



## The impact of climate change on groundwater level changes in future periods based on fifth report of ICCP (Case study: Razan Aquifer)

Mohammad Moein Fallahi<sup>1</sup>, Saeid Shabanlou<sup>✉2</sup>, Ahmad Rajabi<sup>3</sup>, Fariborz Yosefvand<sup>4</sup>,  
Mohammad Ali IzadBakhsh<sup>5</sup>

1. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran, Email:

[moeinfalahi69@yahoo.com](mailto:moeinfalahi69@yahoo.com)

2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran, Email: [saeid.shabanlou@gmail.com](mailto:saeid.shabanlou@gmail.com)

3. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran, Email: [ahmad.rajabi1974@gmail.com](mailto:ahmad.rajabi1974@gmail.com)

4. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran, Email: [fariborzosefvand@gmail.com](mailto:fariborzosefvand@gmail.com)

5. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran, Email: [izadbakhsh.mohammad.ali@gmail.com](mailto:izadbakhsh.mohammad.ali@gmail.com)

### Article Info

### ABSTRACT

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Jan. 9, 2022

**Received:** March. 7, 2022

**Accepted:** May. 22, 2022

**Published online:** July. 23, 2022

**Keywords:**

Razan Aquifer,  
Groundwater Level Variations,  
Probability Levels,  
Climate Change,  
Uncertainty,  
GMS Model

Climate change is one of the major challenges affecting the environment especially groundwater resources. In this study, the effect of the climate change on the Razan plain groundwater level in two 20-year periods is investigated. To simulate the aquifer, the GMS groundwater model is validated and verified for two 18-year period, respectively. To examine the climate change impact on groundwater level variations in the upcoming periods, the CMIP5 models are utilized by three scenarios including Rcp, Rcp 8.5, Rcp 4.5 and Rcp 2.6. To consider the uncertainty of the prediction of the climate change models, the probability level method for precipitation and temperature changes are used. In the probability level method, the combination of 6 climate change models and three mentioned scenarios for each month, 18 values of predictions for  $\Delta T$  and  $\Delta P$  changes in the next year are estimated. Then, using the proper distribution in each month, the next  $\Delta T$  and  $\Delta P$  are estimated in the probability levels of 90 and 50 percent and the general circulation uncertainties are evaluated in these two probability levels to forecast climate variables including precipitation and temperature. The results of forecasting climatic variables for the Rcp 2.6, Rcp 4.5, Rcp 8.5 scenarios and two levels of probability of 90 and 50%, respectively, display changes in the average temperature of +0.65, +0.653, +0.653, -0.04 and +6.6 °C and changes in average precipitation are -0.15, -0.06, +2.25, -30.2 and -0.095 percent during the period 2045-2018. Finally, using the GMS model, the effect of climate change on aquifer level changes under these scenarios are determined. The results show that the groundwater level under the combined scenarios Rcp 2.6, Rcp 4.5, Rcp 8.5 and two probability levels of 90 and 50% for the next period 2018-2045 compared to the base period of 1991-1998 will drop between -55.5 to -1.83 meters on average.

Cite this article: Fallahi, M. M., Shabanlou, S., Rajabi, A., Yosefvand, F., IzadBakhsh, M. A. (2022) The impact of climate change on groundwater level changes in future periods based on fifth report of ICCP (Case study: Razan Aquifer). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (5), 993-1008.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.337121.669179>



## اثر تغییر اقلیم بر تغییرات تراز آب زیرزمینی بر اساس گزارش پنجم کمیته بین‌الدول تغییر اقلیم در آبخوان رزن

محمد معین فلاحی<sup>۱</sup>، سعید شعبانلو<sup>۲</sup>، احمد رجبی<sup>۳</sup>، فریبرز یوسفوند<sup>۴</sup>، محمد علی ایزدبخش<sup>۵</sup>

۱. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، ایمیل: [moeinfalahi69@gmail.com](mailto:moeinfalahi69@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، ایمیل: [saeid.shabanlou@gmail.com](mailto:saeid.shabanlou@gmail.com)

۳. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، ایمیل: [ahmad.rajabi1974@gmail.com](mailto:ahmad.rajabi1974@gmail.com)

۴. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، ایمیل: [fariborzosefvand@gmail.com](mailto:fariborzosefvand@gmail.com)

۵. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، ایمیل: [izadbakhsh.mohammad.ali@gmail.com](mailto:izadbakhsh.mohammad.ali@gmail.com)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	تغییر اقلیم یکی از چالش‌های عمده‌ای است که بر محیط زیست به ویژه ذخایر آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارد. در این پژوهش به بررسی اثر تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی دشت رزن در دو دوره‌ی ۲۰ ساله آتی پرداخته شد. هدف از این تحقیق بررسی اثر عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی در پیش‌بینی تراز سطح آب زیرزمینی تحت تأثیر تغییر اقلیم می‌باشد. برای شبیه‌سازی آبخوان، مدل آب زیرزمینی GMS به ترتیب برای دو دوره ۱۸ ماهه واسنجی و صحت‌سنجی گردید. جهت بررسی اثر تغییر اقلیم بر نوسانات تراز آب زیرزمینی منطقه در دوره‌ی آتی از مدل‌های CMIP5 تحت سه سناریو Rcp 8.5، Rcp 4.5، Rcp 2.6 استفاده شد. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت پیش‌بینی مدل‌های تغییر اقلیم از روش سطوح احتمالاتی تغییرات بارش و دما استفاده شد. در روش سطوح احتمالاتی، از ترکیب خروجی ۶ مدل تغییر اقلیم مختلف در ۳ سناریوی مورد اشاره برای هر ماه، ۱۸ مقدار پیش‌بینی برای تغییرات $\Delta T$ و $\Delta P$ در سال‌های آتی تخمین زده شد. سپس با استفاده از توزیع مناسب در هر ماه مقادیر $\Delta T$ و $\Delta P$ آینده در سطوح احتمال ۵۰ و ۹۰ درصد برآورد گردید و در نهایت در دو سطح احتمالاتی ۹۰ و ۵۰ درصد با در نظر عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی به پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی بارش و دما پرداخته شد. نتایج پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی برای سناریوهای Rcp 2.6، Rcp 4.5، Rcp 8.5 و دو سطح احتمال ۹۰ و ۵۰ درصد به ترتیب نشان دهنده تغییرات میانگین دما به میزان $+0/65$ ، $+0/653$ ، $+0/653$ ، $-0/04$ و $+0/6$ درجه سانتیگراد و تغییرات میانگین بارش به میزان $-0/15$ ، $-2/06$ ، $-2/25$ ، $-30/2$ و $-0/95$ درصد طی دوره‌ی ۲۰۴۵-۲۰۱۸ بود. نتایج کاربرد مدل GMS برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر تغییرات تراز آبخوان نشان داد سطح آب زیرزمینی تحت سناریوهای ترکیبی Rcp 2.6، Rcp 4.5، Rcp 8.5 و دو سطح احتمالاتی ۹۰ و ۵۰ درصد برای دوره آتی 2018-2045 نسبت به دوره پایه ۲۰۱۸-۱۹۹۱ به طور میانگین بین $-1/55$ تا $-1/83$ متر افت خواهد داشت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۱	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۵/۱	
واژه‌های کلیدی:	
آبخوان رزن،	
نوسانات آب زیرزمینی،	
سطوح احتمالاتی،	
تغییر اقلیم،	
عدم قطعیت،	
مدل GMS	

استاد: فلاحی، محمد معین؛ شعبانلو، سعید؛ رجبی، احمد؛ یوسفوند، فریبرز؛ ایزدبخش، محمد علی (۱۴۰۱). اثر تغییر اقلیم بر تغییرات تراز آب زیرزمینی براساس گزارش پنجم

کمیته بین‌الدول تغییر اقلیم در آبخوان رزن. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۵)، ۱۰۰۸-۹۹۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.337121.669179>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

رشد جمعیت و افزایش سریع فعالیت‌های انسانی از جمله رشد شهرنشینی، رشد صنایع و دیگر فعالیت‌های زراعی و اقتصادی به خصوص در کشورهای توسعه نیافته و در حال توسعه، منجر به کاهش منابع آب و دیگر منابع زمین شده است. این امر موجب ایجاد خسارت قابل توجهی به محیط فیزیکی، از جمله تخریب و تخلیه منابع طبیعی و استفاده ناپایدار از منابع آب و دیگر منابع می‌گردد. همچنین تاثیر تغییر اقلیم بر چرخه‌ی آب و هوایی و افزایش دما، موجب تسریع در کاهش منابع آب موجود شده است (Acharyya, 2014). به ویژه تاثیر منفی این پدیده بر منابع آب در مناطق خشک و نیمه خشک که عمدتاً از کشورهای در حال توسعه هستند قابل توجه است (Kumar and Singh, 2015). آب‌های زیرزمینی بزرگترین تامین کننده و ذخایر آب شیرین با گستره‌ی وسیع در جهان است که نقش مهمی در حفظ اکوسیستم دارد. اهمیت استراتژیک آب‌های زیرزمینی برای امنیت آب و غذای جهانی بر کسی پوشیده نیست و اثر تغییر اقلیم با تشدید بروز خشکسالی و سیلاب و همچنین تغییرات در بارش، رطوبت خاک و آب‌های سطحی منجر به افزایش تخلیه و برداشت از آب‌های زیرزمینی شده است. اثر تغییر اقلیم بر منابع آب‌های زیرزمینی از طریق فرآیندهای طبیعی و انسانی ایجاد شده و همچنین بازخوردهای مثبتی بر آب زیرزمینی بر روی سیستم آب و هوایی قابل ارزیابی است (Taylor et al., 2012). تغییرات دما و بارش در آینده، بر میزان تغذیه آبخوان اثر گذار است. پاسخ آبخوان‌های آزاد به تغییرات میزان پارامترهای دما و بارش، بصورت تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی است (Zektser and Loaiciga, 1993; Changnon et al., 1988). جهت بررسی نوسانات منابع آب زیرزمینی، تغییرات بیلان و مدیریت بهره برداری از آبخوان از مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود (Kersic, 1997). مدل‌های ریاضی GMS و MODFLOW از کامل‌ترین مدل‌هایی هستند که در بسیاری از تحقیقات جدید برای پیش‌بینی زمانی و مکانی نوسانات تراز آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (et al., 2021; Zeinali 2021a; Zeinali et al., 2021b; Kamkar et al., 2021). پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی بدون استفاده از مدل‌های ریاضی معمولاً بصورت یک سری میانگین بوده و نقشه توزیعی برای دشت ارایه نمی‌دهد (Guzman et al., 2019; Nadiri et al. 2019; Azari et al. 2021). در بسیاری از تحقیقات بهترین ابزار برای بررسی و تولید سناریوهای اقلیمی و تاثیر گازهای گلخانه‌ای بر جو زمین در مقیاس منطقه‌ای، به کارگیری مدل گردش عمومی جو-اقیانوسی (AOGCM) می‌باشد (Wilby and Harris, 2006). در مطالعات تغییر اقلیم، عدم قطعیت‌های مختلفی بر نتایج نهایی تاثیر می‌گذارند و با نادیده گرفتن آنها از اعتبار نتایج کاسته می‌شود (IPCC, 2010). برای کاهش عدم قطعیت مدل‌ها در مطالعات تغییر اقلیم نباید به یک مدل گردش عمومی اکتفا کرد و باید سعی کرد که از نتایج چند مدل و سناریو کمک گرفته شود تا گستره وسیعی برای تحلیل ایجاد شود و عدم قطعیت را در تولید داده‌های اقلیمی آینده به حداقل برساند (New and Hulme, 2000; Ansari et al., 2014).

