



بررسی اثرات پدیده تغییر اقلیم بر دما، بارش با استفاده از مدل LARS-WG مطالعه موردی حوضه آبخیز رودخانه بشار

حمیدرضا پناهی^۱، حسین منتصری^{۲*}، علی اکبر حکمت زاده^۳، رضا خلیلی^۴

۱- کارشناس ارشد، مهندسی عمران گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه یاسوج، کهگیلویه و بویراحمد

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه یاسوج، کهگیلویه و بویراحمد

۳- دانشیار، گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

۴- دانشجوی دکتری، مهندسی محیط زیست-آب و فاضلاب، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	افزایش گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر و افزایش دمای ناشی از آن باعث به هم خوردن تعادل سیستم اقلیمی کره زمین و تغییرات اقلیمی در اغلب نواحی کره زمین شده است. از این رو، تطبیق و مقابله با تغییرات اقلیمی در بخش منابع آب به همراه کاهش بازتاب آن‌ها باید به‌عنوان بخشی از یک پاسخ جامع منطقه‌ای به آسیب‌پذیری ناشی از تغییر اقلیم مورد رسیدگی جدی قرار گیرد. در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار ریزمقیاس نمایی LARS-WG و مدل گردش عمومی جوی اقیانوسی HadCM3 در قالب سناریوهای مختلف تعریف شده در گزارش چهارم IPCC (سناریوهای پایه) از جمله سناریو A ₁ ، A ₂ ، B ₁ ، B ₂ که بیشتر به مسائل منطقه‌ای و جهانی از منظر اقتصادی و محیط‌زیستی توجه دارد، میزان تغییرات دمایی و بارش در ۱۰۰ سال آینده حوضه آبخیز رودخانه بشار پیش‌نگری شد. سپس با استفاده از سناریوی گزارش پنجم (RCP) استفاده شد و نتایج با سناریوهای پایه مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد در هر دو سناریو در دوره آتی با افزایش زیاد متوسط دمای هوا مواجه خواهیم بود، ولی کاهش میزان بارش چشمگیر نخواهد بود. در بخش سناریوسازی تغییرات اقلیمی RCP ها تا انتهای قرن ۲۱ نشان از افزایش درجه حرارت و کاهش بارش در سال‌های آتی دارد. میزان تغییرات دمایی در RCP2/6 بین ۳ تا ۱۳ درصد و در RCP8/5 بین ۴ تا ۱۴ درصد تخمین زده شد؛ این افزایش دما در مقیاس‌های بزرگ باعث افزایش تبخیر و طولانی‌تر شدن دوره‌های خشکسالی می‌شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۳۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۲	
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵	
کلید واژه‌ها: تغییرات اقلیمی، بارش، سناریوهای اقلیمی، رودخانه بشار، مدل گردش عمومی	



Investigating the effect of climate change on temperature and precipitation using the LARS-WG model, case study: Bashar River basin

Hamidreza Panahi¹, Hossein Montaseri^{2*}, Ali Akbar Hekmatzadeh³, Reza Khalili⁴

1- MSc in Civil Engineering- Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering - Water and Environment, University of Yasouj, yasouj, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Water Resources Engineering and Management, University of Yasouj, yasouj, Iran

3- Associate Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, shiraz, Iran

4- PhD Student, Department of Environmental Engineering- Water and Wastewater, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

Article Info

Abstract

Article type:
Research Article

Article history:

Received:
22/07/2022

Accepted:
03/12/2022

Available online:
05/01/2023

Keywords:
Climate changes,
Precipitation,
Climate scenarios,
Bashar River,
General circulation
model

The increase of greenhouse gases and as the result, the increase in temperature have caused the balance of the earth's climate system and climate changes in most areas of the earth. Therefore, adapting and dealing with climate changes in the water resources sector along with reducing their reflection should be seriously addressed as part of a comprehensive regional response to the vulnerability caused by climate change. In this study, using LARS-WG exponential microscale software and the HadCM3 oceanic atmospheric general circulation model in the form of different scenarios defined in the fourth IPCC report (basic scenarios), including scenario A1, A2, B1, B2, which are more attended to regional and the world issues from an economic and environmental point of view, the amount of temperature changes and precipitation in the next 100 years of Bashar River basin was predicted. Then the fifth report scenario (RCP) was used and the results were compared with the basic scenarios. The results showed that in both scenarios in the coming period, we will face a large increase in average air temperature, but the decrease in precipitation will not be significant. In the scenario section, climate changes of RCPs until the end of the 21st century indicate an increase in temperature and a decrease in precipitation in the coming years. The amount of temperature changes in RCP2/6 was estimated between 3 and 13% and in RCP8/5 between 4 to 14%. This increase in temperature on a large scale increases evaporation and prolongs drought periods.

* Corresponding author E-mail address: hmontaseri@yu.ac.ir

مقدمه

مسئله‌ی تغییر اقلیم به‌عنوان یک بحران و نگرانی اصلی محیط زیستی توسط سازمان هواشناسی جهانی شناخته شده است (Mardani et al., 2022). به دلیل اینکه عواقب آن می‌تواند اجزای مختلف اجتماعی-اقتصادی و اکوسیستم یک منطقه را به‌طور عمده تحت تأثیر قرار دهد. امروزه، یکی از نگرانی‌های مهندسان در مورد سناریوهای آب و هوایی بر کفایت و توانایی زیرساخت موجود برای مقابله با حوادث شدید آب‌وهواست (Sarkar et al., 2015). در هسته این نگرانی‌ها درک علمی از فرآیندهای آب‌وهوایی است که عملکرد فیزیکی و محیط زیستی در محیط را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Zubaidi et al., 2019). برای درک بهتر فرآیندهای آب‌وهوایی و تأثیرات ناشی از آن بر منابع آب، باید با مطالعه و مدل‌سازی حوضه‌ی آبی، شرایط پیش‌نگری اثرات تغییر آب‌وهوا را فراهم آورد (Panahi et al., 2020). در ایران بارش یکی از متغیرهای اساسی برای ارزیابی منابع آب بالقوه‌ی موجود است، اما توزیع زمانی و مکانی آن بسیار ناهمگن است و به همین دلیل توزیع منابع آب کشور یکنواخت نیست (Hassan et al., 2014). نگهداری و مدیریت منابع آب، تابعی از بارش دریافتی و تغییرپذیری بارش است. تغییر اقلیم منجر به تغییر در مقادیر و الگوی بارش و دما در سطح حوضه می‌شود که هرگونه تغییر در مقادیر و الگوی هر یک از این دو عامل و نیز تغییر در ارتباط زمانی بین عوامل مذکور، در کمیت تولید رواناب و نیز الگوی زمانی آن بسیار مؤثر است (Sarkar et al., 2017). به همین دلیل تغییرپذیری زمانی بارش در ارزیابی منابع آب موجود آبخیزها و مطالعه نسبی منابع آب موجود در مقیاس محلی و منطقه‌ای اهمیت زیادی دارد (Sha et al., 2019). تأثیر تغییر اقلیم بر روی منابع آب یک موضوع حیاتی برای زندگی بشر است (Mohammadi et al., 2021). در دهه‌های اخیر شدیدترین پدیده‌های بارندگی رخ داده است و بخش‌هایی از جهان بدترین پدیده‌های هواشناسی مانند سیلاب‌های شدید، خشک‌سالی‌ها و امواج گرما را تجربه کرده‌اند (Chun et al., 2013). این تغییرات اثر شکننده‌ای بر چرخه هیدرولوژیکی و منابع آب خواهد گذاشت.

