



Assessing the Intensity of the Climate Change Effect on Groundwater Resources of Varamin Plain Using NISTOR Index

H. Azizi¹, H. Ebrahimi^{2*}, H. Samani³, and V. Khaki⁴

Abstract

The aim of this study was to investigate the Intensity of the effect of climate change on groundwater resources in Varamin plain using CMIP5 group models under RCP release scenarios. The output of these models was downscaled by LARS-WG software. For this purpose, the period 1989-2005 was used as a base period to select the regional model and the period 2021-2050 to study the NISTOR index in the future. The results showed that the EC-EARTH model of CMIP5 series under three scenarios RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 for the next period has a high performance in simulating temperature and precipitation in the study area. On average, for the average temperature in the study area, under the optimistic and intermediate scenarios of RCP2.6 and RCP4.5, respectively, an increase of 1 to 1.2° C was predicted compared to the base period. For the most pessimistic scenario, RCP8.5, in the period 2050-2020, an average increase of about 1.5 degrees Celsius was predicted compared to the base period. Also in future periods, an increase in precipitation was observed in the early months of the year to late spring and a decrease in precipitation in autumn. Overall and over the next 30 years, the RCP4.5 scenario showed slightly more annual precipitation increase over the base period compared to the other two scenarios. Also, considering the effective rainfall, the results of the NISTOR inferential matrix showed that in all three scenarios, the intensity of climate change effects on the groundwater resources of Varamin plain in the next three decades is significant.

Keywords: Climate Change, LARS-WG, Varamin Plain, Groundwater, NISTOR.

Received: July 25, 2020

Accepted: October 16, 2020

ارزیابی شدت اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی دشت ورامین با استفاده از شاخص NISTOR

حمیدرضا عزیزی^۱، حسین ابراهیمی^{۲*}،
حسین محمودلی سامانی^۳ و ویدا خاکی^۴

چکیده

هدف از این مطالعه بررسی شدت اثر تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های گروه CMIP5 تحت سناریوهای انتشار RCP بر منابع آب زیرزمینی دشت ورامین می‌باشد که خروجی این مدل‌ها توسط نرم‌افزار LARS-WG ریزمقیاس و واسنجی شد. برای این منظور از دوره (۲۰۰۵-۱۹۸۹) به عنوان دوره پایه جهت انتخاب مدل مناسب منطقه و دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) جهت بررسی شاخص NISTOR در آینده استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل EC-EARTH در شبیه‌سازی دما و بارش در منطقه مطالعاتی از سری CMIP5 تحت سه سناریوی RCP4.5، RCP2.6 و RCP8.5 برای دوره آینده عملکرد بالایی دارد. بطور میانگین دمای متوسط در منطقه مطالعاتی، تحت سناریوهای خوشبینانه و حد واسط به ترتیب RCP2.6 و RCP4.5، افزایش ۱ تا ۱/۲ درجه سانتیگراد را نسبت به دوره پایه پیش‌بینی کرد در حالیکه همین افزایش دما بر اساس بدبینانه‌ترین سناریو یعنی RCP8.5 در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۰ بطور متوسط افزایش حدود ۱/۵ درجه سانتیگراد نسبت به دوره پایه پیش‌بینی گردید. همچنین در دوره‌های آتی، افزایش بارش در فصل بهار و کاهش بارش در فصل پاییز مشاهده گردید. بطور کلی سناریوی RCP4.5 بیشتر از دو سناریوی دیگر افزایش بارش سالانه در ۳۰ سال آینده نسبت به دوره پایه را نشان داد. همچنین نتایج ماتریس استنتاجی NISTOR با در نظر گرفتن بارش مؤثر و شاخص اقلیمی De-Martone نشان داد که در هر سه سناریو شدت اثرات تغییر اقلیم بر روی منابع آب زیرزمینی دشت ورامین در سه دهه آینده قابل توجه (شدید) می‌باشد که نشان‌دهنده کاهش مقدار تغذیه منابع آب زیرزمینی است.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، LARS-WG، دشت ورامین، آب زیرزمینی، NISTOR

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۵/۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۷/۲۵

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: Ebrahimi165@yahoo.com

3- Professor, Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مهندسی عمران، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۳- استاد، گروه مهندسی عمران، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

پدیده تغییر اقلیم، تغییر حالتی از شرایط آب و هوایی است که در آن میانگین عناصر اقلیمی به مدت چند دهه یا طولانی‌تر دچار تغییر می‌شود. این تغییرات ممکن است به علت نوسانات چرخه خورشیدی، فوران آتشفشان‌ها، افزایش گازهای گلخانه‌ای و تغییر کاربری اراضی باشد. تغییرات دمای کره زمین و روند رو به افزایش آن با توجه به میانگین شرایط آب و هوایی در سراسر جهان، به عنوان تغییر اقلیم شناخته می‌شود که تأثیر قابل توجهی بر منابع آب زیرزمینی و سطحی دارد (Hashmi et al., 2011).

با توجه به اینکه اثر تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی نسبت به منابع آب سطحی غیرمستقیم و آهسته‌تر می‌باشد، پایش وضعیت این منابع و حفظ پایداری آنها تحت تأثیر این تغییرات از اهمیت بالایی برخوردار است (Shakiba and Cheshmi, 2013). اولین گام در بررسی اثرات تغییر اقلیم، بررسی تأثیر این پدیده بر پارامترهای اقلیمی است. بنابراین جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم در دوره‌های آتی باید در ابتدا مقدار متغیرهای اقلیمی در آینده مورد شبیه‌سازی قرار گیرد (Node Farahani et al., 2018). یکی از معتبرترین ابزار برای بررسی آثار تغییر اقلیم استفاده از متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای اقلیمی نظیر LARS-WG است که می‌تواند پارامترهای اقلیمی را در مقیاس محلی پیش‌بینی کند. در این راستا مطالعات متعددی صورت گرفته است که در ادامه به آنها اشاره می‌گردد.

Jyrkama and Sykes (2007) اثرات زمانی و مکانی تغییر اقلیم را بر تغذیه آب زیرزمینی در حوضه رودخانه گرند به‌وسیله مدل هیدرولوژیکی HELP3 واقع در کانادا مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، از پیش‌بینی‌های گزارش سوم IPCC جهت بررسی اثر تغییر اقلیم استفاده گردید. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییر بارندگی، بیشترین اثر را بر چرخه هیدرولوژیکی دارد، در حالی که تابش خورشیدی کمترین تأثیر را داشته است. تغذیه منابع زیرزمینی تحت تمام سناریوها روند افزایشی داشته و تبخیر- تعرق نیز در تمام موارد افزایش یافته است. Ansari et al. (2016) به بررسی تغذیه آب زیرزمینی تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم در سفید دشت در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از مدل HADCM3 تحت سناریوهای انتشار A2 و B1 در دوره ۲۰۳۵-۲۰۱۵ توسط نرم‌افزار LARS-WG پرداخته‌اند. نتایج مدل‌سازی میزان روان-آب تولیدی توسط مدل IHACRES تحت شرایط تغییر اقلیم نشان داد که افزایش بارندگی تحت هر دو سناریوی انتشار در آینده و همچنین در انتهای دوره ۲۰۳۵ میزان تجمعی تغذیه

آب زیرزمینی در سناریوی A2 نسبت به B1 حدود ۱۰ مترمکعب بر ثانیه افزایش داشته که تأثیر بیشتر تغییرات اقلیمی را تحت سناریوی A2 تأیید می‌کند. (Nistor et al., 2016) با استفاده از روش جدید NISTOR-CEGW با در نظر گرفتن هم‌زمان بارش مؤثر و شاخص اقلیمی De Martonne، در کارپاتیانز (Carpathians) شدت اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که شدت اثر تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه کم بود.

(Aghakhani Afshar et al., 2017) به بررسی مؤلفه‌های اقلیمی در دوره آتی با توجه به سناریوهای گزارش پنجم IPCC در حوزه کشف‌رود پرداختند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که مؤلفه بارش، روند تغییرات قابل توجه کاهشی و افزایشی متغیری را از خود نشان می‌دهد. همچنین دمای متوسط نیز روند افزایشی قابل توجهی با سطح اعتماد ۹۹/۹۰ و ۹۹/۹ درصد از خود نشان می‌دهد. Soleimani sardoo et al. (2018) به بررسی آثار تغییر اقلیم بر افت آب زیرزمینی دشت کرمان تحت سناریوهای اقلیمی مختلف دوره ۱۴۰۱-۱۳۹۰ پرداخته‌اند. آن‌ها از مدل اقلیمی HADCM3 تحت سناریوهای انتشار SRES و مدل GMS جهت شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی استفاده کردند. نتایج حاصل از آثار تغییر اقلیم بر افت آب زیرزمینی در دوره آتی نشان‌دهنده افت سطح آب زیرزمینی تحت سناریوهای تغییر اقلیم در دوره آتی را دارد که با مدیریت صحیح آبخوان و همچنین ارائه راهکارهای سازگار با تغییر اقلیم از افت سطح آب زیرزمینی در آینده کاسته خواهد شد. (Shahvari et al., 2019) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه دشت ورامین با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان رواناب در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ تحت هر سه سناریو در فصول بهار و تابستان افزایش خواهد یافت و در فصول پاییز و زمستان کاهش می‌یابد. این جابجایی فصلی رواناب ناشی از اثرات تغییر اقلیم، به شکل افزایش دما و تغییر الگوی بارش می‌باشد. (Klaas et al., 2020) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی منطقه کارست تحت مدل آب و هوایی HadCM3 پرداختند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده کاهش مقدار تغذیه و ذخیره منابع آب زیرزمینی بود. (Haidu and Nistor, 2020) با استفاده از شاخص NISTOR، شدت اثر تغییر اقلیم در مقیاس مکانی در شرق فرانسه را با در نظر گرفتن میزان بارش مؤثر و شاخص اقلیمی دی-مارتون را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که شدت اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی متوسط و کم است.

