

ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارندگی مدل‌های اقلیمی CMIP₆ توسط نقشه رقومی ارتفاع (مطالعه موردی: استان یزد)

الهام مهدوی‌نژاد^۱، سید زین‌العابدین حسینی^{۲*}، حسین ملکی‌نژاد^۳، محمدحسن رحیمیان^۴، محمدامین اسدی^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۴

چکیده

یکی از مهم‌ترین اقدامات برای استفاده بهتر از داده‌های مدل‌های گردش عمومی (GCM) در مطالعات تغییر اقلیم، انجام ریزمقیاس‌سازی برای تبدیل آن‌ها از سلول‌های بزرگ به واحدهای کوچک‌تر و یا نقطه‌ای است. در این پژوهش روشی برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارندگی مدل‌های بزرگ‌مقیاس اقلیمی CMIP₆ ارائه شده است که در آن، از گرادیان بارش-ارتفاع و نقشه رقومی ارتفاع (DEM) استان یزد استفاده گردید تا داده‌های سه مدل اقلیمی TaiESM₁، ACCESS-CM₂ و CanESM₅ با دقت‌های مکانی ۱۱۸×۱۰۵ کیلومتر مربع، ۱۷۵×۱۳۸ کیلومتر مربع و ۲۷۰×۳۱۰ کیلومتر مربع را به دقت مکانی ۹۰×۹۰ متر مربع بهبود دهد. نتایج حاصل نشان داد که روش پیشنهادی برای ریزمقیاس‌نمایی بارش، کارایی نسبتاً متفاوتی در مدل‌های مختلف اقلیمی با دقت‌های مکانی مختلف دارد؛ به طوری که دقت این روش در مدل Tai-ESM₂ نسبت به مدل‌های Access-CM₂ و Can-ESM₅ به میزان بالاتری به دست آمد. همچنین براساس نتایج نهایی این تحقیق، میانگین بارندگی سالانه دهه‌های آتی استان یزد دارای روند افزایشی بوده و این مدل‌ها افزایش بارش ۱ تا ۲۳ درصد (میانگین ۱۳ درصد) نسبت به دوره پایه را پیش‌بینی می‌کنند. در بین سه مدل اقلیمی مذکور، بیشترین افزایش بارش‌ها توسط ACCESS-CM₂ پیش‌بینی شده و در بین چهار سناریوی SSP بیشترین افزایش بارش توسط سناریوی SSP_{3-7.0} پیش‌بینی شده است.

کلیدواژه‌ها: توپوگرافی زمین، گرادیان بارش-ارتفاع، نقشه بدون بُعد بارندگی، مدل‌های گردش عمومی، سناریوهای SSP.

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی دانشگاه یزد؛ <mailto:mahdavie30@gmail.com>
 ۲. دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی دانشگاه یزد، نویسنده مسئول؛ <mailto:zhosseini@yazduni.ac.ir>
 ۳. دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی دانشگاه یزد؛ malekinezhad.h@gmail.com
 ۴. استادیار مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران؛ <mailto:mhrahimian@gmail.com>
 ۵. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی دانشگاه یزد؛ amin.asadi4@gmail.com
- این مقاله برگرفته از رساله دکتری دانشگاه یزد است.

مقدمه

پدیده تغییر اقلیم که ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه گاز دی‌اکسید کربن در جو است، باعث تغییراتی در رژیم بارش، میزان رواناب، سرعت باد، تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین و دمای هوا می‌شود. در این راستا، توجه به تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر به‌علت پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و خسارت‌های مالی مربوط به رویدادهای جوی اهمیت خاصی پیدا کرده است. بر همین اساس نتایج و داده‌های شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی که با عنوان مدل‌های گردش عمومی^۱ (GCM) و یا مدل‌های گردش عمومی جوی و اقیانوسی^۲ (AOGCM) شناخته می‌شوند، می‌توانند در شناسایی، شبیه‌سازی و بررسی ابعاد و پیامدهای پدیده تغییر اقلیم و مدیریت مخاطرات محیطی به‌ویژه مخاطرات مرتبط با بارندگی و دمای هوای مورد استفاده قرار گیرند. این مدل‌ها تمامی روابط فیزیکی حاکم بر اجزای سیستم اقلیمی کره زمین شامل جوکره، یخ‌کره، زیست‌کره و آب‌کره را در نظر گرفته و این روابط پیچیده را در یک فضای سه‌بعدی در سطح کره زمین حل می‌کنند. اما به‌رغم اینکه خروجی مدل‌های گردش عمومی جو از معتبرترین روش‌ها برای مطالعات تغییر اقلیم‌اند، نتایج این مدل‌ها از دقت مکانی چندان مناسبی برای مطالعات اثر تغییر اقلیم در مقیاس‌های کوچک نظیر یک ایستگاه هواشناسی برخوردار نیستند؛ زیرا متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مدل‌های گردش عمومی جو مربوط به عرصه وسیعی بر روی زمین بوده و این عرصه با مساحت تقریبی صدها کیلومتر مربع، دارای تنوعی از توپوگرافی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی است که هر یک از این موارد می‌توانند بر توزیع مکانی متغیرهای اقلیمی در داخل این عرصه (نظیر توزیع مکانی بارندگی و یا دمای هوا) به‌طور اساسی تأثیرگذار باشند. برخی از این مدل‌ها نظیر HadCM3 حتی برای یک محدوده بزرگ نظیر یک استان تنها یک عدد ارائه می‌دهند. بنابراین تعمیم داده‌های اقلیمی از یک مقیاس بزرگ به مقیاس‌های کوچک‌تر

نظیر یک ایستگاه (نقطه)، محدوده شهری، دشت، زیرحوزه و یا حوزه آبریز نیازمند تدابیر ویژه است. این تدابیر که به ریزمقیاس‌سازی^۳ معروف‌اند، مهم‌ترین گام برای استفاده از داده‌های مدل‌های گردش عمومی در مطالعات تغییر اقلیم محسوب می‌شوند. در حال حاضر از روش‌های مختلفی برای ریزمقیاس‌سازی داده‌های مدل‌های گردش عمومی از مقیاس سلول بزرگ به مقیاس‌های کوچک و نقطه‌ای استفاده می‌شود که عمدتاً بر پایه تحلیل آماری نقطه‌ای ایستگاه‌های هواشناسی زمینی و ارتباط این آمار با اعداد ارائه‌شده توسط نتایج GCM در مقیاس بزرگ است. یکی از متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده در این زمینه، روش آماری^۴ است که توسط نرم‌افزارهایی نظیر SDSM یا Lars-WG (سمنو^۵ و همکاران، ۱۹۹۸) انجام می‌شود. به‌طور عمومی، روش‌های آماری ریزمقیاس‌نمایی به سه دسته عمده تقسیم می‌شوند که شامل مولدهای آب‌وهوا^۶ (WG)، توابع انتقالی^۷ (TF) و الگوهای آب‌وهوایی^۸ (WT) هستند (ویلبی^۹ و همکاران، ۲۰۰۴). اخیراً مولدهای آب‌وهوایی به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های تولید داده‌های اقلیمی براساس معیارهای معین و مناسب به کار گرفته شده‌اند (سیمونوویچ و لی^{۱۰}، ۲۰۰۳؛ یاتس^{۱۱} و همکاران، ۲۰۰۳). مولدهای آب‌وهوا در واقع مدل‌های تصادفی هستند که به تولید سری پیوسته داده‌های هواشناسی در منطقه مورد نظر می‌پردازند و به دو دسته پارامتریک و ناپارامتریک طبقه‌بندی می‌شوند. مدل‌هایی نظیر WGEN و Lars-WG از نوع پارامتریک محسوب شده اما به‌عنوان مدل‌های تک‌ایستگاهی شناخته شده و قادر به شبیه‌سازی هم‌زمان داده‌های هواشناسی در چند ایستگاه نیستند. علاوه بر این، این مدل‌ها در بررسی تغییرپذیری سالانه میانگین ماهانه متغیرها دارای ایراد هستند (صفری و خاتمی، ۲۰۱۹؛ جیا^{۱۲} و

