

ORIGINAL ARTICLE

Projection of Temperature and Precipitation Changes in Northwestern Cities of Iran under SSP Scenarios of the NorESM2 Climate Model

Roghayeh Maleki Meresht¹, Bromnd Salahi^{2*}

1. Ph.D. of Climatology,
Department of Physical
Geography, University of
Mohaghegh Ardabili, Ardabil,
Iran.

2. Professor, Department of
Physical Geography,
University of Mohaghegh
Ardabili, Ardabil, Iran.

* **Correspondence**
Bromnd Salahi
Email: salahi@uma.ac.ir

Receive Date: 10/Jan/2024

Revise Date: 25/Nov/2024

Accept Date: 27/Dcc/2024

How to cite

Maleki Meresht, R., & Salahi,
B. (2026). Projection of
Temperature and Precipitation
Changes in Northwestern Cities
of Iran under SSP Scenarios of
the NorESM2 Climate Model.
Urban Ecological Research,
16(4), 19-40

ABSTRACT

The aim of the current research is to forecast temperature and precipitation changes in northwest of Iran under SSP scenarios of the NorESM2 model. By using Sen's slope estimator, the temperature and precipitation of selected cities were trended during 1985–2014. Then, using SDSM6.1 software, the mentioned parameters were simulated for the base period (1985–2014) and predicted for 2015–2043. To evaluate the performance of the model, the error measurement indices MSE, RMSE and MAE were used. The innovation of this research is the use of new SSP scenarios to predict the important climatic parameters of temperature and precipitation in prominent cities in the field of Iranian tourism. The results of the test of Sen's slope estimator indicated an upward trend of the maximum temperature in all the studied cities at the 99% confidence level except Takab and Sardasht cities. According to the results of precipitation trending, Takab and Maragheh had a significant decreasing trend at the 99% confidence level, and Jolfa and Mako had a significant increasing trend at the 95% confidence level. Based on the modeling results, precipitation will increase in all the studied cities in spring, and the highest percentage of increase will be in Jolfa (20%). Precipitation will decrease in summer and autumn, and the highest percentage of decrease was predicted for Maragheh (33%). The maximum temperature will increase in all the studied cities, especially in the cold months, which will be up to 2 °C.

KEYWORDS

Temperature Changes, Precipitation Changes, Ssp Scenarios, NorESM2 Climate Model, Northwest of Iran.



Copyright © 2026, by the author (s). Published by Payame Noor University, Tehran, Iran
This is an open access article under the CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

<https://grup.journals.pnu.ac.ir/>

«مقاله پژوهشی»

پیش‌نمایی تغییرات دما و بارش در شهرهای شمال غرب ایران تحت سناریوهای SSP مدل اقلیمی NorESM2

رقیه ملکی مرشت^۱، برومند صلاحی^{۲*}

چکیده

هدف پژوهش حاضر پیش‌نمایی تغییرات دما و بارش در شمال غرب ایران تحت سناریوهای SSP مدل NorESM2 است. با بهره‌گیری از آزمون تخمین گر شیب سن، دما و بارش شهرهای منتخب طی ۱۹۸۵-۲۰۱۴ روندیابی شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار SDSM6.1، پارامترهای مذکور برای دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) شبیه‌سازی و برای سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۴۳ پیش‌بینی گردیدند. برای ارزیابی عملکرد مدل، از شاخص‌های خطاسنجی RMSE، MAE و استفاده از سناریوهای جدید SSP برای پیش‌بینی پارامتر مهم اقلیمی دما و بارش در شهرهای مطرح در زمینه گردشگری ایران، نوآوری این پژوهش است. نتایج آزمون شیب سن حاکی از روند صعودی دمای حداکثر در همه شهرهای مورد مطالعه در سطح اطمینان ۹۹٪ به‌جز شهرهای تکاب و سردشت بود. طبق نتایج روندیابی بارش، تکاب و مراغه در سطح اطمینان ۹۹٪ دارای روند کاهشی معنادار و جلفا و ماکو در سطح اطمینان ۹۵٪ دارای روند افزایشی معنادار بودند. بر اساس نتایج مدل‌سازی، بارش در همه شهرهای مورد مطالعه در فصل بهار افزایش خواهد داشت که بالاترین درصد افزایش مربوط به جلفا خواهد بود (۲۰٪). بارش در تابستان و پاییز کاهش خواهد یافت که بیش‌ترین درصد کاهش برای مراغه پیش‌بینی شد (۳۳٪). دمای حداکثر در همه شهرهای مورد مطالعه به‌ویژه در ماه‌های سرد افزایش خواهند داشت که میزان این افزایش تا ۳°C خواهد بود.

واژه‌های کلیدی

تغییرات دما، تغییرات بارش، سناریوهای SSP، مدل اقلیمی NorESM2، شمال غرب ایران.

۱. دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۲. استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

*نویسنده مسئول: برومند صلاحی

رایانامه: salahi@uma.ac.ir

۱۴۰۲/۱۰/۲۰

۱۴۰۳/۰۹/۰

۱۴۰۳/۴/۰

استناد به این مقاله:

ملکی مرشت، رقیه و صلاحی، برومند (۱۴۰۴).
پیش‌نمایی تغییرات دما و بارش در شهرهای
شمال غرب ایران تحت سناریوهای SSP مدل
اقلیمی NorESM2. فصلنامه علمی
پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری، ۱۶(۴)، ۱۹-۴۰.

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. © ۱۴۰۴ ناشر این مقاله، دانشگاه پیام نور است.
این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.



This is an open access article under the CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://grup.journals.pnu.ac.ir/>

مقدمه

تغییرات اقلیمی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی عصر حاضر است. این تغییرات نه تنها بر دمای هوا، بلکه بر الگوهای بارش و چرخه‌های آبی نیز تأثیرات چشمگیری دارند. تغییرات اقلیم به‌عنوان یک پدیده مستند و موجب تغییر در الگوهای آب و هوایی شناخته شده است و این شرایط به احتمال زیاد تداوم خواهد داشت (De Oliveira, 2019). این تغییرات می‌توانند علاوه بر متغیرهای اقلیمی، سایر اجزای یک سیستم مانند منابع آب و خاک را نیز متأثر سازد (Hipit et al, 2019؛ سرابی و همکاران، ۱۳۹۹). IPCC به‌عنوان مهم‌ترین مرجع پژوهش‌های پیش‌بینی تغییر اقلیم، تاکنون شش گزارش ارزیابی از تغییر اقلیم را منتشر کرده است. در حال حاضر، مدل‌های مختلف گردش عمومی جو^۱ دقیق‌ترین ابزار جهت کمی نمودن اثر تغییر اقلیم روی پارامترهای هواشناسی هستند (Mason, 2004).

در گزارش اخیر IPCC جدیدترین مدل‌های تغییر اقلیم با عنوان مدل‌های سری CMIP6 می‌باشند که اقلیم آینده را تحت سناریوهای انتشار SSP شبیه‌سازی می‌کنند (IPCC, 2021). افزایش دمای سطح زمین و تغییر در الگوی بارش، پدیده‌های غالب ناشی از تغییر اقلیم بوده و این دو، کمابیش سایر بخش‌های چرخه آب را نیز مختل خواهند ساخت (احمدآبادی و صدیقی فر، ۱۳۹۷). طبق ارزیابی گزارش پنجم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم^۲ میانگین سالانه دمای جهانی در دوره زمانی ۲۰۱۲-۱۸۸۰ به میزان ۰/۸۵ درجه سلسیوس افزایش یافته است که این افزایش به‌طور مستقیم منجر به تغییر در فراوانی وقوع مخاطراتی همچون خشکسالی، سیل و طوفان خواهد شد. بنابراین مدیریت صحیح منابع آب، به‌ویژه در مناطقی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک که بیش‌تر تحت تأثیر این مخاطرات هستند، امری ضروری می‌باشد (روشنی و حمیدی، ۱۴۰۰).

امروزه اکثر پژوهشگران علوم جوی بر مسئله گرمایش زمین اتفاق نظر دارند. در سراسر جهان، به دلیل تغییرات آب و هوایی و توسعه مداوم کاربری اراضی، شهرها با تغییرات چشمگیر فیزیکی و اقلیمی، مشکلات شدید زیست محیطی و اکولوژیکی و خطرات متعدد محیطی روبرو هستند (سامی و عبادی، ۱۴۰۳). طبق بررسی‌های انجام شده، تغییرات اقلیمی تهدیدی جدی بر تفریح‌های زمستانه شمال شرق ایالات

متحده بوده و پیامدهای بالقوه آن بر کسب‌وکار و فعالیت‌های اجتماعی منطقه که ارتباط تنگاتنگی با توریسم زمستانه دارند قابل ملاحظه است (Scott, 2008). همچنین پژوهش‌ها نشان می‌دهند که تحت تأثیر گرمایش جهانی و افزایش دما، پوشش برف بین ۱۰ الی ۳۹ درصد در دهه ۲۰۲۰ و ۲۲ الی ۸۵٪ در ۲۰۵۰ کاهش خواهد یافت (Hennessy, 2007). منطقه شمال غرب ایران شامل شهرهای مهمی از جمله: تبریز، ارومیه، اردبیل و زنجان است که به دلیل وابستگی اقتصادی به منابع آب و کشاورزی، در برابر نوسانات اقلیمی بسیار آسیب‌پذیر می‌باشند. این بخش از ایران به‌عنوان یکی از مناطق سردسیر کشور، به دلیل برخورداری از آب و هوای خنک و مطبوع و جاذبه‌های گردشگری و زیست‌بوم خاص و منحصربه‌فرد همچون ارتفاعات و قله پوشیده از برف و پیست‌های اسکی، آب‌های درمانی همواره در فصول مختلف، پذیرای گردشگران داخلی و خارجی بوده است که با وقوع گرمایش جهانی و افزایش انکارناپذیر دما و کاهش بارش ناشی از آن، دچار تحولاتی اقلیمی شده و خواهد شد و این مسئله، قطعاً از جاذبه‌های گردشگری منطقه کاسته و اقتصاد آن را متضرر خواهد ساخت. مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی با استفاده از سناریوهای انتشار مختلف برای درک بهتر روند آینده آب و هوا و برنامه‌ریزی درازمدت برای مقابله با آثار سوء این تغییرات طی سال‌های اخیر، اهمیت فزاینده‌ای یافته است. سناریوهای^۳ SSP به‌عنوان یکی از جدیدترین و جامع‌ترین رویکردهای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی، این امکان را فراهم می‌سازند تا با در نظر گرفتن مسیرهای مختلف توسعه اقتصادی و اجتماعی، تغییرات دما و بارش آینده، مورد ارزیابی قرار گیرد.

با توجه به مواردی که ذکر شد و به دلیل نقش مهمی که متغیرهای دما و بارش در زیست‌بوم هر منطقه دارد، در پژوهش حاضر سعی بر آن است تا پیش‌بینی تغییرات این دو پارامتر در شهرهای شمال غرب ایران تحت سناریوهای جدید SSP مدل اقلیمی NorESM2 که از مدل‌های جدید GCM می‌باشد، انجام گیرد و به این وسیله تصویری دقیق‌تر از آینده اقلیمی این منطقه ارائه شود. در این راستا سعی گردید تا شهرهایی انتخاب شود که ضمن تناسب توزیع آن‌ها در سطح منطقه مورد مطالعه، امکان ترسیم نقشه پراکندگی دما و بارش در دوره مشاهداتی و پیش‌بینی شده و مقایسه نتایج حاصل فراهم گردد. شهرهای منتخب پژوهش حاضر از مناطق

موجود در جو و سطح زمین مانند: دی‌اکسیدکربن، ذرات معلق و پوشش گیاهی را در نظر گرفته و بر اساس آن‌ها تخمینی از مقدار پارامترهای هواشناسی در آینده ارائه می‌دهد (Green, 2006).

پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده گزارش ششم هیئت بین‌دولت‌ها تغییر اقلیم از سناریوهای جدید به نام مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک^۲ استفاده می‌کند که با نماینده خطوط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای^۳ پروژه گزارش پنجم IPCC ترکیب شده است (Eyring et al, 2016). سناریوهای جدید اضافه شده در CMIP6 شامل SSP1-1.9، SSP4-3.4، SSP3-7.0 هستند که چهار سناریوی SSP2-4.5، SSP1-2.6، SSP4-6.0، SSP5-8.5 نیز به‌روز شده سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 موجود در CMIP5 می‌باشند (Gupta et al, 2020). مدل‌های آب و هوایی فعلی قوی‌تر از مجموعه‌های قبلی CMIP هستند و پیشرفت‌های مؤثری را در بازتولید الگوهای بزرگ‌مقیاس متغیرهای آب و هوایی نشان دادند (Chen et al, 2020). لذا در پژوهش حاضر از سناریوهایی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 موجود در مدل NorESM2 که از سری مدل‌های CMIP6 هست بهره گرفته شد. در سناریوی SSP2-4.5 پیش‌بینی می‌شود که انتشار جهانی از الگوهای فعلی پیروی کند که این امر حاکی از وجود موانع زیاد در مسیر کاهش و انطباق است. در سناریوی SSP5-8.5، توسعه اقتصادی بر آثار زیست‌محیطی اولویت دارد بر این اساس، مقابله با آثار تغییر اقلیم دشوار است (Jiménez-Navarro et al, 2021).

مدل‌های GCM داده‌های هواشناسی را در یک شبکه بزرگ‌مقیاس در ارتفاعات فوقانی جو پیش‌بینی می‌کنند که عمومی‌ترین روش برای رفع این مشکل، استفاده از ریزمقیاس‌نمایی است. این روش‌ها خروجی مدل‌های GCM را با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، به مقیاس محلی تبدیل می‌کنند. روش‌های ریزمقیاس‌سازی به دو دسته روش دینامیکی و آماری تقسیم می‌شوند (Bates & Kundzewicz, 2008). از دلایل استفاده از این GCM‌ها عملکرد سریع و آسان آن‌ها نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد (Kim & Seoh, 2007). به دلیل اینکه مدل‌های GCM بزرگ‌مقیاس هستند، لذا به یک ابزار ریزگردان جهت تبدیل الگوهای بزرگ‌مقیاس به مقیاس محلی نیاز است. به این

مهم گردشگری و کشاورزی شمال غرب ایران هستند و برخلاف اهمیتی که دارند، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند. لذا نوآوری پژوهش حاضر، پیش‌بینی دمای حداکثر و بارش آینده نزدیک در بخش وسیعی از شمال غرب ایران، تحت سناریوهای جدید (متوسط SSP2-4.5 و بدبینانه SSP5-8.4) مدل NorESM2 است، با پیش‌بینی تحت سناریوهای مذکور، میزان افزایش دما و کاهش بارش در بدبینانه‌ترین حالت مشخص شده و با آمادگی کافی در مقابل مخاطرات احتمالی، پایداری زیست‌بوم شهری در منطقه مورد مطالعه حاصل می‌گردد. در راستای هدف پژوهش، این سؤال مطرح است که طی دهه‌های گذشته، متغیرهای دما و بارش در محدوده مورد مطالعه چه روندی داشته و در آینده چه رفتاری خواهند داشت؟ یافته‌های به دست آمده از روندیابی گذشته و پیش‌بینی رفتار آتی این دو پارامتر مهم اقلیمی می‌تواند نقشی مؤثری در برنامه‌ریزی مدیران منطقه داشته باشد.

مبانی نظری

چارچوب نظری

اصطلاح تغییر اقلیم به تغییر در وضعیت آب و هوایی اشاره دارد که می‌تواند از طریق میانگین و یا تغییرپذیری ویژگی‌های آن مشخص شده و برای دوره طولانی و به مدت یک دهه یا بیش‌تر تداوم یابد (IPCC, 2013). تغییر اقلیم امروزه به‌عنوان شایع‌ترین و مهم‌ترین مباحث علمی و سیاسی-اجتماعی مطرح است. بر همین اساس انسان در تلاش است تا با ابزار و علم خود، قانونمندی این تغییرات را کشف و اقدام به پیش‌بینی رفتارهای بعدی سامانه آب و هوا نماید (عزیزی، ۱۳۸۳). این تغییر نشان‌دهنده تغییرات غیرعادی در اقلیم زمین و پیامدهای ناشی از آن در نواحی مختلف کره زمین است و می‌تواند در متوسط دما، بارش، الگوهای آب و هوایی، باد، تابش و متغیرهایی از این قبیل مؤثر باشد (کارآموز و عراقی‌نژاد، ۱۳۸۴).

منطقه شمال غرب ایران، به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود، از جمله مناطقی است که تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار دارد. پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده^۱ با هماهنگی بین مراکز مختلف برای استانداردسازی، GCM‌ها به‌عنوان یک داده مبنا در مطالعات تغییر اقلیم در سطح جهان به انجام رسیده است. این مدل‌ها اجزاء زیادی از خصوصیات

2. SSP (Shared Socioeconomic Patgways)

3. RCP

1. CMIP

تغییرات در منطقه آب و هوایی BWh و کم‌ترین آن در منطقه آب و هوایی سرد و کوهستانی ایران Dsc رخ خواهد داد.

زارعیان (۱۴۰۱)، اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش استان یزد بر اساس خروجی ترکیبی مدل‌های CMIP6 بررسی نمودند. نتایج نشان داد که مدل‌های CanESM5 و BCC-CSM2-MR، به‌ترتیب بیش‌ترین توانایی را در شبیه‌سازی دما و بارش دوره تاریخی در تمامی ایستگاه‌های مختلف هواشناسی دارا هستند. همچنین طبق یافته‌های حاصل، در تمامی سناریوهای انتشار، دمای سالانه افزایش و بارندگی سالانه کاهش پیدا خواهد کرد. دمای سالانه این منطقه در ایستگاه‌های مختلف بین ۰/۲ تا ۰/۶ درجه افزایش و بارش نیز بین ۲/۹ تا ۱۳/۷ درصد کاهش خواهد یافت. همچنین بیش‌ترین میزان افزایش دما و کاهش بارندگی در این منطقه، به ترتیب در فصول بهار و فصل پاییز رخ خواهند داد.

رضایی زمان و همکاران (۱۴۰۱)، با بهره‌گیری از مدل SWAT و NorESM2 اثرات سناریوهای SSP را بر منابع آب و کشاورزی منطقه هشتگرد بررسی نمودند. یافته‌های آنان حاکی از افزایش تنش آبی و کاهش محصول تحت همه‌ی سناریوها بوده است. همچنین طبق نتایج این پژوهشگران با تغییر الگوی کشت به گندم و جو که قابلیت سازگاری با تغییر اقلیم منطقه نسبت به سایر محصولات داشته‌اند، تنش آبی کم‌تری در منطقه هشتگرد تجربه خواهد شد.

اکبرزاده و همکاران (۱۴۰۳)، به بررسی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی با استفاده از رویکرد مدل‌های گردش عمومی جو در استان‌های غربی کشور پرداختند. مطالعات آنان نشان داده است که بیش‌ترین تغییر بارش در آذربایجان شرقی و غربی رخ خواهد داد و بیش‌ترین تغییر در دمای حداکثر در استان فارس و کرمانشاه تجربه خواهد شد.

اسریواستوا^۱ (۲۰۲۰)، به شبیه‌سازی‌های مدل‌های CMIP6 برای بارش‌های ایالات متحده پرداختند. طبق یافته‌های آنان اغلب مدل‌ها، میانگین و تغییرپذیری دوره‌های تر را بیش از حد و دوره‌های خشک را کم‌تر از حد تخمین می‌زنند.

چو و همکاران^۲ (۲۰۲۱)، دما و بارش فلات تبت را با مدل‌های CMIP6 شبیه‌سازی نمودند. بر اساس یافته‌های آنان همانند دوره مشاهداتی، در دوره پیش‌بینی شده نیز هر دو متغیر بارش و دما در تمام فصول روند افزایشی نشان دادند.

منظور در پژوهش حاضر، ریزگردان SDSM که یکی از پرکاربردترین ابزارهای آماری در هواشناسی، هیدرولوژی، جغرافیا و زیست‌شناسی است، انتخاب شد (هوشیار و همکاران، ۱۳۹۷). در این ریزگردان، از الگوی گردش روزانه بزرگ‌مقیاس در مقیاس ایستگاهی استفاده می‌گردد. این ریزگردان، در مورد مولدهای هواشناسی تصادفی و روش‌های توابع تغییر شکل یافته، نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد (هوشیار و همکاران، ۱۳۹۷). در واقع SDSM ترکیبی از روش مولد هواشناسی، آماری و توابع تغییر شکل یافته است. اگر چه عدم قطعیت در استفاده از نرم‌افزارهای ریزگردان و ریزمقیاس نمایی مدل‌های اقلیمی و پیش‌بینی تغییرات اقلیم آینده وجود دارد، لیکن بهره‌گیری از نسخه به‌روز شده‌ی این نرم‌افزار (SDSM6) و مدل و سناریوهای جدیدتر (NorESM2) تحت سناریوهای SSP، دقت پیش‌بینی را بیش‌تر و احتمال خطا را کم‌تر می‌کند.

همچنین به‌منظور بررسی رفتار داده‌های سالانه دما و بارش دوره پایه، نیاز به تعیین روند است تا نتایج با دوره پیش‌بینی شده مقایسه گردد. آزمون شیب سن یکی از روش‌های تحلیل روند است که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کند و نیز توانایی تحلیل روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی، با وجود داده‌های گم شده را دارد. همچنین وابسته نبودن به توزیع آماری خاص و اثرپذیری ناچیز از مقادیر حدی، از مزایای استفاده از این روش است (Turgay & Ercan, 2005). آزمون شیب سن از تحلیل تفاوت بین مشاهده‌های یک سری زمانی استفاده می‌کند (Serrano et al, 1999) و اساس آن بر محاسبه یک شیب میانه برای سری زمانی استوار است (ملکی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۲).

پیشینه پژوهش

صفریان زنگیر و همکاران (۱۳۹۹)، به تحلیل شاخص‌های خشکسالی و بارش استاندارد شده در مراکز شهرهای استان اردبیل با شاخص‌های SPI و CZI پرداختند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که در هر ۵ ایستگاه مورد مطالعه، تعداد خشکسالی‌های متوسط، بیش‌تر از خشکسالی‌های شدید و خیلی شدید بوده است.

زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰)، به پیش‌بینی بارش‌های شدید آینده در ایران بر اساس مجموعه مدل‌های CMIP6 پرداختند و به‌طور کلی، نتایج مطالعه آنان عدم قطعیت‌های این مدل‌ها را در پیش‌بینی بارش نشان داده است. بررسی روند تغییرات IEP نشان داده است که بیش‌ترین این

1. Srivastava et al

2. Cui et al

روش انجام پژوهش

پژوهش حاضر یک تحقیق کاربردی با روش توصیفی - تحلیلی می‌باشد که بر روی داده‌های دمای حداکثر و بارش شهرهای منتخب شمال غرب ایران شامل: جلفا، تبریز، سراب، مراغه، پارس‌آباد، مشکین‌شهر، اردبیل، خلخال، ماکو، ارومیه، تکاب و سردشت در دو بخش انجام شد. بخش اول پژوهش، تحلیل روند تغییرات دمای حداکثر و بارش در شهرهای مورد مطالعه بود. برای این منظور، داده‌های میانگین دما و بارش ۳۰ ساله با بهره‌گیری از تخمین‌گر شیب سن برای دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴)، روندیابی شد تا از این طریق تغییرات آب و هوایی دهه‌های گذشته به‌درستی شناسایی شده و روند دقیق پارامترها نشان داده شود (شجاع و همکاران، ۱۴۰۱). لازم به ذکر است که آزمون شیب سن از مهم‌ترین روش‌های تحلیل روند پارامترهای آب و هوایی می‌باشد و مقدار شیب به‌دست آمده از این روش، بیانگر شدت روند است. این آزمون به شرح زیر انجام شد:

الف) ابتدا شیب بین هر جفت داده با رابطه زیر محاسبه گردید (رابطه ۱).

$$Q_i = \frac{X_t - X_s}{t - s}, i = 1, 2, \dots, N$$

که X_t و X_s به ترتیب داده در زمان‌های $t > s$ و $N = \frac{n(n-1)}{2}$ می‌باشد. با اعمال این رابطه، برای هر دو جفت داده، یک سری زمانی از شیب‌های محاسبه شده به‌دست آمد که از محاسبه میانه این سری زمانی، برآورد شیب سن مربوط به خط روند، حاصل شد. مقدار مثبت این شیب نشان‌گر صعودی بودن روند و مقدار منفی آن نشان‌دهنده نزولی بودن روند است (رسولی و همکاران، ۱۳۸۹).

ب) در مرحله دوم پارامتر $C \alpha$ برای سطح اطمینان موردنظر از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

$$C \alpha = Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = \sqrt{\text{Var}(A)}$$

در رابطه فوق، Z چنک توزیع نرمال استاندارد می‌باشد (Salmi et al, 2002).

