



## Simulation of Climatic Parameters using Statistical Microscale Models of SDSM and LARS-WG in West Azerbaijan Province

Mohammad Hossein Jahangir<sup>1</sup> , Fatemeh Rouzbahani<sup>2</sup> 

1. Associate Professor, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: [mh.jahangir@ut.ac.ir](mailto:mh.jahangir@ut.ac.ir)
2. M.S. graduate in eco-hydrology engineering, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: [ateme.rouzbahani@ut.ac.ir](mailto:ateme.rouzbahani@ut.ac.ir)

### Article Info

### ABSTRACT

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
Received July 23, 2024  
Received in revised form  
August 18, 2024  
Accepted August 27, 2024  
Available online September  
22, 2024

**Keywords:**  
climate change pattern,  
downscale modeling,  
SDSM,  
LARS-WG model

**Objective:** The objective of this study is to evaluate the performance of the statistical downscaling models SDSM and LARS-WG in simulating minimum and maximum temperatures and precipitation at four stations (Urmia, Maku, Takab, and Mahabad) in West Azerbaijan province, with data from the periods 1987-2010 and 2020-2065.

**Method:** The study used the statistical downscaling models SDSM and LARS-WG to simulate temperature and precipitation variables at the selected stations. The observed data for the period 1987-2010 and the forecasted data for 2020-2065 were compared in both models. Additionally, to validate the SDSM model, the simulated parameters were compared with NCEP data and real observed data.

**Results:** The results showed that both models were more accurate in simulating temperature than precipitation. The SDSM model performed better in simulating daily temperature compared to LARS-WG, whereas the precipitation results from the LARS-WG model were slightly more accurate than those from the SDSM model. Additionally, the RMSE values for the SDSM and LARS-WG models for precipitation were 2.84 mm and 3.4 mm, respectively, while for maximum temperature, the RMSE values were 0.02°C and 0.29°C, respectively.

**Conclusions:** Based on the results, the SDSM model demonstrated higher accuracy in simulating both precipitation and temperature compared to the LARS-WG model. This model can be considered a reliable tool for predicting future changes in temperature and precipitation.

**Cite this article:** Farahnakian, Z., & Ghazavi, R. (2024). Simulation of Climatic Parameters using Statistical Microscale Models of SDSM and LARS-WG in West Azerbaijan Province. *ECOHYDROLOGY*, 11 (3), 374-394. <http://doi.org/10.22059/ije.2024.383818.1844>



© Mohammad Hossein Jahangir, Fatemeh Rouzbahani. Publisher: University of Tehran Press.  
DOI: <http://doi.org/10.22059/ije.2024.383818.1844>

## Introduction

Global climate change has a significant impact on hydrological processes and water resources. As global warming and climate variability continue to rise, it is crucial to understand and project these effects, especially at local and regional levels. However, while comprehensive, General Circulation Models (GCMs) operate on a coarse spatial and temporal scale, limiting their usefulness for localized hydrological applications. To address this, statistical and dynamic downscaling techniques refine GCM outputs for specific areas. In this study, we use two widely accepted statistical downscaling models—SDSM (Statistical Downscaling Model) and LARS-WG (Long Ashton Research Station Weather Generator)—to evaluate minimum and maximum temperatures and precipitation levels for four stations: Urmia, Maku, Takab, and Mahabad, located in West Azerbaijan Province, Iran.

## Methodology

The methodology consists of two main stages. First, we collected baseline observational data from 1987 to 2010, along with projected climate data for the period from 2020 to 2065. The SDSM and LARS-WG models were calibrated and validated for each station using these datasets. For the SDSM model, the simulated parameters were validated against observed values, utilizing NCEP (National Centers for Environmental Prediction) data to ensure accuracy in reproducing historical climate patterns. The downscaled data for minimum and maximum temperatures, as well as precipitation, were compared across each of the four stations. Additionally, we calculated error metrics, including the Root Mean Square Error (RMSE), to evaluate model performance.

## Results

The results indicated that both the SDSM and LARS-WG models demonstrate a higher degree of accuracy in simulating temperature patterns than precipitation. Specifically, the SDSM model showed superior performance in simulating daily temperature, closely aligning with observed values and achieving a lower RMSE of 5.27 mm, compared to 6.34 mm for LARS-WG. While both models produced similar results for precipitation, the RMSE values for SDSM suggest it has better overall accuracy, particularly for temperature-related projections. This discrepancy may be attributed to the inherent complexity and variability of precipitation patterns, which are more difficult to model accurately.

## Conclusion

In conclusion, this study emphasizes the importance of using the right downscaling models for regional climate impact assessments. Both the SDSM and LARS-WG models are valuable, but SDSM demonstrates higher accuracy, particularly for daily temperature simulations, making it the preferred choice for temperature projections in West Azerbaijan Province. However, modeling precipitation continues to pose challenges, indicating a need for further refinement of existing models or the exploration of alternative downscaling methods. These findings highlight the importance of validating and selecting models based on specific climate variables and regional characteristics to ensure the reliability of projections. This, in turn, supports more informed water resource management and effective climate adaptation strategies.

## Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization, methodology, software development, validation, formal analysis, investigation, resource management, data curation, original draft writing, manuscript review and editing, and visualization. Mohammad Hossein Jahangir served

as the corresponding author and was responsible for supervision, project administration, and funding acquisition. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Data Availability Statement**

Data supporting the reported results are available on request from the authors. The data are not publicly available due to institutional restrictions.

**Acknowledgements**

We would like to thank all participants of the study and the University of Tehran for providing facilities and support during the research process.

**Ethical considerations**

The study was approved by the Ethics Committee of the University of Tehran. The authors adhered to ethical research practices, avoiding data fabrication and falsification.

**Funding**

No funding was received for this research.

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.



## شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی با استفاده از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM و LARS-WG در استان آذربایجان غربی

محمدحسین جهانگیر<sup>۱\*</sup>، فاطمه روزبهانی<sup>۲</sup>

۱. دانشیار دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، رایانامه: [mh.jahangir@ut.ac.ir](mailto:mh.jahangir@ut.ac.ir)

۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، رایانامه:

[fateme.rouzbahani@ut.ac.ir](mailto:fateme.rouzbahani@ut.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	<b>موضوع:</b> تغییرات آب‌وهوایی جهانی تأثیرات زیادی بر فرایندهای هیدرولوژیکی و منابع آب دارد. به دلیل مقیاس بزرگ مدل‌های گردش عمومی (GCM)، این مدل‌ها دقت مکانی و زمانی مناسبی ندارند و نیاز به ریزمقیاس‌نمایی آماری و دینامیکی وجود دارد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۲	<b>هدف:</b> بررسی عملکرد مدل‌های آماری SDSM و LARS-WG در شبیه‌سازی دمای حداقل، حداکثر و بارش در چهار ایستگاه ارومیه، ماکو، تکاب و مهاباد در استان آذربایجان غربی.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸	<b>روش تحقیق:</b> در این پژوهش، داده‌های تاریخی برای دوره ۱۹۸۷-۲۰۱۰ و داده‌های پیش‌بینی‌شده برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۶۵ با استفاده از مدل‌های SDSM و LARS-WG مورد مقایسه قرار گرفتند. همچنین، به منظور اعتبارسنجی SDSM، پارامترهای شبیه‌سازی‌شده با متغیرهای NCEP و داده‌های واقعی مقایسه شدند.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۶	<b>یافته‌ها:</b> یافته‌نتایج نشان داد که هر دو مدل در شبیه‌سازی دما دقیق‌تر از بارش عمل می‌کنند. مدل SDSM در شبیه‌سازی دمای روزانه عملکرد بهتری نسبت به LARS-WG دارد، درحالی‌که نتایج بارش در مدل LARS-WG کمی دقیق‌تر از مدل SDSM بود. همچنین، متوسط شاخص RMSE برای مدل‌های SDSM و LARS-WG برای بارش به ترتیب ۲/۸۴ و ۳/۴ میلی‌متر و برای دمای حداکثر به ترتیب ۰/۲ و ۰/۲۹ درجه سانتی‌گراد بود.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱	<b>نتیجه‌گیری:</b> با توجه به نتایج، مدل SDSM دقت بالاتری در شبیه‌سازی بارش و دما نسبت به مدل LARS-WG نشان داد. این مدل می‌تواند به‌عنوان ابزاری معتبر برای پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در آینده استفاده شود.
<b>کلیدواژه‌ها:</b> تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی، مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG، مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM.	

**استناد:** جهانگیر، محمدحسین و روزبهانی، فاطمه. (۱۴۰۳). شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی با استفاده از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM و LARS-WG در

استان آذربایجان غربی. *اکوهیدرولوژی*، ۱۱(۳)، ۳۹۴-۳۷۴.

<http://doi.org/10.22059/ije.2024.383818.1844>



© محمدحسین جهانگیر، فاطمه روزبهانی.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

تشدید تأثیرات تغییرات آب‌وهوایی موجب شده است تحقیقات زیادی در این زمینه در سال‌های اخیر صورت گیرد (ژائی، لی و هانگ، ۲۰۲۳). تغییر اقلیم به‌عنوان تغییر در میانگین تغییرات ویژگی‌های آب‌وهوایی در دوره‌های بلندمدت، خواه ناشی از فعالیت‌های انسانی، خواه طبیعی توصیف می‌شود. اجزای چرخه هیدرولوژیکی و همچنین دسترسی به منابع آب به‌طور کلی تحت تأثیر نوسانات دما و تغییر در روند بارش هستند (ووبنه، ورکو و فیکادی، ۲۰۲۲). به‌منظور انجام ارزیابی ریسک بلندمدت منطقه‌ای و حفاظت از سیل آینده، پیش‌بینی‌های گسترده‌ای از بارش شدید و تکرار وقوع سیل مورد نیاز است. مدیریت یکپارچه منابع آب و برنامه‌ریزی استراتژیک نیازمند زمان‌های معمول چنددهه‌ای برای اجرای اقدامات مناسب برای کاهش خطر است. بنابراین پیش‌بینی‌ها و سناریوهای اثرات تغییر اقلیم منطقه‌ای و پیامدهای هیدرولوژیکی مرتبط با آن برای نهادهای دولتی و غیردولتی اهمیت ویژه‌ای دارد (الفیری و تیلن، ۲۰۱۵).

