

## بررسی اثر تغییر اقلیم بر دما، بارش و خشکسالی‌های دوره آتی با استفاده از دو مدل گردش عمومی BNU-ESM و HadGEM2

علی آذره<sup>۱</sup>، الهام رفیعی ساردوئی<sup>۲\*</sup>، میثم جعفری<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴

### چکیده

در تحقیق حاضر با هدف ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر دما، بارش و خشکسالی‌های آینده در شهرستان خاتم، از خروجی دو مدل گردش کلی HadGEM2 و BNU-ESM تحت سه سناریو RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 برای دو دوره آتی ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ و ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ استفاده شد. خروجی مدل HadGEM2 توسط مدل LARS-WG و خروجی مدل BNU-ESM توسط روش ریزمقیاس‌نمایی عامل تغییر ریزمقیاس گردید. همچنین به منظور ارزیابی کارایی روش عامل تغییر و مدل LARS-WG از شاخص‌های آماری  $R^2$ ، RMSE و NSE استفاده شد. بر طبق نتایج آماره‌های خطا، مدل LARS-WG برای هر دو پارامتر دما و بارش، دارای عملکرد بالاتری نسبت به روش عامل تغییر بود. برای ارزیابی خشکسالی، از شاخص بارش استاندارد (SPI) طی دوره گذشته (۱۹۹۶ تا ۲۰۱۷) و دو دوره آتی در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه استفاده شد. نتایج تغییرات دما و بارش در هر دو دوره آتی حاکی از آن بود که این شهرستان متأثر از گرمایش جهانی هست؛ به گونه‌ای که در تمامی سناریوها در هر دو مدل، دمای متوسط سالانه افزایش و بارش متوسط سالانه کاهش می‌یابد. مقادیر SPI سالانه برای هر دو مدل HadGEM2 و BNU-ESM در هر دو دوره آتی تحت هر سه سناریو نسبت به دوره پایه کاهش یافته و متعاقباً خشکسالی هواشناسی افزایش می‌یابد. بر طبق نتایج، در بین دو مدل GCM، مدل BNU-ESM کمترین مقدار بارش، بیشترین مقدار دما و بیشترین تعداد سال با خشکسالی شدید را در مقایسه با مدل HadGEM2 پیش‌بینی می‌کند.

**کلیدواژه‌ها:** سناریوهای RCP، خشکسالی، عامل تغییر، LARS-WG، شهرستان خاتم.

۱. استادیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه جیرفت

۲. استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، نویسنده مسئول؛ ellrafiei@ujiroft.ac.ir

۳. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

\* این مقاله مستخرج از پژوهش مستقل است.



## مقدمه

افزایش جمعیت و گسترش صنایع در طی یک قرن اخیر منجر به ایجاد تغییراتی در اکوسیستم شده و خروجی آن افزایش گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه آن افزایش دمای کره زمین و همچنین کاهش بارش است. این تغییر در پارامترهای اقلیمی به‌ویژه دما و بارش تحت عنوان تغییر اقلیم مطرح است و تأثیرات منفی زیادی بر بخش‌های مختلف اکوسیستم گذاشته است (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷). پیش‌بینی‌ها انجام شده توسط پژوهشگران مختلف در نقاط مختلف دنیا نشان داده است که این روند افزایش دما و کاهش بارش در دوره آتی نیز ادامه خواهد داشت؛ بنابراین نیاز به مدل‌ها و روش‌های آماری برای پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی با دقت مناسب امری ضروری است. برای ارزیابی تغییرات اقلیمی، مدل‌های گردش عمومی جو<sup>۲</sup> طراحی شده‌اند. این مدل‌ها خصوصیات فیزیکی، چرخش‌ها و حرکات اتمسفری را تحلیل می‌کنند و به دنبال آن متغیرهای هواشناسی را در شبکه‌های خاص شبیه‌سازی می‌کنند (شامی و حبیبی نوخندان، ۲۰۰۹). این مدل‌ها فقط قادر به شبیه‌سازی داده‌های مدل گردش عمومی جو در سطوح بزرگ هستند. لذا ریزمقیاس‌نمایی نتایج این مدل‌ها در مقیاس ایستگاهی ضروری است. برای ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای اقلیمی، روش‌های مختلفی وجود دارد که از بین آن‌ها، روش‌های آماری، بیشتر از سایر روش‌ها مورد توجه محققان قرار گرفته است.

پدیده‌های حدی مانند خشکسالی بیش از سایر پدیده‌ها تحت‌تأثیر تغییر اقلیم قرار می‌گیرند (کووویلر<sup>۳</sup>، ۲۰۱۱). کاهش بارندگی و افزایش دما هر یک به تنهایی یا به کمک هم می‌توانند موجب خشکسالی شوند (دوبروسکی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۹). کشور ایران به‌لحاظ موقعیت جغرافیایی خاص خود نسبت به گردش عمومی جو و خصوصیات پستی و بلندی خود در کمربند خشک جهان قرار گرفته و دارای اقلیم

خشک و نیمه‌خشک است؛ در نتیجه در بیشتر سال‌ها دچار خشکسالی شدید شده است. پدیده خشکسالی موجب افت سطح آب زیرزمینی، فرسایش آبی و بادی خاک می‌شود. از این رو برای کاهش اثرات مخرب خشکسالی، ارزیابی خشکسالی در دوره حال و دوره آتی ضروری به نظر می‌رسد (معافی مدنی و همکاران، ۲۰۱۵).

تاکنون شاخص‌های زیادی برای پیش‌بینی خشکسالی به کار رفته است. شاخص بارش استاندارد<sup>۵</sup> یکی از شاخص‌های مهم است که در تحلیل خشکسالی‌ها قابلیت بالایی از خود نشان داده است. این شاخص به دلیل سادگی محاسبات، استفاده از داده‌های در دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی دلخواه به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص برای تحلیل خشکسالی شناخته شده است (آنجلیدیس<sup>۶</sup>، ۲۰۱۲). در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در زمینه اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی و خشکسالی در سراسر جهان صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات زیر اشاره کرد:

عباسی و همکاران (۲۰۱۰) به پیش‌بینی تغییرات اقلیمی خراسان جنوبی در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۹ میلادی با استفاده از مدل LARS-WG<sup>۷</sup> پرداختند، نتایج حاکی از دقت بالای مدل LARS-WG در پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی بود. همچنین نتایج این تحقیق نشان‌دهنده افزایش چهار درصدی بارش و افزایش میانگین سالانه دما در حدود ۰/۳ درجه سلسیوس است. لوکاس<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۰۹) اثرات تغییر اقلیم را بر روی شدت خشکسالی در ناحیه تسالی کشور یونان با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده ارزیابی کردند. آن‌ها خروجی‌های مدل انتشار جهانی CGCM2<sup>۹</sup> را برای دو سناریو A2 و B2 به کار بردند. نتایج این مقایسه نشان داد شدت خشکسالی سالانه در تمام منطقه افزایش یافته که این افزایش بر اساس سناریو A2 شدت بیشتری داشته است. پورکریمی و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی خصوصیات