ج) در مرحله سوم جهت محاسبه حدود اطمینان بالا و پایین با ضریب $(1-\alpha)$ ، مقادیر M_1 و M_2 به کمک روابط (۳) محاسبه شد:

$$M_1 = \frac{N - C\alpha}{2}$$

$$M_2 = \frac{N + C\alpha}{2}$$

که N تعداد شیب‌های محاسبه شده در بند الف است.

مسگری و همکاران^۱ (۲۰۲۲)، به ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 و پیش‌بینی بارش بر اساس سناریوهای SSP در منطقه MENAP پرداختند و یافته‌های آنان نشان داد که میزان بارش به جز مناطقی مانند دریای سیاه، مدیترانه، نواحی ساحلی دریای سرخ و مناطق کوهستانی و مرتفع، در سایر نقاط محدوده مورد مطالعه آنان عمدتاً کاهش خواهد یافت که بیش‌ترین میزان کاهش بارش در کشورهای خاورمیانه رخ خواهد داد.

کوویسی نونی و همکاران^۲ (۲۰۲۳)، به ارزیابی میانگین بارش گذشته آفریقا و شبه‌جزیره عربستان بر اساس مدل CMIP6 در مقایسه با مشاهدات پایه ماهواره‌ای پرداختند. نتایج نشان دادند که مدل CMIP6 MME نسبت به اکثر مدل‌های منفرد عملکرد بهتری در شبیه‌سازی و پیش‌بینی بارش دارد.

لی و همکاران^۳ (۲۰۲۳)، به بررسی عملکرد مدل‌های چندگانه GCM در پیش‌بینی بارش سنگین در آسیای خشک مرکزی پرداختند. برای این کار از پروژه مقایسه‌ای ۶ مدل جفت شده، استفاده کردند و نتایج پژوهش آن‌ها عملکرد مناسب مدل‌های GCM را در پیش‌بینی بارش مناطق خشک آسیای مرکزی تأیید کرده و چنین اظهار داشته‌اند که با مجموعه مدل‌های جفت شده، پیش‌بینی‌های تغییرات اقلیمی آینده با اطمینان بیش‌تری انجام می‌گیرد.

بررسی یافته‌های پژوهشگران نشان می‌دهد که در نقاط مختلف جهان، الگوها و روندهای متنوعی برای دما و بارش پیش‌بینی شده است که این امر، عدم قطعیت در رابطه با آثار تغییر اقلیم را تشدید نموده و لزوم مطالعه حوزه‌ای و منطقه‌ای دقیق‌تر تغییر پارامترهای اقلیمی را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک همچون شمال غرب ایران که منطقه‌ای با پتانسیل-های چشمگیر برای توسعه صنعت گردشگری دارد و وابسته به اقتصاد کشاورزی است، تقویت می‌نماید. در اغلب مطالعات انجام شده، پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی برای آینده دور و در محدوده کوچک (به وسعت یک شهر یا استان) با مدل‌ها و سناریوهای قدیمی‌تر انجام گرفته که این امر احتمال خطای پیش‌بینی را افزایش می‌دهد، در پژوهش حاضر سعی شده است تا ضمن بهره‌گیری از مدل و سناریوهای به روز شده، منطقه‌ای نسبتاً وسیع انتخاب گردد، تا امکان ارائه نقشه پراکندگی دما و بارش در دوره مشاهداتی و پیش‌بینی شده و مقایسه نتایج فراهم شود.

از وب‌سایت پروژه مقایسه مدل جفت شده گزارش ششم دریافت گردید. به‌منظور پیش‌نگری دمای حداکثر و بارش شهرهای مورد مطالعه در نرم‌افزار SDSM6.1 ابتدا دقت و کارایی مدل NorESM2_MM برای شبیه‌سازی دوره پایه نسبت به داده‌های مشاهداتی، مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس تغییرات دو پارامتر برای هر یک از شهرها، برای آینده (۲۰۴۳-۲۰۱۵) تحت دو سناریوی جدید SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پیش‌بینی و نتایج حاصل، با داده‌های دوره پایه مقایسه شد.

به‌طور خلاصه ریزگردان SDSM، کوچک‌مقیاس‌نمایی آماری متغیرهای اقلیمی روزانه را تحت مراحل زیر انجام داد: ۱. کنترل کیفیت داده‌ها و تغییر شکل داده‌ها ۲. انتخاب بهترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده ۳. کالیبره کردن مدل تولید مدل هواشناسی ۵. آنالیز آماری ۶. خروجی گرافیکی مدل ۷. تولید سناریوی اقلیمی. تمامی مراحل فوق توسط گزینه‌های تعبیه شده در نرم‌افزار SDSM انجام گرفت (چوبه و کاکه، ۱۳۹۴). در جدول ۱، مشخصات مدل GCM مورد استفاده در پژوهش حاضر ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مدل GCM مورد استفاده در پژوهش

ردیف	نام مدل	مؤسسه	کشور
۱	NorESM2_MM	مرکز اقلیمی نروژ	Norway

مأخذ: مسگری و همکاران، ۲۰۲۲

در این روابط، X_0 داده‌های مشاهداتی، X_s داده‌های شبیه‌سازی‌شده و N تعداد داده‌ها است (Mesgari et al, 2022).

محدوده مورد مطالعه

در جدول ۲، مشخصات و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب و در شکل ۱، نقشه محدوده مورد مطالعه ارائه شده است.

د) در پایان برای بررسی حدود اطمینان، در رابطه (۱) که از کوچک به بزرگ مرتب شد $M1$ امین و $M2 + 1$ امین شیب استخراج گردید. در صورتی که عدد صفر در دامنه بین دو شیب استخراج شده فوق قرار بگیرد، فرض صفر پذیرفته می‌شود و سری زمانی بدون روند است (قربانی و همکاران، ۱۳۹۸).

بخش دوم پژوهش، به‌منظور پیش‌نگری تغییرات پارامترهای دما و بارش برای دهه‌های آتی در محدوده مورد مطالعه انجام شد. برای این منظور، مدل NorESM2-MM که از سری مدل‌های فاز ششم پروژه مقایسه‌ای مدل جفت شده (CMIP6) است، انتخاب گردید (مدل مذکور بر این اساس انتخاب شد که دارای وضوح مکانی بالا بوده و داده‌های آن برای سناریوهای مورد مطالعه (SSP) موجود بود). برای انجام این بخش از پژوهش نیاز به دو سری داده بود. دسته اول، داده‌های روزانه دمای حداکثر و بارش شهرهای منتخب شمال غرب ایران برای سال‌های (۲۰۱۴-۱۹۸۵) که از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. دسته دوم، داده‌های مدل NorESM2-MM، از سری مدل‌های CMIP6 بود. این داده‌ها شامل مقادیر روزانه، برای دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۵) و آینده (۲۰۴۳-۲۰۱۵) بود که

در نهایت جهت ارزیابی عملکرد و دقت مدل NorESM2-MM، در تولید داده‌های دما و بارش، داده‌های دوره مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با استفاده از ۳ شاخص خطاسنجی شامل: میانگین مربعات خطا^۱، ریشه میانگین مربع خطا^۲ و میانگین خطای مطلق^۳ مقایسه شد و میانگین این آماره‌ها برای شهرهای منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت. در روابط ۴ تا ۶ به آماره‌های مورد استفاده اشاره گردیده است.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_0 - X_s)^2 \quad (4)$$

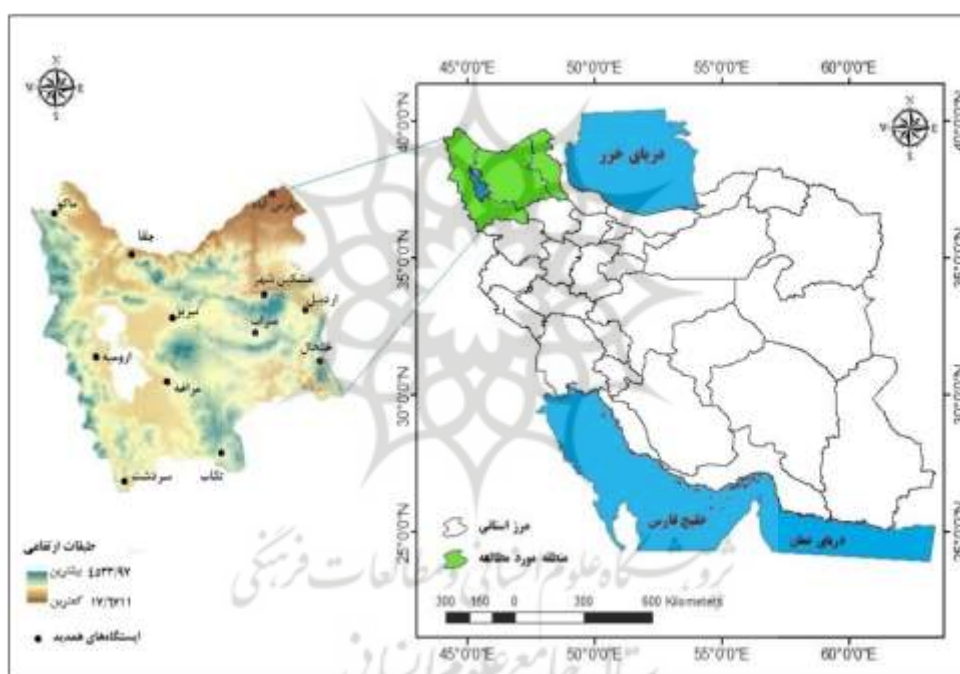
$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_0 - X_s)^2}}{N} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N (X_0 - X_s)}{N} \quad (6)$$

1. MSE
2. RMSE
3. MAE

جدول ۲. مشخصات و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	دوره‌ی آماری
جلفا	۴۵°۴۰'	۳۸°۴۵'	۷۳۶	۱۹۸۵-۲۰۱۴
تبریز	۴۶°۱۷'	۳۸°۵'	۱۳۶۱	۱۹۸۵-۲۰۱۴
سراب	۴۷°۳۳'	۳۷°۵۶'	۱۶۸۲	۱۹۸۶-۲۰۱۴
مراغه	۴۶°۱۶'	۳۷°۲۴'	۱۴۷۷	۱۹۸۵-۲۰۱۴
ماکو	۴۴°۲۶'	۳۹°۲۰'	۱۴۱۱	۱۹۸۵-۲۰۱۴
ارومیه	۴۵°۵'	۳۷°۳۲'	۱۳۱۶	۱۹۸۵-۲۰۱۴
سردشت	۴۵°۳۰'	۳۶°۹'	۱۶۷۰	۱۹۸۷-۲۰۱۴
تکاب	۳۶°۲۴'	۳۷°۶'	۱۷۶۵	۱۹۸۶-۲۰۱۴
پارس‌آباد	۴۷°۵۵'	۳۹°۳۹'	۳۱۹	۱۹۸۵-۲۰۱۴
مشکین‌شهر	۴۷°۶'	۳۸°۳۸'	۱۵۶۸	۱۹۹۵-۲۰۱۴
اردبیل	۴۸°۱۷'	۳۸°۱۵'	۱۳۳۲	۱۹۸۵-۲۰۱۴
خلخال	۴۸°۳۱'	۳۷°۳۸'	۱۷۹۶	۱۹۸۷-۲۰۱۴



شکل ۱. نقشه محدوده مورد مطالعه

یافته‌ها

نتایج واکاوی تغییرات روند مجموع بارش سالانه طی دوره آماری مورد مطالعه بر اساس شیب سن

یافته‌های به دست آمده از تحلیل روند بارش شهرهای مورد مطالعه در سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ بر مبنای سری‌های زمانی بلندمدت در مقیاس سالانه بر اساس شیب سن، در جدول ۳، ارائه شده است. طبق اطلاعات جدول، مجموع بارش سالانه، طی دوره آماری مورد مطالعه در شهرهای مشکین‌شهر، ماکو، سراب، جلفا،

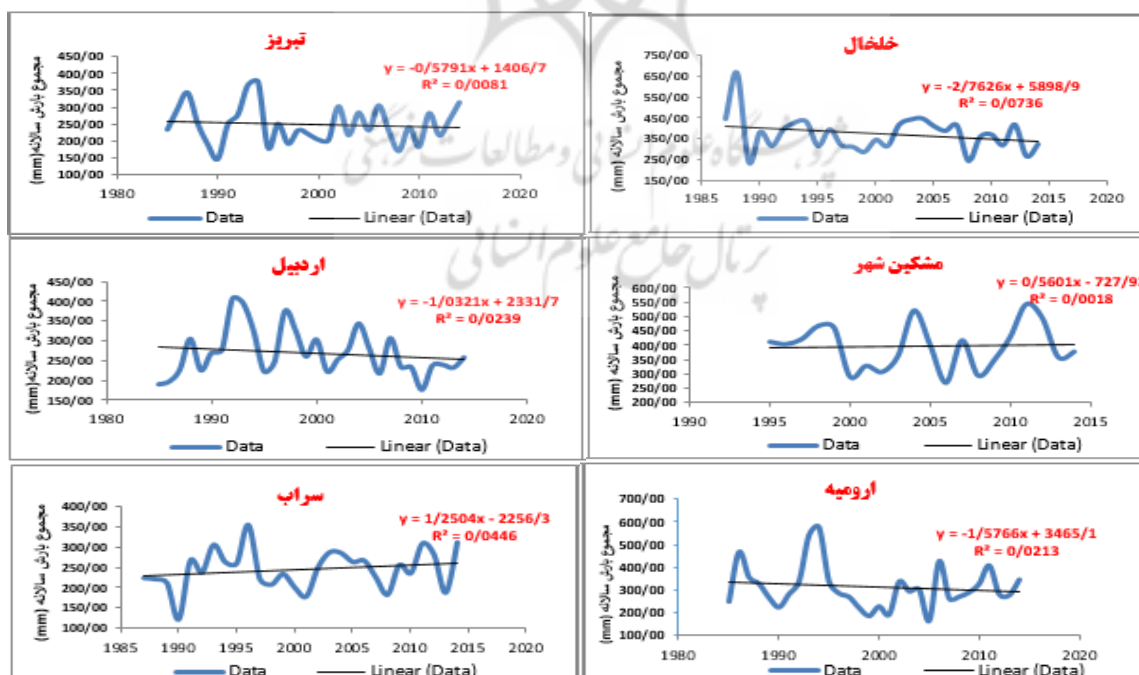
پارس‌آباد آماره Q مثبت بوده است. بیش‌ترین مقادیر Z در شهر-های مراغه و تکاب مشاهده شد که به ترتیب برابر ۲/۵۳- و ۱/۲۹- بود. دو شهر تکاب و مراغه به ترتیب با مقادیر ۲/۶۸- و ۴/۵- در سطح اطمینان ۹۹٪ روند کاهشی معنادار و دو شهر جلفا و ماکو به ترتیب با مقادیر ۲/۲۵ و ۲/۰۷ در سطح ۹۵٪ دارای روند صعودی معنادار بودند. در سایر شهرها روند نزولی و صعودی معنادار نبود.

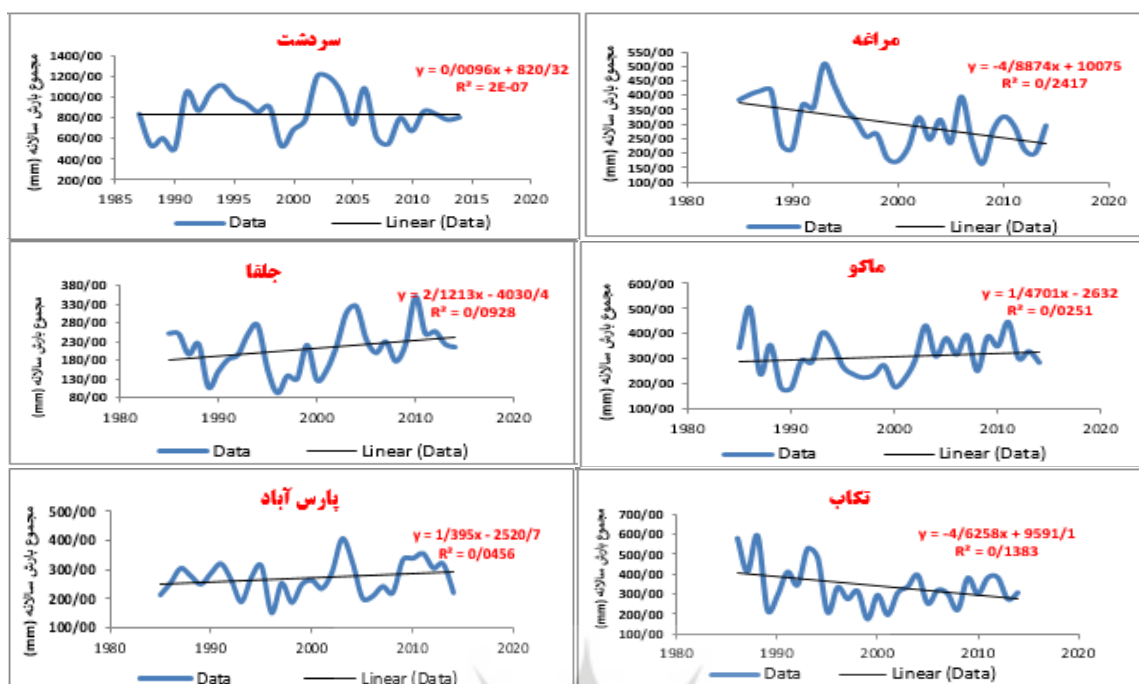
جدول ۳. نتایج واکاوی تغییرات روند مجموع بارش سالانه بر اساس شیب سن برای ۱۲ شهر مورد مطالعه

شهر	سال	Test Z	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95	B	Bmin99	Bmax99	Bmin95	Bmax95
ارومیه	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۰/۲۹	-۰/۳	-۶/۰۵	۴/۱۶	-۴/۰۸	۲/۹۲	۳/۰۷	۵/۴۹	۱/۲۲	۴/۶۹	۱/۸۰
تبریز	۱۹۸۵-۲۰۱۴	-۰/۲۱	-۰/۲	-۳/۹۲	۳/۷۵	-۲/۹۳	۲/۷۱	۲/۵۰	۳/۹۴	۸/۶۵	۳/۶۱	۱/۲۴
اردبیل	۱۹۸۵-۲۰۱۴	-۰/۴۶	-۰/۵	-۴/۹۳	۲/۱۹	-۳/۶۳	۱/۷۰	۲/۷۶	۴/۷۲	۱/۶۷	۴/۰۹	۱/۸۲
خلخال	۱۹۸۷-۲۰۱۴	-۰/۸۱	-۱/۴۷	-۷/۷۵	۲/۸۳	-۶/۰۴	۱/۶۶	۴/۳۷	۶/۸۱	۲/۴۵	۶/۲۰	۳/۰۰
پارس‌آباد	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۰/۹۳	۱/۵۱	-۲/۵۷	۴/۹۳	-۱/۷۵	۴/۰۷	۲/۱۶	۳/۶۰	۸/۷۸	۳/۲۶	۱/۱۷
مشکین‌شهر	۱۹۹۵-۲۰۱۴	۰/۱۶	۰/۷	-۹/۳۹	۱/۳۳	-۵/۶۷	۹/۰۳	۳/۷۰	۸/۱۵	-۲/۱۰	۶/۴۴	-۱/۶۱
جلفا	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۱/۲۸	۲/۲۵	-۱/۶۱	۵/۸۱	-۹/۴۰	۴/۷۷	۱/۲۴	۲/۸۵	-۳/۳۶	۲/۵۸	۹/۱۴
مراغه	۱۹۸۵-۲۰۱۴	-۲/۵۳	-۴/۵	-۹/۸۰	۲/۷۲	-۸/۵۵	-۱/۶۹	-۵/۰۰	۶/۸۰	۲/۸۲	۶/۴۰	۳/۸۰
سراب	۱۹۸۶-۲۰۱۴	۱/۰۱	۱/۲۱	-۱/۹۵	۴/۱۲	-۱/۴۶	۳/۴۳	۱/۹۸	۳/۲۸	۷/۷۹	۳/۱۰	۱/۰۹
ماکو	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۱/۱۱	۲/۰۷	-۳/۵۹	۷/۰۶	-۲/۰۸	۵/۷۱	۲/۱۷	۴/۴۹	-۳/۳۰	۳/۹۴	۵/۸۹
تکاب	۱۹۸۶-۲۰۱۴	-۱/۲۹	-۲/۶۹	-۹/۶۴	۳/۵۵	-۸/۸۰	۱/۶۴	۴/۳۲	۷/۱۲	۱/۸۱	۶/۸۵	۲/۴۵
سردشت	۱۹۸۷-۲۰۱۴	-۰/۲۶	-۱/۳۰	-۱/۷۴	۱/۳۷	-۱/۲۷	۱/۱۶	۸/۹۲	۱/۵۷	۲/۱۶	۱/۴۰	۲/۹۱

روند بارش سیر نزولی داشته و کاهشی بوده است. بر اساس نمودارهای ارائه شده، طی دوره آماری مورد مطالعه، بیش‌ترین میزان روند افزایشی مربوط به شهر جلفا و بیش‌ترین روند کاهشی مربوط به شهر مراغه بوده است. از بین ۱۲ شهر، تنها ۴ شهر روند کاهشی و افزایشی معنادار داشتند.

در شکل ۲، تغییرات روند مجموع بارش سالانه بر اساس شیب سن برای ۱۲ شهر مورد مطالعه طی سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۸۵ ارائه شده است. بررسی نمودارهای مذکور حاکی از روند افزایشی بارش در شهرهای مشکین‌شهر، ماکو، سراب، جلفا، پارس‌آباد است. همچنین طبق خط روند تخمین‌گر شیب سن در شهرهای ارومیه، اردبیل، تبریز، تکاب، خلخال، سردشت، مراغه و





شکل ۲. تغییرات روند مجموع بارش سالانه بر اساس شیب سن برای ۱۲ شهر مورد مطالعه طی سال‌های ۱۹۸۵-۲۰۱۴

۴ ارائه شده است. طبق جدول، آماره Q در هر ۱۲ شهر مثبت بوده است. بیش‌ترین مقادیر Z در شهر مراغه و کم‌ترین آن در شهر مشکین‌شهر مشاهده شد که مقادیر آن به ترتیب برابر ۴/۶۷ و ۱/۲۵ می‌باشد.