3. Downscaling
4. Statistical Downscaling
5. Semenov
6. Weather Generators (WG)
7. Transfer Functions (TF)
8. Weather Typing (WT)
9. Wilby
10. Simonovic & Li
11. Yates
12. Jia

1. General Circulation Models (GCM's)
2. Atmospheric and Oceanic General Circulation Models (AOGCM's)

است. پس از ارزیابی و تعیین مدل‌های مناسب توسط کشورها، به هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم^۵ یا IPCC ارائه می‌شوند و این هیئت آن‌ها را به صورت گزارش‌های ارزیابی^۶ یا AR در بین جوامع علمی جهان منتشر می‌کند. آخرین مدل اقلیمی ارائه‌شده توسط این هیئت مدل CMIP₆ است که در سال ۲۰۱۶ میلادی به جهان معرفی شده و در آن جدیدترین مدل‌های AOGCM مورد ارزیابی و ارائه قرار گرفته‌اند. برای تصویرسازی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی توسط مدل‌های اقلیمی CMIP₆ نیاز به سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای است. تاکنون چهار سری از سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم با نام‌های IS92^۷، SRES^۸، RCP^۹ و SSP^{۱۰} ارائه شده است که جدیدترین آن‌ها (با عنوان سناریوهای SSP) در سال ۲۰۲۰ میلادی معرفی شده‌اند. در مدل‌های اقلیمی ارائه‌شده در CMIP₆ و همچنین گزارش ششم IPCC (AR₆) از سناریوهای SSP استفاده شده است. هر یک از مدل‌های CMIP₆ دارای دقت مکانی متفاوتی هستند؛ به طوری که هر سلول (زون) از این مدل‌ها دارای ابعاد مختلف نظیر ۱۱۸×۱۰۵ کیلومتر مربع، ۱۷۵×۱۳۸ کیلومتر مربع و ۲۷۰×۳۱۰ کیلومتر مربع هستند. برای کارآمد شدن این مدل‌ها و استفاده کاربردی از داده‌های آن‌ها، روش مناسبی برای ریزمقیاس‌نمایی لازم است که بتواند نتایج آن‌ها را به مقیاس‌های کوچک‌تر نظیر یک ایستگاه هواشناسی در سطح زمین تعمیم دهد. پژوهش حاضر با هدف ارائه روشی برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های بارندگی تعدادی از مدل‌های CMIP₆ (با دقت‌های مکانی متفاوت) در استان یزد انجام شده است. پارامتر بارش یک مؤلفه بنیادی در چرخه آب بوده و یکی از مهم‌ترین داده‌های هیدرولوژیکی برای مطالعات اقلیمی، هواشناسی، هیدرولوژی در علوم و مهندسی آبخیز و محیط

همکاران، ۲۰۲۰). در مقابل، مدل‌های ناپارامتریک می‌توانند برای شبیه‌سازی هم‌زمان داده‌های هواشناسی چند ایستگاه مختلف به کار بروند. مدل‌های ناپارامتریک توانایی مناسبی در مدل‌سازی متغیرهای محیطی دوره‌های خشک و تر و بازتولید تغییرات سالانه متغیرها از طریق داده‌های میانگین ماهانه آن‌ها دارند (سید کابلی و همکاران، ۲۰۱۸). پوگیو و گیمونا^۱ (۲۰۱۵) با ریزمقیاس‌نمایی و اصلاح خروجی‌های مدل‌های اقلیم منطقه‌ای با رویکرد زمین‌آمار ترکیبی تحقیقی انجام دادند که این مقاله رویکردی برای ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های اقلیمی براساس ترکیبی از مدل‌های تعمیم‌یافته و زمین‌آمار ارائه نموده و به بهبود پیش‌بینی رطوبت خاک کمک می‌کند. همچنین دیبایک و کویبالی^۲ (۲۰۰۵) با استفاده از دو روش ریزمقیاس‌نمایی آماری (شامل روش اعداد تصادفی و روش رگرسیون) متغیرهای هواشناسی بارش و دما را در کانادا پیش‌بینی کردند. لیمایا^۳ و همکاران (۲۰۲۱) نیز یک رویکرد جایگزین برای کاهش مقیاس شبیه‌سازی بارش روزانه GCM در هر وضوح شبکه دلخواه با استفاده از مدل بیزی کریجینگ (BK) را بررسی کردند که عدم قطعیت‌های پارامتر را در مقایسه با رویکردهای سنتی بهتر نشان داد. پاز و ویلمز^۴ (۲۰۲۲) به بررسی نقاط قوت و ضعف مجموعه‌ای از روش‌های نقشه‌برداری کمی برای ریزمقیاس‌نمایی تغییرات بارش در جنوب آفریقا پرداختند که در این تحقیق شش روش با استفاده از تبدیل‌های پارامتری، سه روش با تبدیل‌های ناپارامتریک و یک روش با تبدیل‌های توزیع‌های نظری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که روش استفاده از توزیع‌های نظری بهترین روش در بررسی تغییرات ناچیز بارش در منطقه مطالعاتی است. با تجزیه و تحلیل سهم عدم قطعیت روش‌ها مشخص شد که مدل‌های اقلیمی بیشترین سهم را در عدم قطعیت این پیش‌بینی‌ها دارند.

از دهه ۱۹۹۰ میلادی تاکنون نسخه‌های مختلفی از مدل‌های AOGCM توسط کشورهای مختلف ارائه شده

5. Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)
6. Assessment Report (AR)
7. The six alternative IPCC scenarios (IS92 A to F)
8. Special Report on Emissions Scenarios (SRES)
9. Representative Concentration Pathways (RCP)
10. Shared Socio-economic Pathways (SSP)

1. Poggio & Gimona
2. Dibike & Coulibaly
3. Lima
4. Paz & Willems

زیست محسوب می‌شود (شی^۱ و همکاران، ۲۰۱۵؛
عبداللهی پور و همکاران، ۲۰۲۰).

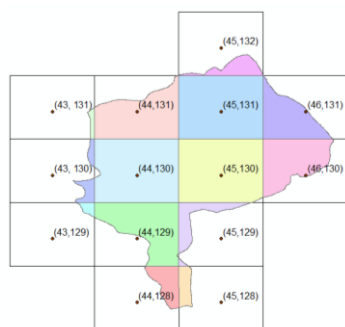
مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعاتی

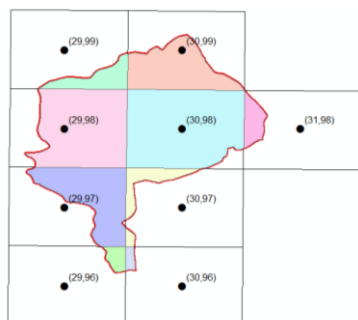
منطقه مورد مطالعه برای انجام این پژوهش استان یزد است که مساحتی بالغ بر ۷۳ هزار کیلومتر مربع دارد. این استان در بین عرض‌های جغرافیایی ۲۹/۵ تا ۳۳/۵ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۲/۵ تا ۵۶/۵ درجه شرقی قرار گرفته است. در بخش وسیعی از استان یزد (حدود ۸۵ درصد) شرایط آب‌وهوایی بیابانی و گرم و خشک حکمفرماست. با توجه به تقسیم‌بندی اقلیمی دوما رتن که متوسط بارش و دمای سالانه را مد نظر قرار می‌دهد، اقلیم این استان عمدتاً از نوع خشک بوده و تنها در بخش‌های کوچکی از منطقه شیرکوه واقع در شهرستان تفت، از نوع نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای تقسیم‌بندی شده است. تنوع در توپوگرافی (ارتفاع از سطح دریا بین ۷۱۱ تا ۴۰۴۲ متر) و تأثیر آن بر توزیع بارندگی از دلایل اصلی انتخاب این منطقه برای انجام پژوهش است.