تغییر اقلیم و پیامدهای ناشی از آن یکی از مشکلات اساسی در مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی است و تخمین دقیق آن در دوره‌ی آتی ضرورت می‌یابد. مطالعات زیادی در مورد این موضوع در سال‌های اخیر صورت پذیرفته است. (Karamouz et al., 2011) به ارزیابی اثر تغییر اقلیم و تغییرات عناصر هواشناسی بر منابع آب زیرزمینی دشت رفسنجان با استفاده از مدل‌های LARS-WG و PMWIN پرداختند.

Crosbie et al., (2013) به بررسی اثرات بالقوه تغییرات اقلیم را در تغذیه آب‌های زیرزمینی در آبخوان دشتهای مرتفع ایالات متحده آمریکا پرداخته است. در این مطالعه ۱۶ مدل گردش عمومی<sup>۲</sup> (GCM) و سه سناریوی به منظور بررسی تغییرات در نرخ تغذیه آب‌های زیرزمینی در سال ۲۰۵۰ نسبت به سال ۱۹۹۰ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج شامل افزایش تغذیه در دشتهای مرتفع شمالی (+۸٪)، کاهش اندک در دشت مرتفع مرکزی (-۳٪) و کاهش بیشتری در دشتهای مرتفع جنوبی (-۱۰٪) بود.

Lemieux et al. (2015) در جزایر ماگدالن واقع در کبک کانادا، اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی بیانگر افزایش سطح آب دریا، کاهش تراز آب زیرزمینی و افزایش فرسایش ساحلی است. در یک دوره ۲۸ ساله ترکیب این اثرات باعث هجوم آب شور دریا به سمت آب‌های زیرزمینی خواهد بود. (Ansari et al., 2016) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر تغذیه آب زیرزمینی دشت سفید بر اساس مدل HADCM3 تحت دو سناریو A2 و B1 پرداختند. نتایج نشان داد در انتهای دوره آتی (سال ۲۰۳۵) میزان تجمعی تغذیه آب زیرزمینی در سناریوی A2 به حدود ۱۰ متر مکعب بر ثانیه افزایش داشته که حاکی از افزایش اثرات تغییر

1 - Atmosphere- Ocean General Circulation Model

2 - General Circulation Model

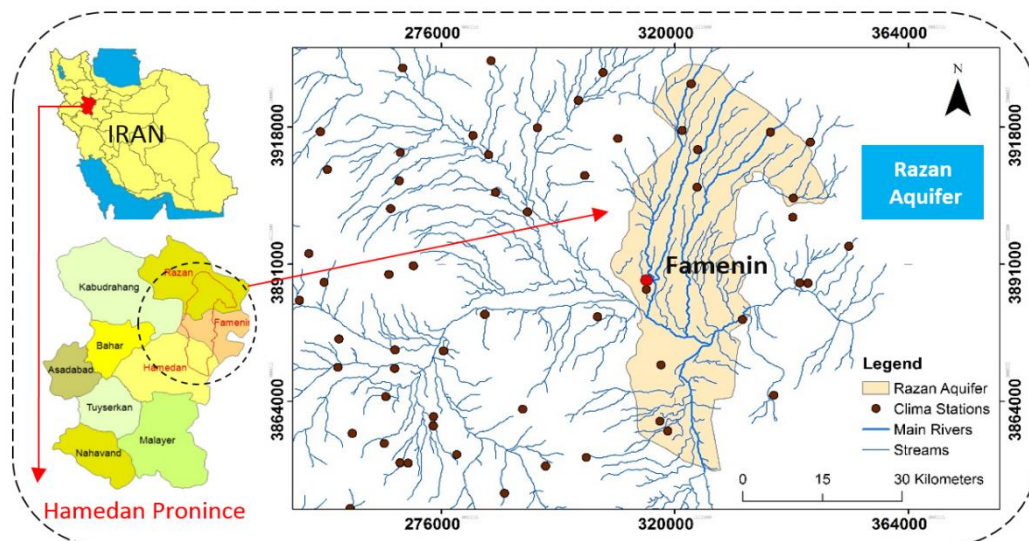
اقلیم در سناریوی A2 نسبت به سناریوی B1 است.

Shrestha et al. (2016) بر اساس مدل‌های گزارش پنجم CMIP5 اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی در دلتای مکنونگ در ویتنام را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که دمای متوسط سالیانه تحت سناریوی RCP4.5 به میزان ۱٫۵ درجه سانتی‌گراد و در سناریوی RCP8.5 به میزان ۴٫۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و همچنین میزان بارندگی در فصل‌های ترسال افزایش و در فصل‌های خشک سال روند نزولی خواهد داشت که منجر به کاهش تراز آب زیرزمینی می‌شود. (Gulacha et al., 2017) از مدل SDSM<sup>۲</sup> برای ریز مقیاس‌سازی آماری و تبدیل مدل‌های گردش عمومی جو به مقیاس محلی، در حوضه رودخانه وامی راوا<sup>۳</sup> کشور تانزانیا استفاده نمودند. در نهایت تحقیقات آنها نشان داد که در حوضه این رودخانه در شرایط تغییر اقلیم، پتانسیل وقوع سیل و خشکسالی، بسیار بالاست. در سالهای اخیر تحقیقات زیادی به بررسی اثر تغییر اقلیم بر تغییرات تراز آب زیرزمینی و میزان تغذیه آن بر اساس گزارش پنجم تغییر اقلیم پرداخته‌اند که نتایج این تحقیقات حاکی از اثر انکارناپذیر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی و تاثیر انتخاب مدل اقلیمی و سناریوی انتشار پیشنهادی بر نتایج کار دارد (Epting et al., 2021; Costa et al., 2021; Nyembo et al., 2022). اما در آنها عدم قطعیت مدل‌های تغییر اقلیم مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا هدف از این تحقیق بررسی اثر عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی و سناریوهای انتشار در پیش‌بینی تراز سطح آب زیرزمینی تحت تاثیر تغییر اقلیم می‌باشد. استفاده از روش سطوح احتمالاتی بجای روش وزن‌دهی مدل‌های تغییر اقلیم برای بررسی عدم قطعیت این مدل‌ها از نوآوری‌های این تحقیق محسوب می‌گردد. بررسی کارایی روش توسعه داده شده با استفاده از سطوح احتمالاتی برای اعمال عدم قطعیت سناریوهای اقلیمی از اهداف دیگر این تحقیق است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه دشت رزن با وسعت ۱۵۵۳ کیلومتر مربع واقع در استان همدان می‌باشد. این دشت در محدوده‌ی بین شهرهای فامنین و رزن و همدان قرار گرفته است. میانگین بلند مدت بارندگی سالیانه در منطقه مطالعاتی در حدود ۳۷۰ میلی‌متر و میانگین دما و تبخیر و تعرق سالیانه در این منطقه به ترتیب ۱۱ درجه سانتی‌گراد و ۱۳۶۴ میلی‌متر است. تعداد چاه‌های بهره‌برداری در این دشت حدود ۱۸۱۷ عدد است. رودخانه‌ها و آبراهه‌های منطقه در جهت شمال به جنوب در این دشت جریان دارند. دشت رزن در سال‌های اخیر با افت تراز آب زیرزمینی مواجه شده است و شرایط تغییر اقلیم باعث تشدید بحران در منطقه خواهد شد. به دلیل فرونشست‌هایی که در این دشت و اطراف آن رخ داده است، انجام مطالعات در این زمینه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. موقعیت این دشت در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه، ایستگاه‌های هواشناسی و رودخانه‌ها

### مدل‌های گردش عمومی و سناریوهای انتشار

برای استخراج داده‌های بارندگی و دمای کمینه و بیشینه و ساعت آفتابی از آمار و اطلاعات ایستگاه سینوپتیک فامنین استفاده شد. برای استخراج داده‌های بارندگی و دما در شرایط تغییر اقلیم از مدل‌های سری CMIP5 گزارش پنجم<sup>۱</sup> (AR5) هئیت بین‌الدول تغییر اقلیم<sup>۲</sup> (IPCC) استفاده شد. سری مدل‌های CMIP5 شامل ۳۹ مدل از گزارش پنجم می‌باشد که از طریق پایگاه داده‌ها به آدرس اینترنتی:

<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>

قابلیت انتخاب و داندود را دارند. این مدل‌ها قابلیت تولید مقادیر بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و دمای میانگین را بصورت داده‌های تاریخی از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۵ میلادی و داده‌های پیش‌بینی آینده در قالب سناریوهای انتشار RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 از سال ۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰ میلادی را دارند. همچنین قدرت تفکیک مکانی سری CMIP5 نسبت به سری CMIP4 از گزارش چهارم و سری CMIP3 از گزارش سوم از حدود ۲/۵ در ۲/۵ درجه به حدود ۰/۵ در ۰/۵ درجه ارتقاء یافته است که پیشرفت بسیار بزرگی محسوب می‌گردد (IPCC, 2014). در این تحقیق شش مدل MIROC-ESM, IPSL-CM5A-LR, GFDL-CM3, CCSM4, BCC-CSM1-1 و HadGEM2-ES که دارای اطلاعات کامل سه سناریوی Rcp 8.5, Rcp 4.5, Rcp 2.6 بودند برای استخراج داده‌های تغییر اقلیم انتخاب شدند.