فنتا و دیسه^۱ (2018) به‌منظور درک تغییر اقلیم آینده در بالادست حوضه رودخانه نیل آبی از دو روش ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG و SDSM استفاده کردند. آن‌ها در این مطالعه نتیجه گرفتند هر دو روش ریزمقیاس‌نمایی توانایی زیادی برای شبیه‌سازی مقادیر تغییر اقلیم منطقه‌ای کنونی با اطمینان زیاد دارند. هر دو روش روند افزایش بارش، کم‌ترین و بیش‌ترین دما را نشان دادند. همچنین تحلیل داده‌های اقلیم ریزمقیاس‌شده در دو روش نشان داد LARS-WG افزایش نسبتاً بیش‌تری از SDSM دارد.

چانگ^۲ و همکاران (2015) به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در رواناب حوضه‌ی رودخانه وایه در چین پرداختند. آن‌ها دریافتند رواناب تنها تحت تأثیر شرایط جغرافیایی قرار می‌گیرد و تغییر اقلیمی تأثیر کمی بر آن خواهد داشت. همچنین آن‌ها دریافتند زمانی که پارامتر بارش و تبخیر در تعادل نیستند امکان افزایش آب رودخانه (تزیق از سد) وجود ندارد، که در صورت انجام منجر به مشکلات اکوسیستم شده و در خطرات جدی است، بر این اساس، رواناب را می‌توان به‌عنوان شاخص ارزیابی پاسخ‌های هیدرولوژیکی به تغییرات آب و هوایی مورد استفاده قرار داد.

توما^۳ و همکاران (2017) به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی و سازگاری در سطح مزرعه و همچنین سازگاری سیستم‌های کشاورزی با شرایط آب و هوایی جدید پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اثرات تغییرات آب و هوایی بر سودآوری کشاورزی بستگی دارد و فقط در مورد تغییر در تولید نیست.

حیدری (2019) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مقیاس‌های زمانی فصلی و سالانه در چند ایستگاه منتخب در غرب ایران پرداختند. از چهار ایستگاه سینوپتیک سنندج، سقز، خرم‌آباد و کرمانشاه که واجد آمار کافی در یک دوره طولانی‌مدت بودند انتخاب شدند. اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق مرجع این ایستگاه‌ها تحت دو سناریو انتشار RCP2/6، RCP8/5 و در سه دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۹-۱۹۷۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در تمامی دوره‌های آبی و تحت تمامی سناریوها و برای کل ایستگاه‌ها، میانگین تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس‌های سالانه و برای فصول پاییز و زمستان در مقایسه با دوره پایه افزایش معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ خواهد داشت.

فیسه‌ها^۴ و همکاران (2012) بخش فوقانی حوضه آبریز رودخانه تایبر در ناحیه مرکزی ایتالیا را مورد مطالعه قرار دادند. این محققان با استفاده از دو روش ریزمقیاس‌نمایی رگرسیونی SDSM و مدل تصادفی مولد هواشناسی LARS-WG پارامترهای بارش و دما را بر اساس خروجی مدل جوی HadCM3 برای دوره‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ تحت سناریوهای B2، A2 پیش‌نگری کردند. یافته‌های مدل رگرسیونی

1. Fenta Mekonnen and Disse

2. change

3. Thamo

4. Fiseha

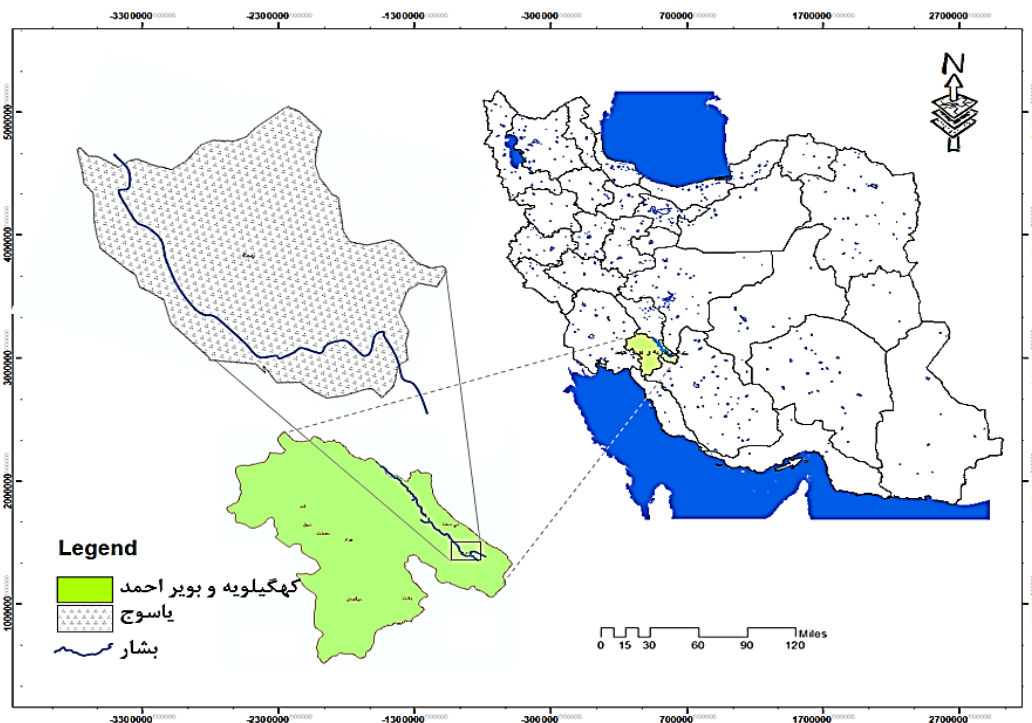
SDSM نشانگر روند افزایشی در مقادیر کمینه و بیشینه دما و بارش در دوره آتی است. نتایج مدل LARS-WG در پیش‌نگری مقادیر دما منطبق با مدل رگرسیونی بوده حال آنکه برای متغیر بارش روند کاهشی خصوصاً در فصل تابستان به میزان ۶۰ درصد در بازه زمانی ۲۰۸۰ نسبت به دوره پایه ۱۹۶۱-۱۹۹۰ پیش‌نگری می‌شود. گرچه نتایج دو مدل یکسان نیست، اما هر دو مدل اثرات تغییر اقلیم در حوضه آبریز مورد مطالعه را بر اساس سری زمانی بارش و دما را نشان می‌دهند. نتیجه کلی نشانگر عملکرد مدل LARS-WG مشابه نتایج مطالعات گذشته و پیش‌نگری بر پایه گزارش چهارم هیئت تغییر اقلیم IPCC است.

کیسی^۱ و همکاران (2013) فرآیند بارش-رواناب حوضه کوروکاواک واقع در شمال غرب ترکیه را به کمک سه روش شبکه عصبی مصنوعی، فازی و برنامه‌ریزی ژنتیک مدل‌سازی و با روش رگرسیون خطی مورد مقایسه قرار دادند؛ که نتایج آن‌ها حاکی از برتری مدل‌های هوشمند نسبت به رگرسیون خطی بود. در این تحقیق خروجی مدل گردش عمومی HadCM3 با استفاده از مدل LARS-WG تحت سناریوهای A_1B و A_2 ریزمقیاس شده و به کمک مدل‌های هوشمند به ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر بارش-رواناب حوضه صوفی چای پرداخته شده است. با توجه به مطالعات انجام شده توسط محققان، تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر بارش و رواناب در ایران در برخی از استان‌ها مورد بررسی قرار گرفته است، ولی به دلیل مطالعات بسیار اندک در استان کهگیلویه و بویراحمد و شهرستان بویراحمد، در این تحقیق تلاش بر این است که اثرات این پدیده بر بارش و رواناب در این شهرستان مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش ابتدا با استفاده از سناریوهای انتشار، میزان تغییرات بارش و دما در آینده مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از سناریوهای واداشت تابشی (گزارش پنجم) میزان تغییرات گازهای گلخانه‌ای، میزان تغییرات بارش و دما مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

