

The perspective of the effects of climate change on precipitation and temperature variables of Todehsk watershed

GholamReza Shojaei¹, Mehdi Ghorbani¹, Arash Malekian^{1*}, Amir Alambeigi², Maryam Rostami³

1. Department of Arid and Mountain Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Department of Agricultural Extension and Education, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran

3. Department of the International Center for Urban Resilience Studies, Natural Disaster Research Institute, Tehran, Iran

* Corresponding author: malekian@ut.ac.ir

(Received: 24 September 2024

Revised: 30 October 2024

Accepted: 13 December 2024)

Extended Abstract:

Introduction: Climate change is considered one of the main and important threats to the environmental, economic and social. Climate change has been occurring all over the world without taking necessary measures to reduce greenhouse gas emissions and in recent years has left disastrous effects in many countries. The increase in greenhouse gases in the atmosphere due to the development of industry and increased use of fossil fuels and changes in land use in the last few decades has caused a constant eating of climate variables especially global warming. The negative consequences of this phenomenon for mankind can be destructive to the extent that among the ten threatening factors for mankind in the 21st century, the climate change phenomenon has taken the first place. This study aims to investigate the extreme temperature and precipitation changes using the Statistical Downscaling Model to downscale the output of the MPI-ESM1-2-HR model from the GCM report under three scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 for the next three periods of the near future, the average future and the far future in the Todehsk watershed in Isfahan.

Materials and methods: In this study, to evaluate the performance of the general circulation model of MPI-ESM1-2-HR in the downscaling of maximum and minimum temperature parameters and precipitation of the Naein synoptic station in Isfahan province during 1989-2014 were used as the base period. In this model, data from 1989 to 2006 were used as the calibration and data of 2007 to 2014 were used as model validation. First, using linear regression test in SPSS software, among 26 variables of ECMWF historical data, variables that had the highest correlation with dependent variables were extracted as independent variables. Also in order to evaluate the performance of the model, goodness of fit correlation coefficient, root mean square error, nash-sutcliffe, kling gupta efficiency and taylor diagrams were used.

Results and Discussion: The results of the goodness of fit coefficient R, RMSE, NSE and KGE in the calibration and validation of the MPI-ESM1-2-HR model with the SDSM downscaling model to estimate the precipitation variables, maximum temperature and the minimum temperature of the Naein synoptic station were 0.97, 0.42, 0.96 and 0.87 respectively, which implies the high performance and accuracy of the model in modeling of climatic variables. The results showed that the output of the MPI-ESM1-2-HR model and the SDSM statistical model have high and medium performance for downscaling of maximum and minimum temperature and precipitation variable in the Naein synoptic station, respectively, and the high and average conformity between the scenario of the maximum and minimum values of the maximum and minimum temperature and the precipitation variable under scenarios SSP1-2.6 and SSP2-4.5 and SSP5-8.5 for the time periods 2015-2042, 2043-2070 and 2071-2100. The results also showed that in the MPI-ESM1-2-HR model, the average monthly precipitation amounts in the time periods 2015-2042, 2043-2070 and 2071-2100 have been reduced to 0.21, 0.22 and 0.24 mm, respectively, and the average maximum temperature values were 1.49, 1.5 and 1.52 °C and the mean temperature of minimum temperature will increase 0.51, 0.53 and 0.54 °C under scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 respectively.

Conclusion: Since the current conditions of the world show the spread of climate change in all countries and in all continents and risks of sustainable development, international community needs to move toward environmentally compatible environments, use of clean and non-renewable energy and implementation of international standards for sustainable development including reduction of greenhouse gases. Therefore, it seems reasonable that among the scenarios evaluated in this research, the average scenario SSP2-4.5 is considered as a decision criterion for planning in order to propose a solution to deal with climate change in policy agenda of policy makers and planners.

Keywords: Climate Change, Downscaling, Sixth Climate Model Intercomparison Project (CMIP6), SDSM model, MPI-ESM1-2-HR model, Todehsk watershed.

Citation: Shojaei, Gh., Ghorbani, M., Malekian, A., Alambeigi, A., & Rostami, M. (2025). The perspective of the effects of climate change on precipitation and temperature variables of Todehsk watershed. *Integrated Watershed Management*, 5(2), 51-73. doi= 10.22034/iwm.2024.2041835.1175

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



چشم‌انداز اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای بارش و دمای حوزه آبخیز تودشک

غلامرضا شجاعی^۱، مهدی قربانی^۱، آرش ملکیان^{۲*}، امیر علم بیگی^۳، مریم رستمی^۲

۱. گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. گروه مرکز بین‌المللی مطالعات تاب‌آوری شهری، پژوهشکده سوانح طبیعی، تهران، ایران

*نویسنده مسئول: malekian@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۳

چکیده مبسوط

مقدمه: یکی از تهدیدهای مهم و اصلی محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی برای جهان، تغییرات اقلیمی است. بدون انجام اقدامات لازم در جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییر اقلیم در سرتاسر زمین در حال وقوع بوده و در سالین اخیر اثرات فاجعه باری را در بسیاری از کشورها از خود به جای گذاشته است. افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو در اثر گسترش صنعت و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری اراضی در چند دهه گذشته موجب به هم خوردن ایستایی روند متغیرهای اقلیمی به خصوص دمای کره زمین شده است. تبعات منفی این پدیده برای بشر تا آنجا می‌تواند مخرب باشد که در بین ده عامل تهدیدآمیز برای بشر در قرن بیست و یکم، پدیده تغییر اقلیم مقام اول را به خود اختصاص داده است. هدف این پژوهش پیش‌نگری تغییرات فرین‌های حدی دمای و بارش با استفاده از کاربست مدل Statistical Downscaling Model برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR از مدل‌های GCM از گزارش CMIP6 تحت سه سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 جهت سه دوره آینده نزدیک، آینده متوسط و آینده دور نسبت به دوره زمانی پایه در حوزه آبخیز تودشک اصفهان می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش به منظور ارزیابی عملکرد خروجی‌های مدل گردش عمومی MPI-ESM1-2-HR در ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه با بهره‌گیری از مدل آماری SDSM، از داده‌های روزانه ایستگاه سینوپتیک ناین استان اصفهان در بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۴ به عنوان دوره پایه استفاده شد. در این مدل، از داده‌های سال ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۶ به عنوان بخش واسنجی مدل و از داده‌های سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۴ به عنوان قسمت اعتبارسنجی مدل استفاده شد. در ابتدا با استفاده از آزمون رگرسیون خطی در نرم‌افزار SPSS از بین ۲۶ متغیر داده‌های تاریخی ECMWF، متغیرهایی که بالاترین میزان همبستگی با متغیرهای وابسته را داشتند، به عنوان متغیر مستقل استخراج گردید. همچنین به منظور ارزیابی عملکرد این مدل از شاخص‌های برازش نکویی ضریب همبستگی، مجذور میانگین مربعات خطا، نش ساتکلیف، کلینگ گوپتا و دیاگرام تیلور استفاده شد.

نتایج و بحث: نتایج شاخص‌های برازش نکویی R، RMSE، NSE و KGE در بخش واسنجی و اعتبارسنجی خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR با مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM در برآورد متغیرهای بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه ایستگاه همدیدی ناین به ترتیب ۰/۹۷، ۰/۴۲، ۰/۹۶ و ۰/۸۷ بوده که حاکی از کارایی و دقت نسبتاً بالای مدل در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی می‌باشد. نتایج تحقیق نشان داد خروجی مدل MPI-ESM1-2-HR و مدل آماری SDSM به ترتیب از کارایی بالا و متوسط جهت ریزمقیاس‌سازی پارامتر بیشینه و کمینه دما و متغیر بارش در ایستگاه سینوپتیک ناین برخوردار بوده و انطباق زیاد و متوسط بین مقادیر سناریوسازی و مشاهداتی پارامتر بیشینه و کمینه دما و متغیر بارش تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره‌های زمانی ۲۰۱۵-۲۰۴۲، ۲۰۷۰-۲۰۴۳ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ برخوردار است. همچنین نتایج نشان داد به طور کلی در مدل MPI-ESM1-2-HR مقادیر میانگین بارش ماهیانه به ترتیب در دوره‌های زمانی ۲۰۱۵-۲۰۴۲، ۲۰۷۰-۲۰۴۳ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ به میزان ۰/۲۱، ۰/۲۲ و ۰/۲۴ میلی‌متر کاهش و مقادیر میانگین دمای بیشینه به ترتیب ۱/۴۹، ۱/۵ و ۱/۵۲ درجه سانتی‌گراد و مقادیر میانگین دمای کمینه به ترتیب ۰/۵۱، ۰/۵۳ و ۰/۵۴ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد یافت.

نتیجه‌گیری: از آنجایی که شرایط کنونی جهان حاکی از گسترش تغییرات اقلیمی در همه کشورها و در همه قاره‌ها بوده و دستاوردهای توسعه پایدار را به خطر می‌اندازد، جامعه بین‌المللی نیازمند حرکت به سمت فناوری‌های سازگار با محیط زیست، استفاده از انرژی‌های پاک و غیرفسیلی و اجرای ضوابط بین‌المللی مبنی بر رعایت اصول زیست‌محیطی در راستای توسعه پایدار از جمله کاهش گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. لذا معقول به نظر می‌رسد که از میان سناریوهای مورد ارزیابی در این پژوهش، سناریوی متوسط SSP2-4.5 به عنوان ملاک تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی در جهت پیشنهاد راهکار جهت مقابله و سازگاری با تغییرات اقلیمی در دستور کار سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان کشور قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی، گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6)، مدل SDSM، مدل MPI-ESM1-2-HR و حوزه آبخیز تودشک

استناد: شجاعی، غ.، قربانی، م.، ملکیان، الف.، علم‌بیگی، الف. و رستمی، م. (۱۴۰۴). چشم‌انداز اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای بارش و دمای حوزه آبخیز تودشک. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۵(۲)، ۷۳-۵۱.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل دسترس است.

مقدمه

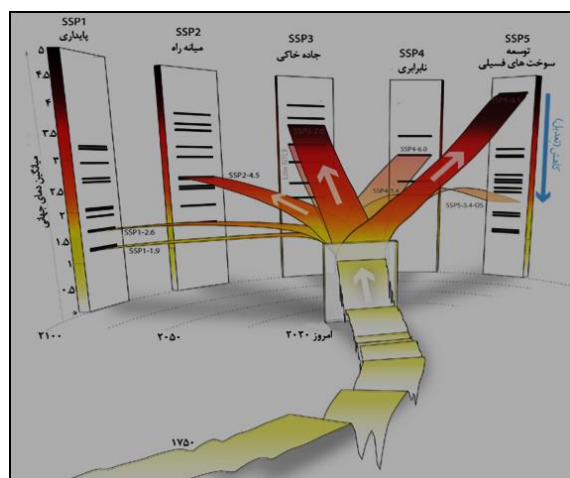
مانند ایران شده است. تبعات منفی این پدیده برای بشر تا آنجا می‌تواند مخرب باشد که در بین ده عامل تهدید آمیز برای بشر در قرن بیست و یکم، پدیده تغییر اقلیم مقام اول را به خود اختصاص داده است (IPCC, 2021). تغییرات اقلیمی، گرمایش جهانی^۵ و وضعیت اضطراری اقلیم^۶ اصطلاحاتی مترادف با بزرگترین چالش پایداری قرن بیست و یکم بوده است (IPCC, 2021) که پیامدهای آن به شدت مانع دستیابی به اهداف توسعه پایدار در همه‌جا و به‌ویژه در کشورهای با درآمد کم و متوسط است (IPCC, 2021). بنابراین در صورتی که فعالیت‌های مناسبی در جهت کاهش اثرات تغییر اقلیم و سازگاری با آن صورت نگیرد این پدیده می‌تواند بخش عمده‌ای از جهان را تحت تأثیر قرار دهد. مشخص است که در صورت اعمال مدیریت نادرست و بهره‌بردن از راهکارهای نامناسب، علاوه بر هدررفت منابع موجود، تشدید اثرات مخرب خشکسالی را موجب می‌شود. با توجه به وابستگی اثرات تغییر اقلیم به نتایج مدل‌های اقلیمی، دستیابی به تصویرسازی معتبر در دوره آتی با استفاده از مدل‌های اقلیمی ارائه شده امکان‌پذیر می‌شود. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های گردش عمومی جو زمین به خوبی توانایی پیش‌بینی تغییرات اقلیمی مانند دما و بارش را در مقیاس جهانی در طول زمان و فضا دارند (Koukidis & Berg, 2009). تاکنون نسخه‌های گوناگونی از مدل‌های تغییر اقلیم ارائه شده است؛ از آن جمله می‌توان مدل اولین گزارش ارزیابی هیأت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) با نام FAR، مدل دومین گزارش با نام SAR، مدل سومین گزارش با نام TAR، مدل چهارمین گزارش با نام AR4 (CMIP4)، مدل پنجمین گزارش با نام AR5 (CMIP5) و مدل ششمین گزارش با نام AR6 (CMIP6) اشاره کرد (Mirakbari et al., 2018). محدودیت‌ها و نقص‌های مدل‌های گزارش

