




Future projection of climatic elements over Yazd province using RCP scenarios

Azam Sadat Hosseini KhezarAbad¹ | Abbasali Vali²  | Amirhossein Halabian³ |
Mohammad Hossein Mokhtari⁴

1 Department Desert management and control, Faculty of Natural Resource and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran. hosseiniias0401@gmail.com

2. Corresponding Author, Department Desert management and control, Faculty of Natural Resource and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran. vali@kashanu.ac.ir

3. Department of Geography, Payame Noor University, Tehran, Iran. am_halabian@pnu.ac.ir

4. Department Desert and Arid Land Management, Faculty of Natural Resources University of Yazd, Yazd, Iran. mhmokhtari@yazd.ac.ir

Article Information

Research Paper

Vol: 14
No: 52
P: 1-23
Received: 2023-02-15
Revised: 2023-04-19
Accepted: 2023-05-03
Published: 2023-08-23

Keywords:

- Yazd Province
- Projection
- Climate Change
- Downscaling
- Representative concentration pathway (RCP)

Cite this Article:

Hosseini KhezarAbad, A. S., Vali, A., Halabian, A., & Mokhtari, M. H. (2023). Future projection of climatic elements over Yazd province using RCP scenarios. *Journal of Arid Regions Geographic Studies* 14(52): 1-23.
doi: 10.22034/JARGS.2023.385861.1015

Publisher: Hakim Sabzevari University

© The Author(s)



 [10.22034/JARGS.2023.385861.1015](https://doi.org/10.22034/JARGS.2023.385861.1015)

Abstract

Aim: The aim of this research is the future projection of climatic elements over the northwest Yazd province using RCP scenarios.

Material & Method: This study uses simulating the climate variables, namely, precipitation and average temperature of Yazd province in the baseline period (2001-2020), by using the LARS-WG6.0 model and four models of CMIP5, for three possible emission scenarios (such as RCP 2.6, RCP 4.5, and RCP 8.5). By introducing the best model, it uses downscaling the climate variables for the future 2026-2055 and 2071- 2100.

Finding: According to the results, BCC-CSM1-1 and NorESM1-M models are introduced as the best models in projecting the mentioned variables with low error and acceptable NRMSE. The most significant increase in the temperature variable will occur in the period 2100-2071 and RCP8.5, so the temperature in the NorESM1-M model increases from 1.13 to 3.93 degrees Celsius in scenarios 2.6 and 8.5, respectively. The amount of rainfall in 2071-2100 will decrease compared to 2055-2026, and in some stations, it will increase or decrease compared to the average of the base period.

Conclusion: In future periods, the temperature will increase in the region and the greatest increase in RCP8.5. Precipitation in the future fluctuates so that it will have the most remarkable changes in RCP2.6.

Innovation: In this research, for future projection of climatic elements over the northwest Yazd province using GCM-CMIP5 models and RCP scenarios (RCP2.6, 4.5, and 8.5). After analyzing the error statistics, we chose BCC-CSM1-1 and NorESM1-M models to project future temperature and rainfall and better understand the region's climate. Therefore, the results of this study can be applied to regional planning, including meteorology, water resource management, and combating desertification.

Extended Abstract

1. Introduction

Global warming and climate change are some of the most critical environmental phenomena in recent decades, which cause a range of challenges for agriculture, forests, and water resources. General circulation models have earned the ability for the future by simulating and adapting climate behaviors with facts. Future projections based on temperature have increased scenarios, and its impact on natural systems has caused attention to climate change and management methods to reduce its consequences. Due to the location of Yazd province in the center of Iran along with population increase, water shortage, consecutive droughts in the past few decades, and the spread of desertification phenomenon, in this research, according to common estimating, simulating and projecting models, Climate change was investigated in this geographical area and climatic variables were downscaled using CMIP5 models under three RCP scenarios for the future periods.

2. Materials and Methods

In this research, the change of precipitation and temperature parameters over Yazd province in the base period (2001-2020) with four general circulation models (BCC-CSM1-1, CSIRO-MK36, HadGEM2-ES, and NorESM1-M) from the CMIP5 series, under three scenarios RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 were simulated using the LARS-WG6 model. Then, the best model in the region was determined by evaluating statistics such as NRMSE and MAE to project future climate parameters. Based on the three mentioned scenarios, the best models' output was exerted to simulate the future climate change projection in the region in two time periods: 2026-2055 and 2071-2100, and the projection results were evaluated.

3. Results and Discussion

The results show the optimal performance of the LARS-WG6 model in simulating climatic parameters in the province. The first step in analyzing the effects of climate change on Yazd province is to quantify the changes in climate variables. Based on the simulation results of precipitation and temperature parameters, BCC-CSM1-1 and NorESM1-M models with the lowest error statistics and acceptable NRMSE (less than 39% and 44%, respectively) are the best models in the region introduced. The results show a consistently increasing trend in average temperature values for climate models in both future periods compared to the baseline period. The average temperature in the winter months (January-March) is lower than the summer months (June-August), and the NorESM1-M model has predicted higher temperatures than the BCC-CSM1-1 model in all RCP scenarios and months in future periods. Both models in all stations have predicted that the average temperature at the end of this century (2071-2100 period) in all scenarios is higher than the base period. With the increase of the RCP scenario, the average temperature also increases. The annual average temperature changes fluctuate from RCP2.6 to RCP8.5, respectively, to the amount of 00.79 to +3.81 (°C) in the BCC-CSM1-1 model and to the amount 11.13 to +3.93 (°C) in the NorESM1-M model in the 2071-2100 period. The rate of monthly and annual precipitation changes from 2026-2055 to 2071-2100 will be different for all models and RCP scenarios. However, compared to the BCC-CSM1-1 model, the NorESM1-M model estimates a more noticeable increase and decrease in precipitation in the near and far future, respectively. In most stations, the precipitation in the summer months is close to zero compared to the base period. The most considerable decrease and increase in annual precipitation in the BCC-CSM1-1 model is -9 (Nodoshan station) mm and +10.73 (Ashkezar station) mm, and in the NorESM1-M model, is -8.77 (Nodoshan station) mm and +16 (Meibood station) mm. In the BCC-CSM1-1 model in the 2026-2055 period and both models in the 2071-2100 period, precipitation changes increase in the RCP2.6 more than the other two scenarios, and except for the Ashkezar station, in other stations, the increase in the RCP scenario, precipitation is reduced.

4. Conclusions

According to the results, the BCC-CSM1-1 and NorESM1-M models are introduced as the best ones in projecting the mentioned variables with low error and acceptable NRMSE. The highest temperature increase will occur in the 2071-2100 period and RCP8.5, so the temperature in the NorESM1-M model increases from 1.13 to 3.93°C in scenarios 2.6 and 8.5, respectively. The amount of precipitation in the 2071-2100 period will decrease compared to the 2026-2055 period, and it is increasing or decreasing compared to the average of the base period in some stations. So, the precipitation changes on stations in the near future between -9.40 and +16 mm and at the end of this century, between -9 and +10.73 mm. In the future, precipitation will have the most and least changes in RCP2.6 and RCP4.5, respectively. The possible consequences of this situation in the future include an increase in evapotranspiration and water stress, a

decrease in soil water and groundwater recharge, an increase in wind speed and the creation of dust storms, an increase in drought, and the area of deserts in the region. These conditions will lead to the destruction of ecosystems, threatening vital systems and settlements. Therefore, integrated management and strategies to reduce climate change and ecosystem destruction in this province are necessary to plan and manage the challenges expected in the future.

5. Acknowledgment & Funding

The authors are grateful to the Meteorological Department of Yazd Province for providing the climatic data and information in this research.

6. Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



پیش‌نگری عناصر اقلیمی بر پایه سناریوهای وادشت تابشی در استان یزد

اعظم‌السادات حسینی خضرآباد^۱، عباسعلی ولی^۲ , امیرحسین حلبیان^۳، محمدحسین مختاری^۴

- ۱- گروه مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. hosseiniias0401@gmail.com
- ۲- نویسنده مسئول، گروه مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. vali@kashanu.ac.ir
- ۳- گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. am_halabian@pnu.ac.ir
- ۴- گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران. mhmokhtari@yazd.ac.ir

چکیده:

هدف: هدف از این پژوهش پیش‌نگری آینده عناصر اقلیمی شمال غرب استان یزد با استفاده از سناریوهای وادشت تابشی است.

روش و داده: این مطالعه، تغییر پارامترهای بارندگی و میانگین دمای استان یزد در دوره پایه (۲۰۲۰-۲۰۰۱) را با چهار مدل گردش کلی از سری CMIP5، تحت سه سناریوی وادشت تابشی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 با استفاده از مدل آماری LARS-WG6 شبیه‌سازی کرده و با انتخاب بهترین مدل، عناصر اقلیمی را برای دوره‌های ۲۰۵۵-۲۰۲۶ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ در آینده، مقیاس‌گاهی کرده و نتایج پیش‌نگری را مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

یافته‌ها: براساس نتایج به‌دست آمده در شبیه‌سازی پارامترهای مذکور، دو مدل BCC-CSM1-1 و NorESM1-M با داشتن آماره‌های خطای کم و NRMSE قابل قبول، به عنوان بهترین مدل معرفی می‌شوند. بیشترین تغییرات میانگین دما نسبت به دوره پایه، مربوط به دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ و سناریوی بدبینانه است به طوری که دما در این دوره در مدل NorESM1-M از ۱/۱۳+ تا ۳/۹۳+ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در سناریو ۲/۶ و ۸/۵ افزایش می‌یابد. میزان بارندگی در دهه‌های پایانی قرن حاضر، از دوره ۲۰۵۵-۲۰۲۶ کمتر و در برخی نقاط نسبت به میانگین دوره پایه افزایشی یا کاهش می‌یابد. به طوری که تغییرات بارندگی در ایستگاه‌های مطالعاتی در آینده نزدیک بین ۹/۴- تا ۱۶+ میلی‌متر و در اواخر قرن حاضر بین ۹- تا ۱۰/۷۳+ میلی‌متر نوسان دارد.

نتیجه‌گیری: در دوره‌های آتی، دما در منطقه افزایش می‌یابد و بیشترین میزان این افزایش مربوط به RCP8.5 است. بارش در آینده نوسانی است به طوری که بیشترین و کمترین تغییرات را به ترتیب در RCP2.6 و RCP4.5 خواهد داشت.

نوآوری، کاربرد نتایج: در این پژوهش، برای پیش‌نگری عناصر اقلیمی از مدل‌های GCM- CMIP5 و سناریوهای وادشت تابشی، RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در شمال غرب یزد استفاده گردید و با ارزیابی آماره‌های خطا، مدل‌های مناسب برای پیش‌نگری دما و بارندگی به ترتیب BCC-CSM1-1 و NorESM1-M انتخاب شد تا تصویر روشنی از اقلیم این منطقه در آینده ارائه شود. بنابراین نتایج این امر می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای به‌ویژه پدیده‌هایی از جمله هواشناسی، منابع آبی در محیط زیست و مبارزه با بیابان‌زایی استفاده شود.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

شماره:	۱۴
دوره:	۵۲
صفحه:	۱-۲۳
تاریخ دریافت:	۱۴۰۱/۱۱/۲۶
تاریخ ویرایش:	۱۴۰۲/۰۱/۳۰
تاریخ پذیرش:	۱۴۰۲/۰۲/۱۳
تاریخ انتشار:	۱۴۰۲/۰۶/۰۱

کلیدواژه‌ها:

- استان یزد
- پیش‌نگری
- تغییر اقلیم
- مقیاس‌گاهی
- سناریو وادشت تابشی (RCP)

نحوه ارجاع به این مقاله:

حسینی خضرآباد، اعظم‌السادات، ولی، عباسعلی، حلبیان، امیرحسین، و مختاری، محمدحسین. (۱۴۰۲). پیش‌نگری عناصر اقلیمی بر پایه سناریوهای وادشت تابشی در استان یزد. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۴(۵۲): ۱-۲۳. doi: 10.22034/JARGS.2023.385861.1015

ناشر: دانشگاه حکیم سبزواری



© نویسنده(گان).

۱- مقدمه

گرم شدن کره زمین، تغییر بارندگی و تغییر در فراوانی رویدادهای جوی، احتمال وقوع تغییر اقلیم را افزایش می‌دهد و منبع آب سالانه و فصلی را تغییر می‌دهد (Refsgaard et al., 2013). فرآیندهای هیدرولوژیکی به شدت به بارندگی و دما حساس هستند؛ بنابراین، تغییر اقلیم می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر رژیم هیدرولوژیکی حوضه داشته باشد (Sharafati et al., 2020). بر اساس پیش‌نگری‌های مدل‌های پنج‌مین دوره هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC¹)، با افزایش دما به میزان ۱/۴ درجه سانتی‌گراد، احتمال کاهش بارندگی در مدیترانه به میزان ۳۰ تا ۴۵ درصد وجود دارد (Zhai et al., 2018 ; Koutsovili et al., 2021)؛ بنابراین، در سال‌های آینده، انتظار فراوانی سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها در منطقه افزایش می‌یابد و این سبب تغییر در الگوهای اکولوژیکی و هیدرولوژیکی می‌شود (Tzoraki, 2020). تغییر اقلیم را نمی‌توان تنها به یک یا چند عامل خاص مرتبط دانست؛ بلکه تغییر اقلیم حاصل مجموعه‌ای از عوامل است (Bipal and Mrinmoy, 2010). با توجه به این که بسیاری از فرآیندهای فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی متقابلی بین طبیعت و انسان وجود دارد و این فرآیندها می‌توانند تحت تأثیر تغییر اقلیم، بر منابع طبیعی (منابع آب، جنگلی و...)، تنوع زیستی، خدمات اکوسیستم و گیاهان تأثیر گذاشته و به طور کلی، برخی از اثرات مثبت و منفی مانند تغییر رابطه بیوفیزیکی، کاهش زیستگاه‌ها، افزایش تبخیر و تعرق و دما، بیابان‌زایی و تغییر کلی در جهان طبیعی را به همراه داشته باشند، ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم در کشورهای در حال توسعه امری ضروری و مهم خواهد بود (Ali Amedie, 2013). در سال‌های اخیر، بسیاری از نهادها، اثرات تغییر اقلیم در توسعه برنامه‌های منطبق با کاهش خطرات طبیعی را در دستور کار خود قرار داده‌اند (Koutsovili et al., 2021)؛ بنابراین، برنامه‌ریزی مؤثر مستلزم بررسی سناریوهای تغییر اقلیم فعلی و پیش‌نگری شده است (Shrestha et al., 2017).