### ریزمقیاس نمایی به روش دلتا<sup>۳</sup> یا عامل تغییر<sup>۴</sup>

برای ریزمقیاس نمایی آماری از روش دلتا یا عامل تغییر استفاده شد. برای محاسبه مقدار عامل تغییر یا دلتای مربوط به بارش هر یک از ۱۲ ماه سال، باید میانگین بارش هر یک از ماه‌های اقلیم آینده ( $P_f$ ) را به میانگین بارش تاریخی در ماه مشابه در اقلیم حاضر ( $P_h$ ) تقسیم نمود، به این صورت ۱۲ تا عامل تغییر یا دلتا برای گردیدی که ایستگاه در آن واقع است بدست می‌آید. در این صورت برای بدست آمدن بارندگی در هر یک از سناریوهای اقلیمی از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$P_f = C_f \times P_h \quad \text{رابطه (۱)}$$

در مورد داده‌های دما، روش ریزمقیاس نمایی به روش عامل تغییر یا دلتا مشابه با بارش می‌باشد با این تفاوت که برای پیش‌بینی دما تحت سناریوهای اقلیمی از رابطه (۲) استفاده می‌گردد. برای محاسبه مقدار عامل تغییر یا دلتای مربوط به دمای هر یک از ۱۲ ماه سال، باید میانگین دمای هر یک از ماه‌های اقلیم آینده منهای میانگین دمای ماه مشابه در اقلیم حاضر گردد. به این روش ۱۲ تا عامل تغییر یا دلتا برای گردید یا ایستگاه مورد نظر بدست می‌آید.

$$T_f = T_h + C_f \quad \text{رابطه (۲)}$$

باتوجه به اینکه برون‌داد مدل‌های گردش عمومی جو قابلیت تولید مقادیر بارش، دمای میانگین، دمای حداقل و حداکثر را بصورت داده‌های تاریخی<sup>۵</sup> از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۵ میلادی و داده‌های پیش‌بینی آینده در قالب سناریوهای انتشار RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 از سال ۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰ میلادی را دارند. در این تحقیق برای محاسبه عامل تغییر یا دلتا از دوره پایه ۳۰ سال منتهی به سال ۲۰۰۵ استفاده گردید و داده‌های آینده بارش، دمای میانگین، ماکزیمم و مینیمم جهت پیش‌بینی و تحلیل وضعیت آینده محدوده مطالعاتی در دوبازه تولید شد. سپس شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی بر اساس داده‌های تغییر اقلیم مربوط به بازه ۲۰۱۸ تا ۲۰۴۵ و ۲۰۴۵ تا ۲۰۷۲ انجام شد.

### محاسبه احتمالات

به منظور کاهش اغتشاشات درون مدلی AOGCM در محاسبات و افزایش دقت پیش‌بینی تغییرات اقلیمی، معمولاً بجای استفاده مستقیم از داده‌های AOGCM در سناریوهای تغییر اقلیم در هر کدام از مدل‌ها، از میانگین دوره‌ای این داده‌ها استفاده می‌شود و مقادیر اختلاف دما و نسبت برای بارندگی بین میانگین دمای بلند مدت سالانه در دوره‌های آتی (۲۰۱۸-۲۰۴۵)، (۲۰۴۵-۲۰۷۲) و دوره شبیه‌سازی شده پایه (۱۹۹۱-۲۰۱۸) توسط همان مدل برای هر سلول از شبکه محاسباتی، به صورت زیر محاسبه می‌شود (Wilby and Harris, 2006; Sadat Ashofte and Bozorg Hadad, 2014).

$$\Delta T_i = (\overline{TAOGCM, fut}_i - \overline{TAOGCM, base}_i) \quad \text{رابطه (۳)}$$

1- Assessment Report-5

2- Intergovernmental Panel on Climate Change

3- Delta

4- Change Factor

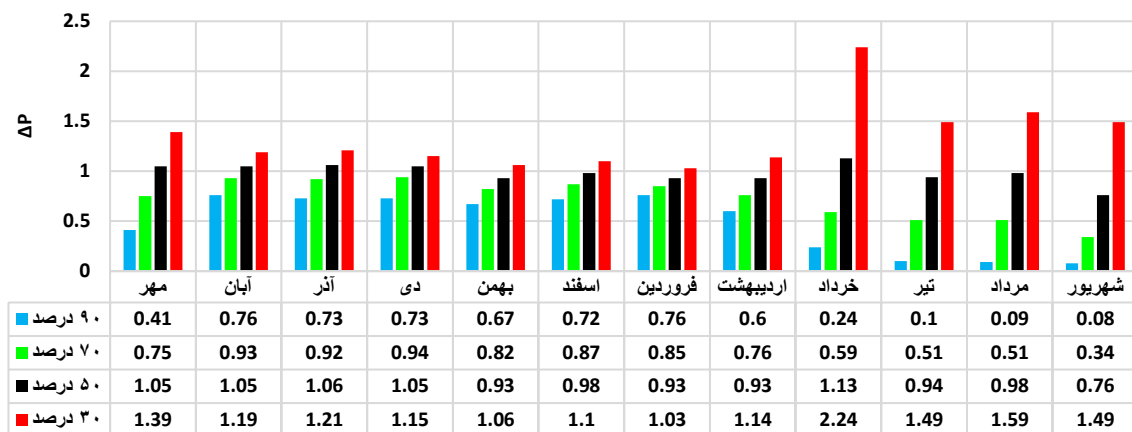
5- Historical

$$\Delta P_i = (\overline{PAOGCM}, fut_i / \overline{PAOGCM}, base_i) \quad \text{رابطه ۴}$$

در روابط فوق  $\Delta T_i$  و  $\Delta P_i$  به ترتیب بیانگر سناریوی تغییر اقلیم مربوط به دما و بارندگی برای میانگین بلند مدت برای هر ماه (۱۲)  $\leq i$   $\overline{PAOGCM}, fut_i$  و  $\overline{TAOGCM}, fut_i$  میانگین بلند مدت دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره آتی برای هر ماه،  $\overline{PAOGCM}, base_i$  و  $\overline{TAOGCM}, base_i$  میانگین بلند مدت دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی برای هر ماه می‌باشد.

در نظر گرفتن همه منابع عدم قطعیت در مطالعات تغییر اقلیم به سادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد ( Ruiz-Ramos and Minguez, 2010). لذا در این تحقیق مهمترین منبع عدم قطعیت، یعنی عدم قطعیت مدل‌های AOGCM مورد بررسی قرار گرفت. برای تولید سناریوهای اقلیمی ماهانه دما و بارش با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌های AOGCM به این صورت عمل گردید که مقادیر  $\Delta T$  و  $\Delta P$  (روابط ۳ و ۴) برای هر مدل AOGCM و هر سناریو شامل RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 برای هر ماه محاسبه گردید. به عبارت دیگر برای تولید سناریوی اقلیمی احتمالاتی در هر دوره آتی، برای هر ماه با استفاده از خروجی ۶ مدل AOGCM و ۳ سناریو اقلیمی، مجموعاً ۱۸ تا  $\Delta T$  و  $\Delta P$  محاسبه گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزار Easy Fit، بهترین تابع توزیع (تابع توزیع بتا) بر مقادیر  $\Delta T$  و  $\Delta P$  برازش داده شد و برای هر ماه یک تابع توزیع بتا برای  $\Delta T$  و  $\Delta P$  همان ماه حاصل گردید. سپس تابع توزیع تجمعی احتمالاتی (CDF)  $\Delta T$  و  $\Delta P$ ها برای هر ماه، از تابع توزیع بتای مربوطه تعیین شد. در نهایت از CDF مربوطه، مقادیر  $\Delta T$  و  $\Delta P$  در ۴ سطح احتمال ۰/۵۰، ۰/۷۰ و ۰/۹۰ تحت سه سناریو (شامل A1B، B1 و A2)، استخراج گردید. در نهایت به عنوان نمونه با استفاده از  $\Delta T$  و  $\Delta P$ های استخراج شده برای بررسی تغییرات بارش و دما در سطح احتمال وقوع متوسط و بالا (۵۰٪ و ۹۰٪) و با استفاده از روابط ۳ و ۴ سناریوهای اقلیمی دما و بارش ماهانه برای دوره آتی تولید گردید. سطوح احتمالات کمتر از ۵۰ درصد برای برنامه ریزی‌های آینده غیر محتمل تر است و به همین دلیل کنار گذاشته شدند.

در مرحله بعد سری زمانی برای دما و بارش در سطوح احتمالات ۵۰٪ و ۹۰٪ تولید گردید و مقادیر دما و بارش برای این سناریوهای احتمالاتی پیش بینی شد. به عنوان نمونه مقادیر  $\Delta P$  برای ماه‌های مختلف در دوره‌ی ۲۰۱۸-۲۰۴۵ در شکل (۲) آورده شد.



شکل ۲. مقادیر  $\Delta P$  برای ماه‌های مختلف در دوره‌ی ۲۰۱۸-۲۰۴۵

### شاخص‌های عملکرد و ارزیابی مدل‌ها

جهت اعتبارسنجی و ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌های گردش عمومی و برازش داده‌ها از آزمون‌های نیکویی برازش شامل مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE)، میانگین خطا مطلق<sup>۲</sup> (MAE) و ضریب نش-ساتکلیف<sup>۳</sup> (NS) استفاده شد. با استفاده از این شاخص‌ها می‌توان میزان دقت پیش‌بینی مدل‌ها را ارزیابی کرد (Hosseinihah et al., 2014; Sadat Ashofte and Bozorg Hadad, 2014)، که در فرمولهای (۵) تا (۷) ارایه شده‌اند.