نتایج واکاوی تغییرات روند دمای حداکثر سالانه طی دوره آماری مورد مطالعه بر اساس شیب سن یافته‌های به دست آمده از تحلیل روند دمای حداکثر شهرهای مورد مطالعه در سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ بر مبنای سری‌های زمانی بلندمدت در مقیاس سالانه بر اساس شیب سن، در جدول

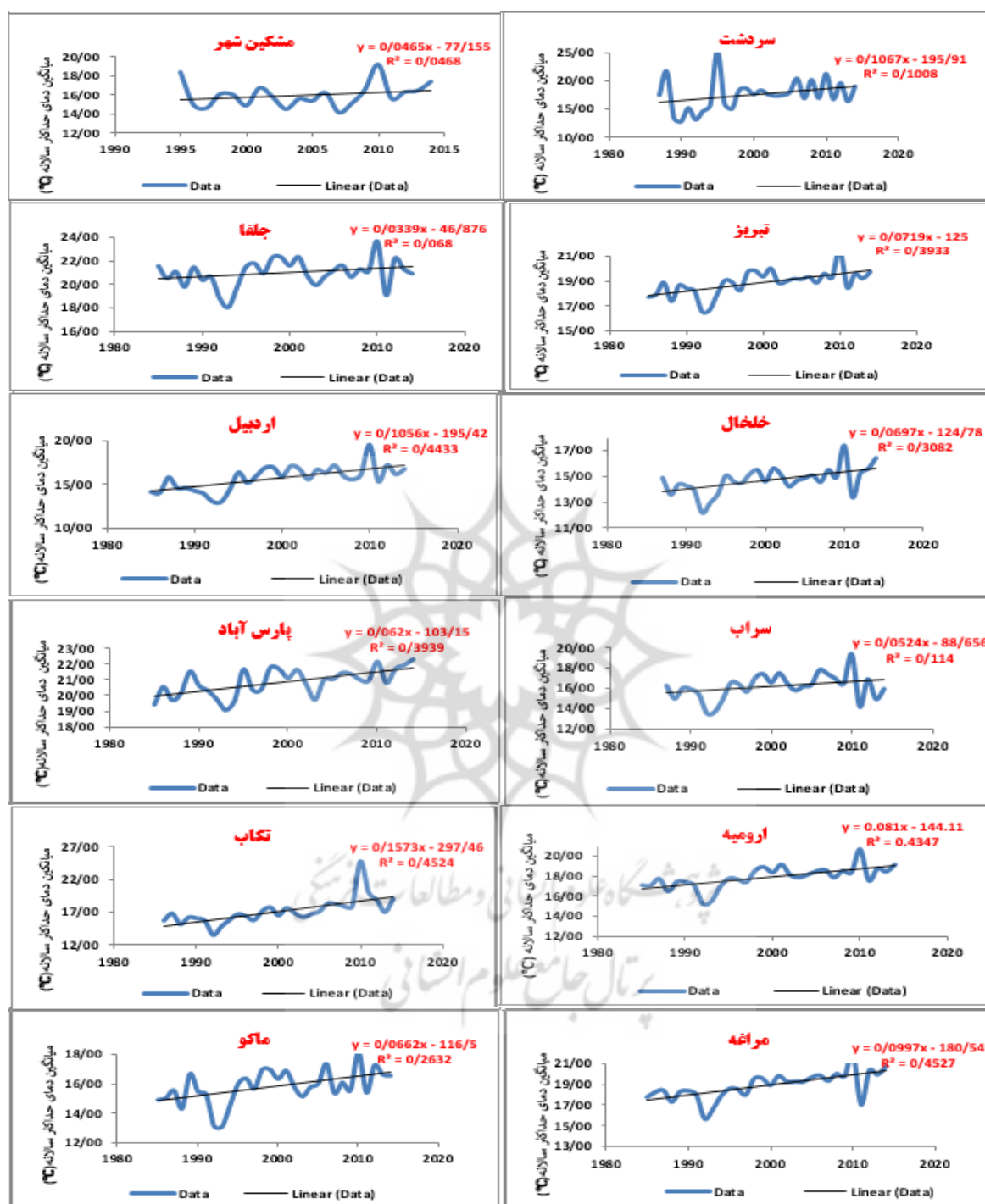
جدول ۴. نتایج واکاوی تغییرات روند دمای حداکثر سالانه بر اساس شیب سن برای ۱۲ شهر مورد مطالعه

شهر	سال	Test Z	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95	B	Bmin99	Bmax99	Bmin95	Bmax95
ارومیه	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۳/۹۳	۶/۹۸	۳/۳۷	۱/۱۸	۴/۴۹	۱/۰۱	۱/۵۲	۱/۶۷	۱/۳۳	۱/۶۲	۱/۳۹
تبریز	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۳/۶۴	۶/۴۴	۲/۳۹	۱/۱۳	۳/۲۱	۱/۰۱	۱/۶۳	۱/۸۰	۱/۴۲	۱/۷۷	۱/۴۷
اردبیل	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۳/۴۶	۹/۲۸	۲/۹۵	۱/۶۳	۵/۰۲	۱/۴۳	۱/۱۹	۱/۴۷	۹/۴۱	۱/۳۷	۱/۰۲
خلخال	۱۹۸۷-۲۰۱۴	۳/۱۴	۶/۳۹	۱/۳۵	۱/۲۴	۲/۷۳	۱/۱۰	۱/۲۱	۱/۴۲	۹/۷۱	۱/۳۶	۱/۰۳
پارس‌آباد	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۳/۳۵	۶/۳۷	۱/۷۸	۱/۰۵	۲/۹۶	۹/۳۷	۱/۸۳	۲/۰۱	۱/۶۶	۱/۹۷	۱/۷۰
مشکین‌شهر	۱۹۹۵-۲۰۱۴	۱/۲۰	۵/۴۸	-۹/۵۰	۱/۸۱	-۶/۲۵	۱/۴۳	۱/۳۵	۱/۹۸	۷/۶۸	۱/۸۵	۹/۴۵
جلفا	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۱/۲۵	۲/۴۵	-۳/۲۴	۱/۰۱	-۱/۸۳	۷/۹۲	۲	۲/۲۴	۱/۷۰	۲/۲۰	۱/۸۰
مراغه	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۴/۶۷	۹/۷۱	۶/۲۹	۱/۳۶	۷/۲۹	۱/۲۷	۱/۵۲	۱/۶۵	۱/۳۵	۱/۶۱	۱/۳۹
سراب	۱۹۸۶-۲۰۱۴	۱/۷۹	۵/۰۱	-۲/۷۲	۱/۴۱	-۶/۸۷	۱/۱۴	۱/۴۴	۱/۷۴	۱/۰۷	۱/۶۶	۱/۱۸
ماکو	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۲/۶۸	۵/۶۳	۵/۱۷	۱/۲۳	۱/۷۷	۱/۰۸	۱/۳۶	۱/۵۶	۱/۱۰	۱/۵۱	۱/۱۷
تکاب	۱۹۸۶-۲۰۱۴	۴/۶۰	۱/۲۷	۷/۲۳	۱/۹۷	۸/۲۳	۱/۷۵	۱/۱۸	۱/۳۹	۹/۱۱	۱/۳۶	۱/۰۱
سردشت	۱۹۸۷-۲۰۱۴	۱/۹۲	۱/۵۸	-۷/۶۶	۳/۱۳	-۶/۲۹	۲/۶۴	۱/۰۵	۲/۰۷	۴/۴۲	۱/۷۷	۶/۳۲

صعودی داشت که به غیر از دو شهر تکاب و سردشت که روند صعودی معنادار در پارامتر دمای حداکثر نداشتند، در سایر شهرها روند افزایشی دما معنادار بود. این روند افزایشی در سطح اطمینان

طبق نمودارهای برآوردگر شیب سن که در شکل ۳، ارائه گردیده، میانگین دمای حداکثر طی دوره آماری مورد مطالعه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) در هر ۱۲ شهر منتخب، دمای حداکثر روند

به شهر مراغه و کم‌ترین آن مربوط به شهر تکاب بوده است. ۹۹/۹۹ درصد معنادار بود. بیش‌ترین میزان روند صعودی، مربوط



شکل ۳. تغییرات روند دمای حداکثر بر اساس شیب سن برای شهرهای مورد مطالعه طی سال‌های ۱۹۸۵-۲۰۱۴

پایه و آینده، بر اساس خروجی مدل NorESM2 از سه شاخص خطاسنجی شامل میانگین قدر مطلق خطاها، میانگین مربع خطا، ریشه میانگین مربعات خطا استفاده شد. این معیارها برای ارزیابی خروجی GCM استفاده می‌شود و مقادیر حاصل، نشان‌گر میزان خطا است و لذا هر چه دقت مدل پیش‌بینی کننده بالاتر باشد،

نتایج پیش‌بینی دمای بیشینه و بارش بر اساس سناریوهای SSP 2-4.5 و SSP 5-8.5 مدل NorESM2

به‌منظور مقایسه داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده، دمای حداکثر و مجموع بارش ماهانه شهرهای منتخب در دوره

تولید شده برای همه شهرها برای دمای حداکثر نسبت به پارامتر بارش کمتر بود. لذا مدل NorESM2 پارامتر دما را نسبت به بارش با خطای کم‌تری پیش‌بینی می‌نماید.

مقادیر به دست آمده از شاخص‌های خطاسنجی مذکور به صفر نزدیک‌تر می‌شود. بر اساس نتایجی که در جدول ۵، ارائه شده است. اگر چه در هر دو پارامتر میزان خطا به‌ویژه در شاخص MSE، نسبتاً بالا بود، اما میزان خطای داده‌های مشاهداتی با داده

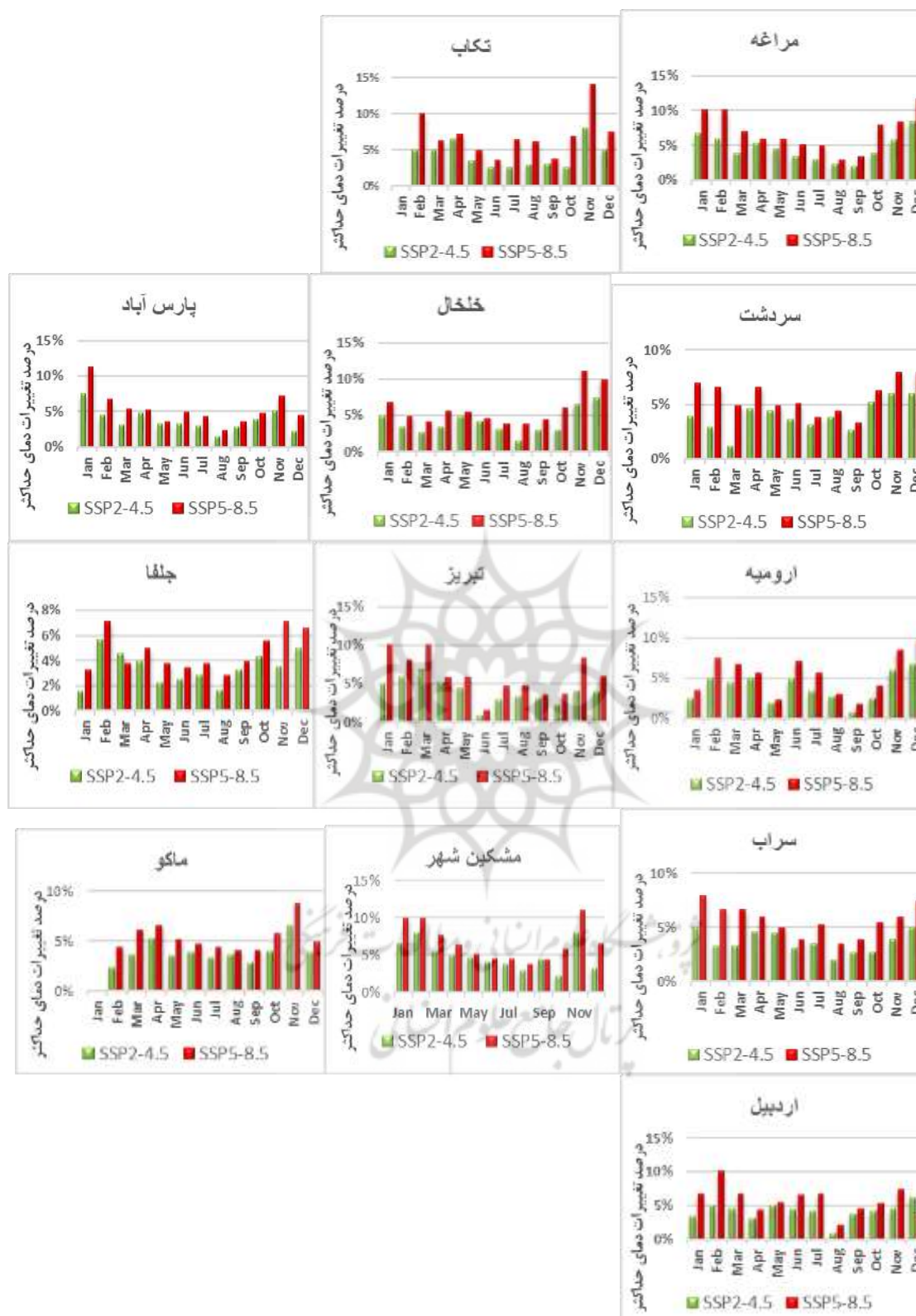
جدول ۵. خطاسنجی بارش دمای حداکثر و بارش شبیه‌سازی شده با مدل‌های NorESM2

شهر	پارامتر	MAD	MSE	RMSE
جلفا	دما	۳/۴	۱۷/۴	۴/۱
	بارش	۵/۴	۳۳/۵	۵/۶
سراب	دما	۲/۸	۱۰/۶	۳/۲
	بارش	۴/۵	۲۹/۱	۵/۱
تبریز	دما	۳/۹	۲۱/۵	۴/۶
	بارش	۴/۵	۴۲/۱	۶/۱
مراغه	دما	۴/۴	۲۵/۹	۵
	بارش	۵/۱	۵۴/۵	۷/۳
ماکو	دما	۲/۵	۱۰	۳/۱
	بارش	۶/۵	۶۷/۵	۸/۲
ارومیه	دما	۳/۵	۱۵/۸	۳/۹
	بارش	۶/۶	۵۳/۱	۷/۲
سردشت	دما	۲/۱	۶/۸	۲/۶
	بارش	۹	۱۳۵	۱۱/۸
تکاب	دما	۳/۹	۲۴/۲	۴/۹
	بارش	۷	۷۰/۹	۸/۸
پارس‌آباد	دما	۱	۱/۵	۱/۲
	بارش	۶/۸	۲۰/۵	۴/۲
مشکین‌شهر	دما	۱/۴	۲/۷	۱/۶
	بارش	۷/۸	۱۱/۳	۷/۶
اردبیل	دما	۲/۷	۱۰/۵	۳/۲
	بارش	۵/۲	۴۸/۴	۶/۵
خلخال	دما	۲	۷/۷	۲/۷
	بارش	۶/۷	۵۹/۵	۷/۷

نمودار مربوط به شهر پارس‌آباد بالاترین درصد افزایش دمای بیشینه حدود ۱۱٪ و در ماه ژانویه پیش‌بینی شده است. در شهر سراب، بالاترین درصد افزایش دما به میزان ۸٪ و در ماه ژانویه پیش‌بینی گردید. در شهر تکاب دما در ماه فوریه و نوامبر حدود ۱۴٪ افزایش خواهد یافت. در سردشت بیش‌ترین افزایش دما در ماه نوامبر و دسامبر و به میزان ۸٪ پیش‌بینی شد. در شهر تبریز ۱۰٪ افزایش دمای بیشینه در ماه مارس و ژانویه تجربه خواهد شد و در نهایت در شهر ارومیه ماه دسامبر به میزان ۱۰٪ افزایش دمای بیشینه رخ خواهد داد. همچنین بر حسب درجه سلسیوس نیز دمای بیشینه در همه شهرها ۰/۲ الی ۲ درجه سلسیوس افزایش خواهد داشت که بالاترین میزان افزایش برای شهر تکاب پیش‌بینی شد (شکل ۴).

پیش‌بینی انجام شده بر اساس سناریوهای مدل NorESM2 برای دمای بیشینه شهرهای منتخب شمال غرب ایران نشان داد که بیش‌ترین درصد افزایش دما طی دوره آتی اغلب در ماه‌های سرد سال خواهد بود. بر اساس پیش‌بینی انجام شده، در شهر اردبیل بالاترین درصد افزایش دما در ماه‌های فوریه و به میزان ۱۰٪ خواهد بود. در شهر خلخال طی ماه دسامبر بیش‌ترین افزایش دما تجربه خواهد شد که میزان آن ۱۱٪ است. در شهر ماکو در ماه نوامبر بالاترین درصد افزایش دما حدود ۹٪ پیش‌بینی شد. در شهر جلفا ۷٪ افزایش دما در ماه‌های نوامبر و فوریه رخ خواهد داد.

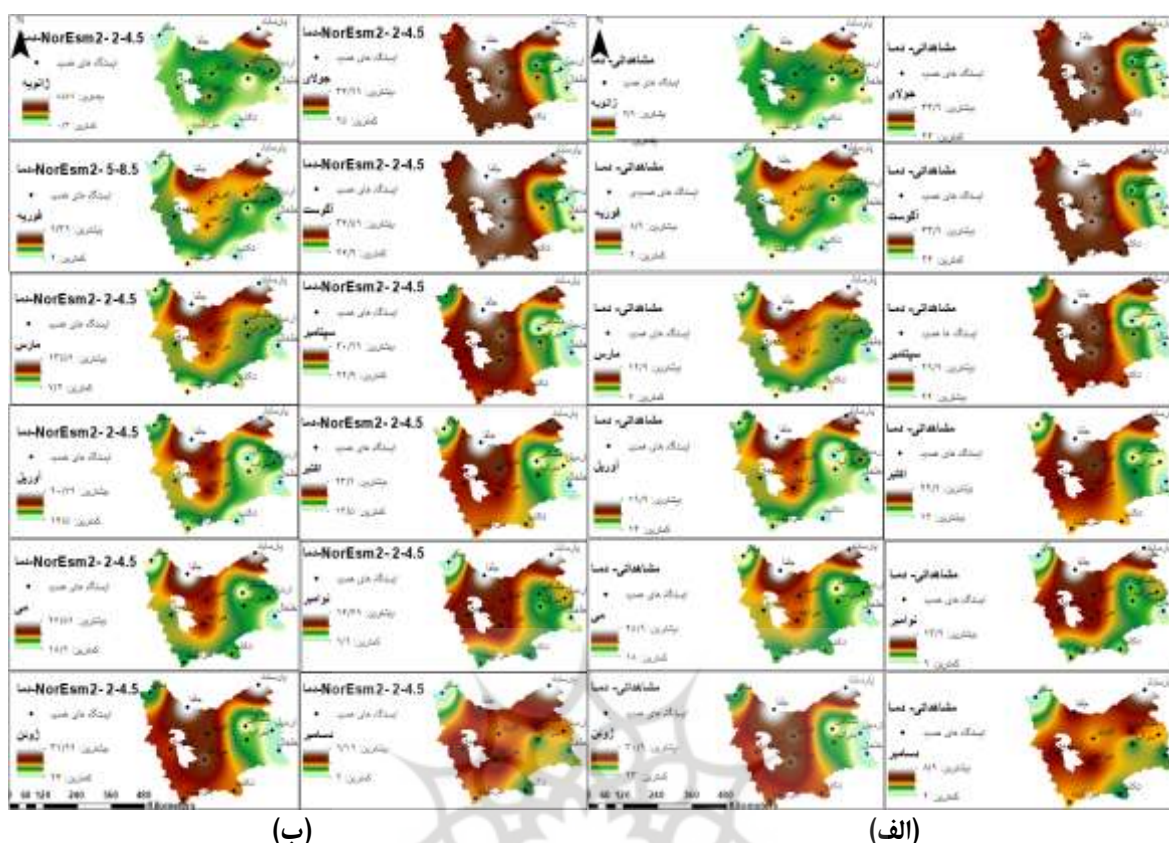
در شهر مشکین‌شهر حدود ۱۱٪ افزایش دمای بیشینه در ماه نوامبر رخ خواهد داد. در مراغه ماه دسامبر افزایش دمای بیش‌تری تجربه خواهند کرد که میزان آن ۱۲٪ خواهد بود. طبق



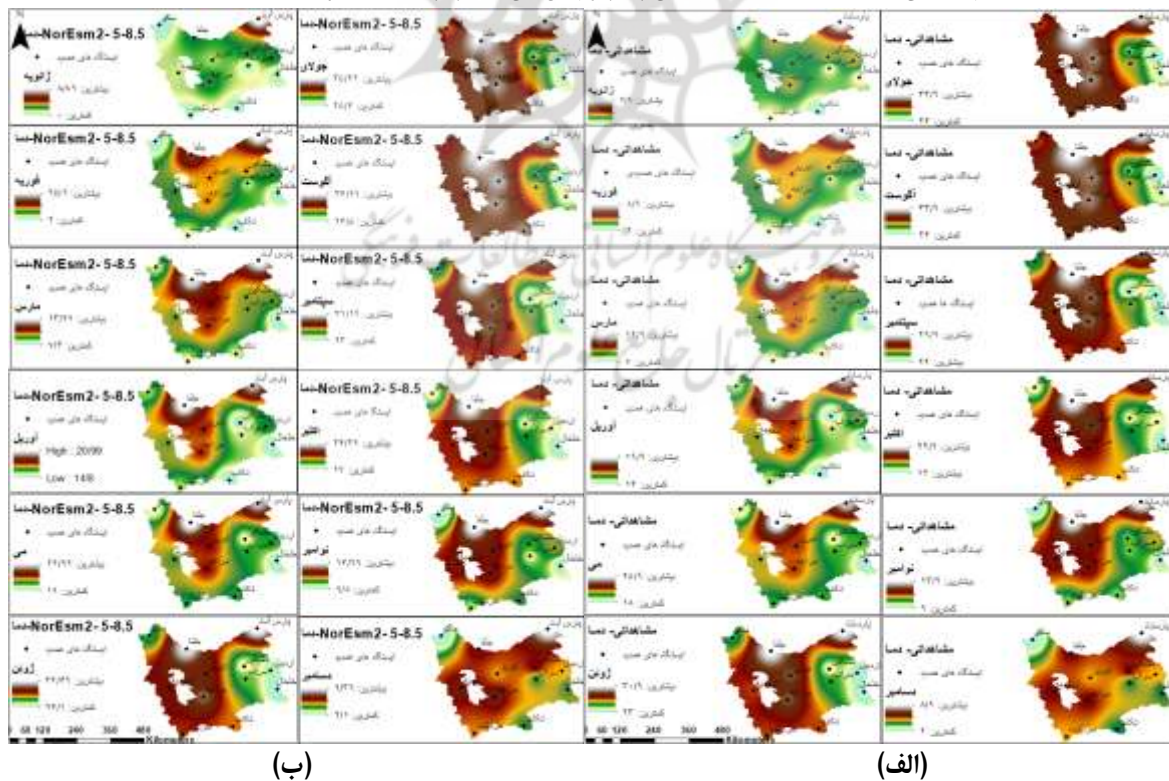
شکل ۴. درصد تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده میانگین دمای حداکثر بر اساس سناریوهای SSP 2-4.5 و SSP 5-8.5 مدل NorESM2

همچنین جهت مشاهده عینی نتایج و مقایسه میزان تغییرات مقادیر گذشته و آینده دمای حداکثر ماهانه، نقشه‌های پراکندگی دمای حداکثر مشاهداتی و پیش‌نگری شده تحت سناریوهای

ب) و ۶ (الف و ب) ارائه شده است.



شکل ۵. نقشه‌های پراکندگی دمای حداکثر ماهانه مشاهداتی (الف) و پیش‌بینی شده (ب) تحت سناریوی SSP 2-4.5 مدل NorESM2



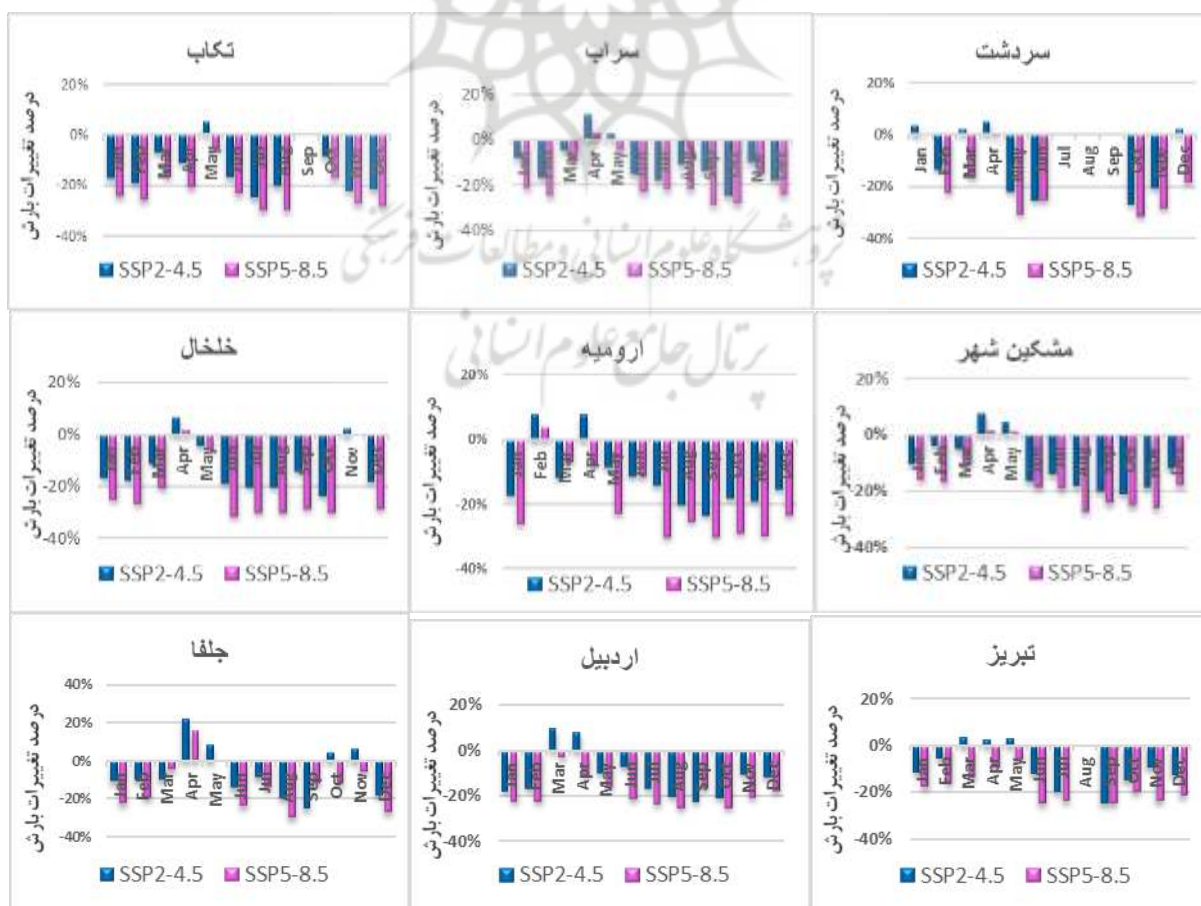
شکل ۶. نقشه‌های پراکندگی دمای حداکثر ماهانه مشاهداتی (الف) و پیش‌بینی شده (ب) تحت سناریوی SSP 5-8.5 مدل NorESM2

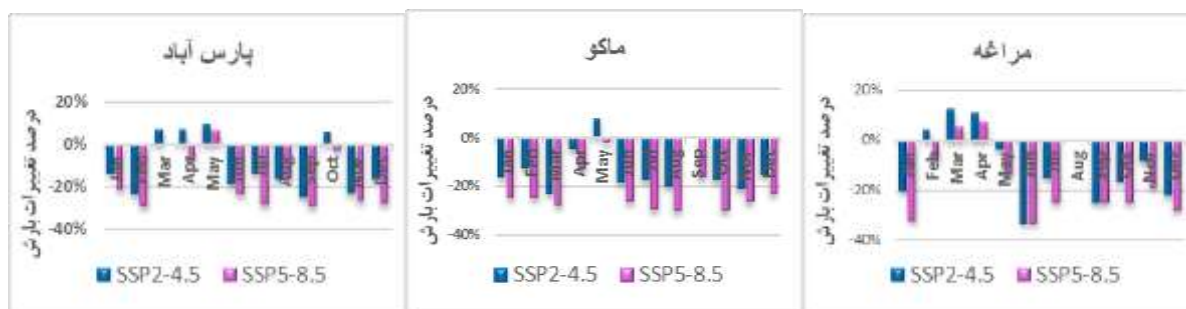
NorESM2 نشان داد که همه شهرها به‌ویژه تحت سناریوی

نتایج پیش‌بینی بارش شهرهای مورد مطالعه بر اساس مدل

در شهر تبریز مارس، آوریل و می ۳٪ افزایش و ژوئن، جولای، سپتامبر ۲۵٪ کاهش رخ خواهد داد. در شهر ارومیه ۸٪ افزایش در ماه فوریه و آوریل ۳۰٪ کاهش، در ماه جولای و نوامبر را تجربه خواهند کرد (شکل ۷).

