجام شده، هدایت هیدرولیکی در این حالت مورد واسنجی قرار گرفت. واسنجی مدل ماندگار آب زیرزمینی با تغییر در مقادیر هدایت هیدرولیکی به گونه‌ای انجام پذیرفت که حداقل خطای ممکن بین سطح آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برقرار باشد (کاردان‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۶).

در شرایط غیرماندگار، متوسط ضریب هدایت هیدرولیکی ۱۰ متر در روز و حداکثر و حداقل آبدهی ویژه ۸ و ۱ درصد در نظر گرفته شد. با توجه به ناهمگنی آبخوان و متفاوت بودن بافت زمین‌شناسی منطقه در نقاط مختلف، محدوده مطالعاتی موردنظر به چندین ناحیه جهت اعمال هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه تقسیم‌بندی شد. میزان نفوذ از بارندگی در سطح ناحیه دشتی ساری-نکا نیز ۶۵/۸۲ میلی‌متر محاسبه شده است که ۹/۹۱ درصد از

جدول (۱): میزان خطای مدل کمی آب زیرزمینی (متر)

پارامتر	مدل ماندگار	مدل غیر ماندگار	صحت سنجی
میانگین خطا	۰/۳۵۹	-۰/۲۴۴	-۰/۱۶۲
میانگین مطلق خطا	۰/۵۵۳	۰/۷۵۱	۰/۷۷۲
جذر میانگین مربعات خطا	۰/۶۲۱	۰/۹۲۲	۰/۹۵۸

نتایج و بحث

واسنجی مدل LARS-WG

با استفاده از مدل LARS-WG، شبیه‌سازی سه پارامتر بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر برای دوره پایه بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ انجام گرفت. پس از شبیه‌سازی به منظور ارزیابی دقت نتایج بدست آمده، مقایسه‌ای با نتایج دوره پایه انجام شد که نتایج در جدول‌های (۲) تا (۴) ارائه شده است.

آنالیز خطای مدل شبیه‌سازی در حالت کلی حاکی از مناسب بودن ابزار شبیه‌سازی جهت تحلیل وضعیت تغییرات تراز آب زیرزمینی در این آبخوان است. معمولاً میزان خطای شبیه‌سازی براساس اهداف و نوع آبخوان قابل تعریف است اما استاندارد خاصی در مورد مقدار کمی خطا وجود ندارد. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) کمتر از یک متر با توجه به نوسانات کم آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی و همچنین نقش تغییر اقلیم بسیار حائز اهمیت است که نتایج به‌گونه‌ای واسنجی شده تا حداقل خطا ایجاد شود.

جدول (۲): مقایسه متوسط ماهانه بارش مشاهداتی و بارش شبیه‌سازی شده بر حسب میلی‌متر برای دوره پایه (۲۰۱۹-۲۰۰۰) در آبخوان ساری-نکا

ماه	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
بارش مشاهداتی	۷۱/۸۴	۶۷/۵۴	۸۲/۹۵	۴۷/۱۷	۲۹/۰۵	۲۶/۵۴	۲۶/۲۱	۳۳/۸۴	۶۴/۶۳	۱۰۷/۸۱	۱۱۴/۰۵	۷۹/۹۷
بارش شبیه‌سازی	۷۲/۲۶	۷۳/۱۵	۸۴/۹۳	۴۹/۵۲	۳۳/۶۱	۳۵/۶۴	۳۲/۱۸	۳۲/۰۴	۷۰/۰۳	۱۱۴/۸۷	۱۳۶/۶۲	۷۹/۶۱
تفاوت	۰/۴۲	۵/۶۱	۱/۹۸	۲/۳۵	۴/۵۶	۹/۱	۵/۹۷	-۱/۸	۵/۴	۷/۰۶	۲۲/۵۷	-۰/۳۶

جدول (۳): مقایسه متوسط ماهانه دمای حداقل مشاهداتی و دمای حداقل شبیه‌سازی شده بر حسب درجه سانتی‌گراد برای دوره پایه (۲۰۱۹-۲۰۰۰) در آبخوان ساری-نکا

ماه	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
دمای حداقل مشاهداتی	۳/۶۹	۴/۵۲	۷/۵۴	۱۱/۲۷	۱۶/۶۷	۲۰/۹۳	۲۳/۳۳	۲۳/۵	۲۰/۹۵	۱۵/۶۱	۹/۴۹	۵/۴۱
دمای حداقل شبیه‌سازی	۳/۵۲	۴/۵۸	۷/۵۸	۱۱/۵۸	۱۶/۵۴	۲۰/۶۸	۲۳/۴۱	۲۳/۴۱	۲۰/۹۱	۱۵/۵۴	۹/۸۵	۵/۵۲
تفاوت	-۰/۱۷	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۳۱	-۰/۱۳	-۰/۲۵	۰/۰۸	-۰/۰۹	-۰/۰۴	-۰/۰۷	۰/۳۶	۰/۱۱

جدول (۴): مقایسه متوسط ماهانه دمای حداکثر مشاهداتی و دمای حداکثر شبیه سازی شده بر حسب درجه سانتی-گراد برای دوره پایه (۲۰۱۹-۲۰۰۰) در آبخوان ساری-نکا

ماه	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
دمای حداکثر مشاهداتی	۱۳/۶۱	۱۳/۶۵	۱۷/۱۸	۲۰/۹۸	۲۶/۲۹	۳۰/۰۶	۳۲	۳۳/۰۲	۲۹/۸۵	۲۵/۱۹	۱۹/۰۸	۱۵/۰۵
دمای حداکثر شبیه سازی	۱۳/۷۶	۱۳/۵۲	۱۶/۶۹	۲۱/۱۷	۲۶/۰۱	۲۹/۷۸	۳۱/۸	۳۲/۹۱	۲۹/۷۵	۲۵/۱	۱۹/۱۸	۱۵/۱۸
تفاوت	۰/۱۵	-۰/۱۳	-۰/۴۹	۰/۱۹	-۰/۲۸	-۰/۲۸	-۰/۲	-۰/۱۱	-۰/۱	-۰/۰۹	۰/۱	۰/۱۳

مدل سازی است. در جدول های (۵) تا (۷) به بررسی آزمون آماری t و مقدار p-value آن برای سه پارامتر بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر می پردازیم.