در گزارش چهارم IPCC، مدل‌های گردش عمومی جوی-اقیانوسی (به‌عنوان ابزار اصلی پیش‌بینی اقلیم گزارش شده است (سالومون، جین و مانینگ، ۲۰۰۷). مدل‌های گردش عمومی نشان می‌دهد که افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای پیامدهای قابل توجهی بر اقلیم در مقیاس جهانی و منطقه‌ای خواهد داشت (حسان، شمس‌الدین و هارون، ۲۰۱۴). خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی به‌دلیل شبکه‌های بزرگ مقیاس‌شان، فاقد دقت مکانی و زمانی برای مطالعات محلی و منطقه‌ای هستند. بنابراین نیاز است که مقیاس خروجی‌های این مدل‌ها به مقیاس‌های ایستگاهی و نقطه‌ای کوچک‌تر شود. این امر منجر به توسعه مدل‌های منطقه‌ای و آماری شده است که از ابتدای معرفی و تصمیم‌گیری برای رویارویی و تطبیق با پیامدهای تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر کاربردهای گسترده‌ای در مطالعات تغییرات اقلیمی داشته‌اند. مدل‌های مبتنی بر روش‌های آماری به‌دلیل سهولت استفاده و عدم نیاز به محاسبات پیچیده از محبوبیت و کاربرد بیشتری برخوردارند.

ریزمقیاس‌نمایی آماری یک رویکرد برای تولید مدل‌های آب‌وهوایی منطقه‌ای با وضوح بالا براساس اطلاعات در مقیاس بزرگ از داده‌های تحلیل مجدد یا مدل‌های آب‌وهوای جهانی است (دگنت و دیسه، ۲۰۱۶). در بین این روش‌های آماری، مدل‌های LARS-WG و SDSM رایج‌ترین و معتبرترین مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی هستند (لطفی، کمالی و مشکاته، ۲۰۲۲). موضوع اصلی ریزمقیاس‌نمایی آماری توسعه رابطه بین متغیرهای GCM و متغیرهای مقیاس محلی با روش‌های آماری و ریاضی مانند مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی و مولدهای آب‌وهواست. هر دو روش تأثیر بسزایی بر تعیین توان اثر تغییر اقلیم ناشی از افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند (بقانام، اصلاحی و شیخ‌بابایی، ۲۰۲۰).

مطالعات زیادی با استفاده از روش‌های آماری برای ریزمقیاس کردن خروجی الگوهای جهانی در مناطق مختلف جهان انجام گرفته است که در آن‌ها عملکرد الگو بررسی شده و تحلیل‌های عدم قطعیت روی این روش‌ها صورت گرفته یا با روش‌های دیگر آماری مقایسه شده است. در سال ۲۰۲۳، لی و همکاران از مدل SDSM برای کاهش مقیاس بارش و دمای پیش‌بینی شده در حوضه آبخیز Yongding تحت چهار سناریوی اقلیمی SSP-RCP در چهار مدل گردش عمومی (GCM) استفاده کردند. نتایج نشان داد که دمای حداکثر، حداقل دما، بارندگی و رواناب روند صعودی دارند (لی، لی و ژنگ، ۲۰۲۳). هادی‌احمد و همکاران با هدف استخراج یک مدل شبیه‌سازی شرایط پوشش گیاهی در مورد دمای روزانه و شاخص بارش‌های شدید در ایالت Katsina نیجریه مطالعه‌ای انجام دادند؛ به این ترتیب که با استفاده از سنجش از دور و تجزیه و تحلیل مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی بارش، دمای حداکثر و حداقل، و همچنین ۲۴ شاخص مربوط به تغییرات آب‌وهوایی به‌منظور ارزیابی تأثیر دما و بارش شدید شاخص‌های دینامیک پوشش گیاهی NDVI انجام دادند؛ نتایج نشان می‌دهد که مدل SDSM در پیش‌بینی دماهای حداکثر و حداقل و همچنین بارندگی عملکرد مطلوبی دارد (هادی‌احمد، ابوبکر و ایشک، ۲۰۲۳). اینگروبر و همکاران در مطالعه‌ای روند تکرار بارش‌های شدید و سیلاب‌ها را برای حوضه آبخیز Rur آلمان تا سال ۲۰۹۹ تجزیه و تحلیل کردند. برای پیش‌بینی روندهای آینده، مدل‌سازی براساس داده‌های NCEP و یک مدل GCM انجام شد. با فرض سناریوهای انتشار آینده

HadCM3 A2a و B2a مدل SDSM توسعه داده و پیش‌بینی برای مقادیر بارش روزانه تا سال ۲۰۹۹ توسط یک مولد آب‌وهوای تصادفی پیش‌بینی شد (اینگروبر و کورس، ۲۰۲۲).

فونگ و همکاران با استفاده از مدل SDSM، سناریوهای بارش روزانه و حداکثر و حداقل دما را در حوضه رودخانه Vu Gia Thu Bon ساختند. عملکرد مدل با استفاده از نمودار تیلور ارزیابی شد. اعتبار سنجی تمامی معیارهای عملکرد مدل نشان داد که مدل، توانایی بالایی در شبیه‌سازی داده‌های دمای بیشینه و بارندگی نشان می‌دهد (فونگ، دونگ و لیم، ۲۰۲۰). حصیرچیان و همکاران عملکرد مدل SDSM را با استفاده از داده‌های بارش، دمای حداکثر و حداقل ایستگاه یاسوج و متغیرهای بزرگ‌مقیاس NCEP ارزیابی و سپس اثر تغییر اقلیم در دوره ۱۹۹۳-۲۰۶۷ با استفاده از خروجی‌های مدل CGCM3 تحت سناریوی A2 پیش‌بینی کردند. نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل در مقیاس روزانه و غیرقابل قبول در شبیه‌سازی توزیع بارش‌های روزانه حداکثر سالانه است؛ در مقیاس ماهانه و همچنین در بازتولید توزیع سالانه بارش در سطح اعتماد ۹۰ درصد قابل قبول، اما نسبتاً ضعیف است. عملکرد مدل در بازتولید توزیع سالانه دما قابل قبول نیست. در ارزیابی اثر تغییر اقلیم نتایج نشان داد که در آینده، میانگین دمای حداکثر و حداقل ماهانه در همه ماه‌های سال تقریباً به صورت یکسان افزایش، میانگین بارش در فصل بهار کاهش و در فصل پاییز افزایش خواهد یافت (حصیرچیان، عیوضی و عبدی، ۲۰۱۹). لطفی و همکاران عملکرد دو مدل LARS-WG و SDSM را در شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش در غرب ایران تحلیل کردند. ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه شامل ۱۷ ایستگاه با دوره آماری بلندمدت (۱۳۶۸-۱۳۹۷) در سه استان کردستان، کرمانشاه و ایلام بود. برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از MSE، RMSE و MAE استفاده شد. به‌طور خلاصه، هیچ‌یک از این مدل‌ها بهتر از دیگری نیست و به‌رغم تفاوت در شبیه‌سازی، هر دو می‌توانند برای بررسی تغییرات آب‌وهوایی مفید باشند (لطفی، کمالی و مشکاته، ۲۰۲۲).

در انجام مطالعات مربوط به اقلیم، انتخاب مدل مناسب برای پیش‌بینی‌های دقیق‌تر و تصمیم‌گیری‌های مؤثر ضروری است. با این هدف دو مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) و مولد هوای ایستگاه تحقیقاتی لانگ اشتون (LARS-WG) انتخاب می‌شوند. هر دو مدل برای ریزمقیاس کردن داده‌های آب‌وهوایی و تولید سناریوهای اقلیمی ولی با دو رویکرد متفاوت طراحی شده‌اند. درک این تفاوت برای تعیین اینکه کدام مدل با اهداف تحقیقاتی خاص یا کاربردهای عملی هماهنگی بهتری دارد، ضروری است. SDSM از روابط آماری بین متغیرهای جوی در مقیاس بزرگ و متغیرهای آب‌وهوایی محلی استفاده می‌کند، درحالی‌که LARS-WG از یک رویکرد تصادفی برای تولید داده‌های آب‌وهوایی مصنوعی براساس ویژگی‌های آماری آب‌وهوای مشاهداتی استفاده می‌کند. با ارزیابی هر دو مدل در برابر داده‌های تاریخی و در نظر گرفتن نقاط قوت و محدودیت‌های مربوط به آن‌ها، می‌توان انتخاب‌های آگاهانه‌تری در حوزه پیش‌بینی اقلیم داشت که منجر به پیش‌بینی‌های قابل اعتمادتر و عملی‌تر می‌شود.

