

Long-term estimation of changes in station climate parameters under the CanESM2 model (Case study: Boroujerd synoptic station)

Mohammad Hossein Jahangir^{1*}, Fateme Rouzbahani²

¹ Associate Professor, Renewable Energies and Environment Department, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

² Graduated M.Sc. Student, Renewable Energies and Environment Department, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

Introduction

General atmospheric circulation models show an increase in greenhouse gas concentrations. These models predict global climate change by simulating the earth's climate. General atmospheric circulation models are not accurate enough for hydrological and water resources studies due to the large temporal and spatial scale of the simulated climate variables compared to the case model. Therefore, they must be scaled. There are different methods for exponential downscale of large-scale variables, and general atmospheric circulation models. In this research, the SDSM model is used to downscaling climatic data.

Materials and Methods

Boroujerd Synoptic Station with an altitude of 1629 meters above sea level is located at latitude 33° 55' East and longitude 48° 45' North. Boroujerd city is located at the foot of the highest wall of the Zagros at an altitude of 1550 to 1571 meters above sea level and the highest point is in the Garin mountain range with an altitude of 3623 meters in the west and its lowest area is in Silakhor plain with an altitude of 1500 meters. In this study, the CanESM2 climate model under three scenarios RCP26, RCP45, and RCP85 in three time periods 2040-2021, 2060-2041, and 2080-2061; and SDSM model version 4.2 were used for downscale (micro-scale) exponential climatic data. For calibration and validation of SDSM microscale model, R² and RMSE calibration indices were used. In this study, 30% of the data were used for validation and 70% of the data were used for calibration.

Result and Discussion

In the SDSM model, the maximum and minimum temperature values are better predicted than the precipitation values, and the simulated data are closer to the observational values. In all scenarios and periods, the precipitation trend is decreasing. The largest decrease in precipitation is related to January in the period 2021-2040 and the RCP8.5 scenario, with a decrease of 69.22 percent. The temperature in all scenarios and periods had an increasing trend compared to the base period. The highest increase in the minimum temperature data is related to the RCP4.5 scenario in October for the period 2061-2080 and it was equal to 4.90 ° C, respectively, and in the maximum temperature data related to the RCP4.5 scenario in October for the period, 2061-2080 was predicted to be equal to 7.02 ° C. Calibration of SDSM model for Boroujerd station for each of the minimum and maximum temperature and precipitation showed the mean values of coefficient of determination 0.99, 0.98 and 0.67, respectively.

Conclusions

The highest decrease in rainfall is related to January in the period 2040-2021 and the RCP8.5 scenario, with a decrease of 69.22%. Also, the SDSM exponential downscale (microscale) model for the minimum and maximum temperature parameters predicted an upward trend. Calibration of SDSM model for Boroujerd synoptic station shows the efficiency of SDSM model in microcompilation of parameters. As a result, we will face a decrease in hydrological reserves in future periods.

Keywords: Climate Change, CanESM2 Model, SDSM, Boroujerd Synoptic Station

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: mh.jahangir@ut.ac.ir

Citation: Jahangir, M.H., Rouzbahani, F. (2022). Long-term estimation of changes in station climate parameters under the CanESM2 model (Case study: Boroujerd synoptic station). *Water and Soil Management and Modeling*, 2(4), 37-52.

DOI: 10.22098/MMWS.2022.10479.1085

DOR: 20.1001.1.27832546.1401.2.4.3.4

Received: 08 March 2022, Received in revised form: 24 April 2022, Accepted: 27 April 2022, Published online: 25 June 2022

Water and Soil Management and Modeling, Year 2022, Vol. 2, No. 4, pp. 37-52

Publisher: University of Mohagheh Ardabili

© Author(s)





تخمین بلندمدت تغییرات عوامل اقلیمی ایستگاهی تحت مدل CanESM2 (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک بروجرد)

محمدحسین جهانگیر*^۱، فاطمه روزبهانی^۲

^۱ دانشیار، گروه انرژی‌های نو و محیط‌زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد اکوهیدرولوژی، گروه انرژی‌های نو و محیط‌زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

تغییر اقلیم یک پدیده اتمسفری-اقیانوسی در مقیاس جهانی و دوره زمانی بلندمدت است که تحت تأثیر عواملی چون فعالیت‌های خورشیدی، آتش‌فشان‌ها، اقیانوس‌ها و اتمسفر (عوامل طبیعی) و یا فعالیت‌های انسانی، رخ می‌دهد. هدف از انجام این مطالعه پیش‌بینی تغییرات پارامترهای اقلیمی ایستگاه سینوپتیک بروجرد در ۱۰۰ سال آینده، با استفاده از نرم‌افزار SDSM است. در این پژوهش از مدل اقلیمی CanESM2، تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در سه بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰ استفاده شده است. هم‌چنین دوره زمانی ۱۹۹۰-۲۰۰۰ جهت واسنجی و دوره زمانی ۲۰۰۱-۲۰۰۵ جهت صحت‌سنجی انتخاب شدند. نتایج نشان داد که در تمامی سناریوها و دوره‌های مورد بررسی، بارش دارای روند کاهشی است. بیش‌ترین درصد کاهش بارندگی، مربوط به ماه ژانویه در دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و سناریوی RCP8.5، به میزان ۶۹/۲۲ درصد است. پارامتر دما در تمامی سناریوها و دوره‌های مورد مطالعه در این پژوهش نسبت به دوره پایه روند افزایشی داشت. بیش‌ترین مقدار افزایش به‌ترتیب در داده‌های دمای حداقل مربوط به سناریوی RCP4.5 در ماه اکتبر دوره زمانی ۲۰۶۱-۲۰۸۰ و برابر با ۴/۹۰ درجه سانتی‌گراد و در داده‌های دمای حداکثر مربوط به سناریوی RCP4.5 ماه اکتبر دوره زمانی ۲۰۶۱-۲۰۸۰ و برابر با ۷/۰۲ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی شد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، مدل CanESM2، SDSM، ایستگاه سینوپتیک بروجرد

نوع مقاله: پژوهشی

*مستول مکاتبات، پست الکترونیکی: mh.jahangir@ut.ac.ir

استناد: جهانگیر، م.ج.، و روزبهانی، ف. (۱۴۰۱). تخمین بلندمدت تغییرات عوامل اقلیمی ایستگاهی تحت مدل CanESM2 (مطالعه موردی: ایستگاه

سینوپتیک بروجرد). *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۴)، ۳۷-۵۲.

DOI: 10.22098/MMWS.2022.10479.1085

DOR: 20.1001.1.27832546.1401.2.4.3.4

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۴/۰۴



مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۱، دوره ۲، شماره ۴، صفحه ۳۷ تا ۵۲

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

۱- مقدمه

تغییر اقلیم به تغییرات برگشت‌ناپذیر شرایط متوسط آب و هوایی در یک منطقه گفته می‌شود. تغییر اقلیم به‌عنوان تغییر در الگوی آب و هوایی عمدتاً ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای از سیستم‌های طبیعی و فعالیت‌های انسانی است (Fawzy et al., 2020) که در چند دهه اخیر موجب افزایش دمای کلی کره زمین و به دنبال آن بروز پدیده تغییر اقلیم شده است. بر اساس آخرین گزارش هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم، گرمای سطح کره زمین از سال ۱۹۷۰ با سرعت بیشتری نسبت به دیگر بازه‌های زمانی پنجاه ساله، حداقل در طی ۲۰۰۰ سال گذشته، رو به افزایش است (IPCC, 2022). پیش‌بینی می‌شود که دمای هوا در سطح جهانی تا پایان قرن ۲۱، با تغییر در الگوی بارش تا ۴ درجه سلسیوس افزایش پیدا کند (Thuiller, 2007). یکی از مهم‌ترین پیامدهای تغییرات پیش‌رو در آب و هوا، تغییر در چرخه‌های آبی منطقه‌ای و متعاقباً اثر بر کمیت و کیفیت منابع آب منطقه‌ای است (Gleick, 1989). منابع آب و چرخه هیدرولوژیکی ارتباط مهمی با تغییر اقلیم دارند. اثر تغییر اقلیم بر منابع آب به‌صورت تغییر در کمیت و کیفیت آب که ناشی از عوامل اقلیمی (بیش‌تر شامل تغییرات دما و بارندگی می‌شود) هستند، مشاهده می‌شود (Yang et al., 2011). شبیه‌سازی‌های اقلیمی برای قرن ۲۱ نشان‌دهنده افزایش بارندگی در عرض‌های جغرافیایی بالا و بخش‌هایی از گستره استوایی و کاهش آن در برخی گستره‌های نزدیک گرمسیری و عرض‌های پایین‌تر از پهنه‌های خشک (معتدله) است. یکی از کارهای اساسی برای کاهش نشانه‌های ناگوار دگرگونی اقلیمی، پیش‌بینی الگو و روند آن‌ها در دهه های آینده است. با محاسبه اندازه افزایش دما در آینده می‌توان نشان آن را بر زندگی گیاهان و انسان‌ها و اکاوی نمود و چاره‌اندیشی کرد (Nazim al-Sadat and Ravan, 2011). کشور ایران با توجه به فرارگیری در عرض جغرافیایی پایین آثار قابل‌ملاحظه‌تری از پدیده تغییر اقلیم دریافت می‌کند (IPCC, 2007). امروزه مدل‌های گردش عمومی جو قوی‌ترین ابزار برای تولید سناریوهای اقلیمی هستند (Jahangir et al., 2020). مدل‌های گردش عمومی جو، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای را نشان می‌دهند. این مدل‌ها با شبیه‌سازی اقلیم کره زمین، تغییر در اقلیم آینده آن را پیش‌بینی می‌کنند (Hooshmand and Khordadi, 2014). اغلب مدل‌های گردش عمومی جو برای اجرا نیاز به ابر رایانه‌ها دارند. که چندین روز به طول می‌انجامد که این زمان بسیار وابسته به ابعاد شبکه مکانی است. این مدل‌ها عامل ارتباطی بین متغیرهایی در مقیاس بزرگ؛ یعنی مدل‌های گردش عمومی جو با دیگر متغیرهای کوچک‌مقیاس هستند (Sanikhani et al., 2014).