5. Standardized Precipitation Index (SPI)

6. Angelidis

7. Long Ashton research station weather generator

8. Loukas

9. Coupled Global Climate Model 2

1. Intergovernmental Panel on Climate Change

2. Global Climate Models (GCMs)

3. Quevauviller

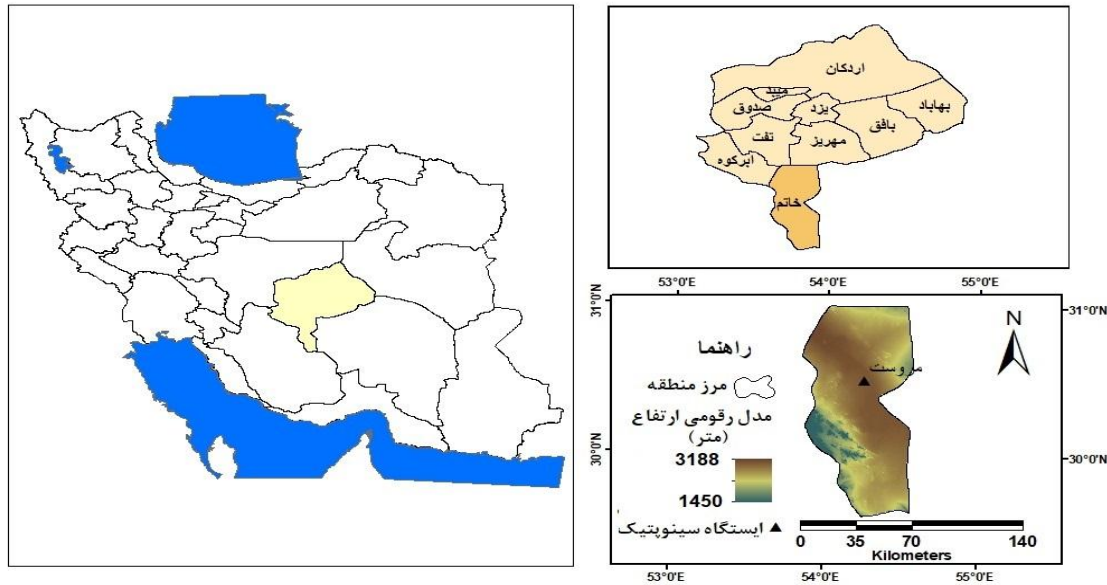
4. Dubrovsky

۱۹۳۹ تا ۱۹۴۲ توسط مدل هیدرولوژیکی WSFS<sup>۹</sup> شبیه‌سازی کردند. سپس به بررسی اثرات تغییر اقلیم روی خشکسالی در دوره آبی پرداختند. برای شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی در دوره آبی از روش ریزمقیاس‌نمایی عامل تغییر (دلتا) استفاده کردند. نتایج نشان داد که خشکسالی‌های اخیر، دبی جریان را تا ۸۰٪ در مقایسه با متوسط سالانه دبی حداقل جریان کاهش داده است. همچنین سناریوهای تغییر اقلیم، کاهش در جریان آب در طول خشکسالی‌ها را نشان می‌دهند.

با توجه به مرور منابع انجام‌شده، تاکنون مطالعه‌ای در زمینه استفاده هم‌زمان از دو مدل گردش عمومی کلی BNU-ESM و HadGEM2 برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی و خشکسالی انجام نشده است و هیچ‌یک از تحقیقات پیشین به مقایسه دو مدل ریزمقیاس‌نمایی دلتا و LARS-WG نپرداخته‌اند. همچنین در مطالعات تغییر اقلیم لحاظ نکردن عدم قطعیت‌های موجود در مراحل مختلف ارزیابی اثرات تغییر اقلیم سبب کاهش قطعیت و اطمینان به خروجی‌های نهایی سیستم خواهد شد؛ بنابراین استفاده هم‌زمان از دو مدل گردش عمومی جو و دو روش ریزمقیاس‌نمایی سبب کاهش عدم قطعیت خروجی‌ها می‌شود. از این‌رو هدف از این مطالعه، بررسی اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای دما، بارش و خشکسالی در دو دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ و ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ در شهرستان خاتم با استفاده از دو گردش عمومی جو BNU-ESM و HadGEM2 و دو مدل ریزمقیاس‌نمایی دلتا و LARS-WG تحت سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 می‌باشد. در این راستا، برای ارزیابی خشکسالی در دوره پایه (۱۹۹۶ تا ۲۰۱۷) و دو دوره آبی، شاخص بارش استاندارد (SPI) در مقیاس ۲۴ ماهه به کار گرفته شده است.

خشکسالی حوضه زربینه رود تحت تأثیر تغییر اقلیم با استفاده از دو شاخص استاندارد شده رواناب<sup>۱</sup> و شاخص رطوبت خاک استاندارد شده<sup>۲</sup> و مدل SWAT<sup>۳</sup> پرداختند. در ادامه با معرفی نتایج ریزمقیاس‌شده مدل گردش عمومی جو BNU-ESM تحت دو سناریوی انتشار RCP2.6 و RCP8.5 به مدل SWAT، شاخص‌های خشکسالی برای دوره آینده (۲۰۱۷ تا ۲۰۴۰) شبیه‌سازی و مقادیر آن با دوره پایه مقایسه شد. نتایج نشان داد میانگین بیشترین وقوع و تداوم خشکسالی کل حوضه در آینده نسبت به دوره پایه مربوط به شاخص استاندارد شده رواناب به ترتیب با ۲۳٪ افزایش تحت سناریو انتشار RCP2.6 و ۱۹/۷٪ افزایش تحت سناریو انتشار RCP8.5 بوده است. لی و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر تغییر اقلیم بر مشخصه‌های خشکسالی را توسط سری‌های زمانی شاخص بارش استاندارد شده و شاخص بارش-تخیر و تفرق استاندارد شده<sup>۴</sup> در دوره آماری ۱۹۸۱ تا ۲۱۰۰ با استفاده از مدل HadGEM2<sup>۵</sup> از سری مدل‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم در دشت وانگا کره شمالی بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد احتمالاً خشکسالی‌های شدیدتری در منطقه تحت شرایط تغییر اقلیم رخ خواهد داد. جهانبخش اصل و همکاران (۲۰۱۶) به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی دما و بارش حوضه شهرچای ارومیه از خروجی شش مدل گردش عمومی جو تحت سه سناریوی A1B، A2، و B1 و مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که بارش دوره آبی ۹ میلی‌متر کاهش خواهد یافت و این در حالی است که دمای حداقل ۱/۰۵ و حداکثر ۰/۸۷ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. ویجالاین<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی اثرات خشکسالی و تغییر اقلیم روی منابع آب در کشور فنلاند پرداختند. در این راستا سطح و دبی آب را در طول خشکسالی‌های شدید

1. Standardized Runoff Index(SRI)
2. Standardized soil moisture Index (SSWI)
3. Soil & Water Assessment Tool
4. Beijing Normal University Earth System Model
5. Representative Concentration Pathway
6. Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index
7. Hadley Centre Global Environmental Model, version 2-Earth System
8. Veijalainen



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان یزد و ایران

Figure (1): The location of the study area in Yazd province, Iran

بادام کوهی «چنارناز» از جمله پوشش گیاهی این منطقه به شمار می‌رود. این شهرستان مهم‌ترین قطب کشاورزی استان یزد محسوب می‌شود. شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را در ایران و استان یزد نشان می‌دهد.

### روش تحقیق

در این تحقیق، داده‌های بارش و دمای روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک مروست واقع در شهرستان خاتم برای بررسی پدیده تغییر اقلیم طی دوره زمانی (۱۹۹۶ تا ۲۰۱۷) از سازمان هواشناسی استان یزد تهیه شد. پس از جمع‌آوری اطلاعات، به منظور بررسی تغییرات اقلیمی در دوره آتی از خروجی دو مدل گردش عمومی جو BNU-ESM و HadGEM2-ES استفاده شد. مراحل انجام پژوهش بدین شرح است:

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

شهرستان خاتم با وسعت ۷۹۳۱ کیلومتر مربع در جنوب استان یزد واقع شده است. این شهرستان از شمال به شهرستان مهریز از شمال غرب به شهرستان ابرکوه از شرق به شهرستان شهربابک (استان کرمان) از غرب به شهرستان بوانات (استان فارس) و از جنوب به شهرستان نیریز (استان فارس) هم‌مرز است. این شهرستان در جنوبی‌ترین نقطه استان یزد و حد فاصل استان‌های فارس و کرمان و در ارتفاع متوسط ۲۳۱۹ متر از سطح دریا قرار گرفته است. متوسط دما و بارش سالانه منطقه مورد مطالعه، به ترتیب ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد و ۸۲/۵ میلی‌متر است. بخش عمده این شهرستان زیرپوشش جنگلی قرار دارد. جنگل‌های پسته وحشی «باغ شادی» و جنگل‌های

جدول (۱): مشخصات مدل گردش عمومی جو HadGEM2-ES و BNU-ESM (IPCC, 2013)

Table (1): The characteristics of Global Circulation Models used in this study (IPCC, 2013)

مدل جهانی	IPCC	مرجع	قدرت تفکیک مکانی به درجه
BNU-ESM	IPCC-AR5	Beijing Normal University Earth System Model, Canada	2.7906° × 2.8125°
HadGEM2-ES	IPCC-AR5	Hadley Global Environment Model 2 - Earth System, United Kingdom	1.25° × 1.875°

### بررسی وضعیت تغییر اقلیم

هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم ارزیابی<sup>۱</sup> خود از سناریوهای RCP به‌عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. جدول (۱) مشخصات دو مدل گردش عمومی جو BNU-ESM و HadGEM2-ES به‌کاررفته در این تحقیق را نشان می‌دهد. یکی از محدودیت‌های عمده در استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو<sup>۲</sup> تفکیک مکانی کم آن‌هاست که به‌لحاظ مکانی و زمانی با دقت مورد نیاز مدل‌های هیدرولوژیکی مطابقت ندارد. بنابراین از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی برای رفع این محدودیت استفاده می‌شود (کمال و مساح بوانی، ۲۰۱۲). مطالعات ارزیابی تغییر اقلیم در مناطق و اقلیم مختلف نشان می‌دهد که کارایی مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری متفاوت و نتایج ارزیابی نیز گوناگون است (کارآموز و همکاران، ۲۰۰۹؛ سلاجقه و همکاران، ۲۰۱۷)؛ بنابراین برای رسیدن به دورنمایی از اقلیم منطقه مورد مطالعه با کمترین عدم قطعیت، استفاده از فقط یک مدل ریزمقیاس‌نمایی منطقی به نظر نمی‌رسد. از این‌رو، در این تحقیق، خروجی‌های مدل گردش عمومی جو BNU-ESM تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 با استفاده از روش عامل تغییر و خروجی‌های مدل گردش عمومی جو HadGEM2-ES تحت سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 توسط مدل LARS-WG ریزمقیاس شدند.