روش تحقیق

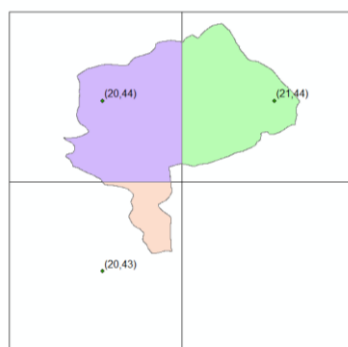
داده‌های مورد استفاده برای انجام این پژوهش شامل بارندگی‌های سالانه ایستگاه‌های باران‌سنجی استان یزد (۵۳ ایستگاه)، مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت تفکیک مکانی ۹۰ متر، داده‌های بارندگی مربوط به تعدادی از مدل‌های اقلیمی موجود در گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (AR₆) شامل مدل‌های TaiESM₁، ACCESS-CM₂ و CanESM₅ بودند. مدل‌های مذکور به ترتیب دارای دقت مکانی ۰/۹۴۲ در ۱/۲۵ درجه، ۱/۸۷۵ در ۱/۲۵ درجه، ۲/۸۱۳ در ۲/۷۹۱ درجه جغرافیایی هستند که هر سلول (زون) این مدل‌ها به ترتیب دارای ابعاد تقریبی ۱۱۸×۱۰۵ کیلومتر مربع، ۱۷۵×۱۳۸ کیلومتر مربع و ۲۷۰×۳۱۰ کیلومتر مربع هستند. شکل (۱) موقعیت قرارگیری سلول‌های مدل‌های اقلیمی مذکور را بر روی نقشه استان یزد نشان می‌دهد.



الف) مدل TaiESM₁ (دقت مکانی ۰/۹۴۲ در ۱/۲۵ درجه)



ب) مدل ACCESS-CM₂ (دقت مکانی ۱/۸۷۵ در ۱/۲۵ درجه)



ج) مدل CanESM₅ (دقت مکانی ۲/۸۱۳ در ۲/۷۹۱ درجه)

شکل (۱): موقعیت قرارگیری سلول‌های سه مدل مختلف اقلیمی
CMPI₆ بر روی نقشه استان یزد

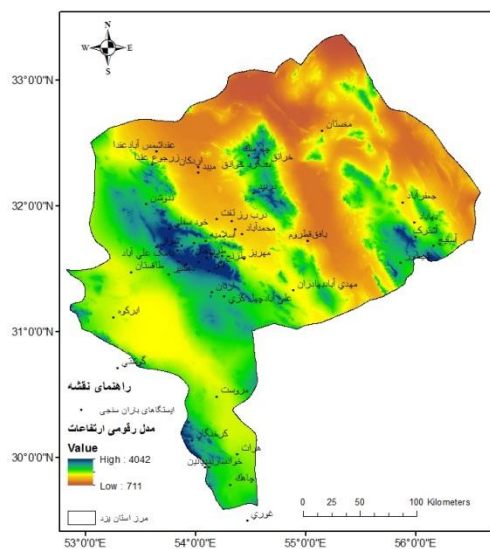
Figure (1): Location of the cells of three different CMPI₆ climate models on the map of Yazd province

بدین ترتیب، محدوده استان یزد براساس هریک از مدل‌های مذکور در چندین سلول (زون) قرار می‌گیرد که تعداد آن‌ها برای مدل‌های TaiESM₁، ACCESS-CM₂ و CanESM₅ به ترتیب ۱۴، ۹ و ۳ عدد است. درصد مساحت واقع شده استان یزد در هر سلول به صورت جدول (۱) است. از اعداد این جدول برای وزن‌دهی به هر سلول واقع در محدوده استان یزد استفاده شده است.

پایه و آتی براساس درصد مساحت تحت پوشش هر سلول (جدول ۱) شد. معادله (۱) نحوه محاسبه میانگین بارندگی پیش‌بینی شده توسط مدل‌های CMPI6 برای کل محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد.

$$[P_{a_CMIP6}]_i = \left[\sum_{n=1}^n X_{c_CMIP6} * P_{c_CMIP6} \right]_i \quad (1)$$

که در آن P_{c_CMIP6} مقدار بارندگی پیش‌بینی شده توسط هریک از مدل‌های CMPI6 در هر سلول، X_{c_CMIP6} وزن سلول مربوطه در مدل مذکور (جدول ۱)، i شماره هریک از ماه‌های سال (۱ تا ۱۲) و n تعداد سلول‌های مربوط به هریک از مدل‌های CMPI6 است که برای $TaiESM_1$ ، $ACCESS-CM_2$ و $CanESM_5$ به ترتیب ۱۴، ۹ و ۳ عدد است. هم‌زمان با محاسبه میانگین بارندگی‌های ماهانه و تبدیل آن‌ها به بارندگی‌های سالانه برای کل محدوده مطالعاتی، اقدام به بررسی ارتباط رگرسیونی بین مقادیر بارندگی سالانه و ارتفاع از سطح دریای ایستگاه‌های باران‌سنجی استان یزد (۵۳ ایستگاه، شکل ۲) شد تا گرادیان ارتفاع-بارندگی برای کل محدوده مطالعاتی برای دوره آماری پایه به دست آید.



شکل (۲): موقعیت مکانی ایستگاه‌های باران‌سنجی استان یزد
Figure (2): Spatial location of Yazd province rain gauge stations

استفاده از این پارامتر (DEM) در شبیه‌سازی بارندگی از آن‌رو اهمیت دارد که همواره رابطه معنی‌داری بین بارش و برخی متغیرهای محیطی نظیر پوشش گیاهی و توپوگرافی زمین وجود داشته که از این بین، پارامتر ارتفاع از سطح دریا جایگاه

جدول (۱): درصد مساحت واقع شده استان یزد در هریک از

سلول‌های مدل‌های اقلیمی CMIP6
Table (1): The percentage of the area of Yazd province located in each of the cells of CMIP6 climate models

شماره سلول	نام مدل اقلیمی CMIP6		
	CanESM ₅	ACCESS-CM ₂	TaiESM ₁
۱	9.23%	1.59%	0.48%
۲	48.21%	15.29%	1.43%
۳	42.55%	24.69%	0.42%
۴	-	4.82%	2.79%
۵	-	0.77%	10.63%
۶	-	4.30%	16.65%
۷	-	31.46%	11.36%
۸	-	14.01%	1.54%
۹	-	3.05%	3.13%
۱۰	-	-	16.68%
۱۱	-	-	16.78%
۱۲	-	-	2.33%
۱۳	-	-	8.67%
۱۴	-	-	7.11%
مجموع	100%	100%	100%

مدل‌های استفاده‌شده در این پژوهش ($TaiESM_1$ ، $ACCESS-CM_2$ و $CanESM_5$) هریک مشتمل بر چهار سناریوی $SSP_{1-2.6}$ ، $SSP_{2-4.5}$ ، $SSP_{3-7.0}$ و $SSP_{5-8.5}$ هستند که برای شبیه‌سازی بارش ماهانه و سالانه در دوره آتی مورد استفاده قرار گرفتند و امکان مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده تحت هریک از سناریوهای مذکور با مقادیر مشاهداتی بارندگی در دوره پایه فراهم شد. برای این کار، ابتدا داده‌های بارندگی ماهانه هریک از مدل‌های اقلیمی مربوط به دوره آماری ۱۸۵۰-۲۰۱۴ میلادی (به‌عنوان دوره پایه) و ۲۰۱۵-۲۱۰۰ میلادی (به‌عنوان دوره آینده) تحت سه سناریوی نام‌برده استخراج شدند. این بخش از پژوهش با کدنویسی در نرم‌افزار R نسخه ۱.۱۷.۱ و استفاده از پکیج و کتابخانه $NCDF4$ انجام شد (جیمز^۱ و همکاران، ۲۰۱۳). سپس اقدام به محاسبه میانگین وزنی بارندگی ماهانه کل محدوده مطالعاتی (P_{a_CMIP6}) از طریق وزن‌دهی بارندگی‌های ماهانه دوره آماری