در عصر حاضر نوسان و پویایی اقلیمی تاثیر فراوانی بر محیط‌زیست و توسعه اجتماعی دارد (Tubiello & Schmidhuber, 2007; Mishra et al., 2010) و بسیاری از چالش‌های جهانی مانند ناامنی غذایی، بحران آب، کاهش تنوع زیستی^۱ و مسائل سلامت، به تغییرات آب و هوایی وابسته است (Pachauri et al., 2014; Tang et al., 2015; Woznicki et al., 2016). هرچند نقش انسان‌ها در وقوع بسیاری از حوادث طبیعی غیرمترقبه با عدم قطعیت‌های فراوانی مواجه است، اما آنچه مسلم است بشر در تشدید برخی بلایای طبیعی مانند پیامدهای ناشی از طوفان‌های گرد و غبار، بروز خشکسالی‌های ناشی از انتشار بی‌رویه گازهای گلخانه‌ای^۲ و غیره به صورت مستقیم یا غیرمستقیم نقش دارد که این رخدادهای طبیعی سالانه هزینه‌های جانی و مالی هنگفتی را بر اقتصاد کشورها، به‌ویژه کشورهای در حال توسعه و کمتر توسعه‌یافته تحمیل می‌کند (Marzi et al., 2019; Nurzaman et al., 2020). افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو در اثر گسترش صنعت و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری اراضی در چند دهه گذشته موجب به هم خوردن ایستایی روند متغیرهای اقلیمی به خصوص دمای کره زمین شده که از آن به عنوان تغییر اقلیم^۳ تعبیر می‌شود (IPCC, 2021).^۴ افزایش دمای کره زمین به‌طور مستقیم باعث تغییر در فراوانی رخدادهایی نظیر خشکسالی، سیل و طوفان خواهد شد (Su-Yaun et al., 2020). تغییرات در متغیرهای اقلیمی دما و بارش، باعث تغییر در سیستم یکپارچه منابع آب شده و با ایجاد تحولاتی در شرایط منابع آب منجر به تغییرات در توزیع زمانی و مکانی منابع آب در مناطق مختلف، از جمله مناطق با اقلیم خشک و نیمه خشک

4- Intergovernmental Panel on Climate Change
5- Global Warming
6- Climate Emergency

1- Biodiversity
2- Greenhouse gaz
3- Climate chenge

بنابراین به‌منظور استفاده از داده‌های GCM از انواع مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری مانند LARS-WG و SDSM (Rakhimova *et al.*, 2020) در پیش‌بینی عناصر و متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی استفاده می‌شود. تحقیقات متعددی در ارتباط با اثر پدیده تغییر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی در نقاط مختلف جهان و ایران صورت گرفته که بیانگر اهمیت و ضرورت مطالعه این پدیده را نشان می‌دهد.



شکل ۱- سناریوی مسیره‌های مشترک اقتصادی - اجتماعی و مسیره‌های معرف غلظت در هر سناریو (Bjornaes, 2013)

Figure 1- Scenarios of common economic-social paths and representative paths of concentration in each scenario (Bjornaes, 2013)

در همین راستا Singh و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیقی تغییرات بارش را تحت سناریوهای SSP2، SSP5-8.5 و SSP1-2.6 و 4.5 در هند گزارش نمودند. براساس نتایج به‌دست آمده الگوی کاهش بارندگی سالانه در مقایسه با سناریوی کنونی (۲۰۰۵-۱۹۶۱) برای دوره (۲۰۴۰-۲۰۰۶) را به میزان ۱۸-۹ درصد، برای دوره (۲۰۷۰-۲۰۴۱) به میزان ۱۶-۱۲ درصد و افزایش روند برای دوره (۲۰۹۹-۲۰۷۱) را نشان می‌دهد. Pimonser و

پنجم (CMIP5) از جمله درک ضعیف واداشت تابشی در مدل‌های اقلیمی همراه با خطاهای سیستماتیک، مشکل تعیین منافع و هزینه‌های هر یک از عملیات‌های کاهش به طور جداگانه و عدم تمرکز روی علوم خاص در مدل‌سازی (Stouffer *et al.*, 2017) منجر به شکل‌گیری سری مدل‌های جفت شده درون مقایسه‌های CMIP6^۷ در گزارش ششم شد (O'Neil *et al.*, 2016). در شکل ۱ سناریوهای گزارش ششم به صورت ترکیبی از خط سیرهای اقتصادی-اجتماعی^۸ (SSP) شامل توسعه پایدار^۹ SSP1 و توسعه بر اساس سیاست‌های میانی^{۱۰} SSP2 و رقابت منطقه‌ای^{۱۱} SSP3 و نابرابری^{۱۲} SSP4 و توسعه سوخت‌های فسیلی^{۱۳} SSP5 و خط سیرهای غلظت گازهای گلخانه‌ای (سطوح واداشت مختلف) نمایش داده شده؛ به‌طوریکه امکان تحلیل بازخورد میان تغییرات اقلیمی و عوامل اجتماعی- اقتصادی نظیر رشد جهانی جمعیت، توسعه اقتصادی و پیشرفت‌های فناوری را فراهم می‌آورند (Ansari Mahabadi *et al.*, 2022). روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم وجود دارد که معتبرترین آنها استفاده از داده‌های مدل گردش عمومی جو^{۱۴} (GCM) می‌باشد. مدل‌های گردش عمومی جو، یکی از معتبرترین روش‌ها جهت تولید سناریوهای اقلیمی بوده و برای ارزیابی تغییرات اقلیمی طراحی شده‌اند (Bessah *et al.*, 2020). با توجه به شرایط فیزیکی جو و زمین و تمامی فرآیندهای مابین آنها، کاربرد مدل‌های GCM به طور مداوم در مطالعات اقلیمی در حال افزایش است؛ اما به جهت اینکه مدل‌های GCM به لحاظ تفکیک مکانی و زمانی از گام‌های بزرگ استفاده می‌کنند داده‌های خروجی از آنها به صورت مستقیم قابلیت استفاده را ندارند؛

11- SSP3: Regional rivalry, A rocky road
12- SSP4: Inequality, A road divided
13- SSP5: Fossil-fueled development, Taking the
14- General Circulation Model

7- Coupled Model Inter Comparison Phase 6
8- Shared Socioeconomic Pathways
9- SSP1: Sustainability, Taking the green road
10- SSP2: Middle of the road

ایران) پرداختند. نتایج نشان از افزایش دما از ۱/۶۴ تا ۸/۹ درصد نسبت به دوره پایه تحت هر چهار سناریو در تمام ایستگاه‌ها است. این در حالی است که بارش در بعضی از ایستگاه‌ها و تحت برخی سناریوهای SSP کاهش و در برخی دیگر افزایشی است. افزایش در ایستگاه بوشهر تا ۱۴۰ درصد و کاهش تا بیشتر از ۱۰ درصد در ایستگاه کیش مورد انتظار است.

با توجه به توسعه مدل‌های جدید GCM و ارائه سناریوهای جدید گزارش ششم AR6 که بر پایه مسیرهای معرف غلظت و سناریوهای مسیرهای مشترک اقتصادی-اجتماعی می‌باشد و از سویی به جهت عدم قطعیت سناریوهای گزارش پنجم AR5 در آینده‌نگاری تغییرات اقلیمی و با توجه به ویژگی‌های اقلیمی و جغرافیایی منطقه شرق استان اصفهان و مستعد بودن آن جهت رخداد فرین‌های دمایی و بارش به ویژه تداوم دوره‌های گرم و بارش رگبارهای سیل‌آسا، در این پژوهش سعی شده است که بررسی نسبتاً کاملی از این فرین‌های دمایی و بارش در دوره پایه و دوره‌های آینده به عمل آید و با توجه به ناهنجاری‌ها و تهدیدهای حاصل از شدت رخداد فرین‌های اقلیمی، به‌ویژه در حوزه آبخیز تودشک اصفهان، هدف از این پژوهش، ارزیابی پیش‌نگری تغییرات نمایه‌های فرین دما و بارش با استفاده از خروجی‌های مدل CMIP6 تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک در منطقه مورد مطالعه به‌منظور افزایش تاب‌آوری ساکنان حوزه آبخیز در برابر مخاطرات طبیعی به‌عنوان نوآوری پژوهش قلمداد نمود.

مواد و روش‌ها

در شکل ۲ موقعیت موقعیت منطقه مورد مطالعه نمایش داده شده است. حوزه آبخیز تودشک با مساحت ۱۵۵۲۸/۰۳ هکتار در فاصله ۱۰۰ کیلومتری شرق شهر اصفهان، در گستره طول جغرافیایی "۳۵' ۴۰" ۵۲° تا "۴۷' ۴۹" ۵۲° شرقی و عرض جغرافیایی "۳۷' ۴۱" ۳۲° تا "۲۱' ۴۹" ۳۲° شمالی واقع شده است. متوسط

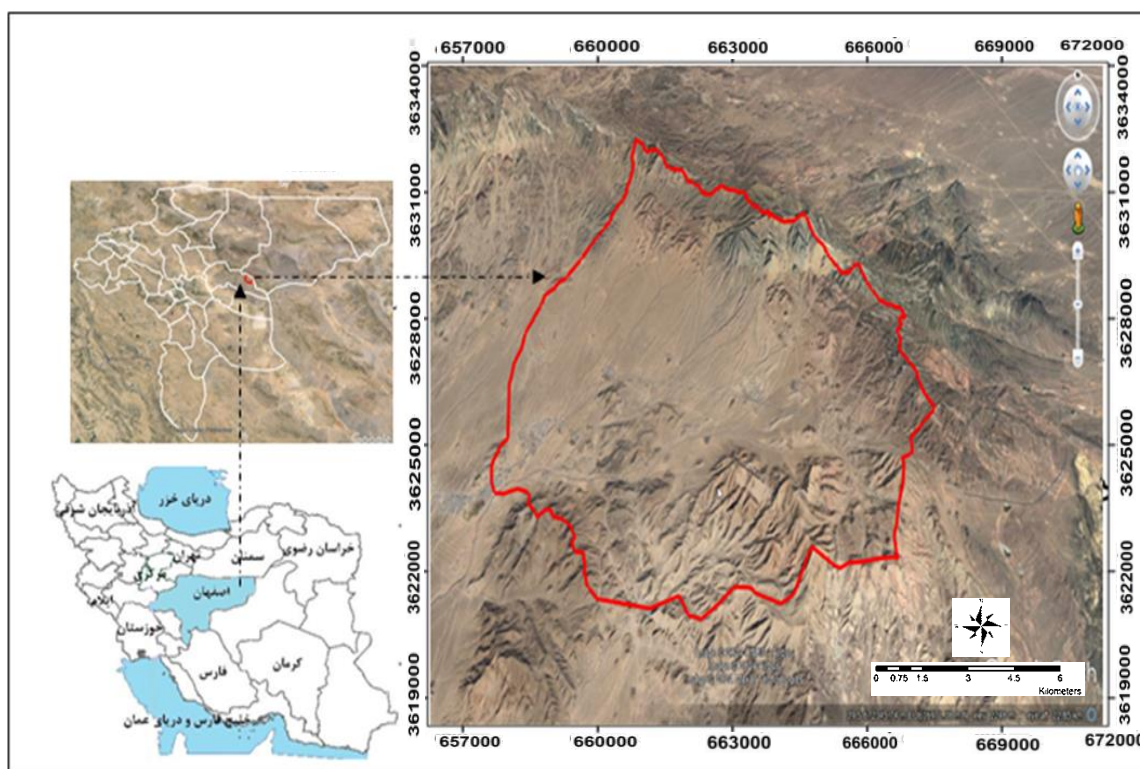
همکاران (۲۰۲۳) در یک مطالعه تحت عنوان ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6، تغییرات بارش در جنوب شرق آسیا را بررسی نمودند. براساس نتایج ایشان مدل TaiESM بهترین عملکرد را برای شبیه‌سازی بارش در بین ۲۷ مدل مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه داشت. Cheng و همکاران (۲۰۲۱) مدل‌های گزارش پنجم و ششم را در شبیه‌سازی فرین‌های آب و هوایی باهم مقایسه کردند و نتایج نشان داد مدل‌های گزارش ششم توانایی بالاتری نسبت به مدل‌های گزارش پنجم برای شبیه‌سازی فرین‌های اقلیمی دارد.