بررسی منابع نشان می‌دهد که نتایج حاصل از مطالعه اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی با توجه به شدت، مدت و گستره جغرافیایی آن در هر منطقه متفاوت بوده است و قابل تعمیم به مناطق دیگر نمی‌باشد.

از طرفی در مطالعات صورت گرفته مربوط به تغییر اقلیم، بکارگیری شدت اثر تغییر اقلیم توسط شاخص NISTOR با استفاده از سناریوهای گزارش پنجم¹ IPCC برای دوره آبی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین در پژوهش حاضر در نظر است تا با ریزمقیاس‌نمایی اطلاعات مدل‌های آب و هوایی جفت شده اقیانوسی-جوی² (AOGCMs) از سری پنجمین گزارش ارزیابی IPCC (CMIP5-AR5) و محاسبه مقدار (بارش مؤثر و ضریب اقلیمی دی-مارتون) منطقه مطالعاتی تحت سناریوهای تغییر اقلیم در سه دهه‌ی آینده، شدت اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی را به‌وسیله شاخص NISTOR مورد ارزیابی قرار گیرد تا نتایج با نتایج سایر پژوهشگران در منطقه مورد مطالعه مورد مقایسه قرار گیرد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دشت ورامین از نظر کشاورزی منطقه‌ای استراتژیک در فاصله ۴۵-۴۰ کیلومتری جنوب تا جنوب شرقی استان تهران واقع شده است. وضعیت اقلیمی این دشت از بسیاری جهات مشابه آب و هوای فلات مرکزی ایران می‌باشد و در اقلیم خشک تا نیمه خشک قرار دارد. حوضه آبریز دشت ورامین با وسعتی معادل ۱۷۲۰ کیلومتر مربع از زیرحوضه‌های دریاچه نمک است که در محدوده جغرافیایی ۳۵ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۹ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی واقع شده است (شکل ۱).

میانگین سالانه دما در این حوضه ۱۶/۹ درجه سانتیگراد بوده و گرم‌ترین ماه سال ژوئیه با میانگین دمای ۲۹/۵ درجه سانتیگراد و سردترین ماه سال ژانویه با میانگین دمای ۳/۳ درجه سانتیگراد است. همچنین میانگین بارش ۱۵۶ میلی‌متر در سال است. خشک‌ترین ماه سال آگوست با متوسط بارش صفر میلی‌متر می‌باشد، همچنین بیشترین بارش مربوط به ماه مارس به میزان ۳۵ میلی‌متر است. رودخانه‌های جاجرو، کندرود-گلندوک و دماوند در حوضه آبریز مطالعاتی قرار گرفته‌اند که مهم‌ترین آنها رودخانه جاجرو است که سد لتیان در بالادست آن احداث شده است. رودخانه جاجرو از ارتفاعات رشته جبال البرز در شمال تهران سرچشمه گرفته و در جهت جنوب غربی حرکت می‌کند و به سد لتیان وارد می‌شود. سپس با دریافت رودخانه‌ی دماوند، به دریاچه نمک منتهی می‌شود. سد لتیان یکی از عواملی است که در چرخه هیدرولوژیکی حوضه و همچنین توسعه کشاورزی پایین دست خود تأثیر زیادی دارد. لازم به ذکر است بارندگی و رودخانه جاجرو مهم‌ترین عوامل تغذیه آبخوان ورامین و برداشت (پمپاژ توسط چاه) مهم‌ترین عامل خروجی آب به شمار می‌آید.

گام اول در این پژوهش، بررسی روند تغییرات پارامترهای اقلیمی تحت سناریوهای CMIP5 در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ دشت ورامین می‌باشد، برای این بررسی نیاز است در ابتدا داده‌های مشاهداتی دوره پایه مشخص شوند، لذا در این پژوهش به توصیه سازمان جهانی هواشناسی به‌منظور هماهنگی در انتخاب دوره پایه در مطالعات مختلف تغییر اقلیم

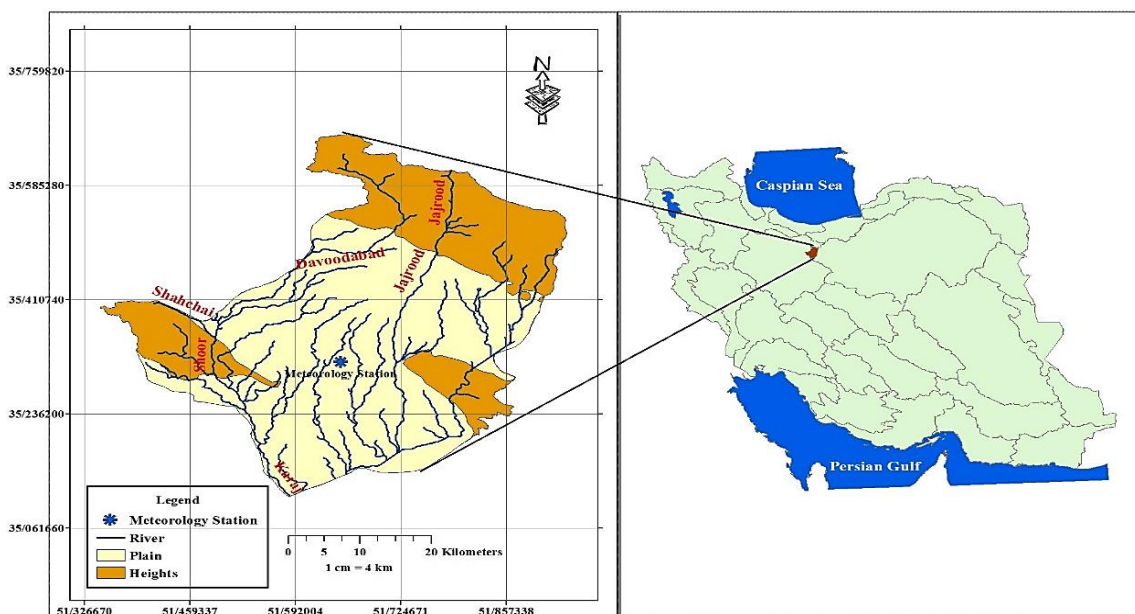


Fig. 1- Geographical location of the study area (Varamin plain)

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (دشت ورامین)

دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) محاسبه و با توجه به ماتریس استنتاجی ارایه شده NISTOR، شدت اثر تغییر اقلیم ارزیابی شد.

۲-۲- مدل‌های گردش عمومی جو سری CMIP5 و ارزیابی عملکرد مدل‌ها

در حال حاضر معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های سه بعدی جفت شده جوی-اقیانوسی گردش عمومی هوا می‌باشند که به طور مخفف از آن به عنوان AOGCM یاد می‌شود (Wilby and Harris, 2006). این مدل‌ها بر پایه قوانین فیزیکی که با روابط ریاضی بیان می‌شوند، استوار هستند. IPCC¹ از سال ۱۹۹۰ تاکنون پروژه استانداردسازی استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جوی-اقیانوسی را راه‌اندازی و پنج گزارش ارزیابی در سه بخش مبانی علمی، آسیب‌پذیری، سازگاری و نیز فروفشاری تغییر اقلیم را عرضه کرده است. نسل جدیدی از مدل‌های گردش عمومی که در تهیه گزارش ارزیابی پنجم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم استفاده گردید، تحت عنوان پروژه درون مقایسه‌ای مدل‌های جفت شده CMIP5 شناخته شده است.

و امکان مقایسه آن‌ها، و با درنظر گرفتن همپوشانی آمار ایستگاه مطالعاتی و اکثر مدل‌های اقلیمی در دوره مشترک و همچنین داده‌های مشاهداتی موجود، از داده‌های روزانه ایستگاه هواشناسی ورامین در دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۸۹ میلادی استفاده گردید. موقعیت ایستگاه در شکل ۱ و اطلاعات آن در جدول ۱ مشخص شده است.

در گام بعدی، از مدل‌های آب وهوایی جفت شده اقیانوسی-جوی از سری پنجمین گزارش ارزیابی IPCC (CMIP5-AR5) جهت تجزیه و تحلیل روند سالانه و ماهانه بارش و دما با فرض ثابت بودن عوامل منطقه‌ای نظیر شیب، پوشش گیاهی و کاربری اراضی در دشت ورامین، تحت سناریوهای جدید انتشار (RCP) استفاده شد. سپس نتایج مدل‌های گزارش پنجم در دوره آتی نسبت به دوره پایه را با یکدیگر مقایسه و بهترین مدل اقلیمی را جهت شبیه‌سازی عناصر اقلیمی در دشت ورامین انتخاب گردید. در نهایت پس از ریز مقیاس‌نمایی و شبیه‌سازی عناصر اقلیمی به وسیله نرم‌افزار LARS-WG، با توجه به رویکرد گام به گام (شکل ۲)، میزان بارش مؤثر، تبخیر-تعرق واقعی و ضریب خشکی دی-مارتون برای هر یک از سناریوهای RCP در

Table 1- Varamin Synoptic Station Information

جدول ۱- اطلاعات ایستگاه سینوپتیک ورامین

Station Name	Station Type	Longitude	Latitude	Elevation(m)
Varamin	Synoptic	51.66	35.31	915