### روش عامل تغییر<sup>۳</sup> یا دلتا

روش دلتا به‌طور گسترده‌ای در مطالعات مربوط به مدل‌های گردش عمومی جو برای مساعدت مطالعات تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گرفته است. قبل از انجام پردازش و ریزمقیاس‌نمایی به روش عامل تغییر برای دوره‌های آینده می‌بایست از توانایی مدل برای شبیه‌سازی آینده اطمینان حاصل کرد؛ بدین ترتیب ابتدا ریزمقیاس‌نمایی روی داده‌های تاریخی مدل به‌صورت زیر انجام می‌شود: برای این کار

داده‌های تاریخی می‌بایست به دو دوره تقسیم شوند: دوره اول به نام دوره پایه از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵ و دوره دوم به نام ارزیابی از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷. برای اصلاح و ریزمقیاس‌نمایی مدل در دوره ارزیابی از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$X_{cori} = x_{oi} * \frac{\mu_p}{\mu_b} \quad (1)$$

که در این رابطه،  $x_{cor,i}$  نشان‌دهنده داده‌های ریزمقیاس‌شده در دوره ارزیابی،  $x_{o,i}$  نشان‌دهنده داده‌های شاهد در دوره پایه،  $\mu$  نشان‌دهنده میانگین داده‌ها و زیرنویس‌های  $\mathbf{p}$ ،  $\mathbf{b}$  و  $\mathbf{O}$  به ترتیب نشان‌دهنده داده‌های شبیه‌سازی شده در دوره پایه و دوره ارزیابی و داده‌های شاهد است.

$\Delta T_i$  سناریوی تغییر اقلیم مربوط به دما برای متوسط درازمدت ۲۰ ساله (۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ و ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰) برای هر ماه،  $\bar{T}_{AOGCM, Fut, i}$  متوسط دمای ۲۰ ساله شبیه‌سازی‌شده توسط هر مدل AOGCM در دوره آبی برای هر ماه و  $\bar{T}_{AOGCM, Base, i}$  متوسط دمای شبیه‌سازی‌شده توسط هر مدل AOGCM در دوره مشاهداتی برای هر ماه است. در رابطه (۳)، برای بارندگی موارد یادشده برقرار است. همچنین  $T$  سری زمانی حاصل از سناریوی اقلیمی دما برای دوره آبی،  $T_{obs}$  سری زمانی دمای مشاهداتی در دوره پایه (۱۹۹۶ تا ۲۰۱۷) و  $\Delta T$  سناریوی تغییر اقلیم کوچک‌مقیاس شده است. برای بارندگی نیز موارد یادشده در رابطه (۵) برقرار است.

$$\Delta T_i = \bar{T}_{AOGCM Fut, i} - \bar{T}_{AOGCM Base, i} \quad (2)$$

$$\Delta P_i = \left( \frac{\bar{P}_{AOGCM Fut, i}}{\bar{P}_{AOGCM Base, i}} \right) \quad (3)$$

$$T = T_{obs} + \Delta T \quad (4)$$

$$P = P_{obs} \times \Delta P \quad (5)$$

لذا برای محاسبه سناریوی تغییر اقلیم در هر مدل مقادیر «اختلاف» برای دما رابطه (۲) و (۴) و «نسبت» برای بارندگی (رابطه ۳ و ۵) برای متوسط درازمدت هر ماه در دوره آبی و دوره شبیه‌سازی‌شده پایه با استفاده از همان مدل (۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵) برای هر سلول از شبکه محاسباتی محاسبه می‌شود (دیاز-نیتو و ویلی، ۲۰۰۵):

1. Fifth Assessment Report (AR5)  
2. Global Circulation Models (GCMs)  
3. Change Factor (CF)

## مدل LARS-WG

مذکور آورده شده است:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sigma_s \times \sigma_o} \right]^2 \quad (8)$$

که در آن،  $O_i$  داده‌های مشاهداتی،  $S_i$  داده‌های برآوردشده،  $\bar{O}$  و  $\bar{S}$  میانگین داده‌های مشاهداتی و برآوردشده و  $\sigma_s$  و  $\sigma_o$  انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و برآوردشده است. مقادیر RMSE و MAE معرف دقت در بسیاری از روش‌های آماری است. هرچه این مقادیر به صفر نزدیک‌تر باشند، نشان‌دهنده دقت بالای مدل است.  $R^2$  بیانگر ارتباط داده‌های مشاهداتی و محاسباتی است. دامنه این پارامتر بین صفر تا یک است؛ هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده ارتباط قوی بین دو گروه است. دامنه ضریب نش-ساتکلیف (NSE) بین صفر تا یک قابل قبول و بهترین حالت زمانی است که ضریب NSE برابر یک باشد.

در نهایت، پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی توسط روش ریزمقیاس‌نمایی عامل تغییر و مدل LARS-WG، تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 طی دو دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ و ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ انجام شد.

## شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص بارش استاندارد شده شاخصی است که بر اساس احتمال بارش برای مقیاس‌های زمانی متفاوت به کار برده می‌شود. همچنین رخداد شرایط خشکسالی را قبل از وقوع، پیش‌بینی کرده و به تخمین شدت خشکسالی کمک می‌کند. با توجه به این موضوع، مک کی<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۵) شاخص استاندارد شده را در مقیاس‌های زمانی سه، شش، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه کردند. محاسبه SPI برای هر مکان بر اساس ثبت بارش‌های طولانی مدت در دوره‌های زمانی مورد نظر پایه‌گذاری شده است. این شاخص با استفاده از رابطه (۹) قابل محاسبه است.

مدل LARS-WG یکی از معروف‌ترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هواست که برای تولید مقادیر بارش، تابش، درجه حرارت‌های بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه برای اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود (راسکو<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۱؛ سمنو<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۹۸؛ سمنو و بارو<sup>۳</sup>، ۲۰۰۲). خروجی‌های این مدل شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و تابش هستند. تولید داده‌های مدل LARS-WG در سه مرحله انجام می‌شود که عبارت‌اند از: کالیبره کردن، ارزیابی و ایجاد داده‌های هواشناسی (بابایان، ۲۰۰۵؛ بابایان و نجفی، ۲۰۰۷).

مرحله کالیبراسیون، دربرگیرنده تمام پارامترهای لازم برای تولید داده‌های مصنوعی است. LARS-WG خودهمبستگی میانگین بین داده‌های دیده‌بانی شده را برای مدل کردن دمای بیشینه و کمینه و تابش به کار می‌برد (سمنو و همکاران، ۱۹۹۸). گام دوم در اجرای مدل، ارزیابی مدل است؛ در این مرحله باید تعیین شود که آیا این مدل برای تولید داده‌های تصادفی در مکان مورد مطالعه مناسب است یا خیر؟ بعد از کالیبره کردن و ارزیابی مدل، باید پارامترهای هواشناسی تولید شوند. برای تولید داده‌های آب‌وهوای مصنوعی نیاز به یک سناریوی تغییر اقلیم است (ریچاردسون و رایت<sup>۴</sup>، ۱۹۸۴). در این تحقیق، دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۴ برای واسنجی و دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۷ برای صحت‌سنجی مدل در نظر گرفته شد و نتایج به‌دست‌آمده از مدل با مقادیر مشاهده‌شده مقایسه و نحوه عملکرد مدل ارزیابی شد.

## ارزیابی عملکرد مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی

به‌منظور ارزیابی قابلیت هر دو مدل از معیارهای آماری ضریب تبیین  $R^2$ ، مجذور مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش ساتکلیف (NSE) استفاده شد (روابط ۶ تا ۸) (دش<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). در ادامه، روابط موجود برای معیارهای

1. Rasco
2. Semenov
3. Semenov and Barrow
4. Richardson and Wright
5. Dash

(۱۳۷۵ تا ۱۳۹۶ شمسی) برای پارامترهای دما و بارش نشان می‌دهد. با توجه به اینکه هم برای دما و هم بارش، مقدار  $p$ -value کمتر از سطح معنی‌دار ۰/۰۵ است، فرض صفر رد شده و فرض ۱ پذیرفته می‌شود؛ از این رو روند بارش منفی و کاهشی و روند دما مثبت و افزایشی است و در سطح اعتماد ۹۵٪ معنی‌دار می‌باشد. شکل (۲) روند تغییرات دما و بارش را در دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۷ نشان می‌دهد.