1 -Root-Mean-Square Error

2 - Mean Absolute Error

3 - Nash-Sutcliffe

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - C_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - C_i|}{n} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - C_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه ۷}$$

که در معادلات فوق  $O$  مقدار مشاهده‌ای و  $\bar{O}$  مقدار میانگین داده‌های مشاهده‌ای و  $C$  مقدار محاسبه شده توسط مدل‌ها و  $N$  تعداد داده‌های مشاهداتی می‌باشد.

بهترین پیش‌بینی‌ها زمانی رخ می‌دهد که کمیت‌های  $RMSE$  و  $MAE$  کمترین ضریب و  $Nash-Sutcliffe$  نزدیک به ۱ باشد (Kamal and Massahbavani, 2012).

#### مدل آب زیرزمینی GMS

در این تحقیق از مدل  $GMS^1$  برای شبیه‌سازی رفتار آبخوان در شرایط تغییر اقلیم استفاده شد. مدل عددی  $GMS$  برپایه حل معادلات سه بعدی حاکم بر جریان زیرزمینی می‌باشد که با توجه به شرایط جریان در دو حالت ماندگار و غیرماندگار ارائه شده است ( $GMS$  User Manual 10.4, 2019). با توجه به اینکه آبخوان دشت رزن از نوع آزاد می‌باشد معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی که به معادله غیرخطی بوزینسک<sup>۲</sup> معروف است به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z h \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \pm w \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن  $K_x, K_y$  و  $K_z$  هدایت هیدرولیکی در جهات مختلف،  $w$  بیانگر تغذیه یا تخلیه آب زیرزمینی،  $h$  بار پتانسیل (هد هیدرولیکی)،  $S_y$  آبدهی ویژه و  $t$  زمان می‌باشد. معادله (۸) با اعمال شرایط اولیه و مرزی و بر اساس روش تفاضل محدود<sup>۳</sup> حل می‌شود. ساختار مدل مفهومی آبخوان دشت رزن شامل محدوده‌ی مدل‌سازی و توزیع اولیه پارامترهای هیدروژئولوژیکی (هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه)، تخلیه چاه‌های بهره برداری و میزان آب برگشتی آنها، چاه‌های مشاهداتی، تبادل آب بین رودخانه و آبخوان، میزان تغذیه از سطح به آبخوان و شرایط مرزی آبخوان است. در این تحقیق مدل‌سازی برای یک سیستم آب زیرزمینی یک لایه انجام شده است و محدوده مدل‌سازی منطبق بر محدوده بیلان آب زیرزمینی می‌باشد. جهت برآورد بار هیدرولیکی اولیه و توپوگرافی سطح دشت و سنگ بستر به ترتیب از نقشه تراز آب زیرزمینی درون یابی حاصل از پیزومترهای منطقه (نقشه تراز ماه قبل شروع دوره‌ی شبیه‌سازی)، نقشه رقومی ارتفاعی منطقه<sup>۴</sup> و نقاط سونداز موجود منطقه استفاده گردیده است. جریان‌های ورودی به آبخوان نیز توسط مقادیر هد در سلول‌های مرزی<sup>۵</sup> (GHB) بر اساس نقشه‌ی تراز محاسبه گردید. مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی و اولیه پارامتر آبدهی ویژه با توجه به دانه بندی لایه اشباع (لاگ چاه‌ها) در نظر گرفته شد و مقادیر نهایی آنها پس از کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل بدست آمد. برای تهیه نقشه اولیه تغذیه از سطح، از نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و همچنین وضعیت بارندگی در منطقه استفاده شد. همچنین دبی رودخانه‌ها در سرشاخه‌ها با از ایستگاه‌های هیدرومتری برآورد گردید.

#### واسنجی و صحت‌سنجی مدل آب زیرزمینی

برای تطبیق عملکرد مدل در شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی، واسنجی مدل برای دوره ۱۸ ماهه (مهر ۱۳۸۷ تا اسفند ۱۳۸۸) و صحت

1- Groundwater Modeling System  
 2- Boussinesq  
 3- Finite Difference  
 4- DEM  
 5- General Head Boundary



سنجی مدل برای دوره ۱۸ ماهه (شهریور ۱۳۹۰ - فروردین ۱۳۸۹) انجام شد. طی مرحله واسنجی، پارامترهای ورودی مدل شامل داده‌های هیدرولیکی و هیدرودینامیکی تا تطابق قابل قبول بین سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای در پیزومترها و سطح آب زیرزمینی محاسبه شده بوسیله مدل تغییر داده شده و تنظیم شدند. واسنجی مدل در دو حالت ماندگار و غیرماندگار صورت گرفت. برای واسنجی در حالت ماندگار، پارامتر هدایت هیدرولیکی (K) و تغذیه و علاوه بر اینها در حالت غیرماندگار پارامتر آبدهی ویژه ( $S_y$ ) آبخوان با استفاده از روش سعی و خطای دستی به صورت زونبندی به مدل وارد شدند. جریان‌های ورودی به آبخوان نیز توسط مقادیر هد در سلول‌های مرزی (GHB) بر اساس نقشه‌ی تراز محاسبه شده و به مدل وارد گردید.

## نتایج و بحث

### نتایج ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌های گردش عمومی

برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌های گردش عمومی شاخص‌های RMSE، MAE و NS هر یک از ۶ مدل مورد استفاده در این تحقیق محاسبه شدند. همانطور که در جدول (۱) نشان داده شده است برای پارامتر بارش، مقدار این شاخص‌ها در مدل MIROC به عنوان بهترین مدل به ترتیب برابر ۰/۵۴، ۰/۴۱ و ۰/۷ است. برای پارامتر دما، مدل HadGEM با ضرایب ۱/۷، ۱/۴۷ و ۰/۹۶ به ترتیب در شاخص RMSE و MAE دارای کمترین مقدار و در شاخص NS دارای بیشترین میزان نسبت به مدل‌های دیگر دارا است و بیشترین دقت کارایی را برای پیش‌بینی کمیت دما دارد.

جدول ۱. ضرایب شاخص‌های عملکردی مدل‌های AOGCM نسبت به دوره‌ی مشاهداتی برای پارامترهای اقلیمی دما و بارش

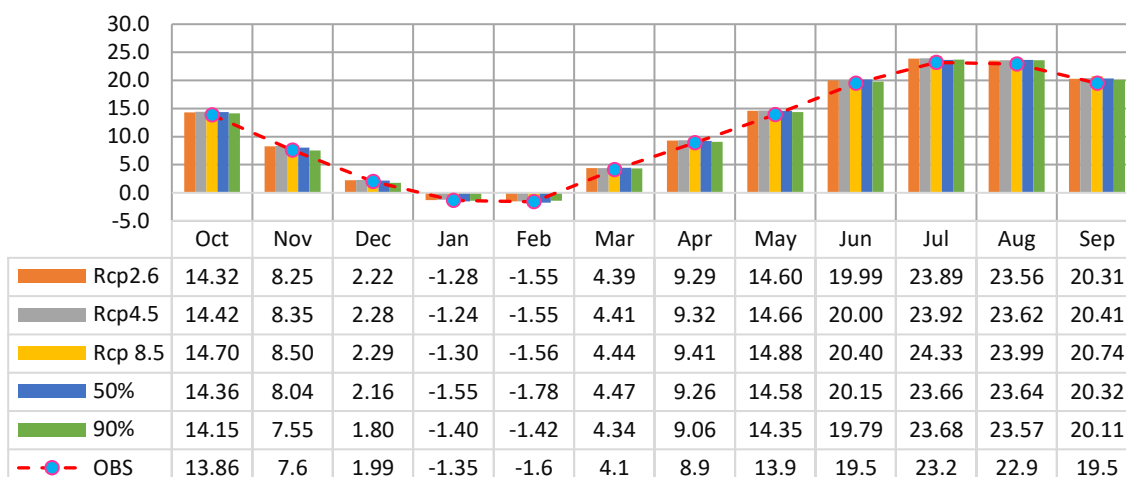
بارش			دما			نام اختصاری	مدل
RMSE	MAE	NS	RMSE	MAE	NS		
۰/۵۴	۰/۴۱	۰/۷	۵/۶۲	۵/۵۴	۰/۵۶	MIROC	MIROC-ESM
۰/۵۸	۰/۴۳	۰/۶۷	۳/۲	۲/۸۲	۰/۸۶	BCC	BCC-CSM1-1
۱/۲۴	۱/۱۳	-۰/۵	۷/۶۵	۶/۴۴	-۰/۳۳	CCSM	CCSM4
۱/۰۶	۰/۸۱	-۰/۰۹	۱/۷	۱/۴۷	۰/۹۶	HadGEM	HadGEM2-ES
۰/۷۶	۰/۵۷	۰/۴۵	۲/۶۵	۲/۲۲	۰/۹	GFDL	GFDL-CM3
۰/۸۹	۰/۶۷	۰/۲۳	۲/۸۲	۲/۱۷	۰/۸۷	IPSL	IPSL-CM5A-LR