ماهانه بارش دوره آتی نسبت به میانگین ماهانه بارش دوره پایه برای هر یک از ماه‌های سال (ΔP_i) محاسبه می‌شود:

$$\Delta P_i = \left[\frac{(\bar{P}_{a_CMIP6})_{future}}{(\bar{P}_{a_CMIP6})_{base}} \right]_i \quad (۳)$$

که منظور از $(\bar{P}_{a_CMIP6})_{base}$ و $(\bar{P}_{a_CMIP6})_{future}$ میانگین وزنی بارش محدوده مطالعاتی توسط هر یک از مدل‌های CMIP6 در دوره‌های آماری پایه و آتی (وزن‌دهی براساس جدول ۱) و منظور از i شماره ماه مورد نظر (۱ تا ۱۲) است. با به دست آمدن ΔP_i در هر یک از ماه‌های سال، میانگین بارش ماهانه درازمدت ایستگاه یزد در دوره پایه (\bar{P}_{s_base}) به بارش ماهانه درازمدت این ایستگاه در دوره آتی (\bar{P}_{s_future}) تبدیل شد:

$$[\bar{P}_{s_future}]_i = [\bar{P}_{s_base}]_i * \Delta P_i \quad (۴)$$

پس از برآورد بارش ماهانه درازمدت ایستگاه یزد در دوره آتی، بارش سالانه این ایستگاه نیز محاسبه شد و با مقادیر به دست آمده براساس روش پیشنهادی این پژوهش مقایسه شد. مقایسه‌ها و ارزیابی‌های انجام شده در این پژوهش با کمک آماره‌های میانگین خطای اریب (MBE)، ضریب همبستگی پیرسون (r)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) انجام شده است.

نتایج و بحث

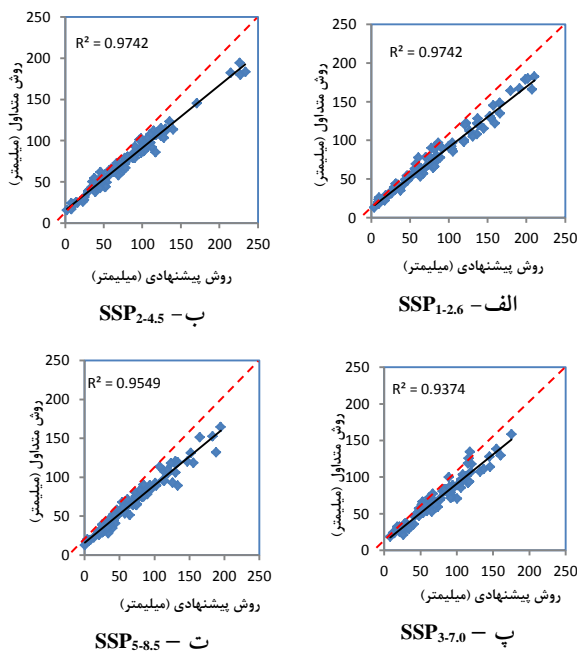
شکل (۳) گرادیان بارش-ارتفاع و نتایج ارزیابی آن برای محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد که براساس تحلیل آمار بارندگی ۵۳ ایستگاه باران‌سنجی در سطح منطقه مطالعاتی تهیه شده است. ارزیابی گرادیان بارش-ارتفاع برای منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد که معادله مربوط دارای ضریب همبستگی ۰/۸ و میانگین خطای اریب ۱/۳۶- میلی‌متر (دارای اندکی کم‌برآورد) بوده و با خطای NRMSE برابر با ۰/۳ قادر به برآورد بارندگی منطقه مطالعاتی است (جدول ۲). کارایی روش گرادیان ارتفاع-بارندگی در مطالعات هیدرولوژی به دفعات مورد بررسی قرار گرفته و به اثبات رسیده است (جیا و همکاران، ۲۰۱۱؛ ژان و همکاران، ۲۰۱۸).

ویژه‌ای در بین متغیرهای محیطی مؤثر بر بارندگی دارد (جیا و همکاران، ۲۰۱۱؛ ژان^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). سپس با کمک معادله گرادیان ارتفاع-بارندگی و مدل رقومی ارتفاعات (DEM)، نقشه بارندگی درازمدت منطقه مطالعاتی با دقت مکانی ۹۰×۹۰ متر مربع تهیه شد (نقشه P_{c_base}). سپس به کمک هیستوگرام نقشه مذکور، میانگین وزنی بارندگی منطقه مطالعاتی در دوره پایه (\bar{P}_{a_base}) محاسبه و نقشه بدون بُعد بارندگی محدوده مطالعاتی (نقشه P_d) توسط معادله زیر تهیه شد:

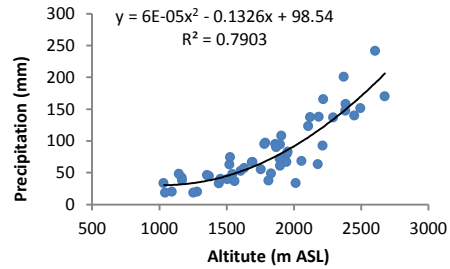
$$P_d = \frac{P_{c_base}}{\bar{P}_{a_base}} \quad (۲)$$

این نقشه نسبت بارندگی هر پیکسل از محدوده مطالعاتی به میانگین بارندگی درازمدت منطقه را نشان می‌دهد و دارای دقت تفکیک مکانی ۹۰×۹۰ متر مربع است. میانگین وزنی اعداد این نقشه برابر با یک است. از این نقشه برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارش مدل‌های اقلیمی CMPI6 (که دارای دقت تفکیک مکانی پایینی هستند) و تبدیل آن‌ها به نقشه بارش محدوده مطالعاتی با دقت تفکیک مکانی ۹۰×۹۰ متر مربع استفاده شد. برای این منظور هر یک از مقادیر P_{a_CMIP6} سالانه در نقش P_d ضرب شدند و نقشه‌های بارشی مدل‌های CMPI6 و تحت سناریوهای مختلف SSP با دقت مکانی ۹۰×۹۰ متر مربع و به تفکیک سال‌های آماری دوره پایه (۱۸۵۰-۲۰۱۴ میلادی) و آتی (۲۰۱۵-۲۱۰۰ میلادی) تهیه شوند. بدین ترتیب نقشه‌های ریزمقیاس بارندگی منطقه مطالعاتی براساس مدل‌های CMPI6 تهیه شدند و به کمک آن‌ها، مقادیر بارندگی ایستگاه‌های مختلف باران‌سنجی استخراج شدند. برای ارزیابی روش ریزمقیاس‌نمایی مذکور، داده‌های بارش مدل‌های اقلیمی CMPI6 برای ایستگاه هواشناسی یزد (دارای طول جغرافیایی ۵۴/۳۷ و عرض جغرافیایی ۳۱/۸۲ درجه) توسط یکی دیگر از روش‌های متداول، ریزمقیاس شد. در روش مد نظر برای ریزمقیاس‌نمایی بارش CMIP6 ایستگاه یزد از روش تناسبی (جونز و هولم^۲، ۱۹۹۶) استفاده شد. در این روش ابتدا نسبت‌های میانگین

شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) به مقایسه و ارزیابی مقادیر ریزمقیاس‌شده بارندگی مدل‌های ACCESS-CM₂، TaiESM₁ و CanESM₅ تحت چهار سناریوی SSP_{1-2.6}، SSP_{2.4.5}، SSP₃ و 7.0 و SSP_{5-8.5} پرداخته و نتایج روش پیشنهادی (استفاده از نقشه بدون بُعد بارندگی، P_d) را با نتایج روش تناسبی به‌عنوان یکی از روش‌های متداول ریزمقیاس‌سازی داده‌های اقلیمی مقایسه کرده است. در این شکل‌ها، خط ۱ به ۱ نیز ترسیم شده تا امکان مقایسه بهتر نتایج و بررسی انحراف داده‌ها نسبت به این خط قابل مشاهده باشد. از مهم‌ترین موارد قابل توجه این نمودارها، عدم مشاهده روند خاص در دقت سناریوهای مختلف SSP است؛ به‌طوری‌که در هریک از مدل‌های اقلیمی CMIP₆، نمی‌توان از لحاظ ضریب تبیین (R²) یک سناریو را نسبت به سناریوی دیگر برتر دانست.