در شهر ماکو ۵٪ افزایش بارش در ماه می و ۳۲ درصد کاهش بارش در ماه ژوئن پیش‌بینی شده است. در شهر جلفا تا ۲۰ درصد افزایش بارش در ماه‌های آوریل، پیش‌بینی شده است. همچنین بیش‌ترین درصد کاهش بارش ۳۰٪ و در ماه آگوست پیش‌بینی شده است. در شهر مشکین‌شهر آوریل و می حدود ۸٪ افزایش و بیش‌ترین میزان کاهش ۲۷٪ و در ماه آگوست پیش‌بینی گردید.

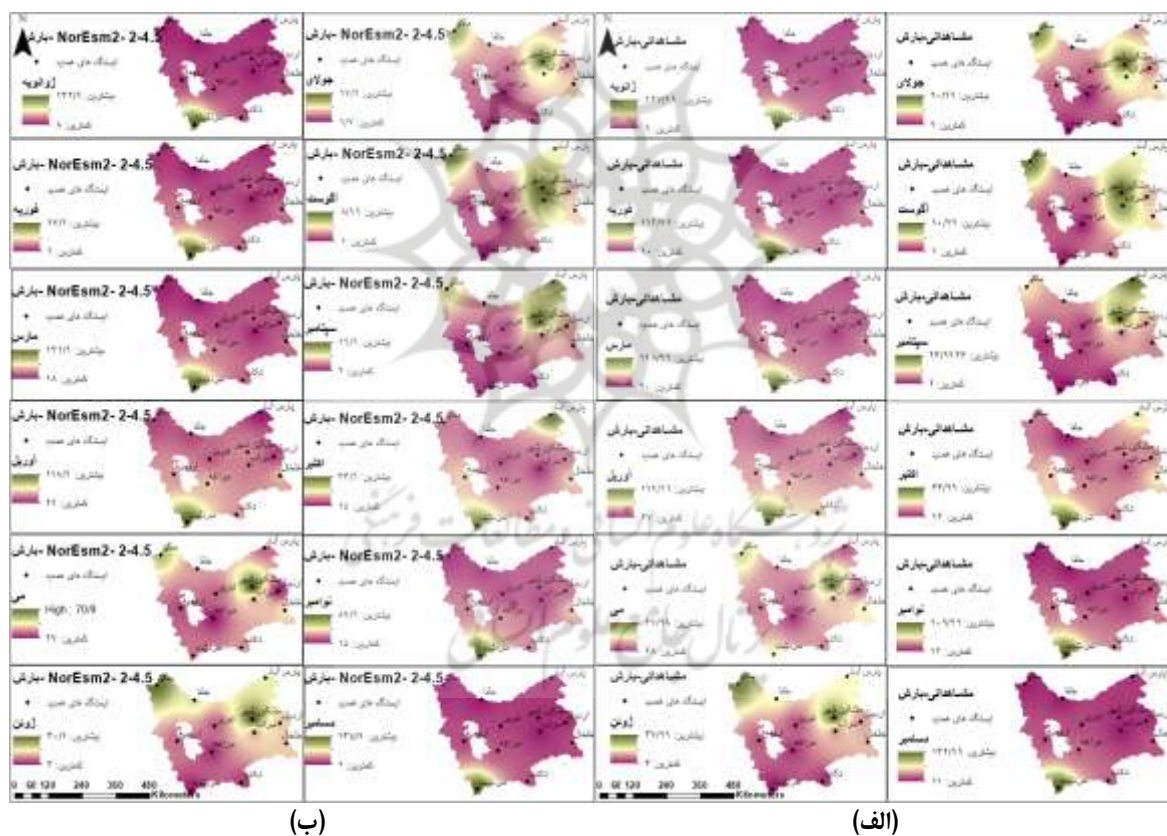




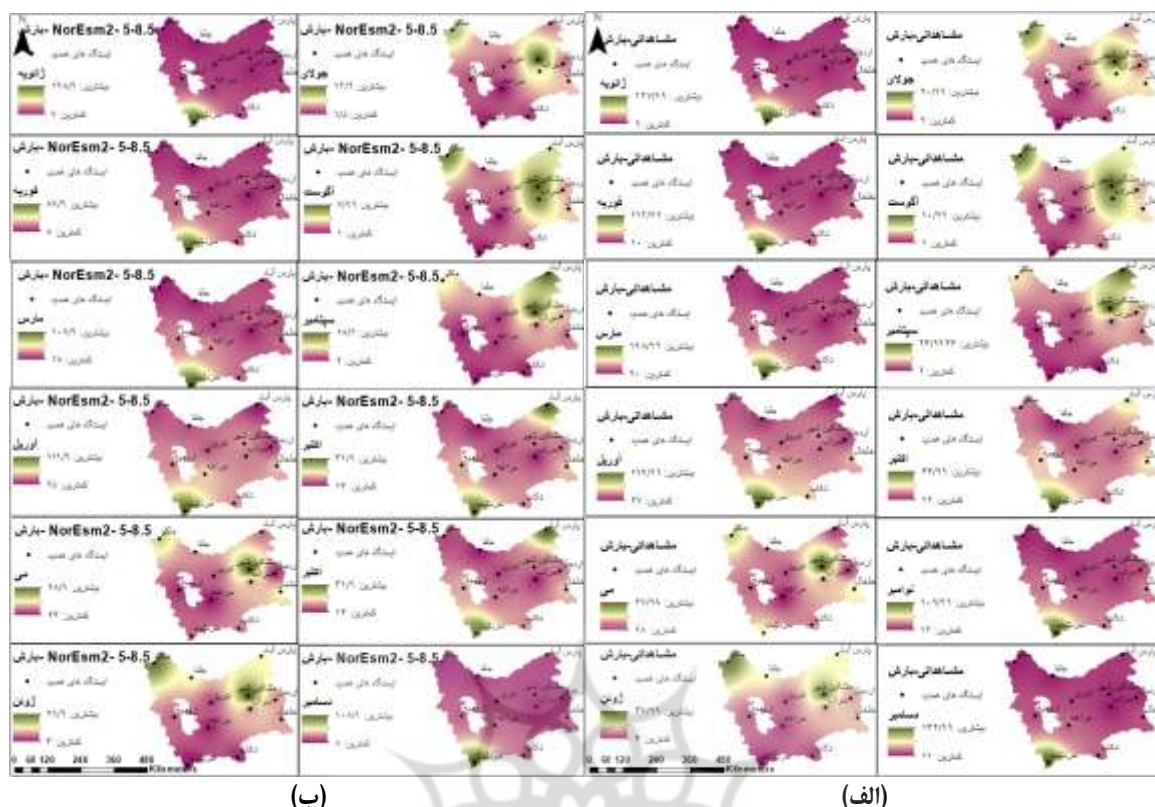
شکل ۷. نمودار درصد تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده مجموع بارش بر اساس سناریوهای SSP 2-4.5 و SSP 5-8.5 مدل NorESM2

مقادیر گذشته و آینده بارش ماهانه شهرهای مورد مطالعه، نقشه-های پراکندگی بارش مشاهداتی و پیش‌نگری شده تحت سناریوهای SSP 2-4.5 و SSP 5-8.5 مدل NorESM2 در شکل ۸ (الف و ب) و ۹ (الف و ب) ارائه شده است.

طبق توضیحات ارائه شده، تحت سناریوی SSP 5-8.5 بیش‌ترین میزان کاهش بارش به میزان ۳۰ الی ۳۳ درصد در شهرهای مراغه، ماکو، سردشت، ارومیه و تکاب رخ خواهد داد. همچنین به‌منظور ارائه ملموس و عینی نتایج و مقایسه تغییرات



شکل ۸. نقشه‌های پراکندگی بارش ماهانه مشاهداتی (الف) و پیش‌بینی شده (ب) تحت سناریوی SSP 2-4.5 مدل NorESM2



این صورت میزان تغییرات دما و بارش در بدبینانه‌ترین حالت پیش‌بینی می‌گردد تا سازمان‌های مرتبط آمادگی لازم جهت مقابله با مخاطرات احتمالی را داشته باشند.

راهکارها

پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن اینکه منطقه شمال غرب یکی از مناطق مهم گردشگری ایران محسوب می‌شود و زیرشاخه‌های مختلف کشاورزی جزء مشاغل اصلی اغلب ساکنین منطقه است، انجام گرفته و در راستای یافته‌های پژوهش، راهکارهای زیر پیشنهاد می‌شود:

- ✓ لزوم مطالعات گسترده‌تر در زمینه گرمایش جهانی؛
- ✓ مدیریت صحیح منابع آب؛
- ✓ ممانعت از مهاجرت روستاییان؛
- ✓ جلوگیری از تعطیلی کشاورزی در منطقه به‌منظور ممانعت از افزایش ریزگردها؛
- ✓ اصلاح الگوی کشت و جایگزین نمودن گیاهان مثمر با نیاز آبی کمتر به‌جای گیاهان غیر مثمر،
- ✓ همکاری مداوم و منسجم نهادها و سازمان‌های ذی‌ربط از جمله؛ سازمان محیط‌زیست، اداره هواشناسی، استانداری و شهرداری.

شایان ذکر است که عدم توجه به بحث افزایش دما و کاهش بارش که طی دهه‌های اخیر نقاط مختلف جهان را تحت تأثیر قرار داده، می‌تواند سبب خیزش ریزگردها شده و علاوه بر ایجاد مخاطره برای سلامت ساکنین منطقه، مشکلات متعدد زیست‌محیطی از جمله: اختلال در عملکرد زنبورها در تولید عسل و آسیب به شغل زنبورداری شود که از مشاغل اصلی در شمال غرب است. همچنین ایجاد تل خاک‌های ناشی از ریزگردهای محلی که در پی افزایش دما و کاهش بارش رخ می‌دهد، منجر به تخریب اراضی زراعی منطقه خواهد شد.

سیاسگزاری

پژوهش حاضر برگرفته از طرح پسا دکتری و تحت حمایت مالی دانشگاه محقق اردبیلی می‌باشد. نویسندگان از پشتیبانی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی و دانشکده علوم اجتماعی آن دانشگاه کمال تشکر را دارند. همچنین از سازمان هواشناسی کشور به جهت در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز، قدردانی می‌گردد.

و آغاز بهار افزایش جزئی بارش را تجربه خواهند کرد که میزان این افزایش در شهرهای مختلف، متفاوت خواهد بود.

بالاترین درصد افزایش بارش مربوط به شهر جلفا بود که به میزان ۲۰٪ پیش‌بینی شد. همچنین بیش‌ترین درصد کاهش بارش، تحت سناریوی بدبینانه SSP 5-8.5 و در ماه‌های مربوط به فصول تابستان و پاییز، پیش‌بینی گردید که بیش‌ترین درصد کاهش بارش به میزان ۳۰ الی ۳۳ درصد در ایستگاه‌های مراغه، ماکو، سردشت، ارومیه و تکاب رخ خواهد داد.

نتایج پژوهش حاضر در خصوص افزایش چند درجه‌ای دمای بیشینه در مناطق مختلف اقلیمی و در کل ماه‌های سال، با یافته‌های اکثر پژوهشگران همسو بود. از جمله: کوی و همکاران (۲۰۲۱)، زارعیان (۱۴۰۱)، اما از لحاظ پیش‌بینی میزان افزایش دما متفاوت بود؛ زیرا بعضی پژوهشگران میزان افزایش دما را کمتر و برخی بیش‌تر از ۲ درجه گزارش کرده‌اند. همچنین در خصوص پارامتر بارش، یافته‌های پژوهش در این خصوص که بارش در برخی ماه‌های سال افزایش و در برخی دیگر کاهش خواهد یافت، با نتایج مسگری و همکاران (۲۰۲۲)، هم‌راستا بود.

پژوهش حاضر روند کاهشی بارش را در برخی شهرها تأیید نمود که از این جهت نیز با یافته‌های زارعیان (۱۴۰۱) همسو بود. همچنین برخی از پژوهشگران همچون منون و همکاران (۲۰۱۳)، کوی و همکاران (۲۰۲۱) افزایش بارش را در منطقه مورد مطالعه خود پیش‌بینی کرده‌اند. پژوهش حاضر نیز در بعضی شهرهای منطقه، افزایش بارش را در برخی ماه‌های سال پیش‌بینی نمود. در مجموع طبق نتایج پژوهش حاضر طی دهه-های آتی میزان کاهش بارش محسوس‌تر از افزایش آن خواهد بود. همچنین برخی پژوهشگران از جمله زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰) و معصوم‌پور سماکوش و همکاران، عدم قطعیت مدل‌های GCM در پیش‌بینی بارش را مطرح کرده‌اند. در پژوهش حاضر نیز چنین نتیجه‌گیری شد که مدل مورد مطالعه، بارش را با خطای نسبتاً بالایی در مقایسه با دما پیش‌بینی می‌کند.

پژوهش حاضر، تحت جدیدترین سناریوهای SSP و مدل NorESM2 که از سری مدل‌های جدید CMIP6 هست به شبیه‌سازی و پیش‌بینی دما و بارش منطقه‌ای نسبتاً وسیع از شمال غرب کشور پرداخت که به دلیل جدید بودن مدل، احتمال خطای نتایج کم‌تر است. بنابراین یافته‌های پژوهش تأثیر قابل ملاحظه‌ای در برنامه‌ریزی و مدیریت آینده منطقه خواهد داشت. زیرا در

References

- Ahmadabadi A, & sedighifar Z. (2018). Prediction of Climate Change Induced Hydrogeomorphology by using SDSM in CAN Watershed. *Applied Research in Geographical Sciences*, 18(51), 114-103. (In Persian) doi: [10.29252/jgs.18.51.103](https://doi.org/10.29252/jgs.18.51.103)
- Akbarzadeh, M., Nouri, H., Mortazavi, S., & attaeian, B. (2024). Investigation and prediction of climate changes using the approach of General Circulation Models (GCMs) in the western provinces of Iran. *Desert Ecosystem Engineering*, 12(39), 23-42. (In Persian) doi: [10.22052/deej.2024.253424.1019](https://doi.org/10.22052/deej.2024.253424.1019)
- Bates, B., Kundzewicz, Z.W., Wu, S. & Palutikof, J. (2008). Climate Change and Water. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, 200.
- Chen, Z., Zhou, T., Zhang, L., Chen, X., Zhang, W., & Jiang, J. (2020). Global land monsoon precipitation changes in CMIP6 Projections. *Geophysical Research Letters*, 47(14), 1-9. <https://doi.org/10.1029/2019GL086902>
- Chobeh, S., & Kake Mami, A. (2014). Investigating the effectiveness of statistical exponential microscale model (SDSM) in predicting temperature and precipitation parameters (case study: Ardabil Baliqlochai watershed), *the second national conference on protection of natural resources and environment*, University of Mohaghegh Ardabili. [In Persian]. <https://civilica.com/doc/491153>
- Cui, T., Li, Ch., & Tian, F. (2021). Evaluation of Temperature and Precipitation Simulations in CMIP6. <https://doi.org/10.1029/2020EA001620>
- De Oliveira, V. A., de Mello, C. R., Beskow, S., Viola, M. R. & Srinivasan, R., (2019). Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome, *Ecological Engineering*, 133, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development Discussions*, 8(12), 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- ghorbani H, vali A A, & zarepour H. (2019). Analysis of the Climatological Drought Trend Variations Using Mann-Kendall, Sen and Pettitt Tests in Isfahan Province. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*; 6 (2):129-146.(In Persian) doi: [10.29252/jsaeh.6.2.129](https://doi.org/10.29252/jsaeh.6.2.129)
- Greene, A.M., Goddard, L. & Lall, L. (2006) .Probabilistic multi-model regional temperature change projections. *J. Climate*. 19: 4326-4346. doi: [10.1175/JCLI3864.1](https://doi.org/10.1175/JCLI3864.1)
- Gupta, V., Singh, V., & Jain, M. K. (2020). Assessment of precipitation extremes in India during the 21st century under SSP1-1.9 mitigation scenarios of CMIP6 GCMs. *Journal of Hydrology*, 590. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125422>
- Hennessy, K. J., Whetton, P. H., Walsh, K., Smith, I. N., Bathols, J. M., Hutchinson, M., & Sharples, J. (2007). Climate change effects on snow conditions in mainland Australia and adaptation at ski resorts through snowmaking. *Climate Research*, 35(3), 255. doi: [10.3354/cr00706](https://doi.org/10.3354/cr00706)
- Hoshiar, M., Sobhani, B., & Hosseini, S A. (2017). The perspective of changes in the maximum temperatures of Urmia using the CanESM2 model output statistical fine-tuning, *Scientific-Research Journal of Geography and Planning*, 22 (63): 325-305. (In Persian) https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_7598.html
- IPCC, (2013). Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V & Midgley, P. M., (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, *United Kingdom and New York*, NY, USA, 1535.
- IPCC, (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, Lonnoy, K., Matthews, E., J.B.R., Waterfield, T.K., T., Yelekçi, O., Yu, R. & Zhou, B. (eds) *Cambridge University Press*.
- Jiménez-Navarro, I. C., Jimeno-Sáez, P., López-Ballesteros, A., Pérez-Sánchez, J., & Senent-Aparicio, J. (2021). Impact of Climate Change on the Hydrology of the Forested Watershed That Drains to Lake Erken in Sweden: An Analysis Using SWAT+ and CMIP6 Scenarios. *Forests*, 12 (12), 1803.

- <https://doi.org/10.3390/f12121803>
- Karamouz, M., & Iraquejad, Sh. (2006). *Advanced Hydrology*, Publications of Amir Kabir University of Technology. *Tehran*. (In Persian)
- Kim, B.S., Kim, H.S., Seoh, B.H. & Kim, N.W. (2007). Impact of climate change on water resources in Yongdam Dam Basin, Korea. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 21, 355–373. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.023>
- Kwesi Nooni, I., Katchele Ogou, F., Saidou Chaibou., A. A., Nakoty. F. M., Gnitou, G.T., & Lu, J. (2023). Torical Mean Precipitation over Africa and the Arabian Peninsula against Satellite-Based Observation, *Journals Atmosphere*, 14 (3), 607. <https://doi.org/10.3390/atmos14030607>
- Lei, X ., Xu, Ch ., Liu, F., Song, L ., Cao, L ., & Suo, N . (2023) Precipitation over Arid Central Asia, *Remote Sens.*, 15(9), 2376. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104142>
- Maleki Nejad, H., Soleimani Mutlaq, M., Jaidari, A., & Shater Abshuri, S. (2012). Analysis of changes in rainfall and drought using Mann-Kendall and age tests in Tehran province, *Newar Scientific and Technical Journal*, 80, 43-55. (In Persian) https://nivar.irimo.ir/article_13186.html
- Mason, S.J. (2004). Simulating climate over western North America using stochastic weather generators. *Climate Change*, 6, 155-187. <https://link.springer.com/article/10.1023/B:CLIM.0000013700.12591.ca>.
- Menon, A., Levermann, A., Schewe, J., Lehmann, J., & Frieler, K. (2013). Consistent increase in Indian monsoon rainfall and its variability across CMIP-5 models. *Earth System Dynamics*, 4(2), 287-300. <https://doi.org/10.5194/esd-4-287-2013>
- Mesgari, E., Hosseini, S A., Hemmesy, M S., Houshyar, M., & Golzari Partoo, L. (2022) Assessment of CMIP6 models' performances and projection of precipitation based on SSP scenarios over the M ENAP region, *Journal of Water and Climate Change*, 13 (10): 3607–3619. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.195>
- Rasouli, Ali-Akbar; Sari Saraf, Behrouz; Mohammadi, Gholam-Hassan. (2011). Analyzing the occurrence of the climatic phenomenon of dust in the west of the country in the last 55 years by using non-parametric statistical methods, *Natural Geography*, 11, 1-16.(In Persian) <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.195>
- Rezaei Zaman, M; Masah Bowani, A; Javadi, S. (2022). Evaluation of the effects of SSP scenarios from the climatic outputs of the coupled intercomparative models of the sixth phase (CMIP6) on water resources and agriculture in the Hashtgerd region with the approach of applying adaptive strategies, *Environmental Science and Technology*, 24 (12), 107-93.(In Persian)
- Roshani, A., & Hamidi, M. (2022). Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature & precipitation based on CMIP6 models (Case study: Sari station). *Water and Irrigation Management*, 11(4), 781-795. (In Persian) doi: 10.22059/jwim.2022.330603.920
- Safarian, V, Salahi, B, Maleki Meresht, R & Kiyanian, M. (2019). Analysis of standardized precipitation and drought indicators in the city centers of Ardabil province, *Urban Ecology Research Quarterly*, 1, 121-136. (In Persian) doi: 10.30473/grup.2020.7476
- Salmi, T., A. Määttä, P. Anttila, T. Ruoho, & T. Amnell. (2002). Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates –the Excel template application MAKESENS.
- Sami, E., & Ebadi, M. (2024). Urban Flood Hazard Zoning Using Fuzzy-Analytic Network Process (ANP), Case study: Maragheh City. *Journal of Urban Ecology Researches*, 15(Vol 1 , Series 34), 171-186. doi: 10.30473/grup.2024.55316.2554
- Sarabi, M., Dastorani, M. T., & Zarrin, A. (2020). Investigating Impact of Future Climate Changes on Temperature and Precipitation condition (Case Study: Torogh Dam Watershed, Mashhad). *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 3(1), 63-83. (In Persian) doi: 10.22034/jmas.2021.278862.1129
- Scott, D., Dawson, J., & Jones, B. (2008). Climate change vulnerability of the US Northeast winter recreation–tourism sector *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 13(5-6), 577-596. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11027-007-9136-z>
- Serrano, A., Mateos, V.L & Garcia, J.A. (1999). Trend Analysis of Monthly Precipitation over the Iberian Peninsula for the Period 1921-1995. *Physics Chem. Earth (B)*, 24 (1-2) 85- 90. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(98\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(98)00016-1)

- Seymohammadi, S., Tavakoli, M., Zarafshani, K., Mahdizadeh, H., & Amiri, F. (2021). Prediction Impact of Climate Change on the Temperature & Precipitation by General Circulation Model, a Strategy for Sustainable Agriculture: (Case of Kermanshah Township). *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(6), 15-31. (In Persian) <https://sid.ir/paper/951683/fa>
- Shoja, F., & Shamsipour, A. (2023). Projection of future Precipitation changes in Tehran's water supply watersheds. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(36), 151-180. (In Persian) doi: [10.22111/jneh.2022.42622.1908](https://doi.org/10.22111/jneh.2022.42622.1908)
- Srivastava, A., Grotjahn, R., & Ullrich, P.A. (2020). Evaluation of historical CMIP6 model simulations of extreme precipitation over contiguous US regions, *Weather and Climate Extremes*, 29, 100-268. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100268>
- Turgay, P. & Ercan K. (2005). Trend Analysis in Turkish Precipitation data. *Hydrological processes published online in Wiley Interscience*. 20 (9), 2011 – 2026. doi/[10.1002/hyp.5993](https://doi.org/10.1002/hyp.5993)
- Zareian M. (2022). Effects of Climate Change on Temperature and Precipitation in Yazd Province Based on Combined Output of CMIP6 Models. *Journal of Water and soil sciences*; 26 (2): 91-105. (In Persian). doi: [10.47176/jwss.26.2.31501](https://doi.org/10.47176/jwss.26.2.31501)
- Zarrin, A., & Dadashi Roudbari, A. A. (2020). Projection the Long-Term Outlook Iran Future Temperature Based on the Output of The coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6). *Journal of the Earth and Space Physics*, 46(3), 583-602. (In Persian) doi: [20.1001.1.24235474.1400.8.4.14.9](https://doi.org/10.1001.1.24235474.1400.8.4.14.9)



مقدمه

تغییرات اقلیمی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی عصر حاضر است. این تغییرات نه تنها بر دمای هوا، بلکه بر الگوهای بارش و چرخه‌های آبی نیز تأثیرات چشمگیری دارند. تغییرات اقلیم به‌عنوان یک پدیده مستند و موجب تغییر در الگوهای آب و هوایی شناخته شده است و این شرایط به احتمال زیاد تداوم خواهد داشت (De Oliveira, 2019). این تغییرات می‌توانند علاوه بر متغیرهای اقلیمی، سایر اجزای یک سیستم مانند منابع آب و خاک را نیز متأثر سازد (Hipit et al, 2019؛ سرابی و همکاران، ۱۳۹۹). IPCC به‌عنوان مهم‌ترین مرجع پژوهش‌های پیش‌بینی تغییر اقلیم، تاکنون شش گزارش ارزیابی از تغییر اقلیم را منتشر کرده است. در حال حاضر، مدل‌های مختلف گردش عمومی جو^۱ دقیق‌ترین ابزار جهت کمی نمودن اثر تغییر اقلیم روی پارامترهای هواشناسی هستند (Mason, 2004).