روابط ریاضی این مدل‌ها در شبکه‌های سه‌بعدی، با مقیاس مکانی افقی ۲۵۰ تا ۶۰۰ کیلومتر و ۱۰ تا ۲۰ لایه در جو و ۳۰ لایه در اقیانوس حل می‌شوند. وضوح مکانی افقی مدل‌ها در سطح خشکی های کره زمین ۲۵۰ کیلومتر و دقت مکانی قائم آن‌ها برابر یک کیلومتر است. درحالی‌که وضوح مکانی قائم در اقیانوس‌ها ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر و وضوح مکانی افقی برابر ۱۲۵ تا ۲۵۰ کیلومتر است. از طرفی فرآیندهای فیزیکی زیادی مربوط به ابر و تابش، بخار آب و گرمایش، چرخه‌های اقیانوسی و یخ و آلبیدوی برف نمی‌توانند به‌طور روشن مدل شوند. در این حالت به‌طور تقریبی اثرات میانگین آن‌ها با در نظر گرفتن رابطه فیزیکی مربوط با متغیرهای بزرگ مقیاس، در مدل لحاظ می‌شود که به آن پارامتربندی می‌گویند. مدل‌های گردش عمومی اقیانوس-جوی در چند دهه اخیر با افزایش قدرت رایانه‌ها توسعه چشم‌گیری یافته‌اند (IPCC, 2007). یکی از ضعف‌های مدل‌های گردش عمومی جو بزرگ بودن مقیاس زمانی و مکانی متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی‌شده نسبت به مدل مورد استفاده است. بنابراین، این متغیرها برای مطالعات هیدرولوژی و منابع آب از دقت کافی برخوردار نیستند. از این‌رو بایستی توسط روش‌های مختلف، کوچک مقیاس شوند (Samadi et al., 2007). در پژوهش حاضر از مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی استفاده شده است. در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی در زمینه مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی و پیش‌بینی اقلیم انجام شده که می‌توان به مواد زیر اشاره کرد:

Hosseini et al., (2015) به‌منظور ارزیابی تأثیراتی که به سناریوهای اقلیمی محلی نیاز دارند، روشی بر مبنای استفاده از یک مولد آب و هوایی با توانایی تولید سناریوهای اقلیمی روزانه در مقیاس ایستگاهی که ورودی‌های بسیاری از مدل‌های بررسی اثر فرآیندها نظیر بارش-رواناب هستند، ارائه دادند. نتایج بررسی جریان‌ات رودخانه صوفی چای واقع در حوضه دریاچه ارومیه به‌وسیله مدل بارش-رواناب نشان داد که اختلاف میان مدل‌های اقلیمی تحت سناریوی انتشار B1 برای هر دو دوره آبی دور و نزدیک به‌خصوص در فصول گرم سال نسبتاً اندک است. پژوهش Hooshmand and Khordadi (2014) عدم قطعیت ۱۵ مدل GCM و سناریوهای انتشار را در برآورد پارامترهای اقلیمی در حوضه قره قوم بررسی کرد. ایشان از مدل آماری LARS-WG جهت ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بزرگ مقیاس استفاده کردند. LARS-WG، یک مدل مولد آب و هوایی با استفاده از توزیع نیمه‌تجربی است که توانایی بالایی در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی دارد (Semenov and Stratonovitch, 2010). نتایج حاکی از وجود بیش‌ترین عدم قطعیت در سناریوی A1B بود،

تحت سناریوهای RCP، انجام دادند. بر اساس نتایج بازه ضریب تبیین SDSM برای دما بین ۷۸ تا ۸۱ درصد و برای بارش تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5، بین ۸۲ تا ۸۶ درصد به‌دست آمد (Munawar et al., 2022). در این پژوهش، برای اولین بار به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی دما و بارش ایستگاه سینوپتیک بروجرد با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5 پرداخته شد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

ایستگاه سینوپتیک بروجرد با ارتفاع ۱۶۲۹ متر از سطح دریا در عرض جغرافیایی $33^{\circ} 55'$ شرقی و طول جغرافیایی $48^{\circ} 45'$ شمالی قرار دارد. شهر بروجرد در دامنه بلندترین دیواره زاگرس در ارتفاع ۱۵۵۰ تا ۱۵۷۱ متری از سطح دریا و بلندترین نقطه، در رشته‌کوه گرین با ارتفاع ۳۶۲۳ متر در غرب و پست‌ترین ناحیه آن، در دشت سیلاخور با ارتفاع تقریبی ۱۵۰۰ متر قرار دارد. قله کوه ولاش با ارتفاع ۳۶۲۳ متر در غرب، برنجه با ۳۵۸۵ متر و کوه میش پرور ۳۵۰۰ متر در جنوب غربی بروجرد قرار دارد. بروجرد دارای آب و هوای سرد کوهستانی با زمستان‌های پر برف و سرد و تابستان‌های معتدل است. تعداد روزهای یخبندان در برخی از نقاط این ناحیه به بیش از ۷۰ روز می‌رسد. در ۴۰ سال پیش، روزهای یخبندان بروجرد، ۱۰۰ روز بوده است. بیش‌ترین درجه حرارت در تابستان ۳۸ درجه و کم‌ترین آن در زمستان ۱۸ درجه زیر صفر برآورد شده که در برخی سال‌های سخت، تا ۳۵ درجه زیر صفر نیز رسیده است. میزان بارش سالانه شهرستان بروجرد حدود ۵۰۰ میلی‌متر است که یک‌چهارم آن در فصل بهار انجام می‌گیرد و میانگین دمای سالانه ۱۴/۶ است. در زمستان بارش‌ها بیش‌تر به‌صورت برف است (Jahangir et al., 2019). در شکل ۱ موقعیت استان لرستان و ایستگاه سینوپتیک بروجرد ارائه شده است.

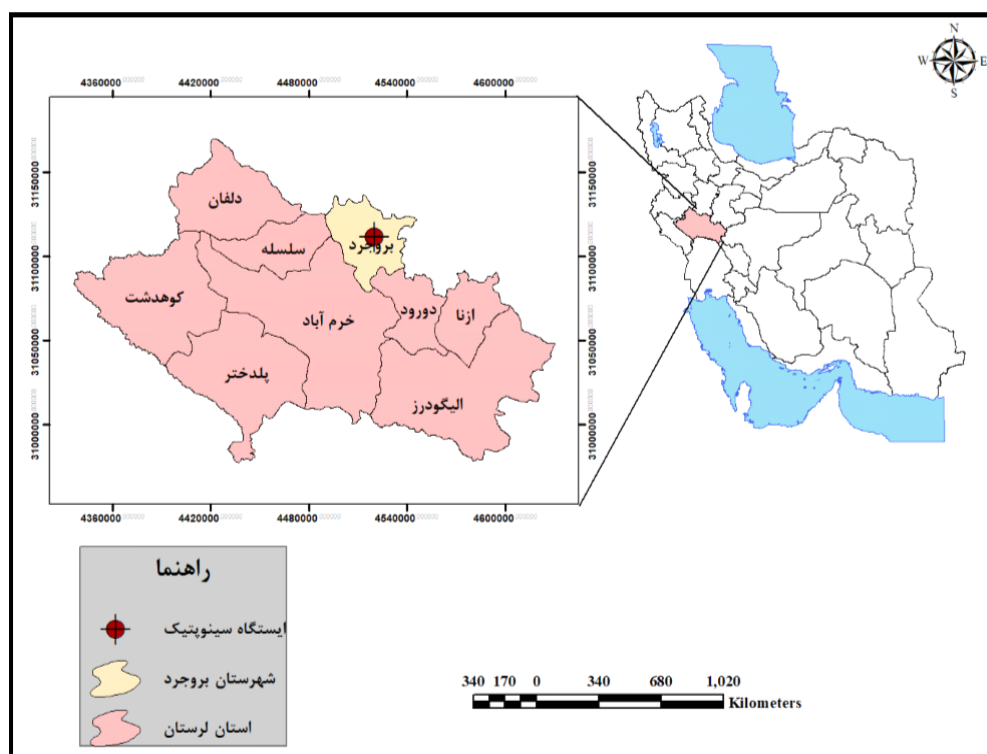
۲-۲- مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM

مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط ویلی و همکاران با عنوان نسخه SDSM 2.1 توسعه یافت. این مدل، ترکیبی از روش مولدهای هواشناسی آماری و توابع تغییر شکل‌یافته است و برای ارزیابی ارتباط بین متغیرهای ریزمقیاس محلی و متغیرهای بزرگ‌مقیاس جوی، از داده‌های مستقل مشاهداتی استفاده می‌کند. مدل SDSM جزء اولین ابزارهای کمکی برای ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم محلی است و بر اساس داده‌های روزانه اقلیمی محلی (بارش و دما) و داده‌های بزرگ‌مقیاس ناحیه‌ای

ولی در مورد پارامترهای مختلف نتایج متفاوتی به‌دست آمد که برای حداقل دما و بارندگی، سناریوی B₁ و برای حداکثر دما، سناریوی A₂ را با دقت زیادی پیش‌بینی کردند. در پژوهش Hemati and Miryaghoubzade (2021) اثرات تغییر اقلیم با استفاده از مدل HadCM3 و سناریوی A₂ و B₂ بر متغیرهای اقلیمی حوزه آبخیز آق‌چای آذربایجان غربی بررسی شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش بارش و همچنین افزایش دمای حداقل و حداکثر در اکثر ماه‌های سال در منطقه مورد مطالعه برای دوره ۲۰۷۰-۲۱۰۰ بود. در پژوهشی Lotfi et al. (2021) به پیش‌بینی دماهای بیشینه در سه استان کردستان، کرمانشاه و ایلام پرداختند. ایشان به این منظور از دو مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG و SDSM استفاده کردند. نتایج نشان داد که بر اساس هر دو مدل، میزان دمای بیشینه در دوره آینده نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. همچنین مدل SDSM از دقت بیشتری نسبت به مدل LARS-WG برخوردار است (Lotfi et al., 2021). همچنین، Tian et al. (2016) دامنه عدم قطعیت‌ها در ارزیابی اثر تغییر اقلیم (دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰) جریانهای حدی در حوضه رودخانه جین هوآ در شرق چین را بررسی کردند. ایشان از چهار سناریوی انتشار، سه مدل GCM و سه مدل هیدرولوژیکی استفاده کردند و همچنین بزرگی عدم قطعیت‌ها بر جریان‌های حدی را به‌ترتیب نزولی ناشی از ساختار مدل‌های هیدرولیکی، مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار به‌دست آوردند. Vergni and Todisco (2011)، به تحلیل عدم‌قطعیت شاخص بارش استاندارد در طی دوره ۱۹۵۱-۲۰۰۹ با کمک روش بوت استرپ در منطقه آبروزو ایتالیا پرداختند. نتایج نشان داد جهت محاسبه SPI توزیع پیرسون تپ ۳، ویبول، حد نهایی، تعمیم عادی و گاما همگی مناسب هستند، اما توزیع پیرسون تپ ۳ و تعمیم عادی دارای عملکرد بهتری است. همچنین نتایج نشان داد کاهش طول داده و مقیاس زمانی سبب افزایش عدم قطعیت می‌شود. در مطالعه‌ای (Al-Mukhtar and Qasim 2019) با استفاده از مدل SDSM، دما و بارندگی کشور عراق را پیش‌بینی کردند. در مجموع ۱۲ ایستگاه، واقع در سرتاسر این کشور مورد بررسی قرار گرفت. مدل با استفاده از ۷۰ درصد داده‌ها برای واسنجی و ۳۰ درصد باقی‌مانده برای صحت‌سنجی اجرا شد. سپس مدل واسنجی‌شده برای سناریوهای آینده CanESM2 به‌کار گرفته شد. این مطالعه عملکرد رضایت‌بخش SDSM را برای شبیه‌سازی حداکثر دما و بارش برای دوره‌های آینده نشان داد. (Munawar et al., 2022)، مطالعه‌ای با هدف ارزیابی تغییرات اقلیمی و هیدرولوژیکی حوضه‌های کوهستانی با استفاده از مدل آماری ریزمقیاس‌نمایی (SDSM) و مدل رواناب ذوب برف (SRM) برای قرن بیست‌ویکم

یک ارتباطات آماری برقرار می‌کند (Wilby et al., 2007). در مقایسه با مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG و شبکه عصبی مصنوعی، مدل SDSM کارایی بهتری دارد (Khan et al., 2006;). همچنین مدل SDSM با توجه به شاخص‌های خطاسنجی، عملکرد بهتری نسبت به مدل LARS-WG از خود نشان می‌دهد (Lotfi et al., 2021).

NCEP تنظیم می‌شود. بعد از آن، آب‌وهوای روزانه محلی برای دوره‌های پایه و آینده را با استفاده از متغیرهای بزرگ جوی ناشی شده از مدل‌های اقلیم جهانی شبیه‌سازی می‌کند (Wilby et al., 2002). مدل SDSM پیوند بین مدل رگرسیون خطی و تکنیک‌های تولید آب و هوای تصادفی را بهتر شرح می‌دهد و بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس جهانی اقلیم و متغیرهای هواشناسی محلی



شکل ۱- موقعیت ایستگاه سینوپتیک بروجرد

Figure 1 - Location of Boroujerd synoptic station

جدول ۱- سناریوهای مورد استفاده تحت مدل CanESM2 (Hewitson and Crane, 1992)

Table 1 - Scenarios used under the CanESM2 model (Hewitson and Crane, 1992)

سناریو	کشور و مؤسسه طراح	فرض‌های کلیدی
RCP8.5	تیم مدل‌سازی MESSAGE و مؤسسه بین‌المللی تحلیل سیستم‌های کاربردی اتریش (IIASA)	بدون اتخاذ هیچ‌گونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب‌وهوای کره زمین در خط سیر انتشار پیش خواهد رفت، به طوری که ادامه این روند منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌شود. در این هنگام غلظت در دی اکسید کربن به ۱۰۰۰ PPM رسیده و هم‌چنان این روند افزایش خواهد داشت.
RCP4.5	گروه مدل‌سازی MiniCAM و مؤسسه (JGCRI) در شمال غرب اقیانوس آرام	واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای، قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات بر مترمربع ثابت می‌ماند.
RCP2.6	تیم مدل‌سازی IMAGE از مؤسسه ارزیابی‌های محیطی هلند	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.

۳- نتایج و بحث

صحت‌سنجی مدل به این مفهوم است که نتایج گرفته‌شده پس از اجرای مدل با نتایجی که هدف ساخت سیستم بوده است، مطابقت می‌کند. شکل ۲ صحت‌سنجی پارامترهای اقلیمی تحت مدل CanESM2 را نشان می‌دهد. دوره زمانی ۱۹۹۰-۲۰۰۰ برای واسنجی و دوره زمانی ۲۰۰۱-۲۰۰۵ جهت صحت‌سنجی انتخاب شد. به‌منظور واسنجی مدل SDSM، ابتدا مدل برای دوره زمانی ۲۰۰۰-۱۹۹۰ اجرا شد. سپس داده‌های شبیه‌سازی‌شده با داده‌های مشاهداتی مقایسه شدند. نتایج این مقایسه در شکل ۲ آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در مدل SDSM مقادیر دمای حداکثر و حداقل نسبت به مقادیر بارش، بهتر پیش‌بینی شده است و داده‌های شبیه‌سازی‌شده به مقادیر مشاهداتی نزدیک‌تر است.

نتایج حاصل از مقایسه داده‌های مدل‌سازی‌شده و مشاهداتی طبق شاخص‌های خطاسنجی RMSE و R^2 در جدول ۲ آمده است. کم‌ترین و بیش‌ترین دقت مدل SDSM با شاخص R^2 به ترتیب مربوط به داده‌های بارش با مقدار ۰/۶۲ و داده‌های دمای حداکثر با مقدار ۰/۹۸ است. هم‌چنین بیش‌ترین دقت مدل با شاخص RMSE مربوط به داده‌های دمای حداقل با مقدار ۰/۶۹ و کم‌ترین دقت مربوط به داده‌های بارش و برابر با ۳/۹۹ به‌دست آمد.