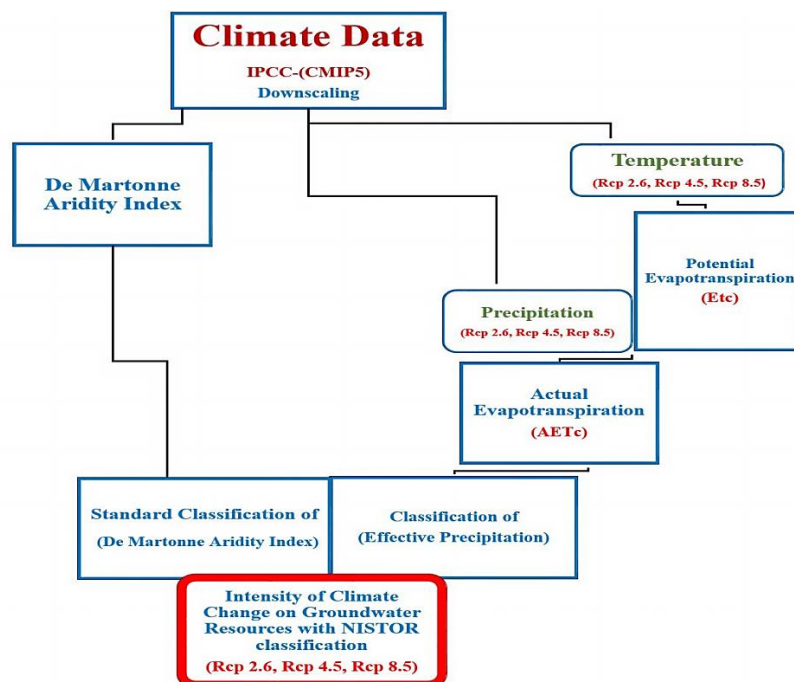


Fig. 2- Process of determining the severity of the climate change effect on groundwater resources

شکل ۲- فلوچارت تعیین شدت اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی (Nistor and Mindrescu, 2019)

برای ارزیابی این مدل‌ها در شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارش منطقه، مقادیر میانگین ماهانه دما و بارندگی شبیه‌سازی شده توسط این هر مدل در دوره پایه با مقادیر مشاهداتی متناظر ایستگاه مورد مطالعه در همان دوره مقایسه گردید. جهت بررسی عملکرد مدل‌ها از چهار معیار ضریب تعیین^۳ (R^2)، ضریب همبستگی (ρ)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE^4$) و معیار خطای بایس^۵ (Bias) استفاده شد که طبق روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$R^2 = \left[\frac{\sum X_0 X_S - \frac{\sum X_0 \sum X_S}{n}}{\sqrt{\left[\sum X_0^2 - \frac{(\sum X_0)^2}{n} \right] \left[\sum X_S^2 - \frac{(\sum X_S)^2}{n} \right]}} \right]^2 \quad (1)$$

$$\rho = \frac{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (X_S - \mu_S)(X_0 - \mu_0)}{\sigma_S \times \sigma_0} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (X_S - X_0)^2}{n}} \quad (3)$$

$$Bias = \frac{\sum_{m=1}^n (X_S - X_0)}{n} \quad (4)$$

مجموعه‌ای از آزمایش‌ها شامل شبیه‌سازی قرن بیستم و پروژه‌های اقلیمی قرن ۲۱م تحت سناریوهای جدید انتشار با عنوان نماینده خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCP) مدل‌های گزارش پنجم را تشکیل می‌دهند (Bjornaes, 2014). سناریوهای جدید انتشار دارای چهار خط سیر کلیدی با نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 می‌باشند که براساس میزان واداشت تابشی آن‌ها در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری شده‌اند. جدول ۲ مشخصات سناریوهای نماینده خطوط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (گزارش ارزیابی پنجم) را نشان می‌دهد (IPCC, 2013).

شصت و یک مدل اقلیمی به منظور شبیه‌سازی دوره‌های زمانی پایه و آینده در گزارش پنجم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم به کار رفته است که مهمترین تغییر آنها نسبت به گزارش سوم و چهارم در قدرت تفکیک مکانی مدل‌های گزارش پنجم می‌باشد که از حدود ۲/۵ در ۲/۵ درجه به حدود ۰/۵ در ۰/۵ ارتقاء یافته‌اند که پیشرفت بسیار بزرگی است. از بین این مدل‌ها، ۱۰ مدل برای پژوهش حاضر انتخاب گردید. اطلاعات کلی هر یک از ۱۰ مدل به همراه مؤسسات پژوهشی سازنده مدل‌ها و قدرت تفکیک مکانی آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

Table 2- Characteristics of representative scenarios for greenhouse gas concentrations (RCPs)
جدول ۲- مشخصات سناریوهای نماینده خطوط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCPs)

Scenarios	CO2 ppm	Forcing Radative (W/m ²)	Researchers
RCP2.6	490 ppm before 2100 and then decreases	Its maximum value is 3 (W / m2) and then decreases	IMAGE Modeling Team, Netherlands
RCP 4.5	650 ppm before 2100 and then remains constant	4.5 (W/m ²) will remain constant after 2100	GCAM (MiniCAM)
RCP 6.0	850 ppm before 2100 and then remains constant	6.5 (W/m ²) and remains constant after 2100	AIM Modeling Team, Japan
RCP 8.5	490 ppm before 2100 and then decreases	More than 8.5 (W/m ²) in 2100	MESSAGE Modeling Team, Austria

Table 3- Specifications of 10 selected models from CMIP5-AR5 collection in the present study (IPCC, 2013)

جدول ۳- مشخصات ۱۰ مدل منتخب از مجموعه CMIP5-AR5 در تحقیق حاضر

No.	Model	Institution	Spatial Resolution
1	EC-EARTH	EC-EARTH consortium published at Irish Centre for High End Computing, Netherlands/Ireland	1.28*2.5
2	CCSM4	National Center for Atmospheric Research, USA	1.25*0.9
3	GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	2.5*2.0
4	GFDL-ESM2G		
5	GFDL-CM	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	2.81*2.79
6	CAN ESM2		
7	MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	1.41*1.39
8	HADGEM2	Met Office Hadley Centre, UK	1.875 * 1.25
9	BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center, China	2.81*2.77
10	GISS-E2-H	NASA/GISS (Goddard Institute for Space Studies), USA	2*2.5

در این روابط، Xs داده‌های شبیه‌سازی شده، Xo داده‌های مشاهداتی، μ میانگین داده‌ها، σ انحراف معیار داده‌ها و n برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار p بیانگر ارتباط خطی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بوده که مقدار آن بین صفر تا یک می‌باشد. هرچه مقدار p به یک نزدیکتر باشد، نشان‌دهنده رابطه قوی‌تر خطی بین دو مقدار می‌باشد. با توجه به اینکه این معیار فقط الگوی رفتاری دو مجموعه از داده‌ها را نشان می‌دهد، بنابراین از معیارهای دیگری همچون RMSE و Bias استفاده می‌گردد، کمتر شدن آنها که به منزله اختلاف حداقل بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است، نشان از عملکرد بهتر مدل دارد.

تولید داده، سری‌های زمانی ۳۰ ساله از دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش روزانه تحت مدل سناریوهای تغییر اقلیم (RCP) تولید می‌شود.

۲-۴- ارزیابی مدل LARS-WG در منطقه مطالعاتی

برای اطمینان از توانایی مدل در تولید داده در آینده، داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل با داده‌های مشاهداتی در ایستگاه سینوپتیک ورامین، مقایسه گردید. این مقایسه به‌وسیله آزمون کلموگراف اسمیرنوف برای توابع احتمالاتی و T-test برای میانگین‌های داده‌های ریزمقیاس شده انجام شد.

۲-۵- شاخص تلفیقی (NISTOR)

این شاخص توسط Nistor et al. (2017) ارائه شده است و با ترکیب مقدار بارش مؤثر و شاخص اقلیمی دی-مارتن در مقیاس زمانی، اقدام به بررسی شدت اثرات تغییرات اقلیم بر روی منابع آب زیرزمینی در مقیاس مکانی و زمانی می‌نماید. در این مرحله با توجه به داده‌های شبیه‌سازی شده دما و بارش برای دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۵۰، مقدار بارش مؤثر و شاخص اقلیمی دی-مارتون تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 محاسبه می‌شود. برای این منظور لازم است مقدار بارش مؤثر که از اختلاف بین مقدار بارش اندازه‌گیری شده و تبخیر-تعرق واقعی است، محاسبه گردد. برای محاسبه تبخیر-تعرق واقعی لازم است ابتدا تبخیر-تعرق پتانسیل اصلاح شده به روش تورنت-وایت (Thorntwaite, 1948) محاسبه شود. تبخیر-تعرق پتانسیل اصلاح شده را می‌توان از معادله ۵ بدست آورد:

$$PET = 16N_m \left(\frac{10\bar{T}_m}{I_y} \right)^a \quad (5)$$

$$i_m = \left(\frac{\bar{T}_m}{5} \right)^{1.51} \quad (6)$$

$$I_y = \sum_{m=1}^{12} i_m \quad (7)$$

$$a = (675 \times 10^{-9})I^3 - (771 \times 10^{-7})I^2 + (179 \times 10^{-4})I + 0.492 \quad (8)$$

در این روابط (PET) تبخیر-تعرق پتانسیل بر حسب میلی‌متر، (N_m) ضریب اصلاحی برای عرض‌های جغرافیایی و بدون بُعد، (T_m) متوسط دمای ماهانه بر حسب سانتیگراد، (i_m) شاخص حرارتی ماهانه و بدون بُعد، (I_y) شاخص حرارتی سالانه و ضریب (a) تابعی است که به شاخص حرارتی سالانه بستگی دارد و بدون بُعد است. با تعیین مقدار تبخیر و تعرق ماهانه، می‌توان بر اساس رابطه ۹ مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه را برای هر سه سناریو تغییر اقلیم، تعیین نمود:

۲-۳- ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی با نرم‌افزار LARS-WG

ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر متغیرهای اقلیمی با استفاده از پیش‌بینی‌های کمی بارش، وابسته به دقت شبیه‌سازی‌هایی است که با مدل‌های GCM انجام می‌شود. یکی از محدودیت‌های عمده در استفاده از خروجی این مدل‌ها قدرت تفکیک مکانی کم آنها است که به لحاظ مکانی و زمانی با دقت مورد نیاز مدل‌های هیدرولوژیکی مطابقت ندارد. بنابراین از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی برای رفع این محدودیت استفاده می‌شود. در این پژوهش جهت ریزمقیاس‌نمایی و اصلاح مدل‌های CMIP5-AR5 و ارزیابی مدل‌ها در دوره پایه از مولد آب و هوایی تصادفی LARS-WG استفاده شده است. مدل LARS-WG یکی از مدل‌های مولد داده‌های تصادفی آب و هوایی است که برای تولید داده‌های بارش، ماکزیمم و مینیمم درجه حرارت و تابش روزانه در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده بکار می‌رود (Racsko et al., 1991; Semenov and Brooks, 1999). اولین نسخه LARS-WG در سال ۱۹۹۰ به عنوان ابزاری برای ریزمقیاس‌نمایی به روش آماری در کشور مجارستان ابداع شد. یک مولد آب و هوایی تصادفی از آب و هوای روزانه مشاهده شده یک ایستگاه برای محاسبه یک مجموعه از پارامترها برای توزیع‌های احتمال متغیرهای هواشناسی به علاوه ارتباط بین آنها استفاده می‌کند. این مجموعه از پارامترها برای تولید سری‌های زمانی متغیرهای هواشناسی با طول دلخواه که از مدل‌های اقلیم جهانی یا منطقه‌ای نتیجه می‌شود استفاده می‌کند. در مدل LARS-WG به جهت ریزمقیاس‌نمایی و تولید سری‌های زمانی روزانه دما و بارش در آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، فایل سناریوی تغییر اقلیم مدل آب و هوایی گزارش پنجم تغییر اقلیم مورد نظر به نرم‌افزار وارد می‌شود. این فایل تغییرات نسبی در بارندگی ماهانه و تغییرات مطلق در دمای حداقل و حداکثر ماهانه دوره آتی نسبت به دوره پایه می‌باشد. با معرفی این فایل و تعیین تعداد سال‌های

رطوبت خاک در سطح مناطق محلی و کوچک کاربرد دارد. برای مطالعات محیطی، استفاده از شاخص خشکی دی مارتن (DAI) جهت تحلیل‌های مکانی و زمانی از فراوانی کاربرد بیشتری برخوردار است. این شاخص بر اساس رابطه ۱۳ محاسبه شده و با توجه به آن نوع اقلیم منطقه با توجه به جدول ۴ تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای سه دهه‌ی آینده تعیین می‌گردد:

$$DAI = \frac{P}{T + 10} \quad (13)$$

در رابطه ۱۳، (P) مقدار متوسط بارش سالانه بر حسب میلی‌متر و (T) متوسط درجه حرارت سالانه بر حسب سانتیگراد می‌باشد.

Table 4- Climatic classification of the DAI (De Martone, 1926)

جدول ۴- طبقه‌بندی اقلیمی شاخص خشکی دی- مارتن (De Martone, 1926)

Climatic type	Rainfall (mm)	DAI
Extremely humid	> 800	> 55
Very humid	700 ≤ P ≤ 800	35 ≤ DAI ≤ 55
Humid	600 ≤ P < 700	28 ≤ DAI < 35
Semi-humid	500 ≤ P < 600	24 ≤ DAI < 28
Mediterranean	400 ≤ P < 500	20 ≤ DAI < 24
Semi-arid	200 ≤ P < 400	10 ≤ DAI < 20
Arid	< 200	< 10

۷-۲- ماتریس استنتاجی NISTOR

پس از تعیین مقدار میانگین سالانه بارش مؤثر و ضریب اقلیمی دی- مارتن تحت سناریوهای تغییر اقلیم برای دوره آتی، شدت اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی را برای هر سه دهه‌ی آینده به‌وسیله ماتریس استنتاجی NISTOR (شکل ۳) ارزیابی می‌گردد.

$$\text{Annual PET} = \sum_{m=1}^{12} \text{PET}_m \quad (9)$$

حال می‌توان با در اختیار داشتن تبخیر- تعرق پتانسیل سالانه و رابطه Budyco (معادله ۱۰) مقدار تبخیر- تعرق واقعی APET را تعیین کرد (Gerrits et al., 2009; Nistor and Porumb-Ghiurco, 2015):

$$\frac{APET}{PP} = \left[\left(\varphi * \tan \frac{1}{\varphi} \right) (1 - \exp^{-\varphi}) \right]^{0.5} \quad (10)$$

$$\varphi = \frac{PET}{PP} \quad (11)$$

در این معادله ۱۰، (APET)، تبخیر- تعرق واقعی منطقه بر حسب میلیمتر، (exp) عدد نپر برابر با ۲/۷۱۸۲، (φ) ضریب خشکی منطقه و بدون بُعد، (PET) تبخیر- تعرق پتانسیل سالیانه (از مرحله قبل) بر حسب میلیمتر و (PP) مجموع بارش سالیانه بر حسب میلی‌متر می‌باشد. در گام آخر مقدار بارش مؤثر منطقه مورد مطالعه از تفاضل بین بارش سالانه و تبخیر- تعرق واقعی سالانه تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای سه دهه‌ی آینده محاسبه می‌شود (Nistor et al., 2017):

$$EP = P - AET \quad (12)$$

در این معادله (EP) بارش مؤثر سالیانه بر حسب میلیمتر، (P) بارش سالیانه بر حسب میلیمتر، (AET) تبخیر- تعرق واقعی سالانه بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

۶-۲- شاخص اقلیمی دی- مارتن

شاخص دی مارتن به طور گسترده در مطالعات اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص که توسط دی مارتن (De Martonne, 1926; Deniz et al., 2011) پیشنهاد گردیده است، برای تعیین

		Effective precipitation (mm)				
		0 - 100	101 - 200	201 - 400	401 - 600	> 600
Climate type De Martonne Index	Effect	Very high	High	Medium	Low	Very low
	Extremely humid	> 55	Very low	Low	Low	Very low
	Very humid	35 ≤ IDM ≤ 55	Low	Medium	Low	Very low
	Humid	28 ≤ IDM < 35	Medium	High	Medium	Low
	Semi-humid	24 ≤ IDM < 28	High	High	High	Medium
	Mediterranean	20 ≤ IDM < 24	Very high	Very high	High	High
		Climate change effect				
		Very high	High	Medium	Low	Very low

Fig. 3- The matrix assessing the intensity of climate change effects on groundwater resources on a spatial and temporal scale (Nistor and Mindrescu, 2019)

شکل ۳- ماتریس ارزیابی شدت اثرات تغییر اقلیم بر روی منابع آب زیرزمینی در مقیاس مکانی و زمانی (Nistor and Mindrescu, 2019)

۳- نتایج

مدل‌ها نشان داده است. بنابراین عملکرد مدل EC-EARTH قابل قبول بوده و برای ادامه مطالعه انتخاب گردید. شکل‌های ۴ و ۵، مقایسه بین مقادیر حاصل از خروجی مدل‌ها و مقادیر مشاهداتی دما و بارش در ایستگاه سینوپتیک ورامین را در دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۹ نشان می‌دهند.

نتایج حاصل از شاخص‌های آماری عملکرد مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی مقادیر دما و بارش آورده انجام شد. عملکرد مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی مقادیر دما برای ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان از همبستگی بالا برای تمامی مدل‌ها و پایین بودن نسبی شاخص‌های خطا دارد (جدول ۵).

• ارزیابی مدل LARS-WG در منطقه مطالعاتی

برای حصول اطمینان از توانایی مدل در تولید داده در آینده، داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل با داده‌های مشاهداتی در ایستگاه سینوپتیک ورامین، مقایسه گردید. در جدول ۶، نتایج آزمون کموگراف اسمیرنوف^۶ بر روی پارامترهای بارش، دماهای حداقل و دمای حداکثر و تابش روزانه را در ایستگاه‌های مطالعاتی نشان داده شده است. همچنین مقادیر (p-value) های آزمون کموگراف اسمیرنوف برای توابع احتمالاتی و T-test برای میانگین پارامترهای بارش، دماهای

لازم به ذکر است، مدل HADGEM2 عملکرد ضعیف‌تری نسبت به سایر مدل‌ها در شبیه‌سازی دما نشان داد و مدل EC-EARTH عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش نشان داد. اگر چه مقادیر بارش سایر مدل‌ها همبستگی قابل قبولی را با داده‌های مشاهداتی نشان داده است اما خطای محاسبه شده آن‌ها میزان بالاتری را نسبت به مدل EC-EARTH نشان می‌دهد. مدل EC-EARTH ضریب همبستگی بالایی را در شبیه‌سازی دما و بارش نسبت به سایر

Table 5- Results of statistical indices for comparing observational and simulated climatic variables in the base period (1989-2005)

جدول ۵- نتایج شاخص‌های آماری برای مقایسه متغیرهای اقلیمی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۹

Model	Rainfall				Temperature			
	Bias (mm)	RMSE (mm)	(%) ρ	R ² (%)	Bias (oC)	RMSE (°C)	(%) ρ	R ² (%)
EC-EARTH	8.3	10.8	84	72	-7.8	7.8	99	99
CAN ESM2	-2.5	6.7	72	53	-5	7.8	83	70
CCSM4	15.7	19	77	59	-5.4	7.5	86	73
GFDL-CM	-9.4	10.5	88	62	31.3	36.7	79	77
GFDL-ESM2G	20.3	23.9	74	55	-4.6	6.9	99	72
GFDL-ESM2M	16	19.3	75	56	-4.6	6.9	85	72
MIROC5	37	43.6	79	61	-3.3	5.7	88	77
HADGEM2	13.8	16.9	54	30	-6.5	9.1	77	59
BCC-CSM1.1	18.5	13.7	60	36	-60.08	7.9	85	73
GISS-E2-H	20.09	21.4	68	46	-5.4	6.2	99	99