در گزارش اخیر IPCC جدیدترین مدل‌های تغییر اقلیم با عنوان مدل‌های سری CMIP6 می‌باشند که اقلیم آینده را تحت سناریوهای انتشار SSP شبیه‌سازی می‌کنند (IPCC, 2021). افزایش دمای سطح زمین و تغییر در الگوی بارش، پدیده‌های غالب ناشی از تغییر اقلیم بوده و این دو، کمابیش سایر بخش‌های چرخه آب را نیز مختل خواهند ساخت (احمدآبادی و صدیقی فر، ۱۳۹۷). طبق ارزیابی گزارش پنجم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم^۲ میانگین سالانه دمای جهانی در دوره زمانی ۲۰۱۲-۱۸۸۰ به میزان ۰/۸۵ درجه سلسیوس افزایش یافته است که این افزایش به‌طور مستقیم منجر به تغییر در فراوانی وقوع مخاطراتی همچون خشکسالی، سیل و طوفان خواهد شد. بنابراین مدیریت صحیح منابع آب، به‌ویژه در مناطقی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک که بیش‌تر تحت تأثیر این مخاطرات هستند، امری ضروری می‌باشد (روشنی و حمیدی، ۱۴۰۰).

امروزه اکثر پژوهشگران علوم جوی بر مسئله گرمایش زمین اتفاق نظر دارند. در سراسر جهان، به دلیل تغییرات آب و هوایی و توسعه مداوم کاربری اراضی، شهرها با تغییرات چشمگیر فیزیکی و اقلیمی، مشکلات شدید زیست محیطی و اکولوژیکی و خطرات متعدد محیطی روبرو هستند (سامی و عبادی، ۱۴۰۳). طبق بررسی‌های انجام شده، تغییرات اقلیمی تهدیدی جدی بر تفریح‌های زمستانه شمال شرق ایالات

متحده بوده و پیامدهای بالقوه آن بر کسب‌وکار و فعالیت‌های اجتماعی منطقه که ارتباط تنگاتنگی با توریسم زمستانه دارند قابل ملاحظه است (Scott, 2008). همچنین پژوهش‌ها نشان می‌دهند که تحت تأثیر گرمایش جهانی و افزایش دما، پوشش برف بین ۱۰ الی ۳۹ درصد در دهه ۲۰۲۰ و ۲۲ الی ۸۵٪ در ۲۰۵۰ کاهش خواهد یافت (Hennessy, 2007). منطقه شمال غرب ایران شامل شهرهای مهمی از جمله: تبریز، ارومیه، اردبیل و زنجان است که به دلیل وابستگی اقتصادی به منابع آب و کشاورزی، در برابر نوسانات اقلیمی بسیار آسیب‌پذیر می‌باشند. این بخش از ایران به‌عنوان یکی از مناطق سردسیر کشور، به دلیل برخورداری از آب و هوای خنک و مطبوع و جاذبه‌های گردشگری و زیست‌بوم خاص و منحصربه‌فرد همچون ارتفاعات و قله پوشیده از برف و پیست‌های اسکی، آب‌های درمانی همواره در فصول مختلف، پذیرای گردشگران داخلی و خارجی بوده است که با وقوع گرمایش جهانی و افزایش انکارناپذیر دما و کاهش بارش ناشی از آن، دچار تحولاتی اقلیمی شده و خواهد شد و این مسئله، قطعاً از جاذبه‌های گردشگری منطقه کاسته و اقتصاد آن را متضرر خواهد ساخت. مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی با استفاده از سناریوهای انتشار مختلف برای درک بهتر روند آینده آب و هوا و برنامه‌ریزی درازمدت برای مقابله با آثار سوء این تغییرات طی سال‌های اخیر، اهمیت فزاینده‌ای یافته است. سناریوهای^۳ SSP به‌عنوان یکی از جدیدترین و جامع‌ترین رویکردهای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی، این امکان را فراهم می‌سازند تا با در نظر گرفتن مسیرهای مختلف توسعه اقتصادی و اجتماعی، تغییرات دما و بارش آینده، مورد ارزیابی قرار گیرد.

با توجه به مواردی که ذکر شد و به دلیل نقش مهمی که متغیرهای دما و بارش در زیست‌بوم هر منطقه دارد، در پژوهش حاضر سعی بر آن است تا پیش‌بینی تغییرات این دو پارامتر در شهرهای شمال غرب ایران تحت سناریوهای جدید SSP مدل اقلیمی NorESM2 که از مدل‌های جدید GCM می‌باشد، انجام گیرد و به این وسیله تصویری دقیق‌تر از آینده اقلیمی این منطقه ارائه شود. در این راستا سعی گردید تا شهرهایی انتخاب شود که ضمن تناسب توزیع آن‌ها در سطح منطقه مورد مطالعه، امکان ترسیم نقشه پراکندگی دما و بارش در دوره مشاهداتی و پیش‌بینی شده و مقایسه نتایج حاصل فراهم گردد. شهرهای منتخب پژوهش حاضر از مناطق

موجود در جو و سطح زمین مانند: دی‌اکسیدکربن، ذرات معلق و پوشش گیاهی را در نظر گرفته و بر اساس آن‌ها تخمینی از مقدار پارامترهای هواشناسی در آینده ارائه می‌دهد (Green, 2006).

پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده گزارش ششم هیئت بین‌دولت‌ها تغییر اقلیم از سناریوهای جدید به نام مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک^۲ استفاده می‌کند که با نماینده خطوط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای^۳ پروژه گزارش پنجم IPCC ترکیب شده است (Eyring et al, 2016). سناریوهای جدید اضافه شده در CMIP6 شامل SSP1-1.9، SSP4-3.4، SSP3-7.0 هستند که چهار سناریوی SSP2-4.5، SSP1-2.6، SSP4-6.0، SSP5-8.5 نیز به‌روز شده سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 موجود در CMIP5 می‌باشند (Gupta et al, 2020). مدل‌های آب و هوایی فعلی قوی‌تر از مجموعه‌های قبلی CMIP هستند و پیشرفت‌های مؤثری را در بازتولید الگوهای بزرگ‌مقیاس متغیرهای آب و هوایی نشان دادند (Chen et al, 2020). لذا در پژوهش حاضر از سناریوهایی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 موجود در مدل NorESM2 که از سری مدل‌های CMIP6 هست بهره گرفته شد. در سناریوی SSP2-4.5 پیش‌بینی می‌شود که انتشار جهانی از الگوهای فعلی پیروی کند که این امر حاکی از وجود موانع زیاد در مسیر کاهش و انطباق است. در سناریوی SSP5-8.5، توسعه اقتصادی بر آثار زیست‌محیطی اولویت دارد بر این اساس، مقابله با آثار تغییر اقلیم دشوار است (Jiménez-Navarro et al, 2021).

مدل‌های GCM داده‌های هواشناسی را در یک شبکه بزرگ‌مقیاس در ارتفاعات فوقانی جو پیش‌بینی می‌کنند که عمومی‌ترین روش برای رفع این مشکل، استفاده از ریزمقیاس‌نمایی است. این روش‌ها خروجی مدل‌های GCM را با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، به مقیاس محلی تبدیل می‌کنند. روش‌های ریزمقیاس‌سازی به دو دسته روش دینامیکی و آماری تقسیم می‌شوند (Bates & Kundzewicz, 2008). از دلایل استفاده از این GCM‌ها عملکرد سریع و آسان آن‌ها نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد (Kim & Seoh, 2007). به دلیل اینکه مدل‌های GCM بزرگ‌مقیاس هستند، لذا به یک ابزار ریزگردان جهت تبدیل الگوهای بزرگ‌مقیاس به مقیاس محلی نیاز است. به این

مهم گردشگری و کشاورزی شمال غرب ایران هستند و برخلاف اهمیتی که دارند، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند. لذا نوآوری پژوهش حاضر، پیش‌بینی دمای حداکثر و بارش آینده نزدیک در بخش وسیعی از شمال غرب ایران، تحت سناریوهای جدید (متوسط SSP2-4.5 و بدبینانه SSP5-8.4) مدل NorESM2 است، با پیش‌بینی تحت سناریوهای مذکور، میزان افزایش دما و کاهش بارش در بدبینانه‌ترین حالت مشخص شده و با آمادگی کافی در مقابل مخاطرات احتمالی، پایداری زیست‌بوم شهری در منطقه مورد مطالعه حاصل می‌گردد. در راستای هدف پژوهش، این سؤال مطرح است که طی دهه‌های گذشته، متغیرهای دما و بارش در محدوده مورد مطالعه چه روندی داشته و در آینده چه رفتاری خواهند داشت؟ یافته‌های به دست آمده از روندیابی گذشته و پیش‌بینی رفتار آتی این دو پارامتر مهم اقلیمی می‌تواند نقشی مؤثری در برنامه‌ریزی مدیران منطقه داشته باشد.

مبانی نظری

چارچوب نظری

اصطلاح تغییر اقلیم به تغییر در وضعیت آب و هوایی اشاره دارد که می‌تواند از طریق میانگین و یا تغییرپذیری ویژگی‌های آن مشخص شده و برای دوره طولانی و به مدت یک دهه یا بیش‌تر تداوم یابد (IPCC, 2013). تغییر اقلیم امروزه به‌عنوان شایع‌ترین و مهم‌ترین مباحث علمی و سیاسی-اجتماعی مطرح است. بر همین اساس انسان در تلاش است تا با ابزار و علم خود، قانونمندی این تغییرات را کشف و اقدام به پیش‌بینی رفتارهای بعدی سامانه آب و هوا نماید (عزیزی، ۱۳۸۳). این تغییر نشان‌دهنده تغییرات غیرعادی در اقلیم زمین و پیامدهای ناشی از آن در نواحی مختلف کره زمین است و می‌تواند در متوسط دما، بارش، الگوهای آب و هوایی، باد، تابش و متغیرهایی از این قبیل مؤثر باشد (کارآموز و عراقی‌نژاد، ۱۳۸۴).

منطقه شمال غرب ایران، به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود، از جمله مناطقی است که تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار دارد. پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده^۱ با هماهنگی بین مراکز مختلف برای استانداردسازی، GCM‌ها به‌عنوان یک داده مبنا در مطالعات تغییر اقلیم در سطح جهان به انجام رسیده است. این مدل‌ها اجزاء زیادی از خصوصیات

2. SSP (Shared Socioeconomic Patgways)

3. RCP

1. CMIP

تغییرات در منطقه آب و هوایی BWh و کم‌ترین آن در منطقه آب و هوایی سرد و کوهستانی ایران Dsc رخ خواهد داد.

زارعیان (۱۴۰۱)، اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش استان یزد بر اساس خروجی ترکیبی مدل‌های CMIP6 بررسی نمودند. نتایج نشان داد که مدل‌های CanESM5 و BCC-CSM2-MR، به‌ترتیب بیش‌ترین توانایی را در شبیه‌سازی دما و بارش دوره تاریخی در تمامی ایستگاه‌های مختلف هواشناسی دارا هستند. همچنین طبق یافته‌های حاصل، در تمامی سناریوهای انتشار، دمای سالانه افزایش و بارندگی سالانه کاهش پیدا خواهد کرد. دمای سالانه این منطقه در ایستگاه‌های مختلف بین ۰/۲ تا ۰/۶ درجه افزایش و بارش نیز بین ۲/۹ تا ۱۳/۷ درصد کاهش خواهد یافت. همچنین بیش‌ترین میزان افزایش دما و کاهش بارندگی در این منطقه، به ترتیب در فصول بهار و فصل پاییز رخ خواهند داد.

رضایی زمان و همکاران (۱۴۰۱)، با بهره‌گیری از مدل SWAT و NorESM2 اثرات سناریوهای SSP را بر منابع آب و کشاورزی منطقه هشتگرد بررسی نمودند. یافته‌های آنان حاکی از افزایش تنش آبی و کاهش محصول تحت همه‌ی سناریوها بوده است. همچنین طبق نتایج این پژوهشگران با تغییر الگوی کشت به گندم و جو که قابلیت سازگاری با تغییر اقلیم منطقه نسبت به سایر محصولات داشته‌اند، تنش آبی کم‌تری در منطقه هشتگرد تجربه خواهد شد.

اکبرزاده و همکاران (۱۴۰۳)، به بررسی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی با استفاده از رویکرد مدل‌های گردش عمومی جو در استان‌های غربی کشور پرداختند. مطالعات آنان نشان داده است که بیش‌ترین تغییر بارش در آذربایجان شرقی و غربی رخ خواهد داد و بیش‌ترین تغییر در دمای حداکثر در استان فارس و کرمانشاه تجربه خواهد شد.

اسریواستوا^۱ (۲۰۲۰)، به شبیه‌سازی‌های مدل‌های CMIP6 برای بارش‌های ایالات متحده پرداختند. طبق یافته‌های آنان اغلب مدل‌ها، میانگین و تغییرپذیری دوره‌های تر را بیش از حد و دوره‌های خشک را کم‌تر از حد تخمین می‌زنند.

چو و همکاران^۲ (۲۰۲۱)، دما و بارش فلات تبت را با مدل‌های CMIP6 شبیه‌سازی نمودند. بر اساس یافته‌های آنان همانند دوره مشاهداتی، در دوره پیش‌بینی شده نیز هر دو متغیر بارش و دما در تمام فصول روند افزایشی نشان دادند.

منظور در پژوهش حاضر، ریزگردان SDSM که یکی از پرکاربردترین ابزارهای آماری در هواشناسی، هیدرولوژی، جغرافیا و زیست‌شناسی است، انتخاب شد (هوشیار و همکاران، ۱۳۹۷). در این ریزگردان، از الگوی گردش روزانه بزرگ‌مقیاس در مقیاس ایستگاهی استفاده می‌گردد. این ریزگردان، در مورد مولدهای هواشناسی تصادفی و روش‌های توابع تغییر شکل یافته، نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد (هوشیار و همکاران، ۱۳۹۷). در واقع SDSM ترکیبی از روش مولد هواشناسی، آماری و توابع تغییر شکل یافته است. اگر چه عدم قطعیت در استفاده از نرم‌افزارهای ریزگردان و ریزمقیاس نمایی مدل‌های اقلیمی و پیش‌بینی تغییرات اقلیم آینده وجود دارد، لیکن بهره‌گیری از نسخه به‌روز شده‌ی این نرم‌افزار (SDSM6) و مدل و سناریوهای جدیدتر (NorESM2) تحت سناریوهای SSP، دقت پیش‌بینی را بیش‌تر و احتمال خطا را کم‌تر می‌کند.

همچنین به‌منظور بررسی رفتار داده‌های سالانه دما و بارش دوره پایه، نیاز به تعیین روند است تا نتایج با دوره پیش‌بینی شده مقایسه گردد. آزمون شیب سن یکی از روش‌های تحلیل روند است که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کند و نیز توانایی تحلیل روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی، با وجود داده‌های گم شده را دارد. همچنین وابسته نبودن به توزیع آماری خاص و اثرپذیری ناچیز از مقادیر حدی، از مزایای استفاده از این روش است (Turgay & Ercan, 2005). آزمون شیب سن از تحلیل تفاوت بین مشاهده‌های یک سری زمانی استفاده می‌کند (Serrano et al, 1999) و اساس آن بر محاسبه یک شیب میانه برای سری زمانی استوار است (ملکی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۲).

پیشینه پژوهش

صفریان زنگیر و همکاران (۱۳۹۹)، به تحلیل شاخص‌های خشکسالی و بارش استاندارد شده در مراکز شهرهای استان اردبیل با شاخص‌های SPI و CZI پرداختند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که در هر ۵ ایستگاه مورد مطالعه، تعداد خشکسالی‌های متوسط، بیش‌تر از خشکسالی‌های شدید و خیلی شدید بوده است.

زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰)، به پیش‌بینی بارش‌های شدید آینده در ایران بر اساس مجموعه مدل‌های CMIP6 پرداختند و به‌طور کلی، نتایج مطالعه آنان عدم قطعیت‌های این مدل‌ها را در پیش‌بینی بارش نشان داده است. بررسی روند تغییرات IEP نشان داده است که بیش‌ترین این

1. Srivastava et al

2. Cui et al

روش انجام پژوهش

پژوهش حاضر یک تحقیق کاربردی با روش توصیفی - تحلیلی می‌باشد که بر روی داده‌های دمای حداکثر و بارش شهرهای منتخب شمال غرب ایران شامل: جلفا، تبریز، سراب، مراغه، پارس‌آباد، مشکین‌شهر، اردبیل، خلخال، ماکو، ارومیه، تکاب و سردشت در دو بخش انجام شد. بخش اول پژوهش، تحلیل روند تغییرات دمای حداکثر و بارش در شهرهای مورد مطالعه بود. برای این منظور، داده‌های میانگین دما و بارش ۳۰ ساله با بهره‌گیری از تخمین‌گر شیب سن برای دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴)، روندیابی شد تا از این طریق تغییرات آب و هوایی دهه‌های گذشته به‌درستی شناسایی شده و روند دقیق پارامترها نشان داده شود (شجاع و همکاران، ۱۴۰۱). لازم به ذکر است که آزمون شیب سن از مهم‌ترین روش‌های تحلیل روند پارامترهای آب و هوایی می‌باشد و مقدار شیب به‌دست آمده از این روش، بیانگر شدت روند است. این آزمون به شرح زیر انجام شد:

الف) ابتدا شیب بین هر جفت داده با رابطه زیر محاسبه گردید (رابطه ۱).

$$Q_i = \frac{X_t - X_s}{t - s}, i = 1, 2, \dots, N$$

که X_t و X_s به ترتیب داده در زمان‌های $t > s$ و $N = \frac{n(n-1)}{2}$ می‌باشد. با اعمال این رابطه، برای هر دو جفت داده، یک سری زمانی از شیب‌های محاسبه شده به‌دست آمد که از محاسبه میانه این سری زمانی، برآورد شیب سن مربوط به خط روند، حاصل شد. مقدار مثبت این شیب نشان‌گر صعودی بودن روند و مقدار منفی آن نشان‌دهنده نزولی بودن روند است (رسولی و همکاران، ۱۳۸۹).

ب) در مرحله دوم پارامتر $C \alpha$ برای سطح اطمینان موردنظر از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

$$C \alpha = Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = \sqrt{\text{Var}(A)}$$

در رابطه فوق، Z چنک توزیع نرمال استاندارد می‌باشد (Salmi et al, 2002).

ج) در مرحله سوم جهت محاسبه حدود اطمینان بالا و پایین با ضریب $(1-\alpha)$ ، مقادیر M_1 و M_2 به کمک روابط (۳) محاسبه شد:

$$M_1 = \frac{N - C \alpha}{2}$$

$$M_2 = \frac{N + C \alpha}{2}$$

که N تعداد شیب‌های محاسبه شده در بند الف است.

مسگری و همکاران^۱ (۲۰۲۲)، به ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 و پیش‌بینی بارش بر اساس سناریوهای SSP در منطقه MENAP پرداختند و یافته‌های آنان نشان داد که میزان بارش به جز مناطقی مانند دریای سیاه، مدیترانه، نواحی ساحلی دریای سرخ و مناطق کوهستانی و مرتفع، در سایر نقاط محدوده مورد مطالعه آنان عمدتاً کاهش خواهد یافت که بیش‌ترین میزان کاهش بارش در کشورهای خاورمیانه رخ خواهد داد.

کوویسی نونی و همکاران^۲ (۲۰۲۳)، به ارزیابی میانگین بارش گذشته آفریقا و شبه‌جزیره عربستان بر اساس مدل CMIP6 در مقایسه با مشاهدات پایه ماهواره‌ای پرداختند. نتایج نشان دادند که مدل CMIP6 MME نسبت به اکثر مدل‌های منفرد عملکرد بهتری در شبیه‌سازی و پیش‌بینی بارش دارد.

لی و همکاران^۳ (۲۰۲۳)، به بررسی عملکرد مدل‌های چندگانه GCM در پیش‌بینی بارش سنگین در آسیای خشک مرکزی پرداختند. برای این کار از پروژه مقایسه‌ای ۶ مدل جفت شده، استفاده کردند و نتایج پژوهش آن‌ها عملکرد مناسب مدل‌های GCM را در پیش‌بینی بارش مناطق خشک آسیای مرکزی تأیید کرده و چنین اظهار داشته‌اند که با مجموعه مدل‌های جفت شده، پیش‌بینی‌های تغییرات اقلیمی آینده با اطمینان بیش‌تری انجام می‌گیرد.

بررسی یافته‌های پژوهشگران نشان می‌دهد که در نقاط مختلف جهان، الگوها و روندهای متنوعی برای دما و بارش پیش‌بینی شده است که این امر، عدم قطعیت در رابطه با آثار تغییر اقلیم را تشدید نموده و لزوم مطالعه حوزه‌ای و منطقه‌ای دقیق‌تر تغییر پارامترهای اقلیمی را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک همچون شمال غرب ایران که منطقه‌ای با پتانسیل-های چشمگیر برای توسعه صنعت گردشگری دارد و وابسته به اقتصاد کشاورزی است، تقویت می‌نماید. در اغلب مطالعات انجام شده، پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی برای آینده دور و در محدوده کوچک (به وسعت یک شهر یا استان) با مدل‌ها و سناریوهای قدیمی‌تر انجام گرفته که این امر احتمال خطای پیش‌بینی را افزایش می‌دهد، در پژوهش حاضر سعی شده است تا ضمن بهره‌گیری از مدل و سناریوهای به روز شده، منطقه‌ای نسبتاً وسیع انتخاب گردد، تا امکان ارائه نقشه پراکندگی دما و بارش در دوره مشاهداتی و پیش‌بینی شده و مقایسه نتایج فراهم شود.

از وب‌سایت پروژه مقایسه مدل جفت شده گزارش ششم دریافت گردید. به‌منظور پیش‌نگری دمای حداکثر و بارش شهرهای مورد مطالعه در نرم‌افزار SDSM6.1 ابتدا دقت و کارایی مدل NorESM2_MM برای شبیه‌سازی دوره پایه نسبت به داده‌های مشاهداتی، مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس تغییرات دو پارامتر برای هر یک از شهرها، برای آینده (۲۰۴۳-۲۰۱۵) تحت دو سناریوی جدید SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پیش‌بینی و نتایج حاصل، با داده‌های دوره پایه مقایسه شد.