شکل (۵): مقایسه مقادیر ریزمقیاس‌شده بارندگی مدل Tai-ESM₂ به دو روش پیشنهادی و متداول تحت سناریوهای مختلف SSP برای ایستگاه یزد
Figure (5): Comparison of downscale rainfall values of Tai-ESM₂ model by two proposed and common methods under different SSP scenarios for Yazd station



شکل (۳): گرادیان بارش - ارتفاع برای محدوده مطالعاتی

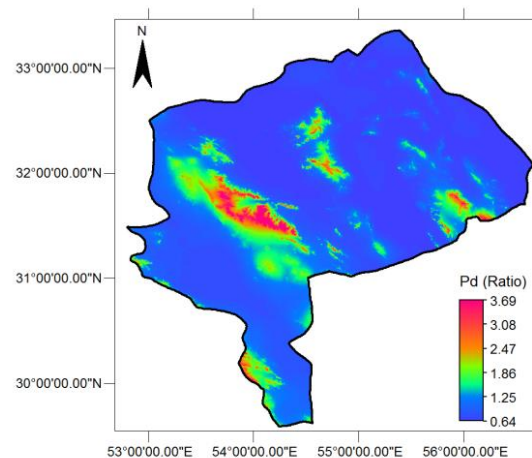
Figure (3): Precipitation-height gradient for the study area

جدول (۲): نتایج ارزیابی گرادیان بارش - ارتفاع برای محدوده مطالعاتی

Table (2): The results of the assessment of precipitation gradient - height for the study area

مقدار	آماره
0.64	ضریب تبیین (R ²)
0.80	ضریب همبستگی پیرسون (r)
-1.36	میانگین خطای اریب (MBE)
24.98	مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)
0.30	ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)

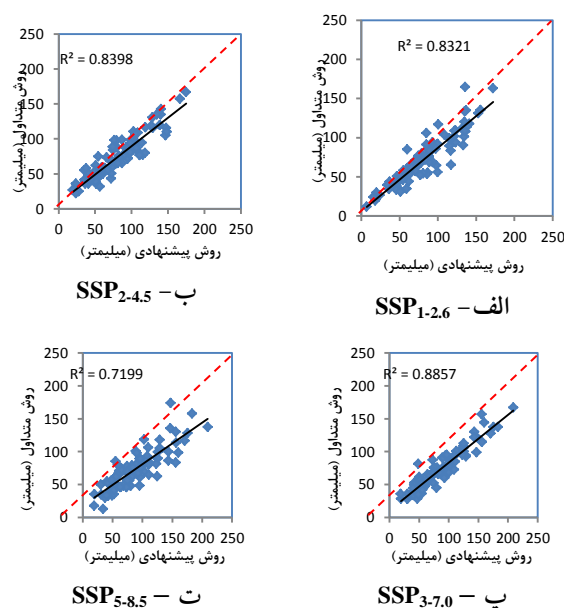
در شکل (۴) نقشه بارندگی بدون بُعد منطقه مطالعاتی ترسیم شده است. این نقشه از تقسیم میزان بارندگی هر پیکسل به میانگین بارندگی منطقه مطالعاتی (۸۳ میلی‌متر) حاصل شده و دارای دقت تفکیک مکانی ۹۰×۹۰ متر مربع است. بیشترین و کمترین مقادیر نقشه P_d به ترتیب مربوط به مناطق کوهستانی و کویری استان یزد است. همچنین، میانگین وزنی نقشه بارندگی بدون بُعد برابر با ۱ بوده و از آن برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارش سه مدل اقلیمی CMIP₆ (شامل مدل‌های ACCESS-CM₂، TaiESM₁ و CanESM₅) استفاده شده است.



شکل (۴): نقشه بارندگی بدون بُعد منطقه مطالعاتی

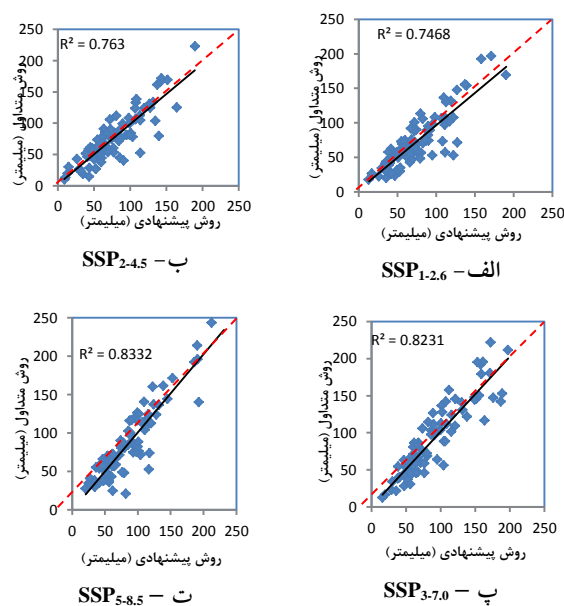
Figure (4): Dimensionless rainfall map of the study area

مختلف اقلیمی CMIP6 برای ایستگاه یزد پرداخته و نتایج روش پیشنهادی و روش تناسبی را با همدیگر مقایسه کرده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی برای ریزمقیاس‌نمایی بارش کارکرد نسبتاً متفاوتی در مدل‌های مختلف اقلیمی دارد؛ به‌طوری‌که دقت روش در مدل‌های Tai-ESM₂ نسبت به مدل‌های Access-CM₂ و Can-ESM₅ بیشتر است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، مساحت تحت پوشش هر سلول از مدل‌های ACCESS-TaiESM₁، CM₂ و CanESM₅ به‌ترتیب برابر با ۱۲۴۰۰، ۲۳۶۰۰ و ۸۳۷۰۰ کیلومتر مربع بوده و دقت تفکیک مکانی این مدل‌ها به‌ترتیب کاهش می‌یابد. بنابراین، چنین استنباط می‌شود که برای مدل‌های اقلیمی با تفکیک مکانی بالاتر، دقت روش پیشنهادی برای ریزمقیاس‌سازی بارندگی بیشتر است. در بین مدل‌های مختلف اقلیمی معرفی‌شده توسط CMIP₆، مدل‌های BCC-CSM2-MR، CAMS-CSM1-0، CESM2، FIO-ESM-2-0، CMCC-CM2-SR5، CIESM، WACCM، GFDL-ESM4، MRI-ESM2-0 و INM-CM4-8 دارای کوچک‌ترین ابعاد سلول و بالاترین دقت تفکیک مکانی بوده و به‌کارگیری روش پیشنهادی برای ریزمقیاس‌سازی داده‌های بارندگی این مدل‌ها توصیه می‌شود. در بررسی و مرور منابع مرتبط با این تحقیق، پژوهش‌های مشابهی در زمینه استفاده از نقشه رقومی ارتفاعات برای ریزمقیاس‌سازی داده‌های مدل‌های اقلیمی نظیر مدل‌های CMIP6 وجود دارد (هریس و جونز،^۱ ۲۰۱۸؛ کوار و جورجیو،^۲ ۲۰۱۸؛ آیچی و احمد،^۳ ۲۰۲۱). همچنین، پژوهش‌های مشابهی به‌منظور ریزمقیاس‌سازی نقشه‌های بارندگی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای به کمک متغیرهای محیطی انجام شده است. تحقیقات ما^۴ و همکاران (۲۰۱۷) و فنگ^۵ و همکاران (۲۰۱۳) از این جمله‌اند. آن‌ها به تأثیر عوامل توپوگرافی مانند ارتفاع از سطح دریا، شیب زمین و... بر الگوهای توزیع مکانی بارش پرداخته و آن‌ها را برای ریزمقیاس‌نمایی مکانی نقشه‌های