در کشور ایران Roshani و Hamidi (۲۰۲۱) در تحقیق خود به شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش ایستگاه ساری با استفاده از مدل‌های NESM3 و HadGEM3-ACCESS-CM2 از مدل‌های اقلیمی سری ششم پرداختند. آنها با انتخاب مدل ACCESS-CM2 به‌عنوان بهترین مدل، پیش‌بینی داده‌ها را تحت ۲ سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در آینده انجام دادند. بنابر نتایج ایشان در این ایستگاه، دما از ۱/۱۶ تا ۴/۰۹ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت و میانگین مقدار بارش سالانه نیز در حدود ۲۴ تا ۳۶ درصد فزونی می‌یابد. Zarian (۲۰۲۲) نیز در مطالعه‌ای تحت عنوان اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش استان یزد براساس خروجی ترکیبی مدل‌های CMIP6 نتیجه گرفتند؛ مدل‌های BCC-CSM2-MR و CanESM5 به‌ترتیب بیشترین توانایی را در شبیه‌سازی دما و بارش در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه (یزد، بافق، رباط، پشت بادام و مروست) داشت. همچنین در تمامی سناریوهای انتشار SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5 دمای سالانه در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) بین ۰/۲ تا ۰/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش و بارندگی سالانه بین ۱۳/۷ تا ۱۳ درصد کاهش پیدا خواهد کرد.

Parakandeh و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهش خود به ارزیابی تغییرات دما و بارش آینده توسط ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های گردش عمومی جو (مطالعه موردی ایستگاه‌های منتخب سینوپتیک سواحل جنوبی

در این پژوهش به منظور مقایسه عملکرد مدل MPI-ESM1-2-HR در ریزمقیاس‌سازی پارامترهای بیشینه و کمینه دما و بارش روزانه از اطلاعات ایستگاه سینوپتیک ناین که در جدول ۱ مشخصات آن آورده شده است، به جهت تطابق شرایط این ایستگاه با مشخصات آب و هوایی غالب در این حوزه آبخیز و دسترسی به داده‌های اقلیمی با کیفیت و پیوسته به منظور تحلیل تغییرات فرین‌های دما و بارش به‌عنوان شاخص اصلی آسیب‌پذیری اقلیمی در بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۴ به‌عنوان دوره پایه استفاده شد.

بارندگی منطقه ۱۶۵ میلی‌متر و متوسط حجم حاصل از بارش‌های سالانه در سطح حوضه حدود ۲۳/۶ میلیون مترمکعب می‌باشد. حوضه تودشک یکی از زیرحوضه‌های مهم رودخانه زاینده‌رود استان اصفهان و در تقسیمات آبی کشور جزئی از حوضه گاوخونی با نام کوهپایه-سگزی و کد شناسایی ۴۲۰۱ می‌باشد. موقعیت مراکز جمعیتی با وجود ۱۹ روستا و ۱ شهر با توزیع جمعیتی بالغ بر ۴۵۰۰ نفر، وضعیت آبراهه‌ها، سیل‌خیزی و رسوبدهی نواحی مختلف آن و نحوه کنترل جریان‌های سطحی و تداوم دوره‌های خشکسالی به‌عنوان یک حوضه مهم در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفت.

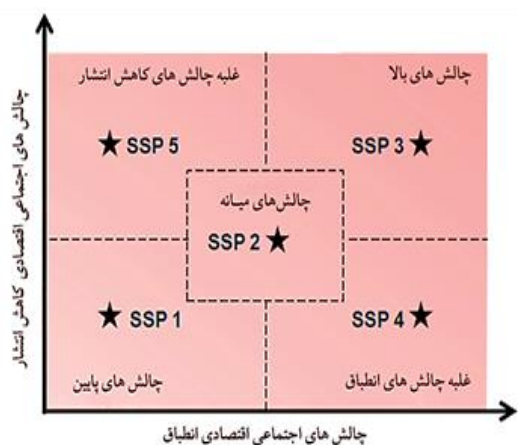


شکل ۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه (حوزه آبخیز تودشک)
Figure 2- Location of the study area (Todshk Watershed)

جدول ۱- مشخصات ایستگاه هواشناسی سینوپتیک ناین
Table 1- Characteristics of the Naeen synoptic station

ردیف	نام ایستگاه هواشناسی	نوع ایستگاه هواشناسی	مختصات جغرافیایی ایستگاه هواشناسی		ارتفاع (متر از سطح دریا)	وابسته به سازمان
			طول جغرافیایی (درجه-دقیقه)	عرض جغرافیایی (درجه-دقیقه)		
1	ناین	سینوپتیک	53° 05'	32° 51'	1549	هواشناسی

تأکید دارد (O'Neil *et al.*, 2020). سناریوهای اصلی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب شرایط خوش‌بینانه تا بدبینانه برای واداشت تابشی در اتمسفر را پیش‌بینی می‌کنند؛ سناریوی SSP1-2.6 پایین‌ترین میزان واداشت تابشی و سناریوی SSP2-4.5 دنیایی با توسعه اقتصادی-اجتماعی در شرایط معمول را با آسیب‌پذیری و سطح واداشت تابشی متوسط و سناریوی SSP5.8.5 نیز حد بالای واداشت تابشی را ارائه می‌دهد که در آن پیشرفت با استفاده از سوخت فسیلی و الگوی مصرف بالای انرژی همراه است (Ansari *et al.*, 2021).



شکل ۳- چالش‌های اقتصادی اجتماعی انطباق و انتشار

Figure 3- Social economic challenge of adaptation and mitigation

معیارهای ارزیابی نیکویی برآزش

مدل MPI-ESM1-2-HR یکی از مدل‌های پیش‌بینی جوی مطرح در جهان می‌باشد که توسط موسسه Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) کشور آلمان توسعه داده شده است. از بین ۲۶ سال (۲۰۱۴-۱۹۸۹) آمار داده‌های بارش، دمای روزانه بیشینه و کمینه ایستگاه سینوپتیک نایین، ۱۸ سال اول آن برای واسنجی (کالیبراسیون) مدل و ۸ سال باقی‌مانده برای صحت‌سنجی مدل استفاده گردید. برای صحت‌سنجی مدل، با استفاده از قابلیت تولیدکننده‌های اقلیمی

مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM¹⁵

مدل SDSM یک مدل ریزمقیاس‌کننده آماری است که قابلیت توسعه سریع و کم هزینه داده‌های ریزمقیاس‌شده در مقیاس ایستگاهی به صورت روزانه، ماهانه، فصلی و یا سالانه را دارا می‌باشد و امروزه به‌عنوان پرکاربردترین مدل ریزمقیاس‌نمایی و بهترین مولد داده شرطی در جهان شناخته شده است (Godarzi *et al.*, 2016).

این مدل به منظور تولید داده‌های اقلیمی آینده از یک رابطه رگرسیونی با بالاترین درجه همبستگی بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده استفاده می‌کند که می‌بایست با روش سعی و خطا بالاترین همبستگی بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و متغیرهای پیش‌بینی‌شونده را بدست آورد. اولین نسخه این مدل در سال ۲۰۰۱ با عنوان SDSM 2.2 ارائه شد. از آن زمان تاکنون این مدل چندین بار تحت بازنگری قرار گرفته است. در این مدل روابط بین پیش‌بینی‌کننده‌ها (خروجی مدل‌های گردش عمومی) و پیش‌بینی‌شونده‌ها (داده‌های تاریخی ایستگاه‌های هواشناسی) بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته و روابط تجربی بین آنها تعیین و به کاربر اعلام می‌گردد (Wilby *et al.*, 2007). طبق پژوهش‌های انجام شده، SDSM به‌عنوان بهترین ترکیب حاصل از مولد تصادفی آب و هوا و روش‌های رگرسیون چندگانه خطی شناخته شده است (Khan *et al.*, 2006).

سناریوی انتشار SSP

خروجی مدل‌های AR6 تحت سناریوهای جدید خطوط سیر مشترک اقتصادی-اجتماعی^{۱۶} (SSPS) و غلظت‌های مختلف گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. در شکل ۳ سناریوهای گزارش ششم به ۵ زیر گروه اصلی تقسیم شده و به مواردی مانند جمعیت، شهرنشینی، توسعه اقتصادی منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای و سناریوهای تعمیم‌یافته (اثرات، سازگاری و کاهش آسیب‌پذیری)

به مقادیر اندازه‌گیری بوده و از رابطه (۱) به دست می‌آید (Lee et al., 2006).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_o - \bar{X}_o) (X_s - \bar{X}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_o - \bar{X}_o)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_s - \bar{X}_s)^2}} \quad (2)$$

ضریب همبستگی (R) ارتباط خطی بین دو متغیر را اندازه‌گیری و یک ابزار ریاضی برای پایه‌ریزی تحلیل‌های اقلیمی بسیار کاربرد دارد و از رابطه (۲) به دست می‌آید (Sedaghatkar, 2012).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T ((Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2)}{\sum_{t=1}^T ((Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2)} \quad (3)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}\right)^2 \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}}\right)^2 - 1} \quad (4)$$

بهترین مقدار برای معیار نش‌ساتکلیف (NSE) و کلینگ‌گوپتا (KGE) عدد ۱ است که نشان‌دهنده تطابق کامل سری‌ها است و از روابط (۳) و (۴) به دست می‌آید (Kult et al., 2014).

نتایج

در جدول ۲ متغیرهای مستقل غالب انتخاب‌شده جهت پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در فرایند مدل‌سازی و سناریوسازی نشان داده شده است. نتایج شاخص‌های برآزش نکویی نیز با استفاده از داده‌های ECMWF در جدول ۳ ارائه شده است.

ECMWF و خروجی مدل گردش عمومی در دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۹ سری زمانی تولید شده با سری زمانی مشاهداتی، پارامترهای اقلیمی در دوره‌های مورد نظر مقایسه شد. برای انتخاب متغیرهای مستقل غالب از آزمون رگرسیون خطی در نرم‌افزار SPSS و تحلیل آماری در مدل SDSM جهت پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی استفاده گردید. عملکرد مدل در پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی بر اساس شاخص‌های نیکویی برآزش شامل R، RMSE، NSE، KGE و دیاگرام تیلور ارزیابی شده است.

در روابط ۱، ۲، ۳ و ۴، X_o به ترتیب مقادیر بارندگی، دمای بیشینه و کمینه ماهانه مشاهداتی و X_s به ترتیب مقادیر بارندگی، دمای بیشینه و کمینه شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های گردش عمومی، X_o و X_s نیز به ترتیب میانگین ریاضی مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده، N تعداد داده‌ها، σ انحراف معیار، T دوره زمانی، μ میانگین و r همبستگی خطی بین داده‌های مشاهده‌ای و مدل‌سازی شده است.

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

مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) به‌عنوان قیاسی برای بیان اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت

جدول ۲- متغیرهای مستقل غالب انتخاب شده جهت مدل‌سازی و سناریوسازی

Table 2- Dominant independent variables selected for modeling and scenario creation

VIF	Tolerance	R	تعریف متغیر پیش‌بینی کننده	علامت متغیر پیش‌بینی کننده	مولفه هواشناسی	ردیف
1.136	0.881	0.951	دما در ارتفاع ۲ متری	temp-day	دمای بیشینه	1
1.136	0.881	0.951	ارتفاع ژئوپتانسیل در ۸۵۰ هکتوپاسکال	p850-day	روزانه	
1.148	0.881	0.951	رطوبت نسبی در ۸۵۰ هکتوپاسکال	s850-day		2
1.136	0.881	0.945	دما در ارتفاع ۲ متری	temp-day	دمای کمینه	
1.136	0.881	0.945	رطوبت نسبی در ۸۵۰ هکتوپاسکال	s850-day	روزانه	3
1.018	0.982	0.421	رطوبت ویژه سطحی	shum-day	بارش	
1.018	0.982	0.421	رطوبت سطحی در نزدیکی سطح	prcp-day	روزانه	

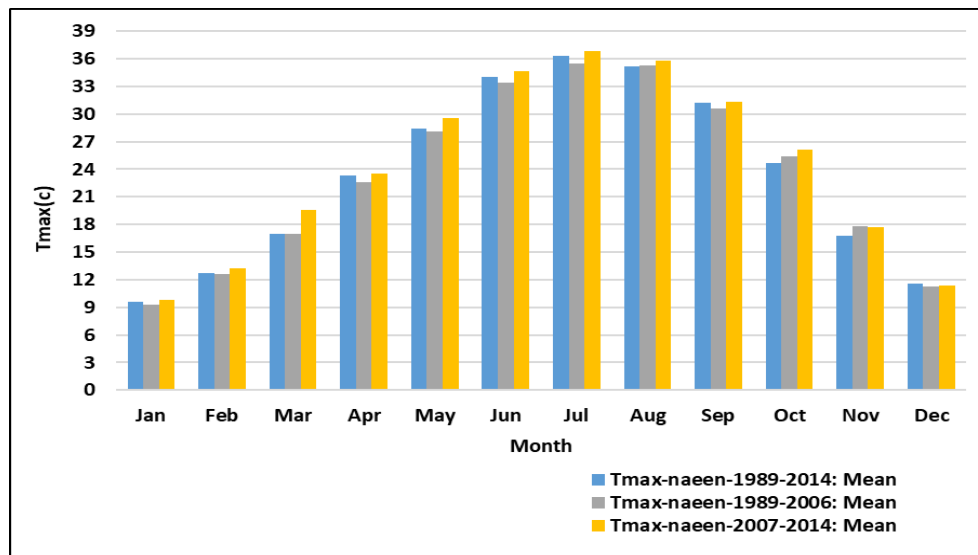
جدول ۳- ارزیابی مدل SDSM در مرحله واسنجی و صحت سنجی مولفه‌های هواشناسی