از بررسی جداول فوق درمی یابیم که مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده توسط مدل LARS-WG برای دوره پایه به هم نزدیک بوده و این اختلاف اندک، بیانگر دقت مناسب

جدول (۵): نتایج آزمون آماری t برای پارامتر متوسط ماهانه بارش برای دوره پایه (۲۰۱۹-۲۰۰۰) در آبخوان ساری-نکا

ماه	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
t-statistics	-۰/۰۴۳	-۰/۰۶۴	-۰/۱۴۳	-۰/۲۷۹	-۰/۸۳۶	-۱/۲۹۵	-۰/۷۴۶	۰/۲۲۶	-۰/۴۲۹	-۰/۴۰۵	-۱/۱۹۵	۰/۰۲۵
p-values (t)	۰/۹۶۶	۰/۵۴۸	۰/۸۸۷	۰/۷۸۱	۰/۴۰۷	۰/۲	۰/۴۵۹	۰/۸۲۲	۰/۶۷	۰/۶۸۷	۰/۲۳۷	۰/۹۸

جدول (۶): نتایج آزمون آماری t برای پارامتر متوسط ماهانه دمای حداقل برای دوره پایه (۲۰۱۹-۲۰۰۰) در آبخوان ساری-نکا

ماه	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
t-statistics	۰/۶۴۴	-۰/۲۲۹	-۰/۱۸۹	-۱/۵۹۹	۰/۶۹۴	۱/۳۲۷	-۰/۴۶	۰/۶۷۳	۰/۲۸۱	۰/۳۳۸	-۱/۳۵۴	-۰/۴۵۲
p-values (t)	۰/۵۲۲	۰/۸۲	۰/۸۵	۰/۱۱۵	۰/۴۹	۰/۱۹	۰/۶۴۷	۰/۵۰۴	۰/۷۸	۰/۷۳۶	۰/۱۸۱	۰/۶۵۳

جدول (۷): نتایج آزمون آماری t برای پارامتر متوسط ماهانه دمای حداکثر برای دوره پایه (۲۰۱۹-۲۰۰۰) در آبخوان ساری-نکا

ماه	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
t-statistics	-۰/۴۱	۰/۴۲۷	۱/۰۷۹	-۰/۵۱۸	۰/۸۹۲	۰/۹۲۴	۰/۷۱۲	۰/۳۴۱	۰/۴۴۲	۰/۳۵۴	-۰/۳۲۱	-۰/۳۵۷
p-values (t)	۰/۶۸۳	۰/۶۷۱	۰/۲۸۵	۰/۶۰۷	۰/۳۷۶	۰/۳۵۹	۰/۴۷۹	۰/۷۳۴	۰/۶۶	۰/۷۲۵	۰/۷۴۹	۰/۷۲۲

دمای حداکثر بیشتر از ۰/۰۵ است، پس فرض H_0 پذیرفته می شود؛ این به معنی تطبیق مناسب داده های مشاهداتی و شبیه سازی و بیانگر دقت مناسب مدل برای آبخوان ساحلی ساری-نکا است.

در آزمون آماری t در جداول فوق، فرض H_0 به معنی تطابق داده های مشاهداتی و شبیه سازی در منطقه مورد مطالعه است. با توجه به این که مقدار P-value در همه ماه های سال و برای هر سه پارامتر بارش، دمای حداقل و



شامل MPI-ESM-MR, MIROC5, HadGEM2-ES و EC-EARTH تحت ۲ سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 انجام گرفت. در جدول‌های (۸) تا (۱۰) نتایج شبیه‌سازی برای دوره آبی برای سه پارامتر بارش، حداقل دما و حداکثر دما در ۵ مدل اقلیمی ارائه شده است.

شبیه‌سازی پارامترهای اقلیم در دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۱)

پس از بررسی نتایج شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی در دوره پایه، شبیه‌سازی برای دوره آینده بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ با استفاده از مدل‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم

جدول (۸): مقادیر متوسط ماهانه بارش تحت مدل‌ها و سناریوهای مختلف CMIP5 برای دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) بر حسب میلی‌متر