۳-۱- تحلیل سناریوهای بارش

در این مرحله به‌منظور ریزمقیاس‌سازی پارامتر بارش حاصل از خروجی مدل CanESM2 تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، از مدل SDSM استفاده شد و بعد از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، تغییرات هر یک از سناریوها در سه بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰ نسبت به دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۰۵) مورد مقایسه قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل ۳ و جدول ۳ مشاهده می‌شود در تمامی سناریوها و دوره‌های مورد بررسی، مقادیر بارش دارای روند کاهشی است. بیش‌ترین میزان این کاهش مربوط به ماه ژانویه تحت سناریوی RCP8.5، دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و برابر با ۶۹/۲۲ درصد است.

۳-۲- تحلیل سناریوهای دمای حداقل

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود مقادیر به‌دست‌آمده از مدل CanESM2 نزدیک به مقادیر مشاهداتی است که نشان‌دهنده پیش‌بینی مناسب پارامتر دمای حداقل در ایستگاه سینوپتیک مورد مطالعه است. پس از بررسی صحت مدل، پارامتر اقلیمی دمای حداقل با اجرای مدل تا سال ۲۱۰۰ پیش‌بینی شد. به‌منظور مقایسه

در پنجمین گزارش منتشر شده IPCC در سال ۲۰۱۳، سناریوهای RCP معرفی شدند. همان‌گونه که در جدول ۱ آمده است سناریوهای RCP نشان‌دهنده محرکه‌های تابشی هستند. برای ارزیابی تغییرات اقلیمی آینده، از مدل گردش عمومی CANESM2 که در گزارش پنجم IPCC آمده است تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شده است. این مدل دارای شبکه‌بندی با ابعاد 64^*128 سلول (طول عرض جغرافیایی) است. طول جغرافیایی دارای وضوح 2^*1125 و عرض جغرافیایی نیز دارای وضوح 2^*1125 است. داده‌های NCEP و تاریخی مدل از سال ۱۹۶۱-۲۰۰۵ برای واسنجی و داده‌های سناریوی‌های RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 نیز برای برآورد تغییرات اقلیمی از سال ۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود.

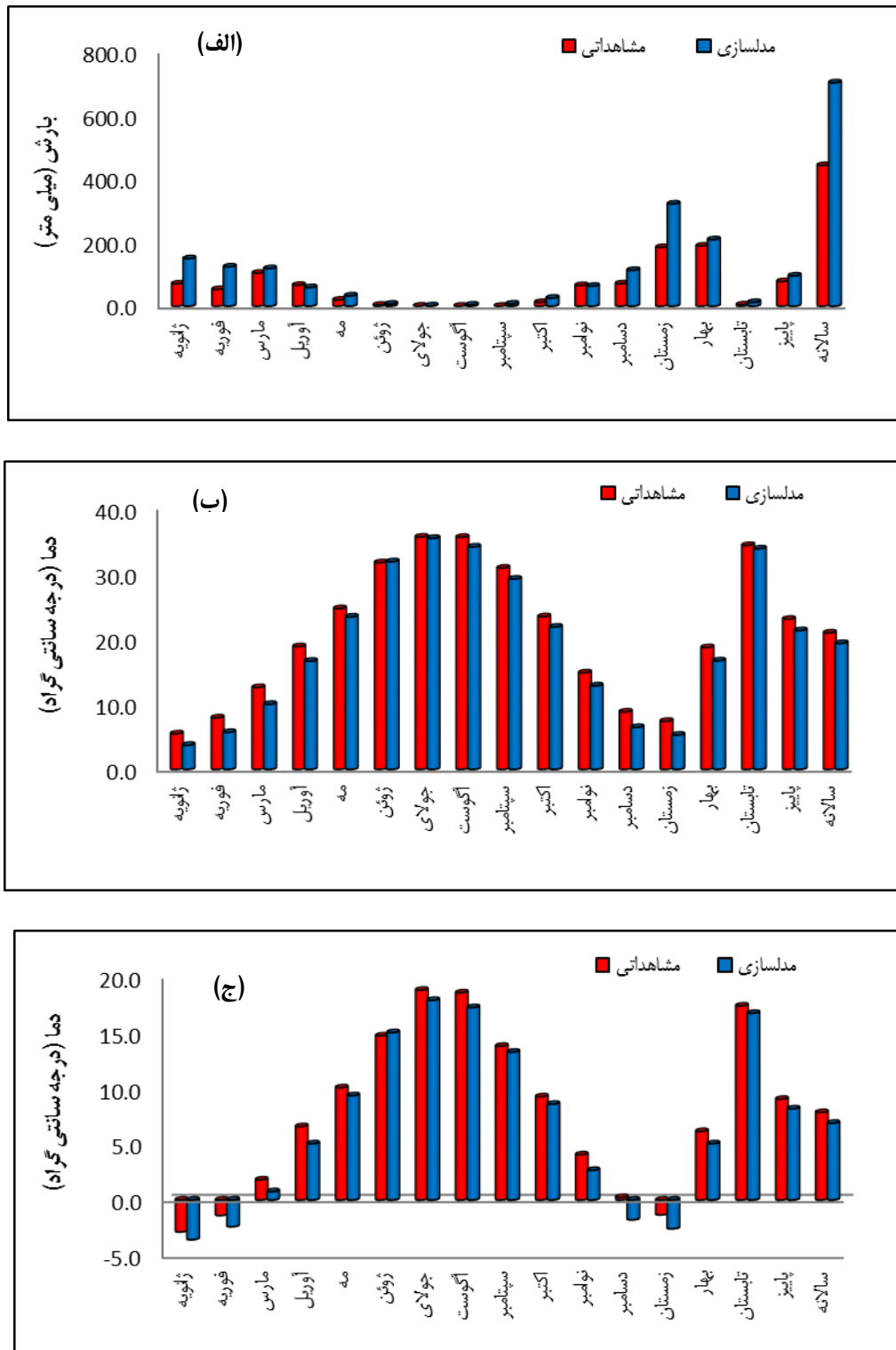
در این پژوهش از مدل اقلیمی CanESM2 تحت سه سناریوی RCP26، RCP45 و RCP85 در سه بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰ و از مدل SDSM نسخه ۴/۲ برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی استفاده شد. مدل CanESM2 چهارمین نسل از مدل‌های آب و هوایی است که توسط مرکز مدل‌سازی و تحلیل آب و هوایی کانادا، زیر نظر سازمان محیط زیست این کشور توسعه یافته است (Houshyaret al., 2018). جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM از شاخص‌های خطاسنجی R^2 و RMSE استفاده شد. R^2 (ضریب تعیین)، معیاری بی‌بعد است که درصد تبیین تغییرات متغیرهای وابسته در یک مدل رگرسیونی با متغیر مستقل را نشان می‌دهد. بهترین مقدار این ضریب برابر با یک است و نحوه محاسبه آن در رابطه زیر آورده شده است (Lotfi et al., 2021).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N x_o x_s}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x_o^2 \sum_{i=1}^N x_s^2}} \quad (1)$$

به‌عنوان مقیاسی برای نشان دادن اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده از مقادیر اندازه‌گیری به کار می‌رود و به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود (Lin et al., 2006).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_o - \bar{x}_s)^2}{N}} \quad (2)$$

در رابطه‌های قبل X_o داده‌های مشاهداتی، X_s داده‌های شبیه‌سازی شده و N تعداد داده‌ها است. در این مطالعه از ۳۰ درصد داده‌ها برای صحت‌سنجی و ۷۰ درصد داده‌ها برای واسنجی استفاده شد.