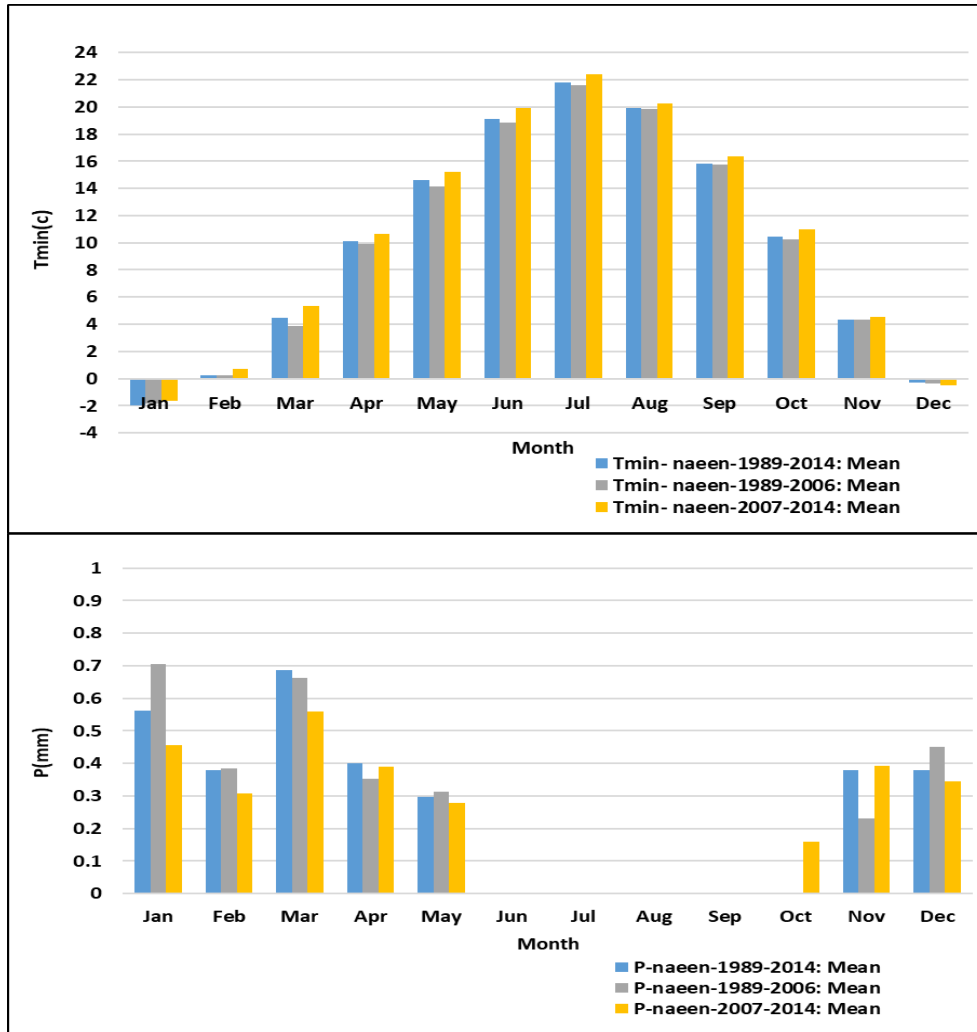
Table 3- Evaluation of the SDSM model in the calibration and validation stage of the meteorological components

صحت سنجی (اعتبارسنجی) مدل				واسنجی (کالیبراسیون) مدل				مولفه هواشناسی	نام مدل
KGE	NSE	RMSE	R	KGE	NSE	RMSE	R		
0.936	0.988	1.013	0.990	0.964	0.996	0.568	0.999	دمای بیشینه	MPI-ESM1-2-HR
0.897	0.995	0.545	0.995	0.963	0.999	0.257	0.999	دمای کمینه	
0.638	0.910	0.071	0.940	0.869	0.926	0.065	0.940	بارش	

دارد. اما بارندگی یک کمیت گسسته بوده و مقدار آن در یک حوضه تحت تاثیر عوامل مختلفی می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که انطباق زیادی بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی وجود داشته لذا ریزمقیاس‌سازی داده‌های دما و بارش در مدل MPI-ESM1-2-HR از توانایی قابل قبولی برخوردار است و می‌توان برای تولید داده‌های اقلیمی طی دوره‌های آتی استفاده نمود. در شکل ۵ مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر واسنجی و صحت‌سنجی پیش‌بینی‌شده و مشاهداتی متغیرهای اقلیمی دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش با استفاده از قابلیت ترسیمی دیاگرام تیلور نمایش داده شده است.

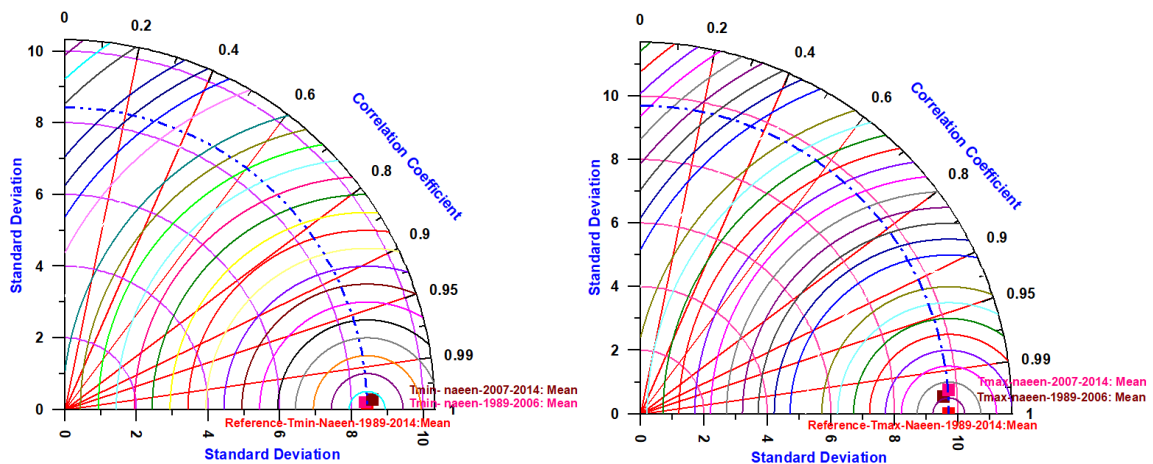
در شکل ۴ نمودار مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر واسنجی و صحت‌سنجی و مشاهداتی متغیرهای دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش نشان داده شده است. نتایج حاصل از ارزیابی مدل SDSM با استفاده از خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR در برآورد بارش، دمای بیشینه و کمینه ایستگاه همدیدی نایین نشان داد که مدل مذکور از کارایی و دقت خوبی برخوردار می‌باشد. همچنین نتایج مدل‌سازی نشان داد، داده‌های پیش‌بینی‌شده متغیر دما نسبت به متغیر بارش، همبستگی بالاتری را با داده‌های مشاهداتی داشتند. این موضوع بدان علت است که دما یک متغیر پیوسته بوده و نسبت به بارندگی تغییرپذیری کمتری

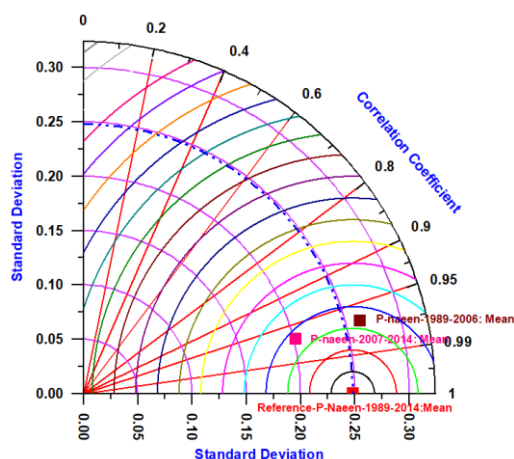




شکل ۴- نمودار مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر واسنجی و صحت‌سنجی پیش‌بینی‌شده و مشاهداتی دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش

Figure 4- Comparison diagram of monthly average values of calibration and validation predicted and observations of maximum temperature, minimum temperature and precipitation





شکل ۵- دیاگرام تیلور مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر واسنجی و صحت‌سنجی پیش‌بینی‌شده و مشاهداتی دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش

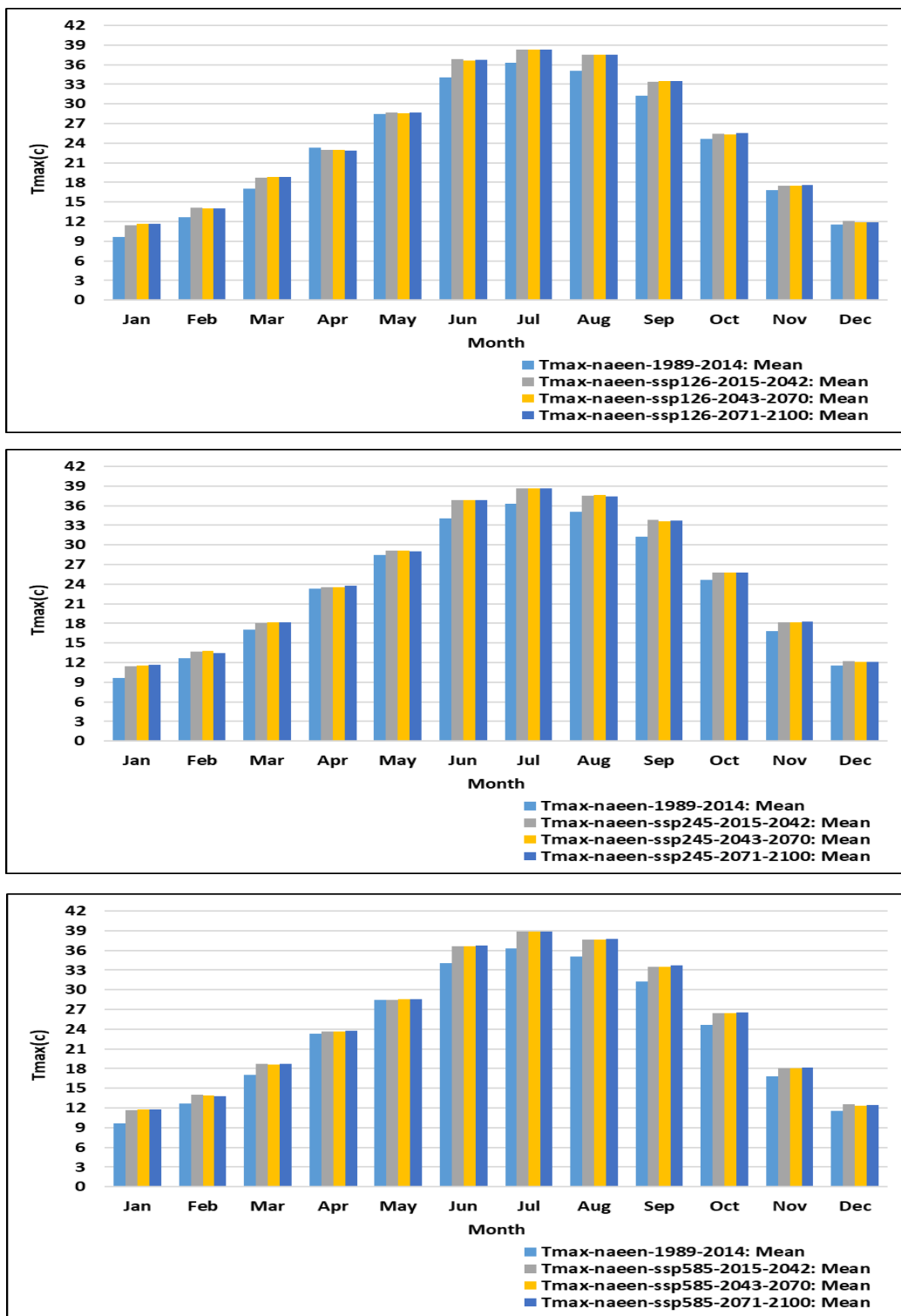
Figure 5- Taylor diagram of monthly average values of calibration and validation predicted and observations of maximum temperature, minimum temperature and precipitation