ماه	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
EC-EARTH [RCP4.5]	۷۵/۱۳	۶۸/۸۶	۹۲/۴۴	۴۶/۸۵	۳۴/۸۵	۳۰/۶۴	۳۰/۱۴	۳۰/۸۸	۵۹/۷۱	۱۰۹/۶۹	۱۳۵/۱۸	۹۷/۸
EC-EARTH [RCP8.5]	۷۳/۲۱	۶۴/۱۱	۹۶/۱۱	۴۸/۴۲	۳۷/۲۱	۳۲/۳۷	۳۵/۰۶	۳۸/۴۸	۶۹/۹۴	۱۲۶/۹۱	۱۳۶/۶۴	۹۹/۳۶
GFDL-CM3 [RCP4.5]	۶۹/۶۳	۵۸/۰۸	۷۶	۴۰/۲	۳۵/۷۵	۴۲/۴۳	۴۴/۳۸	۳۷/۴۷	۵۷/۶۳	۹۴/۰۶	۱۲۵/۹۶	۱۰۳/۷۷
GFDL-CM3 [RCP8.5]	۷۱/۱	۵۷/۷۲	۷۴/۳۴	۳۸/۷۵	۳۵/۳۷	۴۳/۳۱	۴۵/۱۴	۳۷/۲	۵۴/۸۹	۸۶/۸۳	۱۱۸/۹۱	۱۰۴/۵۲
HadGEM2-ES [RCP4.5]	۷۸/۰۹	۶۸/۲	۹۱/۴۸	۴۷/۳۶	۳۶/۹۲	۳۲/۸۵	۲۹/۲	۲۸/۶۱	۵۷/۹	۱۱۳/۳۵	۱۵۰/۶	۱۱۵/۴۷
HadGEM2-ES [RCP8.5]	۷۱/۰۶	۵۸/۷۸	۸۷/۵۲	۴۵/۸۵	۳۷/۰۴	۳۲/۲	۲۹/۵۴	۳۰/۲۵	۶۲/۸	۱۱۷/۱۱	۱۴۱/۹۲	۱۰۸/۰۷
MIROC5 [RCP4.5]	۷۴/۴۹	۶۳/۱	۸۴/۸۴	۴۷/۰۹	۳۸/۸۵	۳۲/۷۳	۲۷/۶۲	۲۸/۸۳	۶۲/۸۱	۱۲۵/۳۴	۱۲۹/۹۳	۹۸/۵۳
MIROC5 [RCP8.5]	۷۸/۲۸	۷۰/۱۱	۹۳/۶۶	۴۹/۰۴	۳۹/۹۶	۳۴/۵۴	۲۸/۶۶	۳۰/۴۸	۷۱/۶۶	۱۵۴/۰۵	۱۶۰/۰۱	۱۱۶/۳۹
MPI-ESM-MR [RCP4.5]	۶۹/۴۱	۵۶/۱۹	۸۶/۱	۴۸/۳۶	۳۹/۰۸	۲۹/۳۳	۲۴/۱۸	۲۶/۴۸	۵۴/۳	۹۶/۸۲	۱۲۲/۳۷	۱۰۰/۹۵
MPI-ESM-MR [RCP8.5]	۷۶/۲۴	۶۲/۰۵	۹۴/۵۳	۴۶/۱۴	۳۳/۹۵	۲۷/۴۳	۲۴/۵۱	۲۸/۷۱	۷۵/۲۶	۱۷۶/۶۴	۱۸۳/۳۵	۱۲۷/۴۸
دوره پایه (۲۰۱۹-۲۰۰۰)	۷۱/۸۴	۶۷/۵۴	۸۲/۹۵	۴۷/۱۷	۲۹/۰۵	۲۶/۵۴	۲۶/۲۱	۳۳/۸۴	۶۴/۶۳	۱۰۷/۸۱	۱۱۴/۰۵	۷۹/۹۷

جدول (۹): مقادیر متوسط ماهانه دمای حداقل تحت مدل‌ها و سناریوهای مختلف CMIP5 برای دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) بر حسب درجه سانتی‌گراد

ماه	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
EC-EARTH [RCP4.5]	۴/۳۳	۵/۱۹	۸/۱۸	۱۱/۸۷	۱۷/۳	۲۱/۲۸	۲۳/۹۷	۲۳/۸۹	۲۱/۵۵	۱۶/۰۹	۱۰/۳۴	۶/۳۱
EC-EARTH [RCP8.5]	۴/۲۳	۵/۲۹	۸/۳۴	۱۱/۸۴	۱۷/۱۲	۲۱/۱۸	۲۳/۹۹	۲۳/۹۷	۲۱/۶۷	۱۶/۲۳	۱۰/۴۴	۶/۲۲
GFDL-CM3 [RCP4.5]	۴/۱۶	۵/۰۲	۸/۴	۱۲/۴	۱۷/۸۴	۲۱/۸۱	۲۴/۶۴	۲۴/۹۹	۲۲/۳۶	۱۶/۴۶	۱۰/۵۵	۶/۴۱
GFDL-CM3 [RCP8.5]	۴/۴۱	۵/۴۹	۸/۹۱	۱۲/۷۶	۱۸/۰۹	۲۲/۱۵	۲۵/۰۹	۲۵/۰۹	۲۲/۴۲	۱۶/۴۹	۱۰/۵۶	۶/۴۸
HadGEM2-ES [RCP4.5]	۴/۲۴	۵/۰۶	۸/۲	۱۱/۹۵	۱۷/۳۳	۲۱/۳۲	۲۴/۰۲	۲۴/۲۶	۲۱/۸۶	۱۶/۴۵	۱۰/۷۳	۶/۵
HadGEM2-ES [RCP8.5]	۴/۴۹	۵/۴۵	۸/۷	۱۲/۴۱	۱۷/۷۲	۲۱/۷۵	۲۴/۵۹	۲۴/۶	۲۲/۱۸	۱۶/۷۱	۱۰/۹۸	۶/۷۲
MIROC5 [RCP4.5]	۳/۹۸	۴/۸۵	۸/۱۴	۱۱/۹۵	۱۷/۳۶	۲۱/۴	۲۴/۱۹	۲۴/۱۹	۲۱/۸۳	۱۶/۲۹	۱۰/۵	۶/۲۷
MIROC5 [RCP8.5]	۴/۰۴	۴/۹۷	۸/۰۸	۱۱/۷۳	۱۷/۱۱	۲۱/۲۶	۲۴/۱۷	۲۴/۴۴	۲۱/۹۵	۱۶/۳۲	۱۰/۳۷	۶/۱۲
MPI-ESM-MR [RCP4.5]	۳/۷۴	۴/۸۱	۸/۲۴	۱۱/۹۷	۱۷/۳۲	۲۱/۴۷	۲۴/۳۱	۲۴/۲۴	۲۱/۸۵	۱۶/۳۵	۱۰/۵۷	۶/۱۳
MPI-ESM-MR [RCP8.5]	۳/۹۲	۵/۱۷	۸/۳۹	۱۱/۹۹	۱۷/۳۸	۲۱/۵۳	۲۴/۳۶	۲۴/۳۴	۲۲/۰۱	۱۶/۴۹	۱۰/۵۴	۶/۰۱
دوره پایه (۲۰۰۰-۲۰۱۹)	۳/۶۹	۴/۵۲	۷/۵۴	۱۱/۲۷	۱۶/۶۷	۲۰/۹۳	۲۳/۳۳	۲۳/۵	۲۰/۹۵	۱۵/۶۱	۹/۴۹	۵/۴۱