### پیش‌بینی پارامترهای دما و بارش در دوره‌ی آتی

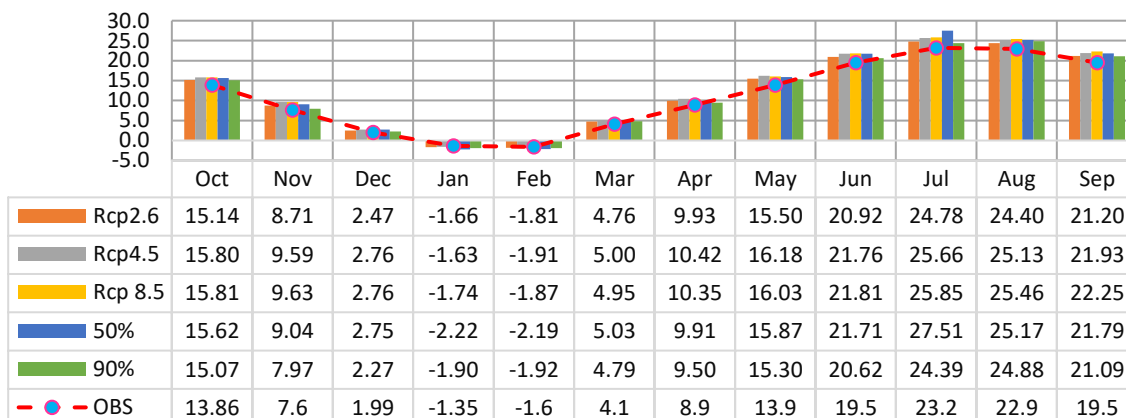
همان‌گونه که گفته شد در ابتدا با استفاده از روش دلتا به تولید داده‌های ریزمقیاس شده مدل‌های MIROC-ESM، BCC-CSM1-1، CCSM4، GFDL-CM3، IPSL-CM5A-LR، MIROC-ESM و HadGEM2-ES که دارای اطلاعات کامل سه سناریوی Rcp 2.6، Rcp 4.5، Rcp 8.5 بودند، پرداخته شد. شکل‌های (۳) و (۴) پیش‌بینی میانگین بلند مدت دما و شکل‌های (۵) و (۶) اختلاف دمای بلند مدت تحت سناریوهای مختلف و سطوح احتمالاتی ۹۰ و ۵۰ درصد را به ترتیب در دوره‌های آتی نشان می‌دهند. بر اساس این شکل‌ها تغییرات میانگین بلند مدت دما در سناریوهای Rcp 2.6، Rcp 4.5، Rcp 8.5 و دو سطح احتمال ۹۰ و ۵۰ درصد طی دوره ۲۰۱۸-۲۰۴۵ به ترتیب  $+۰/۶۵۳$ ،  $+۰/۶۵۳$ ،  $-۰/۰۴$  و  $+۰/۶$  درجه سانتی‌گراد و طی دوره ۲۰۴۶-۲۰۷۲ به ترتیب  $+۲$ ،  $+۲/۲$ ،  $+۱/۵۵$ ،  $+۰/۹۸$  و  $+۲/۳$  درجه سانتی‌گراد است.

شکل‌های (۵) و (۶) نشان می‌دهد در دوره‌ی ۲۰۱۸-۲۰۴۵ بیشترین افزایش دما در ماه‌های شهریور و اردیبهشت و در دوره‌ی ۲۰۴۶-۲۰۷۲ در ماه تیر اتفاق افتاده است. همچنین بیشترین کاهش دما در دوره‌ی ۲۰۱۸-۲۰۴۵ و کمترین افزایش دما در دوره‌ی ۲۰۷۲-۲۰۴۶ در ماه‌های دی و بهمن بدست آمده است.

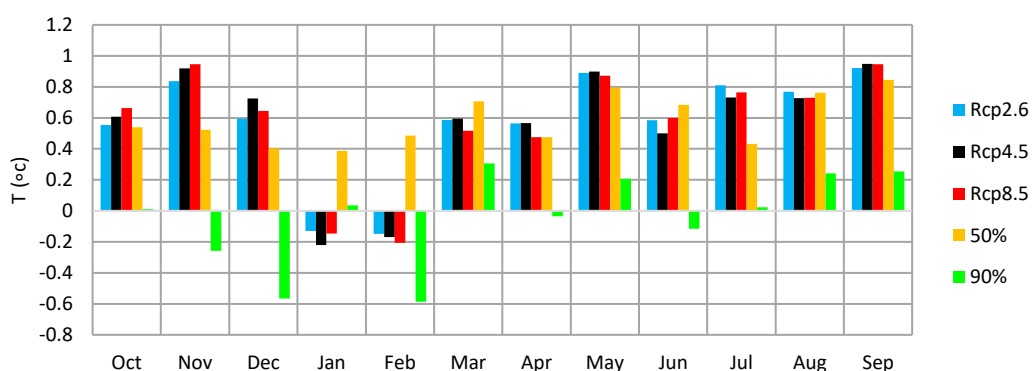




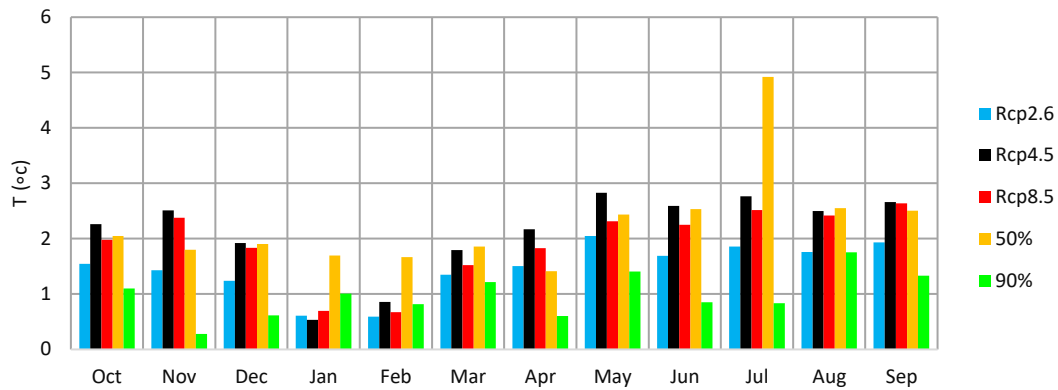
شکل ۳. پیش بینی میانگین بلند مدت دما با استفاده سناریوهای Rep 2.6، Rep 4.5، Rep 8.5 و سطوح احتمالاتی ۹۰ و ۵۰ درصد در دوره ۲۰۴۵-۲۰۱۸ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۸



شکل ۴. پیش بینی میانگین بلند مدت دما با استفاده سناریوهای Rep 2.6، Rep 4.5، Rep 8.5 و سطوح احتمالاتی ۹۰ و ۵۰ درصد در دوره ۲۰۷۲-۲۰۴۶ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۸

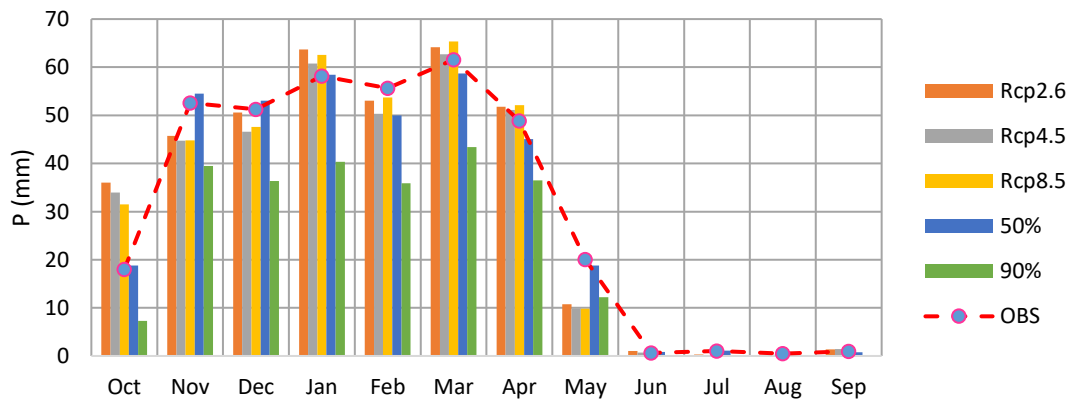


شکل ۵. اختلاف دمای بلند مدت در ماههای مختلف برای سناریوهای Rep 2.6، Rep 4.5، Rep 8.5 و سطوح احتمالاتی ۹۰ و ۵۰ درصد در دوره ۲۰۴۵-۲۰۱۸ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۸

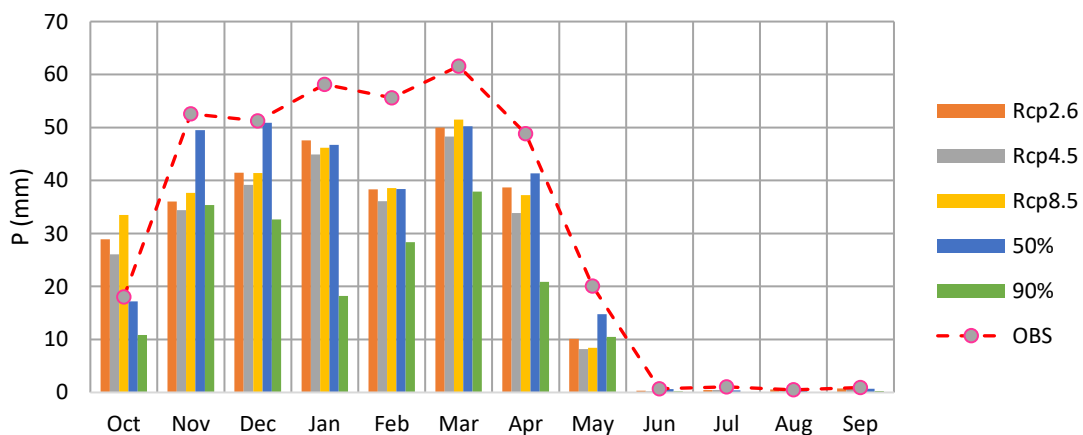


شکل ۶. اختلاف دمای بلند مدت در ماه‌های مختلف برای سناریوهای Rcp 2.6، Rcp 4.5، Rcp 8.5 و سطوح احتمالاتی ۹۰ و ۵۰ درصد در دوره ۲۰۷۲-۲۰۴۶ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۸

شکل‌های (۷) و (۸) پیش بینی میانگین بلند مدت بارش و شکل‌های (۹) و (۱۰) درصد تغییرات بارش تحت سناریوهای مختلف و سطوح احتمالاتی ۹۰ و ۵۰ درصد را به ترتیب در دوره‌های آتی نشان می‌دهند. بر اساس این شکل‌ها تغییرات میانگین بلند مدت بارش در سناریوهای Rcp 2.6، Rcp 4.5، Rcp 8.5 و دو سطح احتمال ۹۰ و ۵۰ درصد طی دوره ۲۰۱۸-۲۰۴۵ به میزان  $-۰/۱۵$ ،  $-۲/۰۶$ ،  $+۲/۲۵$ ،  $-۳/۰۲$  و  $-۰/۰۹۵$  درصد و طی دوره ۲۰۴۶-۲۰۷۲ به ترتیب به میزان  $-۱۷$ ،  $-۲۳/۷$ ،  $-۱۸/۳$ ،  $-۴۶$  و  $۱۳/۸$  درصد می‌باشد.