بر اساس نتایج IPCC، مدل‌های گردش کلی (GCMs²) ابزارهای پیشرفته‌ای هستند که در حال حاضر برای پیش‌نگری واکنش سیستم تغییر اقلیم جهانی به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در دسترس هستند. استفاده از GCMs مناسب‌ترین روش برای مطالعه پیامدهای تغییر اقلیم است (Wu et al., 2015). نسخه‌های گوناگونی از این مدل‌ها منتشر شده است که آخرین نسخه آن مدل‌های سری CMIP6 است که از عدم قطعیت پایین‌تر و وضوح بیشتری نسبت به مدل‌های قبل برخوردارند (Koutsovili et al., 2021). اگرچه GCMها ابزارهای بسیار مهمی برای مطالعه پیامدهای تغییر اقلیم هستند، اما در مقایسه با داده‌های مشاهده‌شده به دلیل سیستم‌های پارامترسازی و بزرگ‌بودن اندازه شبکه، نیاز به مقیاس‌کاهی دارند (Sharma et al., 2007). برای غلبه بر این مشکل، در چند دهه اخیر طیف وسیعی از تکنیک‌های مقیاس‌کاهی توسعه یافته‌اند که اغلب عبارت‌اند از: کاهش مقیاس دینامیکی (پویا)، آماری، رگرسیون، روش مبتنی بر الگوی آب‌وهوا و مولد آب‌وهوای تصادفی (Sunyer et al., 2015). متداول‌ترین روش‌ها، روش‌های مقیاس‌کاهی پویا و آماری هستند (Shrestha et al., 2017). مقیاس‌کاهی پویا مبتنی بر مدل‌های آب‌وهوای منطقه‌ای با وضوح بالا همراه با مشاهدات و برونداد مدل‌های اقلیمی مقیاس بزرگ‌تر با وضوح پایین‌تر است، در حالی که مقیاس‌کاهی آماری مبتنی بر توسعه و کاربرد روابط آماری بین پارامترهای آب‌وهوای محلی و پیش‌نگری‌کننده‌های بزرگ‌مقیاس است (Nourani et al., 2019 ; Sharafati et al., 2020). یکی از ابزارهای مقیاس‌کاهی برونداد این مدل‌ها به روش آماری، استفاده از مدل LARS-WG³ است. این مدل یک تولیدکننده پارامترهای هواشناسی است که برای پیش‌نگری بارندگی و احتمال وقوع آن از روش توزیع نیمه‌تجربی، برای مدل‌سازی دما از سری فوریه و برای مدل‌سازی تابش از روش توزیع نیمه‌تجربی استفاده می‌کند (Semenov & Barrow, 2002). مدل مذکور با استفاده از یک سری پارامترهای هواشناسی و مقیاس‌کاهی، پارامترهای هواشناسی را برای یک دوره زمانی در آینده، پیش‌نگری می‌نماید.

تاکنون پژوهش‌های متعددی در توانمندی مدل LARS-WG و پیش‌نگری تغییر اقلیم بر اساس GCMها، صورت گرفته که به برخی از آن‌ها اشاره می‌کنیم: در مطالعه‌ای (Almazroui et al., 2017)، به ارزیابی عدم قطعیت تغییرات دما و بارندگی پیش‌نگری شده به وسیله مدل‌های گزارش ارزیابی پنجم (AR5) تحت دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ در عربستان پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که دما در تمامی نقاط عربستان آهنگی افزایشی دارد در حالی که بارندگی در برخی نقاط دارای آهنگ افزایشی و در برخی دیگر

1. Intergovernmental Panel on Climate Change
2. Global Circulation Models
3. Long Ashton Research Station of the Weather Generator

آهنگ کاهشی را خواهد داشت. در پژوهشی (Mirakbari et al (2018)، به ارزیابی کارایی مدل CanESM2 در شبیه‌سازی و پیش‌نگری پارامترهای اقلیمی بارندگی، دما و سرعت باد در استان یزد پرداختند. آنان دریافتند که میانگین هر سه پارامتر در دوره آینده (۲۰۰۶-۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد به طوری که میانگین دما به میزان $(1/54^{\circ}\text{C})$ ، بارندگی به میزان $(4/8 \text{ mm})$ و سرعت باد نیز به میزان $(0/53 \text{ m/s})$ افزایش خواهد یافت. در پژوهشی (Izadi et al (2019) تغییر پارامترهای اقلیمی ایستگاه شهرکرد را با شبیه‌سازی تحت سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 به کمک مدل LARS-WG برای دوره‌های ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ مقیاس‌کاهی نمودند. نتایج با نشان‌دهنده ضریب تبیین به میزان $0/998$ ، $0/999$ و $0/994$ به ترتیب برای پارامترهای حداقل دما، حداکثر دما و بارندگی در شبیه‌سازی مدل LARS-WG، بیان‌گر توانایی بالای مدل بود. هم‌چنین نتایج حاصل از برونداد مدل در آینده نشان‌دهنده آهنگ افزایشی بارندگی، افزایش حداکثر و حداقل دما در تمامی سناریوها و ماه‌ها است. با این وجود حداکثر و حداقل دمای ماهانه به ترتیب به میزان $(3/62^{\circ}\text{C})$ و $(3/55^{\circ}\text{C})$ در دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ در سناریوی A1B افزایش می‌یابد. Fallah (2019) در تحقیقی با استفاده از مدل LARS-WG به ارزیابی تغییر اقلیم ایستگاه بجنورد طی دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۵۰ پرداختند. نتایج مدل نشان داد که تا سال ۲۰۵۰ با افزایش بارندگی، میزان آن در سناریوی B1 و A2 به ترتیب به ۲۵۸ و ۲۵۶ میلی‌متر در سال می‌رسد. حداقل و حداکثر دما در آینده آهنگ افزایشی دارد و بیشترین میزان افزایش حداقل دما مربوط به فصل زمستان در سناریوی A2 به میزان $(0/8^{\circ}\text{C})$ است. در مقاله‌ای (Babaian et al (2019) به پیش‌نگری فراسنج‌های اقلیمی کشور با به کارگیری تمام مدل‌های گردش کلی سری CMIP5 برای دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۰ پرداختند. آنان سال‌های ۲۰۰۵-۱۹۸۶ را به عنوان دوره پایه انتخاب کردند. نتایج نشان داد به استثنای سناریو خوش‌بینانه (RCP12.6) در سه سناریوی دیگر (RCP4.5, 6, 8.5) میانگین بارندگی از مدیترانه تا افغانستان کاهش می‌یابد. با کاهش بارندگی و افزایش دما در آینده، مناطق غرب کشور به ویژه زاگرس در معرض خشکسالی و تنش آبی قرار می‌گیرد. (Koutsovili et al (2021) در پژوهشی به ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی رودخانه کالونی در یونان با استفاده از مدل HEC-HMS² از سری CMIP6 و سیستم LARS-WG6.0 تحت سه سناریو پرداختند. نتایج عملکرد LARS-WG6.0 در شبیه‌سازی دما و بارندگی، به ترتیب ضریب تبیین به میزان $0/997$ و $0/983$ را ارائه داد، هم‌چنین نتایج، آهنگ افزایشی تغییرات در پیش‌نگری فصلی و سالانه میانگین دبی‌های بلندمدت در پاییز و آهنگ کاهشی در تابستان، و تلفات تبخیر و ترق واقعی با آهنگ افزایشی را نشان داد. (Kazemi and Khazaei (2022) در پژوهشی به پیش‌نگری تغییر اقلیم تهران و یزد برای دوره ۲۰۶۵-۲۰۳۶ توسط مدل LARS-WG پرداختند. نتایج نشان داد که دمای تهران و یزد در آینده افزایش می‌یابد و تغییرات بارندگی در ماه‌های مختلف متفاوت است ولی میزان بارندگی سالانه در تهران بین 40% - 20% و در یزد بین 43% - 49% افزایش می‌یابد. (Arab solghar (2022) در پژوهشی، تغییر اقلیم حوضه آبریز رودخانه دز را با استفاده از مدل‌های SDSM و LARS-WG پیش‌نگری کردند. نتایج نشان داد که در شبیه‌سازی تغییر اقلیمی در حوضه، هر دو مدل از دقت مناسبی برخوردارند. در دوره‌های آینده میزان بارندگی در سطح حوضه بین $6/3\%$ تا $15/7\%$ درصد نسبت به دوره پایه تغییر می‌کند. هم‌چنین حداکثر دما بین $1/3$ - $3/9$ و حداقل دما بین $1/5$ تا $3/5$ درجه سانتی‌گراد در نوسان خواهد بود. در مطالعه‌ای (Hejazi et al (2022)، با پیش‌نگری عناصر اقلیمی توسط مدل SDSM و سه سناریوی واداشت‌تابشی در ایستگاه اهر در حوضه آبخیز حاجیلر، به این نتیجه دست یافتند که در آینده، دما تا $(1/56^{\circ}\text{C})$ افزایش و بارندگی در فصل بهار بین ۵ تا ۱۴ میلی‌متر کاهش روبه‌رو است. Goodarzi and Fatehifar (2022)، تأثیر تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی در دوره ۲۰۵۹-۲۰۳۰ را با استفاده از مدل CanESM2 و سه سناریوی جدید انتشار در حوضه آبخیز آذرشهر در شمال غرب ایران، مورد پژوهش قرار دادند. بر اساس نتایج به‌دست آمده در این دوره دما افزایش و بارندگی در برخی نقاط کاهش و افزایش می‌یابد.

پیش‌نگری آینده مبتنی بر سناریوهای افزایش دما و تأثیر آن بر سیستم‌های طبیعی، سبب توجه جدی به مقوله تغییر اقلیم و مدیریت روش‌هایی در راستای کاهش پیامدهای ناشی از آن شده است. به دلیل قرار گرفتن استان یزد در مرکز ایران همراه با افزایش جمعیت، کمبود آب، خشکسالی‌های پیاپی در چند دهه گذشته و گسترش پدیده بیابان‌زایی، در این تحقیق با توجه به مدل‌های رایج برآورد، شبیه‌ساز و پیش‌نگری‌کننده، مبادرت به بررسی تغییر اقلیم در این پهنه جغرافیایی شد و عناصر اقلیمی با استفاده از مدل‌های CMIP5 تحت سه سناریوی واداشت‌تابشی در آینده مقیاس‌کاهی و نتایج حاصل مورد ارزیابی قرار گرفت.

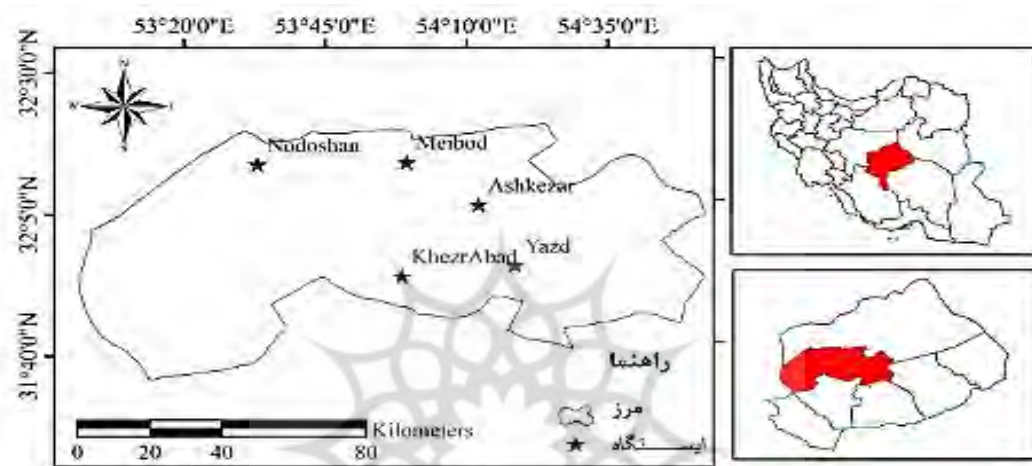
1. Representative Concentration Pathway

2. Hydrologic Modeling System developed by the Hydrologic Engineering Center

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان یزد در مرکز ایران با مساحت ۷۴۶۵۰ کیلومتر مربع، بین عرض‌های جغرافیایی ۳۰ تا ۳۳ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۲ تا ۵۶ درجه شرقی واقع شده است. جهت بررسی عناصر اقلیمی، از پارامترهای روزانه بارندگی، حداقل و حداکثر دمای پنج ایستگاه هواشناسی با دوره آماری بیست‌ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۰) استفاده شده است. در این دوره در شهر یزد میانگین بلندمدت بارندگی ۴۷/۵۷ میلی‌متر، حداکثر و حداقل مطلق دما نیز به ترتیب $(^{\circ}\text{C})$ ۴۲/۹ و ۱۰/۸- است. ارتفاع منطقه پژوهشی از غرب به شرق کاهش می‌یابد. موقعیت منطقه پژوهشی و ایستگاه‌های مورد بررسی در شکل ۱ و مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه پژوهشی و ایستگاه‌های مورد بررسی

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی

ردیف	نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	میانگین دما ($^{\circ}\text{C}$)	بارندگی (mm)
۱	یزد	سینوپتیک	۵۴° ۱۷' ۳۹"	۳۱° ۵۴' ۲۷"	۱۲۳۷	۲۰/۷۲	۴۷/۵۸
۲	اشکذر	کلیماتولوژی	۵۴° ۱۱' ۳۳"	۳۲° ۰۵' ۳۸"	۱۱۴۰	۱۹/۶۶	۴۸/۸۲
۳	خضرآباد	کلیماتولوژی	۵۳° ۵۷' ۵۳"	۳۱° ۵۳' ۰۳"	۱۷۳۲	۱۸/۵۷	۹۳/۸۲
۴	میبد	سینوپتیک	۵۳° ۵۸' ۵۳"	۳۳° ۱۳' ۱۰"	۱۱۱۶	۱۹/۶۶	۵۲/۳۱
۵	ندوشن	کلیماتولوژی	۵۳° ۳۲' ۵۰"	۳۳° ۱۳' ۲۷"	۱۹۹۴	۱۴/۸۵	۸۱/۳۷

۲-۲- روش پژوهش

در این پژوهش جهت مقیاس‌کاهی آماری داده‌های چهار مدل GCM از سری CMIP5 که دارای سناریوهای وادشت تابشی RCP2.6، RCP4.5، RCP8.8 و از مدل LARS-WG6 که یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هوا است، استفاده شده است (جدول ۲). تولید داده توسط مدل LARS-WG6 در سه مرحله انجام می‌گیرد که عبارت‌اند از کالیبره کردن، ارزیابی و تولید پارامترهای هواسنجی برای دوره آینده. بر این اساس برای اجرای این مدل در پژوهش حاضر، ابتدا دوره آماری بیست‌ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۰) به عنوان دوره آماری پایه و مشترک در نظر گرفته شد، سپس پارامترهای روزانه موردنیاز مدل شامل پارامترهای بارندگی، حداقل و حداکثر دمای ۵ ایستگاه هواشناسی نام‌برده شده در جدول بالا در این دوره آماری از اداره هواشناسی

یزد تهیه شد. پس از پردازش و مرتب‌سازی پارامترها و تهیه پرونده‌های ورودی، شبیه‌سازی مدل برای دوره پایه اجرا شد و بدین ترتیب مرحله کالیبره کردن صورت گرفت.