شکل (۶): مقایسه مقادیر ریزمقیاس‌شده بارندگی‌های مدل ACCESS-CM₂ به دو روش پیشنهادی و متداول تحت سناریوهای مختلف SSP برای ایستگاه یزد

Figure (6): Comparison of downscale rainfall values of ACCESS-CM₂ model with two proposed and common methods under different SSP scenarios for Yazd station



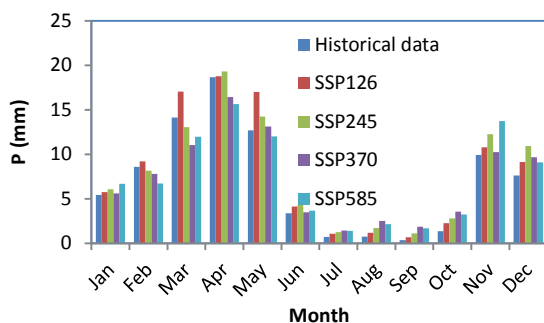
شکل (۷): مقایسه مقادیر ریزمقیاس‌شده بارندگی‌های مدل Can-ESM₅ به دو روش پیشنهادی و متداول تحت سناریوهای مختلف SSP برای ایستگاه یزد

Figure (7): Comparison of Can-ESM₅ model's downscale rainfall values by two proposed and conventional methods under different SSP scenarios for Yazd station

- Harris & Jones
- Kumar & Foufoula-Georgiou
- Ayachi & Ahmad
- Ma
- Fang

در جدول (۳) به ارزیابی روش پیشنهادی برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارندگی مستخرج از مدل‌های

شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) به شبیه‌سازی میانگین بارندگی ماهانه استان یزد به کمک مدل‌های ACCESS-TaiESM₁، CM₂ و CanESM₅ تحت چهار سناریوی SSP_{1-2.6}، SSP_{2-4.5}، SSP_{3-7.0} و SSP_{5-8.5} در دهه‌های آتی (۲۰۱۵-۲۱۰۰ میلادی) پرداخته است. براساس نتایج به‌دست آمده از سه مدل اقلیمی مطالعاتی، میانگین بارندگی سالانه دهه‌های آتی دارای روند افزایشی بوده و افزایش بارش ۱ تا ۲۳ درصد (میانگین ۱۳ درصد) نسبت به دوره پایه پیش‌بینی شده است. در بین سه مدل اقلیمی CMIP₆، بیشترین افزایش بارش‌ها توسط مدل ACCESS-CM₂ پیش‌بینی شده و در بین چهار سناریوی SSP بیشترین افزایش بارش توسط سناریوی SSP_{3-7.0} پیش‌بینی شده است. شایان ذکر است که هر یک از سناریوهای SSP بر پایه مفروضات مختلف اقتصادی و اجتماعی توسعه یافته‌اند. برای مثال، SSP_{1-2.6} به‌عنوان سناریوی توسعه پایدار، SSP_{2-4.5} به‌عنوان سناریوی انرژی پایدار، SSP_{3-7.0} به‌عنوان سناریوی رقابت منطقه‌ای و SSP_{5-8.5} به‌عنوان سناریوی توسعه سوخت فسیلی معروف است. از نکات حائز اهمیت در این زمینه، پیش‌بینی تغییر الگوی توزیع ماهانه بارش‌های استان یزد به‌رغم پیش‌بینی روند افزایشی مقدار بارش‌هاست؛ به‌طوری‌که در برخی مدل‌ها و سناریوها احتمال کاهش بارندگی ماه‌های اکتبر و نوامبر (بارش‌های زمستانه) وجود داشته، در مقابل احتمال افزایش بارندگی ماه‌های آپریل، می و ژوئن (بارش‌های بهاره و تابستانه) وجود دارد.



شکل (۸): شبیه‌سازی میانگین بارندگی ماهانه استان یزد در دهه‌های آتی به کمک مدل Tai-ESM₁ تحت سناریوهای مختلف SSP

Figure (8): Simulating the average monthly rainfall of Yezd province in the coming decades using the Tai-ESM₁ model under different SSP scenarios

بارندگی توصیه کرده‌اند. در تحقیق دیگری که ما و همکاران (۲۰۱۸) انجام داده‌اند، از متغیرهای زمینی شامل NDVI، دمای سطح زمین در روز و شب، DEM و سایر شاخص‌های توپوگرافی و مدل جنگل تصادفی برای ریزمقیاس‌نمایی بارندگی استفاده کرده‌اند. چن^۱ و همکاران (۲۰۱۹) و ژائو^۲ و همکاران (۲۰۲۱) نیز با در نظر گرفتن ناپیوستایی مکانی در روابط بین بارش و متغیرهای محیطی، همین روش را برای ریزمقیاس‌نمایی چند نمونه از محصولات بارندگی تصاویر ماهواره‌ای استفاده کرده‌اند. عبدالهی‌پور و همکاران (۲۰۲۱) نیز برای ریزمقیاس‌نمایی بارش تصاویر ماهواره‌ای، از رابطه مکانی ناهمگن بین بارش و متغیرهای محیطی برای استان گلستان استفاده کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی مختلط^۳ (MGWR) مدلی را برای این کار توسعه داده‌اند و در دستیابی به داده‌های بارش بهبودیافته با رزولوشن مکانی یک کیلومتر در مقیاس سالانه، به این نتیجه رسیدند که این روش نه تنها رزولوشن مکانی بهبود می‌یابد، بلکه دقت ریزمقیاس‌سازی نیز افزایش پیدا می‌کند. در این تحقیق، داده‌های بارش ریزمقیاس‌شده و کالیبره شده، عملکرد بهتری نسبت به داده‌های اصلی در برابر مشاهدات زمینی داشتند.

جدول (۳): نتایج ارزیابی روش پیشنهادی برای ریزمقیاس‌نمایی

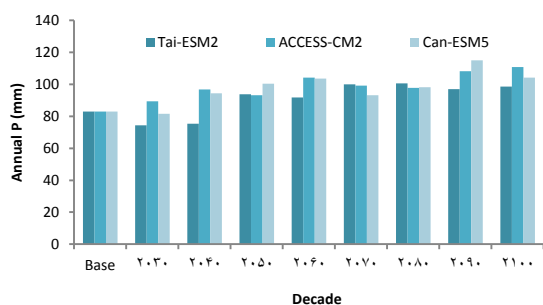
بارندگی مدل‌های اقلیمی CMIP6 در ایستگاه یزد

Table (3): The results of the evaluation of the proposed method for downscaling of precipitation of CMIP6 climate models in Yazd station

مدل اقلیمی	سناریوی SSP	R ²				
		NRMSE	RMSE	MBE	r	r
	SSP126	0.19	14.4	4.7	0.98	0.97
	SSP245	0.18	13.7	4.0	0.98	0.97
	SSP370	0.17	11.7	3.5	0.97	0.94
	SSP585	0.20	14.1	3.3	0.97	0.95
	SSP126	0.24	17.8	10.2	0.91	0.83
	SSP245	0.21	15.7	7.1	0.92	0.84
	SSP370	0.27	20.1	13.1	0.94	0.89
	SSP585	0.16	11.8	7.6	0.85	0.72
	SSP126	0.27	19.2	1.8	0.87	0.75
	SSP245	0.26	19.6	0.8	0.87	0.76
	SSP370	0.22	20.4	-1.6	0.91	0.82
	SSP585	0.22	19.7	-0.6	0.91	0.83

1. Chen
2. Zhao
3. Mixed Geographically Weighted Regression (MGWR)

برمی‌گردد (اقدامی‌راد و همکاران، ۲۰۱۶؛ شهیدی و همکاران، ۲۰۱۶).