پیش‌بینی‌شده، نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ تحت سناریو SSP5-8.5 بوده، به طوری که بیشترین افزایش دما مربوط به ماه ژوئن بوده و به ترتیب ۱/۱۶، ۲/۵۶، ۲/۶۱ و ۲/۷۷ درجه سانتی‌گراد و از بین فصول سال، فصل بهار (آوریل، می و ژوئن) دارای بیشترین افزایش دمای بیشینه، بوده است. برای ارزیابی سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تولید شده در دوره‌های زمانی ۲۰۱۵-۲۰۴۲، ۲۰۱۵-۲۰۴۲ و ۲۰۴۳-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ از شاخص‌های نیکویی برآزش R، RMSE، NSE و KGE در جدول ۴ استفاده شد. نتایج بیانگر آن بوده که مدل SDSM با استفاده از خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR از کارایی بالایی جهت ریزمقیاس‌نمایی پارامتر دمای بیشینه در ایستگاه سینوپتیک نایین برخوردار بوده و انطباق زیادی بین مقادیر سناریوسازی و مشاهداتی، تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره‌های زمانی ۲۰۱۵-۲۰۴۲، ۲۰۱۵-۲۰۴۲ و ۲۰۴۳-۲۰۷۰ وجود دارد. همچنین نتایج سناریوسازی مدل SDSM با استفاده از خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR نشان داد به‌طورکلی مقادیر میانگین دمای بیشینه به ترتیب ۱/۴۹، ۱/۵ و ۱/۵۲ درجه

پیش‌بینی درجه‌حرارت بیشینه در دوره‌های آتی در شکل ۶ روند تغییرات میانگین ماهیانه درجه حرارت بیشینه در دوره‌های زمانی ۲۰۱۵-۲۰۴۲، ۲۰۱۵-۲۰۴۲ و ۲۰۴۳-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان داده شده است. نتایج حاکی از افزایش میانگین ماهیانه دمای بیشینه در تمام دوره‌های زمانی پیش‌بینی‌شده، نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ تحت سناریو SSP1-2.6 بوده، به طوری که بیشترین افزایش مربوط به ماه ژوئن و به ترتیب ۱/۰۲، ۲/۷۸، ۲/۶۶ و ۲/۷۵ درجه سانتی‌گراد و از بین فصول سال، تابستان (جولای، آگوست و سپتامبر) دارای بیشترین افزایش دمای بیشینه، بوده است. همچنین نتایج حاکی از افزایش میانگین ماهیانه دمای بیشینه در تمام دوره‌های زمانی پیش‌بینی‌شده، نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ تحت سناریو SSP2-4.5 بوده، به گونه‌ای که بیشترین افزایش مربوط به ماه ژوئن و به ترتیب ۱/۴۲، ۲/۸۲، ۲/۸۴ و ۲/۸۹ درجه سانتی‌گراد و از بین فصول سال، بهار (آوریل، می و ژوئن) دارای بیشترین افزایش دمای بیشینه، بوده است. همچنین نتایج حاکی از افزایش میانگین ماهیانه دمای بیشینه در تمام دوره‌های زمانی

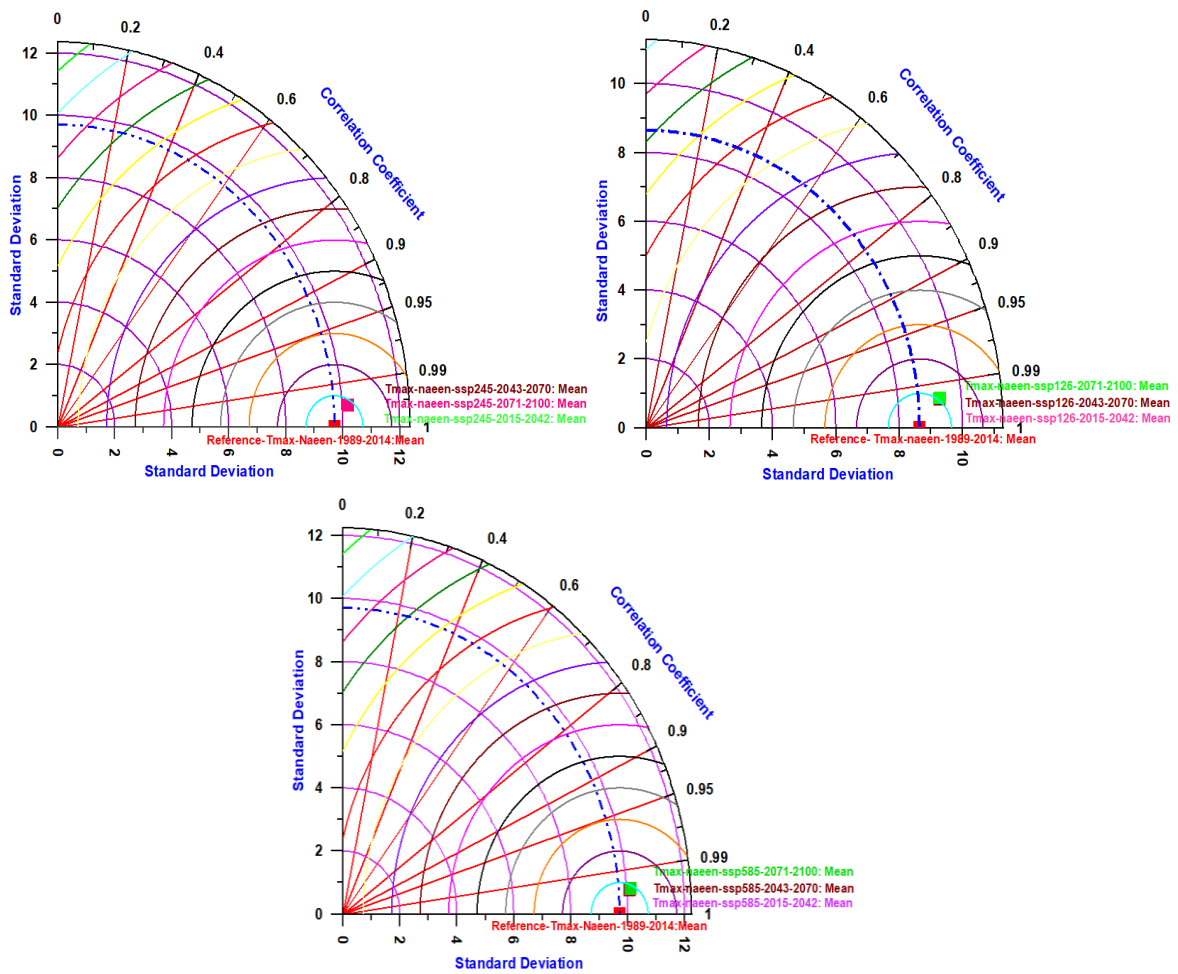
شبیه‌سازی و مشاهداتی دمای بیشینه با استفاده از قابلیت ترسیم دیاگرام تیلور نمایش داده شده است.

سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد یافت. در شکل ۷ مقایسه میانگین ماهانه مقادیر



شکل ۶- نمودار مقایسه میانگین میانه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی دمای بیشینه تحت سناریو SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Figure 6- Comparison diagram of monthly average of simulated and observed values of the maximum temperature under the scenario SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5



شکل ۷- دیاگرام تیلور مقایسه میانگین ماهانه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی دمای بیشینه تحت سناریو SSP2- و SSP1-2.6 و SSP5-8.5 و 4.5

Figure 7- Taylor diagram of the monthly average of simulated and observed values of the maximum temperature under the scenario SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5

جدول ۴- ارزیابی مدل SDSM تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با مولفه هواشناسی دمای بیشینه

Table 4 - Evaluation of SDSM model under SSP1-2.6 & SSP2-4.5 & SSP5-8.5 scenario with meteorological component of maximum temperature

KGE	NSE	RMSE	R	دوره زمانی	سناریو	مولفه هواشناسی	نام مدل
0.852	0.969	1.643	0.99	2015-2042	SSP1-2.6	دمای بیشینه	MPI-ESM1-2-HR
0.854	0.969	1.632	0.99	2043-2070			
0.851	0.967	1.678	0.99	2071-2100			
0.828	0.966	1.722	0.99	2015-2042	SSP2-4.5	دمای بیشینه	MPI-ESM1-2-HR
0.830	0.966	1.723	0.99	2043-2070			
0.830	0.966	1.726	0.99	2071-2100			
0.836	0.962	1.806	0.99	2015-2042	SSP5-8.5	دمای بیشینه	MPI-ESM1-2-HR
0.834	0.962	1.805	0.99	2043-2070			
0.826	0.959	1.879	0.99	2071-2100			

پیش‌بینی درجه حرارت کمینه در دوره‌های آتی

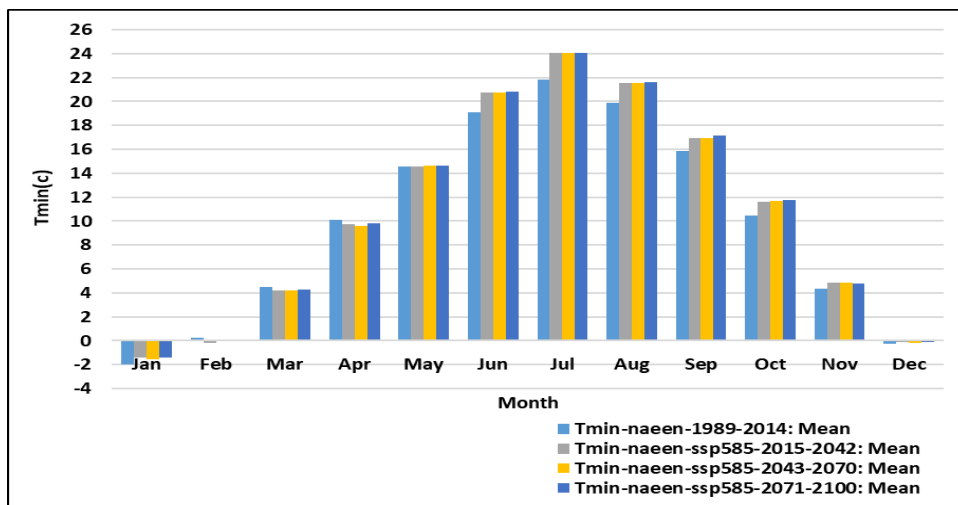
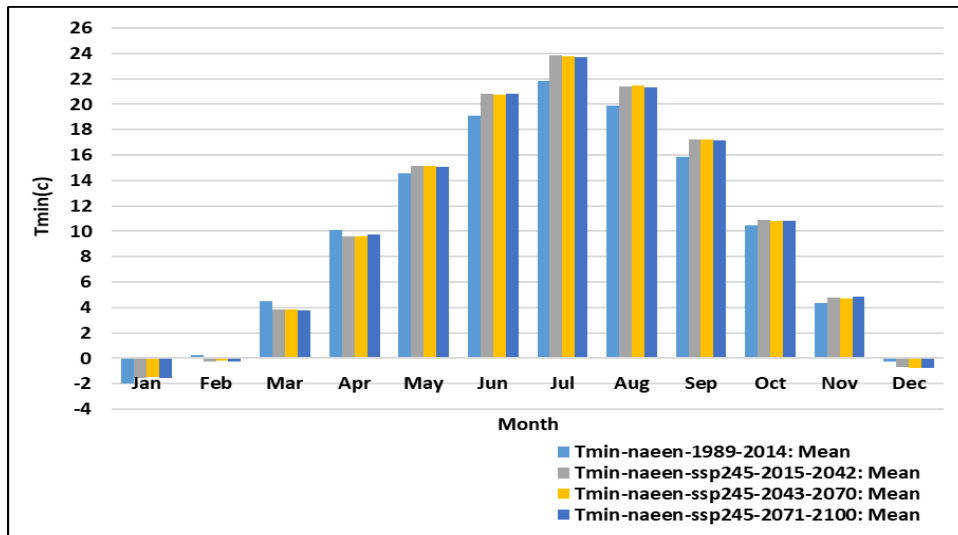
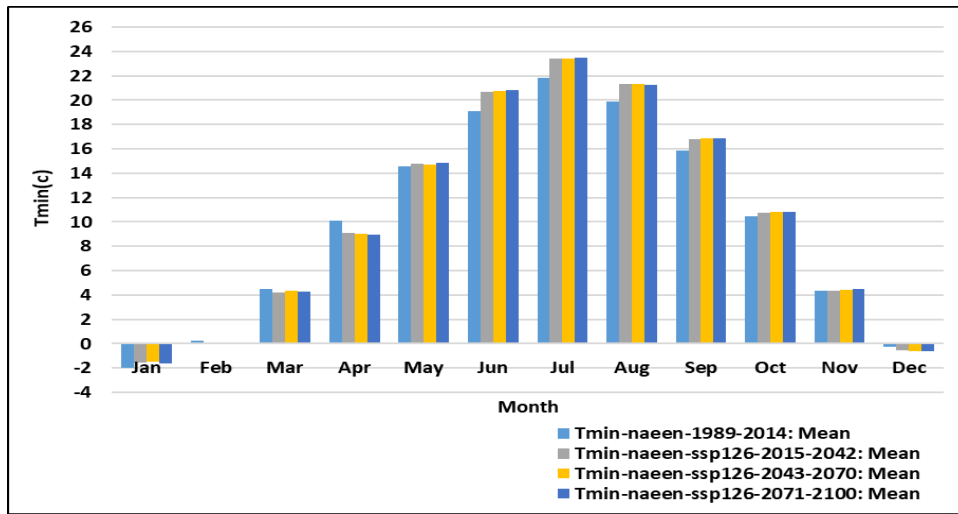
در شکل ۸ روند تغییرات میانگین ماهیانه درجه حرارت کمینه در دوره‌های زمانی ۲۰۱۵-۲۰۴۲، ۲۰۱۵-۲۰۷۰-۲۰۴۳ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان داده شده است. نتایج حاکی از افزایش میانگین ماهیانه دمای کمینه در تمام دوره‌های زمانی پیش‌بینی‌شده، نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ تحت سناریو SSP1-2.6 بوده، به طوری که بیشترین افزایش دما مربوط به ماه ژوئن بوده و به ترتیب ۱/۰۲، ۱/۵۳، ۱/۶۵ و ۱/۶۸ درجه سانتی‌گراد و از بین فصول سال، بهار (آوریل، می و ژوئن) دارای بیشترین افزایش دمای کمینه بوده است.