- منطقه مورد مطالعه

حوضه مورد مطالعه، حوضه آبخیز رودخانه بشار واقع در محدوده جغرافیایی 51° تا 52° طول شرقی و 30° تا 31° عرض شمالی در جنوب غربی ایران در استان کهگیلویه و بویراحمد شهر یاسوج است. مساحت حوضه 2800 کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط آن 2277 متر از سطح دریاست، در این مطالعه از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری پاتاوه مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱- حوضه آبخیز رودخانه بشار

معرفی مدل LARS-WG

نرم افزار LARS-WG^۱ یک تولیدکننده تصادفی اطلاعات هواشناسی^۲ است که قادر به مدل کردن اطلاعات هواشناسی در یک محل بر اساس اطلاعات فعلی است. این اطلاعات به صورت سری زمانه روزانه متغیرهای اقلیمی کمینه و بیشینه دما، بارندگی و تشعشعات خورشید است (Mardani et al., 2022). خواص آماری داده‌های تولید شده مشابه دوره آماری بوده اما انحراف معیار آن‌ها به نسبت اختلاف داده‌های مدل GCM در دوره آینده و گذشته مقایسه می‌شود. داده‌ها در سری‌های زمانی روزانه برای یک سری متغیرهای اقلیمی مناسب برای مثال بارش، دمای کمینه و بیشینه و تابش ایجاد می‌شوند. نکته قابل توجه این است که مولدهای مصنوعی داده‌های آب و هوایی ابزاری برای پیش‌نگری نیستند که بتوان در پیش‌نگری‌های آب و هوایی استفاده کرد. اما توانایی تولید سری‌های زمانی داده‌های آب و هوایی یکسان با دوره دیده‌بانی رادارند. در این روش با شبیه‌سازی و تولید داده‌های آب و هوایی مصنوعی در مقیاس محلی می‌توان مطالعات تغییر اقلیم را در یک ایستگاه انجام داد. مولد مصنوعی، داده‌های آب و هوایی است که می‌تواند برای شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در یک مکان واحد تحت شرایط اقلیم حال و آینده بکار رود (Munawar et al., 2022). در واقع تولید نرم‌افزار دارای دو هدف اصلی می‌باشد، عبارت‌اند از:

الف) ایجاد ابزاری برای شبیه‌سازی و تولید داده‌های آماری هواشناسی مرتبط با داده‌های مشاهداتی منطقه مورد مطالعه
ب) ابزاری برای شبیه‌سازی و تولید داده‌های آماری هواشناسی با استفاده از درون‌یابی پارامترهای تولید شده نقاط مجاور برای نقاطی که فاقد اطلاعات مشاهده‌ای هستند (Kavwenje et al., 2022).

نسخه اولیه مدل LARS-WG در سال ۱۹۹۰ در بوداپست به‌عنوان بخشی از پروژه‌ای ارزیابی ریسک کشاورزی ارائه شد و کار آبی این مدل توسط سمونوف^۳ در ۱۸ ایستگاه هواشناسی واقع در آمریکا، اروپا و آسیا ارزیابی شد. هسته اصلی این مدل استفاده از زنجیره مارکف است که یک روش مرسوم برای مدل‌سازی پدیده بارش است و در واقع هدف اصلی از کاربرد مدل LARS-WG برطرف نمودن محدودیت‌های زنجیره مارکف است. زنجیره مارکف همیشه قادر نیست به‌طور صحیح طول دوره خشکی را شبیه‌سازی نماید. طول دوره‌ی خشکی برای ارزیابی عملکرد محصولات کشاورزی در مناطق مختلف جهان بسیار مهم است (Mohammed & Hassan, 2022).

در این مدل وقوع بارش به صورت سری‌های تر و خشک مدل می‌شود، به طوری که سری‌تر به روزهایی با بارش بیش از صفر میلی‌متر تعریف می‌شود و طول هر سری به صورت تصادفی از طریق توزیع نیمه تجربی تر و خشک اختصاص یافته به آغاز هر ماه تعیین می‌شود. برای روزهای تر، مقادیر بارش از طریق توزیع نیمه تجربی‌ای تعیین می‌شود که مربوط به بارش می‌باشد که از طول سری‌های تر با بارش روزهای قبلی مستقل است. درجه حرارت‌های کمینه و بیشینه روزانه به صورت فرآیندهای تصادفی با میانگین و انحراف معیارهای روزانه که وابسته به وضعیت تر یا خشک بودن روز موردنظر هستند، مدل‌سازی می‌شوند.

در توزیع نیمه تجربی فاصله‌ها به‌طور مساوی بین مقادیر بیشینه و کمینه سری زمانه ماهانه به صورت رابطه زیر تقسیم می‌شوند:

$$EMP = \{a_0, a_i, h_i, i=1, 2, 3, \dots, 10\} \quad (1)$$

که در اینجا EMP یک هیستوگرام با ۱۰ بازه با شدت‌های مختلف بارش است.

$$[a_{i-1}, a_i] \quad a_{i-1} < a_i$$

h_i تعداد رخداد بارش در i مین فاصله را نشان می‌دهد. فاصله‌ها برای طول روزهای تر و خشک و بارش افزایشی هستند. در این مدل به جای تابش می‌توان از ساعت آفتابی نیز استفاده کرد. مقدار بارش یک روز تر از توزیع نیمه تجربی بارش ماه موردنظر و مستقل از سری‌های تر یا مقدار بارش در روز قبل به دست می‌آید. در این مدل سری‌های فوریه، درجه حرارت را تخمین می‌زنند. درجه حرارت‌های کمینه و بیشینه روزانه به صورت فرآیندهای تصادفی با میانگین و انحراف معیارهای روزانه که وابسته به وضعیت تر یا خشک بودن روز موردنظر هستند، مدل‌سازی می‌شوند (Majumder et al., 2019).

سری فوریه مرتبه‌ی سوم برای شبیه‌سازی میانگین و انحراف معیار درجه‌ی حرارت فصلی استفاده می‌شود.

فرآیند تولید داده‌ها توسط مدل LARS-WG در سه مرحله انجام می‌گیرد که عبارت‌اند از: واسنجی، ارزیابی و تولید یا شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی دهه‌های آینده.

الف) واسنجی مدل: در این مرحله مدل با دریافت داده‌های هواشناسی مشاهداتی منطقه در مقیاس روزانه و همچنین اطلاعات جغرافیایی منطقه تنظیم شده و داده‌های آب و هوایی مشاهداتی برای تعیین مشخصات آماری آن آنالیز می‌شود.

ب) ارزیابی مدل: در این مرحله با تولید داده‌های آب و هوایی مصنوعی برای دوره مشاهداتی در منطقه مطالعاتی (بدون اعمال تغییر اقلیم) و مقایسه مشخصات داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل با داده‌های مشاهداتی، توانایی مدل در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی روزانه مورد ارزیابی و تصدیق قرار می‌گیرد.

ج) تولید داده‌های آب و هوایی آینده: در این مرحله پارامترهای اقلیمی دوره‌های آتی با توجه به مدل GCM و سناریوهای تعیین شده مدل‌سازی می‌شود.

دوره بازگشت عکس احتمال است و آن تعداد مهر و موم‌هایی است که به‌طور میانگین بین وقوع دو حادثه مشابه وجود دارد. اگر دوره بازگشت T (سال) و احتمال وقوع P باشد خواهیم داشت (Punyawansiri & Kwanyuen, 2020).

$$T = \frac{1}{P} \quad (2)$$

سناریوی انتشار RCP8/5

بدون اتخاذ هیچ‌گونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب‌وهوای کره زمین در خط سیر سناریوی انتشار RCP8/5 پیش خواهد رفت. به‌طوری‌که ادامه این روند منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌شود. در این هنگام غلظت دی‌اکسید کربن به ۱۰۰۰ ppm رسیده و همچنان روند افزایش خواهد داشت. میزان جمعیت تا سال ۲۱۰۰ در این سناریو حدود ۱۲ میلیارد نفر خواهد بود. این سناریو وجه مشخصه آن روند افزایش گازهای گلخانه‌ای است (Osman et al., 2014).