جدول (۳): نتایج حاصل از آزمون من-کندال در ایستگاه سینوپتیک مروست (دوره آماری ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۷)  
Table (3): The results of Mann-Kendall test in Marvast synoptic station (1996-2017)

پارامتر	Kendall's tau	p-value (Two-tailed)	alpha
دما	0.028	0.0033	0.05
بارش	-0.015	0.014	0.05

### ارزیابی عملکرد مدل‌ها

جدول (۴) آماره‌های خطا حاصل از پارامترهای اقلیمی مشاهداتی و مدل‌سازی شده توسط مدل LARS-WG و عامل تغییر را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از عملکرد مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG و عامل تغییر، به منظور ارزیابی قابلیت آن‌ها در ریزمقیاس‌نمایی دو پارامتر بارش و دمای متوسط طی دوره پایه حاکی از آن است که این دو مدل از قابلیت بالایی در شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی شهرستان خاتم برای دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ و ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ برخوردارند (جدول ۴). همچنین بر طبق نتایج آماره‌های خطا (جدول ۴) و اشکال (۳) و (۴)، مدل LARS-WG برای هر دو پارامتر دما و بارش، دارای عملکرد بالاتری نسبت به روش عامل تغییر است.

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{SD} \quad (9)$$

که در آن،  $P_i$  مقدار بارش در دوره مورد نظر،  $\bar{P}$  میانگین درازمدت بارش برای دوره مورد نظر و  $SD$  انحراف معیار مقدار بارش است. برای تعیین درجه خشکسالی در سال‌های مختلف لازم است که آستانه‌هایی برای  $SPI$  تعریف شوند. جدول (۲) اولین طبقه‌بندی از شاخص بارش استاندارد شده ( $SPI$ ) را که در سال ۱۹۹۳ و ۱۹۹۵ توسط مک کی ایجاد شده است، نشان می‌دهد (مک کی و همکاران، ۱۹۹۵). در این مطالعه، برای محاسبه مقادیر  $SPI$  در دوره پایه و دوره آبی از نرم‌افزار DIP استفاده شد. همچنین برای محاسبه این شاخص در دوره آبی، از داده‌های بارش شبیه‌سازی شده در دو دوره آبی بر اساس دو مدل گردش عمومی جو استفاده شد.

جدول (۲): طبقه‌بندی شاخص خشکسالی  $SPI$  (مک کی و همکاران، ۱۹۹۵)

Table (2): SPI Drought Index Classification (McKee and et al., 1995)

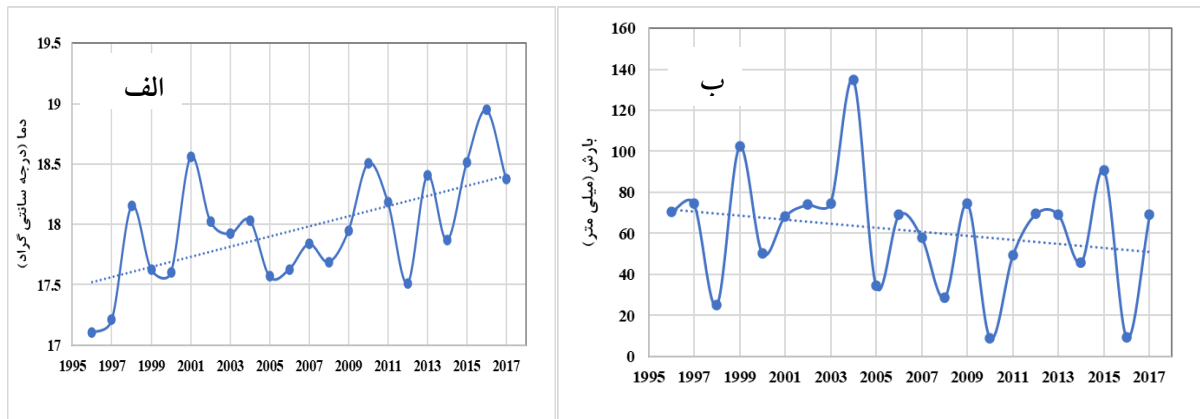
مقادیر شاخص	طبقه‌بندی
بزرگتر از ۲	به شدت مرطوب
۱/۵ تا ۱/۹۹	خیلی مرطوب
۱/۰ تا ۱/۴۹	رطوبت متوسط
۰ تا ۰/۹۹	نرمال
۰ تا ۰/۹۹	خشکسالی خفیف
۱/۴۹ تا ۱/۰	خشکسالی متوسط
۱/۹۹ تا ۱/۴۹	خشکسالی شدید
کمتر از ۲/۰	خشکسالی بسیار شدید

### نتایج

#### بررسی روند پارامترهای اقلیمی

جدول (۳) نتایج حاصل از آزمون من-کندال در ایستگاه‌های سینوپتیک مروست را در دوره آماری ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۷ میلادی





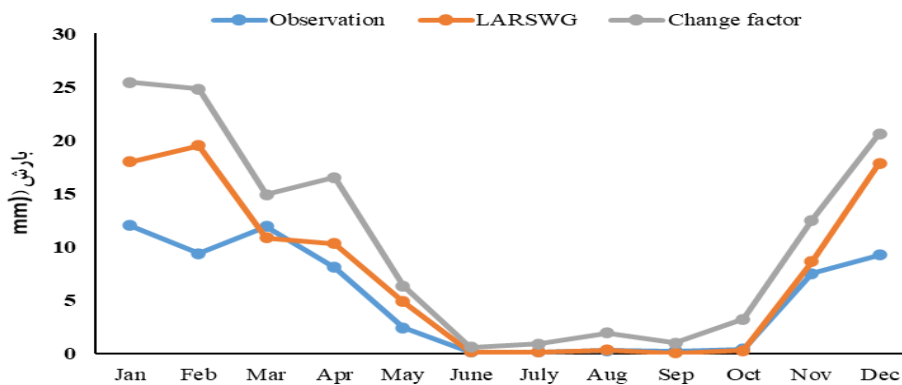
شکل (۲): روند تغییرات پارامترهای اقلیمی در دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۷ الف- دما ب- بارش

Figure (2): The trend of climatic parameters changes during 1996-2017 a) temperature b) precipitation

جدول (۴): معیارهای ارزیابی عملکرد مدل‌ها در پیش‌بینی بارش و دمای روزانه (۱۹۹۶ تا ۲۰۱۷)

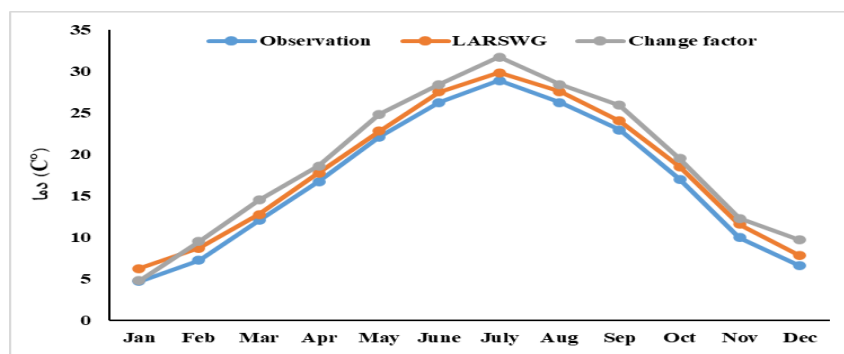
Table (4): Performance evaluation of models in predicting daily precipitation and temperature (1996-2017)

NSE	RMSE	R <sup>2</sup>	پارامتر	مدل گردش عمومی جو	مدل ریزمقیاس‌نمایی	ایستگاه
0.83	4.34	0.72	بارش	BNU-ESM	عامل تغییر	مروست
0.89	1.54	0.84	دما			
0.91	1.09	0.88	بارش	HadGEM2-ES	LARS-WG	
0.98	0.48	0.92	دما			



شکل (۳): مقایسه بین بارش متوسط ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل LARS-WG و روش عامل تغییر در مرحله صحت‌سنجی

Figure (3): Comparison between the observed and simulated monthly average precipitation by LARS-WG model and CF method in the validation step