جدول (۱۰): مقادیر متوسط ماهانه دمای حداکثر تحت مدل‌ها و سناریوهای مختلف CMIP5 برای دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) بر حسب درجه سانتی‌گراد

ماه	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
EC-EARTH [RCP4.5]	۱۴/۴۳	۱۴/۱۴	۱۷/۳۸	۲۱/۹۱	۲۶/۶۸	۲۹/۹۶	۳۲/۲۲	۳۳/۶۲	۳۰/۱۶	۲۵/۳۹	۱۹/۶۲	۱۵/۹۱
EC-EARTH [RCP8.5]	۱۴/۳۳	۱۴/۲۴	۱۷/۵۶	۲۱/۸۹	۲۶/۵	۲۹/۸۶	۳۲/۲۴	۳۳/۷	۳۰/۲۸	۲۵/۵۳	۱۹/۷۳	۱۵/۸۳
GFDL-CM3 [RCP4.5]	۱۴/۵۵	۱۴/۱۶	۱۷/۷۸	۲۲/۷۱	۲۷/۵۴	۳۰/۷۸	۳۳/۲۵	۳۴/۸۹	۳۱/۲۱	۲۵/۹۵	۲۰/۰۳	۱۶/۳۱
GFDL-CM3 [RCP8.5]	۱۴/۸۱	۱۴/۷۵	۱۸/۴۱	۲۳/۰۷	۲۷/۷	۳۱/۰۴	۳۳/۶	۳۵/۱۶	۳۱/۲۸	۲۵/۹۳	۱۹/۹۸	۱۶/۳۳
HadGEM2-ES [RCP4.5]	۱۴/۲۱	۱۳/۸۹	۱۷/۳۵	۲۲/۰۳	۲۶/۸۲	۳۰/۱۷	۳۲/۵۹	۳۴/۲۲	۳۰/۹۶	۲۶/۰۲	۱۹/۸۶	۱۵/۸۷
HadGEM2-ES [RCP8.5]	۱۴/۵۹	۱۴/۴۶	۱۸/۰۵	۲۲/۵۷	۲۷/۱۶	۳۰/۵۵	۳۳/۰۴	۳۴/۵۶	۳۰/۹۹	۲۶/۰۶	۲۰/۱۳	۱۶/۱۷
MIROC5 [RCP4.5]	۱۴/۱۸	۱۳/۹	۱۷/۴۹	۲۲/۱۲	۲۶/۸۲	۳۰/۱۸	۳۲/۵۹	۳۴/۰۵	۳۰/۵۱	۲۵/۶۴	۱۹/۸۵	۱۵/۹۷
MIROC5 [RCP8.5]	۱۴/۱۴	۱۳/۹۳	۱۷/۲۸	۲۱/۷۳	۲۶/۳۶	۲۹/۸۹	۳۲/۵۵	۳۴/۱۳	۳۰/۶۱	۲۵/۵۵	۱۹/۴۶	۱۵/۶۱
MPI-ESM-MR [RCP4.5]	۱۳/۹۲	۱۳/۹۸	۱۷/۶۶	۲۲/۰۵	۲۶/۶۸	۳۰/۳۱	۳۲/۸۲	۳۴/۲۱	۳۰/۶۶	۲۵/۸۷	۱۹/۹۸	۱۵/۷۳
MPI-ESM-MR [RCP8.5]	۱۴	۱۴/۰۶	۱۷/۵۴	۲۲	۲۶/۸۴	۳۰/۴۵	۳۲/۸۹	۳۴/۲۹	۳۰/۷۶	۲۵/۸۸	۱۹/۸۹	۱۵/۶۱
دوره پایه (۲۰۰۰-۲۰۱۹)	۱۳/۶۱	۱۳/۶۵	۱۷/۱۸	۲۰/۹۸	۲۶/۲۹	۳۰/۰۶	۳۲	۳۳/۰۲	۲۹/۸۵	۲۵/۱۹	۱۹/۰۸	۱۵/۰۵

بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ مقدار متوسط ماهانه بارش افزایش خواهد یافت و با توجه به تغییرات ناچیزی که در مقدار دمای حداقل و دمای حداکثر وجود خواهد داشت، احتمالاً در دوره آتی با افزایش نسبی منابع آب در منطقه ساری-نکا مواجه خواهیم شد.

بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی

آبخوان ساری-نکا برای دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰)

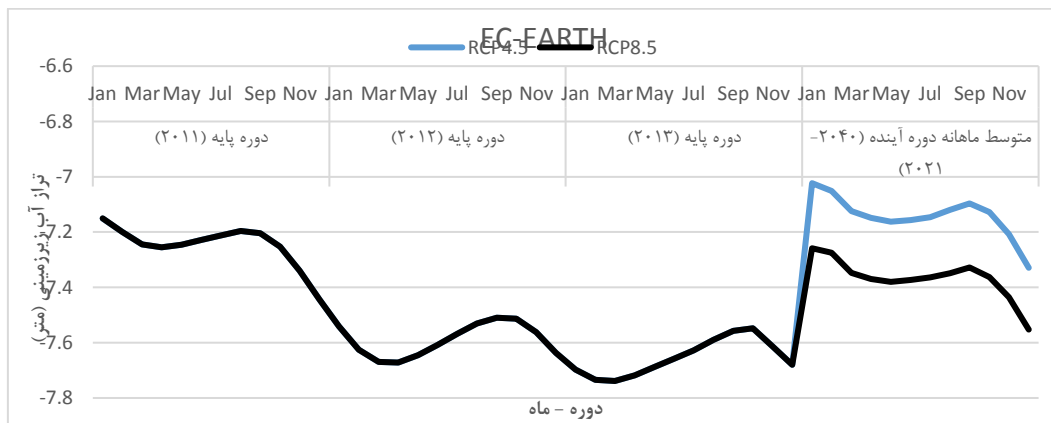
پس از شبیه‌سازی اقلیمی، شبیه‌سازی وضعیت آبخوان تحت اعمال سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در مدل MODFLOW مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی در شرایطی انجام گرفت که وضعیت تراز آب زیرزمینی بدون تغییر در وضعیت برداشت از منابع آب زیرزمینی لحاظ شده است. به منظور ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر وضعیت کمی آبخوان، از هیدروگراف آبخوان استفاده شد. بر این اساس مطابق شکل‌های (۴) تا (۸) برای ۵ مدل اقلیمی، دو سناریوی RCP 4.5 و RCP 8.5 مورد ارزیابی قرار گرفت

در جدول (۸) نتایج استخراجی از شبیه‌سازی بارش برای دوره آتی نشان می‌دهد که مقدار متوسط ماهانه بارش برای ماه‌های مارس، می، ژوئن، جولای، اکتبر، نوامبر و دسامبر نسبت به دوره پایه افزایش قابل توجهی دارد. همچنین در سایر ماه‌های سال نیز با توجه به اکثر مدل‌ها و سناریوها، افزایش میزان بارندگی در دوره آتی پیش‌بینی می‌شود.

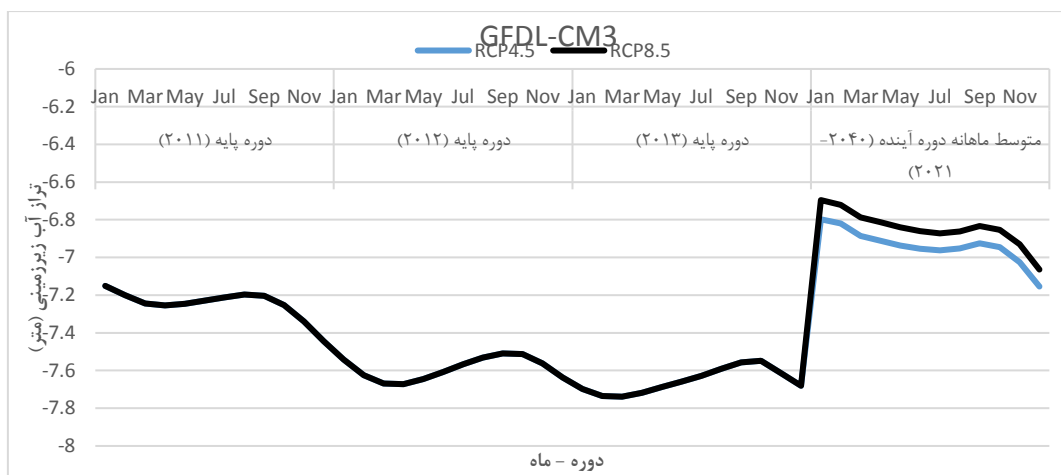
در جدول (۹) نتایج شبیه‌سازی پارامتر دمای حداقل نشان داد که تقریباً تحت تمامی مدل‌ها و سناریوهای مورد استفاده، در دوره آتی احتمال افزایش جزئی مقدار متوسط ماهانه دمای حداقل وجود دارد.

با توجه به جدول (۱۰)، نتایج شبیه‌سازی پارامتر دمای حداکثر در دوره آتی مشابه پارامتر دمای حداقل بوده و نتایج حاکی از احتمال افزایش نسبی دمای حداکثر است.