به‌طور خلاصه ریزگردان SDSM، کوچک‌مقیاس‌نمایی آماری متغیرهای اقلیمی روزانه را تحت مراحل زیر انجام داد: ۱. کنترل کیفیت داده‌ها و تغییر شکل داده‌ها ۲. انتخاب بهترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده ۳. کالیبره کردن مدل تولید مدل هواشناسی ۵. آنالیز آماری ۶. خروجی گرافیکی مدل ۷. تولید سناریوی اقلیمی. تمامی مراحل فوق توسط گزینه‌های تعبیه شده در نرم‌افزار SDSM انجام گرفت (چوبه و کاکه، ۱۳۹۴). در جدول ۱، مشخصات مدل GCM مورد استفاده در پژوهش حاضر ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مدل GCM مورد استفاده در پژوهش

ردیف	نام مدل	مؤسسه	کشور
۱	NorESM2_MM	مرکز اقلیمی نروژ	Norway

مأخذ: مسگری و همکاران، ۲۰۲۲

در این روابط، X_0 داده‌های مشاهداتی، X_s داده‌های شبیه‌سازی‌شده و N تعداد داده‌ها است (Mesgari et al, 2022).

محدوده مورد مطالعه

در جدول ۲، مشخصات و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب و در شکل ۱، نقشه محدوده مورد مطالعه ارائه شده است.

د) در پایان برای بررسی حدود اطمینان، در رابطه (۱) که از کوچک به بزرگ مرتب شد $M1$ امین و $M2 + 1$ امین شیب استخراج گردید. در صورتی که عدد صفر در دامنه بین دو شیب استخراج شده فوق قرار بگیرد، فرض صفر پذیرفته می‌شود و سری زمانی بدون روند است (قربانی و همکاران، ۱۳۹۸).

بخش دوم پژوهش، به‌منظور پیش‌نگری تغییرات پارامترهای دما و بارش برای دهه‌های آتی در محدوده مورد مطالعه انجام شد. برای این منظور، مدل NorESM2-MM که از سری مدل‌های فاز ششم پروژه مقایسه‌ای مدل جفت شده (CMIP6) است، انتخاب گردید (مدل مذکور بر این اساس انتخاب شد که دارای وضوح مکانی بالا بوده و داده‌های آن برای سناریوهای مورد مطالعه (SSP) موجود بود). برای انجام این بخش از پژوهش نیاز به دو سری داده بود. دسته اول، داده‌های روزانه دمای حداکثر و بارش شهرهای منتخب شمال غرب ایران برای سال‌های (۲۰۱۴-۱۹۸۵) که از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. دسته دوم، داده‌های مدل NorESM2-MM، از سری مدل‌های CMIP6 بود. این داده‌ها شامل مقادیر روزانه، برای دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۵) و آینده (۲۰۴۳-۲۰۱۵) بود که

در نهایت جهت ارزیابی عملکرد و دقت مدل NorESM2-MM، در تولید داده‌های دما و بارش، داده‌های دوره مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با استفاده از ۳ شاخص خطاسنجی شامل: میانگین مربعات خطا^۱، ریشه میانگین مربع خطا^۲ و میانگین خطای مطلق^۳ مقایسه شد و میانگین این آماره‌ها برای شهرهای منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت. در روابط ۴ تا ۶ به آماره‌های مورد استفاده اشاره گردیده است.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_0 - X_s)^2 \quad (4)$$

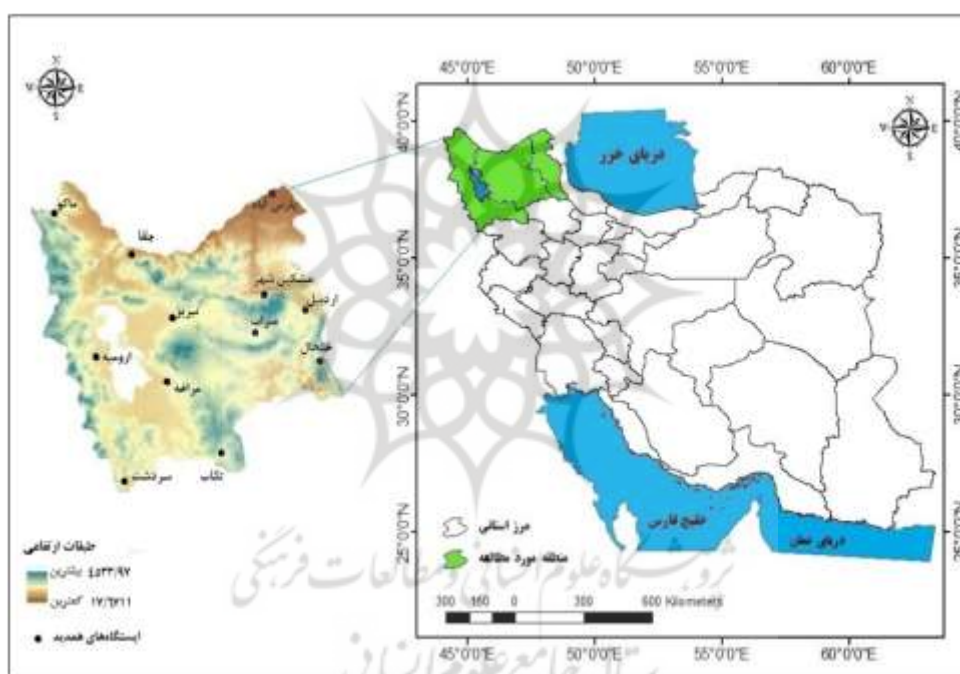
$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_0 - X_s)^2}}{N} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N (X_0 - X_s)}{N} \quad (6)$$

1. MSE
2. RMSE
3. MAE

جدول ۲. مشخصات و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	دوره‌ی آماری
جلفا	۴۵°۴۰'	۳۸°۴۵'	۷۳۶	۱۹۸۵-۲۰۱۴
تبریز	۴۶°۱۷'	۳۸°۵'	۱۳۶۱	۱۹۸۵-۲۰۱۴
سراب	۴۷°۳۳'	۳۷°۵۶'	۱۶۸۲	۱۹۸۶-۲۰۱۴
مراغه	۴۶°۱۶'	۳۷°۲۴'	۱۴۷۷	۱۹۸۵-۲۰۱۴
ماکو	۴۴°۲۶'	۳۹°۲۰'	۱۴۱۱	۱۹۸۵-۲۰۱۴
ارومیه	۴۵°۵'	۳۷°۳۲'	۱۳۱۶	۱۹۸۵-۲۰۱۴
سردشت	۴۵°۳۰'	۳۶°۹'	۱۶۷۰	۱۹۸۷-۲۰۱۴
تکاب	۳۶°۲۴'	۳۷°۶'	۱۷۶۵	۱۹۸۶-۲۰۱۴
پارس‌آباد	۴۷°۵۵'	۳۹°۳۹'	۳۱۹	۱۹۸۵-۲۰۱۴
مشکین‌شهر	۴۷°۶'	۳۸°۳۸'	۱۵۶۸	۱۹۹۵-۲۰۱۴
اردبیل	۴۸°۱۷'	۳۸°۱۵'	۱۳۳۲	۱۹۸۵-۲۰۱۴
خلخال	۴۸°۳۱'	۳۷°۳۸'	۱۷۹۶	۱۹۸۷-۲۰۱۴



شکل ۱. نقشه محدوده مورد مطالعه

یافته‌ها

نتایج واکاوی تغییرات روند مجموع بارش سالانه طی دوره آماری مورد مطالعه بر اساس شیب سن

یافته‌های به دست آمده از تحلیل روند بارش شهرهای مورد مطالعه در سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ بر مبنای سری‌های زمانی بلندمدت در مقیاس سالانه بر اساس شیب سن، در جدول ۳، ارائه شده است. طبق اطلاعات جدول، مجموع بارش سالانه، طی دوره آماری مورد مطالعه در شهرهای مشکین‌شهر، ماکو، سراب، جلفا،

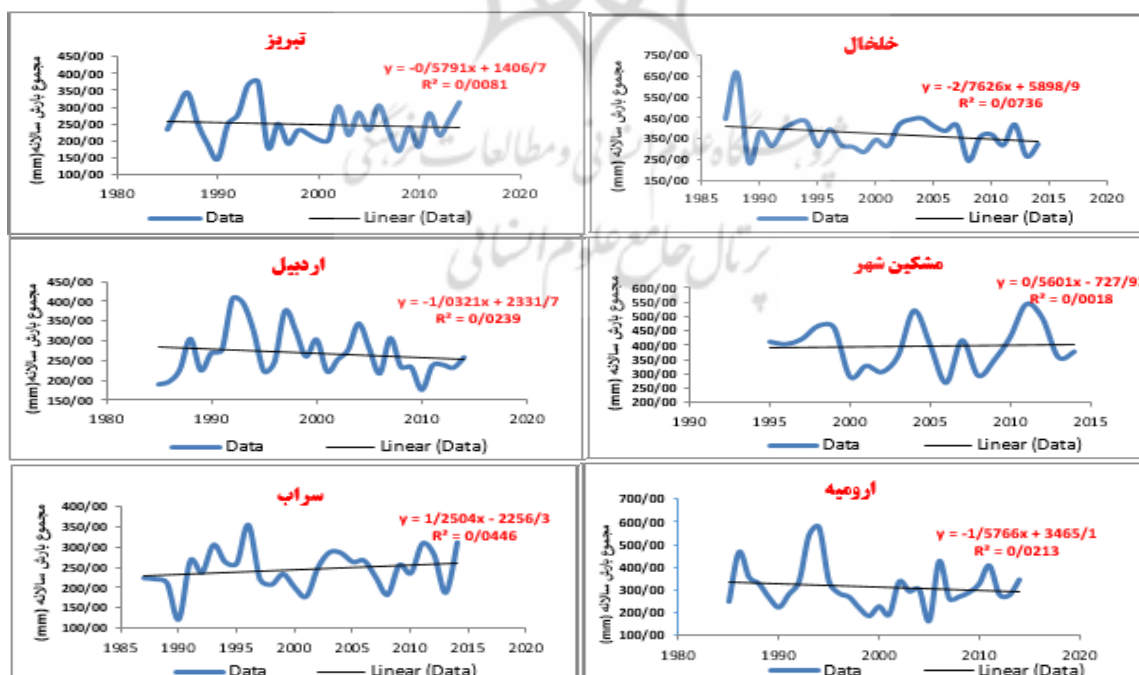
پارس‌آباد آماره Q مثبت بوده است. بیش‌ترین مقادیر Z در شهر-های مراغه و تکاب مشاهده شد که به ترتیب برابر ۲/۵۳- و ۱/۲۹- بود. دو شهر تکاب و مراغه به ترتیب با مقادیر ۲/۶۸- و ۴/۵- در سطح اطمینان ۹۹٪ روند کاهشی معنادار و دو شهر جلفا و ماکو به ترتیب با مقادیر ۲/۲۵ و ۲/۰۷ در سطح ۹۵٪ دارای روند صعودی معنادار بودند. در سایر شهرها روند نزولی و صعودی معنادار نبود.

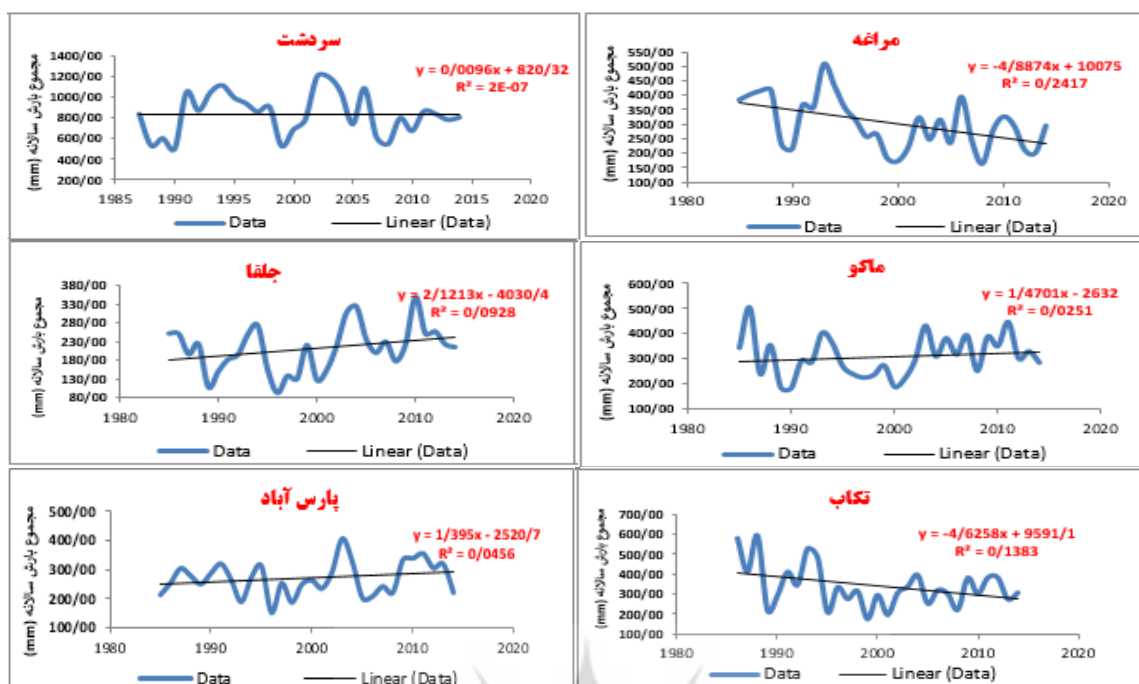
جدول ۳. نتایج واکاوی تغییرات روند مجموع بارش سالانه بر اساس شیب سن برای ۱۲ شهر مورد مطالعه

شهر	سال	Test Z	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95	B	Bmin99	Bmax99	Bmin95	Bmax95
ارومیه	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۰/۲۹	-۰/۳	-۶/۰۵	۴/۱۶	-۴/۰۸	۲/۹۲	۳/۰۷	۵/۴۹	۱/۲۲	۴/۶۹	۱/۸۰
تبریز	۱۹۸۵-۲۰۱۴	-۰/۲۱	-۰/۲	-۳/۹۲	۳/۷۵	-۲/۹۳	۲/۷۱	۲/۵۰	۳/۹۴	۸/۶۵	۳/۶۱	۱/۲۴
اردبیل	۱۹۸۵-۲۰۱۴	-۰/۴۶	-۰/۵	-۴/۹۳	۲/۱۹	-۳/۶۳	۱/۷۰	۲/۷۶	۴/۷۲	۱/۶۷	۴/۰۹	۱/۸۲
خلخال	۱۹۸۷-۲۰۱۴	-۰/۸۱	-۱/۴۷	-۷/۷۵	۲/۸۳	-۶/۰۴	۱/۶۶	۴/۳۷	۶/۸۱	۲/۴۵	۶/۲۰	۳/۰۰
پارس‌آباد	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۰/۹۳	۱/۵۱	-۲/۵۷	۴/۹۳	-۱/۷۵	۴/۰۷	۲/۱۶	۳/۶۰	۸/۷۸	۳/۲۶	۱/۱۷
مشکین‌شهر	۱۹۹۵-۲۰۱۴	۰/۱۶	۰/۷	-۹/۳۹	۱/۳۳	-۵/۶۷	۹/۰۳	۳/۷۰	۸/۱۵	-۲/۱۰	۶/۴۴	-۱/۶۱
جلفا	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۱/۲۸	۲/۲۵	-۱/۶۱	۵/۸۱	-۹/۴۰	۴/۷۷	۱/۲۴	۲/۸۵	-۳/۳۶	۲/۵۸	۹/۱۴
مراغه	۱۹۸۵-۲۰۱۴	-۲/۵۳	-۴/۵	-۹/۸۰	۲/۷۲	-۸/۵۵	-۱/۶۹	-۵/۰۰	۶/۸۰	۲/۸۲	۶/۴۰	۳/۸۰
سراب	۱۹۸۶-۲۰۱۴	۱/۰۱	۱/۲۱	-۱/۹۵	۴/۱۲	-۱/۴۶	۳/۴۳	۱/۹۸	۳/۲۸	۷/۷۹	۳/۱۰	۱/۰۹
ماکو	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۱/۱۱	۲/۰۷	-۳/۵۹	۷/۰۶	-۲/۰۸	۵/۷۱	۲/۱۷	۴/۴۹	-۳/۳۰	۳/۹۴	۵/۸۹
تکاب	۱۹۸۶-۲۰۱۴	-۱/۲۹	-۲/۶۹	-۹/۶۴	۳/۵۵	-۸/۸۰	۱/۶۴	۴/۳۲	۷/۱۲	۱/۸۱	۶/۸۵	۲/۴۵
سردشت	۱۹۸۷-۲۰۱۴	-۰/۲۶	-۱/۳۰	-۱/۷۴	۱/۳۷	-۱/۲۷	۱/۱۶	۸/۹۲	۱/۵۷	۲/۱۶	۱/۴۰	۲/۹۱

روند بارش سیر نزولی داشته و کاهشی بوده است. بر اساس نمودارهای ارائه شده، طی دوره آماری مورد مطالعه، بیش‌ترین میزان روند افزایشی مربوط به شهر جلفا و بیش‌ترین روند کاهشی مربوط به شهر مراغه بوده است. از بین ۱۲ شهر، تنها ۴ شهر روند کاهشی و افزایشی معنادار داشتند.

در شکل ۲، تغییرات روند مجموع بارش سالانه بر اساس شیب سن برای ۱۲ شهر مورد مطالعه طی سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۸۵ ارائه شده است. بررسی نمودارهای مذکور حاکی از روند افزایشی بارش در شهرهای مشکین‌شهر، ماکو، سراب، جلفا، پارس‌آباد است. همچنین طبق خط روند تخمین‌گر شیب سن در شهرهای ارومیه، اردبیل، تبریز، تکاب، خلخال، سردشت، مراغه و





شکل ۲. تغییرات روند مجموع بارش سالانه بر اساس شیب سن برای ۱۲ شهر مورد مطالعه طی سال‌های ۱۹۸۵-۲۰۱۴

۴ ارائه شده است. طبق جدول، آماره Q در هر ۱۲ شهر مثبت بوده است. بیش‌ترین مقادیر Z در شهر مراغه و کم‌ترین آن در شهر مشکین‌شهر مشاهده شد که مقادیر آن به ترتیب برابر ۴/۶۷ و ۱/۲۵ می‌باشد.

نتایج واکاوی تغییرات روند دمای حداکثر سالانه طی دوره آماری مورد مطالعه بر اساس شیب سن یافته‌های به دست آمده از تحلیل روند دمای حداکثر شهرهای مورد مطالعه در سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ بر مبنای سری‌های زمانی بلندمدت در مقیاس سالانه بر اساس شیب سن، در جدول

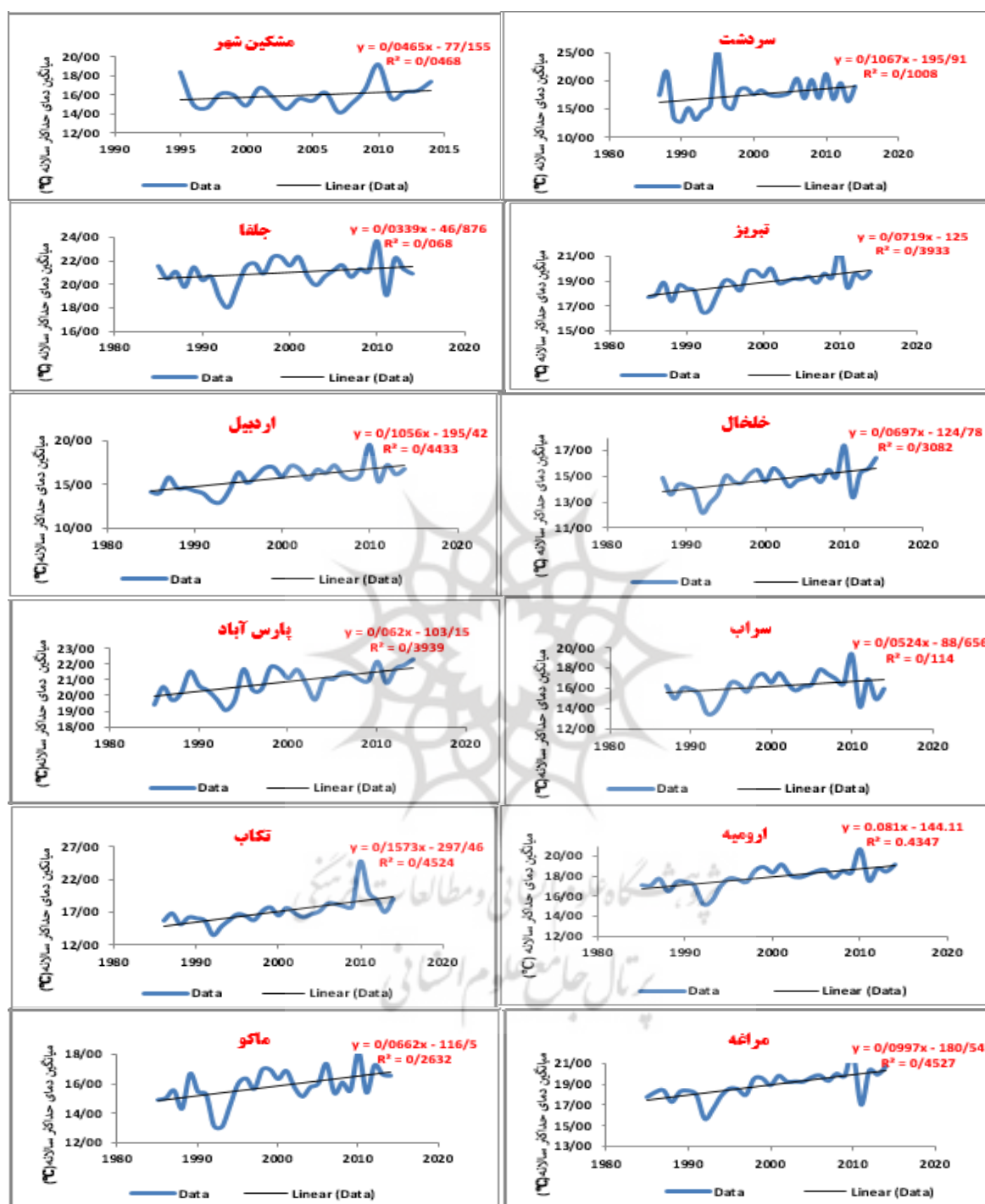
جدول ۴. نتایج واکاوی تغییرات روند دمای حداکثر سالانه بر اساس شیب سن برای ۱۲ شهر مورد مطالعه

شهر	سال	Test Z	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95	B	Bmin99	Bmax99	Bmin95	Bmax95
ارومیه	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۳/۹۳	۶/۹۸	۳/۳۷	۱/۱۸	۴/۴۹	۱/۰۱	۱/۵۲	۱/۶۷	۱/۳۳	۱/۶۲	۱/۳۹
تبریز	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۳/۶۴	۶/۴۴	۲/۳۹	۱/۱۳	۳/۲۱	۱/۰۱	۱/۶۳	۱/۸۰	۱/۴۲	۱/۷۷	۱/۴۷
اردبیل	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۳/۴۶	۹/۲۸	۲/۹۵	۱/۶۳	۵/۰۲	۱/۴۳	۱/۱۹	۱/۴۷	۹/۴۱	۱/۳۷	۱/۰۲
خلخال	۱۹۸۷-۲۰۱۴	۳/۱۴	۶/۳۹	۱/۳۵	۱/۲۴	۲/۷۳	۱/۱۰	۱/۲۱	۱/۴۲	۹/۷۱	۱/۳۶	۱/۰۳
پارس‌آباد	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۳/۳۵	۶/۳۷	۱/۷۸	۱/۰۵	۲/۹۶	۹/۳۷	۱/۸۳	۲/۰۱	۱/۶۶	۱/۹۷	۱/۷۰
مشکین‌شهر	۱۹۹۵-۲۰۱۴	۱/۲۰	۵/۴۸	-۹/۵۰	۱/۸۱	-۶/۲۵	۱/۴۳	۱/۳۵	۱/۹۸	۷/۶۸	۱/۸۵	۹/۴۵
جلفا	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۱/۲۵	۲/۴۵	-۳/۲۴	۱/۰۱	-۱/۸۳	۷/۹۲	۲	۲/۲۴	۱/۷۰	۲/۲۰	۱/۸۰
مراغه	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۴/۶۷	۹/۷۱	۶/۲۹	۱/۳۶	۷/۲۹	۱/۲۷	۱/۵۲	۱/۶۵	۱/۳۵	۱/۶۱	۱/۳۹
سراب	۱۹۸۶-۲۰۱۴	۱/۷۹	۵/۰۱	-۲/۷۲	۱/۴۱	-۶/۸۷	۱/۱۴	۱/۴۴	۱/۷۴	۱/۰۷	۱/۶۶	۱/۱۸
ماکو	۱۹۸۵-۲۰۱۴	۲/۶۸	۵/۶۳	۵/۱۷	۱/۲۳	۱/۷۷	۱/۰۸	۱/۳۶	۱/۵۶	۱/۱۰	۱/۵۱	۱/۱۷
تکاب	۱۹۸۶-۲۰۱۴	۴/۶۰	۱/۲۷	۷/۲۳	۱/۹۷	۸/۲۳	۱/۷۵	۱/۱۸	۱/۳۹	۹/۱۱	۱/۳۶	۱/۰۱
سردشت	۱۹۸۷-۲۰۱۴	۱/۹۲	۱/۵۸	-۷/۶۶	۳/۱۳	-۶/۲۹	۲/۶۴	۱/۰۵	۲/۰۷	۴/۴۲	۱/۷۷	۶/۳۲

صعودی داشت که به غیر از دو شهر تکاب و سردشت که روند صعودی معنادار در پارامتر دمای حداکثر نداشتند، در سایر شهرها روند افزایشی دما معنادار بود. این روند افزایشی در سطح اطمینان

طبق نمودارهای برآوردگر شیب سن که در شکل ۳، ارائه گردیده، میانگین دمای حداکثر طی دوره آماری مورد مطالعه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) در هر ۱۲ شهر منتخب، دمای حداکثر روند

به شهر مراغه و کم‌ترین آن مربوط به شهر تکاب بوده است. ۹۹/۹۹ درصد معنادار بود. بیش‌ترین میزان روند صعودی، مربوط



شکل ۳. تغییرات روند دمای حداکثر بر اساس شیب سن برای شهرهای مورد مطالعه طی سال‌های ۱۹۸۵-۲۰۱۴

پایه و آینده، بر اساس خروجی مدل NorESM2 از سه شاخص خطاسنجی شامل میانگین قدر مطلق خطاها، میانگین مربع خطا، ریشه میانگین مربعات خطا استفاده شد. این معیارها برای ارزیابی خروجی GCM استفاده می‌شود و مقادیر حاصل، نشان‌گر میزان خطا است و لذا هر چه دقت مدل پیش‌بینی کننده بالاتر باشد،

نتایج پیش‌بینی دمای بیشینه و بارش بر اساس سناریوهای SSP 2-4.5 و SSP 5-8.5 مدل NorESM2

به‌منظور مقایسه داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده، دمای حداکثر و مجموع بارش ماهانه شهرهای منتخب در دوره

تولید شده برای همه شهرها برای دمای حداکثر نسبت به پارامتر بارش کمتر بود. لذا مدل NorESM2 پارامتر دما را نسبت به بارش با خطای کم‌تری پیش‌بینی می‌نماید.