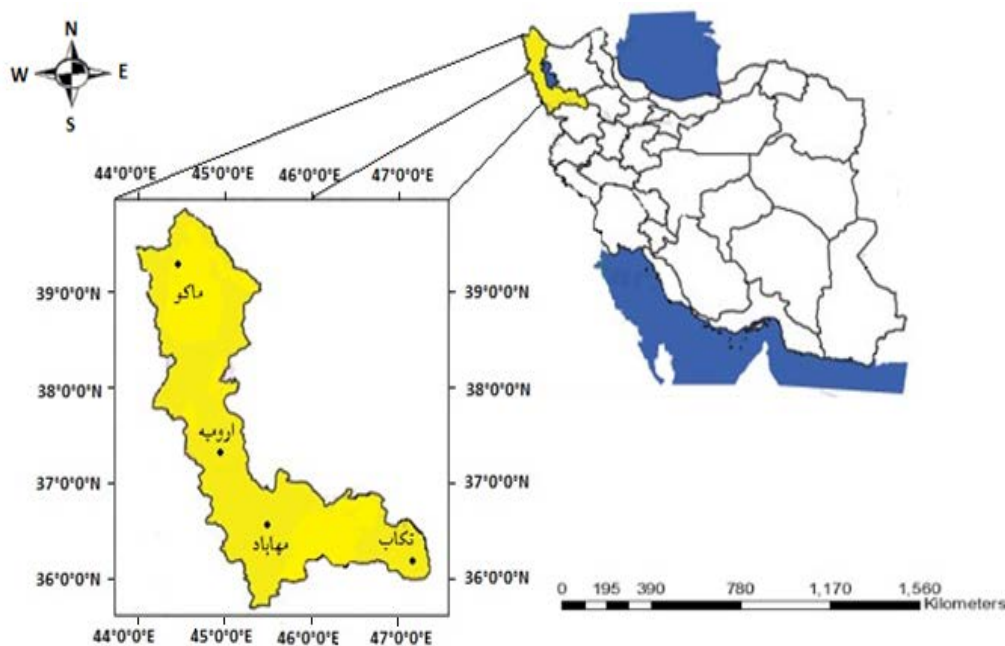
## مواد و روش‌ها

### ۱. معرفی منطقه مورد مطالعه

استان آذربایجان غربی با احتساب دریاچه ارومیه با مساحتی حدود ۴۳۶۶۰ کیلومتر مربع و مختصات جغرافیایی بین ۴۴ درجه و ۳ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۲۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۶ دقیقه عرض شمالی، در شمال غرب ایران واقع شده است. وجود کوه‌های مرتفع و قرار گرفتن آن‌ها در مسیر انواع جریان‌های آب‌وهوایی و نیز دریاچه ارومیه در شرق، باعث تنوع آب‌وهوایی در استان شده است. دمای استان در قسمت‌های مختلف متفاوت است و براساس طبقه‌بندی اقلیمی، از نیمه خشک بسیار سرد در شمال غرب و جنوب شرق تا بسیار مرطوب سرد در جنوب غرب استان متغیر است (حبیب‌زاده، عیوضی و عبدی، ۲۰۲۰). در پژوهش حاضر به دلیل اختلاف دمای مطلق حداقل و حداکثر در ایستگاه‌های مختلف هواشناسی از داده‌های چهار ایستگاه ارومیه، ماکو، تکاب و مهاباد واقع در چهار نقطه مختلف استان آذربایجان غربی استفاده شده است. مشخصات و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مذکور در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد بررسی

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا
ارومیه	۳۷	۴۵	۱۳۳۲ متر
ماکو	۳۹	۴۴	۱۱۸۲ متر
تکاب	۳۶	۴۷	۱۷۶۵ متر
مهاباد	۳۶	۴۵	۱۳۲۰ متر



شکل ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

## ۲. مدل‌های مورد بررسی

### ۱.۲. مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG

LARS-WG به‌عنوان یکی از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی، برای شبیه‌سازی اطلاعات اقلیمی در شرایط کنونی و آینده استفاده می‌شود (بیات و رکشی، ژنگ و فصیحی، ۲۰۲۰). این مدل می‌تواند برای ایجاد داده‌های اقلیمی روزانه و پر کردن شکاف‌ها در یک سری زمانی اقلیمی موجود استفاده شود. علاوه بر این، می‌تواند با استفاده از ویژگی‌های داده‌های مشاهداتی مانند بارش، دما و تابش خورشیدی یک سایت نظارت‌شده، داده‌هایی را برای یک سایت نظارت‌نشده در نزدیکی آن تولید کند. داده‌های ورودی به مدل شامل دما حداقل، دمای حداکثر، بارش و میزان تابش به‌صورت روزانه در بازه زمانی طولانی سایت هدف است. علاوه بر این می‌تواند سناریوهای اقلیمی آینده را با تنظیم پارامترها بر اساس داده‌های مشاهداتی برای تولید داده‌های مصنوعی که منعکس‌کننده تغییرات آب‌وهوایی بالقوه‌اند، شبیه‌سازی کند (حشمی، شمس‌الدین و مل و یله، ۲۰۱۱). داده‌های روزانه از مرکز هواشناسی تهیه شده و حداقل باید یک دوره زمانی ۳۰ ساله باشند. این داده‌ها که از مرکز هواشناسی دریافت شده‌اند، حداقل باید شامل یک دوره زمانی ۳۰ ساله باشند تا تحلیل‌ها قابل اعتماد باشند. روش کار به این صورت است که ابتدا داده‌های مشاهده شده دوره پایه دریافت می‌شوند؛ سپس با بررسی این داده‌ها، مشخصه‌های آماری آن‌ها استخراج می‌شود. برای اطمینان از دقت مدل، این داده‌ها روی نرم‌افزار QTEST اجرا می‌شوند تا یک سری داده‌های مصنوعی برای دوره پایه (۱۹۸۷-۲۰۱۷) مجدداً ایجاد شود. سپس این خروجی‌ها با مشخصات آماری

داده‌های مشاهده‌شده ۳۰ ساله مقایسه می‌شوند تا عملکرد مدل در بازسازی داده‌ها ارزیابی شود. در این پژوهش از آخرین نسخه این مدل، یعنی نسخه ۶ استفاده شده است، که به دلیل به‌روزرسانی‌ها و بهبودهای انجام‌شده، انتظار می‌رود نتایج دقیق‌تری ارائه دهد.

## ۲.۲. مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM

SDSM تجزیه و تحلیل همبستگی و همبستگی جزئی را بین پیش‌بینی‌کننده‌های محلی و پیش‌بینی‌کننده‌های مقیاس بزرگ برای شنا سایی مرتبط‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌ها برای منطقه مورد مطالعه انجام می‌دهد. این مدل ترکیبی از روش تولید داده‌های آب‌وهوایی غیرقطعی و روش رگرسیون خطی است. این مدل ابزار پشتیبان تصمیم در ارزیابی اثرات منطقه‌ای تغییر اقلیم بوده که وظیفه ریزمقیاس‌نمایی آماری سری‌های روزانه آب‌وهوایی را عهده‌دار است که در سال ۲۰۰۲ در انگلستان تهیه شد. داده‌های ورودی به مدل شامل داده‌های روزانه هواشناسی (بارش روزانه و بیشینه و کمینه درجه‌حرارت روزانه) و نیز داده‌های مشاهداتی مربوط به مرکز ملی پیش‌بینی متغیرهای محیطی (NCEP) هستند. باتوجه به آنکه خروجی پیش‌بینی‌کنندگان بزرگ مقیاس یا متغیرهای NCEP دارای متغیرهای زیادی هستند، باید از میان آن‌ها مناسب‌ترین پیش‌بینی‌کننده مرتبط با ایستگاه مورد نظر را انتخاب کرد. این نرم‌افزار دارای ۵ مرحله است: ۱. غربال‌سازی متغیرهای پیش‌بینی‌کننده؛ ۲. کالیبراسیون مدل؛ ۳. بازتولید داده‌های مشاهداتی به‌صورت مصنوعی؛ ۴. تولید سناریوهای تغییر اقلیم؛ ۵. عیب‌یابی و آنالیزهای آماری (ویلبای، دانسون و بارو، ۲۰۰۲).

## ۳.۲. معیار ارزیابی عملکرد

به‌منظور ارزیابی مدل، از آماره‌های ضریب تعیین ( $R^2$ )، میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص نش ساتکلیف (NS) استفاده شده است. روابط مربوط به این آماره‌ها در ادامه ارائه شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^k (X_k - Y_k)^2}{k}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (\text{رابطه ۲})$$

RMSE برای محاسبه ریشه میانگین مربعات خطا به کار می‌رود، که معیاری از دقت مدل است. در این معادله،  $X_k$  مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی محاسبه شده و به توان دو می‌رسد تا تمامی اختلافات مثبت شوند. سپس این مربعات اختلافات برای همه داده‌ها جمع شده و بر تعداد کل داده‌ها تقسیم می‌شود تا میانگین مربعات خطا به دست آید. درنهایت، ریشه دوم این میانگین گرفته می‌شود تا RMSE به دست آید، و هرچه مقدار آن کمتر باشد، مدل دقیق‌تر است؛ که در آن‌ها،  $X_i$  و  $Y_i$  به ترتیب  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  میانگین کل داده‌های  $X_i$  و  $Y_i$  در جامعه آماری و  $n$  تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی هستند (عساکره و مطلبی‌زاد، ۲۰۱۷).

کارایی نش ساتکلیف (NSE) یک شاخص آماری برای ارزیابی دقت مدل‌های شبیه‌سازی، به‌ویژه در مدل‌های هیدرولوژیکی است. این شاخص میزان مطابقت بین داده‌های مشاهده‌شده و داده‌های مدل شده را محاسبه می‌کند. مقدار این شاخص بین  $-\infty$  و ۱ است، که هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بالاتر است (روشگر و عبدالزاده، ۲۰۲۳).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (x_{obs,t} - y_{model,t})^2}{\sum_{t=1}^T (x_{obs,t} - \bar{x}_{obs})^2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن‌ها  $X_{obs,t}$  مقادیر داده‌های مشاهداتی و  $Y_{model,t}$  مقادیر داده‌های شبیه‌سازی مدل در واحد  $t$  و  $\bar{X}_{obs}$  نیز به ترتیب میانگین مقادیر داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در کل دوره زمانی ارزیابی (دوره پایه) است.



## نتایج و بحث

مدل‌ها خروجی‌های مختلفی شامل دمای حداقل و حداکثر، بارش، مجموع و واریانس آن‌ها را با استفاده از داده‌های اولیه (۱۹۸۷-۲۰۱۰) و پیش‌بینی‌شده (۲۰۲۰-۲۰۶۵) برای SDSM و داده‌های اولیه (۱۹۸۷-۲۰۱۷) و پیش‌بینی‌شده (۲۰۲۰-۲۰۶۵) برای LARS-WG ارائه دادند که در جدول ۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بالاترین دقت و کمترین خطا مربوط به پارامتر بارش در مدل SDSM در ایستگاه تکاب با RMSE برابر ۱/۲۱ است که نسبت به مدل LARS-WG با RMSE برابر ۳/۵۳ خطای کمتری دارد. بیشترین دقت و کمترین خطای دمای حداکثر مربوط به ایستگاه‌های تکاب، ارومیه و ماکو در مدل SDSM با RMSE برابر ۰/۰۲ و در مدل LARS-WG مربوط به ایستگاه ارومیه با RMSE برابر ۰/۲۱ است. در دمای حداقل نیز، کمترین خطا مربوط به مدل SDSM در ایستگاه‌های تکاب و ارومیه با RMSE برابر ۰/۰۲ است. بررسی‌ها در زمینه شبیه‌سازی دمای حداکثر نیز مشابه با دمای حداقل است، با این تفاوت که میانگین خطا در هر دو مدل نسبت به دمای حداقل کاهش یافته است. هر دو مدل در شبیه‌سازی دمای حداکثر نسبت به دو پارامتر اقلیمی دیگر عملکرد بهتری داشته‌اند که در این زمینه مدل SDSM کارایی بهتری نشان می‌دهد. برای اطمینان از مدل‌ها از شاخص خطاسنجی  $R^2$  نیز استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که هر دو مدل در شبیه‌سازی دما نسبت به شبیه‌سازی بارش از دقت بهتری برخوردار بوده‌اند.