با بررسی تغییرات پارامترهای اقلیمی تحت مدل‌ها و سناریوهای مختلف می‌توان نتیجه گرفت که در دوره آینده



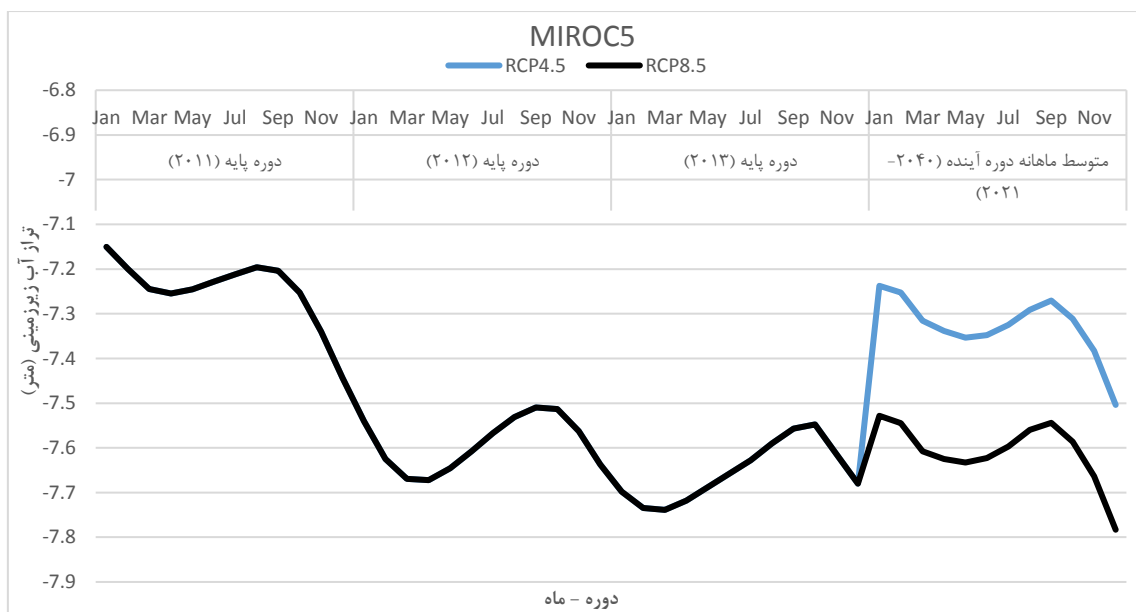
شکل (۴): مقایسه هیدروگراف دوره پایه و متوسط ماهانه دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) در آبخوان ساری-نکا برای مدل EC-EARTH تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5



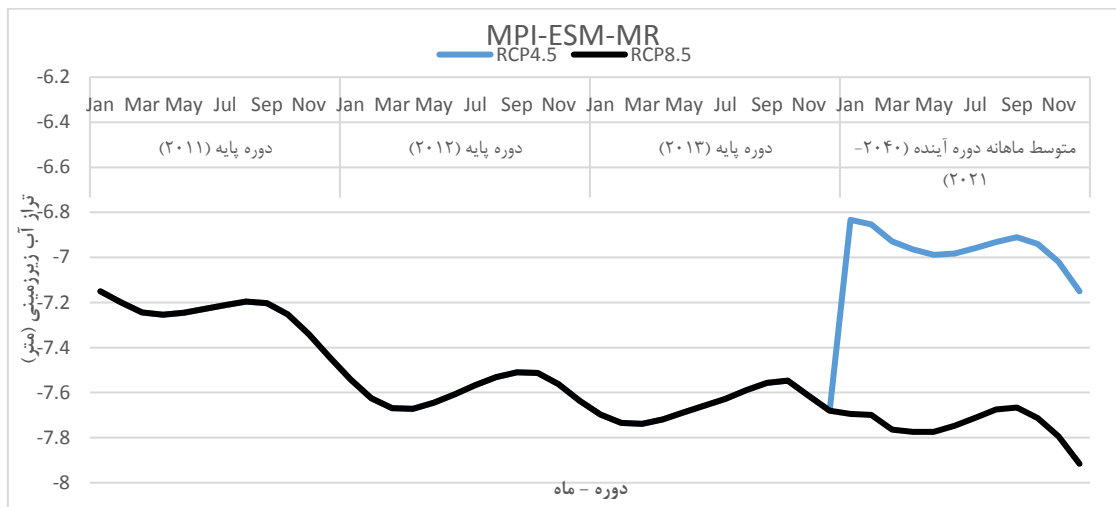
شکل (۵): مقایسه هیدروگراف دوره پایه و متوسط ماهانه دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) در آبخوان ساری-نکا برای مدل GFDL-CM3 تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5

با توجه به شکل (۵)، با وجود روند نزولی سطح آب زیرزمینی در دوره پایه، طبق پیش‌بینی مدل GFDL-CM3 تحت هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) سطح آب زیرزمینی در منطقه افزایش خواهد یافت.

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود با وجود روند نزولی سطح آب زیرزمینی در دوره پایه، طبق پیش‌بینی مدل EC-EARTH و تحت هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) سطح آب زیرزمینی در منطقه افزایش خواهد یافت.