شکل (۴): مقایسه بین دمای متوسط ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل LARS-WG و روش عامل تغییر در مرحله صحت‌سنجی

Figure (4): Comparison between the observed and simulated monthly average temperature by LARS-WG model and CF method in the validation step

نتایج تغییرات متغیرهای بارش، دما در دوره‌های آبی

نسبت به دوره پایه

نتایج تغییرات دما (°C) و درصد تغییرات بارش در دوره آبی نسبت به دوره پایه برای هر دو مدل ریزمقیاس‌نمایی عامل تغییر (دلتا) و LARS-WG، تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای ایستگاه مروست در جدول (۵) و (۶) ارائه شده است. نتایج بررسی روند تغییرات دما و بارش سالیانه در دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ بر اساس روش ریزمقیاس‌نمایی دلتا و مدل BNU-ESM حاکی از آن است که متوسط دمای سالیانه، به‌ترتیب به میزان ۱/۰۶، ۱/۸۳ و ۲/۱۳ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP 8.5، افزایش و بارش متوسط سالیانه، به‌ترتیب به میزان ۱۴، ۲۲/۱ و ۳۲/۹ درصد تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP 8.5 کاهش می‌یابد. همچنین نتایج بررسی روند تغییرات دما و بارش سالیانه در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ بر اساس مدل BNU-ESM حاکی از آن است که متوسط دمای سالیانه، به‌ترتیب به میزان ۱/۰۸۴، ۱/۹۴ و ۲/۸۲ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP 8.5 افزایش و بارش متوسط سالیانه، به‌ترتیب به میزان ۲۴/۲، ۳۳/۹ و ۴۸/۱ درصد تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP 8.5 نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد (جدول ۶). نتایج تحلیل تغییرات دما و بارش سالیانه در دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ بر اساس مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG و مدل گردش عمومی HadGEM2-ES حاکی از آن است که متوسط دمای سالیانه، به‌ترتیب به میزان ۱/۷۵، ۱/۹۴ و ۲/۱۲ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP 8.5،

افزایش و بارش متوسط سالیانه، به‌ترتیب به میزان ۶/۱، ۱۴/۲ و ۳۵/۲٪ تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP 8.5 کاهش می‌یابد. همچنین نتایج تحلیل تغییرات دما و بارش سالیانه در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ بر اساس مدل LARS-WG حاکی از آن است که متوسط دمای سالیانه، به‌ترتیب به میزان ۲/۰۷، ۲/۷۱ و ۳/۸۷ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP 8.5 افزایش و بارش متوسط سالیانه به‌ترتیب به میزان ۲۶/۸، ۳۵/۵ و ۵۱/۵٪ تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP 8.5 نسبت به دوره پایه، کاهش می‌یابد (جدول ۵). اشکال (۵) و (۶) مقادیر میانگین بارش و دمای ماهانه دوره پایه و دوره آبی تحت سناریوهای RCP در دو مدل گردش عمومی BNU-ESM و HadGEM2-ES نشان می‌دهد. مقایسه مقادیر متوسط دمای ماهانه با دوره پایه برای هر دو مدل نشان می‌دهد که دما در دوره آبی در اکثر ماه‌ها و تمامی سناریوها بیشتر از دوره پایه خواهد بود. بر طبق نتایج بیشترین افزایش دما تحت سناریو RCP8.5 رخ داده است و افزایش دما در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ بیشتر از دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ می‌باشد. بر اساس مقایسه مقادیر بارش ماهانه با دوره پایه برای هر دو مدل مشخص شد که بارش در دوره آبی در اکثر ماه‌ها و تمامی سناریوها کاهش خواهد یافت. بیشترین کاهش بارش طی سناریو RCP8.5 در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ اتفاق خواهد افتاد. مطابق با تغییرات دمایی و نسبت تغییرات بارش برای هر دو مدل در دو دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ و ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰، می‌توان دریافت که در هر دو دوره آبی، افزایش دما در شهرستان خاتم همسو با گرمایش جهانی است و به تبع آن منجر به کاهش بارندگی در سطح منطقه می‌شود.

جدول (۵): تغییرات دما (°C) و نسبت تغییرات بارش (٪) در دوره آبی نسبت به دوره پایه بر اساس مدل HadGEM2-ES در ایستگاه سینوپتیک مروست

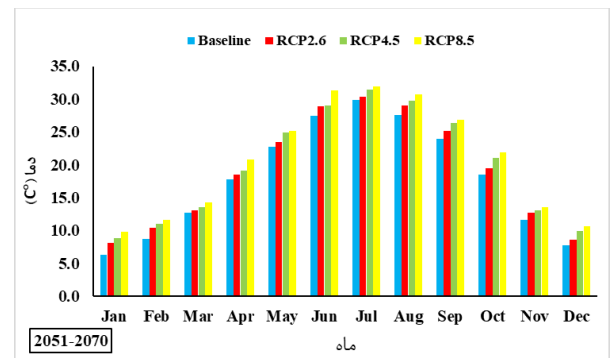
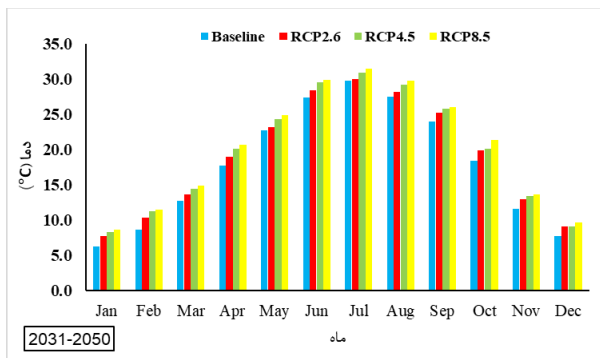
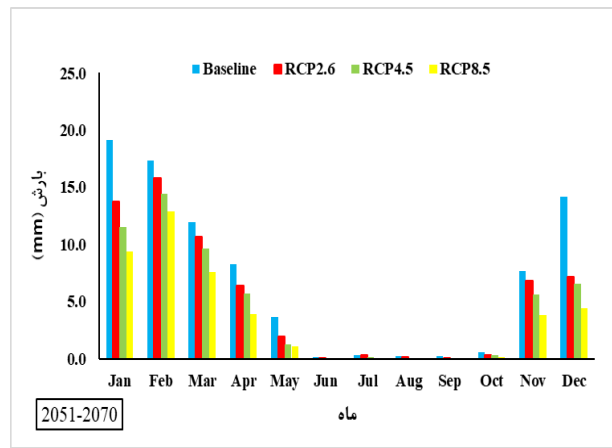
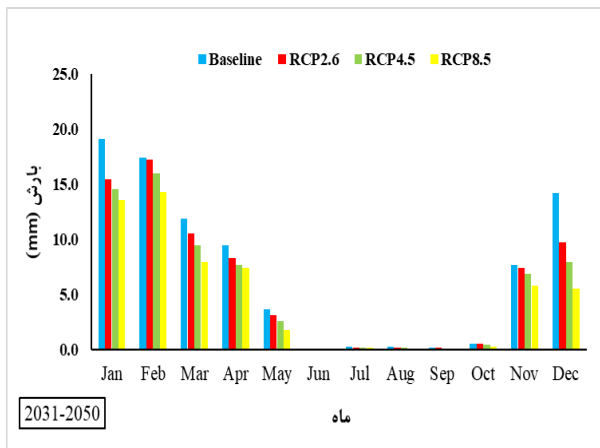
Table (5): Temperature changes (°C) and ratio of precipitation changes (%) in the future period compared to the base period based on HadGEM2-ES in Marvast synoptic station

پارامتر	دوره	سناریو	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
دما	2031-2050	RCP2.6	1.09	1.16	2.02	1.88	2.18	1.40	1.70	1.53	1.84	2.12	2.36	1.71
		RCP4.5	1.38	1.36	2.16	2.00	2.58	1.90	2.21	1.68	1.94	1.74	2.40	1.93
		RCP8.5	1.57	1.61	2.37	2.22	2.31	1.98	2.33	2.03	2.34	1.72	2.76	2.20
	2051-2070	RCP2.6	1.16	1.90	2.20	2.41	2.41	2.14	2.32	2.05	2.18	1.80	2.32	2.02
		RCP4.5	2.04	1.98	2.72	2.44	2.82	2.49	3.03	2.78	3.06	2.83	3.51	2.85
		RCP8.5	3.22	3.23	3.86	3.58	3.99	3.81	4.08	3.82	4.08	4.01	4.85	3.92
بارش	2031-2050	RCP2.6	-5.40	-6.85	-16.2	-2.7	-5.21	-8.71	-11.4	-3.8	-28.3	-12	-2.7	-1.05
		RCP4.5	-11.2	-21.8	-21	-2.91	-33.9	-17.8	-50.8	-15.3	-57.5	-22.4	-8.93	-5.73
		RCP8.5	-31.8	-45.2	-36.9	-28.9	-50.5	-30.6	-60.6	-50	-74.4	-37.9	-53.0	-14.86
	2051-2070	RCP2.6	-28.5	-18.3	-21	-38.4	-42.8	-31.5	-55.7	-7.69	-61.6	-25.8	-14.7	-34.73
		RCP4.5	-37.2	-32.4	-21.9	-41.6	-51.7	-50.7	-65.4	-57.6	-89.7	-34.7	-28.6	-42.03
		RCP8.5	-46.6	-46	-53.9	-61.6	-67.1	-60.7	-65.5	-79.2	-92.3	-55.1	-67.9	-42.14