در جدول زیر، شاخص‌های ارزیابی مدل‌های LARS-WG و SDSM برای چهار ایستگاه مهاباد، ماکو، تکاب و ارومیه ارائه شده است. شاخص‌های مورد استفاده شامل  $R^2$ ، NS و RMSE هستند که برای بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل محاسبه شده‌اند.

جدول ۳. عملکرد مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از شاخص‌های خطاسنجی

ایستگاه	شاخص مدل	$R^2$		NS		RMSE	
		SDSM	LARS-WG	SDSM	LARS-WG	SDSM	LARS-WG
مهاباد	بارش	۰/۶۷	۰/۶۰	۰/۴۹	۰/۴۳	۳/۶۵	۳/۷۸
	دمای حداکثر	۰/۸۹	۰/۸۶	۰/۷۸	۰/۸۷	۰/۲۸	۰/۰۵
	دمای حداقل	۰/۹۲	۰/۹۵	۰/۸۷	۰/۷۵	۰/۴۴	۰/۰۶
ماکو	بارش	۰/۷۹	۰/۷۳	۰/۶۱	۰/۵۲	۲/۰۷	۲/۳۸
	دمای حداکثر	۰/۹۱	۰/۹۰	۰/۷۸	۰/۸۷	۰/۲۶	۰/۰۲
	دمای حداقل	۰/۹۲	۰/۸۷	۰/۸۶	۰/۸۵	۰/۳	۰/۰۴
تکاب	بارش	۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۶۲	۳/۵۳	۱/۲۱
	دمای حداکثر	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۹۱	۰/۴۴	۰/۰۲
	دمای حداقل	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۸۷	۰/۳۳	۰/۰۲
ارومیه	بارش	۰/۶۸	۰/۵۹	۰/۵۰	۰/۳۸	۴/۳۶	۴
	دمای حداکثر	۰/۹۸	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۵	۰/۲۱	۰/۰۲
	دمای حداقل	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۸۸	۰/۸۶	۰/۲۵	۰/۰۲

در شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش، مدل SDSM در دمای حداکثر عملکرد بهتری نسبت به LARS-WG نشان داده است. در ایستگاه مهاباد، LARS-WG برای بارش با  $R^2$  برابر ۰/۶۷ و RMSE کمتر ۳/۶۵ نسبت به SDSM برتری دارد. در ایستگاه ماکو، LARS-WG نیز در شاخص NS و RMSE بهتر عمل کرده است. در ایستگاه تکاب، SDSM برای بارش با RMSE کمتر ۱/۲۱ نسبت به LARS-WG عملکرد بهتری دارد. در ایستگاه ارومیه، LARS-WG در شبیه‌سازی بارش برتری نشان می‌دهد. در

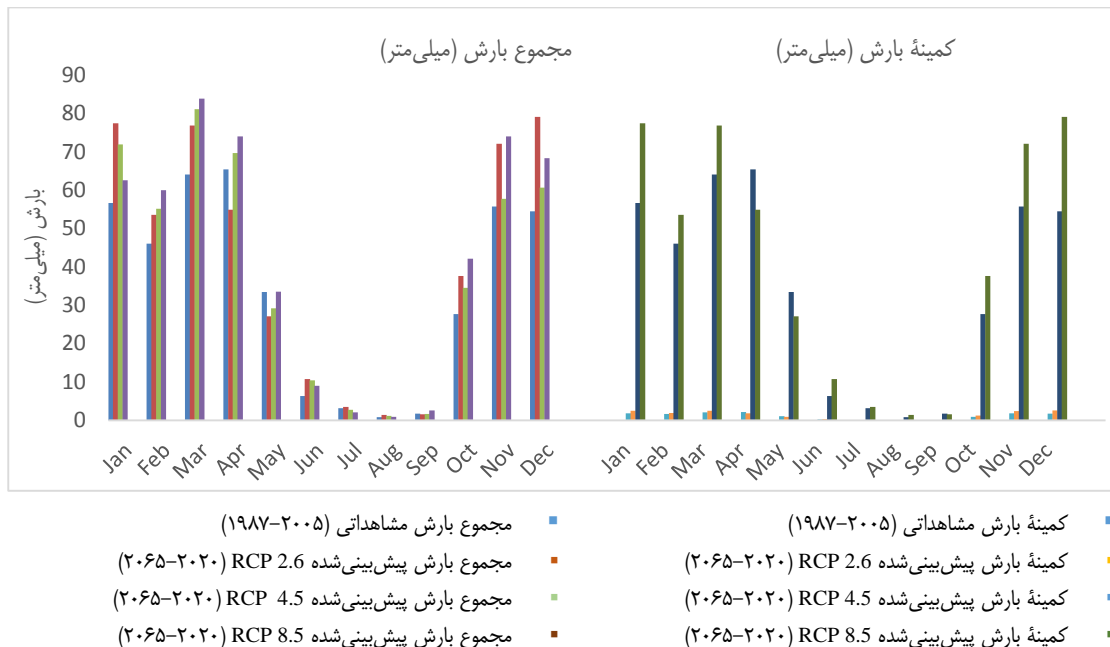
۱. بارش برحسب میلی‌متر

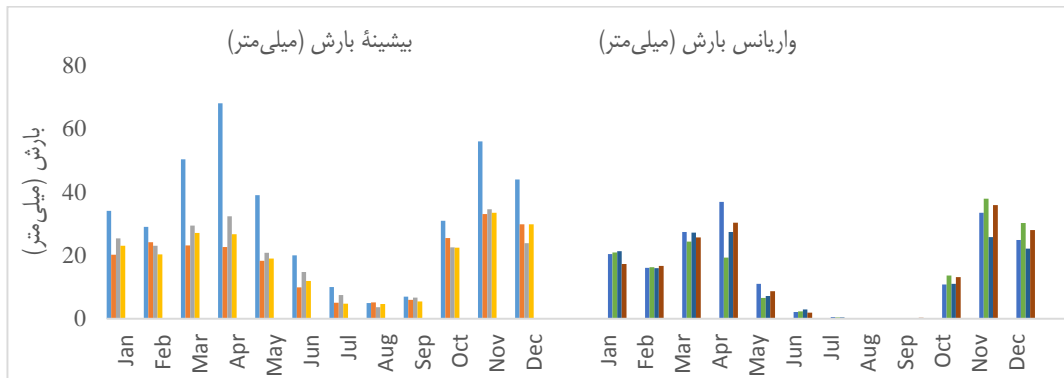
۲. دما برحسب درجه سانتی‌گراد

دمای حداکثر، SDSM در بیشتر ایستگاه‌ها از جمله مهاباد، ماکو، تکاب و ارومیه دقت بیشتری دارد. در دمای حداقل، SDSM در ایستگاه‌های مهاباد، تکاب و ارومیه عملکرد بهتری داشته و تنها در ایستگاه ماکو LARS-WG کمی برتر بوده است. به‌طور کلی، مدل SDSM در شبیه‌سازی دمای حداکثر و حداقل و مدل LARS-WG در شبیه‌سازی بارش بهتر عمل کرده‌اند.

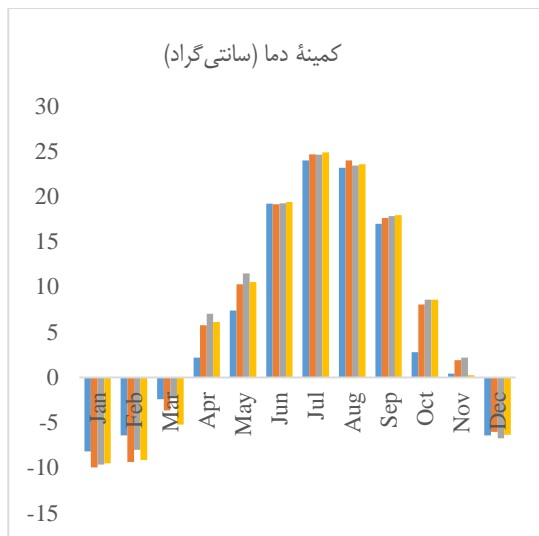
برای ارائه توضیحی جامع از خروجی مدل‌های SDSM و LARS-WG، در این مطالعه از نمودارهای مقایسه‌ای برای نمایش و مقایسه پارامترهای مختلف مانند حداکثر و حداقل دما، بارش و وارپانس این متغیرها در ایستگاه‌های مختلف استفاده شد. این نمودارها (شکل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵) عملکرد هر دو مدل را نشان می‌دهند. از نظر دمای حداکثر در همه ایستگاه‌ها، مدل SDSM عموماً در اکثر روزها از مدل LARS-WG بهتر عمل کرد. این نشان می‌دهد که مدل SDSM به دلیل استفاده دقیق از ورودی‌های داده در مقیاس بزرگ و روش‌های آماری پیشرفته، در ثبت محدوده‌های دمای بالاتر در منطقه مورد مطالعه مؤثرتر است. برای حداقل دما و بارش، نتایج متغیرتر بود. مدل SDSM عموماً شبیه‌سازی‌های بهتری از بارش را برای اکثر ایستگاه‌ها به جز مهاباد ارائه می‌دهد. در مقابل، مقادیر بارش مدل LARS-WG اغلب با مشاهدات واقعی مطابقت بیشتری دارد، در حالی که SDSM ممکن است در برخی موارد بهتر باشد، LARS-WG دارای نقاط قوتی در همسویی با داده‌های مشاهداتی بارش است.

باتوجه به شکل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵، در حالی که مدل SDSM ممکن است در مواردی دقیق‌تر باشد، سادگی و کارایی مدل LARS-WG در مدیریت داده‌های ورودی (مانند حداقل و حداکثر دما، بارش و ساعات آفتابی) نتایج قابل اعتمادی را با پیچیدگی کمتر ارائه می‌دهد. این کارایی LARS-WG را به مدلی سریع‌تر برای پیاده‌سازی تبدیل می‌کند؛ اگرچه ممکن است در شبیه‌سازی داده‌ها در مقایسه با SDSM دقت کمتری داشته باشد. بنابراین همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، در ارتباط با دمای حداکثر، در بیشتر روزها در همه ایستگاه‌ها، مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM از کارایی بهتری نسبت به مدل LARS-WG برخوردار است. در ارتباط با پارامتر بارش و وضعیت متفاوت است، چراکه در بیشتر ایستگاه‌ها به جز مهاباد مدل SDSM در شبیه‌سازی بارش بهتر عمل کرده است در حالی که در شبیه‌سازی بارش مقادیر شبیه‌سازی شده در مدل LARS-WG به مقادیر واقعی (مشاهداتی) ایستگاهی نزدیک‌تر است؛ بنابراین در این زمینه این مدل نسبت به SDSM موفق‌تر بوده است.