همچنین نتایج حاکی از افزایش میانگین ماهیانه دمای کمینه در تمام دوره‌های زمانی پیش‌بینی‌شده، نسبت به دوره زمانی پایه تحت سناریو SSP2-4.5 بوده، به گونه‌ای که بیشترین افزایش دما مربوط به ماه جولای بوده و به ترتیب ۱/۱۱، ۲/۰۰، ۱/۹۳ و ۱/۸۷ درجه سانتی‌گراد و از بین فصول سال، فصل تابستان (جولای، آگوست و سپتامبر) دارای بیشترین افزایش دمای کمینه بوده است. همچنین نتایج حاکی از افزایش میانگین ماهیانه دمای کمینه در تمام دوره‌های زمانی پیش‌بینی‌شده، نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ تحت سناریو SSP5-8.5 بوده، به طوری که بیشترین

افزایش دما مربوط به ماه جولای بوده و به ترتیب ۰/۹۵، ۲/۲۴، ۲/۲۵ و ۲/۲۴ درجه سانتی‌گراد و از بین فصول سال، فصل تابستان (جولای، آگوست و سپتامبر) دارای بیشترین افزایش دمای کمینه بوده است. برای ارزیابی سناریوهای تولید شده در دوره‌های زمانی ۲۰۴۲-۲۰۱۵، ۲۰۷۰-۲۰۴۳ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ از شاخص‌های نیکویی برآزش R، RMSE، NSE و KGE در جدول ۵ استفاده شد. نتایج بیانگر آن بوده که مدل SDSM با استفاده از خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR از کارایی بالایی جهت ریزمقیاس‌نمایی پارامتر دمای کمینه در ایستگاه سینوپتیک نایین برخوردار بوده و انطباق زیادی بین مقادیر سناریوسازی و مشاهداتی، تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره‌های زمانی ۲۰۴۲-۲۰۱۵، ۲۰۷۰-۲۰۴۳ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ وجود دارد. همچنین نتایج سناریوسازی مدل SDSM با استفاده از خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR نشان داد به‌طور کلی مقادیر میانگین دمای کمینه به ترتیب ۰/۵۱، ۰/۵۳ و ۰/۵۴ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد یافت. در شکل ۹ مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی دمای کمینه با استفاده از قابلیت ترسیم دی‌گرام تیلور نمایش داده شده است.

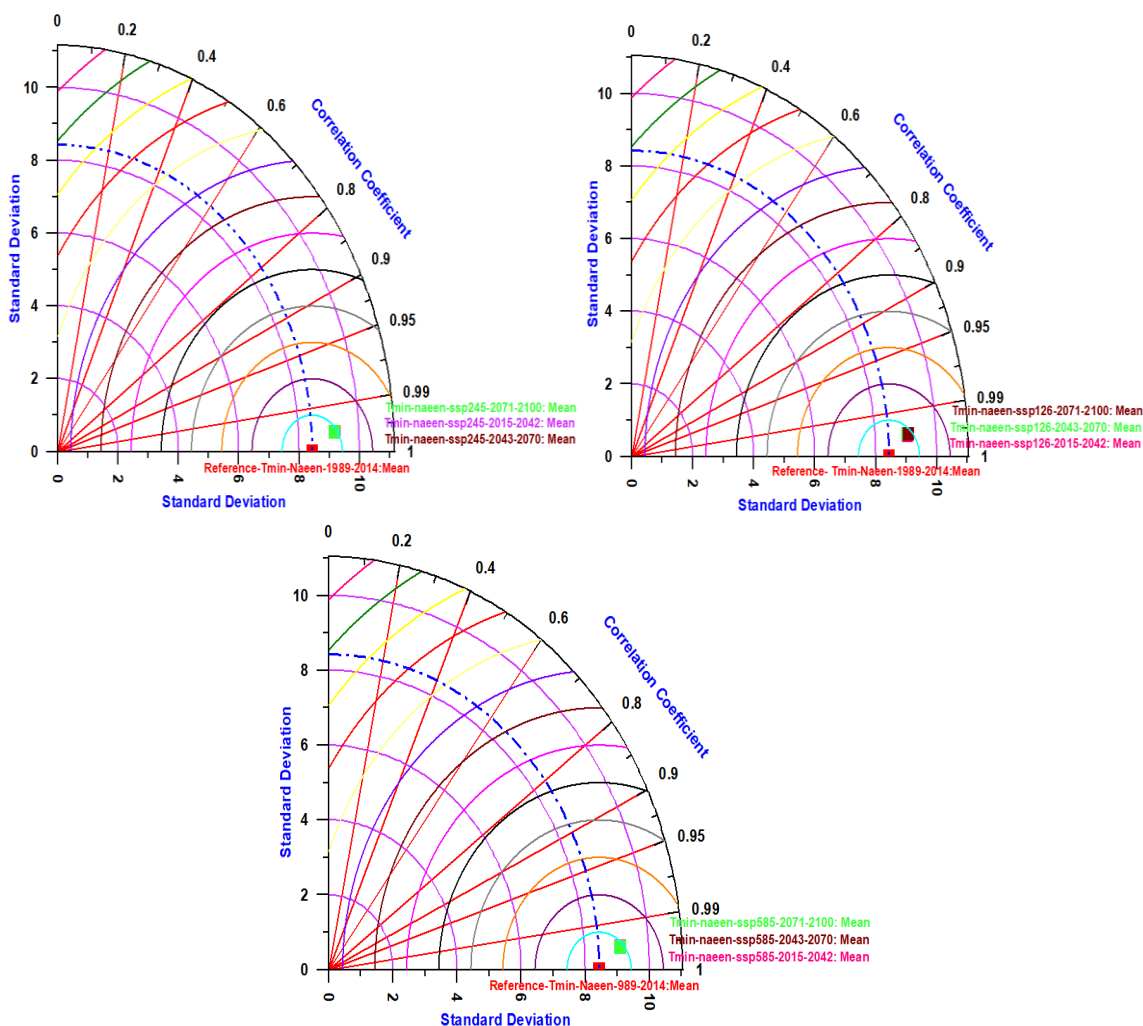
جدول ۵- ارزیابی مدل SDSM تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با مولفه هواشناسی دمای کمینه
Table 5 - Evaluation of SDSM model under SSP1-2.6 & SSP2-4.5 & SSP5-8.5 scenario with meteorological component of mainimum temperature

نام مدل	مولفه هواشناسی	سناریو	دوره زمانی	R	RMSE	NSE	KGE
		SSP1-2.6	2015-2042	0.99	0.884	0.988	0.827
			2043-2070	0.99	0.915	0.987	0.826
			2071-2100	0.99	0.939	0.986	0.818
MPI-ESM1-2-HR	دمای کمینه	SSP2-4.5	2015-2042	0.99	1.037	0.983	0.778
			2043-2070	0.99	1.030	0.984	0.780
			2071-2100	0.99	1.006	0.984	0.784
		SSP5-8.5	2015-2042	0.99	1.081	0.982	0.784
			2043-2070	0.99	1.084	0.982	0.782
			2071-2100	0.99	1.118	0.981	0.774



شکل ۸- نمودار مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی دمای کمینه تحت سناریو SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Figure 8- Comparison diagram of the monthly average of simulated and observed values of the minimum temperature under the scenario SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5



شکل ۹- دیاگرام تیلور مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی دمای کمینه تحت سناریو SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Figure 9- Taylor diagram of the monthly average of simulated and observed values of the minimum temperature under the scenario SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5

مربوط به ماه ژانویه بوده که به ترتیب مقادیر ۰/۱۴، ۰/۲۱، ۰/۲۵ و ۰/۳۲ میلی‌متر نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ شبیه سازی شده است. برای هر دوره زمانی، میانگین افزایش بارش در فصل پاییز (اکتبر، نوامبر و دسامبر) بیشتر از سایر ماه‌ها و میانگین کاهش بارش در فصل زمستان (ژانویه، فوریه و مارس) بیشتر از سایر ماه‌ها می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از کاهش و افزایش میانگین ماهیانه بارش در تمام دوره‌های زمانی در سناریو SSP2-4.5 می‌باشد. بیشترین افزایش بارش در دوره‌های زمانی مربوط به ماه نوامبر بوده که به ترتیب مقادیر ۰/۲۸ و ۰/۲۳، ۰/۲۱، ۰/۰۴ میلی‌متر

پیش‌بینی متغیر بارش در دوره‌های آتی در شکل ۱۰ روند تغییرات میانگین ماهیانه بارش در دوره‌های زمانی ۲۰۴۲-۲۰۷۰، ۲۰۴۳-۲۰۷۰ و ۲۱۰۰-۲۰۷۰ تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان داده شده است. نتایج حاکی از کاهش و افزایش میانگین ماهیانه بارش در تمام دوره‌های زمانی در سناریو SSP1-2.6 می‌باشد. بیشترین افزایش بارش در دوره‌های زمانی مربوط به ماه نوامبر بوده که به ترتیب مقادیر ۰/۰۴، ۰/۴۶، ۰/۳۹ و ۰/۲۹ میلی‌متر نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ شبیه‌سازی شده است. بیشترین کاهش بارش در دوره‌های زمانی

بارش در فصل زمستان (ژانویه، فوریه و مارس) بیشتر از سایر ماه‌ها می‌باشد. برای ارزیابی سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تولید شده در دوره‌های زمانی ۲۰۴۲-۲۰۱۵، ۲۰۷۰-۲۰۴۳ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ از شاخص‌های نیکویی برازش R، RMSE، NSE و KGE در جدول ۶ استفاده شد. نتایج بیانگر آن بوده که مدل SDSM با استفاده از خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR از کارایی متوسطی جهت ریزمقیاس‌نمایی پارامتر بارش در ایستگاه سینوپتیک نایین برخوردار بوده و انطباق متوسطی بین مقادیر سناریوسازی و مشاهداتی، تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره‌های زمانی ۲۰۴۲-۲۰۱۵، ۲۰۷۰-۲۰۴۳ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ وجود دارد.