شکل ۲- صحت‌سنجی پارامترهای اقلیمی تحت مدل CanESM2: (الف) مقادیر بارش، (ب) دمای حداکثر و (ج) دمای حداقل
 Figure 2 – Validation of climatic parameters under the CanESM2 model: (a) precipitation, (b) maximum temperature, and (c) minimum temperature

جدول ۲- مقادیر آماره‌های آزمون مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل SDSM
Table 2 – Statistics values of calibration and validation test of SDSM model

صحت‌سنجی		واسنجی		پارامتر
R ²	RMSE	R ²	RMSE	
0.62	3.99	0.67	3.87	بارش
0.97	0.71	0.99	0.69	دمای حداقل
0.96	1.02	0.98	0.88	دمای حداکثر

حوزه تغییر اقلیم امری مهم به شمار می‌رود. در این پژوهش با استفاده از خروجی مدل CanESM2، تغییرات دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش در در سه بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰ نسبت به دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۰۵) مورد مقایسه قرار گرفت. واسنجی مدل SDSM برای ایستگاه سینوپتیک بروجرد برای هر کدام از پارامترهای اقلیمی دمای حداقل و حداکثر و بارش، مقدار متوسط ضریب تعیین را به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۹۸ و ۰/۶۷ را نشان داد که حاکی از کارایی مدل SDSM در ریزمقیاس کردن پارامترهای اقلیمی است. در این پژوهش دوره زمانی ۱۹۹۱-۲۰۰۰ جهت واسنجی و دوره زمانی ۲۰۰۱-۲۰۰۵ جهت صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که در تمامی سناریوها و دوره‌های مورد بررسی بارش، روند کاهشی دارد. بیش‌ترین مقدار کاهش بارندگی مربوط به ماه ژانویه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ و سناریوی RCP8.5 با کاهش ۶۹/۲۲ درصدی است. همچنین مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM برای پارامتر دمای حداقل روندی افزایشی را پیش‌بینی کرد که بیش‌ترین مقدار این افزایش مربوط به ماه اکتبر در دوره زمانی ۲۰۶۱-۲۰۸۰، تحت سناریوی RCP4.5 و برابر با ۴/۹۰ درجه سانتی‌گراد است. دمای حداکثر نیز در هر سه سناریو دارای روند افزایشی است که بیش‌ترین افزایش آن مربوط به سناریوی RCP4.5 در ماه اکتبر حاصل از این پژوهش، مطالعه Jahangir et al. (2019) مبتنی بر روند افزایشی میانگین مجموع پارامترهای هواشناسی در ایستگاه سینوپتیک بروجرد با استفاده از مدل HadCM3 در دوره‌های آبی را مورد تأیید قرار می‌دهد. با توجه به این نتایج کاهش ذخایر هیدرولوژیکی در دوره‌های آینده بر اثر افزایش شدت تبخیر و تعرق و کاهش بارندگی، تهدیدی غیر قابل انکار است. از جمله تمهیداتی که به کاهش اثرات ناگوار این تغییرات آب و هوایی می‌توان در نظر گرفت تقویت پوشش گیاهی منطقه جهت ذخیره و نفوذ باران به سفرهای آب زیرزمینی و ایجاد راهکارهای سازگار با شرایط آب و هوایی جدید توسط مسئولان و سیاستگذاران این حوزه است.

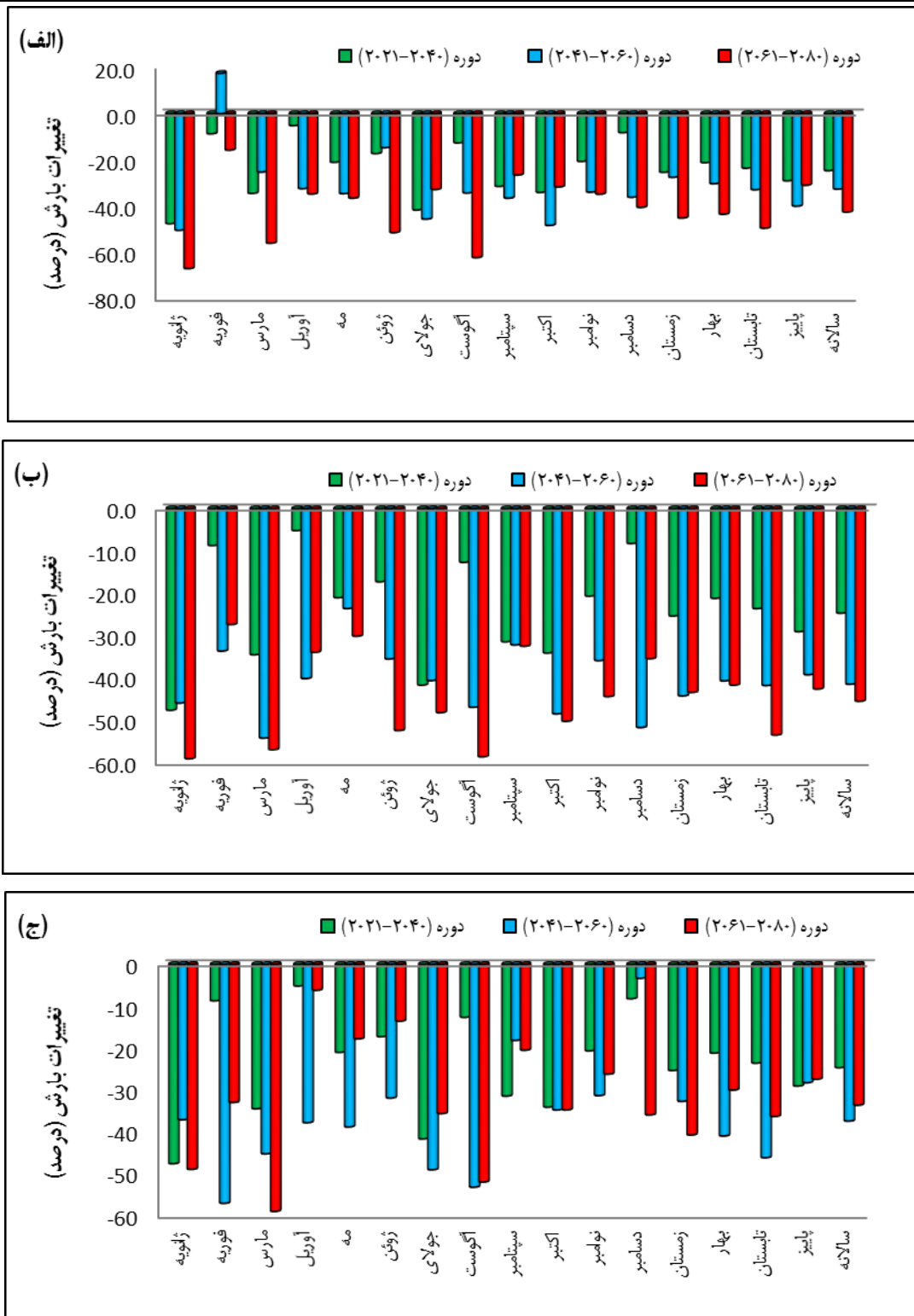
منطقی مقادیر پایه و دوره شبیه‌سازی شده، دوره آینده در سه بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰ و دوره پایه؛ یعنی ۱۹۹۰-۲۰۰۵ تحت سناریوهای مختلف با هم مقایسه شده‌اند که در شکل ۴ و جدول ۴ آورده شده است. نتایج نشان داد که در هر سه سناریو و هر سه دوره زمانی، پارامتر دما دارای روند افزایشی است. بیش‌ترین مقدار افزایش دمای حداقل مربوط به سناریوی RCP4.5 و اکتبر دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰، برابر با ۴/۹۰ درجه سانتی‌گراد و کم‌ترین مقدار افزایش دمای حداقل مربوط به ماه می و دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریوی RCP2.6، برابر با ۰/۸۴ درجه سانتی‌گراد است.

۳-۳- تحلیل سناریوهای دمای حداکثر

پس از بررسی صحت مدل، همانطور که در شکل ۵ و جدول ۵ مشاهده می‌شود، به‌منظور پیش‌بینی پارامتر اقلیمی دمای حداکثر، مدل تحت سناریوهای مختلف اجرا شد. سپس به‌منظور مقایسه منطقی مقادیر دوره پایه و دوره شبیه‌سازی شده، مقادیر مربوط به سه بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰ با دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۰۵)، با یک‌دیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که مقادیر دمای حداکثر تحت هر سه سناریوی مورد بررسی، نسبت به دوره پایه دارای روند افزایشی است. بیش‌ترین مقدار افزایش دمای حداکثر در ماه اکتبر دوره زمانی ۲۰۶۱-۲۰۸۰ و مربوط به سناریوی RCP4.5 برابر با ۷/۰۲ درجه سانتی‌گراد است. همچنین کم‌ترین افزایش دمای حداکثر در ماه ژوئن، دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریوی RCP2.6 و برابر با ۰/۹۶ درجه سانتی‌گراد است.