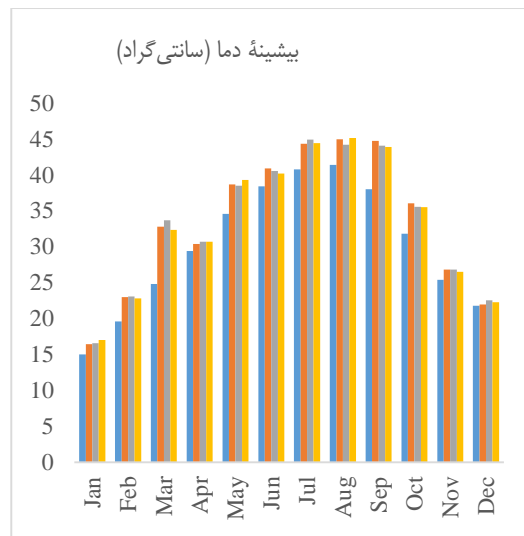




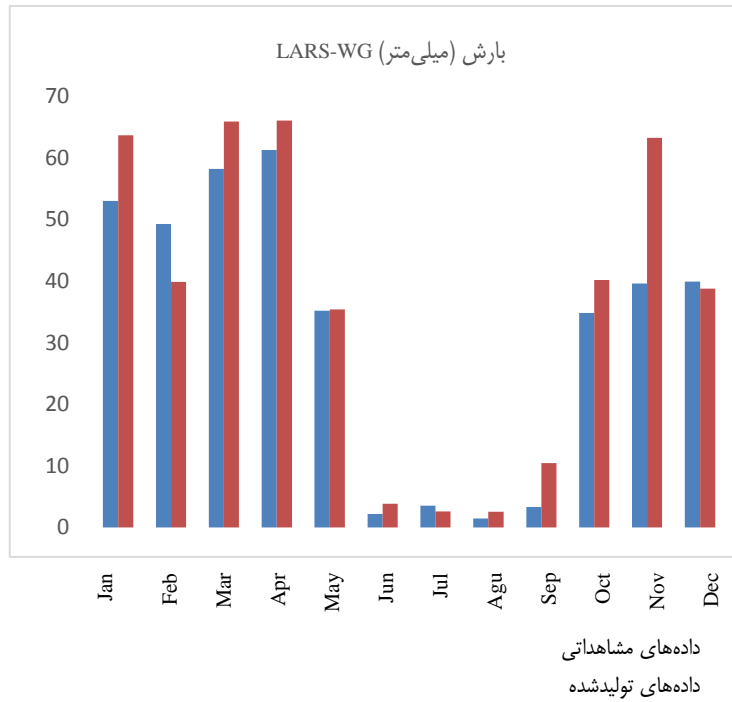
- بیشینه بارش مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۰۵)
- واریانس بارش مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۰۵)
- بیشینه بارش پیش‌بینی شده RCP 2.6 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- واریانس بارش پیش‌بینی شده RCP 2.6 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- بیشینه بارش پیش‌بینی شده RCP 4.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- واریانس بارش پیش‌بینی شده RCP 4.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- بیشینه بارش پیش‌بینی شده RCP 8.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- واریانس بارش پیش‌بینی شده RCP 8.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)



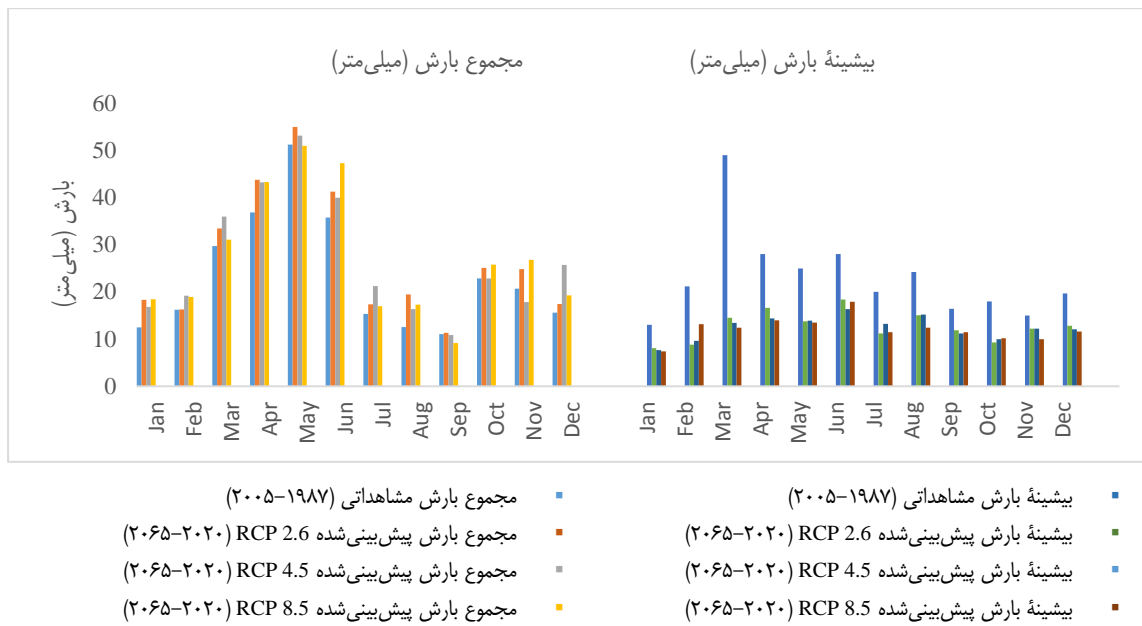
- کمینه دما مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۰۵)
- کمینه دما پیش‌بینی شده RCP 2.6 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- کمینه دما پیش‌بینی شده RCP 4.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- کمینه دما پیش‌بینی شده RCP 8.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)

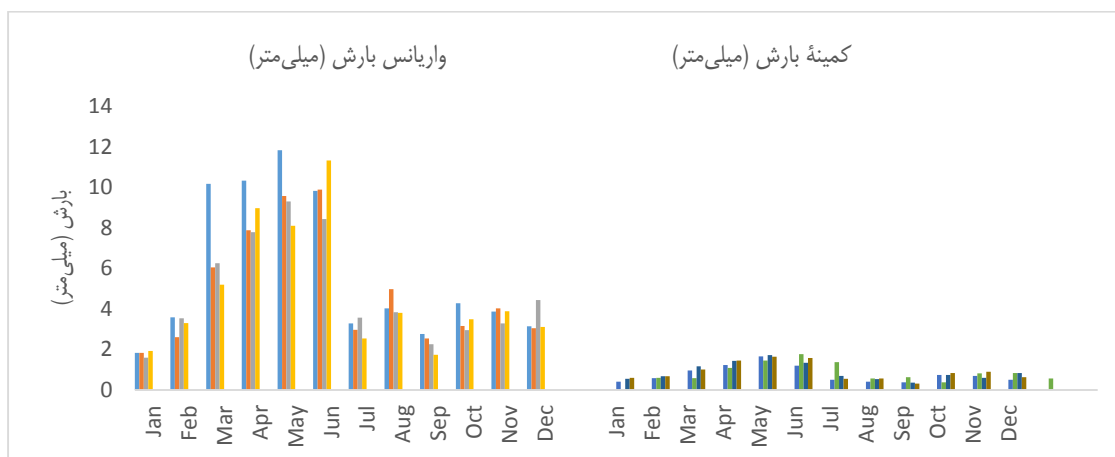


- بیشینه دما مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۰۵)
- بیشینه دما پیش‌بینی شده RCP 2.6 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- بیشینه دما پیش‌بینی شده RCP 4.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- بیشینه دما پیش‌بینی شده RCP 8.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)

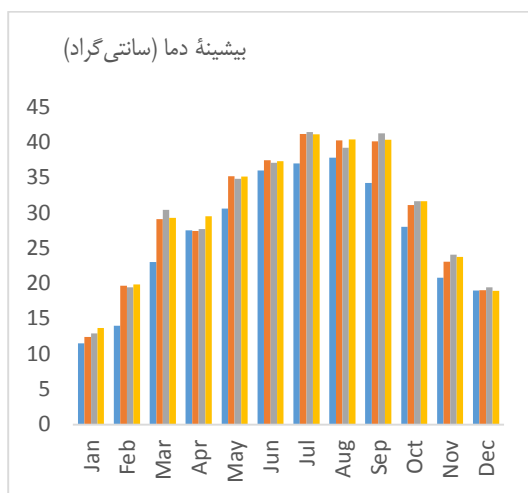


شکل ۲.۱. ایستگاه مهاباد - شاخص بارش و دما (SDSM) و (LARS-WG) نمودارهای پیشینه و کمینه