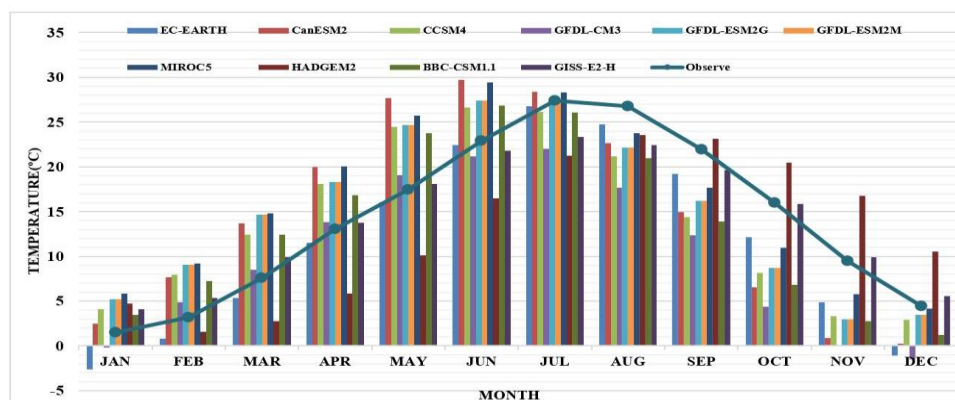


Fig. 4- Comparison of average monthly observational temperature and different CMIP5-AR5 models in the base period of 1989-2005

شکل ۴- مقایسه میانگین ماهانه دمای مشاهداتی و مدل‌های مختلف CMIP5-AR5 در دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۹

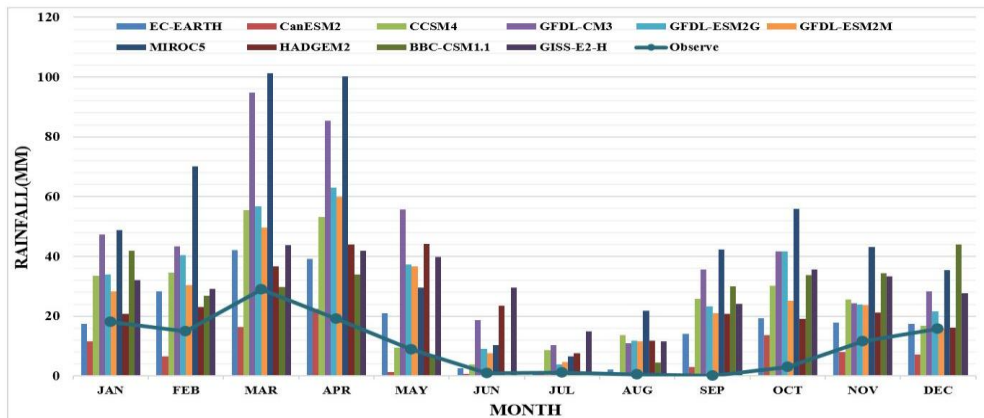


Fig. 5- Comparison of average monthly observational rainfall and different CMIP5-AR5 models in the base period of 1989-2005

شکل ۵- مقایسه میانگین ماهانه بارش مشاهداتی و مدل‌های مختلف CMIP5-AR5 در دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۹

Table 6- Kolmogorov-Smirnov test results for probabilistic distribution of daily rainfall, min daily temperature, max daily temperature and daily radiation in LARS-WG model of Varamin synoptic station
جدول ۶- نتایج آزمون کلموگراف اسمیرنوف برای توزیع احتمالاتی بارش روزانه، دمای حداقل روزانه، دمای حداکثر روزانه و تابش روزانه در مدل LARS-WG ایستگاه سینوپتیک ورامین

Month	Daily radiation		Max. daily temperature		Min. daily temperature		Daily rainfall	
	P-value	KS	P-value	KS	P-value	KS	P-value	KS
January	1	0.044	0.91	0.158	0.99	0.106	1	0.03
February	1	0.087	0.91	0.158	0.91	0.158	1	0.03
March	1	0.044	0.99	0.053	0.91	0.158	1	0.03
April	1	0.087	0.99	0.106	0.99	0.158	1	0.03
May	0.9	0.131	0.99	0.106	0.99	0.106	1	0.03
June	0.9	0.131	0.91	0.211	0.91	0.158	1	0.06
July	1	0.087	0.99	0.106	0.99	0.158	0.0004	0.58
August	1	0.044	0.63	0.158	0.91	0.158	0.01	0.44
September	1	0.044	0.99	0.105	0.91	0.158	0.1	0.34
October	1	0.044	0.99	0.106	0.91	0.158	1	0.04
November	1	0.087	0.99	0.106	0.91	0.105	1	0.03
December	0.8	0.174	1	0.053	0.91	0.158	1	0.03

در شکل ۶، نتایج مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بارش روزانه، دماهای حداقل روزانه، دمای حداکثر روزانه و تابش روزانه در ایستگاه سینوپتیک ورامین در دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۹ ارائه شده است. مقادیر پارامترهای اقلیمی شبیه‌سازی شده (دماهای حداقل روزانه، دمای حداکثر روزانه و تابش روزانه) در ایستگاه سینوپتیک ورامین مطابقت قابل قبولی با داده‌های مشاهداتی دارند.

نتایج آزمون T-test برای بارش ماهانه، دمای حداقل ماهانه، دمای حداکثر ماهانه و تابش ماهانه در مدل LARS-WG ایستگاه سینوپتیک ورامین در دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۹ در جدول ۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل از جدول ۷، نتایج آزمون بر اساس شاخص p-value در سطح ۰/۰۵، دارای اختلاف معنی‌داری است.

حداقل و دمای حداکثر و تابش روزانه را در ایستگاه‌های مطالعاتی نشان داده شده است که در اکثر ماه‌ها، در سطح معنی‌داری (سطح ۹۰ درصد) قابل اطمینان می‌باشد که بیانگر این است که مدل LARS-WG، برای شبیه‌سازی متغیرهای بارش، دماهای حداقل و دمای حداکثر و تابش روزانه در دوره آتی توانایی لازم را دارد.

همچنین مدل LARS-WG عملکرد ضعیفی در شبیه‌سازی مقادیر بارش روزانه در ماه‌های فصل تابستان ارائه داده است که زیاد بودن روزهای خشک در فصل تابستان می‌تواند دلیل این امر باشد. با توجه به عملکرد پایین مدل لارس در ماه جولای در شبیه‌سازی بارش، نمی‌توان اعتماد بالایی به مقدار بارش شبیه‌سازی شده در ماه جولای داشته باشیم.

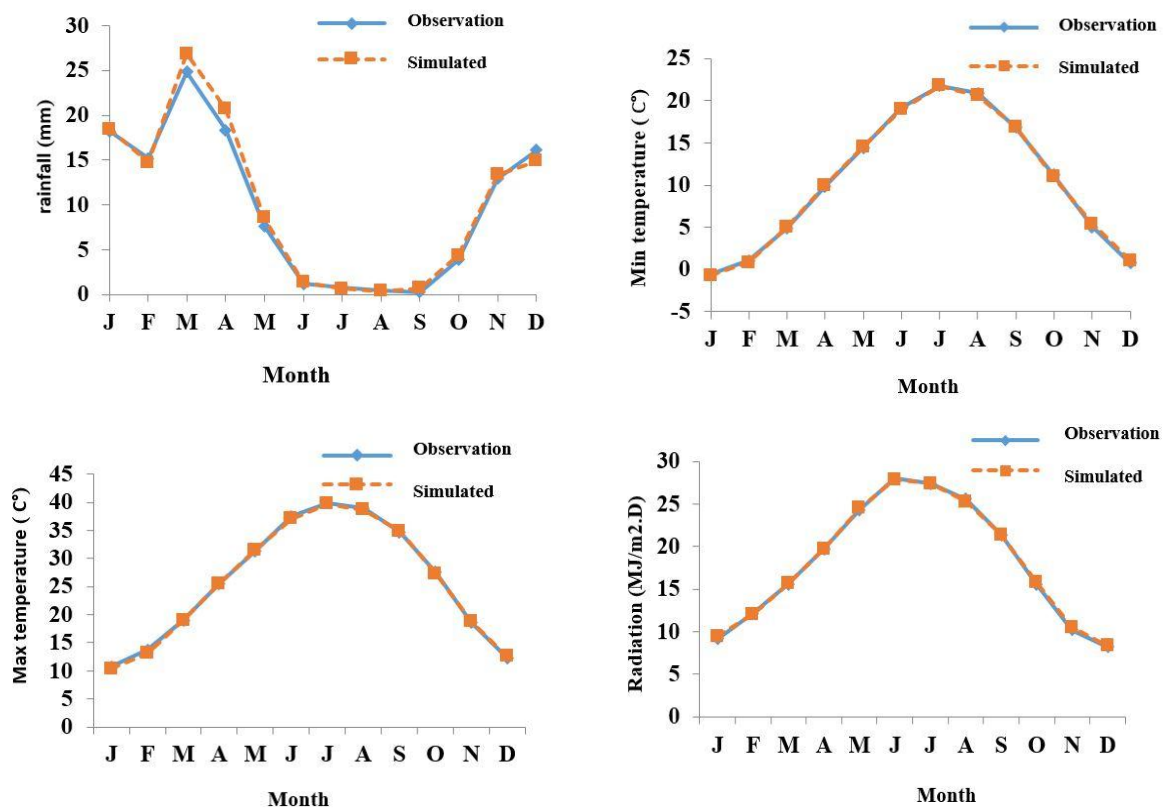


Fig. 6- Comparison of simulated and observational data daily rainfall, min daily temperature, max daily temperature and daily radiation in Varamin synoptic station in the base period of 1989-2005
 شکل ۶- مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بارش روزانه، دماهای حداقل روزانه، دمای حداکثر روزانه و تابش روزانه در ایستگاه سینوپتیک ورامین در دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۹

Table 7- T-test results for monthly rainfall, min monthly temperature, max monthly temperature and monthly radiation in LARS-WG model of Varamin synoptic station in the base period of 1989-2005
 جدول ۷- نتایج آزمون T-test برای بارش ماهانه، دمای حداقل ماهانه، دمای حداکثر ماهانه و تابش ماهانه در مدل LARS-WG ایستگاه سینوپتیک ورامین در دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۹

Month	Monthly radiation		Max.Monthly temperature		Min.Monthly temperature		Monthly rainfall	
	P-value	T-test	P-value	T-test	P-value	T-test	P-value	T-test
January	0.079	-1.769	0.26	1.132	0.356	0.926	0.925	-0.094
February	0.601	0.524	0.022	2.314	0.272	1.104	0.85	0.189
March	0.711	-0.371	0.91	-0.113	0.609	-0.513	0.633	-0.479
April	0.983	0.022	0.958	0.053	0.452	-0.755	0.504	-0.671
May	0.433	-0.787	0.54	-0.614	0.624	-0.492	0.506	-0.666
June	0.3	1.041	0.012	2.55	0.219	1.235	0.717	-0.363
July	0.7	0.387	0.138	1.492	0.952	0.06	0.687	0.404
August	0.005	2.837	0.041	2.06	0.003	3.06	0.504	0.67
September	0.631	0.482	0.33	-0.977	0.809	-0.242	0.131	-1.521
October	0.096	-1.679	0.179	1.351	0.114	1.591	0.636	-0.475
November	0.106	-1.626	0.626	-0.488	0.037	-2.11	0.82	-0.228
December	0.61	-0.51	0.8348	-0.942	0.028	-2.226	0.575	0.562

شایان ذکر است که مدل در شبیه‌سازی دمای کمینه، بیشینه و تابش در ماه آگوست، (در سطح ۰/۰۵) اختلاف معنی داری را نشان می‌دهد که عدم وجود داده معتبر در روزهای ماه مورد نظر می‌تواند دلیل این امر باشد.