۴- نتیجه‌گیری

پارامترهای اقلیمی نظیر دما و بارندگی تحت‌تأثیر تغییرات اقلیمی در درازمدت افزایش و یا کاهش می‌یابند. به‌منظور مدیریت پایدار پیامدهای تغییر اقلیم از جمله خشکسالی، سیل و افزایش رواناب، انجام مطالعات در



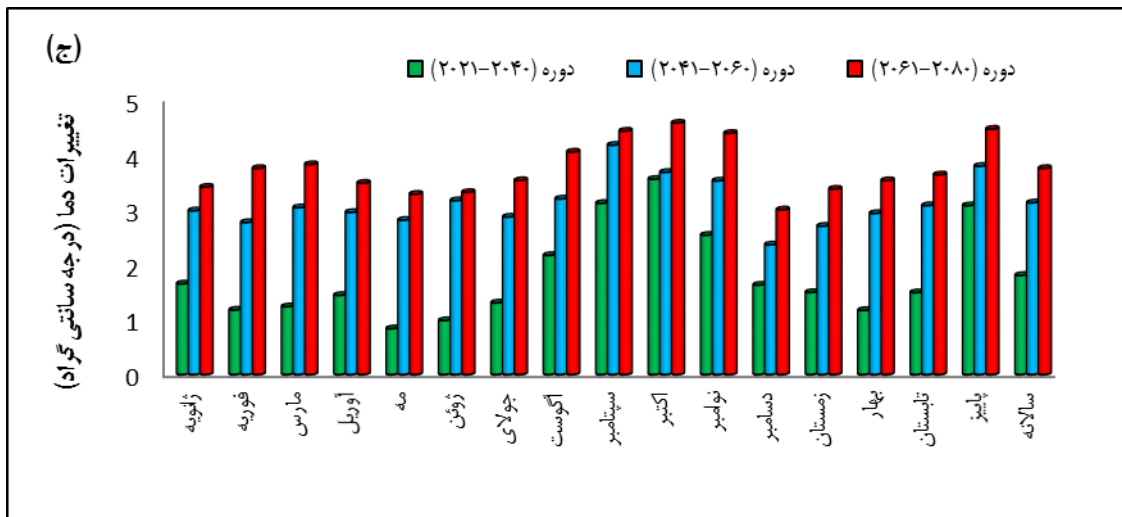
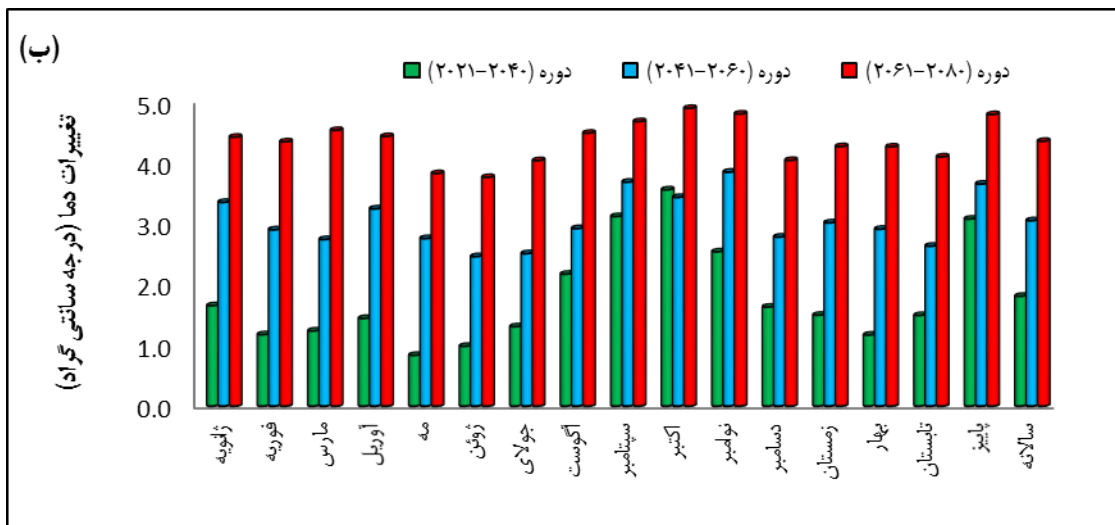
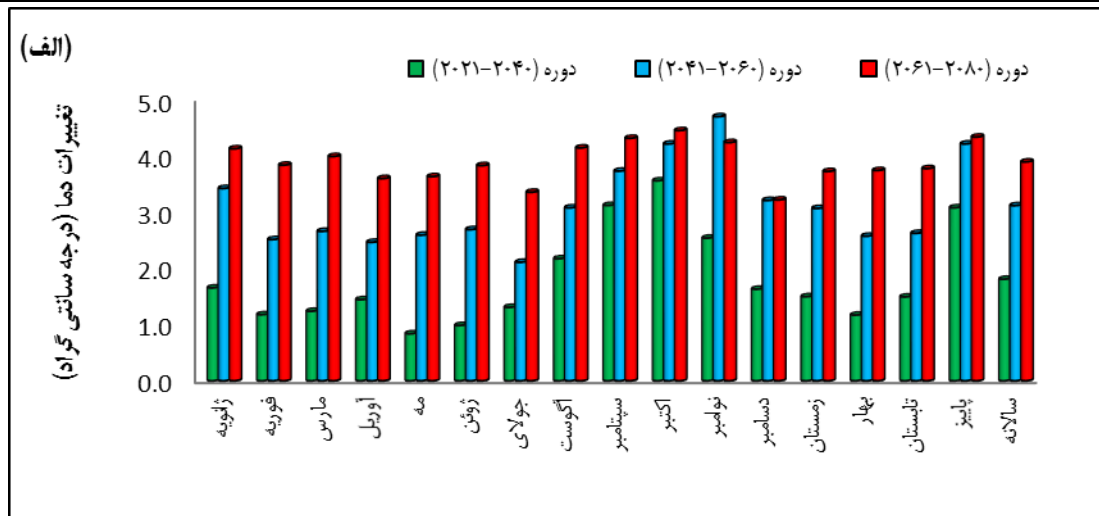
شکل ۳- تغییرات بارش دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۰۵) نسبت به سه دوره آینده تحت مدل CanESM2: (الف) سناریوی RCP2.6، (ب) سناریوی RCP4.5 و (ج) سناریوی RCP8.5

Figure 3- Changes in precipitation of the base period (1990-2005) compared to the next three periods under the CanESM2 model: (a) RCP2.6 scenario, (b) RCP4.5 scenario, and (c) RCP8.5 scenario

جدول ۳- تغییرات بارش دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۰۵) نسبت به سه دوره آینده تحت مدل CanESM2

Table 3- Changes in precipitation of the base period (1990-2005) compared to the next three periods under the CanESM2 model

زمان	دوره (2021-2040)			دوره (2041-2060)			دوره (2061-2080)		
	RCP26	RCP45	RCP85	RCP26	RCP45	RCP85	RCP26	RCP45	RCP85
ژانویه	-47.50	-41.03	-69.22	-50.36	-45.82	-37.02	-66.87	-58.94	-48.84
فوریه	-8.68	-4.63	3.59	17.44	-33.56	-56.94	-15.73	-27.29	-32.90
مارس	-34.41	-58.40	-67.03	-25.21	-54.08	-45.15	-55.91	-56.80	-58.86
آوریل	-5.16	0.53	10.54	-32.38	-40.03	-37.72	-34.67	-33.84	-6.16
می	-20.98	-12.35	-38.03	-34.53	-23.53	-38.73	-36.47	-30.05	-17.75
ژوئن	-17.23	-58.19	-34.23	-14.68	-35.41	-31.86	-51.34	-52.29	-13.53
جولای	-41.59	-55.11	-60.77	-45.52	-40.51	-48.93	-32.76	-48.07	-35.54
اگوست	-12.64	6.69	4.04	-34.24	-46.80	-53.09	-62.15	-58.49	-51.87
سپتامبر	-31.38	-38.74	-48.69	-36.47	-32.12	-18.10	-26.48	-32.41	-20.45
اکتبر	-34.02	-27.87	-48.47	-48.23	-48.36	-34.69	-31.63	-50.12	-34.68
نوامبر	-20.61	-31.53	-21.61	-33.88	-35.80	-31.26	-34.75	-44.29	-26.15
دسامبر	-8.20	-42.86	-43.23	-36.08	-51.58	-3.30	-40.46	-35.36	-35.87
زمستان	-25.28	-41.03	-46.88	-27.48	-44.13	-32.64	-45.04	-43.30	-40.65
بهار	-21.14	-49.54	-39.24	-30.24	-40.59	-40.89	-43.41	-41.60	-29.95
تابستان	-23.55	-28.77	-29.32	-32.83	-41.68	-46.06	-49.44	-53.36	-36.24
پاییز	-28.98	-38.74	-41.42	-39.92	-39.14	-28.20	-30.91	-42.51	-27.37
سالانه	-24.62	-43.27	-38.95	-32.57	-41.37	-37.34	-42.47	-45.39	-33.56



شکل ۴- تغییرات دمای حداقل دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۰۵) نسبت به سه دوره آینده تحت مدل CanESM2: (الف) سناریوی RCP2.6، (ب)