جدول ۲. ویژگی‌های چهار مدل GCM-CMIP5 مورد استفاده در پژوهش (Semenov et al., 2010)

شماره	مرکز تحقیقات	کشور	GCM-CMIP5	قدرت تفکیک
۱	Beijing Climate Center	China	BCC-CSM1-1	$1.277^\circ \times 2.81^\circ$
۲	uu aaaiaao ooo monee atth Scnnniinnn nn Indullllll	Australia	CSIRO-MK36	$1.85^\circ \times 1.88^\circ$
۳	UK Meteorological Office	UK	HadGEM	$1.25^\circ \times 1.88^\circ$
۴	Norwegian Climate Centre	Norway	NorESM1-M	$1.90^\circ \times 2.50^\circ$

در مرحله بعد، جهت ارزیابی پارامترها، از چندین آمار خطا شامل ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده ($NRMSE^1$) و میانگین خطای مطلق (MAE^2) استفاده شد. سپس پارامترهای تولید شده به وسیله مدل با پارامترهای واقعی در دوره پایه مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(E_i - \bar{E}_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 (E_i - \bar{E}_i)^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{n}} / O_i - E_i \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - E_i| \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در این روابط؛ O_i : مقادیر دوره پایه (۲۰۰۱-۲۰۲۰)؛ E_i : مقادیر دوره شبیه‌سازی شده؛ n : تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی؛ O_{min} و O_{max} : حداکثر و حداقل مقادیر دوره پایه است. ضریب تبیین نشان‌دهنده میزان ارتباط مقادیر شبیه‌سازی شده از مدل با مقادیر پایه است. سایر آماره‌های خطا، هر چه به صفر نزدیک‌تر باشند، مشخص می‌شود که مدل، مقادیر شبیه‌سازی شده را خوب برآورد کرده و انحراف کمتری با مقادیر پایه دارد.

پس از بررسی نتایج مرحله ارزیابی و اطمینان از توانایی مدل LARS-WG6 در شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی، این مدل جهت شبیه‌سازی داده‌های چهار مدل GCM از سری CMIP5 ارائه‌شده در جدول ۲، و تولید داده‌های مصنوعی برای دوره پایه، با استفاده از سه سناریوی واداشت‌تابشی یعنی RCP2.6، RCP4.5، و RCP8.5 (به ترتیب خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه) تأیید شده توسط IPCC اجرا شد. سپس با استفاده از آماره‌های خطا (R^2 ، $NRMSE$ و MAE) به شرح جدول ۵، اقدام به ارزیابی مقادیر پارامترهای تولید شده توسط مدل‌های مورد پژوهش و پارامترهای مشاهداتی در دوره پایه شد تا توانایی مدل‌ها در شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی در ایستگاه‌های مورد بررسی، ارزیابی و بهترین مدل در منطقه مطالعاتی برای پیش‌نگری پارامترهای اقلیمی آینده مشخص گردد. در نهایت از برون‌داد بهترین مدل‌ها، بر اساس هر سه سناریوی تغییر اقلیم ذکر شده، مجموع ماهانه و سالانه پارامترهای بارندگی و میانگین دما برای دو دوره زمانی به نام‌های دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۵ (آینده نزدیک) و دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ (آینده دور) به دست می‌آید. خصوصیات سه سناریوی ذکر شده در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۳. خصوصیات سناریوهای تغییر اقلیم (Ashraf et al., 2011)

سناریو	خصوصیات سناریوهای تغییر اقلیم
RCP 2.6	همگرایی جمعیت در سطح جهان، تغییر در ساختار اقتصاد (کاهش مواد آلاینده و معرفی منابع فناوری پاک و مؤثر)
RCP 4.5	رشد سریع جمعیت جهان، اقتصاد ناهمگن و همسو با شرایط اقتصادی در سراسر جهان
RCP 8.5	رشد سریع اقتصادی، بیشینه رشد جمعیت در نیمه قرن و پس از آن روند کاهشی، رشد سریع فناوری‌های نوین و مؤثر

1. Normalisation of Root Mean Square Error

2. Mean Absolute Error

۳- یافته‌های تحقیق

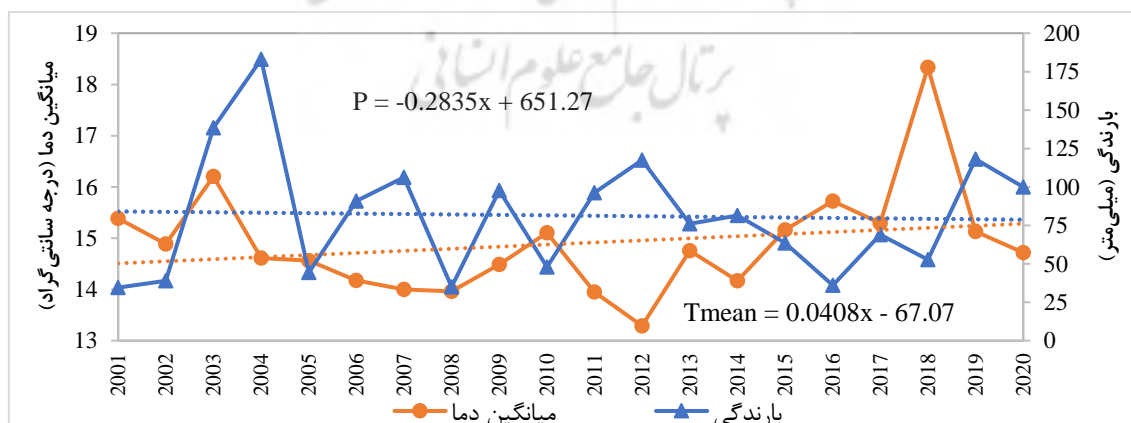
۳-۱- ارزیابی

ارزیابی عملکرد LARS-WG6 در شبیه‌سازی پارامترهای ماهانه بارندگی و میانگین دما در دوره پایه (۲۰۲۰-۲۰۰۱) در ایستگاه‌های منتخب در جدول شماره ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج این جدول، ضریب تبیین برای پارامتر میانگین دما در تمام ایستگاه‌ها بیشتر از ۰/۹۹۱ است که این نشان می‌دهد شبیه‌سازی پارامتر مذکور کامل است و عملکرد عالی مدل LARS-WG6 را در پیش‌نگری این پارامتر نشان می‌دهد. همچنین می‌توان به این نکته اشاره کرد که مدل نسبت به میانگین بارندگی در تمام ایستگاه‌ها بسیار خوب ولی ضعیف‌تر از پارامتر میانگین دما عمل کرده است، به طوری که ضریب تبیین بین ۰/۹۶-۰/۸۷ را داراست. میزان NRMSE در پارامتر بارندگی بین ۱۶/۱۴-۹/۸۸ افزایش یافته است این در حالی است که میزان این خطا در میانگین دما نزدیک یک درصد است. MAE در بارندگی محدوده‌ای بین ۰/۷۰-۱/۴۵ را شامل می‌شود که کمترین و بیشترین میزان آن به ترتیب مربوط به ایستگاه اشکذر و خضرآباد است. این در حالی است که میزان MAE در مورد پارامتر دیگر کمتر از ۰/۲۵ است.

جدول ۴. نتایج ارزیابی مدل LARS-WG برای بارندگی و میانگین دمای ماهانه در دوره پایه در هر ایستگاه

میانگین دما			بارندگی			نام ایستگاه
MAE	NRMSE%	R2	MAE	NRMSE%	R2	
۰/۱۹	۰/۹۰	۰/۹۹۴	۰/۸۳	۱۶/۱۴	۰/۸۷	یزد
۰/۲۵	۱/۳۷	۰/۹۹۱	۰/۷۰	۱۰/۷۹	۰/۹۱	اشکذر
۰/۱۵	۰/۸۱	۰/۹۹۵	۱/۴۵	۱۰/۴۲	۰/۹۳	خضرآباد
۰/۱۹	۰/۸۹	۰/۹۹۳	۰/۷۲	۹/۸۹	۰/۹۵	میبد
۰/۱۸	۰/۸۸	۰/۹۹۴	۰/۸۹	۹/۸۸	۰/۹۶	ندوشن

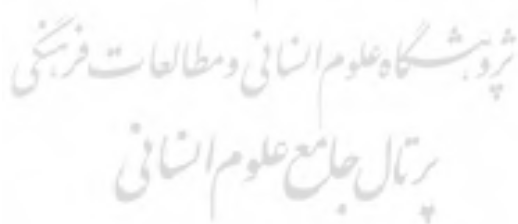
شکل ۲ بررسی روند پارامترهای اقلیمی در دوره پایه در ایستگاه ندوشن را با نمودار آمپروترمیک نشان می‌دهد. با توجه به نتایج شکل ۲ و شیب خط برازش داده شده روی نمودار، مشاهده می‌شود که میانگین دما در دوره پایه آهنگی افزایشی داشته است. ولی با توجه به نمودار بارندگی، مشاهده می‌شود که بارندگی در دوره پایه دارای شیب نزولی است. علامت منفی به دست آمده بر روی نمودار گویای همین مطلب است که در سال‌های اخیر بارندگی در ایستگاه ندوشن کاهش یافته است و این با نتایج به دست آمده از جدول شماره ۴ نیز منطبق است.



شکل ۲. نمودار آمپروترمیک نتایج حاصل از بررسی آهنگ پارامترها در دوره پایه

اولین گام در تجزیه و تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر هیدرولوژی منطقه مطالعاتی، تجزیه و تحلیل پارامترهای بارندگی (P^1) و میانگین دما (T_{mean}^2) است. در جدول ۵، نتایج برآورد آماره‌های ارزیابی در پارامترهای شبیه‌سازی شده در هر چهار مدل تحت سه سناریوی واداشت‌تابشی (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) با پارامترهای مشاهداتی در دوره پایه، در تمامی ایستگاه‌ها به صورت خلاصه آورده شده است. برای انتخاب بهترین مدل در پیش‌نگری پارامترها در آینده، اولویت با مدل‌هایی با مقادیر NRMSE کمتر است. در پارامتر میانگین دما در تمامی ایستگاه‌ها میزان ضریب تبیین بین ۰/۹۹۷-۰/۹۳۲ است. از مقایسه سناریوها در مدل‌ها مشخص می‌شود که میانگین دما در سناریوی واداشت‌تابشی بدبینانه (RCP8.5) و مدل HadGEM2-ES در ایستگاه اشکذر بیشترین میزان خطا را دارد به طوری که میزان NRMSE آن به ۱۰٪ می‌رسد. در سایر مدل‌ها و تمامی ایستگاه‌ها به غیر از اشکذر، $NRMSE \leq 4\%$ و قابل قبول است؛ بنابراین به ترتیب مدل‌های BCC-CSM1-1، NorESM1-M، و CSIRO-MK36 در هر سه سناریو در تمامی ایستگاه‌ها با داشتن کمترین میزان خطا، به عنوان بهترین مدل در پیش‌نگری پارامتر میانگین دما انتخاب می‌گردند.

میزان آماره‌های خطا در ارزیابی پارامتر بارندگی نسبت به میانگین دما متفاوت هست. ضریب تبیین (R^2)، محدوده‌ای بین ۰/۶۷-۰/۳۹ را شامل می‌شود. بیشترین آماره خطا مربوط به مدل HadGEM2-ES در ایستگاه میبد و سناریوی واداشت‌تابشی میانه است به طوری که میزان NRMSE و MAE آن به ترتیب به میزان ۵۶٪ و ۲/۷۰ رسیده است. در ایستگاه ندوشن و اشکذر تمامی مدل‌ها با داشتن NRMSE مناسب و کمتر از ۳۰٪، در پیش‌نگری بارندگی در دوره‌های آینده مناسب هستند. بیشترین میزان NRMSE در مدل CSIRO-MK36، مربوط به ایستگاه میبد در سناریوی واداشت‌تابشی میانه و مساوی با ۵۱٪ است. بر اساس مقادیر جدول ۵ و آماره‌های خطای ارزیابی شده، مدل BCC-CSM1-1 و مدل NorESM1-M به ترتیب با دارا بودن $NRMSE \leq 39\%$ و $NRMSE \leq 44\%$ ، مقادیر نزدیک‌تر به پارامترهای ایستگاه‌های هواشنجی منطقه را مشخص می‌کنند و بیشتر می‌توان به نتایج این دو مدل اطمینان کرد، بنابراین به عنوان اولین و دومین مدل در پیش‌نگری بارندگی در منطقه مطالعاتی شناخته می‌شوند (جدول ۵).