مقادیر به دست آمده از شاخص‌های خطاسنجی مذکور به صفر نزدیک‌تر می‌شود. بر اساس نتایجی که در جدول ۵، ارائه شده است. اگر چه در هر دو پارامتر میزان خطا به‌ویژه در شاخص MSE، نسبتاً بالا بود، اما میزان خطای داده‌های مشاهداتی با داده

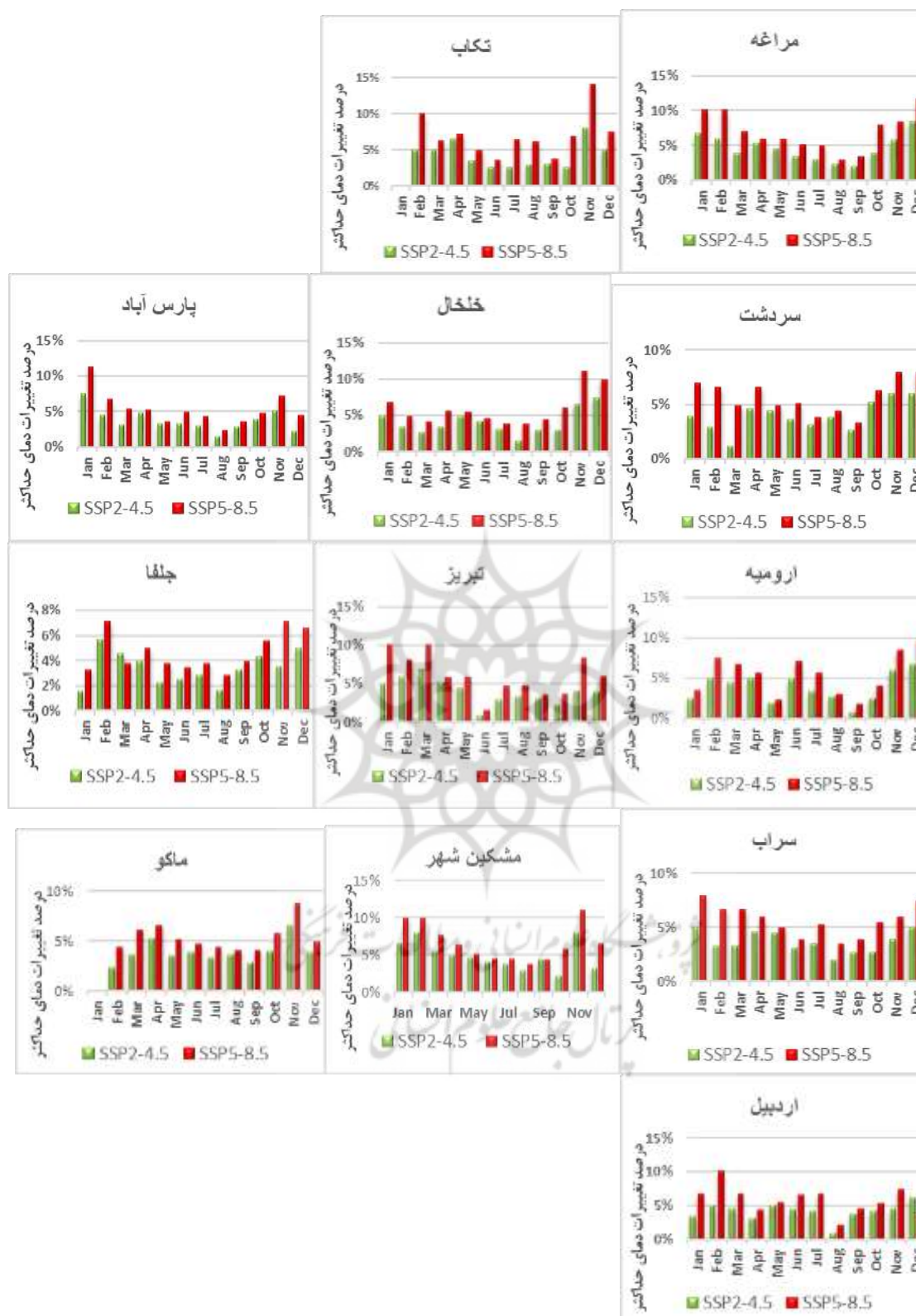
جدول ۵. خطاسنجی بارش دمای حداکثر و بارش شبیه‌سازی شده با مدل‌های NorESM2

شهر	پارامتر	MAD	MSE	RMSE
جلفا	دما	۳/۴	۱۷/۴	۴/۱
	بارش	۵/۴	۳۳/۵	۵/۶
سراب	دما	۲/۸	۱۰/۶	۳/۲
	بارش	۴/۵	۲۹/۱	۵/۱
تبریز	دما	۳/۹	۲۱/۵	۴/۶
	بارش	۴/۵	۴۲/۱	۶/۱
مراغه	دما	۴/۴	۲۵/۹	۵
	بارش	۵/۱	۵۴/۵	۷/۳
ماکو	دما	۲/۵	۱۰	۳/۱
	بارش	۶/۵	۶۷/۵	۸/۲
ارومیه	دما	۳/۵	۱۵/۸	۳/۹
	بارش	۶/۶	۵۳/۱	۷/۲
سردشت	دما	۲/۱	۶/۸	۲/۶
	بارش	۹	۱۳۵	۱۱/۸
تکاب	دما	۳/۹	۲۴/۲	۴/۹
	بارش	۷	۷۰/۹	۸/۸
پارس‌آباد	دما	۱	۱/۵	۱/۲
	بارش	۶/۸	۲۰/۵	۴/۲
مشکین‌شهر	دما	۱/۴	۲/۷	۱/۶
	بارش	۷/۸	۱۱/۳	۷/۶
اردبیل	دما	۲/۷	۱۰/۵	۳/۲
	بارش	۵/۲	۴۸/۴	۶/۵
خلخال	دما	۲	۷/۷	۲/۷
	بارش	۶/۷	۵۹/۵	۷/۷

نمودار مربوط به شهر پارس‌آباد بالاترین درصد افزایش دمای بیشینه حدود ۱۱٪ و در ماه ژانویه پیش‌بینی شده است. در شهر سراب، بالاترین درصد افزایش دما به میزان ۸٪ و در ماه ژانویه پیش‌بینی گردید. در شهر تکاب دما در ماه فوریه و نوامبر حدود ۱۴٪ افزایش خواهد یافت. در سردشت بیش‌ترین افزایش دما در ماه نوامبر و دسامبر و به میزان ۸٪ پیش‌بینی شد. در شهر تبریز ۱۰٪ افزایش دمای بیشینه در ماه مارس و ژانویه تجربه خواهد شد و در نهایت در شهر ارومیه ماه دسامبر به میزان ۱۰٪ افزایش دمای بیشینه رخ خواهد داد. همچنین بر حسب درجه سلسیوس نیز دمای بیشینه در همه شهرها ۰/۲ الی ۲ درجه سلسیوس افزایش خواهد داشت که بالاترین میزان افزایش برای شهر تکاب پیش‌بینی شد (شکل ۴).

پیش‌بینی انجام شده بر اساس سناریوهای مدل NorESM2 برای دمای بیشینه شهرهای منتخب شمال غرب ایران نشان داد که بیش‌ترین درصد افزایش دما طی دوره آتی اغلب در ماه‌های سرد سال خواهد بود. بر اساس پیش‌بینی انجام شده، در شهر اردبیل بالاترین درصد افزایش دما در ماه‌های فوریه و به میزان ۱۰٪ خواهد بود. در شهر خلخال طی ماه دسامبر بیش‌ترین افزایش دما تجربه خواهد شد که میزان آن ۱۱٪ است. در شهر ماکو در ماه نوامبر بالاترین درصد افزایش دما حدود ۹٪ پیش‌بینی شد. در شهر جلفا ۷٪ افزایش دما در ماه‌های نوامبر و فوریه رخ خواهد داد.

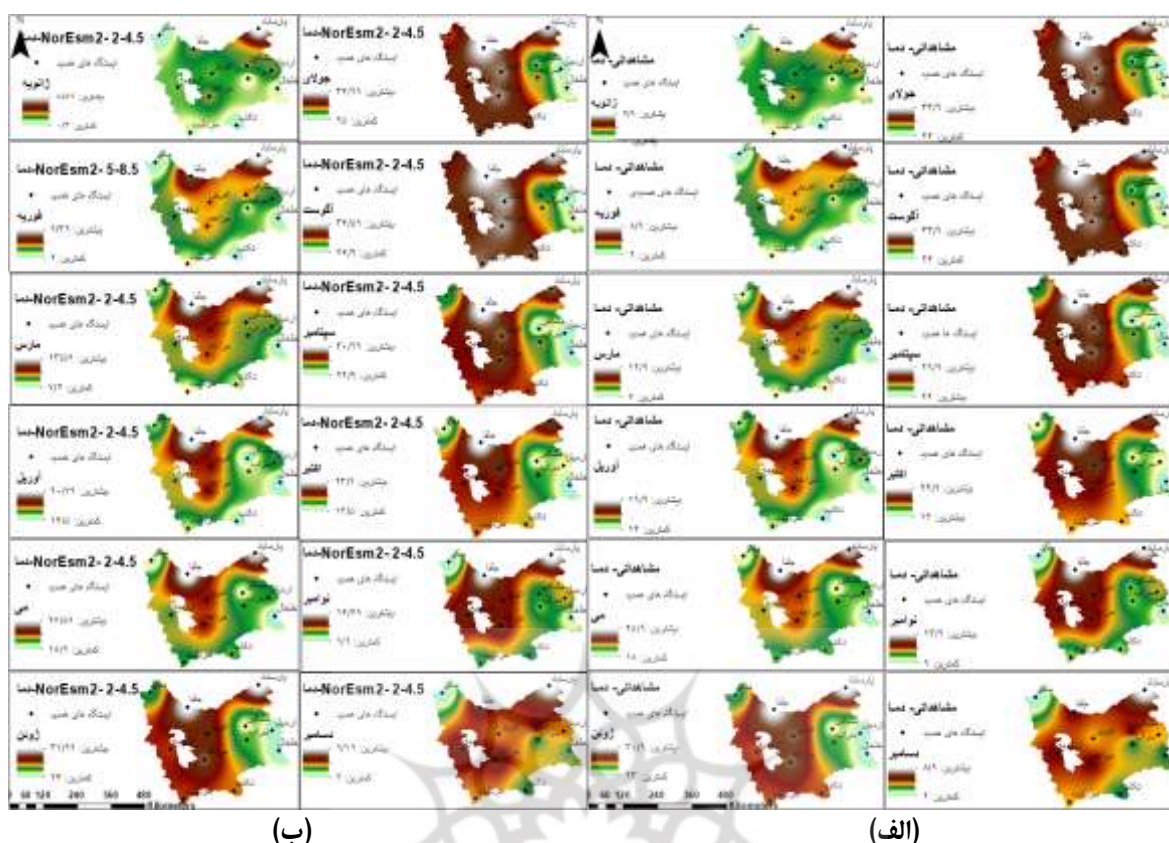
در شهر مشکین‌شهر حدود ۱۱٪ افزایش دمای بیشینه در ماه نوامبر رخ خواهد داد. در مراغه ماه دسامبر افزایش دمای بیش‌تری تجربه خواهند کرد که میزان آن ۱۲٪ خواهد بود. طبق



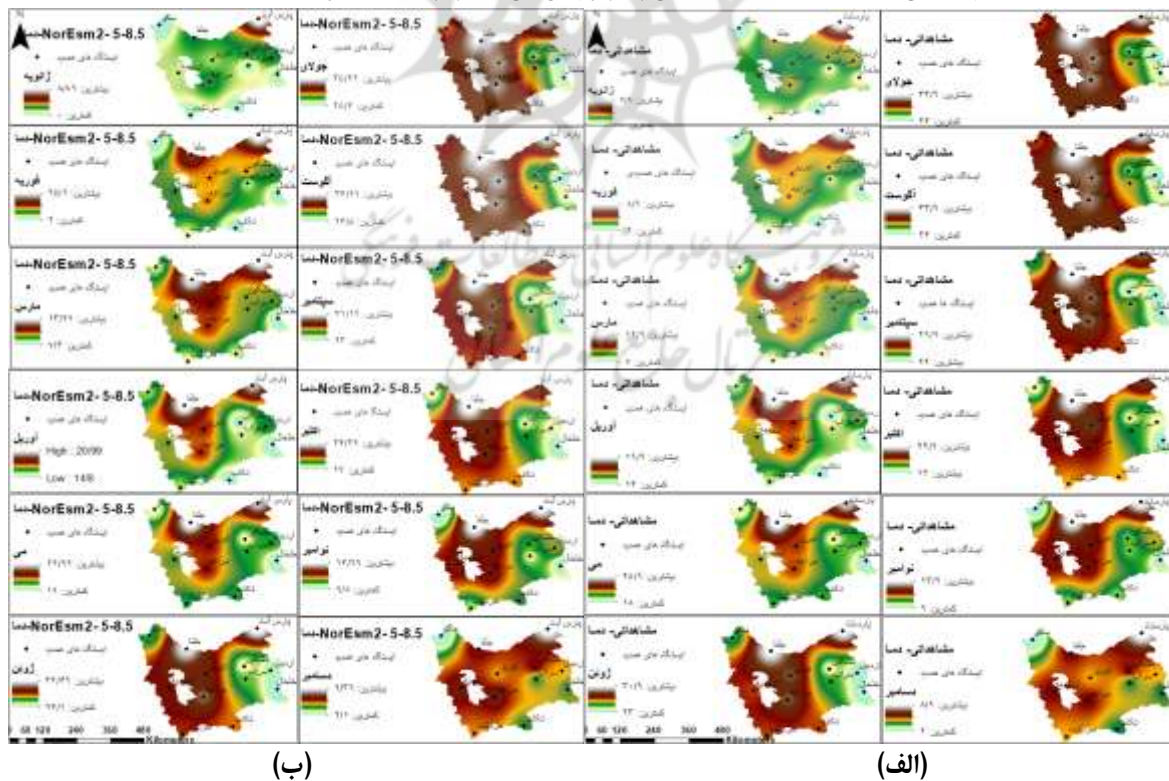
شکل ۴. درصد تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده میانگین دمای حداکثر بر اساس سناریوهای SSP 2-4.5 و SSP 5-8.5 مدل NorESM2

همچنین جهت مشاهده عینی نتایج و مقایسه میزان تغییرات مقادیر گذشته و آینده دمای حداکثر ماهانه، نقشه‌های پراکندگی دمای حداکثر مشاهداتی و پیش‌نگری شده تحت سناریوهای

SSP 2-4.5 و SSP 5-8.5 مدل NorESM2 در شکل ۵ (الف و ب) و ۶ (الف و ب) ارائه شده است.



شکل ۵. نقشه‌های پراکندگی دمای حداکثر ماهانه مشاهداتی (الف) و پیش‌بینی شده (ب) تحت سناریوی SSP 2-4.5 مدل NorESM2



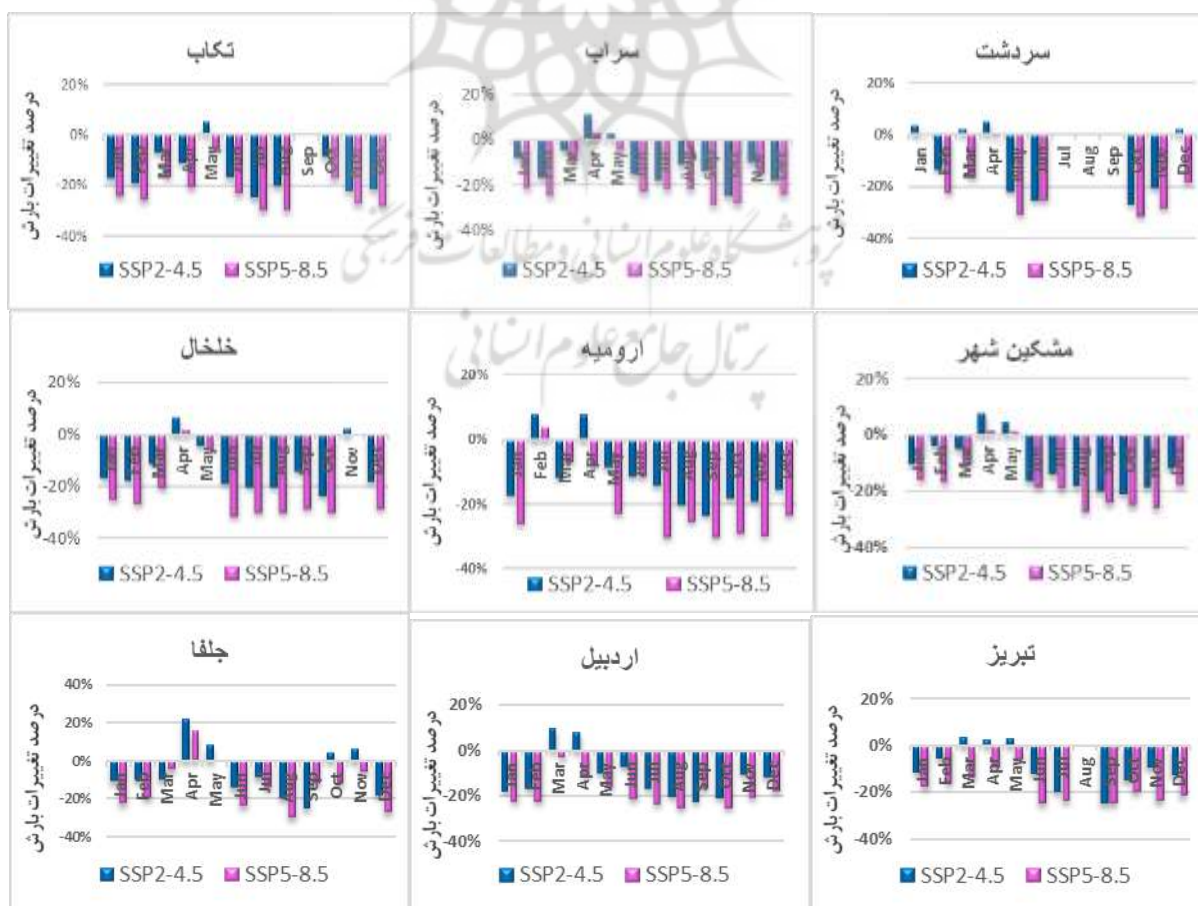
شکل ۶. نقشه‌های پراکندگی دمای حداکثر ماهانه مشاهداتی (الف) و پیش‌بینی شده (ب) تحت سناریوی SSP 5-8.5 مدل NorESM2

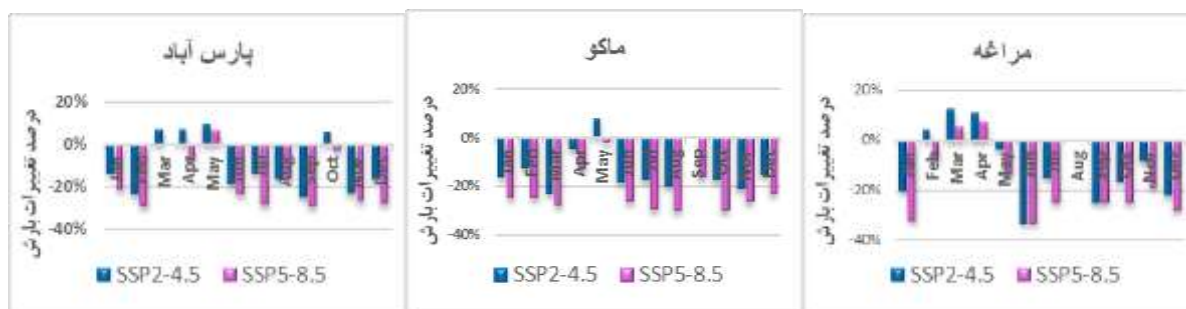
NorESM2 نشان داد که همه شهرها به‌ویژه تحت سناریوی

نتایج پیش‌بینی بارش شهرهای مورد مطالعه بر اساس مدل

در شهر تبریز مارس، آوریل و می ۳٪ افزایش و ژوئن، جولای، سپتامبر ۲۵٪ کاهش رخ خواهد داد. در شهر ارومیه ۸٪ افزایش در ماه فوریه و آوریل ۳۰٪ کاهش، در ماه جولای و نوامبر را تجربه خواهند کرد (شکل ۷).

در شهر ماکو ۵٪ افزایش بارش در ماه می و ۳۲ درصد کاهش بارش در ماه ژوئن پیش‌بینی شده است. در شهر جلفا تا ۲۰ درصد افزایش بارش در ماه‌های آوریل، پیش‌بینی شده است. همچنین بیش‌ترین درصد کاهش بارش ۳۰٪ و در ماه آگوست پیش‌بینی شده است. در شهر مشکین‌شهر آوریل و می حدود ۸٪ افزایش و بیش‌ترین میزان کاهش ۲۷٪ و در ماه آگوست پیش‌بینی گردید.