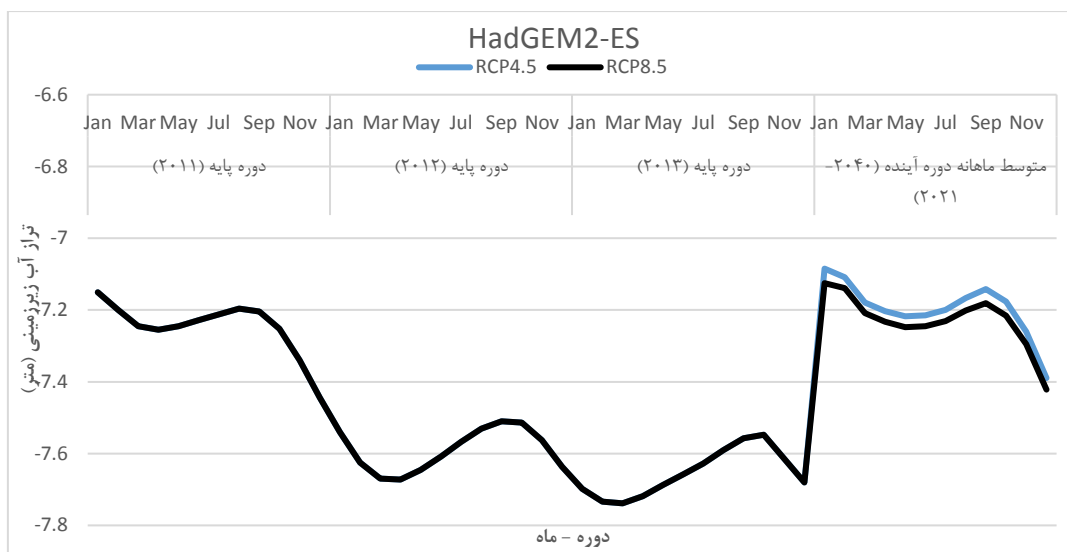
شکل (۶): مقایسه هیدروگراف دوره پایه و متوسط ماهانه دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) در آبخوان ساری-نکا برای مدل MIROC5 تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5



شکل (۷): مقایسه هیدروگراف دوره پایه و متوسط ماهانه دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) در آبخوان ساری-نکا برای مدل MPI-ESM-MR تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5

با توجه به شکل (۷)، با وجود روند نزولی سطح آب زیرزمینی در دوره پایه، طبق پیش‌بینی مدل MPI-ESM-MR تحت سناریوی RCP4.5 در دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۱) سطح آب زیرزمینی در منطقه افزایش خواهد یافت. اما با توجه به عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی و در نظر داشتن این که سناریوی RCP8.5 نسبت به RCP4.5 سناریوی بدبینانه‌تری است، سطح آب زیرزمینی در سناریوی RCP8.5 در دوره آینده نیز به روند نزولی خود ادامه خواهد داد و شاهد کاهش تراز آب زیرزمینی در منطقه خواهیم بود.

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود با وجود روند نزولی سطح آب زیرزمینی در دوره پایه، طبق پیش‌بینی مدل MIROC5 تحت سناریوی RCP4.5 در دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۱) سطح آب زیرزمینی در منطقه افزایش خواهد یافت اما در سناریوی RCP8.5 روند متعادلی دارد و تغییر چندانی را در سطح آب زیرزمینی شاهد نخواهیم بود.



شکل (۸): مقایسه هیدروگراف دوره پایه و متوسط ماهانه دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) در آبخوان ساری-نکا برای مدل HadGEM2-ES تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5

EC-، MPI-ESM-MR، MIROC5، HadGEM2-ES، EARTH و GFDL-CM3 تحت ۲ سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) پرداخته شد. به طور کلی نتایج حاکی از افزایش مقدار بارندگی در اکثر ماه‌های سال و تغییرات اندک مقدار دمای حداقل و حداکثر در دوره آتی بود. با استفاده از نتایج بدست آمده از شرایط تغییر اقلیم منطقه، به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی تحت مدل‌ها و سناریوهای مختلف گزارش پنجم تغییر اقلیم برای دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) پرداخته شد. نتایج نشان داد که در ۸ حالت از ۱۰ حالت بررسی شده تراز آب زیرزمینی در دوره آتی نسبت به دوره پایه افزایشی خواهد بود و فقط با توجه به پیش‌بینی مدل MPI-ESM-MR تحت سناریوی RCP8.5 روند آن نزولی خواهد شد. در حالی که مدل MIROC5 تحت سناریوی RCP8.5 تراز آب زیرزمینی برای دوره آتی را تقریباً بدون تغییر نسبت به دوره پایه شبیه‌سازی کرد. به طور کلی با توجه به عدم قطعیت مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی، ممکن است تراز آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی ساری-نکا برای دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) افزایش یابد که از این امر می‌توان در جهت توسعه کشاورزی و صنعت در منطقه بهره‌برداری کرد.

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود با وجود روند نزولی سطح آب زیرزمینی در دوره پایه، طبق پیش‌بینی مدل HadGEM2-ES و تحت هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) سطح آب زیرزمینی در منطقه افزایش خواهد یافت.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی آبخوان ساحلی ساری-نکا مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا با استفاده از مدل MODFLOW مدل کمی آب زیرزمینی منطقه برای دوره پایه (از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۳) شبیه‌سازی شد که ضریب تبیین ۰/۹۸ در حالت غیرماندگار نشان از دقت بالای مدل‌سازی کمی آبخوان داشت. پس از آن به واسنجی مدل LARS-WG برای دوره پایه (۲۰۱۹-۲۰۰۰) پرداخته شد که مقدار ضریب تبیین برای پارامترهای بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر به ترتیب برابر با ۰/۹۷، ۰/۹۹ و ۰/۹۹ بدست آمد که این مقادیر قابل قبول بوده و بیانگر دقت بالای مدل واسنجی شده می‌باشد. در ادامه به شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی مذکور با استفاده از مدل‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم (CMIP5)، شامل