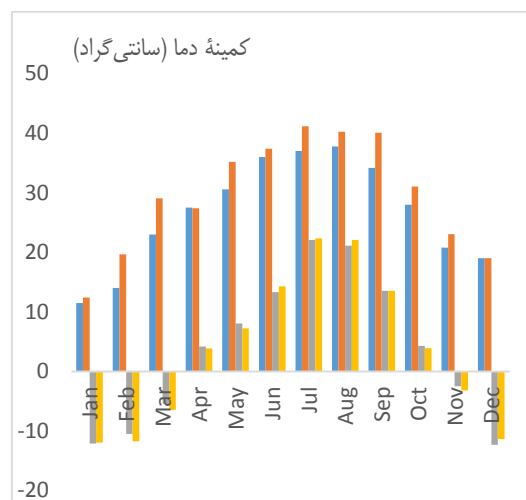




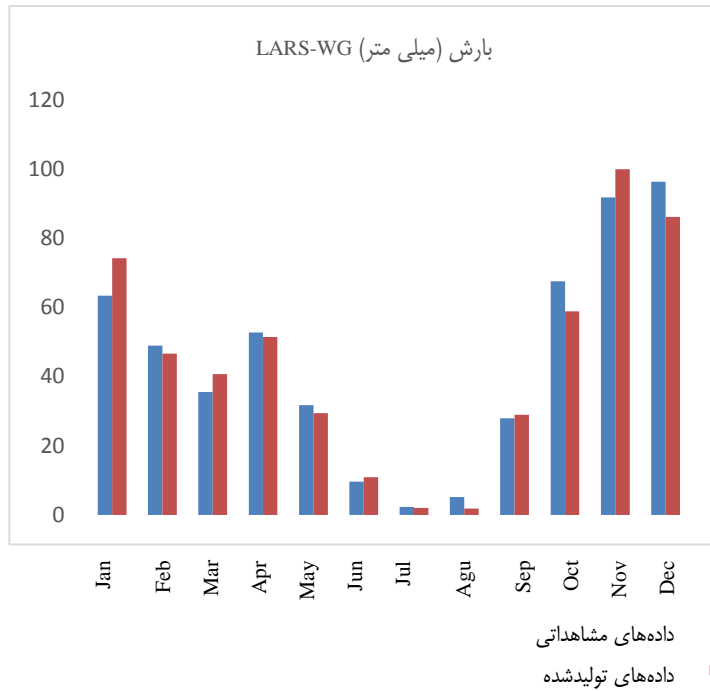
- واریانس بارش مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۰۵)
- کمینۀ بارش مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۰۵)
- واریانس بارش پیش‌بینی‌شده RCP 2.6 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- کمینۀ بارش پیش‌بینی‌شده RCP 2.6 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- واریانس بارش پیش‌بینی‌شده RCP 4.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- کمینۀ بارش پیش‌بینی‌شده RCP 4.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- واریانس بارش پیش‌بینی‌شده RCP 8.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- کمینۀ بارش پیش‌بینی‌شده RCP 8.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)



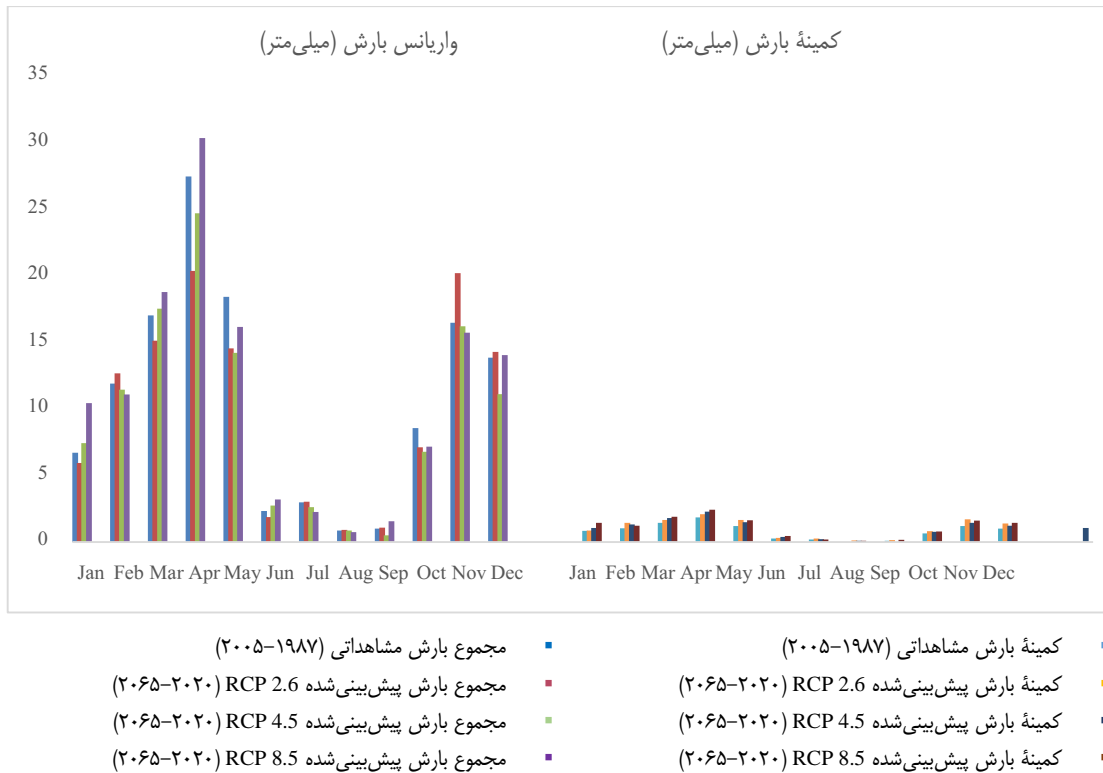
- بیشینۀ دما مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۰۵)
- بیشینۀ دما پیش‌بینی‌شده RCP 2.6 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- بیشینۀ دما پیش‌بینی‌شده RCP 4.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- بیشینۀ دما پیش‌بینی‌شده RCP 8.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)

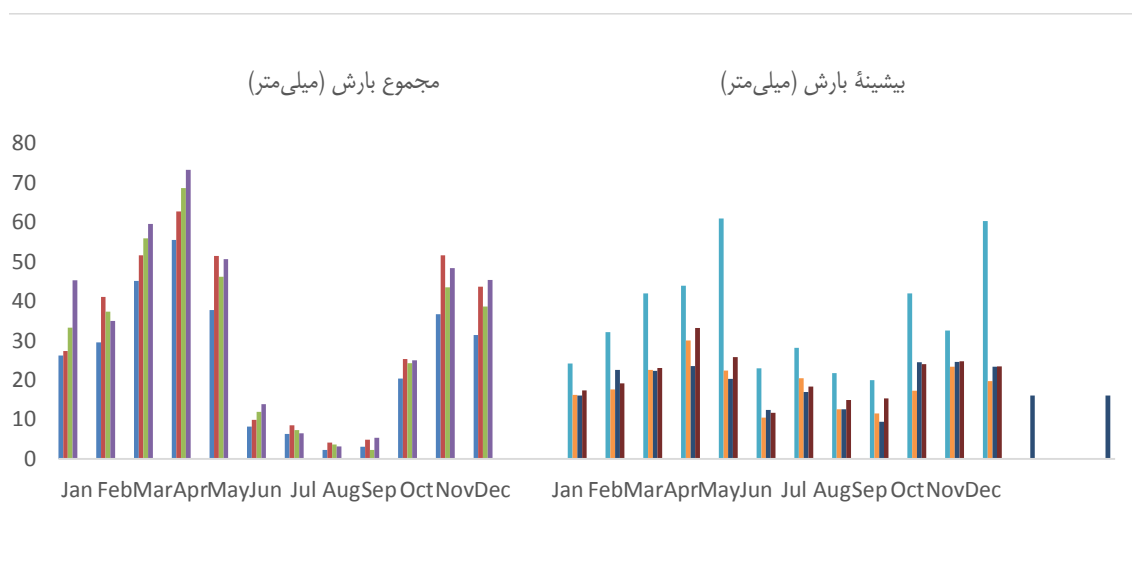


- کمینۀ دما مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۰۵)
- کمینۀ دما پیش‌بینی‌شده RCP 2.6 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- کمینۀ دما پیش‌بینی‌شده RCP 4.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- کمینۀ دما پیش‌بینی‌شده RCP 8.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)

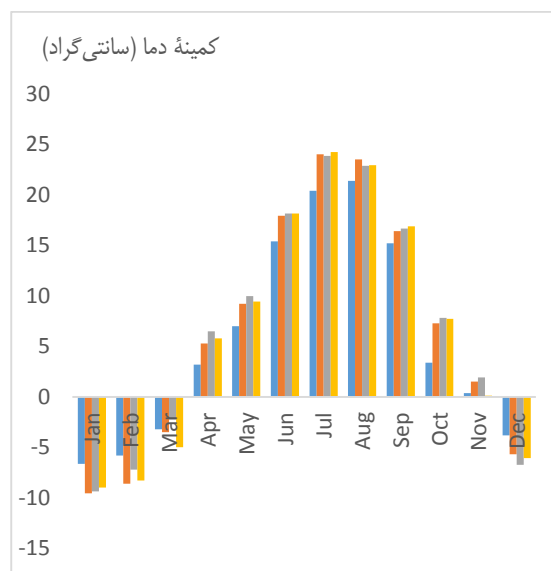
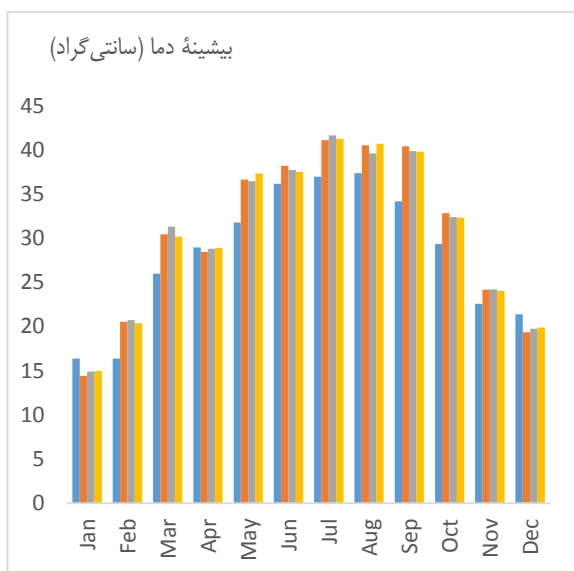


شکل ۳.۳. ایستگاه ماکو - شاخص بارش و دما (SDSM) و (LARS-WG) نمودارهای بیشینه، کمینه، واریانس، مجموع