● روند تغییرات دما و بارش تحت سناریوهای انتشار CMIP5-AR5 در دوره آتی

در شکل ۷ مقایسه میانگین حداقل دما (a)، حداکثر دما (b) و دمای میانگین (c) ماهانه شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل ECEARTH تحت سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5 در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ نسبت به دوره پایه ۱۹۸۹-۲۰۰۵ ایستگاه سینوپتیک ورامین نشان داده شده است.

بطور کلی ارزیابی و صحت‌سنجی مدل LARS-WG در ایستگاه سینوپتیک ورامین، نشان از توانمندی قابل قبول این مدل در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی (بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و تابش) را دارد. اگر چه شبیه‌سازی پارامتر بارش در برخی ماه‌های سال در ایستگاه مطالعاتی توسط این مدل در سطح معنی‌داری قابل قبولی برآورد نشده است؛ اما برآزش بالای مقادیر شبیه‌سازی شده برای سایر پارامترهای اقلیمی کاملاً مشهود است.

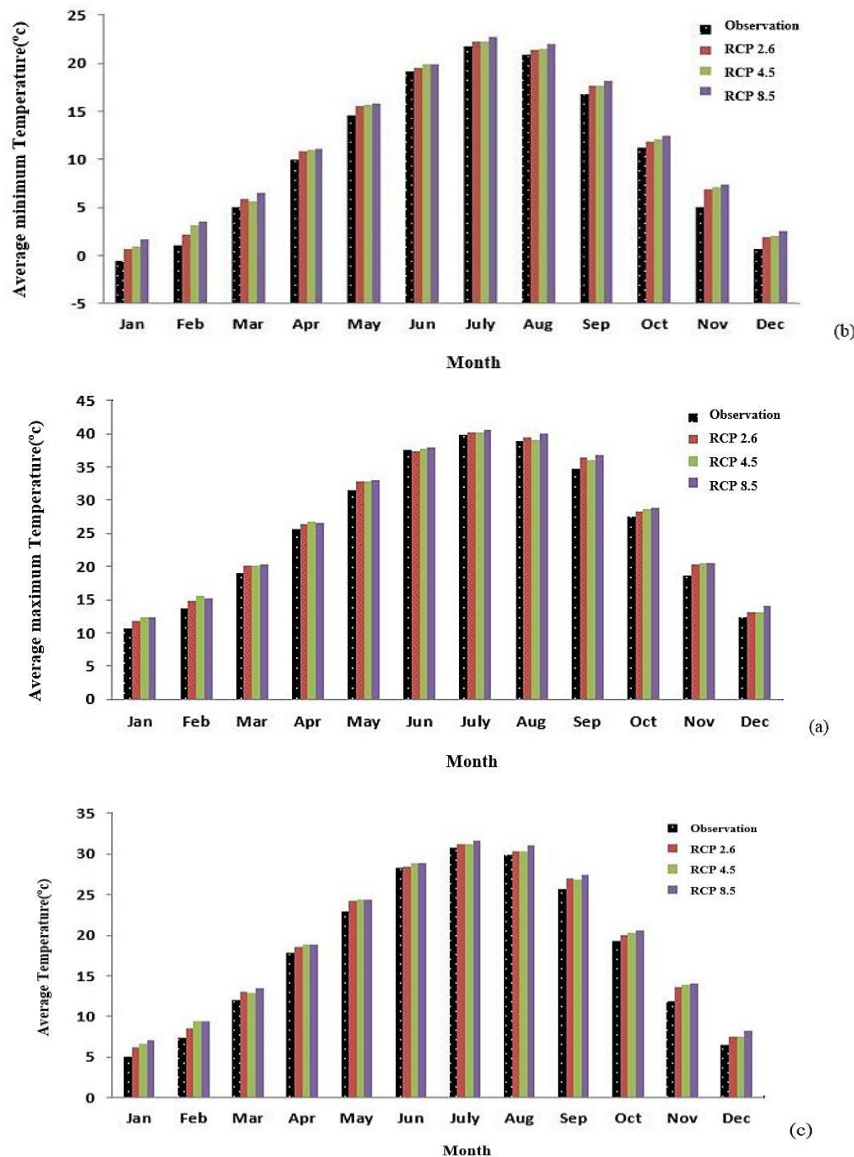


Fig. 7- Comparison of simulated monthly average maximum temperature (a), minimum temperature (b), and average temperature (c) using ECEARTH model under RCP8.5, RCP4.5 and RCP2.6 release scenarios 2005 at the Varamin Synoptic Station-in 2021-2050 period compared to base period 1989

شکل ۷- مقایسه میانگین بیشینه دما (a)، کمینه دما (b) و دمای میانگین (c) ماهانه شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل ECEARTH تحت سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5 در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره پایه ۱۹۸۹-۲۰۰۵ در ایستگاه سینوپتیک ورامین

نتایج مقایسه میانگین بارش تجمعی ماهانه شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل ECEARTH تحت سناریوهای انتشار مختلف در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ نسبت به دوره پایه در ایستگاه مورد مطالعه در شکل ۹ نشان داده شده است که تغییرات یکنواختی در ماه‌های مختلف مشاهده نمی‌گردد. بطورکلی در دوره آتی، افزایش بارش در ماه‌های ابتدایی سال تا اواخر فصل بهار و کاهش بارش در فصل پاییز مشاهده می‌گردد. به عبارت دیگر، میزان بارش تحت هر سه سناریوی انتشار در دوره آتی در فصل پاییز، روند کاهشی محسوسی نسبت به سایر فصول سال دارد. این در حالی است که افزایش و یا کاهش چشمگیری میان شبیه‌سازی‌های حاصل از سناریوهای مختلف در آینده وجود ندارد.

با توجه به شکل ۸، روند افزایشی دمای سالانه تحت هر سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5 تا سال ۲۰۵۰ مشهود است. سناریوی RCP8.5، افزایش دمای بیشتری را نسبت به دو سناریوی دیگر در ۳۰ سال آینده نسبت به دوره پایه در منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. بیشترین تغییرات دما توسط مدل ECEARTH در دوره آتی نسبت به دوره پایه از اواخر فصل پاییز تا اوایل فصل زمستان مشاهده می‌گردد. همچنین از نمودارهای تغییرات دما می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین تغییرات مربوط به دمای حداقل بوده که تأثیر بیشتری در افزایش دمای میانگین داشته است.

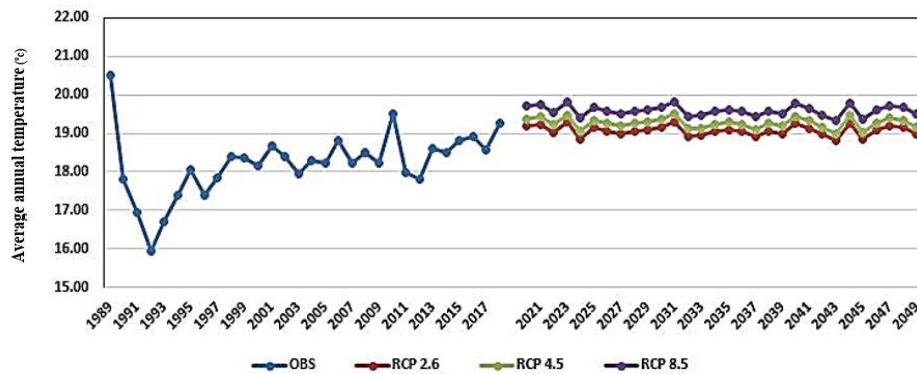


Fig. 8- Comparison of the average annual simulated temperature using the ECEARTH model under the emission scenarios of RCP8.5, RCP4.5, and RCP2.6 in the period 2021-2050 compared to the period of 1989 - 2005 in the studied station

شکل ۸- مقایسه دمای میانگین سالانه شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل ECEARTH تحت سناریوهای انتشار RCP8.5، RCP4.5 و RCP2.6 در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ نسبت به دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۹ در ایستگاه مورد مطالعه