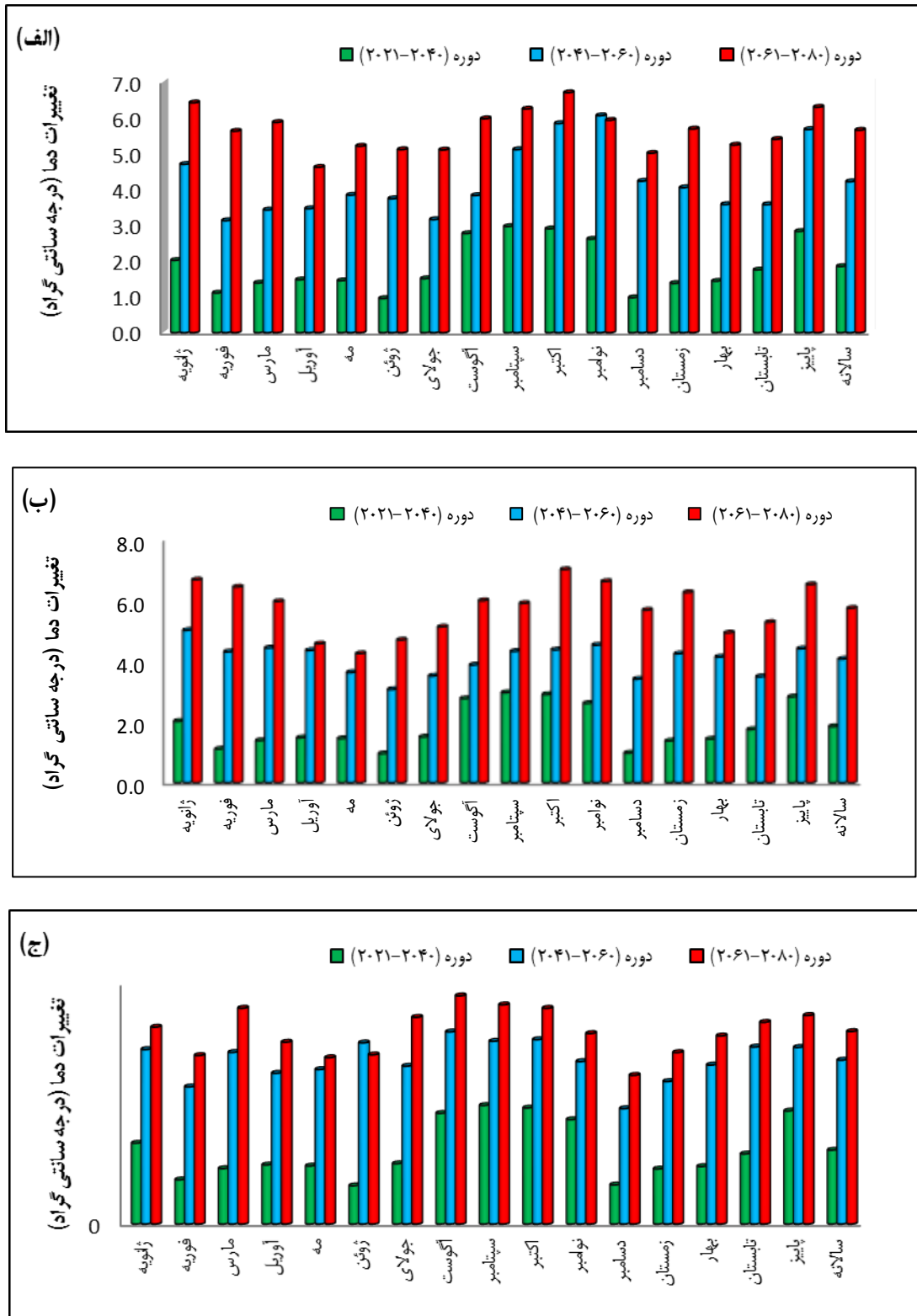
سناریوی RCP4.5 و (ج) سناریوی RCP8.5

Figure 4- Minimum temperature changes of the base period (1990-2005) compared to the next three periods under the CanESM2 model: (a) RCP2.6 scenario, (b) RCP4.5 scenario, and (c) RCP8.5 scenario

جدول ۴- تغییرات دمای حداقل دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۰۵) نسبت به سه دوره آینده تحت مدل CanESM2

Table 4- Minimum temperature changes of the base period (1990-2005) compared to the next three periods under the CanESM2 model

زمان	دوره (2021-2040)			دوره (2041-2060)			دوره (2061-2080)		
	RCP26	RCP45	RCP85	RCP26	RCP45	RCP85	RCP26	RCP45	RCP85
ژانویه	1.65	1.71	1.87	3.42	3.35	2.98	4.13	4.42	3.41
فوریه	1.18	1.21	1.34	2.51	2.90	2.77	3.84	4.35	3.75
مارس	1.24	1.25	1.35	2.66	2.74	3.04	3.99	4.53	3.83
آوریل	1.44	1.45	1.74	2.46	3.24	2.95	3.60	4.43	3.49
می	0.84	0.97	0.98	2.59	2.76	2.81	3.63	3.82	3.29
ژوئن	0.98	0.99	1.05	2.69	2.46	3.17	3.83	3.76	3.32
جولای	1.31	1.42	1.45	2.11	2.51	2.87	3.35	4.04	3.53
اگوست	2.17	2.09	2.87	3.08	2.92	3.20	4.14	4.49	4.05
سپتامبر	3.12	3.16	3.54	3.73	3.68	4.18	4.31	4.68	4.44
اکتبر	3.56	3.54	3.98	4.21	3.43	3.68	4.45	4.90	4.58
نوامبر	2.54	2.87	3.05	4.70	3.85	3.53	4.24	4.80	4.39
دسامبر	1.63	1.69	1.87	3.21	2.78	2.36	3.22	4.04	3.00
زمستان	1.50	1.64	1.69	3.06	3.01	2.70	3.72	4.27	3.38
بهار	1.17	1.98	1.98	2.57	2.91	2.93	3.74	4.26	3.53
تابستان	1.49	1.54	1.87	2.62	2.63	3.08	3.77	4.10	3.64
پاییز	3.08	3.15	3.25	4.21	3.65	3.79	4.33	4.79	4.47
سالانه	1.81	2.02	2.13	3.12	3.05	3.13	3.89	4.36	3.76



شکل ۵- تغییرات دمای حداکثر دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۰۵) نسبت به سه دوره آینده تحت مدل CanESM2: (الف) RCP2.6، (ب) سناریوی RCP4.5 و (ج) سناریوی RCP8.5

Figure 5 – Changes in maximum temperature of the base period (1990-2005) compared to the next three periods under the CanESM2 model: (a) RCP2.6 scenario, (b) RCP4.5 scenario, and (c) RCP8.5 scenario

جدول ۵- تغییرات دمای حداکثر دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۰۵) نسبت به سه دوره آینده تحت مدل CanESM2

Table 5- Maximum temperature changes of the base period (1990-2005) compared to the next three periods under the CanESM2 model

زمان	دوره (2021-2040)			دوره (2041-2060)			دوره (2061-2080)		
	RCP26	RCP45	RCP85	RCP26	RCP45	RCP85	RCP26	RCP45	RCP85
ژانویه	2.02	2.14	2.34	4.70	5.02	4.37	6.42	6.68	4.93
فوریه	1.11	1.23	1.25	3.13	4.31	3.43	5.63	6.44	4.22
مارس	1.39	1.38	1.40	3.43	4.43	4.29	5.87	5.96	5.40
آوریل	1.48	1.37	1.58	3.46	4.35	3.77	4.62	4.57	4.55
می	1.45	1.40	1.59	3.84	3.63	3.87	5.21	4.25	4.16
ژوئن	0.96	1.08	1.02	3.74	3.07	4.53	5.11	4.70	4.23
جولای	1.51	1.35	1.67	3.16	3.51	3.95	5.10	5.12	5.17
اگوست	2.77	2.87	2.87	3.83	3.88	4.81	5.98	5.99	5.71
سپتامبر	2.97	3.00	2.99	5.11	4.33	4.57	6.25	5.90	5.48
اکتبر	2.90	2.98	2.98	5.84	4.37	4.61	6.70	7.02	5.40
نوامبر	2.61	2.74	2.78	6.06	4.53	4.07	5.93	6.62	4.77
دسامبر	0.98	1.00	1.02	4.23	3.41	2.89	5.01	5.68	3.72
زمستان	1.38	1.28	1.48	4.05	4.24	3.57	5.69	6.26	4.29
بهار	1.44	1.38	1.55	3.58	4.14	3.98	5.24	4.93	4.71
تابستان	1.75	1.79	1.87	3.58	3.49	4.43	5.40	5.28	5.05
پاییز	2.83	2.78	2.99	5.67	4.41	4.42	6.30	6.52	5.22
سالانه	1.85	1.89	1.98	4.22	4.07	4.10	5.66	5.74	4.82

منابع

جهانگیر، م.ح.، نوروزی، ا.، و یاراحمدی، ی. (۱۳۹۷). بررسی روند تغییرات پارامترها یاقلمی شهرستان بروجرد در ۲۰ سال آتی با استفاده از مدل HADCM3/کوهیدرولوژی، (۴)، ۵(۴)، ۱۳۴۵-۱۳۵۳.