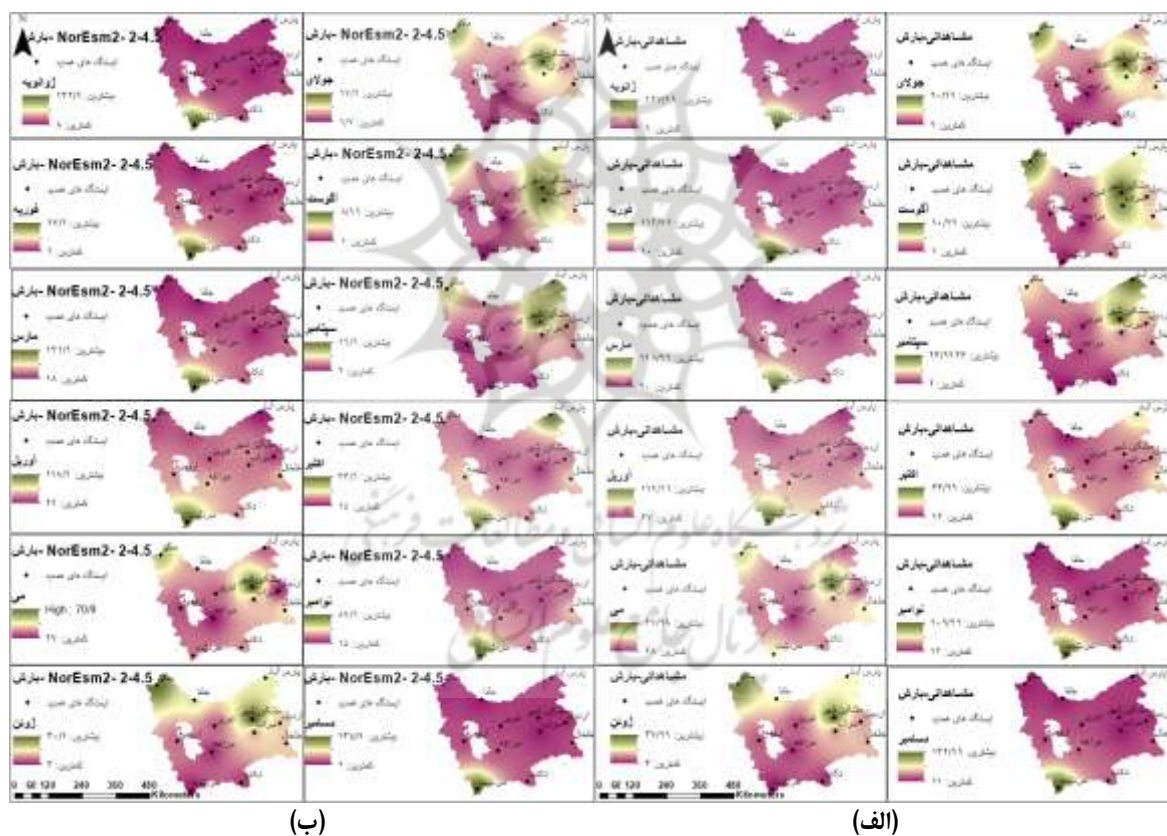




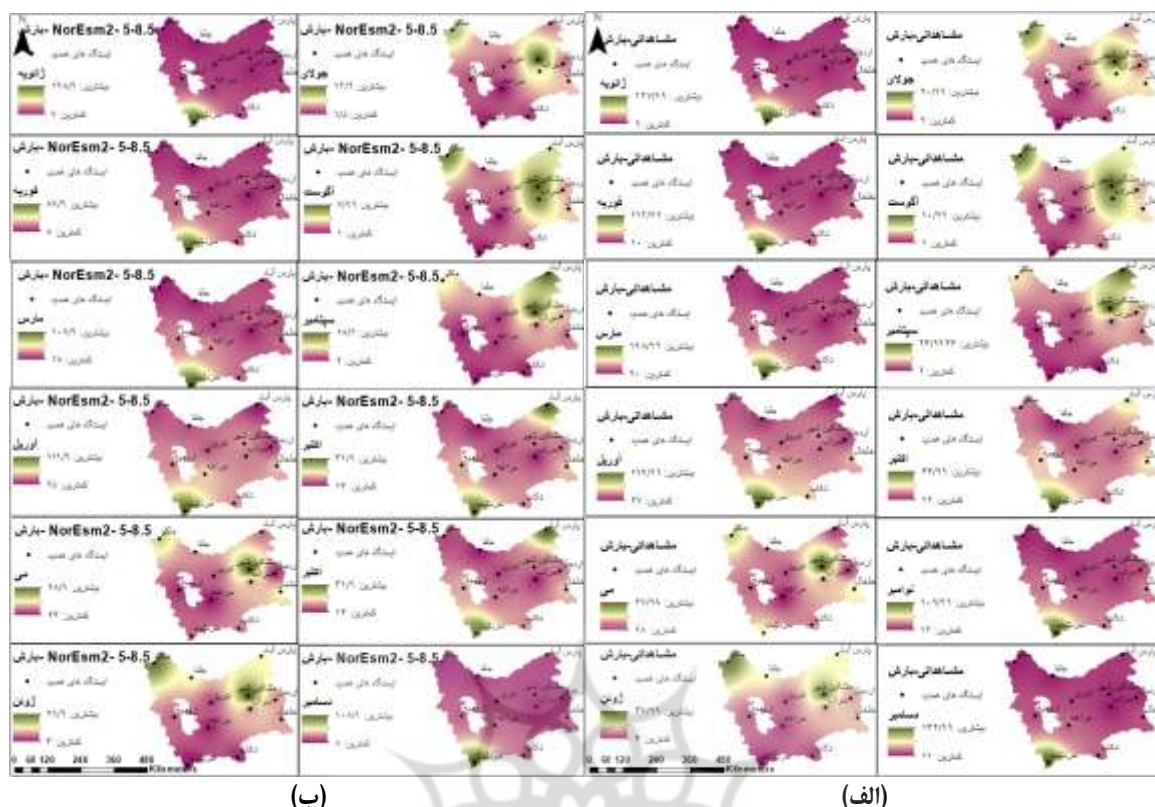
شکل ۷. نمودار درصد تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده مجموع بارش بر اساس سناریوهای SSP 2-4.5 و SSP 5-8.5 مدل NorESM2

مقادیر گذشته و آینده بارش ماهانه شهرهای مورد مطالعه، نقشه-های پراکندگی بارش مشاهداتی و پیش‌نگری شده تحت سناریوهای SSP 2-4.5 و SSP 5-8.5 مدل NorESM2 در شکل ۸ (الف و ب) و ۹ (الف و ب) ارائه شده است.

طبق توضیحات ارائه شده، تحت سناریوی SSP 5-8.5 بیش‌ترین میزان کاهش بارش به میزان ۳۰ الی ۳۳ درصد در شهرهای مراغه، ماکو، سردشت، ارومیه و تکاب رخ خواهد داد. همچنین به‌منظور ارائه ملموس و عینی نتایج و مقایسه تغییرات



شکل ۸. نقشه‌های پراکندگی بارش ماهانه مشاهداتی (الف) و پیش‌بینی شده (ب) تحت سناریوی SSP 2-4.5 مدل NorESM2



شکل ۹. نقشه‌های پراکندگی بارش ماهانه مشاهداتی (الف) و پیش‌بینی شده (ب) تحت سناریوی SSP 5-8.5 مدل NorESM2

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت دما و بارش به‌عنوان عناصر مهم اقلیمی و تأثیرپذیری این دو پارامتر از تغییرات اقلیمی و آثاری که بر جوانب مختلف زیست‌بوم شهری دارند، در پژوهش حاضر، جهت پیش‌نمایی تغییرات دما و بارش در شهرهای شمال غرب ایران، از جدیدترین سناریوهای اقلیمی فاز ششم (SSP) بهره گرفته شد. برای این منظور اطلاعات خروجی مدل NorESM2-5.8.5 تحت سناریوهای مختلف SSP جهت واکاوی چشم‌انداز آتی منطقه مورد استفاده قرار گرفت.

در راستای هدف پژوهش، ابتدا میانگین دما و بارش سالانه شهرهای منتخب، با تخمین‌گر شیب سن روندیابی شد تا از میزان شیب به‌دست آمده شدت روند آشکار گردد. نتایج آزمون شیب سن حاکی از روند صعودی دمای حداکثر در همه شهرها در سطح اطمینان ۹۹٪ به‌جز ایستگاه تکاب و سردشت بود که روند افزایشی معنادار نداشتند. همچنین طبق روندیابی بارش بر اساس شیب سن، از بین ۱۲ شهر، تنها ۴ شهر روند کاهشی و افزایشی معنادار داشتند.

دو شهر تکاب و مراغه در سطح اطمینان ۹۹٪ روند کاهشی معنادار و دو شهر جلفا و ماکو در سطح اطمینان ۹۵٪ دارای روند صعودی معنادار بودند. در سایر شهرها روند نزولی و

صعودی معنادار نبود. در بخش دوم پژوهش به‌منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی دما و بارش، ابتدا دقت مدل مورد مطالعه در شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای مورد مطالعه با استفاده از شاخص‌های خطاسنجی RMSE، MSE، MAD ارزیابی گردید. نتایج خطاسنجی حاکی از اختلاف نسبتاً بالا بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده به‌ویژه در پارامتر بارش بود که این امر نشانگر دقت کمتر پیش‌بینی‌های انجام شده پارامتر مذکور بر اساس مدل و سناریوهای مورد مطالعه برای دوره آتی است. پیش‌بینی انجام شده بر اساس سناریوهای مدل NorESM2-5.8.5 برای بیشینه شهرهای منتخب شمال غرب ایران نشان داد که بیش‌ترین درصد افزایش دما طی دوره آتی اغلب در ماه‌های سرد سال خواهد بود. در همه شهرها در کل ماه‌های سال دمای حداکثر افزایش خواهد داشت که میزان این افزایش تحت سناریوی بدبینانه (SSP 5.8.5) تا ۲ درجه سلسیوس نیز پیش‌بینی شد.

بین ۱۲ شهر، تکاب و جلفا با ۱۴٪ و ۷٪ به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین میزان افزایش دما را تجربه خواهند کرد. همچنین شبیه‌سازی و پیش‌بینی بارش منطقه بر اساس سناریوهای مدل NorESM2-5.8.5 نشان داد که همه شهرها به‌ویژه تحت سناریوی متوسط SSP 2-4.5 در ماه‌های پایانی زمستان

این صورت میزان تغییرات دما و بارش در بدبینانه‌ترین حالت پیش‌بینی می‌گردد تا سازمان‌های مرتبط آمادگی لازم جهت مقابله با مخاطرات احتمالی را داشته باشند.

راهکارها

پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن اینکه منطقه شمال غرب یکی از مناطق مهم گردشگری ایران محسوب می‌شود و زیرشاخه‌های مختلف کشاورزی جزء مشاغل اصلی اغلب ساکنین منطقه است، انجام گرفته و در راستای یافته‌های پژوهش، راهکارهای زیر پیشنهاد می‌شود:

- ✓ لزوم مطالعات گسترده‌تر در زمینه گرمایش جهانی؛
- ✓ مدیریت صحیح منابع آب؛
- ✓ ممانعت از مهاجرت روستاییان؛
- ✓ جلوگیری از تعطیلی کشاورزی در منطقه به‌منظور ممانعت از افزایش ریزگردها؛
- ✓ اصلاح الگوی کشت و جایگزین نمودن گیاهان مثمر با نیاز آبی کمتر به‌جای گیاهان غیر مثمر،
- ✓ همکاری مداوم و منسجم نهادها و سازمان‌های ذی‌ربط از جمله؛ سازمان محیط‌زیست، اداره هواشناسی، استانداری و شهرداری.

شایان ذکر است که عدم توجه به بحث افزایش دما و کاهش بارش که طی دهه‌های اخیر نقاط مختلف جهان را تحت تأثیر قرار داده، می‌تواند سبب خیزش ریزگردها شده و علاوه بر ایجاد مخاطره برای سلامت ساکنین منطقه، مشکلات متعدد زیست‌محیطی از جمله: اختلال در عملکرد زنبورها در تولید عسل و آسیب به شغل زنبورداری شود که از مشاغل اصلی در شمال غرب است. همچنین ایجاد تل خاک‌های ناشی از ریزگردهای محلی که در پی افزایش دما و کاهش بارش رخ می‌دهد، منجر به تخریب اراضی زراعی منطقه خواهد شد.

سیاسگزاری

پژوهش حاضر برگرفته از طرح پسا دکتری و تحت حمایت مالی دانشگاه محقق اردبیلی می‌باشد. نویسندگان از پشتیبانی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی و دانشکده علوم اجتماعی آن دانشگاه کمال تشکر را دارند. همچنین از سازمان هواشناسی کشور به جهت در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز، قدردانی می‌گردد.

و آغاز بهار افزایش جزئی بارش را تجربه خواهند کرد که میزان این افزایش در شهرهای مختلف، متفاوت خواهد بود.

بالاترین درصد افزایش بارش مربوط به شهر جلفا بود که به میزان ۲۰٪ پیش‌بینی شد. همچنین بیش‌ترین درصد کاهش بارش، تحت سناریوی بدبینانه SSP 5-8.5 و در ماه‌های مربوط به فصول تابستان و پاییز، پیش‌بینی گردید که بیش‌ترین درصد کاهش بارش به میزان ۳۰ الی ۳۳ درصد در ایستگاه‌های مراغه، ماکو، سردشت، ارومیه و تکاب رخ خواهد داد.

نتایج پژوهش حاضر در خصوص افزایش چند درجه‌ای دمای بیشینه در مناطق مختلف اقلیمی و در کل ماه‌های سال، با یافته‌های اکثر پژوهشگران همسو بود. از جمله: کوی و همکاران (۲۰۲۱)، زارعیان (۱۴۰۱)، اما از لحاظ پیش‌بینی میزان افزایش دما متفاوت بود؛ زیرا بعضی پژوهشگران میزان افزایش دما را کمتر و برخی بیش‌تر از ۲ درجه گزارش کرده‌اند. همچنین در خصوص پارامتر بارش، یافته‌های پژوهش در این خصوص که بارش در برخی ماه‌های سال افزایش و در برخی دیگر کاهش خواهد یافت، با نتایج مسگری و همکاران (۲۰۲۲)، هم‌راستا بود.

پژوهش حاضر روند کاهشی بارش را در برخی شهرها تأیید نمود که از این جهت نیز با یافته‌های زارعیان (۱۴۰۱) همسو بود. همچنین برخی از پژوهشگران همچون منون و همکاران (۲۰۱۳)، کوی و همکاران (۲۰۲۱) افزایش بارش را در منطقه مورد مطالعه خود پیش‌بینی کرده‌اند. پژوهش حاضر نیز در بعضی شهرهای منطقه، افزایش بارش را در برخی ماه‌های سال پیش‌بینی نمود. در مجموع طبق نتایج پژوهش حاضر طی دهه‌های آتی میزان کاهش بارش محسوس‌تر از افزایش آن خواهد بود. همچنین برخی پژوهشگران از جمله زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰) و معصوم‌پور سماکوش و همکاران، عدم قطعیت مدل‌های GCM در پیش‌بینی بارش را مطرح کرده‌اند. در پژوهش حاضر نیز چنین نتیجه‌گیری شد که مدل مورد مطالعه، بارش را با خطای نسبتاً بالایی در مقایسه با دما پیش‌بینی می‌کند.

پژوهش حاضر، تحت جدیدترین سناریوهای SSP و مدل NorESM2 که از سری مدل‌های جدید CMIP6 هست به شبیه‌سازی و پیش‌بینی دما و بارش منطقه‌ای نسبتاً وسیع از شمال غرب کشور پرداخت که به دلیل جدید بودن مدل، احتمال خطای نتایج کم‌تر است. بنابراین یافته‌های پژوهش تأثیر قابل ملاحظه‌ای در برنامه‌ریزی و مدیریت آینده منطقه خواهد داشت. زیرا در

References

- Ahmadabadi A, & sedighifar Z. (2018). Prediction of Climate Change Induced Hydrogeomorphology by using SDSM in CAN Watershed. *Applied Research in Geographical Sciences*, 18(51), 114-103. (In Persian) doi: [10.29252/jgs.18.51.103](https://doi.org/10.29252/jgs.18.51.103)
- Akbarzadeh, M., Nouri, H., Mortazavi, S., & attaeian, B. (2024). Investigation and prediction of climate changes using the approach of General Circulation Models (GCMs) in the western provinces of Iran. *Desert Ecosystem Engineering*, 12(39), 23-42. (In Persian) doi: [10.22052/deej.2024.253424.1019](https://doi.org/10.22052/deej.2024.253424.1019)
- Bates, B., Kundzewicz, Z.W., Wu, S. & Palutikof, J. (2008). Climate Change and Water. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, 200.
- Chen, Z., Zhou, T., Zhang, L., Chen, X., Zhang, W., & Jiang, J. (2020). Global land monsoon precipitation changes in CMIP6 Projections. *Geophysical Research Letters*, 47(14), 1-9. <https://doi.org/10.1029/2019GL086902>
- Chobeh, S., & Kake Mami, A. (2014). Investigating the effectiveness of statistical exponential microscale model (SDSM) in predicting temperature and precipitation parameters (case study: Ardabil Baliqlochai watershed), *the second national conference on protection of natural resources and environment*, University of Mohaghegh Ardabili. [In Persian]. <https://civilica.com/doc/491153>
- Cui, T., Li, Ch., & Tian, F. (2021). Evaluation of Temperature and Precipitation Simulations in CMIP6. <https://doi.org/10.1029/2020EA001620>
- De Oliveira, V. A., de Mello, C. R., Beskow, S., Viola, M. R. & Srinivasan, R., (2019). Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome, *Ecological Engineering*, 133, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development Discussions*, 8(12), 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- ghorbani H, vali A A, & zarepour H. (2019). Analysis of the Climatological Drought Trend Variations Using Mann-Kendall, Sen and Pettitt Tests in Isfahan Province. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*; 6 (2):129-146.(In Persian) doi: [10.29252/jsaeh.6.2.129](https://doi.org/10.29252/jsaeh.6.2.129)
- Greene, A.M., Goddard, L. & Lall, L. (2006) .Probabilistic multi-model regional temperature change projections. *J. Climate*. 19: 4326-4346. doi: [10.1175/JCLI3864.1](https://doi.org/10.1175/JCLI3864.1)
- Gupta, V., Singh, V., & Jain, M. K. (2020). Assessment of precipitation extremes in India during the 21st century under SSP1-1.9 mitigation scenarios of CMIP6 GCMs. *Journal of Hydrology*, 590. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125422>
- Hennessy, K. J., Whetton, P. H., Walsh, K., Smith, I. N., Bathols, J. M., Hutchinson, M., & Sharples, J. (2007). Climate change effects on snow conditions in mainland Australia and adaptation at ski resorts through snowmaking. *Climate Research*, 35(3), 255. doi: 10.3354/cr00706
- Hoshlar, M., Sobhani, B., & Hosseini, S A. (2017). The perspective of changes in the maximum temperatures of Urmia using the CanESM2 model output statistical fine-tuning, *Scientific-Research Journal of Geography and Planning*, 22 (63): 325-305. (In Persian) https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_7598.html
- IPCC, (2013). Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V & Midgley, P. M., (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, *United Kingdom and New York*, NY, USA, 1535.
- IPCC, (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, Lonnoy, K., Matthews, E., J.B.R., Waterfield, T.K., T., Yelekçi, O., Yu, R. & Zhou, B. (eds) *Cambridge University Press*.
- Jiménez-Navarro, I. C., Jimeno-Sáez, P., López-Ballesteros, A., Pérez-Sánchez, J., & Senent-Aparicio, J. (2021). Impact of Climate Change on the Hydrology of the Forested Watershed That Drains to Lake Erken in Sweden: An Analysis Using SWAT+ and CMIP6 Scenarios. *Forests*, 12 (12), 1803.

- <https://doi.org/10.3390/f12121803>
- Karamouz, M., & Iraquejad, Sh. (2006). *Advanced Hydrology*, Publications of Amir Kabir University of Technology. *Tehran*. (In Persian)
- Kim, B.S., Kim, H.S., Seoh, B.H. & Kim, N.W. (2007). Impact of climate change on water resources in Yongdam Dam Basin, Korea. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 21, 355–373. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.023>
- Kwesi Nooni, I., Katchele Ogou, F., Saidou Chaibou., A. A., Nakoty. F. M., Gnitou, G.T., & Lu, J. (2023). Torical Mean Precipitation over Africa and the Arabian Peninsula against Satellite-Based Observation, *Journals Atmosphere*, 14 (3), 607. <https://doi.org/10.3390/atmos14030607>
- Lei, X ., Xu, Ch ., Liu, F., Song, L ., Cao, L ., & Suo, N . (2023) Precipitation over Arid Central Asia, *Remote Sens.*, 15(9), 2376. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104142>
- Maleki Nejad, H., Soleimani Mutlaq, M., Jaidari, A., & Shater Abshuri, S. (2012). Analysis of changes in rainfall and drought using Mann-Kendall and age tests in Tehran province, *Newar Scientific and Technical Journal*, 80, 43-55. (In Persian) https://nivar.irimo.ir/article_13186.html
- Mason, S.J. (2004). Simulating climate over western North America using stochastic weather generators. *Climate Change*, 6, 155-187. <https://link.springer.com/article/10.1023/B:CLIM.0000013700.12591.ca>.
- Menon, A., Levermann, A., Schewe, J., Lehmann, J., & Frieler, K. (2013). Consistent increase in Indian monsoon rainfall and its variability across CMIP-5 models. *Earth System Dynamics*, 4(2), 287-300. <https://doi.org/10.5194/esd-4-287-2013>
- Mesgari, E., Hosseini, S A., Hemmesy, M S., Houshyar, M., & Golzari Partoo, L. (2022) Assessment of CMIP6 models' performances and projection of precipitation based on SSP scenarios over the M ENAP region, *Journal of Water and Climate Change*, 13 (10): 3607–3619. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.195>
- Rasouli, Ali-Akbar; Sari Saraf, Behrouz; Mohammadi, Gholam-Hassan. (2011). Analyzing the occurrence of the climatic phenomenon of dust in the west of the country in the last 55 years by using non-parametric statistical methods, *Natural Geography*, 11, 1-16.(In Persian) <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.195>
- Rezaei Zaman, M; Masah Bowani, A; Javadi, S. (2022). Evaluation of the effects of SSP scenarios from the climatic outputs of the coupled intercomparative models of the sixth phase (CMIP6) on water resources and agriculture in the Hashtgerd region with the approach of applying adaptive strategies, *Environmental Science and Technology*, 24 (12), 107-93.(In Persian)
- Roshani, A., & Hamidi, M. (2022). Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature & precipitation based on CMIP6 models (Case study: Sari station). *Water and Irrigation Management*, 11(4), 781-795. (In Persian) doi: 10.22059/jwim.2022.330603.920
- Safarian, V, Salahi, B, Maleki Meresht, R & Kiyanian, M. (2019). Analysis of standardized precipitation and drought indicators in the city centers of Ardabil province, *Urban Ecology Research Quarterly*, 1, 121-136. (In Persian) doi: 10.30473/grup.2020.7476
- Salmi, T., A. Määttä, P. Anttila, T. Ruoho, & T. Amnell. (2002). Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates –the Excel template application MAKESENS.
- Sami, E., & Ebadi, M. (2024). Urban Flood Hazard Zoning Using Fuzzy-Analytic Network Process (ANP), Case study: Maragheh City. *Journal of Urban Ecology Researches*, 15(Vol 1 , Series 34), 171-186. doi: 10.30473/grup.2024.55316.2554
- Sarabi, M., Dastorani, M. T., & Zarrin, A. (2020). Investigating Impact of Future Climate Changes on Temperature and Precipitation condition (Case Study: Torogh Dam Watershed, Mashhad). *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 3(1), 63-83. (In Persian) doi: 10.22034/jmas.2021.278862.1129
- Scott, D., Dawson, J., & Jones, B. (2008). Climate change vulnerability of the US Northeast winter recreation–tourism sector *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 13(5-6), 577-596. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11027-007-9136-z>
- Serrano, A., Mateos, V.L & Garcia, J.A. (1999). Trend Analysis of Monthly Precipitation over the Iberian Peninsula for the Period 1921-1995. *Physics Chem. Earth (B)*, 24 (1-2) 85- 90. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(98\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(98)00016-1)

- Seymohammadi, S., Tavakoli, M., Zarafshani, K., Mahdizadeh, H., & Amiri, F. (2021). Prediction Impact of Climate Change on the Temperature & Precipitation by General Circulation Model, a Strategy for Sustainable Agriculture: (Case of Kermanshah Township). *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(6), 15-31. (In Persian) <https://sid.ir/paper/951683/fa>
- Shoja, F., & Shamsipour, A. (2023). Projection of future Precipitation changes in Tehran's water supply watersheds. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(36), 151-180. (In Persian) doi: [10.22111/jneh.2022.42622.1908](https://doi.org/10.22111/jneh.2022.42622.1908)
- Srivastava, A., Grotjahn, R., & Ullrich, P.A. (2020). Evaluation of historical CMIP6 model simulations of extreme precipitation over contiguous US regions, *Weather and Climate Extremes*, 29, 100-268. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100268>
- Turgay, P. & Ercan K. (2005). Trend Analysis in Turkish Precipitation data. *Hydrological processes published online in Wiley Interscience*. 20 (9), 2011 – 2026. doi/[10.1002/hyp.5993](https://doi.org/10.1002/hyp.5993)
- Zareian M. (2022). Effects of Climate Change on Temperature and Precipitation in Yazd Province Based on Combined Output of CMIP6 Models. *Journal of Water and soil sciences*; 26 (2): 91-105. (In Persian). doi: [10.47176/jwss.26.2.31501](https://doi.org/10.47176/jwss.26.2.31501)
- Zarrin, A., & Dadashi Roudbari, A. A. (2020). Projection the Long-Term Outlook Iran Future Temperature Based on the Output of The coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6). *Journal of the Earth and Space Physics*, 46(3), 583-602. (In Persian) doi: [20.1001.1.24235474.1400.8.4.14.9](https://doi.org/10.1001.1.24235474.1400.8.4.14.9)