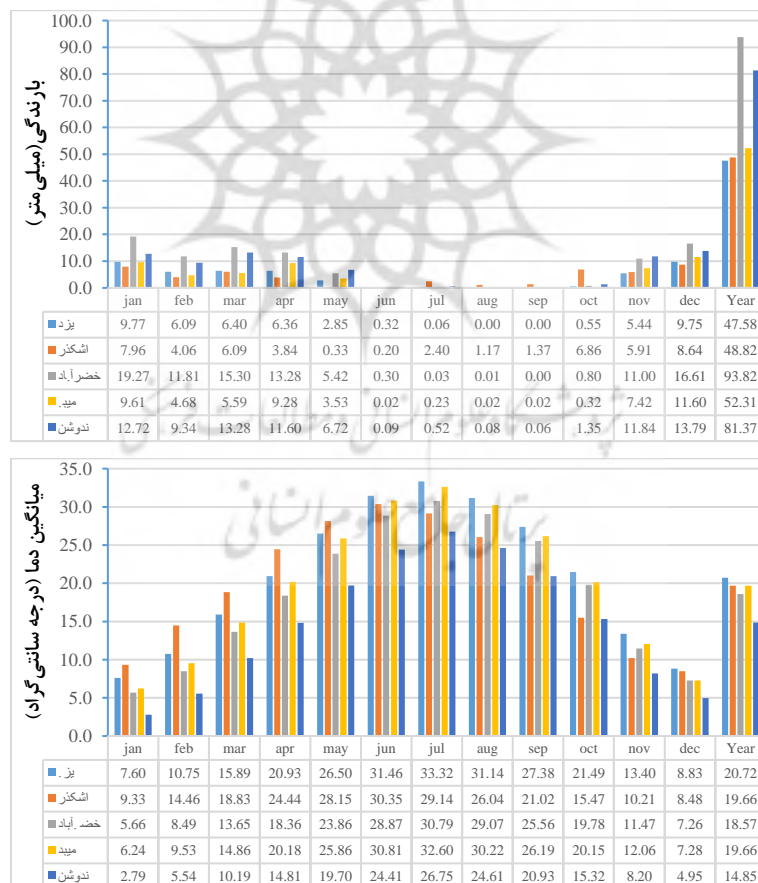
جدول ۵. نتایج ارزیابی آماره‌های خطای پارامترهای شبیه‌سازی شده با پارامترهای مشاهداتی در دوره پایه

پارامتر	ایستگاه سناریو	ندوشن			اشکذر			میبد			خضرآباد			یزد			
		GCM	RCP	NRMSE%	MAE	R2	NRMSE%	MAE	R2	NRMSE%	MAE	R2	NRMSE%	MAE	R2	NRMSE%	MAE
میانگین دما	BCC-CSM1-1	۲/۶	۲	۰/۴۵	۰/۹۹۵	۹	۱/۶۲	۰/۹۳۹	۲	۰/۳۶	۰/۹۹۷	۳	۰/۶۴	۰/۹۹۶	۲	۰/۳۹	۰/۹۹۷
	CSIRO-MK36	۲/۶	۳	۰/۵۳	۰/۹۹۹	۹	۱/۶۲	۰/۹۴۲	۲	۰/۴۵	۰/۹۹۷	۴	۰/۷۸	۰/۹۹۵	۲	۰/۴۹	۰/۹۹۷
	NorESM1-M	۲/۶	۳	۰/۴۸	۰/۹۹۴	۹	۱/۶۳	۰/۹۳۹	۲	۰/۳۸	۰/۹۹۷	۳	۰/۶۰	۰/۹۹۵	۲	۰/۳۸	۰/۹۹۷
	HadGEM2-ES	۲/۶	۳	۰/۵۳	۰/۹۹۵	۹	۱/۶۲	۰/۹۳۷	۳	۰/۵۰	۰/۹۹۶	۴	۰/۷۵	۰/۹۹۵	۲	۰/۴۹	۰/۹۹۶
	BCC-CSM1-1	۴/۵	۳	۰/۴۴	۰/۹۹۵	۹	۱/۶۴	۰/۹۴۲	۲	۰/۳۹	۰/۹۹۷	۳	۰/۶۷	۰/۹۹۶	۲	۰/۴۲	۰/۹۹۷
	CSIRO-MK36	۴/۵	۳	۰/۵۳	۰/۹۹۹	۹	۱/۵۹	۰/۹۴۵	۲	۰/۴۵	۰/۹۹۶	۳	۰/۷۳	۰/۹۹۵	۲	۰/۴۶	۰/۹۹۷
	NorESM1-M	۴/۵	۳	۰/۴۹	۰/۹۹۵	۹	۱/۶۵	۰/۹۳۹	۲	۰/۳۸	۰/۹۹۷	۳	۰/۶۸	۰/۹۹۶	۲	۰/۳۹	۰/۹۹۷
	HadGEM2-ES	۴/۵	۳	۰/۵۶	۰/۹۹۵	۹	۱/۶۳	۰/۹۳۷	۳	۰/۵۱	۰/۹۹۶	۴	۰/۸۰	۰/۹۹۶	۲	۰/۴۸	۰/۹۹۶
	BCC-CSM1-1	۸/۵	۲	۰/۴۶	۰/۹۹۶	۹	۱/۶۶	۰/۹۴۱	۲	۰/۴۲	۰/۹۹۷	۳	۰/۶۸	۰/۹۹۷	۲	۰/۴۲	۰/۹۹۷
	CSIRO-MK36	۸/۵	۳	۰/۵۵	۰/۹۹۴	۹	۱/۶۸	۰/۹۴۴	۲	۰/۴۲	۰/۹۹۷	۳	۰/۷۴	۰/۹۹۵	۲	۰/۴۶	۰/۹۹۷
	NorESM1-M	۸/۵	۳	۰/۵۱	۰/۹۹۵	۹	۱/۶۶	۰/۹۴۲	۲	۰/۳۹	۰/۹۹۷	۳	۰/۷۰	۰/۹۹۶	۲	۰/۴۳	۰/۹۹۷
	HadGEM2-ES	۸/۵	۳	۰/۶۲	۰/۹۹۴	۱۰	۱/۷۶	۰/۹۳۲	۳	۰/۵۴	۰/۹۹۶	۴	۰/۸۷	۰/۹۹۶	۳	۰/۵۳	۰/۹۹۵
بارندگی	BCC-CSM1-1	۲/۶	۲۳	۲/۲۸	۰/۶۲	۲۸	۲/۲۳	۰/۴۶	۳۹	۲/۳۴	۰/۴۹	۳۴	۴/۰۹	۰/۵۶	۳۹	۲/۳۱	۰/۵۰
	CSIRO-MK36	۲/۶	۲۴	۲/۳۴	۰/۶۰	۲۸	۲/۲۶	۰/۴۵	۴۴	۲/۱۳	۰/۵۰	۳۳	۳/۹۱	۰/۵۵	۳۹	۲/۲۹	۰/۵۰
	NorESM1-M	۲/۶	۲۴	۲/۴۰	۰/۵۹	۲۸	۲/۳۷	۰/۴۴	۴۴	۲/۲۶	۰/۵۴	۳۶	۴/۱۴	۰/۵۱	۴۲	۲/۴۵	۰/۴۶
	HadGEM2-ES	۲/۶	۲۲	۲/۳۲	۰/۶۴	۳۰	۲/۴۳	۰/۴۴	۵۰	۲/۷۸	۰/۳۹	۳۶	۴/۱۸	۰/۵۳	۴۶	۲/۶۰	۰/۵۱
	BCC-CSM1-1	۴/۵	۲۲	۲/۱۹	۰/۶۵	۳۷	۲/۲۵	۰/۴۸	۳۹	۲/۲۲	۰/۵۰	۳۳	۴/۰۳	۰/۵۶	۳۹	۲/۳۵	۰/۵۲
	CSIRO-MK36	۴/۵	۲۳	۲/۴۴	۰/۶۱	۳۰	۲/۵۵	۰/۴۲	۵۱	۲/۶۶	۰/۴۲	۳۷	۴/۲۵	۰/۵۰	۴۷	۲/۶۲	۰/۴۳
	NorESM1-M	۴/۵	۲۴	۲۰/۳	۰/۶۱	۲۷	۲/۱۸	۰/۴۶	۴۳	۲/۱۷	۰/۴۹	۳۳	۳/۹۱	۰/۵۴	۳۹	۲/۳۴	۰/۴۸
	HadGEM2-ES	۴/۵	۲۱	۲/۳۰	۰/۶۷	۲۹	۲/۴۲	۰/۴۸	۵۶	۲/۷۰	۰/۴۲	۳۶	۴/۱۶	۰/۵۵	۴۷	۲/۶۴	۰/۴۹
	BCC-CSM1-1	۸/۵	۲۲	۲/۱۶	۰/۶۷	۳۷	۲/۱۹	۰/۴۹	۳۹	۲/۲۲	۰/۵۴	۳۳	۳/۹۶	۰/۵۶	۳۹	۲/۳۵	۰/۵۲
	CSIRO-MK36	۸/۵	۲۴	۲/۳۷	۰/۶۲	۳۷	۲/۲۸	۰/۴۷	۴۵	۲/۲۲	۰/۴۹	۳۳	۳/۷۰	۰/۵۴	۴۰	۲/۳۷	۰/۴۸
	NorESM1-M	۸/۵	۲۵	۲/۳۷	۰/۶۰	۲۶	۲/۲۰	۰/۴۹	۴۳	۲/۱۷	۰/۴۷	۳۴	۳/۹۴	۰/۵۲	۳۹	۲/۳۹	۰/۴۷
	HadGEM2-ES	۸/۵	۲۳	۲/۴۱	۰/۶۰	۳۷	۲/۲۳	۰/۴۸	۴۵	۲/۲۶	۰/۵۰	۳۵	۴/۲۲	۰/۵۴	۴۲	۲/۴۰	۰/۴۹

با توجه به این که مدل BCC-CSM1-1 و NorESM1-M با دارا بودن کمترین آمار خطا در هر دو پارامتر بارندگی و میانگین دما، به عنوان اولین و دومین مدل در پیش‌نگری پارامترهای اقلیمی در منطقه مطالعاتی معرفی شده‌اند، در ادامه نتایج تغییرات ماهانه و سالانه پارامترهای مذکور برای تمامی ایستگاه‌ها در دوره‌های آینده تنها بر اساس دو مدل CMIP5 ذکر شده، ارائه شده است.

۳-۲- دوره پایه

میانگین دما در دوره پایه بین ایستگاه‌های مختلف دارای نوسان کم و ناچیزی است. کمترین میزان میانگین دما در تمامی ایستگاه‌ها مربوط به ماه‌های زمستان (ژانویه - مارس) و پائیز (نوامبر و دسامبر)، و بیشترین میزان، مربوط به ماه‌های فصل تابستان (ژوئن، جولای و اگوست) است؛ بنابراین در دوره پایه آهنگ تغییرات میانگین دمای تمامی ایستگاه‌ها در ماه‌های ژانویه تا جولای افزایشی و پس از آن آهنگ نزولی را داراست. کمترین میزان میانگین دمای ماهانه و سالانه مربوط به ایستگاه ندوشن به ترتیب به میزان ۲/۷۹ و ۱۴/۸۵ درجه سانتی‌گراد و بیشترین میزان مربوط به ایستگاه یزد به ترتیب به میزان ۳۳/۳۲ و ۲۰/۷۲ درجه سانتی‌گراد است. با این که بارندگی در پهنه مطالعاتی یزد تغییرات قابل ملاحظه‌ای ندارد، در دوره پایه آهنگ تغییرات ماهانه بارندگی تمامی ایستگاه‌ها در ماه‌های ژانویه تا آوریل به صورت صعودی، از ژوئن تا سپتامبر نزولی و پس از آن دوباره آهنگ صعودی را نشان می‌دهد. اوج بارندگی از ژانویه به دسامبر تغییر می‌کند، به طوری که بالاترین میزان بارندگی در ایستگاه خضرآباد در ماه‌های ژانویه و دسامبر به ترتیب به میزان (mm) ۱۹/۲۷ و ۱۶/۶۱ است. در تمامی ایستگاه‌ها در فصل تابستان بارندگی بسیار ناچیز و کمتر از (mm) ۲/۴۰ است. ایستگاه‌های خضرآباد و ندوشن به دلیل کوهستانی بودن و ویژگی‌های اقلیمی به ترتیب بالاترین میزان بارندگی سالانه را دارا هستند (شکل ۳).



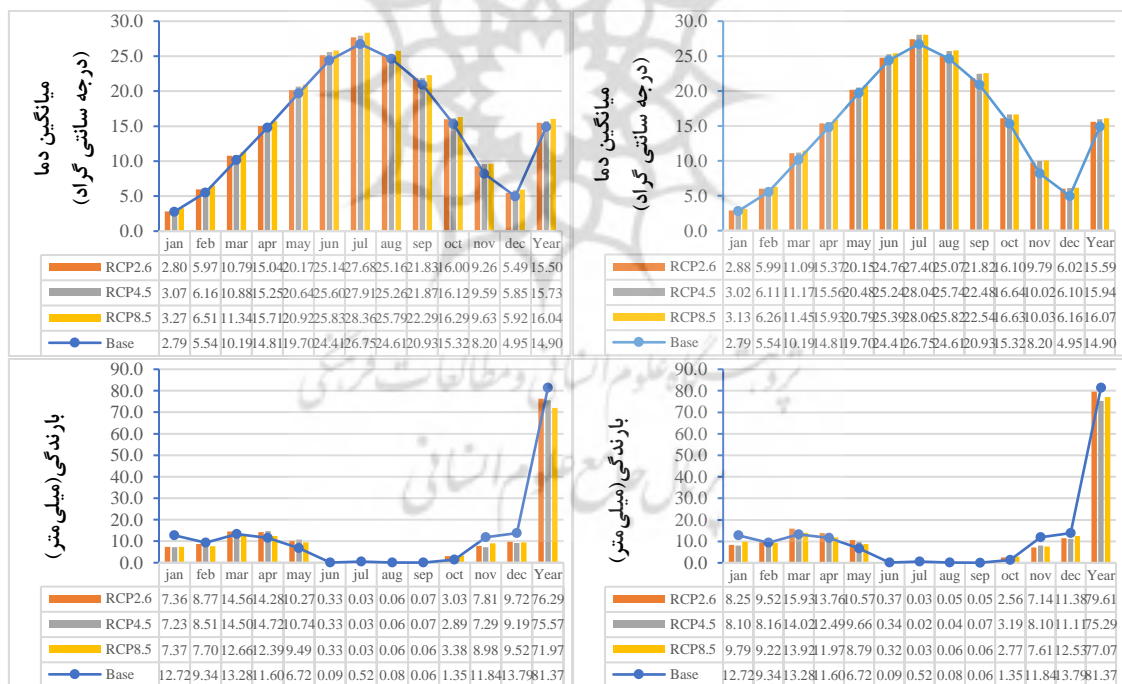
شکل ۳. مقادیر ماهانه و سالانه میانگین دما و بارندگی تمامی ایستگاه‌ها در دوره پایه

با توجه به این که تغییرات مقادیر میانگین دما و بارندگی در دوره‌های آینده از آهنگی شبیه به دوره پایه پیروی می‌کنند و به دلیل محدودیت در تعداد صفحات، نتایج مقادیر ماهانه و سالانه پارامترهای مقیاس‌کاهی شده توسط دو مدل در آینده نسبت به دوره پایه، تنها برای ایستگاه ندوشن به عنوان نمونه آورده شده است و تنها برون‌دادهای مربوط به میزان تغییر پارامترهای اقلیمی در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه برای تمامی ایستگاه‌ها در قالب نمودار آورده شده است.

۳-۳- دوره ۲۰۵۵-۲۰۲۶ (آینده نزدیک)

در ایستگاه ندوشن در مقادیر میانگین دمای ماهانه و سالانه دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۵، تغییر منظم و افزایشی نسبت به دوره پایه در هر دو مدل وجود دارد و از مقایسه سناریوهای واداشت‌تابشی در مدل‌ها مشخص شد که Tmean در RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب کمترین و بیشترین تغییر را در طی دوره آینده نزدیک خواهد داشت (شکل ۴). با این که مقادیر Tmean در هر دو مدل خیلی مشابه است؛ ولی مدل NorESM1-M مقادیر ماهانه و سالانه را کمی بیشتر از مدل BCC-CSM1-1 پیش‌نگری کرده است. بیشترین و کمترین میزان Tmean به ترتیب مربوط به ماه‌های جولای و ژانویه است.