حسینی، س.ج.، قربانی، م.ح.، و مساح بوانی، ع. (۱۳۹۴). مدل‌سازی بارش- رواناب در شرایط تغییر اقلیم به‌منظور پیش‌بینی جریان‌ات آبی حوزه صوفی‌چای. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، (۱۱)، ۶(۱۱)، ۱-۱۴.

روان، و.، و ناظم‌السادات، س.م. (۱۳۹۰). پیش‌بینی نوسان‌های دما و بارش در پهنه مرکزی استان فارس برای دوره‌ی زمانی ۲۰۱۱-۲۰۴۰ با کاربرد شبیه ECHAM5. مهندسی منابع آب، (۱۰)، ۴(۱۰)، ۵۱-۶۲.

صمدی، س.ز.، مساح بوانی، ع.، و مهدوی، م. (۱۳۸۶). بررسی تأثیر روش‌های کوچک مقیاس کردن رگرسیون بر رژیم سیلاب

ثانی‌خانی، ه.، دین‌پژوه، ی.، پورسیف، س.، زمانزاده قویدل، س.، و صولتی، ب. (۱۳۹۲). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه‌های آبریز (مطالعه موردی: حوضه آبریز آبی چای در استان آذربایجان شرقی). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، (۶)، ۲۷(۶)، ۱۲۲۵-۱۲۳۴.

جهانگیر، م.ح.، امرایی، ن.، و نوروزی، ا. (۱۳۹۹). پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی دما و بارش توسط مدل چندگانه خطی SDSM (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک تهران). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، (۲۱)، ۱۱(۲۱)، ۳۰۳-۳۱۱.

ریمقیاس‌نمایی SDSM در حوزه آبخیز آق‌چای (آذربایجان غربی). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۲(۳)، ۹۵-۱۰۷.

هوشمند، د.، و خردادی، م.ج. (۱۳۹۳). بررسی عدم قطعیت مدل‌های AOGCM و سناریوهای انتشار در برآورد پارامترهای اقلیمی (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک مشهد). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۳(۳)، ۷۷-۹۲.

هوشیار، م.، سبحانی، ب.، و حسینی، س. (۱۳۹۷). چشم‌انداز تغییرات دماهای حداکثر ارومیه با استفاده از ریزگردانی آماری خروجی مدل CanESM2. جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۲(۶۳)، ۳۰۵-۳۲۵.

رودخانه. گزارش نهایی کارگاه فنی تغییرات اقلیم در مدیریت منابع آب، کمیته ملی آبیاری و زهکشی، ۱۸ صفحه.

لطفی، م.، کامالی، غ.، مشکوتی، ا.، و ورشوایان، و. (۱۴۰۰). پیش‌نگری دماهای بیشینه با استفاده از مدل‌های جهانی اقلیم تحت سناریوهای RCP و ریزمقیاس گردانی مدل‌های LARS-WG و SDSM در غرب کشور. فصلنامه جغرافیای طبیعی، ۱۴، ۱۱۵-۱۳۰.

همتی، ل.، و میریعقوب زاده، م.ج. (۱۴۰۰). پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در دوره آتی بر پایه مدل HadCM3 با استفاده از مدل

References

- Al-Mukhtar, M., & Qasim, M. (2019). Future predictions of precipitation and temperature in Iraq using the statistical downscaling model. *Arabian Geosciences*, 12(2), 25.
- Fawzy, S., I. Osman, A., Doran, J., & W. Rooney, D. (2020). Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 2069–2094.
- Gleick, P.H. (1989). Climate change, hydrology, and water resources. *Reviews of Geophysics*, 27(3), 329–344.
- Hemati, L., & Miryaghoubzadeh, M. (2021). Forecasting of climate variables in future periods based on HadCM3 Data using statistical downscaling model (SDSM) in Agh-Chay Basin (West Azarbayjan). *Journal of Watershed Management Research*, 12(23), 95–107.
- Hewitson, B.C., & Crane, R.G. (1992). Large-scale atmospheric controls on local precipitation in tropical Mexico. *Geophysical Research Letters*, 19(18), 1835–1838.
- Hooshmand, D.A., & Khordadi, M.J. (2014). Investigation of uncertainty of AOGCM models and diffusion scenarios in estimating climatic parameters (Case study: Mashhad Synoptic Station). *Geography and Environmental Hazards*, 3(3), 77-92 (in Persian).
- Hosseini, S.H., Ghorbani, M., & Massah Bavani, A. (2015). Modeling rainfall-runoff in climate change to predict future flows of Sufi Chai watershed. *Journal of Watershed Management Research*, (11)6, 1-14 (in Persian).
- Houshyar, M., Sobhani, B., & Hosseini, S.A. (2018). Future Projection of maximum temperature in Urmia through downscaling output of Canesm2 Model. *Geography and Planning*, 22(63), 305-325 (in Persian).
- IPCC, (2022). Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC, (2007). Aviation and the Global Atmosphere. AR4 Climate Change 2007.
- Jahangir, M.H., Amrai, N., & Norozi, E. (2020). Predicting variables climate, temperature and precipitation by multiple linear the model SDSM (Case study: Tehran Synoptic Station). *Journal of Watershed Management Research*, 11(21), 303-311 (in Persian).
- Jahangir, M.H., Norozi, E., & Yarahmadi, Y. (2019). Investigation of Climate Parameters' Changes in Borujerd City in Next 20 Years through the Using HADCM3 Model. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 5(4), 1345-1353 (in Persian).
- Khan, M.S., Coulibaly, P., & Dibike, Y. (2006). Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), 357–382.
- Lin, J.Y., Cheng, C.T., & Chau, K.W. (2006). Using support vector machines for long-term discharge prediction. *Hydrological Sciences Journal*, 51(4), 599–612.
- Lotfi, M., Kamali, G., Mashkooti, A.H., & Varshavian, V. (2021). Predicting maximum temperatures using global climate models under RCP scenarios and microscaling LARS-WG and SDSM models in the west of the country. *Quarterly Journal of Physical Geography*, 14, 115-130 (in Persian).
- Munawar, S., Tahir, M.N., & Baig, M.H.A. (2022). Twenty-first century hydrologic and climatic changes over the scarcely gauged Jhelum river basin of Himalayan region using SDSM and RCPs. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(8), 11196–11208.
- Ravan, W., Nazim al-Sadat, S.M.J. (2011). The projected fluctuations in temperature and precipitation over the central parts of the Province of Fars for the 2011-2040 period using the Echam5 Model. *Water Resources Engineering*, 4(10), 51-62 (in Persian).
- Samadi, Z., Masahbavani, A., & Mahdavi, M. (2007). Study of the effect of small regression scaling methods on river flood regime. Final report of technical workshop on the effects of climate change on water resources management, National

- Committee for Irrigation and Drainage, 18 pages (in Persian).
- Sanikhani, H., Dinpajoh, Y., Zamanzadeh Ghavidel, S., & Solati, B. (2014). A study on the impact of climate change on the runoff of the Ajichai basin in East Azerbaijan using the data of general circulation models of the atmosphere (GCMS) and its microscale by LARS-WG model. *Water and Soil*, 27(6), 1225-1234 (in Persian).
- Semenov, M.A., & Stratonovitch, P. (2010). Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 41(1), 1-14.
- Sobhani, B., Eslahi, M., & Babaeian, I. (2016). Efficiency of Statistical Downscaling Models of SDSM and LARS-WG in the Simulation of Meteorological Parameters in Lake Urmia Basin. *Physical Geography Research Quarterly*, 47(4), 499-516 (in Persian).
- Thuiller, W. (2007). Climate change and the ecologist. *Nature*, 448(7153), 550-552.
- Tian, Y., Xu, Y.P., Booij, M.J., & Cao, L. (2016). Impact assessment of multiple uncertainty sources on high flows under climate change. *Hydrology Research*, 47(1), 61-74.
- Vergni, L., & Todisco, F. (2011). Spatio-temporal variability of precipitation, temperature and agricultural drought indices in Central Italy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(3), 301-313.
- Wilby, R.L., Dawson, C.W., & Barrow, E.M. (2002). SDM- A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17(2), 145-157.
- Wilby, R.L., & Dawson, C.W. (2007). SDSM 4.2-A Decision Support Tool for the Assessment of Regional Climate Change Impacts, Version 4.2 User Manual. Lancaster University, Lancaster/Environment Agency of England and Wales, Lancaster, 1-94.
- Yang, N., Men, B.H., & Lin, C.K. (2011). Impact analysis of climate change on water resources. *Procedia Engineering*, 24, 643-648.