شکل ۷. پیش بینی میانگین بلند مدت بارش با استفاده از سناریوهای Rcp 2.6، Rcp 4.5، Rcp 8.5 و سطوح احتمالاتی ۹۰ و ۵۰ درصد در دوره ۲۰۴۵-۲۰۱۸ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۸

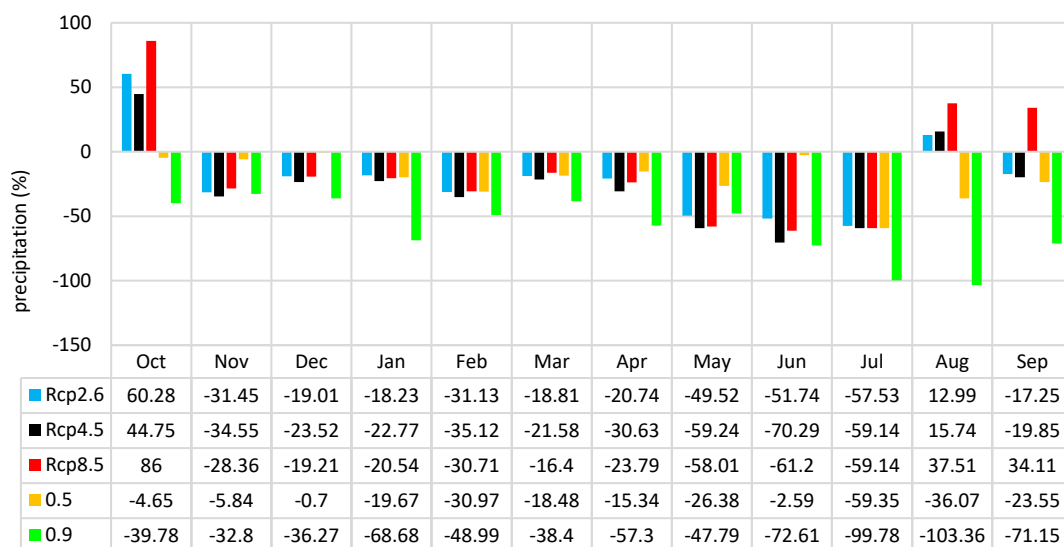


شکل ۸. پیش بینی میانگین بلند مدت بارش با استفاده از سناریوهای Rcp 2.6، Rcp 4.5، Rcp 8.5 و سطوح احتمالاتی ۹۰ و ۵۰ درصد در دوره ۲۰۷۲-۲۰۴۶ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۸

همان گونه که در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود در هر دو دوره، بیشترین افزایش بارش در ماه‌های مهر و شهریور برای سناریوهای Rcp 8.5، Rcp 4.5، Rcp 2.6 و بیشترین کاهش دما در دوره‌ی ۲۰۴۵-۲۰۱۸ و کمترین افزایش دما در دوره‌ی ۲۰۴۶-۲۰۲۲ در ماه‌های دی و بهمن بدست آمده است. بیشترین سهم بارش را فصل زمستان در میان فصول دیگر دارد و سهم تابستان در بارش‌ها بسیار ناچیز است به همین دلیل تغییرات درصد بارش در این فصل تأثیر چندانی در تغییر بارش سالانه ندارد.



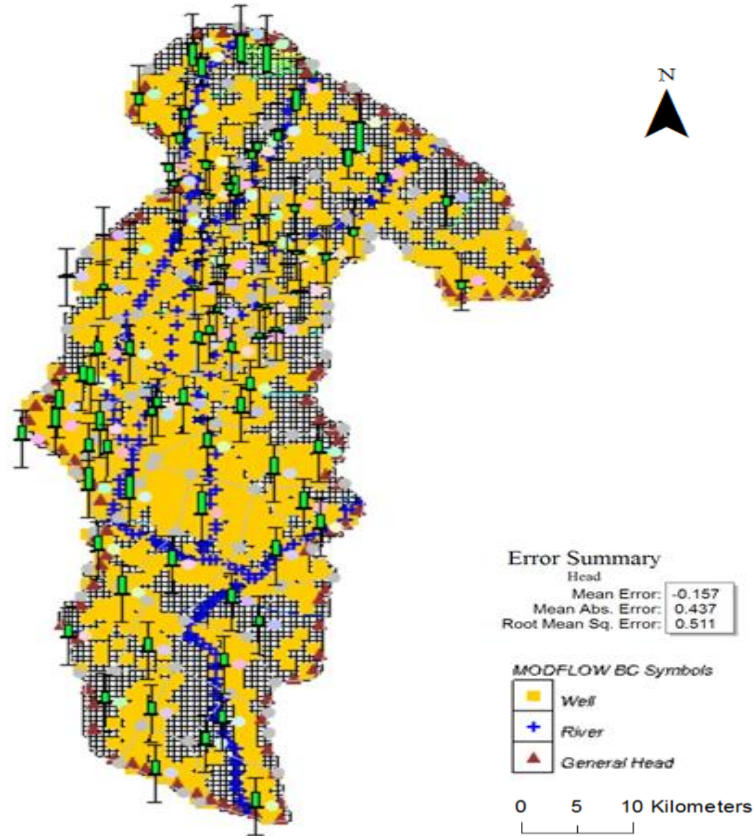
شکل ۹. درصد تغییرات بارش در ماه‌های مختلف، سناریوهای Rcp 8.5، Rcp 4.5، Rcp 2.6 و سطوح احتمالاتی ۹۰ و ۵۰ درصد در دوره‌ی ۲۰۴۵-۲۰۱۸ در مقایسه با دوره‌ی پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۸



شکل ۱۰. درصد تغییرات بارش در ماه‌های مختلف، سناریوهای Rcp 8.5، Rcp 4.5، Rcp 2.6 و سطوح احتمالاتی ۹۰ و ۵۰ درصد در دوره‌ی ۲۰۷۲-۲۰۴۶ در مقایسه با دوره‌ی پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۸

### نتایج واسنجی و صحت سنجی در حالت ماندگار و غیرماندگار

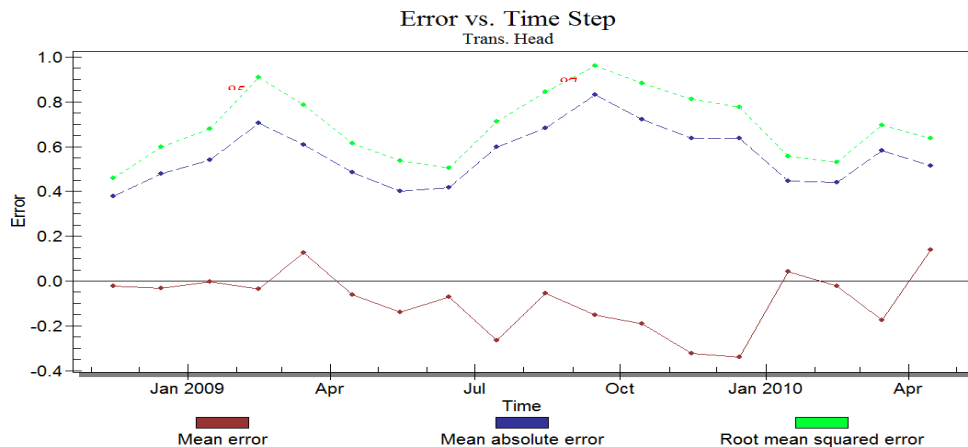
در حالت ماندگار یک ماه با تراز آب زیرزمینی ماندگار انتخاب و واسنجی مدل در این حالت انجام شد (شکل (۱۱)). این شکل نشان می‌دهد در حالت ماندگار مقدار RMSE محاسبه شده بر اساس تراز شبیه سازی شده در همه پیزومترها، برابر با ۰/۵ متر است که حاکی از دقت بالایی شبیه سازی در حالت ماندگار است.



شکل ۱۱. موقعیت پیزومترهای واسنجی شده دشت در حالت غیرماندگار

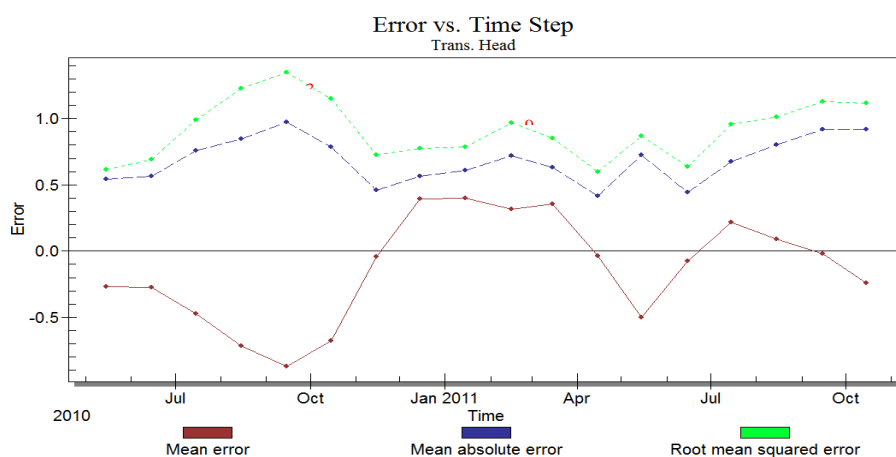
برای حصول اطمینان از درستی نتایج شبیه سازی، در حالت غیرماندگار پارامترهای آبدهی ویژه و تغذیه برای دو دوره ۱۸ ماهه در ۱۰۳ پیزومتر واسنجی و صحت سنجی شدند و در محل هر یک پیزومترها برای دو حالت ماندگار و غیر ماندگار میزان خطای شاخص‌های  $MAE$  و  $RMSE$  بدست آمد. شکل‌های (۱۲) و (۱۳) تطبیق قابل قبول نتایج شبیه سازی تراز در مدل آب زیرزمینی را نسبت به داده‌های واقعی در مراحل واسنجی و صحت سنجی نشان می‌دهد.

میزان خطا در حالت ماندگار بعد از واسنجی مدل در دامنه قابل قبول قرار دارد. در حالت غیر ماندگار مقادیر خطاها در دوره زمانی ۱۸ ماهه واسنجی مدل (مهر ۱۳۸۷ تا اسفند ۱۳۸۸) در شکل ۱۲ دیده می‌شود و در همه ماه‌ها در محدوده‌ی قابل قبول قرار دارد که حاکی از عملکرد مناسب مدل می‌باشد. بر این اساس بیشترین مقدار  $RMSE$  در دوره واسنجی مربوط به ماه اکتبر و به میزان ۰/۸۷ متر می‌باشد.