منابع

- امرای، ب. ۱۳۹۹. آشکارسازی تاثیر تغییرات اقلیمی بر افت سطح ایستابی آبخوان دشت بیرجند. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۲۲(۶۴). ص ۲۹۱-۳۰۵.
- حمزه، س. باقرپور، ز. دلقندی، م. کاردان مقدم، ح. ۱۳۹۷. ارزیابی ریسک تاثیرات تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان گتوند-عقیلی). مجله اکوهیدرولوژی. ۵(۱). ص ۱۱۱-۱۲۲.
- رسایی، ا.ح. شرافتی، ا. کاردان مقدم، ح. ۱۳۹۹. تحلیل عدم قطعیت تراز آب زیرزمینی در شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی هشتگرد). مجله اکوهیدرولوژی. ۷(۳). ص ۸۱۵-۸۲۷.
- کاردان مقدم، ح. بنی حبیب، م. ا. جواد، س. ۱۳۹۶. تحلیل پایداری کمی سامانه‌ی آبخوان (مطالعه موردی: خراسان جنوبی- آبخوان بیرجند). نشریه آب و خاک. ۳۱(۶). ص ۱۵۸۷-۱۶۰۱.
- گزارش بیان منابع آب محدوده مطالعاتی ساری- نکا، مهندسین مشاور آب و خاک تهران، ۱۳۹۳.
- نصیری، م. حمیدی، م. کاردان مقدم، ح. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی (مطالعه موردی: سواحل جنوبی دریای خزر). نشریه آب و خاک. ۳۴(۲). ص ۲۶۹-۲۸۶.
- وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران، معاونت پژوهش و مطالعات پایه، دفتر استانداردها و معیارهای فنی، ۱۳۸۴، راهنمای تهیه مدل آب زیرزمینی.
- Ahmed, M., 2020. Introduction to Modern Climate Change. Andrew E. Dessler: Cambridge University Press, 2011, 252 pp, ISBN-10: 0521173159. The Science of the Total Environment, 734, p.139397.
- Amanambu, A.C., Obarein, O.A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S.S., Balogun, O., Oyebamiji, A. and Ochege, F.U., 2020. Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. Journal of Hydrology, p.125163.
- Guevara-Ochoa, C., Medina-Sierra, A. and Vives, L., 2020. Spatio-temporal effect of climate change on water balance and interactions between groundwater and surface water in plains. *Science of the Total Environment*, 722, p.137886.
- Hamidov, A., Khamidov, M. and Ishchanov, J., 2020. Impact of climate change on groundwater management in the northwestern part of Uzbekistan. *Agronomy*, 10(8), p.1173.
- Moghaddam, H.K., Milan, S.G., Kayhomayoon, Z. and Azar, N.A., 2021. The prediction of aquifer groundwater level based on spatial clustering approach using machine learning. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(4): 1-20.
- Moghaddam, H.K., kivi, Z.R., Bahreinimotlagh, M. and Moghddam, H.K., 2020. Evaluation of the groundwater resources vulnerability index using nitrate concentration prediction approach. *Geocarto International*, (just-accepted): 1-15.
- Nasiri, M., Moghaddam, H.K. and Hamidi, M., 2021. Development of multi-criteria decision making methods for reduction of seawater intrusion in coastal aquifers using SEAWAT code. *Journal of Contaminant Hydrology*, p.103848.



Nistor, M.M., 2019. Climate change effect on groundwater resources in South East Europe during 21st century. *Quaternary International*, 504: 171-180.

Rodríguez-Huerta, E., Rosas-Casals, M., & Hernández-Terrones, L. M. (2020). A water balance model to estimate climate change impact on groundwater recharge in Yucatan Peninsula, Mexico. *Hydrological Sciences Journal*, 65(3): 470–486.

Toure, A., Diekkrüger, B. and Mariko, A., 2016. Impact of climate change on groundwater resources in the Klela basin, southern Mali. *Hydrology*, 3(2): 17.

Wang, S. J., Lee, C. H., Yeh, C. F., Choo, Y. F., & Tseng, H. W. (2021). Evaluation of climate change impact on groundwater recharge in groundwater regions in Taiwan. *Water (Switzerland)*, 13(9).



Evaluating the Effect of Climate Change on Groundwater Level Changes in the Sari-Neka Coastal Aquifer

Sajad Najafi¹, Ahmad Sharafati^{2*}, Hamid Kardan Moghaddam³

Abstract

Climate change is inevitable and has different effects on water resources in each region. Due to the large population and high exploitation potentials in terms of agriculture, drinking, industry, etc., the study of the effects of climate change on the groundwater level of the Sari-Neka coastal aquifer is of great importance. In this regard, initially using the MODFLOW model, the quantitative model of groundwater in the region for the base period (from October 2010 to September 2014) was calibrated. The correlation coefficient of 0.98 in the unsteady state showed the high accuracy of quantitative modeling of the aquifer. Then, the LARS-WG model was calibrated for the base period (2000-2019). The correlation coefficient for precipitation, minimum temperature, and maximum temperature was 0.97, 0.99, and 0.99, respectively. Indicates the high accuracy of the calibrated model. To simulate the above climate parameters using CMIP5 models including HadGEM2-ES, MIROC5, MPI-ESM-MR, EC-EARTH, and GFDL-CM3 under two emission scenarios RCP4.5 and RCP8.5 for the next period (2040-2021) was paid. In general, the results showed an increase in rainfall in most months of the year and relative changes in temperature in the future. Finally, the impact of climate change on the groundwater level of the region under different models and scenarios of CMIP5 for the future (2021-2040) was investigated. The results showed that in 8 of 10 cases, the groundwater level in the future period will be higher than the base period, which can be used for the development of agriculture and industry in the region.

Keywords: Climate Change, CMIP5, Coastal Aquifer, Groundwater, MODFLOW

¹ MSc, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. (sajad.najafi@srbiau.ac.ir)

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. (*Correspondence: asharafati@gmail.com)

³ Assistant Professor, Water Research Institute, Ministry of Energy Water Research Institute, Tehran, Iran. (hkardan@ut.ac.ir)