جدول (۶): تغییرات دما (°C) و نسبت تغییرات بارش (%) در دوره آتی نسبت به دوره پایه بر اساس مدل BNU-ESM در ایستگاه سینوپتیک مروست

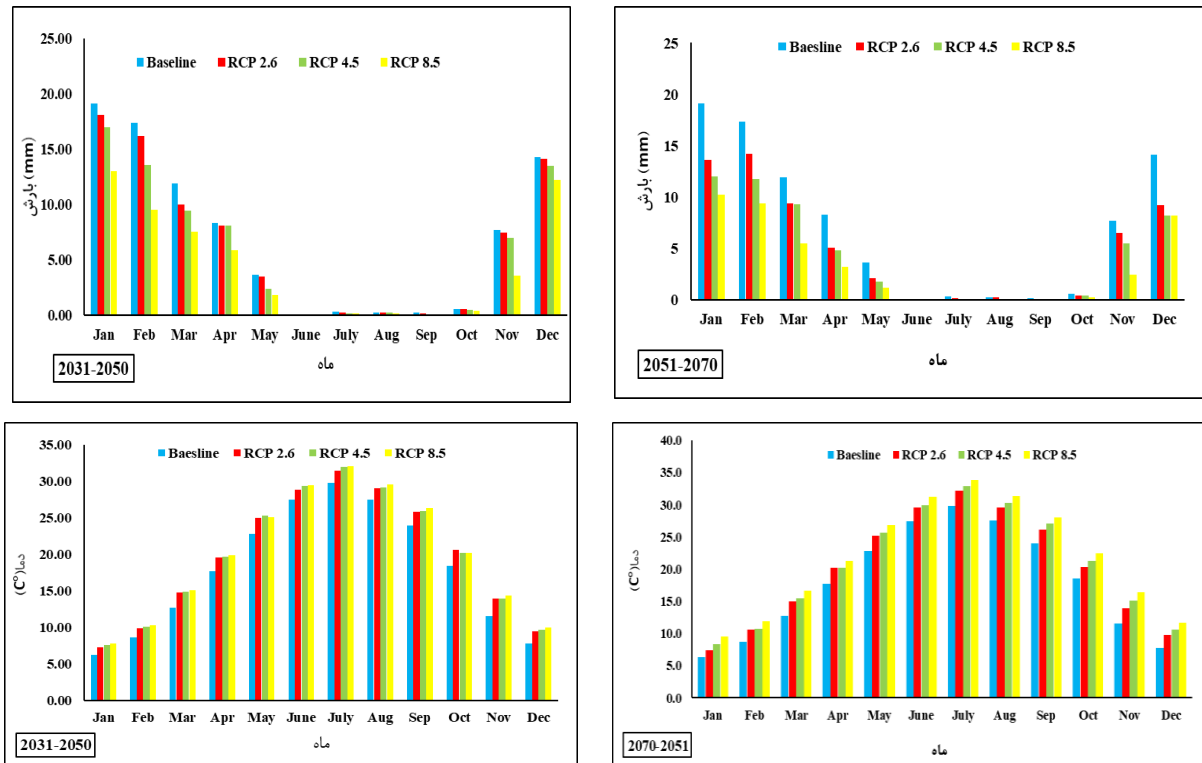
Table (6): Temperature changes (°C) and ratio of precipitation changes (%) in the future period compared to the base period based on BNU-ESM in Marvast synoptic station

پارامتر	دوره	سناریو	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
دما	2031-2050	RCP2.6	1.53	1.72	0.95	1.28	0.39	0.91	0.22	0.66	1.22	1.38	1.46	1.29
		RCP4.5	2.03	2.63	1.71	2.36	1.60	2.12	1.10	1.73	1.79	1.65	1.91	1.32
		RCP8.5	2.35	2.75	2.14	2.94	2.11	2.48	1.72	2.28	2.06	2.95	2.04	1.88
	2051-2070	RCP2.6	1.87	1.77	0.26	0.73	0.68	1.39	0.55	1.43	1.20	0.98	1.07	0.76
		RCP4.5	2.55	2.37	0.75	1.42	2.09	1.57	1.67	2.19	2.39	2.62	1.49	2.14
		RCP8.5	3.61	2.93	1.51	3.09	2.41	3.79	2.07	3.22	2.90	3.37	2.02	2.91
بارش	2031-2050	RCP2.6	-19.20	-0.92	-11.89	13.92	-14.75	-24.54	-31.15	-11.54	-21.72	-10.34	-3.74	-30.99
		RCP4.5	-23.80	-7.83	-20.57	-7.95	-28.77	-36.10	-40.98	-34.62	-43.72	-18.97	-10.31	-43.89
		RCP8.5	-28.94	-17.99	-33.16	-11.24	-50.55	-66.22	-50.82	-69.23	-51.40	-53.45	-24.60	-60.69
	2051-2070	RCP2.6	-28.23	-9.00	-10.11	-23.43	-46.03	-54.36	-11.48	-50.00	-52.93	-46.55	-11.23	-49.63
		RCP4.5	-39.76	-17.03	-18.93	-31.33	-66.03	-72.61	-57.38	-66.54	-63.67	-53.45	-27.04	-53.77
		RCP8.5	-50.76	-25.70	-36.07	-53.13	-70.41	-81.74	-71.48	-75.38	-73.40	-79.31	-50.49	-69.01



شکل (۵): میانگین بارش و دمای ماهانه دوره پایه و دوره آتی تحت سناریوهای RCP در مدل BNU-ESM

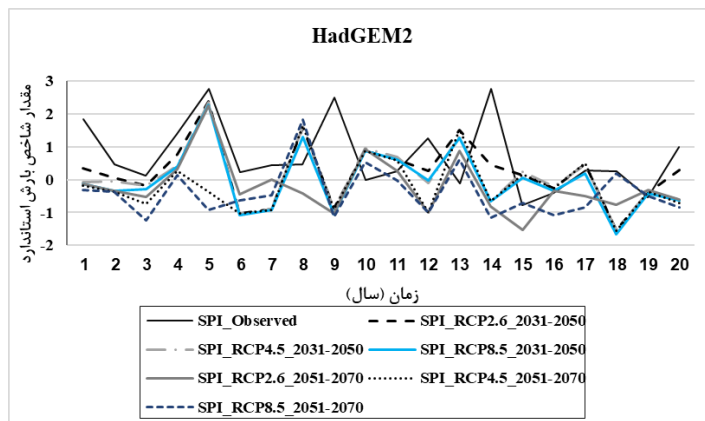
Figure (5): Average monthly precipitation and temperature in baseline period and future period under RCP scenarios based on BNU-ESM model



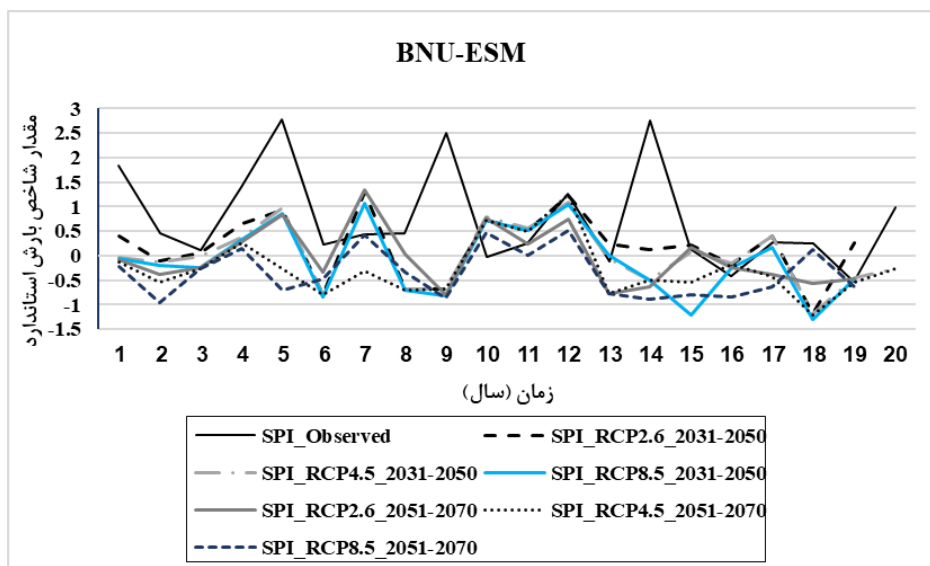
شکل (۶): میانگین بارش و دمای ماهانه دوره پایه و دوره آتی تحت سناریوهای RCP در مدل HadGEM2-ES  
 Figure (6): Mean monthly precipitation and temperature in baseline period and future period under RCP scenarios based on HadGEM2-ES model