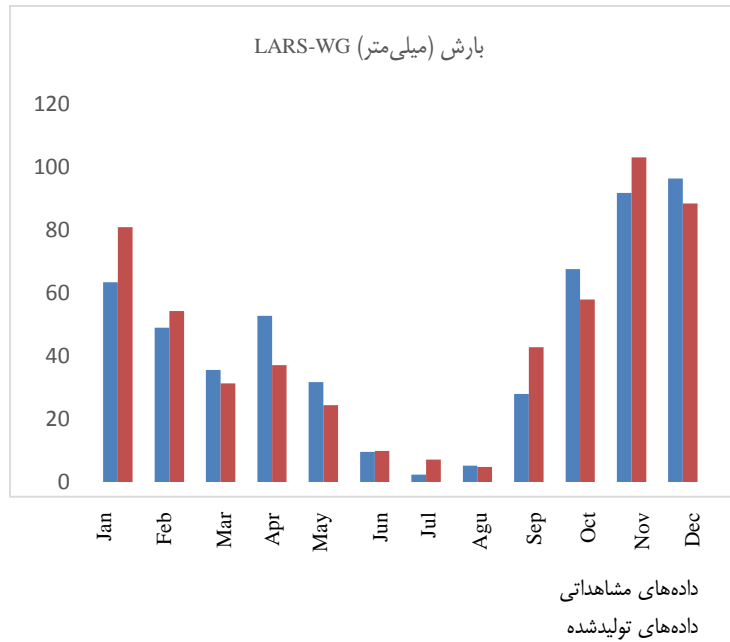




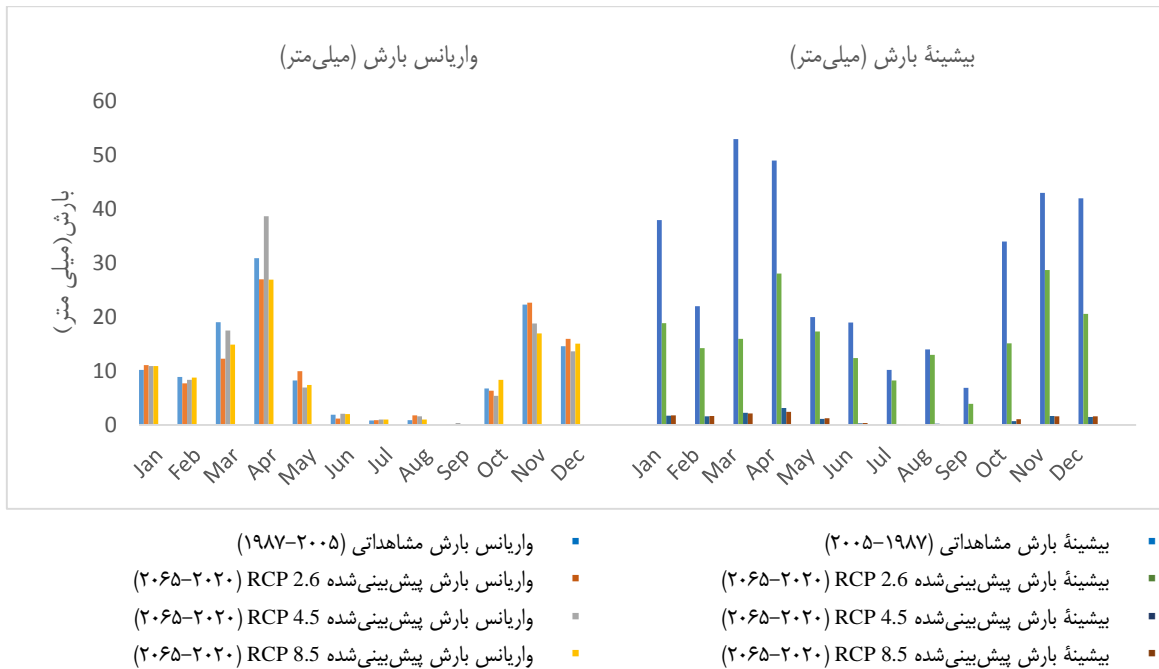
- واریانس بارش مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۰۵)
- بیشینه بارش مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۰۵)
- واریانس بارش پیش‌بینی شده RCP 2.6 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- بیشینه بارش پیش‌بینی شده RCP 2.6 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- واریانس بارش پیش‌بینی شده RCP 4.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- بیشینه بارش پیش‌بینی شده RCP 4.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- واریانس بارش پیش‌بینی شده RCP 8.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- بیشینه بارش پیش‌بینی شده RCP 8.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)



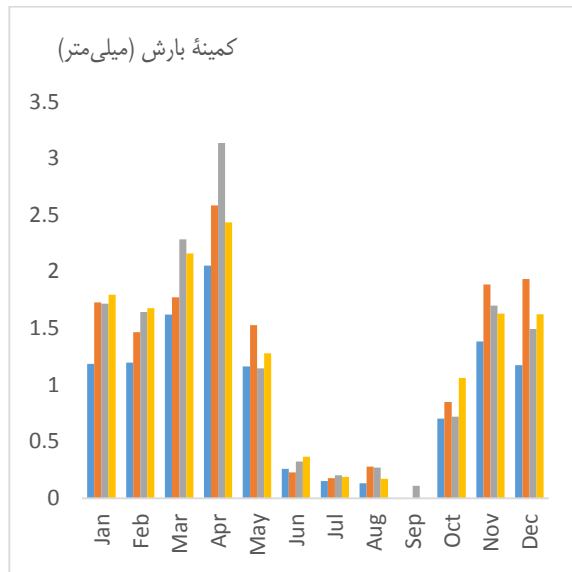
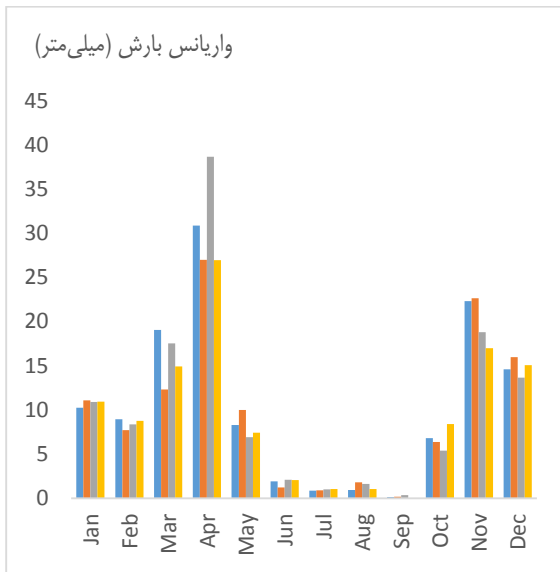
- بیشینه دما مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۰۵)
- کمینه دما مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۰۵)
- بیشینه دما پیش‌بینی شده RCP 2.6 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- کمینه دما پیش‌بینی شده RCP 2.6 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- بیشینه دما پیش‌بینی شده RCP 4.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- کمینه دما پیش‌بینی شده RCP 4.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- بیشینه دما پیش‌بینی شده RCP 8.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- کمینه دما پیش‌بینی شده RCP 8.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)



شکل ۴. ایستگاه ارومیه - شاخص بارش و دما (SDSM) و (LARS-WG) نمودارهای بیشینه، کمینه، واریانس، مجموع

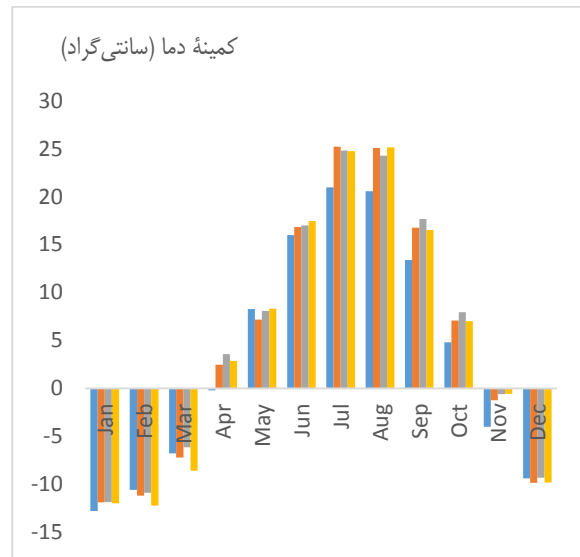
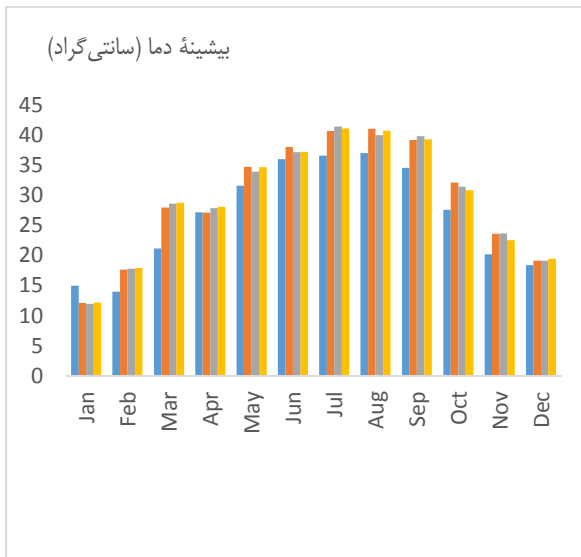






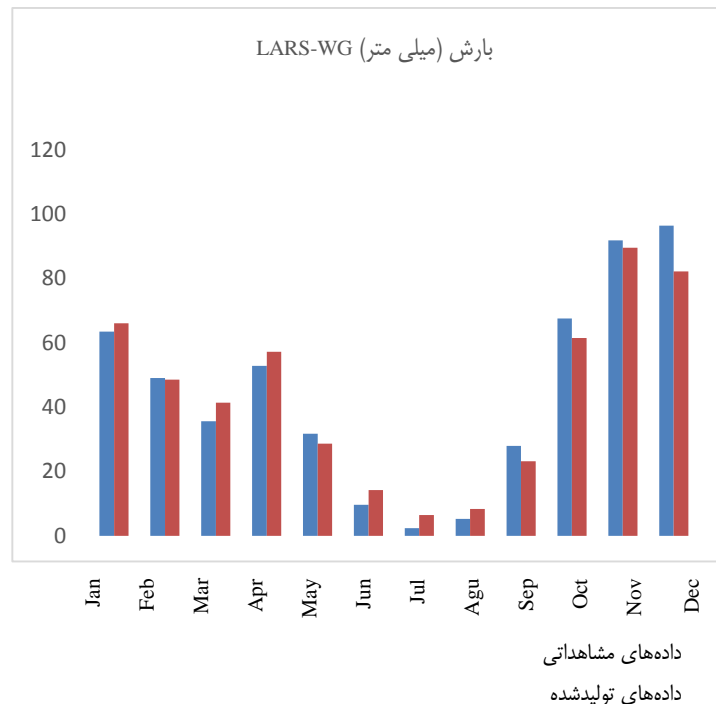
- مجموع بارش مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۰۵)
- مجموع بارش پیش‌بینی شده RCP 2.6 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- مجموع بارش پیش‌بینی شده RCP 4.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- مجموع بارش پیش‌بینی شده RCP 8.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)