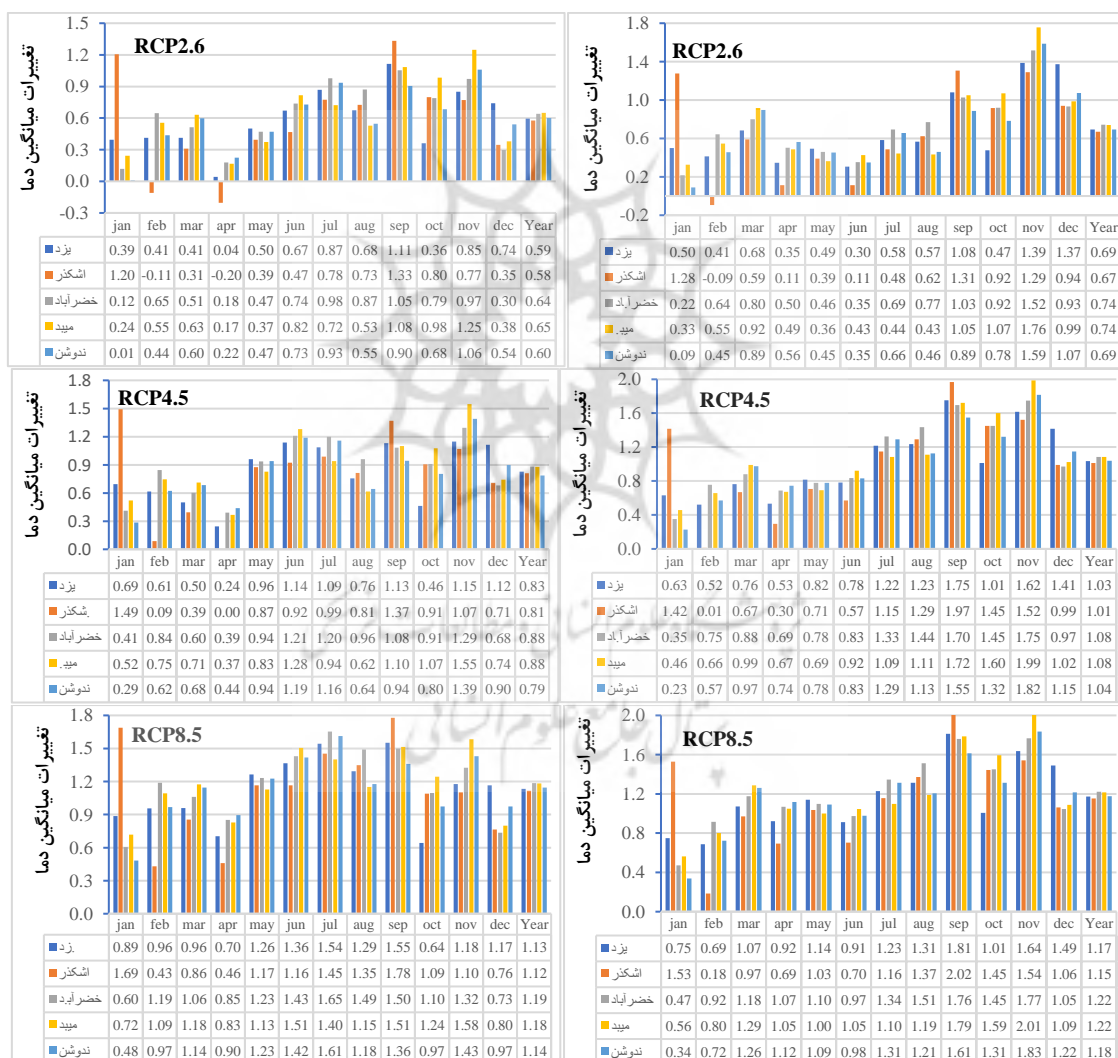
همچنین نتایج شکل ۴ حاکی از آن است که بارندگی در دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۵ در اکثر ماه‌های سال به غیر از ماه‌های مارس، آوریل، می و اکتبر، نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. در ماه‌های ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر، بارندگی وجود ندارد. بارندگی سالانه ایستگاه ندوشن در هر دو مدل و هر سه سناریوی واداشت‌تابشی نسبت به دوره پایه در آینده نزدیک کاهش می‌یابد، با این وجود، مدل BCCC-CSM1-1 و NorESM1-M در دو سناریو از سه سناریوی انتخابی (RCP4.5 و RCP8.5) کاهش بارندگی بیشتری را برآورد می‌کنند. در هر دو مدل، بارندگی سالانه در سناریوی ۲/۶ که از خوش‌بینانه‌ترین سناریوهاست بیشتر از دو سناریوی دیگر است.



شکل ۴. مقادیر ماهانه و سالانه میانگین دما و بارندگی شده ایستگاه ندوشن با مدل BCC-CSM1-1 (سمت چپ) و مدل NorESM1-M (سمت راست) نسبت به دوره پایه (Base) در سه سناریوی واداشت‌تابشی (RCP8.5, 4.5, 2.6) در آینده نزدیک

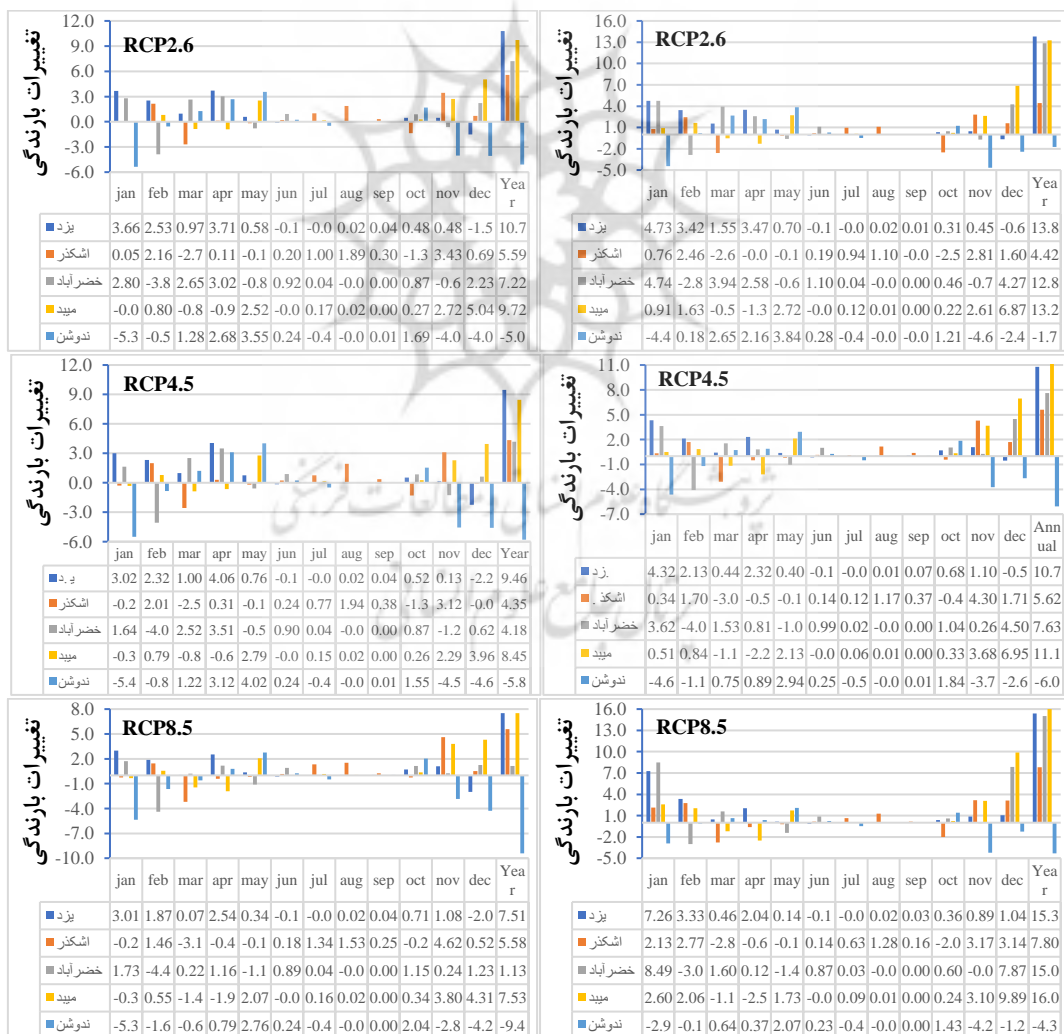
تغییرات ماهانه و سالانه میانگین دما و بارندگی پیش‌نگری شده تمام ایستگاه‌ها با دو مدل BCC-CSM1-1 و NorESM1-M نسبت به دوره پایه برای سه سناریوی واداشت‌تابشی (RCP8.5، RCP4.5، RCP2.6) در آینده نزدیک در شکل ۵ و ۶ خلاصه شده است. تنها در سناریوی واداشت‌تابشی خوش‌بینانه تغییرات فاحشی بین مقادیر دما در دوره پایه با آینده نزدیک وجود ندارد و

بیشترین میزان تغییرات در سناریوی واداشت تابشی بدینانه صورت می‌گیرد (شکل ۵). تمامی ایستگاه‌ها در هر دو مدل در همه ماه‌ها و هر سه سناریو، دارای تغییرات میانگین دما صعودی هستند و تنها ایستگاه اشکذر در سناریوی واداشت تابشی خوش‌بینانه در هر دو مدل در ماه فوریه و در مدل BCC-CSM1-1 در ماه آوریل، میانگین دما را به اندازه 0.2°C کمتر از دوره پایه برآورد کرده است که این میزان بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است. با این وجود مدل NorESM1-M افزایش سالانه دمای بیشتری را نسبت به مدل BCC-CSM1-1 در هر سه سناریو پیش‌نگری کرده است. با این‌که در دوره‌های آینده نیز مانند دوره پایه بیشترین میزان میانگین دما مربوط به فصل تابستان و ماه جولای است؛ ولی در آینده نزدیک بیشترین میزان تغییرات میانگین دما مربوط به ماه‌های نوامبر و سپتامبر است. میزان ماهانه تغییرات میانگین دما در آینده نزدیک از -0.20 تا $+1.76$ برای RCP2.6، از 0.00 تا $+1.99$ در RCP4.5 و از $+0.43$ تا $+2.01$ در RCP8.5 متغیر است. به طوری‌که این کمترین و بیشترین مقادیر موجود در هر سناریو به ترتیب مربوط به اشکذر در ماه آوریل و میبد در ماه نوامبر است. هر دو مدل در تمامی سناریوها در ماه ژانویه، میانگین دما در ایستگاه اشکذر را بیشتر از سایر ایستگاه‌ها برآورد کرده‌اند. تغییرات میانگین دمای سالانه تمامی ایستگاه‌ها بر اساس هر دو مدل و هر سه سناریوی واداشت تابشی، بسیار مشابه، نزدیک به یکدیگر و افزایشی است و میزان این تغییرات در سناریوی واداشت تابشی بدینانه بیشتر است.



شکل ۵. تغییرات ماهانه میانگین دمای پیش‌نگری شده تمام ایستگاه‌ها با مدل BCC-CSM1-1 (سمت چپ) و مدل NorESM1-M (سمت راست) نسبت به دوره پایه در سه سناریوی واداشت تابشی (RCP8.5, 4.5, 2.6) در آینده نزدیک

بر اساس شکل ۶، در آینده نزدیک در ماه‌های آگوست و سپتامبر بارندگی بسیار ناچیز و حداکثر میزان آن تنها در ایستگاه اشکنذر به $1/94$ (mm) نسبت به دوره پایه می‌رسد که این مقدار، چندان قابل توجه نیست. در هر ایستگاه برای هر سه سناریوی وادشت-تابشی در دو مدل نتایج تقریباً مشابهی پیش‌نگری شده است و تغییرات فاحشی بین مقادیر پیش‌نگری شده تحت سناریوهای مختلف وجود ندارد. بارندگی ماهانه در دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۵ تحت مدل BCC-CSM1-1 بین $5/49$ (mm) (ندوشن، ماه ژانویه و RCP4.5) تا $5/04$ (mm) (میبد، ماه دسامبر و RCP2.6) و تحت مدل NorESM1-M بین $4/69$ (mm) (ندوشن، ماه نوامبر و RCP2.6) تا $9/89$ (mm) (میبد، ماه دسامبر و RCP8.5) متغیر خواهد بود. در هر ایستگاه تغییرات بارندگی در مدل‌ها و سناریوهای مختلف بسته به ماه موردنظر به صورت افزایش یا کاهش پیش‌نگری شده است. بیشترین کاهش و افزایش بارندگی سالانه در مدل BCC-CSM1-1 مربوط به ایستگاه ندوشن و یزد به ترتیب به میزان $5/80$ و $10/70$ میلی‌متر، و در مدل NorESM1-M مربوط به ایستگاه ندوشن و میبد به ترتیب به میزان 6 و 16 میلی‌متر است. دلیل کاهش و افزایش بارندگی در این ایستگاه‌ها را می‌توان ویژگی‌های اقلیمی و وضعیت توپوگرافی محلی (کوهستانی یا مسطح بودن) دانست. تغییرات بارندگی سالانه در مدل NorESM1-M بیشتر از مدل BCC-CSM1-1 در آینده نزدیک است. این تغییرات همچنین بیان‌گر این است که در آینده نزدیک در هر سه سناریو تنها در ایستگاه ندوشن، بارندگی نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. در سایر ایستگاه‌ها و مدل BCC-CSM1-1، تغییرات بارندگی در سناریوی $2/6$ که خوش‌بینانه‌ترین سناریو است، افزایش بیشتری نسبت به دو سناریوی دیگر دارد و به غیر از ایستگاه اشکنذر، در سایر ایستگاه‌ها با افزایش وادشت‌تابشی، بارندگی کاهش می‌یابد. تغییرات بارندگی تمامی ایستگاه‌ها در مدل NorESM1-M در سناریوی بدبینانه افزایش محسوس‌تری نسبت به دو سناریوی دیگر دارد (شکل ۶).