شکل ۱۲. میزان شاخص‌ها  $MAE$ ،  $ME$  و  $RMSE$  در دوره ۱۸ ماهه‌ی واسنجی

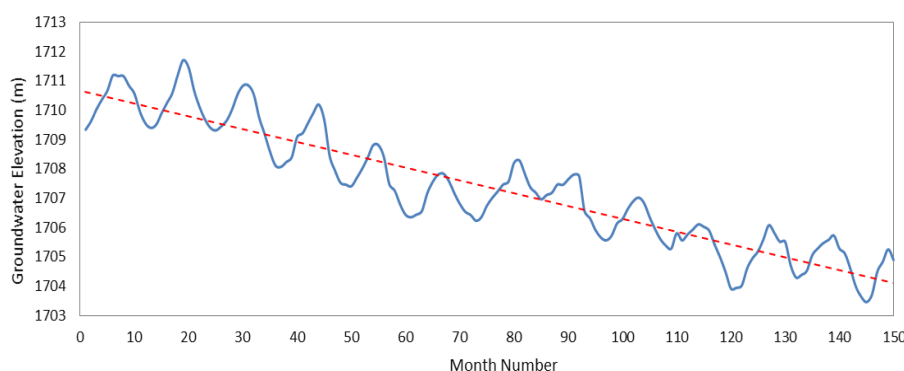
برای تصدیق عملکرد مدل، صحت سنجی مدل برای دوره‌ی ۱۸ ماهه (شهریور ۱۳۹۰ - فروردین ۱۳۸۹)، صورت پذیرفت و مقدار شاخص‌های RMSE و MAE بدست آمده (شکل ۱۳) نشان دهنده دقت قابل قبول مدل شبیه‌سازی می‌باشد. مقدار خطای RMSE در اکثر ماه‌ها در محدوده‌ی قابل قبول قرار دارد که حاکی از انطباق مناسب مدل شبیه‌سازی شده با شرایط طبیعی آبخوان می‌باشد. بر این اساس بیشترین مقدار RMSE در دوره صحت سنجی مربوط به ماه اکتبر و به میزان ۱/۳ متر می‌باشد.



شکل ۱۳. میزان شاخص‌ها MAE، ME و RMSE در دوره ۱۸ ماهه‌ی صحت‌سنجی

#### روند تغییرات آب زیرزمینی

عوامل انسانی کاهش تراز آب زیرزمینی را می‌توان به دو بخش تقسیم نمود. بخش اول شامل تولید و افزایش گازهای گلخانه‌ای و پیامدهای تغییر اقلیم ناشی از آن مانند تغییر در دما و بارش و بخش دوم شامل افزایش برداشت آب زیرزمینی مانند افزایش سطح زیر کشت (افزایش نیاز آبی)، افزایش برداشت از چاه‌های بهره‌برداری و غیره می‌باشد (Taylor et al., 2012). اثرات این تغییرات را نیز می‌توان به آب زیرزمینی دشت رزن بسط داد، که در این تحقیق به بررسی اثر تغییر اقلیم بر نوسانات منابع آب زیرزمینی دشت رزن پرداخته شد. روند تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی دشت رزن همان گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، طی دوره مشاهداتی تاریخی ۴/۵ متر کاهش نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. هیدروگراف واحد دشت رزن و روند تغییر سطح آب زیرزمینی طی دوره مشاهداتی تاریخی

#### تأثیرات متغیرهای اقلیمی بر تراز آب زیر زمینی منطقه در دوره‌های آتی

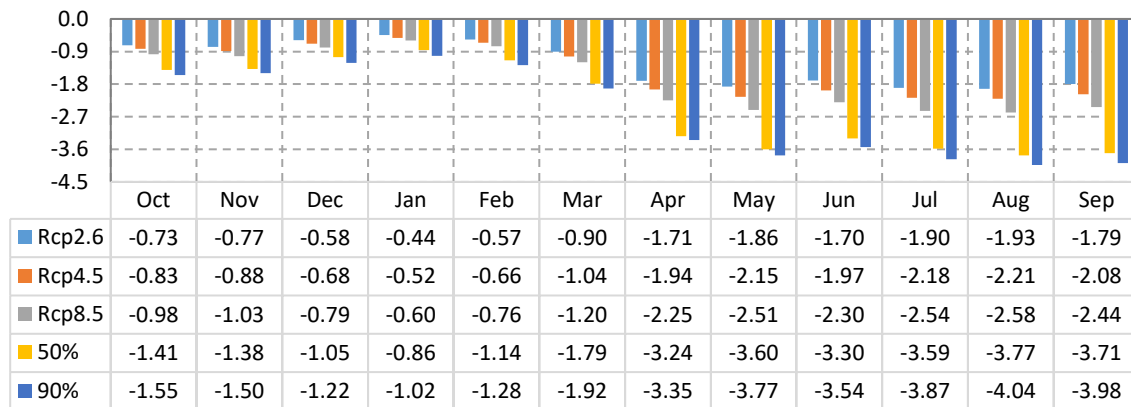
بعد از صحت‌سنجی مدل و اطمینان از عملکرد مناسب آن به پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان در دو دوره‌ی آتی ۲۰۱۸-۲۰۴۵ و ۲۰۷۲-۲۰۴۵ با استفاده از مدل GMS پرداخته شد. بدین منظور بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم Rcp 8.5, Rcp 4.5, Rcp 2.6 و دو سطح احتمالاتی ۵۰ و ۹۰ درصد، عملکرد آبخوان مورد ارزیابی قرار گرفت و میزان نوسانات آن محاسبه شد. برای این کار پس از تغییرات ایجاد شده در پارامترهای مختلفی که بارش و دما بر آن تاثیر گذاشته اند از جمله تغذیه آبخوان، دبی رودخانه‌ها، تبخیر آب زیرزمینی و برداشت از چاه‌های آب زیرزمینی آبخوان، مدل عددی مجدداً اجرا و شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی برای دوره‌های آتی انجام گرفت. بر اساس نتایج

بدست آمده، تراز آب زیرزمینی تحت سناریوهای اقلیمی Rcp 8.5، Rcp 4.5، Rcp2.6 و دو سطح احتمالاتی ۹۰ و ۵۰ درصد برای دوره‌های ۲۰۱۸-۲۰۴۵ و ۲۰۷۲-۲۰۴۵ نسبت به دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۸ به طور میانگین بین ۲/۴۴- تا ۶/۲- متر افت نشان داد که مقادیر آن در جدول (۲) آمده است.

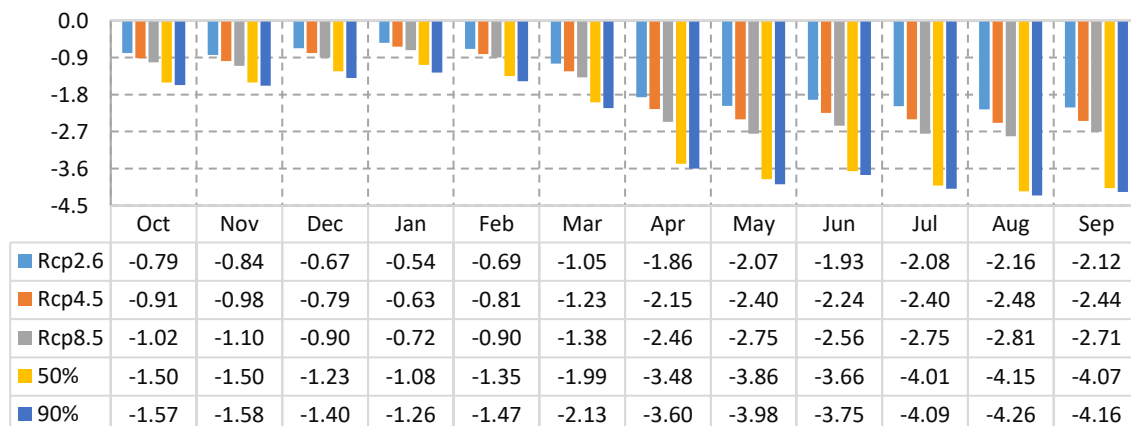
جدول ۲- میانگین افت تراز سطح آب زیرزمینی نسبت به دوره‌ی پایه بر حسب متر

سناریو	میزان افت دوره (m)	
	۲۰۴۵-۲۰۱۸	۲۰۷۲-۲۰۴۵
Rcp2.6	-۲/۴۴	-۲/۶۹
Rcp4.5	-۳/۲۲	-۳/۵۶
Rcp8.5	-۳/۹۹	-۴/۳۵
0.5	-۲/۶۹	-۲/۹۴
0.9	-۵/۸۳	-۶/۲۰

میزان نوسانات تراز سطح آب زیرزمینی در ماه‌های مختلف در دوره‌های آبی در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، افت تراز آب زیرزمینی در شش ماه مهر تا اسفند (فصل پاییز و زمستان) روند کاهشی دارد و علت آن نیز، تغییر بارش کمتر در دوره‌های آبی و حتی افزایش بارش برای سه سناریو Rcp 8.5، Rcp 4.5، Rcp 2.6 می‌باشد. از طرفی افزایش دمای کمتری در این شش ماه وجود دارد و حتی در برخی از سناریوها کاهش دما مشاهده شده می‌باشد. در شش ماه فروردین تا شهریور (فصل بهار و تابستان) نسبت به شش ماه قبل (فصل پاییز و زمستان) افت تراز آب زیرزمینی بیشتر می‌شود. افزایش دما و کاهش بارش از علت‌های افزایش افت تراز آب زیرزمینی در این ماه‌ها است. بیشترین افت آب زیرزمینی در ماه مرداد و کمترین افت آب زیرزمینی در ماه دی صورت گرفت.