- کمینه بارش مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۰۵)
- کمینه بارش پیش‌بینی شده RCP 2.6 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- کمینه بارش پیش‌بینی شده RCP 4.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- کمینه بارش پیش‌بینی شده RCP 8.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)



- بیشینه دما مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۰۵)
- بیشینه دما پیش‌بینی شده RCP 2.6 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- بیشینه دما پیش‌بینی شده RCP 4.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- بیشینه دما پیش‌بینی شده RCP 8.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)

- کمینه دما مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۰۵)
- کمینه دما پیش‌بینی شده RCP 2.6 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- کمینه دما پیش‌بینی شده RCP 4.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)
- کمینه دما پیش‌بینی شده RCP 8.5 (۲۰۲۰-۲۰۶۵)



شکل ۵. ایستگاه تکاب - شاخص بارش و دما (SDSM) و (LARS-WG) نمودارهای بیشینه، کمینه، واریانس، مجموع

از نظر سناریوهای پیش‌بینی شده تغییرات اقلیمی، نتایج نشان می‌دهد که در سناریوی RCP8.5، افزایش دمای حداقل و حداکثر در ایستگاه‌های مختلف استان تا سال ۲۰۶۵ محسوس خواهد بود. مدل SDSM در شبیه‌سازی دمای حداقل و حداکثر عملکرد بهتری نسبت به LARS-WG داشته است. در ایستگاه‌های ماکو و ارومیه، دمای حداکثر بیش از ۳ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد که این افزایش به‌ویژه در ماه‌های تابستان شدت بیشتری دارد. همچنین، نمودارهای دما در این ایستگاه‌ها نشان می‌دهند که دمای حداقل به‌ویژه در فصل زمستان نیز روند افزایشی خود را حفظ می‌کند.

در شبیه‌سازی بارش، مدل LARS-WG در برخی ایستگاه‌ها عملکرد بهتری نسبت به SDSM نشان داده است. برای مثال، در ایستگاه مهاباد، در سناریوی RCP4.5، کاهش بارش در فصل بهار به ۲۷ درصد می‌رسد که نشان‌دهنده کاهش چشمگیر منابع آبی در این دوره است. در مقابل، در ایستگاه‌های ماکو و ارومیه، پیش‌بینی‌ها حاکی از افزایش بارش در فصل‌های پاییز و زمستان است. با این حال، در فصل بهار کاهش محسوس مشاهده می‌شود. افزایش واریانس بارش در سناریوی RCP8.5 نیز در اکثر ایستگاه‌ها، از جمله ماکو و ارومیه، نشان‌دهنده نوسانات شدیدتر و احتمال وقوع بارش‌های ناگهانی و سنگین است. به‌طور کلی، نمودارهای شبیه‌سازی دما و بارش در سناریوهای مختلف نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی پیش‌بینی‌شده، به‌ویژه در سناریوی RCP8.5، می‌تواند تأثیرات درخور توجهی بر الگوهای دما و بارش در منطقه داشته باشد.

## نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش به‌ویژه در دقت بالای SDSM در شبیه‌سازی دما و عملکرد بهتر LARS-WG در شبیه‌سازی بارش در برخی ایستگاه‌ها، با مطالعات مشابه در مناطق دیگر ایران و جهان هم‌راستاست. از میان روش‌های آماری، مدل‌های LARS-WG و SDSM از معتبرترین ابزارهای ریزمقیاس‌سازی حال حاضر به حساب می‌آیند. این دو مدل به‌عنوان ابزارهایی برای اندازه‌گیری کمی ویژگی‌های محیطی در مقیاس محلی استفاده می‌شوند. در این پژوهش به بررسی عملکرد دو مدل ریزمقیاس LARS-WG و SDSM به‌منظور شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی ایستگاه‌های ارومیه، ماکو، مهاباد و تکاب در استان آذربایجان غربی در دوره پایه SDSM (۱۹۸۷-۲۰۱۰) و LARS-WG (۱۹۸۷-۲۰۱۷) و دوره مشترک (۱۹۸۷-۲۰۱۰) پرداخته شده است. نتایج حاصل نشان داد

که هر دو مدل LARS-WG و SDSM در شبیه‌سازی متغیرهای بارش و دما در منطقه مورد بحث توانایی قابل قبولی را دارند. همچنین با در نظر گرفتن اینکه هر دو مدل به‌طور کلی قابل اعتمادند، مدل SDSM به‌دلیل استفاده از داده‌های بزرگ مقیاس مدل‌های GCM و NCEP دقت بیشتری در شبیه‌سازی داده‌های آب‌وهوایی دارد، در حالی که LARS-WG برای سرعت عملکرد بالاتر و نیازهای داده ساده‌تر سودمند است. در این مطالعه، چالش اصلی اختلاف در نتایج بین ایستگاه‌های مختلف و پارامترهای اقلیمی است؛ به این صورت که دو مدل نتایج ثابتی را در همه مکان‌ها و در مورد همه متغیرها ارائه نمی‌دهند، که نشان‌دهنده تغییر در عملکرد آنهاست. این ناهماهنگی بر دشواری دستیابی به دقت و قابلیت اطمینان یکنواخت در شرایط مختلف اقلیمی و تنظیمات جغرافیایی با استفاده از یک رویکرد مدل‌سازی واحد تأکید می‌کند.

برای تحقیقات آینده توسعه یک مدل که به‌طور بالقوه سادگی و سرعت LARS-WG را با دقت دقیق SDSM ادغام کند، کالیبره کردن هر مدل به‌طور خاص برای ایستگاه‌های مختلف و پارامترهای آب‌وهوایی برای بالابردن سازگاری و دقت مدل و استفاده از یادگیری ماشین و سایر روش‌های محاسباتی پیشرفته برای افزایش قابلیت‌های پیش‌بینی و کارایی مدل‌های آب‌وهوایی می‌توانند رویکرد مناسبی باشند.

## References

- Alfieri, L. & Thielen, J. A. (2015). European precipitation index for extreme rain-storm and flash flood early warning. *Meteorological Application*, 22(1), 3–13.
- Asakare, H. & Motalebizad, S. (2017). Comparing the performance of the SDSM models and those based on artificial neural networks in predicting the changes in minimum temperatures (station in case: urmia). *The Journal of Spatial Planning and Geomatics*, 21(4), 140–60. (in Persian)
- Baghanam, A. H., Eslahi, M., Sheikhabaei, A. & Seifi, A. J. (2020). Assessing the impact of climate change over the northwest of Iran: an overview of statistical downscaling methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 141(3), 1135–50. (in Persian)
- Bayatvarkeshi, M., Zhang, B., Fasihi, R., Adnan, R. M., Kisi, O. & Yuan, X. (2020). Investigation into the Effects of Climate Change on Reference Evapotranspiration Using the HadCM3 and LARS-WG. *Water*, 12(3), 666.
- Dagnenet, M. & Disse, M. (2016). Analyzing the future climate change of Upper Blue Nile River Basin (UBNRB) using statistical down scaling techniques. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, DOI: <https://dx.doi.org/10.5194/hess-2016-543>
- Eingrüber, N. & Korres, W. (2022). Climate change simulation and trend analysis of extreme precipitation and floods in the mesoscale Rur catchment in western Germany until 2099 using Statistical Downscaling Model (SDSM) and the Soil & Water Assessment Tool (SWAT model). *Science of The Total Environment*, 838(1), 155775.
- Habibzadeh, Y., Evazi, A. & Abdi, S. (2020). Evaluation of relevant areas of wheat cultivation with priority of reduction in water use in West Azerbaijan Province. *Iranian Journal of Field Crop Science.*, 51(3), 205–20. (in Persian)
- Hadi Ahmad, M., Abubakar, A., Ishak, Y. M., Shehu Danhassan, S., Jiahua, Z. & Alatalo, J. M. (2023). Modeling the influence of daily temperature and precipitation extreme indices on vegetation dynamics in Katsina State using statistical downscaling model (SDM). *Ecological Indicators*, 155, 110979.
- Hassan, Z., Shamsudin, S. & Harun S. (2014). Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature. *Theoretical and Applied Climatology*, 116(1), 243–57. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0951-8>
- Hashmi, M. Z., Shamseldin, A. Y. & Melville, B. W. (2011). Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4), 475–84.
- Hasirchian, M., Zahabiyoun, B. & Khazaei, M. R. (2019). Assessment of SDSM model performance to investigate the effect of climate change on precipitation and temperature. *Irrigation and Water Engineering*, 9(2), 108–20. (in Persian)
- Li, J., Li, Y., Zhang, T. & Feng, P. (2023). Research on the future climate change and runoff response in the mountainous area of Yongding watershed. *Journal of Hydrology*, 625, 130108.
- Lotfi, M., Kamali, G. & Meshkatee, A. (2022). Varshavian V. Performance analysis of LARS-WG and SDSM downscaling models in simulating temperature and precipitation changes in the West of Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8, 1–11.
- Phuong, D., Duong, N., Liem, T. & Nguen, D. (2020). Projections of Future Climate Change in the Vu Gia Thu Bon River Basin, Vietnam by Using Statistical DownScaling Model (SDSM), *Water*, 12(3), 755.
- Roushangar, K. & Abdelzad, S. (2023). River Flow Modeling in Semi-Arid and Humid Regions Using an Integrated Method Based on LARS-WG and LSTM Models. *The Journal of Spatial Planning and Geomatics*, 37(10), 3813–31. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03527-8>
- Solomon, S. & Qin, D. (2007). Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K, et al. *IPCC fourth assessment report (AR4). Climate Change*, 374.
- Wilby, R. L., Dawson, C. W. & Barrow, E. M. (2002). sdsim — a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17(2), 145–57.
- Wubneh, M. A., Worku, T. A., Fikadie, F. T., Aman, T. F. & Kifelew, M. S. (2022). Climate change impact on lake tana water storage, upper blue nile basin, Ethiopia. *Geocarto International*, 37(25), 10278–300.

Zhai, X., Li, Y., Wang, H., Huang, G. & Li, Y. (2023). Assessment of the potential impacts of climate changes on Syr Darya watershed: A hybrid ensemble analysis method. *Journal of Hydrology, Regional Studies*, 47, 101415.