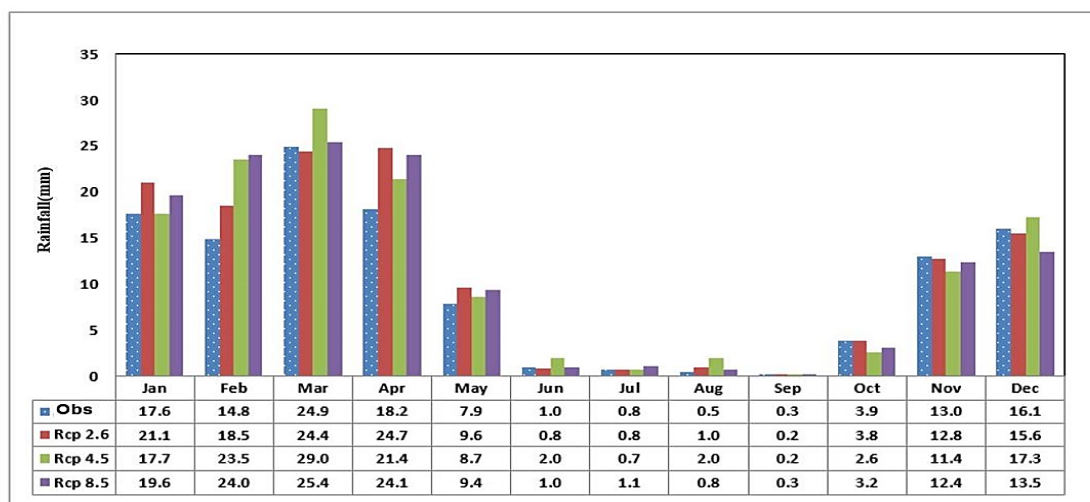


Fig. 9- Comparison of the average monthly cumulative simulated rainfall using the ECEARTH model under the emission scenarios of RCP8.5, RCP4.5, and RCP2.6 in the period 2021-2050 compared to the base period of 1989-2005 in the studied station

شکل ۹- مقایسه میانگین بارش تجمعی ماهانه شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل ECEARTH تحت سناریوهای انتشار RCP8.5، RCP4.5 و RCP2.6 در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ نسبت به دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۹ در ایستگاه مورد مطالعه

۳۰ سال آینده که روند تغییرات دما و بارش را تحت تأثیر تغییر اقلیم نشان می‌دهد، مقدار بارش مؤثر، تبخیر- تعرقی واقعی و شاخص اقلیمی دی مارتن به صورت میانگین سالانه برای دوره مشاهداتی و آینده محاسبه گردید. شکل‌های ۹ و ۱۰ روند تغییرات بارش مؤثر و تبخیر- تعرق واقعی را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از این سناریوها با توجه به ماتریس استنتاجی NISTOR (شکل ۳) نشان می‌دهد (جدول ۸) که در تمامی حالات، شدت اثرات تغییر اقلیم بر روی منابع آب زیرزمینی دشت ورامین در دوره آتی قابل توجه می‌باشد.

با توجه به شکل ۱۰، تغییرات یکنواختی در بارش سالانه تحت هر سه سناریوی انتشار RCP در دوره آتی نسبت به دوره مشاهداتی مشاهده نمی‌گردد. بطور کلی سناریوی RCP4.5 افزایش بارش سالانه در ۳۰ سال آینده را نسبت به دو سناریوی دیگر کمی بیشتر ارائه می‌دهد.

● **شدت اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی بوسیله ماتریس استنتاجی NISTOR**

با تلفیق بارش مؤثر و شاخص اقلیمی دی- مارتن در ماتریس استنتاجی NISTOR می‌توان میزان شدت تأثیر شرایط اقلیمی بر روی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه را در مقیاس زمانی برای دوره آتی بررسی کرد. در این مطالعه با توجه به سناریوهای انتشار CMIP5-AR5 در

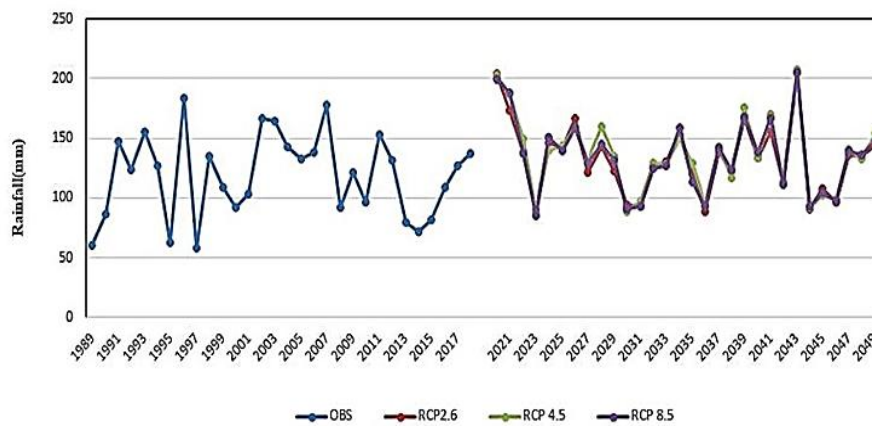


Fig. 10- Comparison of the average annual simulated rainfall using the ECEARTH model under the emission scenarios of RCP8.5, RCP4.5, and RCP2.6 in the period 2021-2050 compared to the base period of 1989-2005 in the studied station

شکل ۱۰- مقایسه میانگین بارش سالانه شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل ECEARTH تحت سناریوهای انتشار RCP8.5، RCP4.5 و RCP2.6 در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره پایه ۱۹۸۹-۲۰۰۵ در ایستگاه مورد مطالعه

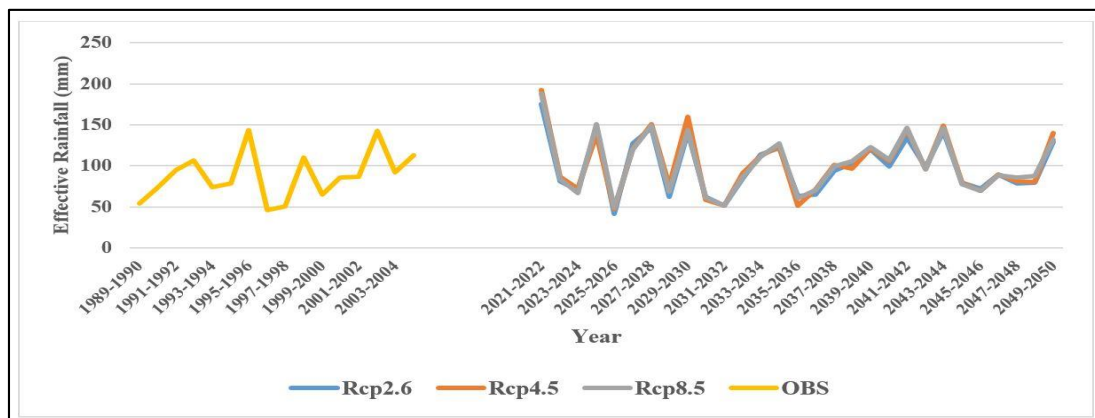


Fig. 11- Comparison of the average annual simulated effective rainfall using the ECEARTH model under the emission scenarios of RCP8.5, RCP4.5, and RCP2.6 in the period 2021-2050 compared to the base period of 1989-2005 in the studied station

شکل ۱۱- مقایسه میانگین بارش مؤثر سالانه شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل ECEARTH تحت سناریوهای انتشار RCP8.5، RCP4.5، RCP2.6 در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره پایه ۱۹۸۹-۲۰۰۵ در ایستگاه مورد مطالعه

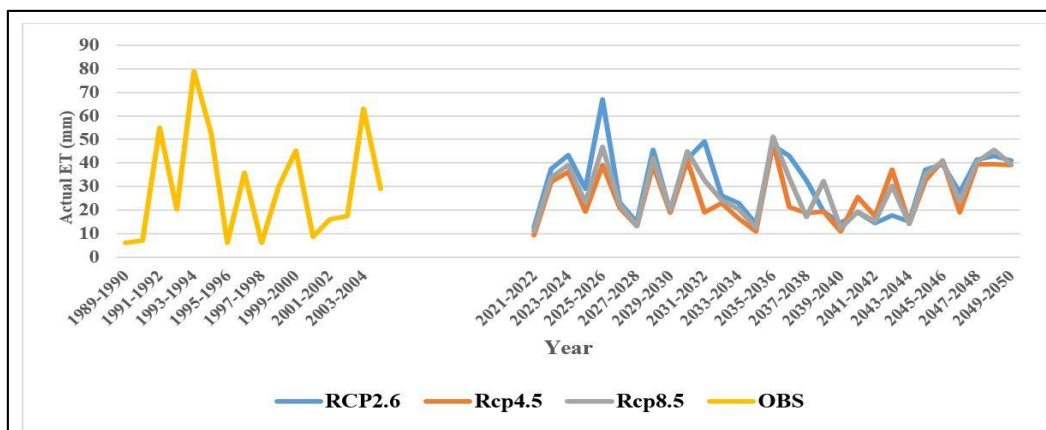


Fig. 12- Comparison of the average annual simulated actual ET using the ECEARTH model under the emission scenarios of RCP8.5, RCP4.5, and RCP2.6 in the period 2021-2050 compared to the base period of 1989-2005 in the studied station

شکل ۱۲- مقایسه میانگین تبخیر- تعرق واقعی سالانه شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل ECEARTH تحت سناریوهای انتشار RCP8.5، RCP4.5 و RCP2.6 در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره پایه ۱۹۸۹-۲۰۰۵ در ایستگاه مورد مطالعه

Fig. 8- Assessment the intensity of climate change effects on groundwater resources of varamin plain under different climate diffusion scenarios with NISTOR method

جدول ۸- ارزیابی شدت اثرات تغییر اقلیم بر روی منابع آب زیرزمینی دشت ورامین تحت سناریوهای انتشار مختلف اقلیمی با روش NISTOR

Scenarios (CMIP5)	Average DAI index	Average effective rainfall (mm)	Impact rate (NISTOR method)
RCP 2.6 (2021-2030)	4.70	105.50	Very high
RCP 2.6 (2031-2040)	4.17	89.03	Very high
RCP 2.6 (2041-2050)	4.61	100.39	Very high
RCP 4.5 (2021-2030)	4.83	110.32	Very high
RCP 4.5 (2031-2040)	4.22	92.63	Very high
RCP 4.5 (2041-2050)	4.66	103.60	Very high
RCP 8.5 (2021-2030)	4.68	107.99	Very high
RCP 8.5 (2031-2040)	4.26	94.4	Very high
RCP 8.5 (2041-2050)	4.60	103.20	Very high

آب زیرزمینی باشد که نیازمند مدیریت درست و تخصیص و برنامه ریزی مناسب جهت برداشت در مناطق کشاورزی می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

استفاده از مدل‌های تغییرات اقلیمی برای بررسی رفتار پارامترهای اقلیمی در آینده امری اجتناب‌ناپذیر است؛ زیرا با شناخت رفتار زمانی عناصر اقلیمی مانند بارش و دما، امکان کاهش شدت اثرات مخرب

با توجه به پژوهش (Klaas et al., 2020) در حوزه آبخیز کارست در اندونزی که کاهش تغذیه و تراز آب زیرزمینی به‌وسیله بارش مؤثر را در دوره آتی به‌وسیله مدل‌سازی آب زیرزمینی پیش‌بینی کرده بودند و همچنین مقایسه توام ضریب اقلیمی و مقدار بارش مؤثر جهت تعیین شدت اثر تغییر اقلیم بر آب زیرزمینی توسط (Nistor et al. (2017) می‌توان این موضوع را دریافت که یکی از مهم‌ترین دلایل اثر شدید تغییر اقلیم در دوره آتی دشت ورامین می‌تواند کاهش مقدار تغذیه منابع

اقلیم نیمه‌خشک و رویارویی با مشکلات ناشی از کمبود آب، نتایج این مطالعه با پیش‌بینی روند عناصر اقلیمی و میزان بارش مؤثر در سه دهه آینده، تصویر روشنی از شدت اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی را نشان می‌دهد و می‌تواند مورد استفاده متخصصان و برنامه‌ریزان مرتبط با مسائل آب قرار گیرد.