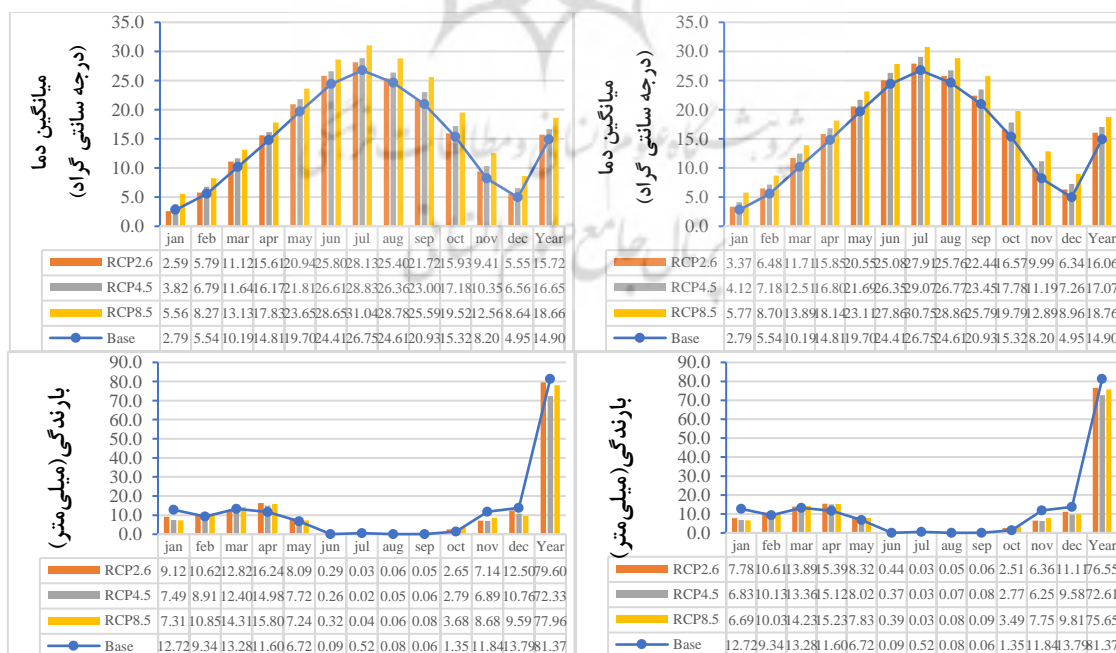


شکل ۶. تغییرات ماهانه بارندگی پیش‌نگری شده تمام ایستگاه‌ها با مدل BCC-CSM1-1 (سمت چپ) و مدل NorESM1-M (سمت راست) نسبت به دوره پایه در سه سناریوی وادشت‌تابشی (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) در آینده نزدیک

۳-۴- دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ (آینده دور)

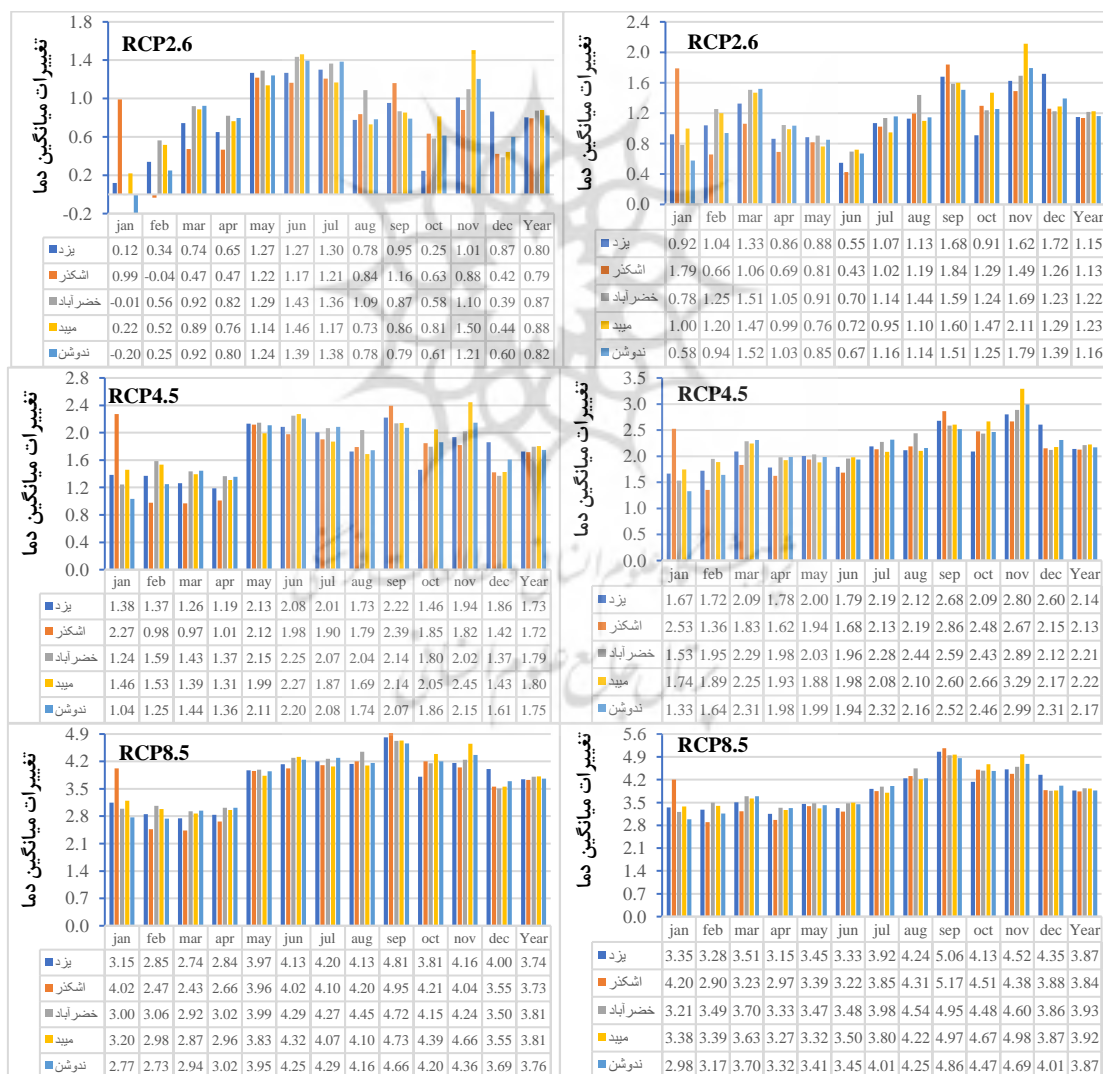
در ایستگاه ندوشن در RCP2.6 که از خوش‌بینانه‌ترین سناریوهاست با افزایش میانگین دما مواجه هستیم، با این حال، در این سناریو تغییرات فاحشی بین مقادیر Tmean در دوره پایه با آینده دور وجود ندارد و بیشترین میزان تغییرات ماهانه و سالانه در سناریوی واداشت‌تابشی بدبینانه صورت می‌گیرد (شکل ۷). بیشترین میزان میانگین دما مربوط به ماه جولای در تابستان است به طوری که میزان آن در مدل BCC-CSM1-1 در سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ به ترتیب به میزان (°C) ۲۸/۱۳، ۲۸/۸۳ و ۳۱/۰۴ و در مدل NorESM1-M و سناریوهای مذکور به ترتیب به میزان (°C) ۲۷/۹۱، ۲۹/۰۷ و ۳۰/۷۵ می‌رسد. این در حالی است که بیشترین میزان تغییر Tmean مربوط به ماه سپتامبر در هر دو مدل است به گونه‌ای که در RCP8.5 به ترتیب در مدل BCC-CSM1-1 و NorESM1-M با ۴/۶۶+ و ۴/۸۶+ درجه سانتی‌گراد تغییر همراه هستند. میانگین دمای سالانه از (°C) ۱۴/۹۰ در دوره پایه به (°C) ۱۸/۷۶ در مدل NorESM1-M-RCP8.5 می‌رسد. در کل میانگین دمای ماهانه و سالانه در دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ بیشتر از دوره ۲۰۵۵-۲۰۲۶ است.

بر اساس نتایج شکل ۷ در ایستگاه ندوشن، بارندگی ماهانه در مدل‌ها و سناریوهای مختلف در آینده دور به صورت نوسانی پیش‌نگری شده است، با این وجود تغییرات فاحشی بین مقادیر پیش‌نگری شده تحت سناریوهای مختلف در آینده دور با آینده نزدیک وجود ندارد. مدل BCC-CSM1-1 علاوه بر ماه‌های ژانویه، فوریه، نوامبر و دسامبر، در ماه مارس و در سناریوهای واداشت‌تابشی خوش‌بینانه (۰/۴۶-) و متوسط (۰/۸۷-)، میزان بارندگی را کمتر از دوره پایه در آینده دور پیش‌نگری کرده است. بیشترین میزان کاهش بارندگی ماهانه در دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰، مربوط به ماه ژانویه و سناریوی واداشت‌تابشی بدبینانه به میزان (۵/۴۱-) BCC-CSM1-1 و (۶/۰۳-) NorESM1-M) میلی‌متر است. بیشترین میزان افزایش بارندگی در آینده دور نیز مربوط به ماه آوریل و سناریوی واداشت‌تابشی خوش‌بینانه به میزان (۴/۶۴+) BCC-CSM1-1 و (۳/۷۹+) NorESM1-M) میلی‌متر است. بارندگی سالانه در ایستگاه ندوشن در هر سه سناریو در آینده دور نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد و میزان این کاهش در سناریوی واداشت‌تابشی میانه بیشتر از بدبینانه و آن نیز بیشتر از خوش‌بینانه است (RCP2.6 > RCP8.5 > RCP4.5). بنابراین هرچه واداشت‌تابشی (گرمايش جهانی) افزایش می‌یابد بارندگی در ایستگاه ندوشن که در شمال غربی منطقه و در بالاترین نقطه ارتفاعی قرار دارد، کاهش بیشتری می‌یابد. میزان بارندگی سالانه در آینده دور نسبت به آینده نزدیک، در مدل NorESM1-M در هر سه سناریوی واداشت‌تابشی کاهش می‌یابد و در مدل BCC-CSM1-1 در سناریوهای واداشت‌تابشی ۲/۶ و ۸/۵ افزایش و در RCP4.5 کاهش می‌یابد.



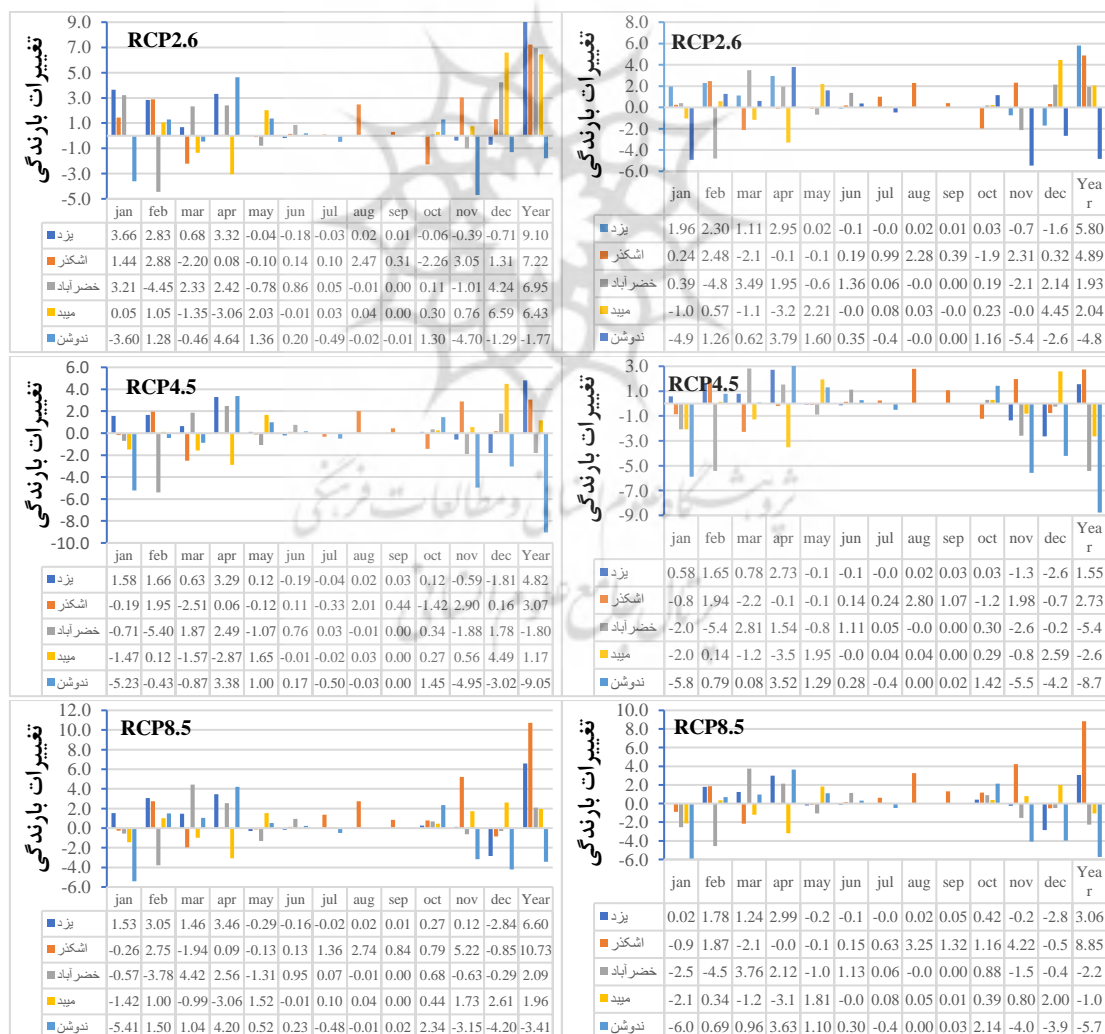
شکل ۷. مقادیر ماهانه و سالانه میانگین دما و بارندگی پیش‌نگری شده ایستگاه ندوشن با مدل BCC-CSM1-1 (سمت چپ) و مدل NorESM1-M (سمت راست) نسبت به دوره پایه (Base) در سه سناریوی واداشت‌تابشی (RCP8.5, 4.5, 2.6) در آینده دور

مدل BCC-CSM1-1 تغییرات میانگین دما در آینده دور را تنها در ایستگاه اشکذر و ماه فوریه، ایستگاه ندوشن و ماه ژانویه تا $(^{\circ}\text{C}) 0.20$ کمتر از دوره پایه پیش‌نگری کرده است که این میزان کاهش بسیار جزئی و قابل صرف‌نظر کردن است. با این وجود آهنگ تغییرات Tmean دوره پایه از آینده نزدیک تا آینده دور برای مدل‌ها و سناریوهای مختلف منظم و افزایشی خواهد بود. همچنین مدل NorESM1-M افزایش دمای بیشتری را نسبت به مدل دیگر در تمامی سناریوها و ماه‌ها در آینده دور پیش‌نگری کرده است، میزان تغییرات میانگین دمای ماهانه و سالانه نیز در دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ بیشتر از دوره قبلی است (شکل ۸). هر دو مدل در تمامی ایستگاه‌ها پیش‌نگری کرده‌اند که میانگین دما در اواخر قرن حاضر (دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰) در همه سناریوها بیشتر از میانگین دوره پایه است و هرچه سناریوی واداشت‌تابشی افزایش می‌یابد میانگین دما نیز افزایش بیشتری می‌یابد. در ماه ژانویه، افزایش دما در ایستگاه اشکذر محسوس‌تر از سایر ایستگاه‌ها است. به‌طوری‌که بین $+0.99$ (BCC-CSM1-1_RCP2.6) تا $+4.20$ (NorESM1-M_RCP8.5) متغیر است. بیشترین و کمترین تغییرات هر دو مدل به ترتیب برای اشکذر در ماه سپتامبر توسط RCP8.5 $(+5.17^{\circ}\text{C})$ و ندوشن در ژانویه توسط RCP2.6 (-0.20°C) پیش‌نگری شد (شکل ۸). تغییرات سالانه میانگین دما در آینده دور در ایستگاه‌های مختلف، یکسان و نزدیک به یکدیگر است و در مدل BCC-CSM1-1 از $+0.79$ تا $+3.81$ $(^{\circ}\text{C})$ و در مدل NorESM1-M از $+1.13$ تا $+3.93$ $(^{\circ}\text{C})$ در حال تغییر است.