شکل ۱۵. میزان نوسانات تراز آب زیرزمینی در ماه‌های مختلف در دوره‌ی ۲۰۴۵-۲۰۱۸ نسبت به دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۸



شکل ۱۶. میزان نوسانات تراز سطح آب زیرزمینی در ماه‌های مختلف در دوره‌ی ۲۰۷۲-۲۰۴۵ نسبت به دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۸

## نتیجه گیری

تغییر اقلیم و پیامدهای ناشی از آن یکی از مشکلات اساسی در مدیریت منابع آب است و پیش بینی آثار و تبعات آن در دوره‌ی آتی ضروری است. در این پژوهش برای پیش بینی دما و بارش در دوره‌ی آتی از مدل‌های گردش عمومی AOGCM استفاده شد. جهت اعتبارسنجی و ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌های گردش عمومی و برازش داده‌ها از شاخص‌های RMSE، MAE و NS بهره گرفته شد. در بررسی عدم قطعیت، برای اعتبار بخشی و بالا بردن دقت در نتایج پیش‌بینی‌ها به یک مدل اکتفا نشده و از شش مدل گردش عمومی AOGCM شامل مدل‌های BCC-CSM1-1، CCSM4، GFDL-CM3، IPSL-CM5A-LR، MIROC-ESM و HadGEM2-ES تحت سناریوهای انتشار Rcp 2.6، Rcp 4.5، Rcp 8.5 و دو سطح احتمالاتی ۹۰ و ۵۰ درصد از خروجی شش مدل و سه سناریو استفاده شد. بر اساس نتایج پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی برای سناریوهای Rcp 2.6، Rcp 4.5، Rcp 8.5 و دو احتمال ۹۰ و ۵۰ درصد به ترتیب، تغییرات میانگین بلندمدت دما  $+۰/۶۵۳$ ،  $+۰/۶۵۳$ ،  $+۰/۶۵$  و  $-۰/۰۴$  و  $+۰/۶$  درجه سانتی‌گراد و تغییرات میانگین بلند مدت بارش به میزان  $-۰/۱۵$ ،  $-۲/۰۶$ ،  $+۲/۲۵$ ،  $+۲/۳$  و  $-۳۰/۲$  درصد طی دوره ۲۰۱۸-۲۰۴۵ بدست آمد. با همان ترتیب، تغییرات میانگین بلند مدت دما  $+۲$ ،  $+۲/۲$ ،  $+۱/۵۵$ ،  $+۰/۹۸$  و  $+۲/۳$  درجه سانتی‌گراد و تغییرات میانگین بلند مدت بارش به میزان  $-۱۷$ ،  $-۲۳/۷$ ،  $-۱۸/۳$ ،  $-۴۶$  و  $-۱۳/۸$  درصد طی دوره‌ی آماری ۲۰۴۵-۲۰۷۲ حاصل شد. سپس با استفاده از مدل GMS، نوسانات ناشی از تغییر اقلیم بر تراز آبخوان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد میزان افت تراز آب زیرزمینی در سناریوهای اقلیمی Rcp 2.6، Rcp 4.5، Rcp 8.5 و دو سطح احتمالاتی ۹۰ و ۵۰ درصد برای دوره‌های ۲۰۱۸-۲۰۴۵ و ۲۰۴۵-۲۰۷۲ نسبت به دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۸ به طور میانگین بین  $-۲/۴۴$  تا  $-۶/۲$  متر است. علت این امر این است که کاهش بارش و افزایش دما و به موجب آن افزایش تبخیر، باعث تغییراتی در چرخه‌ی آب و هوایی موجود می‌گردد که کاهش آب سطحی و تغذیه منابع آب زیرزمینی و در پی آن افت تراز آب زیرزمینی را به دنبال دارد. بر اساس این نتایج لازم است برای سازگاری و کاهش تبعات منفی ناشی از تغییر اقلیم بر منابع آب منطقه، با بکارگیری مدیریت صحیح منابع آب و در نظر گرفتن نیاز کشاورزی، مصارف شرب، صنعت و زیست محیطی در سال‌های آتی، از آثار سوء تغییر اقلیم بر منابع آب منطقه کاست، تا به حفظ هر چه بهتر این منابع منجر گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Acharyya, A. (2014). Groundwater, Climate Change and Sustainable Well Being of the Poor: Policy options for South Asia, China and Africa. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 157, 226-235.
- Ansari, H., Khadivi, M., Salehnia, N., and Babaeian, I. (2014). Evaluation of Uncertainty LARS Model under Scenarios A1B, A2 and B1 in Precipitation and Temperature Forecast (Case Study: Mashhad Synoptic Stations). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 8(4), 664-672. (In Farsi)
- Ansari, S., Massah Bavani, A., Roozbahani, A. (2016). Effects of Climate Change on Groundwater Recharge (Case Study: Sefid Dasht Plain). *Water and Soil*, 30(2), 416-431. (In Farsi)
- Azari, A., Zeynoddin, M., Ebtehaj, I., Sattar, A., Gharabaghi, B. and Bonakdari, H. (2021). Integrated preprocessing techniques with linear stochastic approaches in groundwater level forecasting. *Acta Geophysica*, 69(4), 1395-1411.
- Changnon, S.A., Huff, F.A., and Hsu, C.F. (1988). Relations between precipitation and shallow groundwater in Illinois. *Journal of Climate*, 1, 1239-1250.
- Costa, D., Zhang, H. and Levison, J. Impacts of climate change on groundwater in the Great Lakes Basin: A review. *Journal of Great Lakes Research*, 47(6), 1613-1625. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2021.10.011>.
- Crosbie, R.S., Scanlon, B.R., Mpelasoka, F.S., Reedy, R.C., Gates, J.B., and Zhang, L. (2013). Potential climate change effects on groundwater recharge in the High Plains Aquifer, USA, *Water Resour. Res.*, 49(7), 3936-3951.
- Epting, J., Michel, A., Affolter, A. and Huggenberger, P. (2021). Climate change effects on groundwater recharge and temperatures in Swiss alluvial aquifers. *Journal of Hydrology X*, 11(3), 100071. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2020.100071>.
- GMS User Manual 10.4. (2019). Online User Manual, [https://www.xmswiki.com/wiki/GMS:GMS\\_User\\_Manual\\_10.4](https://www.xmswiki.com/wiki/GMS:GMS_User_Manual_10.4).
- Gulacha, M.M., and Mulungu, D.M.M. (2017). Generation of climate change scenarios for precipitation and temperature at local scales using SDSM in Wami-Ruvu River Basin Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth*, 100, 62-72.



- Guzman, S. M., Paz, J. O., Tagert, M. L. M. and Mercer, A. E. (2019). Evaluation of Seasonally Classified Inputs for the Prediction of Daily Groundwater Levels: NARX Networks Vs Support Vector Machines. *Environmental Modeling & Assessment*, 24(2), 223-234.
- Hosseinihah, M., Zeinivand, H., Haghizadeh, A., and Tahmasebipour, N. (2014). Validation of Global Climate Models (GCMS) Temperature and Rainfall Simulation in Kermanshah, Ravansar and West Islamabad Stations. *Iranian journal of Ecohydrology*, 1(3), 195-206. (In Farsi)
- IPCC, (2014). Summary for policmarkers. In: *Climate Change. 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part a: Global and Sectoral Aspect. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* cambridge University Press, cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1-132.
- Kamal, A., and Massahbavani, A. (2012). The Uncertainty Assessment of AOGCM & Hydrological Models for Estimating Gharesu Basin Temperature, Priciation, and Runoff Under Climate Change Impact. *Iranian Water Research Journal*, 5(9), 39-49. (In Farsi)
- Kamkar, V., Azari, A. and Fatemi, S. E. (2021). Estimation of recharge and flow exchange between river and aquifer based on coupled surface water-groundwater model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(7), 1779-1793. (In Farsi)
- Karamouz, M., Abolpour, A., and Nazif, S. (2011). Evaluation of the impact of climate change on groundwater resources of Rafsanjan. 4th Iranian Conference of Water resources management, Tehran, Amirkabir University, May 3th and 4th. (In Farsi)
- Kersic, N. (1997). *Quantitative Solution in Hydrology and Groundwater Modeling*. Lewis Publishers.
- Kumar, C.P., and Singh, S. (2015). CLIMATE CHANGE EFFECTS ON GROUNDWATER RESOURCES. *Octa Journal of Environmental Research*, Oct. Jour. Env. Res. 3(4), 264-271.
- Lemieux, J., Hassaoui, J., Molson, J., Therrien, R., Therrien, P., Chouteau, M., and Ouellet, M. (2015). Simulating the impact of climate change onthe groundwater resources of the Magdalen Islands. *Journal of Hydrology*, 3, 400-423.
- Nadiri, A. A., Naderi, K., Khatibi, R., and Gharekhani, M. (2019). Modelling groundwater level variations by learning from multiple models using fuzzy logic. *Hydrological sciences journal*, 64(2), 210-226.
- New, M., and Hulme, M. (2000). Representing uncertainty in climate change scenarios: a Monte-Carlo approach. *Integrated Assessment* 1, 203-213.
- Nyembo, L. O., Larbi, I., Mwabumba, M., Selemani, J. R., Dotse, S. Q., Limantol, A. M. and Bessah, E. (2022). Impact of climate change on groundwater recharge in the lake Manyara catchment, Tanzania. *Scientific African*, 15(10), e01072. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01072>.
- Ruiz-Ramos, M., and Minguez, M.I. (2010). Evaluating uncertainty in climate change impacts on crop productivity in the Iberian Peninsula. *Climate Research*, 44, 69-82.
- Sadat Ashofte, P., and Bozorg Hadad, O. (2014). A New Probabilistic Approach for Evaluation of the Effects of Climate Change on Water Resources. *Water Resources Engineering*, 6(19), 51-66. (In Farsi)
- Shrestha, S., Bach, T.V., and Pandey, V.P. (2016). Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Environmental Science and Policy*, 61, 1-13.
- Taylor, R.G., et al. (2012). Ground water and climate change. *NATURE CLIMATE CHANGE*, 3, 322-329.
- Wilby, R., and Harris, I. (2006). A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames. *UK, Water Resources Research*, 42(2), 1-10.
- Zeinali, M., Azari, A. and Heidari, M. (2020a). Simulating Unsaturated Zone of Soil for Estimating the Recharge Rate and Flow Exchange Between a River and an Aquifer. *Water Resources Management*, 34, 425-443.
- Zeinali, M., Azari, A. and Heidari, M. (2020b). Multiobjective Optimization for Water Resource Management in Low-Flow Areas Based on a Coupled Surface Water-Groundwater Model. *Journal of Water Resource Planning and Management (ASCE)*, 146(5), 04020020.
- Zektser, I.S., and Loaiciga, H.A. (1993). Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: Past, present, and future. *Journal of Hydrology*, 144, 405- 427.