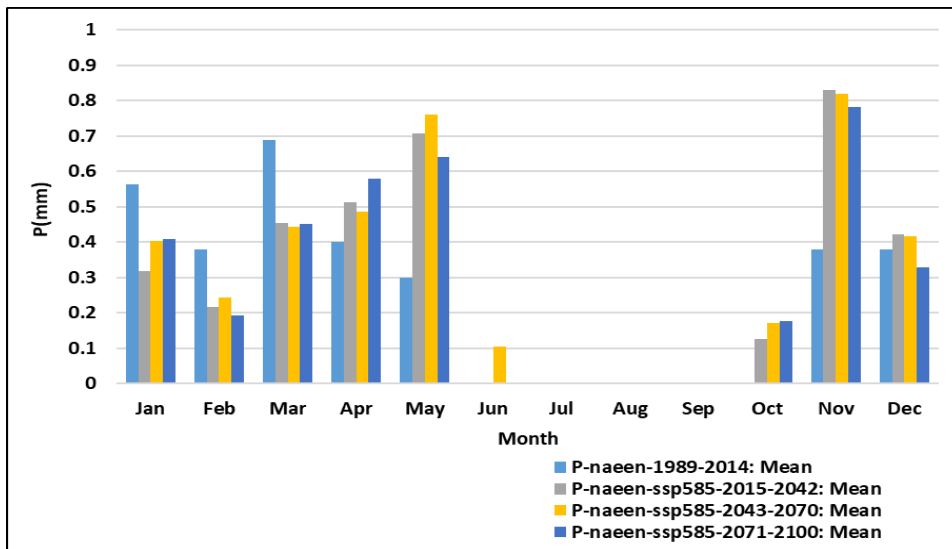
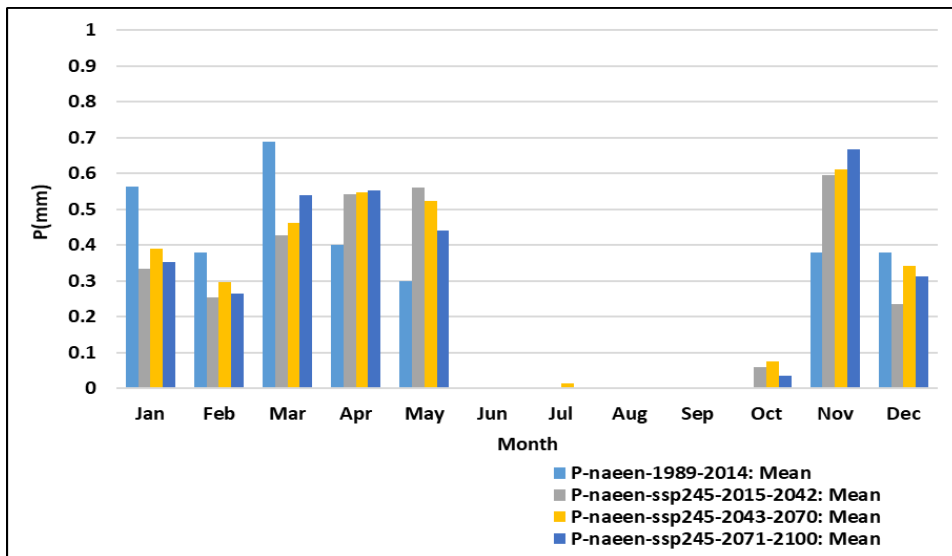
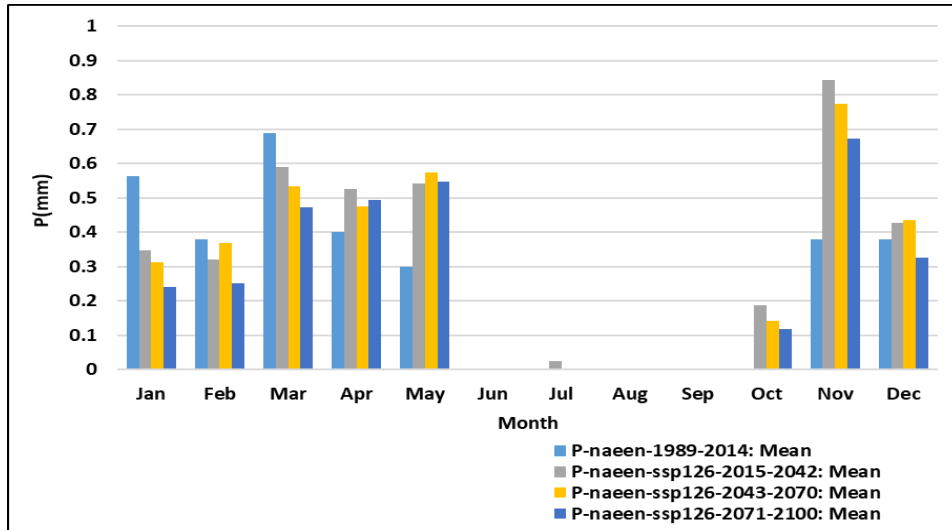
همچنین نتایج سناریوسازی مدل SDSM با استفاده از خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR نشان داد به‌طور کلی مقادیر میانگین بارش به ترتیب ۰/۲۱، ۰/۲۲ و ۰/۲۲ میلی‌متر تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد یافت. در شکل ۱۱ مقایسه میانگین ماهیانه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی متغیر بارش با استفاده از قابلیت ترسیمی دیاگرام تیلور نمایش داده شده است.

نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ شبیه‌سازی شده است.

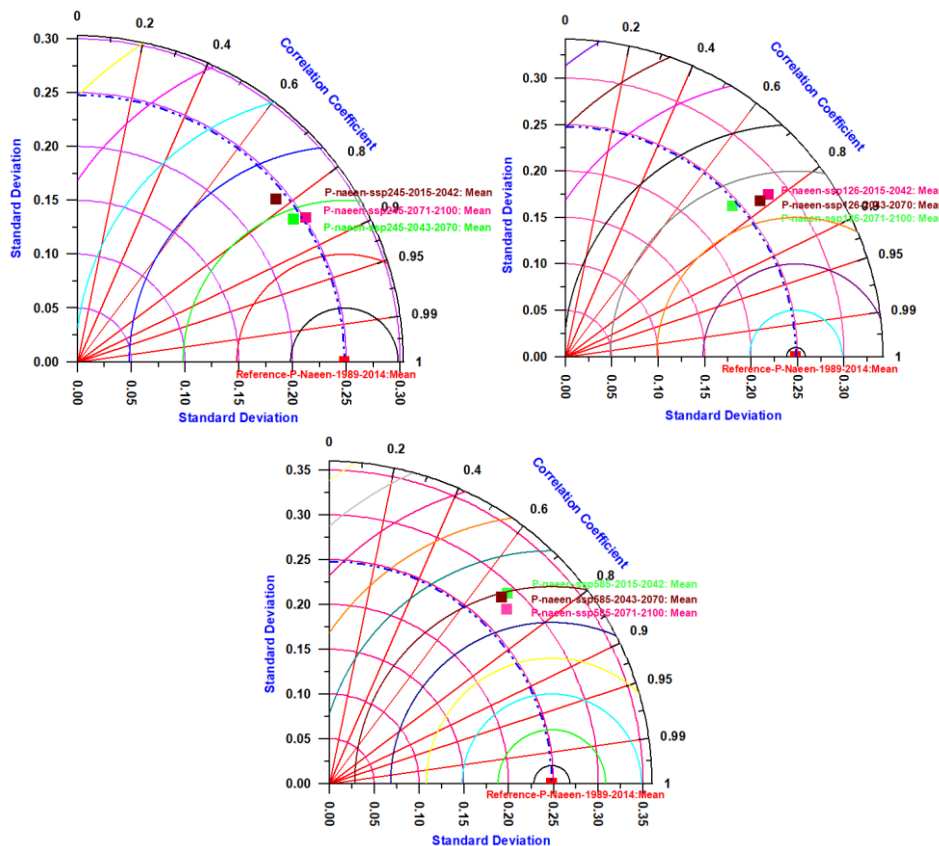
بیشترین کاهش بارش در دوره‌های زمانی مربوط به ماه مارس بوده که به ترتیب مقادیر ۰/۰۵، ۰/۲۵، ۰/۲۲ و ۰/۱۵ میلی‌متر نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ شبیه‌سازی شده است. برای هر دوره زمانی، میانگین افزایش بارش در فصل پاییز (اکتبر، نوامبر و دسامبر) بیشتر از سایر ماه‌ها و میانگین کاهش بارش در فصل زمستان (ژانویه، فوریه و مارس) بیشتر از سایر ماه‌ها می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از کاهش افزایش میانگین ماهیانه بارش در تمام دوره‌های زمانی در سناریو SSP8-8.5 می‌باشد. بیشترین افزایش بارش در دوره‌های زمانی مربوط به ماه نوامبر بوده که به ترتیب مقادیر ۰/۰۶، ۰/۴۵، ۰/۴۳ و ۰/۴۰ میلی‌متر نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ شبیه‌سازی شده است. بیشترین کاهش بارش در دوره‌های زمانی مربوط به ماه مارس بوده که به ترتیب مقادیر ۰/۰۲، ۰/۲۳، ۰/۲۴ و ۰/۲۳ میلی‌متر نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۴ شبیه‌سازی شده است. برای هر دوره زمانی، میانگین افزایش بارش در فصل پاییز (اکتبر، نوامبر و دسامبر) بیشتر از سایر ماه‌ها و میانگین کاهش

جدول ۶- ارزیابی مدل SDSM تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با مولفه هواشناسی بارش
Table 6 - Evaluation of SDSM model under SSP1-2.6 & SSP2-4.5 & SSP5-8.5 scenario with meteorological component of Percipitation

نام مدل	مولفه هواشناسی	سناریو	دوره زمانی	R	RMSE	NSE	KGE
MPI-ESM1-2-HR	بارش	SSP1-2.6	2015-2042	0.610	0.180	0.425	0.371
			2043-2070	0.610	0.171	0.484	0.534
			2071-2100	0.550	0.161	0.495	0.737
MPI-ESM1-2-HR	بارش	SSP2-4.5	2015-2042	0.600	0.157	0.561	0.754
			2043-2070	0.700	0.136	0.674	0.789
			2071-2100	0.710	0.133	0.687	0.836
MPI-ESM1-2-HR	بارش	SSP5-8.5	2015-2042	0.470	0.213	0.196	0.398
			2043-2070	0.460	0.216	0.173	0.293
			2071-2100	0.510	0.196	0.316	0.493



شکل ۱۰- مقایسه میانگین ماهانه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی بارش تحت سناریو SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5
 Figure 10- Comparison of the monthly average of simulated and observed values of the Percipitation under the scenario SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5



شکل ۱۱- دیاگرام تیلور مقایسه میانگین ماهانه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی بارش تحت سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Figure 11- Taylor diagram of the monthly average of simulated and observed values of the Percipitation under the scenario SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5

(Stofer *et al.*, 2017) بود، لذا منجر به شکل‌گیری سری مدل‌های جفت شده درون مقایسه‌ای CMIP6 در گزارش ششم شد (O'Neil *et al.*, 2016). در واقع گزارش ششم شامل سناریوهای جدید سازماندهی شده از مدل‌های اقلیمی جهانی هستند که الگوی تکامل و ویژگی‌های سازماندهی فازهای قبلی (CMIP5) را ادامه داده و جهت شناخت مکانیسم‌های مختلف آب و هوایی مورد طراحی قرار گرفته است (Eyering *et al.*, 2016). مدل‌های موجود در گزارش ششم وضوح بیشتری را با بهبود فرآیندهای پویا شامل شده است. مقایسه تحقیقات پراکنده انجام شده براساس مدل‌های گزارش پنجم با نتایج برون‌داد مدل‌های گزارش ششم نشان داد که مدل‌های گزارش ششم دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های گزارش پنجم در شبیه‌سازی بارش و دما

بحث

با توجه به اهمیت بحث تغییر اقلیم در دنیا، مطالعه پارامترها و رخداد‌های حدی آب و هوایی به صورت گسترده مورد توجه بوده و مقابله و سازگاری با آن امری اجتناب‌ناپذیر است. برای مدیریت با این رخداد، مدیران و برنامه‌ریزان نیازمند مدیریت خطر هستند تا دچار مدیریت بحران نشوند.