سناریوی انتشار RCP 6

در این سناریو با کاهش واداشت تابشی، میزان افزایش دی‌اکسید کربن نیز کاهش می‌یابد. این سناریو انتشار توسط گروه مدل‌سازی AIM در موسسه ملی مطالعات محیطی ژاپن طراحی شد. میزان جمعیت حدود ۹ میلیارد نفر تخمین زده شده است که مقداری کمتر از میزان جمعیت پیش‌نگری شده در سناریو A2 است. در این سناریو واداشت تابشی بعد از سال ۲۱۰۰ به دلیل استفاده از فناوری‌های جدید و سیاست‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای ثابت می‌ماند (Chuwah et al., 2016).

سناریوی انتشار RCP4/5

این سناریو توسط گروه مدل‌سازی CAM Mini طراحی شده است و در آن واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات بر مترمربع ثابت می‌ماند.

سناریوی انتشار RCP2/6

این سناریو توسط گروه مدل‌سازی IMAGE از موسسه ارزیابی‌های محیطی هلند طراحی شده است. این سناریو دربرگیرنده کمترین نرخ افزایش گازهای گلخانه‌ای و واداشت تابشی ناشی از آن است. مطابق این سناریو واداشت تابشی در اواسط این قرن به حدود ۳/۱ رسیده و سپس کاهش یافته و به ۲/۶ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد. برای رسیدن به این سطح واداشت تابشی بایستی گازهای گلخانه‌ای به میزان قابل توجهی کاهش یابند. مدل‌های جفت شده CMIP5 نسل جدیدی از مدل‌های گردش عمومی است که در تهیه گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم استفاده می‌شود (Masui et al., 2011).

نتایج نرم‌افزار LARS-WG

نتایج حاصل از تحلیل منطقه‌ای

نتایج حاصل از بخش تحلیل منطقه‌ای در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. جدول ۱ نشان‌دهنده فصل‌های ترسالی و خشک‌سالی و آزمون‌های آماری K-S جهت مقایسه توزیع‌های فراوانی است که یک مقدار احتمالاتی P-value برای دوره پایه ارائه می‌دهند. مقدار P-value بین ۰/۵ تا ۱ قابل قبول است.

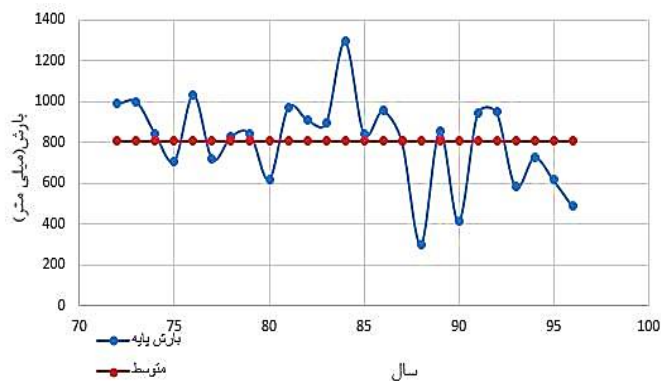
جدول ۱- فصل‌های ترسالی و خشک‌سالی و آزمون‌های آماری K-S و مقدار احتمالاتی P-value برای دوره پایه

فصل‌ها	تر یا خشک	k-s	P-value
زمستان	تر	۰/۱۲۶	۰/۹۸۸۵
زمستان	خشک	۰/۰۵۴	۱
بهار	تر	۰/۰۵۵	۱
بهار	خشک	۰/۰۳۶	۱
تابستان	تر	۰/۲۰۰	۰/۶۹۶۷
تابستان	خشک	۰/۱۸۲	۰/۷۹۹۸
پاییز	تر	۰/۰۳۰	۱
پاییز	خشک	۰/۱۳۸	۰/۹۷۰۵

جدول ۲- بارش مشاهداتی و تولیدشده و اختلاف بین آن‌ها در دوره پایه بدون اعمال سناریو

ماه	آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی
مشاهداتی	۱۵۶۶	۸۸۰۶	۸۶۹	۰/۷۵	۲/۸۴	۱۷/۱	۰/۸۵	۷۴/۱۸	۷۱/۱۱	۱۴/۴۱	۱۳۶/۶۸	۱۶۲/۸۷
SD	۱۳۸۸	۹۳/۷۶۴	۱۱۱/۵۷۹	۲/۴۸	۶/۳۶۹	۲/۵۳۵	۲/۱۹۴	۲۰/۳۹۷	۵۳/۰۹۵	۹/۱۸۵	۹۱/۴۷۸	۱۰/۸۳۴
تولیدشده	۱۶۲/۹	۷۰/۳۹	۱۶/۷۴	۰/۵۵	۳/۰۳	۰/۸۱	۳/۰۳	۳۹/۲۷	۶۳/۹۳	۱۴/۸۹	۱۲۶/۷۳	۱۶۳/۰۲
SD	۱۰۵/۸	۵۸/۱۶۹	۲۶/۵۲۷	۲/۲۰۷	۷/۶۶	۱/۸۳	۷/۳۳۶	۳۰/۷۵۹	۵۵/۷۹۱	۷/۵۱۳	۵۷/۶۷۳	۸۰/۳۷۴
T-t	۰/۸۲۷	۰/۳۱۶	۰/۱۴۵	۰/۷۱۸	۰/۹۱۲	۰/۴۷۹	۰/۱۴۴	۰/۲	۰/۰۹۴	۰/۶۶۶	۰/۵۶۳	۰/۹۳۱
f-t	۰/۱۰۷	۰/۰۰۵	۰	۰/۴۷۷	۰/۳۷۸	۰/۰۵۱	۰	۰/۰۲۹	۰/۸۰۷	۰/۰۴۱	۰/۰۰۶	۰/۱۷۱
اختلاف مشاهداتی و تولیدشده	-۴/۰۳۷	۲۰/۱۷۹	۹۳/۶۴۰	۲۶/۶۷	۶/۶۹۰	۳۰/۱۷۷	۲۵۶/۵۰	۴۶/۱۶۰	۳۱/۶۷۰	۵۷/۰۲	۷/۳۸	۱/۱۳۵

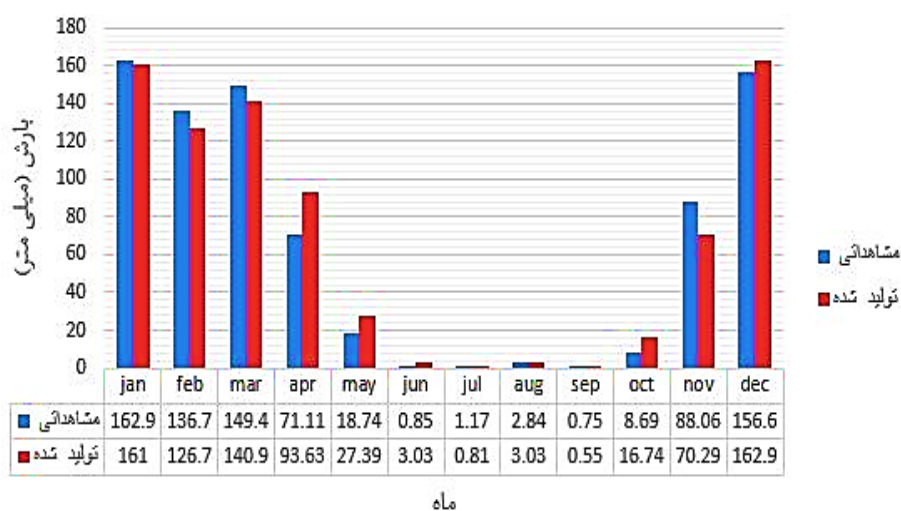
در شکل ۲ سری زمانی بارش سالانه حوضه مورد مطالعه از سال ۷۱-۷۲ تا سال ۹۵-۹۶ ایستگاه با تاوه ارائه شده است که مقدار متوسط سالانه حدود ۸۰۰ میلی‌متر است.