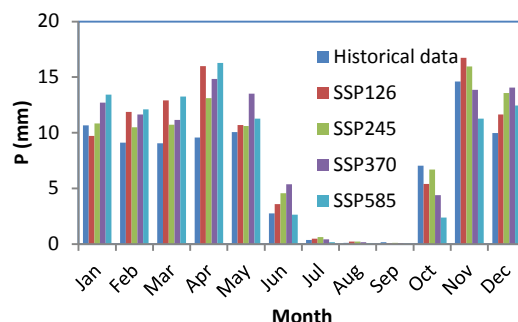
شکل (۱۱): پیش‌بینی میانگین بارش محدوده مطالعاتی در دهه‌های

آتی توسط مدل‌های مختلف CMIP₆

Figure (11): Forecasting the average precipitation of the study area in the coming decades by different CMIP6 models

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

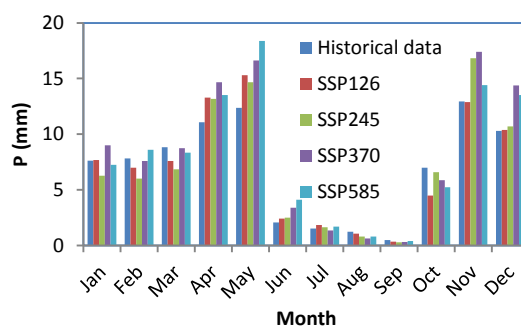
در این پژوهش روشی برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بزرگ‌مقیاس بارندگی مدل‌های اقلیمی CMIP₆ ارائه شد که در آن، از ارتباط مکانی بین بارندگی و ارتفاع از سطح دریا (گرادیان بارش-ارتفاع) و مدل رقومی ارتفاعات (DEM) به‌عنوان مهم‌ترین متغیر محیطی تأثیرگذار بر بارش استان یزد استفاده شده است. نتایج حاصل نشان داد که می‌توان به کمک نقشه DEM با دقت مکانی ۹۰×۹۰ متر مربع، داده‌های بارندگی سه مدل اقلیمی TaiESM₁، ACCESS-CM₂ و CanESM₅ با دقت‌های مکانی اندک را با موفقیت ریزمقیاس کرد و دقت مکانی آن‌ها را به ۹۰×۹۰ متر مربع بهبود داد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی ریزمقیاس‌نمایی بارش کارکرد نسبتاً متفاوتی در مدل‌های مختلف اقلیمی دارد؛ به‌طوری‌که دقت این روش در مدل Tai-ESM₂ نسبت به مدل‌های ACCESS-CM₂ و Can-ESM₅ بیشتر بود. براساس نتایج حاصل، چنین استنباط می‌شود که این روش برای مدل‌های اقلیمی با تفکیک مکانی بالاتر، دارای دقت و کارایی بالاتری برای ریزمقیاس‌سازی است. در بین مدل‌های مختلف اقلیمی معرفی‌شده توسط CMIP₆، مدل‌های BCC-CSM2-MR، CMCC-CESM2-WACCM، CAMS-CSM1-0، CM2-SR5، FIO-ESM-2-0، GFDL-ESM4، MRI-ESM2-0 و INM-CM4-8 دارای کوچک‌ترین ابعاد سلول و بالاترین



شکل (۹): شبیه‌سازی میانگین بارندگی ماهانه استان یزد در دهه‌های

آتی به کمک مدل Access-CM₂ تحت سناریوهای مختلف SSP

Figure (9): Simulating the average monthly rainfall of Yazd province in the coming decades with the help of Access-CM2 model under different SSP scenarios



شکل (۱۰): شبیه‌سازی میانگین بارندگی ماهانه استان یزد در دهه‌های

آتی به کمک مدل Can-ESM₅ تحت سناریوهای مختلف SSP

Figure (10): Simulating the average monthly rainfall of Yazd province in the coming decades using the Can-ESM5 model under different SSP scenarios

شکل (۱۱) به پیش‌بینی میانگین بارش محدوده مطالعاتی در دهه‌های آتی توسط مدل‌های مختلف CMIP₆ و مقایسه با میزان بارندگی دوره پایه پرداخته است. به‌طور عمومی، افزایش بارش پیش‌بینی‌شده توسط مدل ACCESS-CM₂ بیشتر از سایر مدل‌هاست. همچنین، در برخی دهه‌ها (۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ میلادی)، مدل Tai-ESM₂ کاهش میانگین بارندگی سالانه را پیش‌بینی کرده است. از دلایل اصلی تفاوت نتایج هر مدل با مدل دیگر (و یا هر سناریو با سناریوی دیگر)، عدم قطعیت موجود در مدل‌های مختلف پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی است که به دلایل متعددی نظیر خودکارکرد مدل‌های گردش عمومی جو (مانی و سالی، ۲۰۱۶^۱) و فرضیات مورد استفاده در سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای

سناریوی SSP بیشترین افزایش بارش توسط سناریوی SSP₃ 7.0 پیش‌بینی شده است. از نکات حائز اهمیت در این زمینه، پیش‌بینی تغییر الگوی ماهانه بارش‌های استان یزد به‌رغم پیش‌بینی روند افزایش بارش سالانه است؛ به‌طوری‌که در برخی مدل‌ها و سناریوها احتمال کاهش بارندگی ماه‌های اکتبر و نوامبر (بارش‌های زمستانه) وجود داشته، در مقابل احتمال افزایش بارندگی ماه‌های آوریل، می و ژوئن (بارش‌های بهار) و تابستانه) وجود دارد. مهم‌ترین پیشنهاد تحقیق حاضر، توصیه به کارگیری روش پیشنهادی برای ریزمقیاس‌سازی داده‌های بارندگی مدل‌های CMIP6 به‌منظور استفاده واقعی‌تر و کاربردی‌تر از داده‌های بزرگ‌مقیاس جهانی بارش در سطح محدوده مطالعاتی است.

دقت تفکیک مکانی بوده و به‌کارگیری روش پیشنهادی برای ریزمقیاس‌سازی داده‌های بارندگی این مدل‌ها توصیه می‌شود. در ادامه، اقدام به شبیه‌سازی میانگین بارندگی ماهانه و سالانه استان یزد به کمک مدل‌های ACCESS-TaiESM₁، ACCESS-CM₂ و CanESM₅ تحت چهار سناریوی SSP_{1-2.6}، SSP_{2-4.5}، SSP_{3-7.0} و SSP_{5-8.5} در دهه‌های آتی (۲۰۱۵-۲۱۰۰ میلادی) شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده از سه مدل اقلیمی مذکور در محدوده مطالعاتی، میانگین بارندگی سالانه دهه‌های آتی دارای روند افزایشی بوده و این مدل‌ها افزایش بارش ۱ تا ۲۳ درصد (میانگین ۱۳ درصد) نسبت به دوره پایه را پیش‌بینی می‌کند. در بین سه مدل اقلیمی مذکور، بیشترین افزایش بارش‌ها توسط ACCESS-CM₂ پیش‌بینی شده و در بین چهار