شکل ۸. تغییرات ماهانه میانگین دمای پیش‌نگری شده تمام ایستگاه‌ها با مدل BCC-CSM1-1 (سمت چپ) و مدل NorESM1-M (سمت راست) نسبت به دوره پایه در سه سناریو واداشت‌تابشی (RCP8.5, 4.5, 2.6) در آینده دور

همان‌طور که شکل ۹ نشان می‌دهد، آهنگ تغییرات بارندگی ماهانه و سالانه در آینده دور برای ایستگاه‌ها در هر دو مدل و سناریوهای واداشت‌تابشی مختلف، متغیر خواهد بود. با این وجود مدل NorESM1-M کاهش بارندگی بیشتری را برآورد می‌کند. از مقایسه سناریوها در هر دو مدل مشخص شد که بارندگی سالانه در سناریوهای ۲/۶ و ۴/۵ به ترتیب بیشترین و کمترین تغییر را در طی دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ در تمامی ایستگاه‌ها به جز اشکذر خواهد داشت، در ایستگاه اشکذر بیشترین تغییرات مربوط به RCP8.5 است. بارندگی سالانه ایستگاه‌های یزد و اشکذر در هر دو مدل و ایستگاه میبد در مدل BCC-CSM1-1، در هر سه سناریوی واداشت‌تابشی، دارای آهنگی افزایشی در مقایسه با دوره پایه است. ایستگاه ندوشن در هر دو مدل و هر سه سناریو، ایستگاه‌های خضرآباد و میبد در مدل NorESM1-M و سناریوهای واداشت‌تابشی ۴/۵ و ۸/۵ و ایستگاه خضرآباد در مدل BCC-CSM1-1 تنها در سناریوی واداشت‌تابشی میانه، دارای آهنگ کاهشی در آینده دور در مقایسه با دوره پایه است. میزان تغییرات بارندگی در آینده دور به جز در ایستگاه اشکذر و سناریوهای واداشت‌تابشی خوش‌بینانه و بدبینانه، در سایر ایستگاه‌ها و تمامی سناریوها، در هر دو مدل کمتر از آینده نزدیک است؛ بنابراین بارندگی در آینده دور نسبت به آینده نزدیک در منطقه کاهش می‌یابد. بیشترین میزان کاهش بارندگی ماهانه در دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰، مربوط به ایستگاه ندوشن در ماه ژانویه و سناریوی واداشت‌تابشی بدبینانه به میزان (mm) ۶/۰۳- (NorESM1-M)، و بیشترین میزان افزایش نیز مربوط به ایستگاه میبد در ماه دسامبر و سناریوی واداشت‌تابشی خوش‌بینانه به میزان (mm) ۶/۵۹+ (BCC-CSM1-1) است.

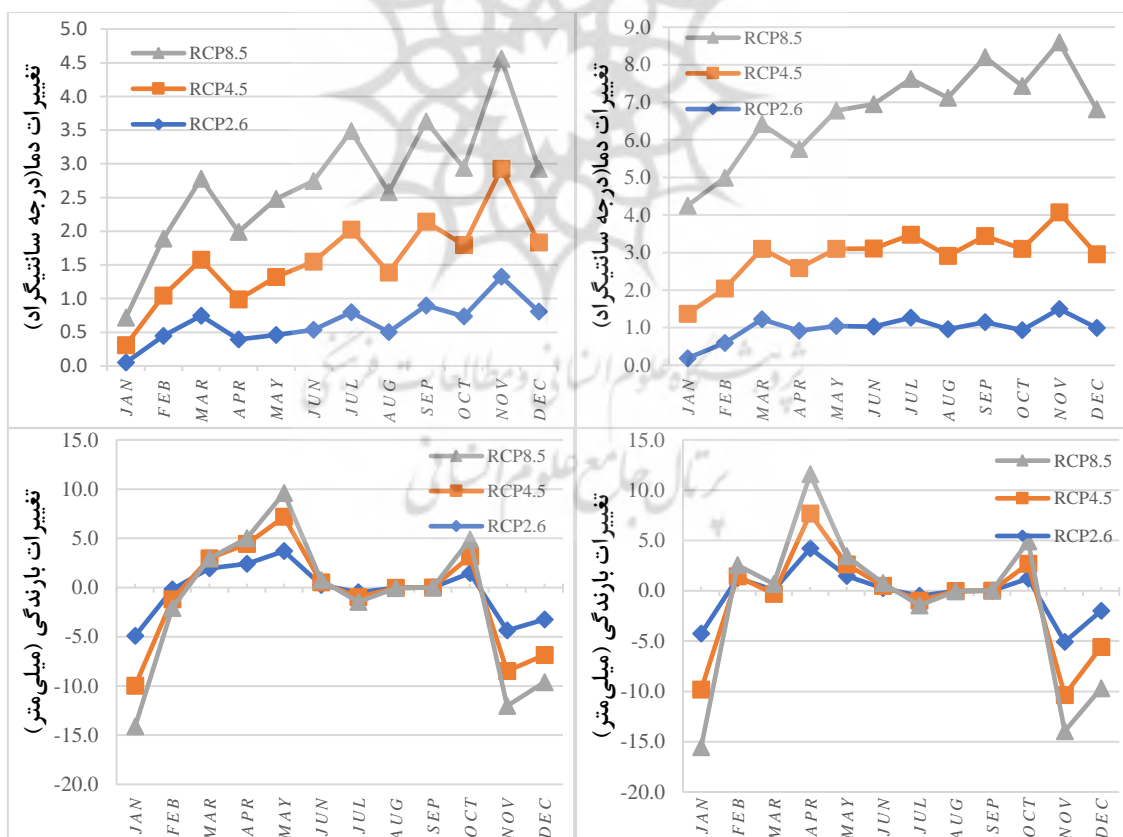


شکل ۹. تغییرات ماهانه بارندگی پیش‌نگری شده تمام ایستگاه‌ها با مدل BCC-CSM1-1 (سمت چپ) و مدل NorESM1-M (سمت راست) نسبت به دوره پایه در سه سناریوی واداشت‌تابشی (RCP8.5, 4.5, 2.6) در آینده دور

بر اساس بروندادهای حاصل از مجموعه سناریوهای GCM-RCP در پیش‌نگری پارامتر بارندگی در آینده، می‌توان این نتیجه را استنباط نمود که ۳۷٪ مدل‌ها پیش‌نگری کرده‌اند که بارندگی در دهه‌های پایانی قرن حاضر کمتر از میانگین دوره پایه است و ۸۷٪ نیز پیش‌نگری کرده‌اند که بارندگی در دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ کمتر از دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۵ است؛ بنابراین بر اساس ویژگی‌های اقلیمی و وضعیت توپوگرافی محلی، تنها محدوده‌ای که در قرن حاضر با افزایش بارندگی مواجه می‌شود منطقه مسطح و مرکزی یزد است هرچند افزایش بارندگی در این منطقه با افزایش نسبی دما بی‌تأثیر می‌شود، ضمن این‌که رفتار بارندگی این منطقه در آینده به شکل بارش‌های ناگهانی و سیل‌آسا محتمل خواهد شد. مناطق کوهستانی واقع در غرب و شمال غربی نیز در آینده با کاهش بارندگی مواجه می‌شوند.

۳-۵- بررسی محدوده‌ی عدم قطعیت

به دلیل تفاوت‌های ساختاری میان مدل‌های جهانی آب‌وهوا و عدم اطمینان در تغییرات شرایط اولیه مدل‌ها، استفاده از چندین مدل گردش کلی برای تأکید بر عدم قطعیت در پیش‌نگری تغییر اقلیم ضروری است (سمنوف^۱ و همکاران، ۲۰۱۰). به منظور بررسی محدوده‌ی عدم قطعیت، اختلاف مقادیر پارامترهای مجموع بارندگی و میانگین دما برای هر دو مدل مورد مطالعه در دوره‌های آینده در هر سه سناریوی وادشت‌تابشی با مقادیر دوره پایه محاسبه و تغییرات آن به عنوان نمونه تنها در ایستگاه ندوشن به صورت نمودار در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که شکل ۱۰ نشان می‌دهد هر دو مدل میانگین دما را در هر سه سناریوی وادشت‌تابشی نسبت به دوره پایه با افزایش پیش‌نگری کرده‌اند و بیشترین افزایش دما مربوط به ماه نوامبر در RCP8.5 و دوره آینده دور است. همچنین هر دو مدل بارندگی در ماه‌های ژانویه، نوامبر و دسامبر را با کاهش پیش‌نگری کرده‌اند. بیشترین تغییرات بارندگی مربوط به ماه‌های می و آوریل به ترتیب در آینده نزدیک و دور است.



شکل ۱۰. تغییرات ماهانه میانگین دما و مجموع بارندگی پیش‌نگری شده برای دو مدل مورد مطالعه در ایستگاه ندوشن نسبت به دوره پایه تحت سه سناریو وادشت‌تابشی (RCP8.5, 4.5, 2.6) در آینده نزدیک (سمت چپ) و آینده دور (سمت راست)

۴- بحث و نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی با استفاده از چهار مدل GCM از سری CMIP5 با سه سناریوی واداشت‌تابشی، برای دوره پایه در محیط LARS-WG6 انجام شد. نتایج ارزیابی LARS-WG6 با استفاده از آمارهای خطا نشان داد که مدل در پیش‌نگری پارامتر میانگین دما و بارندگی از قابلیت قابل قبولی برخوردار است؛ میزان R^2 برای میانگین دما بیشتر از $0/991$ و برای بارندگی بین $0/87-0/96$ است که این با یافته‌های لئو و همکاران تطابق دارد، آنان میزان R^2 را برای بارندگی و دما به ترتیب $0/07$ و $0/9$ تعیین کردند، همچنین با یافته‌های ایزدی و همکاران و کوتسوویلی و همکاران هم‌خوانی دارد (Liu et al., 2011; Izadi et al., 2021; Koutsovili et al., 2019). هم‌چنین آمارهای خطای مربوط به شبیه‌سازی چهار مدل GCM مورد استفاده نشان داد که به ترتیب مدل‌های BCC-CSM1-1 و NorESM1-M با دارا بودن کمترین میزان آمارهای خطا به ویژه NRMSE قابل قبول و به ترتیب کمتر از 39% و 44% ، مقادیر نزدیک‌تر به پارامترهای دما و بارندگی ایستگاه‌های هواسنجی منطقه را مشخص می‌کنند و به نتایج این دو مدل در پیش‌نگری عناصر اقلیمی در دوره آینده نزدیک و آینده دور بیشتر می‌توان اطمینان کرد.

همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در هر دو دوره، تغییرات میانگین دمای پیش‌نگری شده نسبت به دوره پایه از آهنگی منظم و افزایشی برخوردار است که نتایج حاصل با نتایج میراکبری و همکاران مطابقت دارد (Mirakbari et al., 2018). میزان پارامتر میانگین دما در ماه‌های زمستان (ژانویه - مارس) کمتر از ماه‌های فصل تابستان (ژوئن - آگوست) است و مدل NorESM1-M تغییرات میانگین دمای بیشتری را نسبت به مدل BCC-CSM1-1 در تمامی سناریوها و ماه‌ها در دوره‌های آینده پیش‌نگری کرده است. هر دو مدل در تمامی ایستگاه‌ها پیش‌نگری کرده‌اند که میانگین دما در اواخر قرن حاضر (دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰) در همه سناریوها بیشتر از میانگین دوره پایه است و هرچه سناریوی واداشت‌تابشی افزایش می‌یابد میانگین دما نیز افزایش بیشتری می‌یابد. با این حال در RCP2.6 که از خوش‌بینانه‌ترین سناریوهاست با افزایش میانگین دما مواجه هستیم، ولی در این سناریو تغییرات فاحشی بین مقادیر Tmean در دوره پایه با دوره‌های آینده وجود ندارد. تغییرات سالانه میانگین دما در هر دو دوره بین ایستگاه‌های مختلف، مشابه یکدیگر است و در آینده دور از سناریو $2/6$ تا $8/5$ ، در مدل BCC-CSM1-1 به ترتیب به میزان $0/79$ تا $3/81$ (°C) و در مدل NorESM1-M نیز به ترتیب به میزان $1/13$ تا $3/93$ (°C) در حال نوسان است و این با نتایج تحقیقات فلاح‌قاهره‌ی، باباییان و همکاران، کوتسوویلی و همکاران، عرب سلغار و همکاران و هجازی و همکاران هم‌خوانی دارد (Fallah Ghalhari, 2019; Babaian et al., 2019; Koutsovili et al., 2021; Arab Solghar et al., 2022; Hejazi et al., 2022).