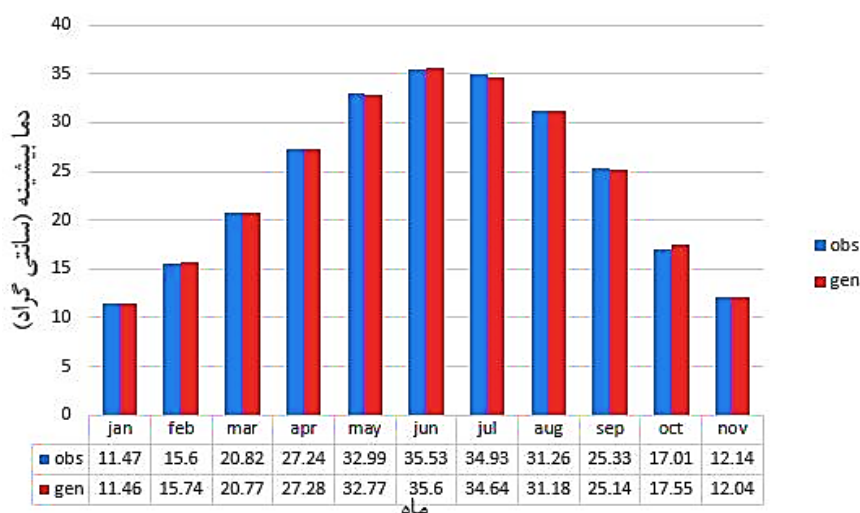
شکل ۲- سری زمانی بارش سالانه حوضه مورد مطالعه

واسنجی و صحت‌سنجی مدل LARS-WG

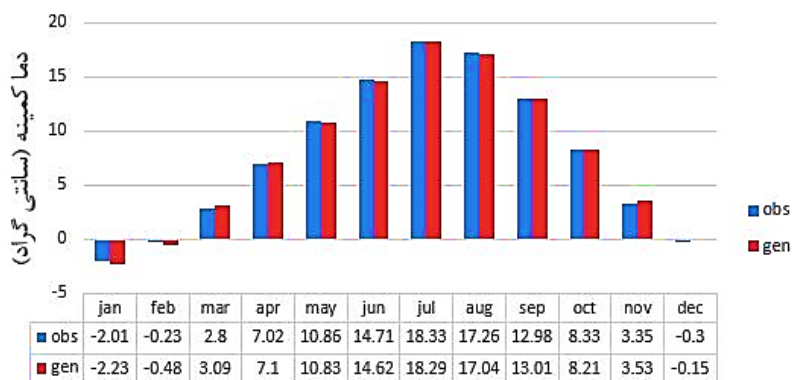
واسنجی و صحت‌سنجی مدل LARS-WG برای دوره پایه ریزمقیاس‌نمایی انجام شده است. با توجه به نزدیک بودن داده‌های تولیدشده و مشاهداتی، نتایج حاصل حاکی از صحت مدل برای تولید دقیق داده‌ها در آینده است. نتایج ریز گردانی بارش، دمای کمینه و بیشینه حاصل از روش مولد هواشناسی LARS-WG که به‌منظور ریزمقیاس‌نمایی با این روش انجام شده است، پس از واسنجی بر پایه آزمون‌های نکویی برازش (آزمون K-S، F، t و مقدار p) به‌منظور صحت‌سنجی، سری زمانی در دوره پایه بر اساس فایل ایجادشده در مرحله واسنجی تولید شد و با اطلاعات مشاهداتی مقایسه شد که نتیجه آن در شکل‌های ۳ تا ۵ مشاهده می‌شود. خطای بین مقادیر تولیدشده و مشاهداتی (اطلاعات ماهانه) برای شاخص‌های جذر متوسط مجموع مربعات خطاها RMSE و خطای متوسط مطلق MAE به ترتیب برابر ۹/۵ و ۵/۶ میلی‌متر و ضریب تعیین برابر ۰/۹۷ است که نشان می‌دهد این مدل از کار آبی مناسبی جهت ریزمقیاس‌نمایی اطلاعات برخوردار است.



شکل ۳- اختلاف بارش مشاهداتی با بارش تولیدشده بدون اعمال سناریو در دوره پایه (تاریخی)



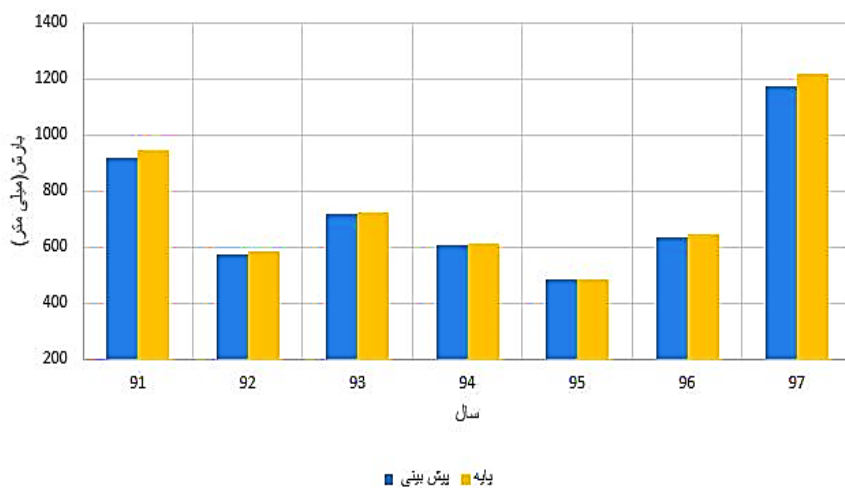
شکل ۴- اختلاف دمای بیشینه مشاهداتی با دمای بیشینه تولیدشده بدون اعمال سناریو در دوره پایه (تاریخی)



شکل ۵- اختلاف دمای کمینه مشاهداتی با دمای کمینه تولیدشده بدون اعمال سناریو دوره پایه (تاریخی)

پیش‌نگری کوتاه‌مدت برای دوره هفت‌ساله موجود

در این بخش به منظور بررسی دقیق‌تر صحت مدل LARS-WG، دوره ۲۰ ساله از سال ۷۱ تا ۹۰ به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شد و برای دوره ۷ ساله ۹۱ تا ۹۸ مقادیر بارندگی پیش‌نگری شد. نتایج حاصل در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل به خوبی توانسته است واقعه مربوط به سیل سال ۹۷-۹۸ که بعد از یک دوره کم بارش اتفاق افتاده است را پیش‌نگری کند.



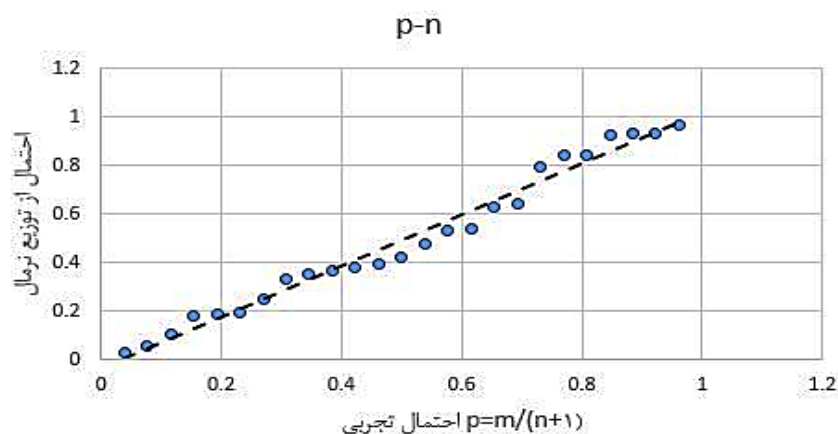
شکل ۶- پیش‌نگری کوتاه‌مدت هفت‌ساله برای صحت‌سنجی دقیق مدل Lars

همچنین در جدول ۳ مقادیر بارش سالانه پیش‌نگری شده و مشاهداتی و میزان درصد خطای نسبی شبیه‌سازی ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود درصد خطای نسبی مقدار قابل قبولی است.