از آنجایی که در تحقیقات انجام گرفته با گزارش پنجم تغییرات اقلیمی (CMIP5) دارای محدودیت‌ها و نقص‌هایی از جمله درک ضعیف واداشت تابشی در مدل‌های اقلیمی همراه با خطاهای سیستماتیک، عدم قطعیت سناریوها در آینده‌نگاری اقلیمی، مشکل تعیین منافع و هزینه‌های هریک از عملیات‌های کاهش به طور جداگانه و عدم تمرکز روی علوم خاص در مدل‌سازی

قابل توجه بارش در برخی از دوره‌ها در سناریوها می‌تواند ناشی از فرضیات متفاوت در نظر گرفته شده در آنها باشد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش نشان داد که بررسی، آنالیز و تخمین وضعیت اقلیم در دوره‌های آینده می‌بایست از مهمترین موضوعات تحقیقاتی باشد تا سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان بتوانند تصمیمات اجرایی در جهت اقدامات کاهش و سازگاری با پدیده تغییر اقلیم را اتخاذ نمایند. این امر برای کشوری همچون ایران که دارای اقلیم گرم و خشک و با پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارندگی است، ضروری‌تر می‌باشد زیرا وقوع تغییر اقلیم در اینگونه مناطق، می‌تواند اثرات مخرب‌تری داشته باشد. از آنجایی که شرایط کنونی جهان حاکی از گسترش تغییرات اقلیمی در همه کشورها و در همه قاره‌ها بوده و دستاوردهای توسعه پایدار را به خطر می‌اندازد، جامعه بین‌المللی نیازمند حرکت به سمت فناوری‌های سازگار با محیط‌زیست، استفاده از انرژی‌های پاک و غیرفسیلی و اجرای ضوابط بین‌المللی مبنی بر رعایت اصول زیست‌محیطی در راستای توسعه پایدار از جمله کاهش گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. لذا بهره‌گیری از سناریوی SSP5-8.5 که یک سناریوی بدبینانه می‌باشد، به‌عنوان مبنای تصمیم‌گیری جهت مقابله و سازگاری با آنچه در آینده اتفاق می‌دهد تا حد فراوانی غیرمنطقی و غیرعلمی می‌باشد. از طرفی انتخاب سناریوی SSP1-2.6 به‌عنوان یک اصل جهت تصمیم‌گیری با توجه به وضعیت کشورهای توسعه نیافته یا در حال توسعه و قرار گرفتن این قبیل کشورها در ابتدای راه تغییرات اساسی سازگار با محیط‌زیست، بیش از اندازه خوش‌بینانه به نظر می‌رسد. لذا منطقی می‌باشد که از میان سناریوهای مورد ارزیابی در این پژوهش، سناریوی متوسط SSP2-4.5 به‌عنوان ملاک تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی به منظور پیشنهاد راهکار جهت مقابله و سازگاری با تغییرات اقلیمی در دستور کار سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان کشور قرار گیرد.

می‌باشد (Zamani *et al.*, 2020). لذا در پژوهش حاضر به منظور پیش‌نگری تغییرات شاخص‌های حدی دمایی و بارش از مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR، که یکی از کاراترین مدل‌های GCM از گزارش CMIP6 می‌باشد تحت سه سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در سه دوره آینده نزدیک، آینده متوسط و آینده دور نسبت به دوره زمانی پایه استفاده گردید. جهت ارزیابی عملکرد مدل MPI-ESM1-2-HR از شاخص‌های برازش نکویی R، RMSE، NSE، KGE و دیاگرام تیلور در واسنجی و اعتبارسنجی مدل و تولید سناریوهای اقلیمی استفاده شد. همچنین معیارهای ارزیابی عملکرد مدل MPI-ESM1-2-HR و نزدیکی متغیرهای پیش‌بینی‌شده با نقطه مرجع در دیاگرام تیلور، حاکی از دقت بالای مدل در ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای دمای بیشینه و کمینه و دقت متوسط مدل در خصوص متغیر بارش تحت سه سناریو خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه در سه دوره زمانی آینده نزدیک، آینده متوسط و آینده دور می‌باشد که این نتایج با تحقیقات Parakandeh و همکاران (۲۰۲۴) و Zarin و همکاران (۲۰۲۲) و Cheng و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد. در رابطه با تغییرات دما، تحت تمامی سناریوها و در تمامی دوره‌ها مقدار دمای حداقل و حداکثر نسبت به دوره پایه افزایش پیدا کرده است. در خصوص متغیر بارش نتایج حاکی از وجود یک روند سینوسی در خصوص تغییرات بارش در سناریوها در دوره‌های زمانی آینده نزدیک، آینده متوسط و آینده دور نسبت به دوره زمانی پایه می‌باشد. به طوری که برای هر دوره زمانی، میانگین افزایش بارش در فصل پاییز بیشتر از سایر ماه‌ها و میانگین کاهش بارش در فصل زمستان بیشتر از سایر ماه‌ها بوده که این موضوع با نتایج پژوهش Zarin و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد. ضمناً کاهش بارش در سناریو خوش‌بینانه SSP1-2.6 و افزایش بارش در سناریو بدبینانه SSP5-8.5 معنی‌دار و قابل توجه نمی‌باشد. از طرفی عدم تغییرات

دمای بیشینه و کمینه ایستگاه سینوپتیک نایین استان اصفهان کمال تشکر و قدردانی را دارند.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از سازمان هواشناسی کشور برای در اختیار قرار دادن داده‌ها و اطلاعات روزانه بارش و

References

- Ansari Mahabadi, S., Dehban, H., Zareian, M.J., & Farokhnia, A. (2022). Investigating the trend of temperature and precipitation changes in Iran's watersheds in the next 20 years based on output CMIP6 models. *Iranian Water Research Journal*, 16(1), 11-24. <https://doi.org/10.22034/iwrj.2022.11204> (In Persian)
- Bessah, E., Raji, A., Taiwo, O., Agodzo, S., & Ololade, O. (2020). The impact of varying spatial resolution of climate models on future rainfall simulations in the Pra River Basin (Ghana). *Journal of Water and Climate Change*, 11(4), 1263-1283. <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.258>
- Bjornaes, C. (2013). A guide to Representative Concentration Pathways. Center for International Climate and Environmental Research.
- Cheng, Q., Zhong, F., & Wang, P. (2021). Potential linkages of extreme climate events with vegetation and large-scale circulation indices in an endorheic river basin in northwest China. *Journal of Atmospheric Research*, 247, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105256>
- Eyring, V., Bony, S., Senior, C., Stevens, B., Stouffer, R. J., Taylor, K. E., & Meehl, G.A. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Journal of Geoscientific Model Development*, 8, 10539-10583. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- IPCC, Climate Change. (2021). Future Global Climate: Scenario-based Projections and Near-term Information. Lee, J. Y., Marotzke, G., Bala, L., Cao, S., Corti, J.P., Dunne, F., Engelbrecht, E., Fischer, J.C., Fyfe, C., Jones, A., Maycock, J., Mutemi, O., Ndiaye, S., Panickal, & Zhou., T. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.006>
- Khan, M. S., Coulibaly, P., & Dibike, Y. (2006). Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology*, 319, 357-382. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.035>
- Koukidis, E. N., & Berg, A. A. (2009). Sensitivity of the Statistical DownScaling Model to reanalysis products. *Journal of Atmosphere-Ocean*, 47(1), 1-18. <https://doi.org/10.3137/AO924.2009>
- Kult, J., Choi, W., & Choi, J. (2014). Sensitivity of the Snowmelt Runoff Model to snow covered area and temperature inputs. *Journal of Applied Geography*, 55, 30-38. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.08.011>
- Marzi, S., Mysiak, J., Essenfelder, A., Amadio, A., Giove, S., & Fekete, A. (2019). Constructing a comprehensive disaster resilience index: The case of Italy. *Journal of Plos one*, 14(9), 221-585. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221585>
- Mirakbari, M., Mesbahzadeh, T., Mohseni Saravi, M., Khosravi, H., & Mortezaei Frizhendi, Q. (2018). Evaluation of efficiency of CMIP5 series model in simulation and prediction of climatic parameters of rainfall, temperature and wind speed (Case study: Yazd province). *Journal of Natural Geography Research*, 50(3), 609-593. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.248177.1007156>
- Mishra, V., Cherakauer, K., & Shukla, SH. (2010). Assessment of Drought due to Historic Climate Variability and Projected Future Climate Change in the Midwestern United States. *Journal of Hydrometeorology*, 11, 46-68. <http://doi.org/10.1175/2009JHM1156.1>
- Nurzaman, A., Shaw, R., & Roychansyah, M.S. (2020). Measuring community resilience against coastal hazards: Case study in Baron Beach, Gunungkidul Regency. *Journal of Progress in Disaster Science*, 5, 100067.

- <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2020.100067>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J. F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Journal of Geoscientific Model Development*, 9, 3461-3482.
<https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- O'Neill, B. C., Carter, T.R., Ebi, K., Harrison, P. A., Kemp-Benedict, E., Kok, K., Kriegler, E., Preston, B., Riahi, K., Sillmann, J., Van Ruijven, B., Van Vuuren, D., Carlisle, D., Conde, C., Fuglestedt, J., Green, C., Hasegawa, T., Leisinger, J., Monteith, S., & Pichs-Madruga, R. (2020). Achievements and needs for the climate change scenario framework. *Journal of Nature Climate change*, 10, 1074-1084.
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-00952>
- Pachauri, R.K., Allen, M.R., Barros, V.R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J.A., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., Dubash, N.K., Edenhofer, O., Elgizouli, I., Field, C.B., Forster, P., Friedlingstein, P., Fuglestedt, J., Gomez-Echeverri, L., Hallegatte, S., Hegerl, G., Howden, M., Jiang, K., Jimenez Cisneros, B., Kattsov, V., Lee, H., Mach, K. J., Marotzke, J., Mastrandrea, M. D., Meyer, L., Minx, J., Mulugetta, Y., O'Brien, K., Oppenheimer, M., Pereira, J. J., Pichs-Madruga, R., Plattner, G.K., Pörtner, H.O., Power, S.B., Preston, B., Ravindranath, N.H., Reisinger, A., Riahi, K., Rusticucci, M., Scholes, R., Seyboth, K., Sokona, Y., Stavins, R., Stocker, T. F., Tschakert, P., van Vuuren, D., & van Ypserle, J. P. (2014). AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Journal of Geneva*.
<https://doi.org/10.4236/ajcc.2013.23020>
- Parakandeh, F., Alavinia, H., & Omidvar, E. (2024). Evaluation of future temperature and precipitation changes by downscaling general circulation models (A case study of selected synoptic stations on the southern coasts of Iran). *Journal of Management of Natural Ecosystems*, 3(1), 63-75.
<https://doi.org/10.220/emj.2024.2025835.1056> (In Persian)
- Pimonsree, S., Kamworapan, S., Gheewala, S.H., Thongbhakdi, A., & Prueksakorn, K. (2023). Evaluation of CMIP6 GCMs performance to simulate precipitation over Southeast Asia. *Journal of Atmospheric Research*, 282, 33.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4204582>
- Rakhimova, M., Liu, T., Bissenbayeva, S., Mukanov, Y., Gafforov, K. S., Bekpergenova, Z., & Gulakhmadov, A. (2020). Assessment of the impacts of climate change and human activities on runoff using climate elasticity method and general circulation model (GCM) in the Buqtyrma river Basin. *Journal of Sustainability*, 12(12), 4968.
<https://doi.org/10.3390/su12124968>
- Roshani, A., & Hmidi, M. (2022). Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature & precipitation based on CMIP6 models (Case study: Sari station). *Journal of Water and Irrigation Management*, 11(4), 781-795.
<https://doi.org/10.22059/jwim.2022.330603920>
- Schmidhuber, J., & Tubiello, F.N. (2007). Global food security under climate change. *Journal of Proc. Natl. Acad. Sci.*, 104, 19703-19708.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0701976104>
- Stouffer, R. J., Eyring, V., Meehl, G. A., Bony, S., Senior, C., Stevens, B., & Taylor, K. E. (2017). CMIP5 Scientific Gaps and Recommendations for CMIP6. *Journal of American Meteorological Society*, 98(1), 95-105.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00013.1>
- Su-Yuan, L., Li-Juan, M., Zhi-Hong, J., GuoJie, W., Raj, G. K., Jing, ZH., Hui, ZH., Ke, F., Yu, H., & Chun, L. (2020). Projected drought conditions in Northwest China with CMIP6 models under combined SSPs and RCPs for 2015-2099. *Journal of Advances in Climate Change Research*, 11(3), 210-217.
<https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.09.003>
- Tang, Q., Donfg, W., Liu, Z., Liao, H., & Li, X. (2015). New climate and socio-economic scenarios for assessing global human health challenges due to heat risk. *Journal of*

- Climatic Change*, 130, 505–518.
<https://doi.org/10.1007/s10584-015-1372-8>
- Van der Mensbrugge, D. (2015). Shared Socio-Economic Pathways and Global Income Distribution. 18th Annual Conference on Global Economic Analysis. Melbourne, Australia.
- Wilby, R. L., & Dawson, C. W. (2007). SDSM 4.2-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. User Manual. London, UK. *American Journal of climate change*, 6(3).
- Woznicki, A., Adhikari, U., & Nejadhashemi, A. (2016). Climate change and eastern Africa: a review of impact on major crops. *Journal of Food and Energy Security*, 4(2), 110-132. <https://doi.org/10.1002/fes3.61>
- Zamani, Y., Monfared, S. A. H., & Hamidianpour, M. (2020). A comparison of CMIP6 and CMIP5 projections for precipitation to observational data: the case of Northeastern Iran. *Journal of Theoretical and Applied Climatology*, 142(3), 1613-1623.
<https://doi.org/10.1007/s00704-018-2672-5>
- Zarin, A., Dadashi-Roudbari, A. A. & Hassani, S. (2022). Near term (2021-2028) climate prediction of monthly temperature in Iran using Decadal Climate Prediction Project (DCPP). *Journal of the Earth and Space Physics*, 48(1), 189-211.
<https://doi.org/10.22059/JESPHYS.2022.327886.1007340> (In Persian)