در تحقیق حاضر به بررسی شدت اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی با شاخص NISTOR در منطقه مطالعاتی، تنها با استفاده از یک مدل گردش عمومی جو و تنها در نزدیک‌ترین دوره آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۱) پرداخته شده است که پیشنهاد می‌گردد جهت دستیابی به بهترین برآورد پارامترهای اقلیمی برای تعیین میزان بارش مؤثر و شاخص دی-مارتون در دوره‌های آتی و لحاظ قرار دادن عدم قطعیت، از چند مدل AOGCM و در دوره‌های زمانی آینده دورتر (به جای یک دوره)، مورد آزمون قرار گیرد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Intergovernmental Panel on Climate Change
- 2- Atmosphere-Ocean General Circulation Model
- 3- Coefficient of Determination
- 4- Root Mean Square Error
- 5- Bias Indicator
- 6- Kolmogorov-Smirnov Test

۵- مراجع

- Aghakhani Afshar A, Hassanzadeh Y, Besalatpour AA, Pourreza Bilondi M (2017) Annual assessment of Kashafrood watershed basin climate components in future periods by using fifth report of intergovernmental panel on climate change. *Journal of Water and Soil Conservation* 23:217-233 (In Persian)
- Ansari S, Massah Bavani AR, Roozbahani A (2016) Effects of climate change on groundwater recharge (Case Study: Sefid Dasht Plain). *Journal of Water and Soil* 30:416-431 (In Persian)
- Bjornaes K (2014) A guide to representative concentration pathways. Senior Communication Advisor in CICERO center for
- De Martonne E (1926) A new climatological function. *The Aridity Index* Gauthier-Villars, Paris, France
- Deniz A, Toros H, Incecik S (2011) Spatial variations of climate indices in Turkey. *International Journal of Climatology* 31:394-403
- Gerrits AMJ, Savenije HHG, Veling EJM, Pfister L (2009) Analytical derivation of the Budyko curve based on rainfall characteristics and a simple

تغییر اقلیم بر منابع سطحی و زیرزمینی وجود دارد، به طوری که این تغییرات در هر منطقه با مناطق دیگر متفاوت می‌باشد. بنابراین پیش‌بینی رفتار این متغیرها در دوره‌های آتی جهت شناخت پدیده تغییر اقلیم می‌تواند نگرشی نو در بحث مدیریت و بهینه‌سازی منابع آب در افق بلندمدت به مدیران و تصمیم‌گیرندگان حوضه ارائه دهد. لذا در پژوهش حاضر جهت بررسی شدت اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی دشت ورامین در سه دهه آینده، به شبیه‌سازی و ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از مدل‌های CPMI5-AR5 پرداخته شد. در این پژوهش مشخص شد که مدل LARS-WG توانایی بالایی در ریزمقیاس کردن داده‌های دما و بارش دوره پایه در منطقه مورد مطالعه را دارد. مدل EC-EARTH روند معنی‌دار افزایش دمای متوسط را در دوره آتی تحت هر سه سناریوی انتشار RCP پیش‌بینی کرد و نتایج حاصل با پیش‌بینی‌های مطالعات (Aghakhani Afshar et al., 2017) همخوانی دارد. بطور میانگین دمای متوسط در منطقه مطالعاتی، تحت سناریوهای خوشبینانه و حد واسط به ترتیب RCP2.6 و RCP4.5، افزایش ۱ تا ۱/۲ درجه سانتیگراد را نسبت به دوره پایه پیش‌بینی کردند در حالیکه همین افزایش دما براساس بدبینانه‌ترین سناریو یعنی RCP8.5 در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰، بطور متوسط حدود ۱/۵ درجه سانتیگراد نسبت به دوره پایه را پیش‌بینی کرد.

مهمترین ویژگی در مدل LARS-WG، فقدان هماهنگی بین مدل‌سازی بارش توسط مدل EC-EARTH تحت سناریوهای مختلف در دوره آتی در ماه‌های مختلف بود، به طوری که در سه دهه آینده در منطقه مطالعاتی، در برخی ماه‌ها افزایش بارش و در برخی کاهش بارش و بطور میانگین افزایش بارش سالانه در ۳۰ سال آینده نسبت به دوره پایه در منطقه مطالعاتی را نشان داد که نتایج حاصل با پیش‌بینی‌های مطالعات (Shahvari et al., 2019) مبنی بر افزایش روان آب و تغییر الگوی بارش در دشت ورامین همخوانی دارد. شاید جواب آن در شناخت الگوی رفتاری بارش که اساسا رفتاری نامنظم دارد نهفته باشد. به هر حال پارامتر بارش تحت تأثیر عوامل مستقل دیگری از قبیل ارتفاع و ویژگی‌های اقلیمی منطقه مورد مطالعه از منطقه‌ای به منطقه دیگر و یا حتی در بخش‌های مختلف منطقه، تغییرات غیریکنواختی را نشان می‌دهد. به هر حال نکته قابل توجه این پژوهش بر هم خوردن توزیع زمانی بارش و افزایش دما است که احتمالا بیشتر از نوسانات بارش، تبعات منفی خواهد داشت؛ زیرا اگرچه تا سال ۲۰۵۰ تحت سناریوهای مختلف در برخی از ماه‌های سال افزایش بارش را داریم، اما با پیش‌بینی افزایش دمای میانگین تا مرز ۱/۵ درجه نسبت به دوره پایه، بالطبع افزایش تبخیر و تعرق از دشت را انتظار می‌رود که اثر افزایش بارش را در مقاطع زمانی موردنظر از بین می‌برد. به هر حال با توجه به قرار گرفتن منطقه مورد مطالعه در

- University of Suceava Geography Series 25
doi:10.4316/GEOREVIEW.2015.25.1.268
- Nistor M, Mîndrescu M (2019) Climate change effect on groundwater resources in Emilia-Romagna region: An improved assessment through NISTOR-CEGW method. *Quaternary International* 504: 214-228
- Node farahani MA, Rasekhi A, Parmas B, keshvari A (2018) The effects of climate change on temperature, precipitation and drought in the the future Shadegan basin. *Journal of Iran-Water Resources Research (IR-WRR)* 14:125-139(In Persian)
- Racsko P, Szeidl L, Semenov M (1991) A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling* 57:27-41
- Semenov M, Brooks R (1999) Spatial interpolation of the LARS-WG weather generator in Great Britain. *Climate Research- CLIMATE RES* 11:137-148
- Shahvari N, Khalilian S, Mosavi SH, Mortazavi SA (2019) Assessing climate change impacts on water resources and crop yield: A case study of Varamin plain basin. *Iran Environmental Monitoring and Assessment* 191:134
- Shakiba AR, Cheshmi A (2013) Evaluation of the effect of climate change on groundwater resources of Ramhormoz plain using NARX neural network. *Journal of Researches in Earth Sciences* 2:46-57
- Soleimani Sardoo F, Mesbahzadeh T, Broomand n, Azare A, Rafii sardooii E (2018) Investigating the effects of climate change under different scenarios on groundwater in Kerman plain. *Journal of Environmental Studies* 43:645-661 (In Persian)
- Thorntwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38:55-94
- Wilby RL, 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)
- evaporation model. *Water Resources Research* 45, doi:10.1029/2008wr007308
- Haidu I, Nistor M-M (2020) Long-term effect of climate change on groundwater recharge in the Grand Est region of France. *Meteorological Applications* 27:e1796 doi:10.1002/met.1796
- Hashmi MZ, Shamseldin AY, Melville BW (2011) Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 25:475-484
- IPCC (2013) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*
- Jyrkama MI, Sykes JF (2007) The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed (Ontario). *Journal of Hydrology* 338:237-250
- Klaas DKS, Imteaz MA, Sudiayem I, Klaas EME, Klaas ECM (2020) Assessing climate changes impacts on tropical karst catchment: Implications on groundwater resource sustainability and management strategies. *Journal of Hydrology* 582:124426
- Nistor M-M, Cheval S, Gualtieri A F, and et al. (2017) Crop evapotranspiration assessment under climate change in the Pannonian basin during 1991–2050. *Meteorological Applications* 24:84-91
- Nistor M-M, Dezsi Ş, Cheval S, Baciu M (2016) Climate change effects on groundwater resources: a new assessment method through climate indices and effective precipitation in Beliş district, Western Carpathians. *Meteorological Applications* 23:554-561
- Nistor M, Porumb-Ghiurco C (2015) How to compute the land cover evapotranspiration at regional scale? A spatial approach of Emilia-Romagna region. *GEOREVIEW Scientific Annals of Ştefan cel Mare*