به دوره پایه کاهش یافته و در هر دو دوره آتی خشکسالی هواشناسی افزایش می‌یابد (شکل ۷). همچنین بر طبق شکل (۸)، مقادیر SPI سالانه برای مدل BNU-ESM، در دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ و ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ تحت هر سه سناریو نسبت به دوره پایه کاهش چشمگیری نشان می‌دهد که این کاهش نسبت به مدل HadGEM2 بیشتر است. به طور کلی، نتایج هر دو مدل حاکی از تشدید خشکسالی هواشناسی در دوره‌های آتی تحت هر سه سناریو می‌باشد.

بررسی اثر تغییر اقلیم روی خشکسالی پس از تعیین پارامترهای دما و بارش برای دوره‌های آتی می‌توان شاخص خشکسالی SPI را برای دوره‌های آتی و سه سناریو مشخص کرد. در شکل (۷) و (۸) مقادیر SPI با مقیاس زمانی ۲۴ ماهه برای سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP 8.5 و دو دوره آتی در دو مدل HadGEM2 و BNU-ESM نشان داده شده است. مقادیر SPI سالانه برای مدل HadGEM2 در هر دو دوره آتی تحت هر سه سناریو نسبت



شکل (۷): مقادیر شاخص SPI سالانه برای دو دوره آتی ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ و ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ و مدل HadGEM2 تحت سناریوهای RCP  
 Figure (7): Annual SPI index values for the two periods of 2031-2050 and 2051-2070 and HadGEM2 model under RCP scenarios



شکل (۸): مقادیر شاخص SPI سالانه برای دو دوره آتی ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ و ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ و مدل BNU-ESM تحت سناریوهای RCP  
Figure (8): Annual SPI index values for the two periods of 2031-2050 and 2051-2070 and BNU-ESM model under RCP scenarios

### بحث و نتیجه گیری

دو دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ و ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ به ترتیب تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 کاهش می‌یابد، به طوری بیشترین کاهش در سناریوی RCP 8.5 رخ داده است که با نتایج جی واتس<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۹) در حوزه آبخیز بالادست رودخانه اردن مطابقت دارد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان‌دهنده امکان رخداد خشکسالی‌هایی با شدت بیشتر در دوره‌های شبیه‌سازی شده آتی توسط مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG و روش عامل تغییر است، به طوری که با نتایج مطالعات لوکاس و همکاران (۲۰۰۸)، لبلدزکی<sup>۲</sup> (۲۰۰۶) و صالح پورجم و همکاران (۱۳۹۳) همخوانی دارد. افزایش شدت خشکسالی در دوره‌های آتی تحت تأثیر افزایش دما و کاهش بارش می‌باشد که نتایج نوده فراهانی و همکاران (۱۳۹۷) نیز این امر را تأیید می‌کند. بر طبق نتایج، در بین دو مدل GCM، مدل BNU-ESM کمترین مقدار بارش، بیشترین مقدار دما و بیشترین تعداد سال با خشکسالی شدید را در مقایسه با مدل HadGEM2 پیش‌بینی می‌کند. با توجه به خشک و نیمه‌خشک بودن این شهرستان، برای کاهش اثرات تغییر اقلیم می‌توان از راهکارهای لازم از قبیل تدابیری برای اصلاح نظام آبیاری، روش‌هایی به‌منظور کاهش تبخیر و اصلاح نظام کشت استفاده کرد.

در پژوهش حاضر به‌منظور بررسی تغییر اقلیم بر پارامترهای دما، بارش و خشکسالی در شهرستان خاتم از روش ریزمقیاس‌نمایی عامل تغییر (مدل گردش عمومی جو BNU-ESM) و مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG (مدل گردش عمومی HadGEM2-ES) و سناریوهای جدید انتشار در دو بازه آینده نزدیک (۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰) و دور (۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰) بهره گرفته شد. همچنین بر اساس شاخص‌های آماری  $R^2$ ، RMSE و NSE به مقایسه عملکرد دو مدل مذکور در ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای اقلیمی پرداخته شد. نتایج ارزیابی دقت دو مدل نشان داد که هر دو مدل کارایی لازم را در پیش‌بینی بارش و دما در دوره آتی دارا هستند که با نتایج شدیدی و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی تغییرات اقلیمی استان کرمان مطابقت دارد. همچنین بر طبق نتایج آماره‌های خطا، مدل LARS-WG دارای عملکرد بهتری نسبت به روش عامل تغییر (دلتا) در ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای بارش و دما بوده است. نتایج تغییرات دمایی در سطح این دو دوره در هر دو مدل نشان داد که این شهرستان متأثر از گرمایش جهانی می‌باشد؛ به‌گونه‌ای که تغییرات دمایی حاکی از افزایش دما در دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ و ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ به ترتیب در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 بوده است. همچنین بررسی تغییرات بارندگی در هر دو مدل نشان داد که بارندگی در هر

1. Givati  
2. Labedzki

## منابع

- Abbasi, F., Malbousi, Sh., Babaeian, I., Asmry, M. and Borhani, R., 2010. Prediction of climate change in the period of 2039-2010 in South Khorasan, using statistical downscaling model output ECHO-G. *Journal of Soil and Water (Agricultural Sciences and Technology)*, 24(2), 233-218 (in Farsi).
- Angelidis, P., Maris, F., Kotsovinos, N. and Hrissanthou, V., 2012. Computation of drought index SPI with alternative distribution functions. *Water resources management*, 26(9), 2453-2473.
- Babaian, I., 2005. Preliminary study and evaluation of Weather generator models Case study: Evaluation of LARS-WG model in selected stations in Khorasan province, Climatological Research Institute, Project Report.
- Babaian, I. and Najafi Nik, Z., 2007. Introducing and evaluating the LARS-WG model for modeling the climatological parameters of Khorasan province in 1961-2003, *Journal of Nivar*, 63, 50-67.
- Dash, S.S., Sahoo, B. and Raghuwanshi, N.S., 2019. A SWAT-Copula based approach for monitoring and assessment of drought propagation in an irrigation command. *Ecological engineering*, 127, 417-430.
- Diaz-Nieto, J. and Wilby, R.L., 2005. A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom, *Climatic Change*, 69, 245-268.
- Dubrovsky, M., Svoboda, M. D., Trnka, M., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., Zalud, Z. and Hlavinka, P., 2009. Application of relative drought indices in assessing climate-change impacts on drought conditions in Czechia. *Theoretical and Applied Climatology*, 96(1), 155-171.
- Givati, A., Thirel, G., Rosenfeld, D. and Paz, D., 2019. Climate change impacts on streamflow at the upper Jordan River based on an ensemble of regional climate models. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 21, 92-109.
- IPCC., 2007. *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, 1-18.
- IPCC., 2013. Summary for policymakers. PP 3-29 In: T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley, (Eds.), *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge.
- Jahanbakhsh Asl, S., Khorshiddoust, A., Hossein Alinejad, M. and Pourasghar, F., 2016. Impact of Climate Change on Precipitation and Temperature by Taking the Uncertainty of Models and Climate Scenarios (Case Study: Shahrchay Basin in Urmia). *Journal of Hydrogeomorphology*. 3 (7), 107-122 (In Persian).
- Kamal, A. R. and Massah Bavani, A. R., 2012. Comparison of future uncertainty of AOGCM-TAR and AOGCM-AR4 models in the projection of runoff basin. *Journal of earth and space physics*. 38(3): 175-188.
- Karamouz, M., Fallahi, M., Nazif, S. and Rahimi Farahani, M., 2009, "Long Lead rainfall prediction using statistical downscaling and artificial neural network modeling", *Journal of Sharif University of Technology*, 16: 165-171.
- Labeledzki, L., 2006. Estimation of local drought frequency in central Poland using the standardized precipitation Index (SPI), *Irrigation and Drainage*, 56, 67-77.
- Lee, S. H., Yoo, S. H., Choi, J. Y. and Bae, S., 2017. Assessment of the Impact of Climate Change on Drought Characteristics in the Hwanghae Plain, North Korea Using Time Series SPI and SPEI: 1981-2100. *MDPI* 9(579), 1-19.
- Loukas, A., Vasiliades, L. and Tzabiras, J., 2008. Climate change effects on drought severity. *Advances in Geosciences*. 17, 23-29.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J., 1995. Drought Monitoring with Multiple Time Scales, In Proc, 9th Conf. on Applied Climatology. January 15-20. American Meteorological Society. Massachusetts. pp 233-236.
- Moafimadani, F., Mosavibaygani, M. and Ansari, H., 2015. Prediction of Khorasan Razavi Province drought condition at 2011-2030 with LARS-WG downscaling model. *Geography and Environmental Hazard* 7(2), 157-171 (In Persian)
- Node Farahani, M.A., Rasekhi, A., Parmas, B. and Keshvari, A., 2018. The Effects of Climate Change on Temperature, Precipitation and Drought in Upcoming Period in Shadegan Basin. *Iran Water Resources Research*. 14(3), 160-173 (In Persian).
- Pourkarimi, Z., Moghaddasi, M., Mohseni Movahed, A. and Delavar, M. A. J. I. D., 2018. The Effect of Climate Change on the Hydrological and Agricultural Drought Characteristics in Zarinrehud Basin Using SRI and SSWI Indices and SWAT Model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(5), 1145-1157. (In Persian)
- Quevauviller, P., 2011. Adapting to climate change: Reducing water-related risks in Europe-EU policy and research considerations. *Environmental Science and Policy* 14(7), 722-729.
- Rasco, P., Szeidl, L. and Semenov, M. A., 1991. A serial approach to local stochastic models. *J. Ecological Modeling*, 57, 27-41.
- Richardson, C.W., Wright, D.A., 1984. WGEN: A