آهنگ تغییرات بارندگی ماهانه و سالانه از دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۵ تا ۲۰۷۱-۲۱۰۰ برای مدل‌ها و سناریوهای مختلف، متغیر خواهد بود و این با نتایج المزروی و همکاران تطابق دارد (Almazroui et al., 2017). با این وجود مدل NorESM1-M در آینده نزدیک و آینده دور به ترتیب افزایش و کاهش بارندگی محسوس‌تری را نسبت به مدل BCC-CSM1-1 برآورد می‌کند. در اکثریت ایستگاه‌ها در ماه‌های تابستان بارندگی نسبت به دوره پایه، نزدیک به صفر و چندان قابل توجه نیست. بیشترین کاهش و افزایش بارندگی سالانه در مدل BCC-CSM1-1 مربوط به ایستگاه ندوشن و اشکذر به ترتیب به میزان -9 و $10/73$ میلی‌متر و در مدل NorESM1-M مربوط به ایستگاه ندوشن و میبد به ترتیب به میزان $-1/77$ و 16 میلی‌متر است که این منطبق با نتایج کاظمی و خزائی و عرب سلغار و همکاران است (Kazemi and Khazaei, 2022; Arab solghar et al., 2022). در مدل BCC-CSM1-1 در آینده نزدیک و در هر دو مدل در آینده دور، تغییرات بارندگی در سناریوی $2/6$ که خوش‌بینانه‌ترین سناریوهاست، افزایش محسوس‌تری نسبت به دو سناریوی دیگر دارد و به غیر از ایستگاه اشکذر، در سایر ایستگاه‌ها با افزایش واداشت‌تابشی، بارندگی کاهش می‌یابد. همچنین بر اساس برون‌دادهای حاصل از مجموعه سناریوهای GCM-RCP در پیش‌نگری پارامتر بارندگی در آینده، این نتیجه برداشت شد که بارندگی ایستگاه‌های پژوهشی در دهه‌های پایانی قرن حاضر، از دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۵ کمتر و در برخی نقاط نسبت به میانگین دوره پایه افزایشی یا کاهشی است؛ بنابراین بر اساس ویژگی‌های اقلیمی و وضعیت توپوگرافی محلی، تنها محدوده‌ای که در اواخر قرن حاضر با افزایش بارندگی مواجه می‌شود منطقه مسطح و مرکزی یزد است هرچند افزایش بارندگی در این منطقه با افزایش نسبی دما بی‌تأثیر می‌شود، ضمن این‌که رفتار بارندگی این منطقه در آینده به شکل بارش‌های ناگهانی و سیل‌آسا محتمل خواهد شد. مناطق کوهستانی واقع در غرب و شمال غربی نیز در آینده با کاهش بارندگی مواجه می‌شوند. افزایش بارندگی در آینده با نتایج تحقیق فلاح‌قاهره‌ی، کاظمی و خزائی و کاهش بارندگی نیز با نتایج تحقیق باباییان و همکاران و هجازی و همکاران تطابق دارد (Fallah Ghalhari, 2019; Kazemi and Khazaei, 2022; Babaian et al., 2019; Hejazi et al., 2022).

با توجه به نتایج حاصل از افزایش دما، عدم بارندگی شبیه‌سازی شده در تابستان و کاهش بارندگی در دهه‌های پایانی قرن حاضر، یک ارتقای شناخت در رابطه با وضعیت استان به دست آمد. پیامدهایی احتمالی از این وضعیت در آینده به وجود خواهد آمد که این پیامدها با افزایش تبخیر و تعرق و تنش آبی، کاهش آب خاک و تغذیه آب‌های زیرزمینی، افزایش سرعت باد و ایجاد طوفان گردوغبار، افزایش خشکی و خشکسالی و افزایش سطح بیابان همراه است که در نتیجه ممکن است سبب تخریب اکوسیستم، تهدید سیستم‌های حیاتی و سکونتگاه‌ها شود؛ بنابراین چنین یافته‌هایی نشان‌دهنده نیاز به مدیریت یک‌پارچه و استراتژی‌های کاهش تغییر اقلیم و تخریب اکوسیستم در استان دارد تا چالش‌های مورد انتظار در آینده را برنامه‌ریزی و مدیریت کنند.

۵- سپاس‌گزاری

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه دکتری خانم اعظم السادات حسینی خضرآباد است که با حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه کاشان انجام شده است.

۶- فهرست منابع

- اشرف، بتول؛ موسوی بایگی، سیدمحمد؛ کمالی، غلام‌علی؛ داوری، کامران (۱۳۹۰). پیش‌بینی تغییرات فصلی پارامترهای اقلیمی در ۲۰ سال آتی با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری داده‌های مدل HADCM3. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵(۴)، ۹۵۷-۹۴۷.
- ایزدی، زهره؛ حیدر نصرالهی، علی؛ حقیقتی بروجنی، بیژن. (۱۳۹۷). بررسی تغییرات بارندگی و دمای هوا تحت تأثیر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم (مطالعه موردی: شهرکرد). فصلنامه علمی تخصصی مهندسی آب، ۳۵-۲۸.
- بابائیان، ایمان؛ کریمیان، مریم؛ مدیریان، راهله؛ میرزایی، ابراهیم (۱۳۹۸). پیش‌نگری فراسنج‌های اقلیمی کشور با به‌کارگیری مدل‌های گردش کلی سری CMIP5 دوره (۲۰۲۰-۲۱۰۰ میلادی). مجله علمی و ترویجی نیوار، ۱۰۴-۱۰۵، ۱۰-۱.
- حجازی، سیداسدالله؛ رضائی مقدم، محمدحسین؛ کرمی، فریبا؛ یاراحمدی، جمشید و بی‌غم، علی (۱۴۰۱). شبیه‌سازی و پیش‌بینی برخی متغیرهای اقلیمی توسط مدل چندگانه خطی SDSM و سناریوهای RCP در حوضه آبخیز حاجیلر. نشریه علمی جغرافیا و مخاطرات طبیعی، DOI: 10.22067/GEOEH.2022.75404.1206
- عرب‌سلنگار، علی‌اکبر؛ پرهمت، جهانگیر و گودرزی، مسعود (۱۴۰۱). پیش‌بینی تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو و مقیاس کاهی مدل‌های SDSM و LARS WG تحت سناریوهای واداشت‌تابشی در حوضه آبریز دز. فصل‌نامه جغرافیای طبیعی، ۱۴(۵۵)، ۱۴۹-۱۲۹.
- فلاح‌قاله‌ری، غلام‌عباس؛ یوسفی، حسین؛ حسین‌زاده، احمد؛ علی‌مرادی، محمدرضا و ریحانی، الیاس (۱۳۹۸). ارزیابی تغییر اقلیم ایستگاه بجنورد طی دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۵۰ با استفاده از مدل‌های ریزمقیاس نمایی LARS WG و SDSM. اکوهیدرولوژی، ۱۶(۱)، ۹۹-۱۰۹.
- کاظمی، رضا و خزائی، محمدرضا (۱۴۰۰). پیش‌بینی تغییر اقلیم تهران و یزد در آینده تحت سناریوهای RCP و توسط مدل LARS-WG. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، DOI: 10.22034/JEST.2021.48424.4865
- گودرزی، محمدرضا و فاتحی‌فر، آتیه (۱۴۰۱). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی و بارش‌های حداکثر تحت سناریوهای-جدیدانتشار RCP در حوضه آبریز. فصل‌نامه انسان و محیط‌زیست، ۲۰(۲)، ۱۲۷-۱۱۱.
- میراکبری، مریم؛ مصباح‌زاده، طیبه؛ محسنی‌ساروی، محسن؛ خسروی، حسن و مرتضایی فریزه‌ندی، قاسم (۱۳۹۷). ارزیابی کارایی مدل سری CMIP5 در شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی بارندگی، درجه‌حرارت و سرعت‌باد (مطالعه موردی: استان یزد). پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۵۰(۳)، ۵۹۳-۶۰۹.

References

- Ali Amedie, F. (2013). Impacts of Climate Change on Plant Growth, Ecosystem Services, Biodiversity and Potential Adaptation Measures. Master thesis in Atmospheric Science with Orientation towards Environmental Science (60 HEC), University of Gothenburg. https://studentportal.gu.se/digitalAssets/1432/1432197_fantahun.pdf

- Almazroui, M., Nazrul Islam, M., Saeed, F., Alkhalaf, A.K. and Dambul, R. (2017). Assessing the robustness and uncertainties of projected changes in Temperature and Precipitation in AR5 Global Climate Models Over the Arabian Peninsula. *Atmospheric research*, 194, 202-213. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.05.005>
- Arab solghar, A. A., Porhemat, J. and Goodarzi, M. (2022). Prediction of Climate Change using General Circulation Models and SDSM and LARS-WG Downscaling Models under RCP Scenarios in Dez Watershed, *Physical Geography Quarterly*, 14(55), 129-149. DOI:20.1001.1.20085656.1401.15.55.8.0. **[in persian]**
- Ashraf, B., Mousavi Baygi, M., Kamali, G.A. and Davari. K. (2011). Prediction of Seasonal Variations of Climatological Parameters over Next 20 Years by Using Statistical Downscaling Method of HADCM3 Data (Case Study: Khorasan Razavi Province). *Journal of Water and Soil*, 25(4), 947-957. <https://sid.ir/paper/460360/fa>. **[in persian]**
- Babaian, I., Karimian, M., Modirian, R. and Mirzaei, E. (2019). Prediction of the country climatic parameters by using the general circulation models of CMIP5 series for the period 2020-1100. *NIVAR Scientific and Extension Journal*, 43(104-105), 1-10. DOI:10.30467/nivar.2019.142745.1103. **[in persian]**
- Bipal, K.J. and M. Mrinmoy. (2010). *Impact of climate change on natural resource management*. Springer Press, 495 pages. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-90-481-3581-3>
- Fallah Ghalhari, G. A., Yousefi. H., Hosseinzadeh. A., Alimardani. M. R. and Reyhani, E. (2019). Assessment of Climate Change in Bojnourd Station in 2016-2050 using Downscaling Models LARS WG and SDSM. *Journal of Ecohydrology*, 1(6), 99-109. DOI:10.22059/IJE.2018.265918.952. **[in persian]**
- Goodarzi, M.R. and Fatehifar, A. (2022). Assessment of climate change effects on meteorological variables and maximum precipitation under new RCP emission in watershed. *Human and environment*, 20(61), 111-127. DOI: 20.1001.1.15625532.1401.20.2.9.0. **[in persian]**
- Hejazi, S., Rezaei Moghaddam, M.H., Karami, F., Yarahmadi, J. and Bigham, A. (2022). Simulation and forecasting of some climatic variables by SDSM multiple linear model and RCP scenarios in Hajiler watershed. *Journal of Geography and Environmental Hazards*. DOI:10.22067/GEOEH.2022.75404.1206. **[in persian]**
- Izadi, Z., Nasrollahi, A.H. and Haghghati Borujeni, B. (2019). Investigation of Rainfall and Air Temperature Changes Under Different Scenarios of Climate Change (Case study: Shahrekord). *Water engineering*, 6(1), 28-35. https://jwe.shoushtar.iau.ir/article_546143.html?lang=fa. **[in persian]**
- kazemi, R. and Khazaei, M.R. (2022). Prediction of future climate change in Tehran and Yazd under RCPs scenarios and using LARS-WG model. *Journal of Environmental Science and Technology (JEST)*. DOI: 10.22034/JEST.2021.48424.4865. **[in persian]**
- Koutsovili, E., Tzoraki, O., Theodossiou. N. and Gaganis, P. (2021). Numerical assessment of climate change impact on the hydrological regime of a small Mediterranean river, Lesvos Island, Greece. *Acta hort regiotec*, 1, 28-48. DOI: 10.2478/ahr-2021-0022
- Liu, L., Liu, Z., Ren, X., Fischer, T. and Xu. Y. (2011). Hydrological impacts of climate change in the Yellow River Basin for the 21st century using hydrological model and statistical downscaling model. *Quaternary International*, 2, 211-220. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.12.001>
- Mirakbari, M., Mesbahzadeh, T., Mohseni Sarvi, M., Khosravi, H. and Mortezaei Friz handi, Gh. (2018). Evaluating the model efficiency of CMIP5 series in simulating and predicting climatic parameters of rainfall, temperature and wind speed (Case study: Yazd province). *Physical Geography Research*, 50(3), 593-609. DOI: 10.22059/JPHGR.2018.248177.1007156. **[in persian]**
- Nourani, V., Hosseini Baghanam, H. and Gokcekus, H. (2018). Datadriven ensemble model to statistically downscale rainfall using nonlinear predictor screening approach. *Journal of Hydrology*, 565, 538-551. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.049>
- Refsgaard, J.C., Arnbjerg-Nielsen, K., Drews, M., Halsnaes, K., Jeppesen, E., Madsen, H., Markandya, A., Olesen, J.E., Porter, J.R. and Christensen, J.H. (2013). The role of uncertainty in climate change adaptation strategies – A Danish water management example. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 18, 337-359. DOI: 10.1007/s11027-012-9366-6
- Semenov, M.A. and Barrow, E.M. (2002). *A Stochastic Weather Generator for use in Climate, User Impact Studies*. Version 3.0. User Manual. *Atmospheric and Hydrologic Science*, 28 pages.
- Semenov. M.A., Donatelli, M., Stratonovitch, P., Chatzidaki, E. and Baruth, B. (2010). ELPIS: a dataset of local-scale daily climate scenarios for Europe. *Climate Research*, 44, 3-15. DOI: 10.3354/cr00865

- Sharafati, A., Pezeshki, E., Shahid, S. and Motta, D. (2020). Quantification and uncertainty of the impact of climate change on river discharge and sediment yield in the Dehbar river basin in Iran. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 2977–2996. DOI: 10.1007/s11368-020-02632-0
- Sharma, D., Gupta, A.D. and Babel, M.S. (2007). Spatial disaggregation of bias-corrected GCM precipitation for improved hydrologic simulation: Ping River Basin, Thailand. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1373–1390. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1373-2007>
- Shrestha, A., Babel, M.S., Weesakul, S. and Vojinovic, Z. (2017). Developing Intensity Duration Frequency (IDF) Curves under Climate Change Uncertainty: The Case of Bangkok, Thailand. *Journal of Water*, 145, 1-22. <https://doi.org/10.3390/w9020145>
- Sunyer, M.A., Madsen, H. and Ang, P.H. (2012). A comparison of drrrr nnt rggonll mmrca models and statistical downscaling methods for extreme rainfall estimation under climate change. *Journal of Atmospheric Research*, 103, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.06.011>
- Tzoraki, O. (2020). Operating Small Hydropower Plants in Greece under Intermittent Flow Uncertainty: The Case of Tsiknias River (Lesvos). *Challenges*, 17, 1-15. <https://ideas.repec.org/a/gam/jchals/v11y2020i2p17-d393807.html>
- Wu, C.H., Huang, G.R. and Yu, H.J. (2015). Prediction of extreme floods based on CMIP5 climate models: a case study in the Beijiang River basin, South China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 1385–1399. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1385-2015>
- Zhai, P., Roberts, D. and Shukla, P.R. (2018). Summary for Policymakers. In: *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report. ResearchGate*, 1, 1-33. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/11/SR1.5_SPM_Low_Res.pdf