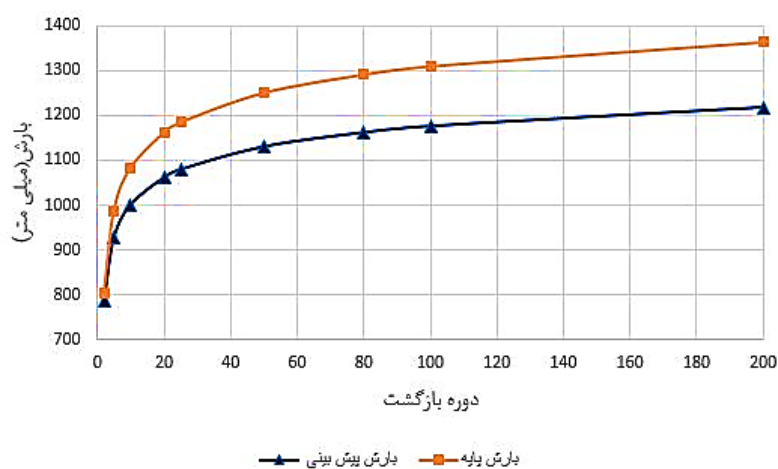
جدول ۳- میزان خطای نسبی بارش مشاهداتی و پیش‌نگری‌شده

سال	خطای نسبی (%)	بارش مشاهداتی (mm)	بارش پیش‌نگری (mm)
۹۱	۲/۹۱۳۶	۹۴۷	۹۲۰
۹۲	۱/۹۴۶۸	۵۸۳/۹۳	۲۷۵/۶
۹۳	۱/۰۶۷۷	۷۲۶/۷۶	۷۱۹
۹۴	۱/۲۷۶۲	۶۱۵/۸۶	۶۰۸
۹۵	۰/۶۸۵۳	۴۸۷/۳۴	۴۸۴
۹۶	۱/۱۹۳۷	۶۴۵	۶۷۳/۳
۹۷	۳/۸۹۵۹	۱۲۲۰	۱۱۷۲

به منظور بررسی اثر دوره بازگشت‌های مختلف بر عملکرد مدل، مقادیر بیشینه بارش با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله بر اساس داده‌های تولیدشده توسط مدل LARS-WG و داده‌های مشاهداتی محاسبه شد. بدین منظور هر دو سری داده با توزیع‌های آماری مختلف برازش داده شد و از این میان توزیع احتمالاتی نرمال به عنوان توزیع مناسب انتخاب شد (شکل ۷). مقادیر بیشینه بارش با دوره بازگشت‌های مختلف که بر اساس برازش داده‌های تولید شده توسط مدل LARS-WG با توزیع نرمال به دست آمده است و مقادیر مشاهداتی در شکل ۸ مقایسه شده است. نتایج نشان‌دهنده این است که میزان بارش پیش‌نگری شده در دوره‌های بازگشت مختلف توسط مدل نسبت به بارش مشاهداتی کمتر است.



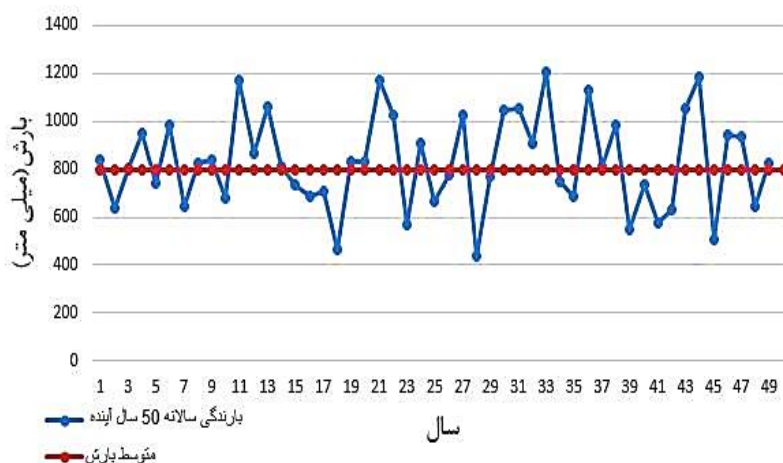
شکل ۷- برازش داده‌ها با توزیع نرمال



شکل ۸- مقایسه مقادیر بیشینه بارش با دوره بازگشت مختلف تولیدشده توسط مدل LARS-WG و اطلاعات مشاهداتی در دوره پایه (تاریخی)

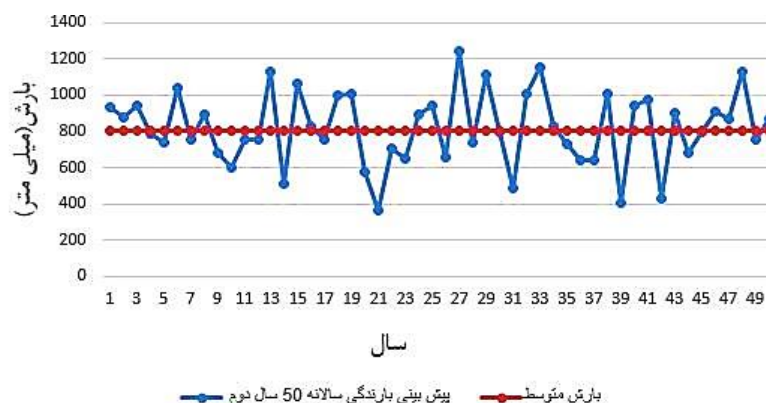
پیش‌نگری بلندمدت بارش و دما در دوره‌های ۵۰ ساله

پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، فایل تغییر اقلیم که نشانگر تغییرات ماهانه نسبت به دوره پایه است، در هر اجرا به مدل معرفی شده و سری زمانی بارش، دمای کمینه و بیشینه در دوره‌های آتی تولید می‌شود. میزان بارندگی پیش‌نگری شده ۵۰ سال آینده توسط نرم‌افزار LARS-WG در شکل ۹ آمده است که بیشترین مقدار بارش پیش‌نگری شده ۱۲۳۳ میلی‌متر در سال و کم‌ترین مقدار ۴۳۸ میلی‌متر در سال است.



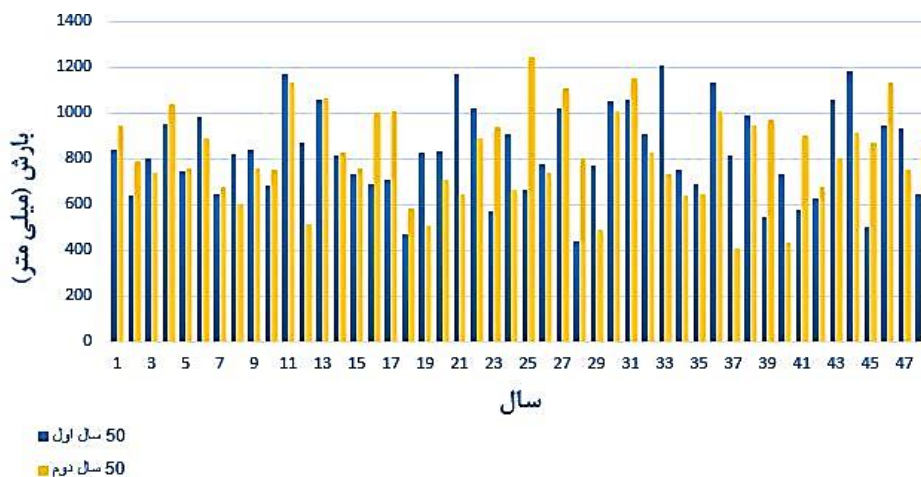
شکل ۹- میزان بارندگی ۵۰ سال اول پیش‌نگری شده توسط نرم‌افزار LARS-WG

میزان بارندگی پیش‌نگری شده ۵۰ سال دوم توسط نرم‌افزار LARS-WG در شکل ۱۰ آورده شده است که بیشترین مقدار متوسط بارندگی ۱۱۶۸ میلی‌متر در سال و کم‌ترین مقدار ۳۶۸ میلی‌متر در سال است.