- model for generating daily weather variables. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8. USDA, Washington, DC.
24. Sadidi, J., Jafari Gadneh, M., Sajedi, H. and Hamzehzadeh, G., 2020. The Study of trend and prediction of temperature changes in arid and semi-arid regions (Case study: Kerman province), 14th Congress of the Geographical Association of Iran, Tehran.
25. Salajegheh, A., Rafiei Sardooi, E., Moghaddamnia, A.R., Malekian, A., Araghinejad, Sh., Khalighi Sigarodi and Saleh Pourjam, A., 2017. Performance assessment of LARS-WG and SDSM downscaling models in simulation of precipitation and temperature. Iranian journal of soil and water research. 48 (2): 253-262.
26. Salehpourjam, A., Mohseni Saravi, M. and Khalighi, Sh., 2015. Investigation of Climate Change Effect on Drought Characteristics in the Future Period using the HadCM3 model (Case Study: Northwest of Iran). Journal of Range and Watershed Management. 67 (4), 537-548 (in Persian).
27. Semenov, M. A. and Barrow, E. M., 2002. A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies: User Manual. Harpenden, Hertfordshire, UK.
28. Semenov, M. A., Brooks, R. J., Barrow, E. M. and Richardson, C. W., 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. Climate research, 10(2), 95-107.
29. Shaemi, A. and Habibinokhandan, M., 2009. Global warming and bio-ecological consequences. Ferdowsi University of Mashhad Press, 216 pp (in Persian).
30. Veijalainen, N., Ahopelto, L., Marttunen, M., Jääskeläinen, J., Britschgi, R., Orvomaa, M. and Keskinen, M., 2019. Severe drought in Finland: modeling effects on water resources and assessing climate change impacts. Sustainability, 11(8), 2450.

## Investigating the Effect of Climate Change on Future Temperature, Precipitation, and Droughts Using BNU-ESM and HadGEM2 Models

Ali Azareh<sup>1</sup>, Elham Rafiei Sarooi<sup>2\*</sup>, Meysam Jafari<sup>3</sup>

Received: 06/12/2020

Accepted: 14/03/2021

### Extended Abstract

**Introduction:** while global Climate Models (GCMs) are designed to assess climate change, they can only simulate large-scale atmospheric circulation model data. Therefore, these models' results need to be downscaled, for which there are different methods such as dynamical and statistical ones.

This study sought to investigate the effect of climate change on temperature, precipitation parameters, and drought in 2050-2031 and 2070-2051 periods in Khatam city using two general circulations models, namely BNU-ESM and HadGEM2. Moreover, as using only one downscaling model to achieve a perspective concerning the future climate of the study area with the slightest uncertainty does not seem logical, LARS-WG and Change Factor (Delta) were used as two downscaling models under RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios.

**Material and methods:** The Khatam city is located south of the Yazd province, Iran. In this study, the data obtained from the synoptic station of Marvast were applied. The historical data from 1996 to 2017 comprised the daily temperature and precipitation. Moreover, the data collected from two large-scale models including HadGEM2-ES and BNU-ESM and two statistical downscaling methods, i.e., LARS-WG and Change Factor (CF), were applied to simulate precipitation, temperature, and drought in Khatam city under three scenarios including RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 in 2031-2050 and 2051-2070 periods. Also, statistical indices such as R2, RMSE, and NSE were used to evaluate the accuracy of the CF method and the LARS-WG model. To assess the drought in the baseline period (1996-2017) and the two future periods, the standardized precipitation index (SPI) was used based on a 24-month scale.

**Results:** The results of temperature variations regarding 2031 to 2050 and 2051 to 2070 periods indicated that based on the LARS-WG model, the Khatam city would be affected by global warming, with temperature changes suggesting a 1.75, 1.94, and 2.12 °C increase from 2031 to 2050, and 2.07, 2.71, and 3.87 °C from 2051 to 2070 under the scenarios of RCP2.6, RCP4.5, and RCP8, respectively.

The results concerning annual precipitation variations based on the LARS-WG model showed that precipitation would be decreased by 6.1, 14.2, and 35.2% from 2030 to 2051, and by 26.8%, 35.5., and 51.5% from 2051 to 2070 under RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios, respectively. Also, investigating annual temperature and precipitation changes based on the BNU-ESM model suggested an increase in temperature by 1.06, 1.83, and 2.13 °C from 2031 to 2050, and by 1.084, 1.94, and 2.82 °C from 2051 to 2070 under the RCP2.6, RCP4.5, and RCP8 scenarios, respectively.

The results of annual precipitation variations based on the BNU-ESM model showed that precipitation would decrease by 14, 22.1, and 32.9% from 2030 to 2051 and 24.2%, 33.9, and 48.1% during 2051 to 2070 under RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios, respectively. It should be noted that after determining the climatic parameters for future periods, the SPI values for future periods and three scenarios can be determined.

1. Department of Geography, University of Jiroft, Kerman.

2. Department of Ecological Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Kerman; ellrafiei@ujiroft.ac.ir

3. Ph.D Student of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran

DOI: 10.22052/deej.2021.10.31.51



Moreover, the results indicated an increase in meteorological drought based on the HadGEM2 and BNU-ESM models for the two future periods under all scenarios compared to the baseline period. Also, the BNU-ESM showed higher drought compared to the HadGEM2 model.

**Discussion and conclusion:** as mentioned earlier, both downscaling models used in this study had a high accuracy in predicting future precipitation and temperature, which is consistent with the results found by Sadidi et al. (2020) in Kerman province, and the findings reported by Panahi and Khorramabadi (2020) in East Azerbaijan province. The study's findings concerning the two future periods' temperature changes in both models indicated that the Khatam city would be affected by global warming, indicating an increase in temperature from 2031 to 2050 and from 2051 to 2070 under RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios, respectively. Also, results regarding the precipitation changes in both models suggested a decrease in precipitation from 2031 to 2050 and from 2051 to 2070 under RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios, respectively, with the greatest decrease, occurred under the RCP 8.5 scenario, that is in accordance with the results found of Givati et al. (2019) in the upstream of the Jordan River. Moreover, the current study's results indicated the possibility of more severe droughts in future simulated periods by the LARS-WG downscaling model and CF method, which is compatible with the findings reported by Lucas and Et al. (2008), Lebedzki (2006), and Saleh Pourjam et al. (2014). It could be argued that the increase in the severity of drought in future periods is due to the increase in temperature and decrease in precipitation, which is also confirmed by the results found by Node Farahani et al. (2015). According to this study's results concerning the comparison of the two GCM models, it could be said that the BNU-ESM model can predict the lowest precipitation, the highest temperature, and the highest number of years regarding the severe drought compared to the HadGEM2 model.

**Keywords:** RCP scenarios, Drought, Change Factor, LARS-WG, Khatam city.