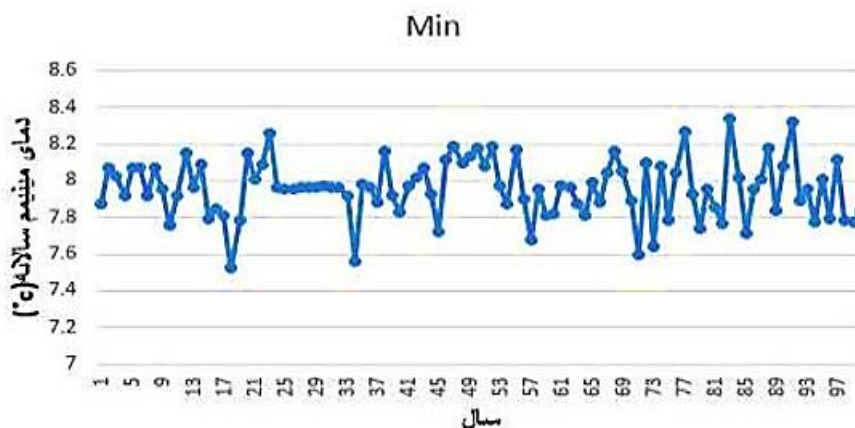
شکل ۱۰- میزان بارندگی ۵۰ سال دوم پیش‌نگری شده توسط نرم‌افزار LARS-WG

مقایسه بارش تولیدشده توسط نرم‌افزار LARS-WG در ۱۰۰ سال آینده که میزان تغییرات بارش در ۵۰ سال اول و ۵۰ سال دوم را در آینده نشان می‌دهد در شکل ۱۱ آورده شده است. بر اساس این شکل، میزان بارش در ۵۰ سال اول به مراتب بیشتر از ۵۰ سال دوم است.



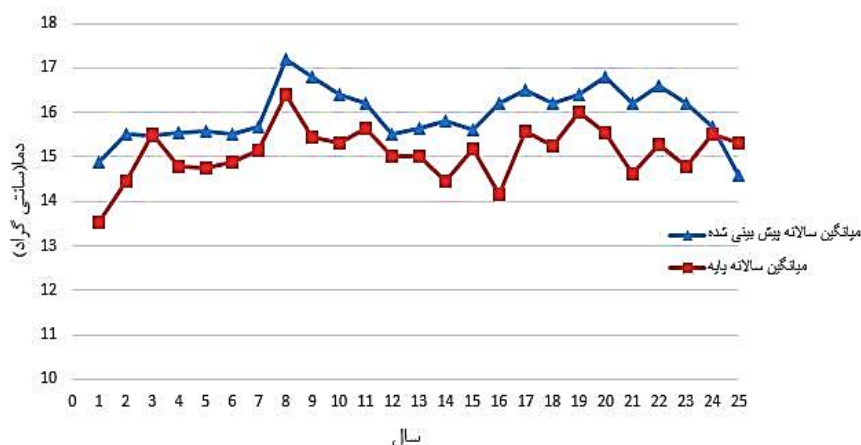
شکل ۱۱- مقایسه بارش تولیدشده در ۵۰ سال اول و ۵۰ سال دوم

میزان تغییرات دمای کمینه تولیدشده ۱۰۰ سال آینده توسط نرم‌افزار LARS-WG در شکل ۱۲ آورده شده است.



شکل ۱۲- میانگین سالانه دمای کمینه پیش‌نگری شده ۱۰۰ سال آینده

در شکل ۱۳ میانگین دمای ۲۵ سال پایه و پیش‌نگری شده مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، در آینده با افزایش دما روبه‌رو هستیم.



شکل ۱۳- اختلاف بین میانگین دمای سالانه پایه و ۲۵ سال اول پیش‌نگری شده

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، نتایج حاصل از پیش‌نگری دما و بارش در آینده با استفاده از نرم‌افزار ریزمقیاس نمایی LARS-WG نشان داد که این نرم‌افزار در بخش صحت سنجی به‌خوبی عمل کرده و پیش‌نگری‌ها حاکی از دقت بالایی نرم‌افزار بوده است و همچنین پیش‌نگری بارش در ۵۰ سال اول بیشتر از ۵۰ سال دوم بوده است و بررسی داده‌های پیش‌نگری شده تغییرات دمایی در ۱۰۰ سال آینده حاکی از افزایش شدت درجه حرارت در است که نتایج تطابق خوبی با (Ramak et al., 2015) دارد. در بخش سناریوسازی تحت سناریوهای مختلف مشاهده شد که تغییرات درجه حرارت رو به افزایش و میزان بارش رو به کاهش است. نکته مهم این است که افزایش گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی باعث افزایش متوسط دما و کاهش متوسط بارش در آینده می‌شود. میزان تغییرات بارش در RCP2/6 نشان می‌دهد میزان بارش ماکزیمم دارای ۹ درصد کاهش و در RCP8/5 دارای ۶ درصد کاهش نسبت به دوره مشاهداتی است، اما میزان بارش حداقل در RCP2/6 دارای حدود ۴۷ درصد افزایش و میزان بارش حداقل در RCP8/5 دارای حدود ۵۱ درصد افزایش نسبت به دوره مشاهداتی است. مقدار متوسط بارش در RCP2/6 حدود ۴ درصد کاهش و در RCP8/5 حدود ۱ درصد کاهش را نشان می‌دهد. تغییرات دمایی در RCP2/6 بین ۳ تا ۱۳ درصد و در RCP8/5 بین ۴ تا ۱۴ درصد افزایش را نسبت به دوره مشاهداتی نشان می‌دهد. که این افزایش دما در

مقیاس‌های بزرگ باعث افزایش تبخیر و طولانی‌تر شدن دوره‌های خشک‌سالی می‌شود. که عامل اصلی کاهش منابع آب در آینده همین افزایش دما و در پی آن افزایش میزان تبخیر و تعرق است. نتیجه حاصل از این پژوهش در بخش ریزمقیاس نمایی توانایی مناسب مدل LARS-WG برای برآورد تغییرات دمایی و بارش در سال‌های آتی را نشان داد. در بخش سناریوسازی تغییرات اقلیمی RCP ها تا انتهای قرن ۲۱ نشان از افزایش درجه حرارت و کاهش بارش در سال‌های آتی است.

منابع

- اسلامی، ع و ر. ثقفیان. ۱۳۸۵. نقش عوامل مورفومتری و اقلیمی حوزه در تولید جریان‌های سیلابی (مطالعه موردی حوزه‌های آبخیز غربی خزر). نشریه پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، ۱ (۲۱): ۱۷۵-۱۳۹.
- امیراحمدی، ا.، ابراهیمی، م. & بیرامعلی کیوی، ف. ۱۴۰۰. مکان‌یابی پتانسیل جمع‌آوری آب باران با استفاده از مدل‌سازی عامل مبنای مکانی (مطالعه موردی: پردیس دانشگاه حکیم سبزواری). فضای جغرافیایی، ۲۱ (۷۶): ۱۹-۳۳.
- قضاوی، ر.، ساداتی نژاد، س.، یزدانی، ی. و ع. ولی. ۱۳۹۴. شناسایی و طبقه‌بندی سازه‌های مناسب شارژ و برداشت آب با استفاده از روش GIS جغرافیای طبیعی، (۲۶): ۸۵-۹۶.
- دخانی، س. ۱۳۹۲. مکان‌یابی جمع‌آوری آب باران بر پایه سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در مناطق غیرخشک و نیمه مرطوب ایران مرکزی (مطالعه موردی حوزه آبخیز استان اصفهان)، پایان‌نامه دکتری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. ص ۱۵۹.
- رضایی، ع و م. سلطانی. ۱۳۸۲. تحلیل رگرسیون کاربردی. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.
- صادقی، ح.، مرادی، ح.، مزین، م و م. وفاخواه. ۱۳۸۴. کارایی روش‌های مختلف تجزیه و تحلیل آماری در مدل‌سازی بارش رواناب (مطالعه موردی حوزه کسلیان). نشریه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۲ (۳): ۸۹-۸۱.
- طهماسبی، رمضان، رجبی ثانی، رضا. (۱۳۸۵). جمع‌آوری آب باران در عرصه‌های طبیعی راه‌حلی برای رفع کم‌آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک. نشریه جغرافیا و توسعه، ۴ (۷): ۴۲-۲۳.
- مفیدی چلان، مرتضی، نظرنژاد، حبیب، و محرم پور، الهام (۱۴۰۰). مکان‌یابی عملیات اصلاحی ذخیره نزولات آسمانی در عرصه‌های طبیعی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز نازلو چای، ارومیه). مدیریت اراضی، ۹ (۲): ۲۴۷-۲۶۱.
- محمودی، ن.، (۱۳۹۱)، "مکان‌یابی مناطق مناسب برای ذخیره آب باران (مطالعه موردی: حوضه آبخیز درخت سنجد)"، اولین همایش ملی سامانه تراز آب باران بارندگی، ۲۲ تا ۲۳ آذر ۱۳۹۱، تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی.
- Ammar, A., Riksen, M., Ouessar, M., Ritsema, C., (2016) Identification of suitable sites for rainwater harvesting structures in arid and semi-arid regions: a review. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 4 (2), 108–120.
- Adham, A., Riksen, M., Ouessar, M., Ritsema, C., Ammar, A., Riksen, M., Ouessar, M., Ritsema, C., 2016. Identification of suitable sites for rainwater harvesting structures in arid and semi-arid regions; A review. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 4:108–120.
- Adamowski, J. (2015) Rainwater harvesting for the management of agricultural droughts in arid and semiarid regions. *Paddy and Water Environment*, 14(1), 231–246.
- Al-Daghastani, H.S., 2010. Water harvesting search in Nineah Governorate using remote sensing data. *Iraqi J. Desert Stud.* 2: 1–15.
- Baguma, D., Loiskandl, W., Jung, H., 2010. Water management, rainwater harvesting and predictive variables in rural households. *Water Resour. Manag.* 24: 3333–3348.
- Basinger, M., Montalto, F., Lall, U., 2010. A rainwater harvesting system reliability model based on nonparametric stochastic rainfall generator. *J. Hydrol.* 392: 105–118.
- Dabiri, D., Alipor, A., Azad, B., Fatahi, A., 2016. Site Selection of In-situ and Ex-situ Methods of Rain Water Harvesting In the Arid Regions of Iran. Volume: 03 Issue: 04:270–276.
- De Winnaar, G., Jewitt, G.P.W., Horan, M., Winnaar, G. De, Jewitt, G.P.W., Horan, M., 2007. A GIS-based approach for identifying potential runoff harvesting sites in the Thukela River basin, South Africa. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C* 32: 1058–1067.
- Durbude, D.G., Venkatesh, B., 2004. Site suitability analysis for soil and water conservation structures. *J. Indian Soc. Remote Sens.* 32: 399–405.
- Durga Rao, K.H. V, Bhaumik, M.K., 2003. Spatial expert support system in selecting suitable sites for water harvesting structures—a case study of song watershed, Uttaranchal, India. *Geocarto Int.* 18, 43–50.

- El-Awar, F. A., Makke, M. K., Zurayk, R. A., & Mohtar, R. H. (2000) A spatial hierarchical methodology for water harvesting in dry lands. *Applied Engineering in Agriculture*, 16(4), 395–404.
- Ejegu, M. A., & Yegizaw, E. S. (2020) Potential rainwater harvesting suitable land selection and management by using GIS with MCDA in Ebenat District, Northwestern Ethiopia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 8(1), 2537–2549.
- Fewkes, A., 2000. Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach. *Urban water* 1, 323–333.
- Guo, Y., Baetz, B.W., Engineering, H., 2007. Sizing of rainwater storage units for green building applications. *J. Hydrol. Eng.* 12, 197–205.
- Helmreich, B.Ä., Horn, H., Coulombwall, A., 2009. Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination* 248, 118–124.
- Jha, M.K., Chowdary, V.M., Kulkarni, Y., Mal, B.C., 2014. Rainwater harvesting planning using geospatial techniques and multicriteria decision analysis. *Resour. Conserv. Recycl.* 83, 96–111.
- Jasrotia, A. S., Majhi, A., & Singh, S. (2009) Water balance approach for rainwater harvesting using remote sensing and GIS techniques, Jammu Himalaya, India. *Water Resources Management*, 23(14), 3035–3055
- Kahinda, J.M., Lillie, E.S.B., Taigbenu, A.E., Taute, M., Boroto, R.J., 2008. Developing suitability maps for rainwater harvesting in South Africa. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C* 33, 788–799.
- Kadam, A. K., Kale, S. S., Pande, N. N., et al. (2012) Identifying potential rainwater harvesting sites of a semi-arid, basaltic region of Western India, using SCS-CN method. *Water Resources Management*, 26(9), 2537–2554.
- Mahmoud, S.H., Alazba, A.A., 2015. The potential of in situ rainwater harvesting in arid regions: developing a methodology to identify suitable areas using GIS-based decision support system. *Arab. J. Geosci.* 8, 5167–5179.
- Makhamreh, Z., 2011. Using remote sensing approach and surface landscape conditions for optimization of watershed management in Mediterranean regions. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C* 36, 213–220.
- Mitchell, V.G., 2007. How important is the selection of computational analysis method to the accuracy of rainwater tank behaviour modelling? *Hydrol. Process.* 21, 2850–2861.
- Mahmoud, S. H., & Alazba, A. A. (2016) Delineation of potential sites for rainwater harvesting structures using a GIS-based decision support system. *Hydrology Research*, 46(4), 591–606.
- Napoli, M., Cecchi, S., Orlandini, S., & Zanchi, C. A. (2014) Determining potential rainwater harvesting sites using a continuous runoff potential accounting procedure and GIS techniques in central Italy. *Agricultural Water Management*, 141, 55–65.
- Palla, A., Gnecco, I., Lanza, L.G., Barbera, P. La, La Barbera, P., 2012. Performance analysis of domestic rainwater harvesting systems under various European climate zones. *Resour. Conserv. Recycl.* 62, 71–80.
- Ward, S., Memon, F.A., Butler, D., 2010. Rainwater harvesting: model-based design evaluation. *Water Sci. Technol.* 61, 85–96.
- Waterfall, P.H., 2006. *Harvesting rainwater for landscape use*, 2nd ed. College of Agriculture and Life Sciences, University of Arizona (Tucson, AZ)1-60
- Weerasinghe, H., Schneider, U.A., Loew, A., 2011. Water harvest-and storage-location assessment model using GIS and remote sensing. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 3353–3381.
- Wei, H., Li, J.-L., Liang, T.-G., 2005. Study on the estimation of precipitation resources for rainwater harvesting agriculture in semi-arid land of China. *Agric. Water Manag.* 71, 33–45.
- Winnar, G., Jewitt, G. P. W., & Horan, M. (2007) A GIS-based approach for identifying potential runoff harvesting sites in the Thukela River basin, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 34(15–18), 767–775.