منابع

1. Abdollahipour, A., Ahmadi, H., & Aminnejad, B. (2020). Evaluating the Hydrological Utility of Satellite-Based Rainfall Products Using Neural Network Models over the Ghare Ghieh River Basin, Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 12(7), 3018–3044.
2. Abdollahipour, A., Ahmadi, H., Aminnejad, B., (2021). Micro-scale satellite precipitation considering the heterogeneous spatial relationship between precipitation and environmental variables. *Journal of Natural Geography*, 13(54): 109-126.
3. Ayachi, M. N. & Ahmad, S. (2021). Use of DEM in Precipitation Downscaling: A Case Study of the CMIP6 Models. *Water*, 13(9), 1234.
4. Chen, Sh., Zhang, L., She, D., & Chen, J. (2019). Spatial Downscaling of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Annual And Monthly Precipitation Data over The Middle And Lower Reaches of The Yangtze River Basin, China. *Water*, 11(3), P.568.
5. Dibike, Y.B. & Coulibaly, P. (2005). Hydrologic Impact of Climate Change in the Saguenay Watershed: Comparison of Downscaling Methods and Hydrologic Models. *Journal of Hydrology*, 307, 145-163.
6. Eghdamirad, S., Johnson, F., Woldemeskel, F., & Sharma, A. (2016). Quantifying the sources of uncertainty in upper air climate variables. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 27, 121(8), 3859-74.
7. Fang, J., Du, J., Xu, W., Shi, P., Li, M., & Ming, X. (2013). Spatial Downscaling of TRMM Precipitation Data Based on the Orographical Effect And Meteorological Conditions In A Mountainous Area, Elsevier, Scencedirect. *Advances In Water Resources*, 61, 42–50.
8. Harris, I. & Jones, P. D. (2018). Climate change and climate variability in the CMIP6 era: A review of impacts and adaptation. *Climate Dynamics*, 50(3-4), 1093-1114.
9. James, G., Witten, D., Hastie, T. & Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning with Applications* in R. Springer, New York.
10. Jia, G. et al. (2020). Impact of Weather Variability and Climate Change on On-Farm Practices and Crop Production. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 292, 106804.
11. Jia, Sh., Zhu, W., Lü, A., & Yan, T. (2011). A Statistical Spatial Downscaling Algorithm Of TRMM Precipitation Based on NDVI and DEM In The Qaidam Basin of China, Elsevier, Scencedirect. *Remote Sensing Of Environment*, 115, 3069–3079.
12. Jones, P.D. & Hulme, M. (1996) Calculating Regional Climate Times Series for Temperature Precipitation: Methods and Illustrations. *International Journal of Climatology*, 16, 361-377.
13. Kumar, R. & Foufoula-Georgiou, E. (2018). Statistical Downscaling of Climate Models: A Review. *Journal of Hydrology*, 570, 147-162.
14. Lima, C.H.R., Kwon, H.H., & Kim, Y.T. (2021). A Bayesian Kriging model applied for spatial downscaling of daily rainfall from GCMs. *Journal of Hydrology*, Volume 597, ISSN 0022-1694
15. Ma, Z., He, K., Tan, X., Xu, J., Fang, W., He, Y., & Hong, Y. (2018). Comparisons of Spatially

- Downscaling TMPA and IMERG over The Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 10(12), P.1883.
16. Ma, Z., Shi, Z., Zhou, Y., Xu, J., Yu, W., Yang, Y. (2017). A Spatial Data Mining Algorithm for Downscaling TMPA 3B43 V7 Data over the Qinghai Tibet Plateau with the Effects of Systematic Anomalies Removed, Elsevier. *Sciencedirect, Remote*. 200 (378-395)
17. Ma, Z., Xu, J., He, K., Han X., Ji, Q., Wang, T., Xiong, W., & Hong, Y. (2020). An Updated Moving Window Algorithm For Hourly-Scale Satellite Precipitation Downscaling: A Case Study In The Southeast Coast Of China. *Journal of Hydrology*, 581, P.124378.
18. Mani, A. & Tsai, FT. (2016) Ensemble Averaging Methods for Quantifying Uncertainty Sources in Modeling Climate Change Impact on Runoff Projection. *Journal of Hydrologic Engineering*. 1:04016067.
19. Paz, S.M. & Willems, P. (2022). Uncovering the strengths and weaknesses of an ensemble of quantile mapping methods for downscaling precipitation change in Southern Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume 41, ISSN 2214-5818,
20. Poggio L. & Gimona, A. (2015). Downscaling and correction of regional climate models outputs with a hybrid geostatistical approach, *Spatial Statistics*, Volume 14, Part A, Pages 4-21, ISSN 2211-6753.
21. Safari, M. & Khatami, R. (2019). Evaluating the Performance of Climate Change Projections in an Arid Region Using Weather Generators. *Earth Systems and Environment*, 3(3), 439-451.
22. Semenov, M.A., Brooks, R.J., Barrow, E.M., & Richardson, C.W. (1998). Comparison of WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research* 10, 95-107.
23. Seyed Kabli, H. A., Akhundali, M., Masah Bovani, A.R., & Radmanesh, F. (2018). Presenting a microscale model of climatic data based on the non-parametric nearest neighbor (K-NN) method. *Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Industries)*, 26(4): 808-779.
24. Shahidi A., Tajbakhsh, S.M., Khashai Seyuki, A., Khazimenejad, H., & Jafarzadeh, A. (2016). Uncertainty analysis of changes in climatic variables of precipitation and temperature under the influence of climate change (case study: South Khorasan province). *Ecohydrology*, 4(4): 943-953.
25. Shi, Y., Song, L., Xia, Zh., Lin, Y., B. Myneni, R., Choi, S., Wang, L., Ni, X., Lao, C., & Yang, F. (2015). Mapping Annual Precipitation Across Mainland China In The Period 2001-2010 From TRMM3B43 Product Using Spatial Downscaling Approach, MDPI. *Remote Sensing*, 7, 5849-5878.
26. Simonovic, S.P. & Li, L. (2003). Methodology for assessment of climate change impacts on large-scale flood 129(5).
27. Wilby, R.L., Charles, S.P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., & Mearns, L.O. (2004). Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods, *TGICA*, 27p.
28. Yates, D., Gangopadhyay, S., Rajagopalan, B., & Strzepek, K. 2003. A technique for generating regional climate scenarios using a nearest-neighbor algorithm. *Water Resources Research* 39 (7), SWC 7-1-SWC 7-14.
29. Zhan, Ch., Han, J., Hu, Sh., Liu, L., Dong, Y. (2018). Spatial Downscaling of GPM Annual And Monthly Precipitation Using Regression-Based Algorithms In A Mountainous Area, Hindawi. *Advances In Meteorology*, Volume 2018, Article ID 1506017, 13 Pages.
30. Zhao, N. (2021). An Efficient Downscaling Scheme for High-Resolution Precipitation Estimates over a High Mountainous Watershed. *Remote Sensing*, 13(2), P. 234.

Downscaling of CMIP₆ Rainfall Data Using Digital Elevation Model (Case Study: Yazd Province)

Elham Mahdavi Nezhad,¹ Seyed Zeynalabedin Hosseini,^{2*} Hossein Maleki Nezhad,³
Mohammad Hassan Rahimian,⁴ Mohammad Amin Asadi⁵

Received: 19/09/2024

Accepted: 14/03/2025

Extended Abstract

Introduction: Climate change, driven by the increasing concentration of greenhouse gases—particularly carbon dioxide—in the atmosphere, leads to significant alterations in rainfall patterns, runoff volumes, wind speed, solar radiation reaching the Earth's surface, and air temperature. In recent years, the economic and social consequences of climate-related events have heightened the importance of addressing climate change. To study the impacts of climate change on future trends in rainfall, temperature, and other parameters, projected data from climate models, known as General Circulation Models (GCMs) or Atmospheric and Oceanic General Circulation Models (AOGCMs), are widely used. A critical step in utilizing GCM data for projecting climate parameters (e.g., rainfall) is the downscaling process, which converts data from large-scale grid cells to smaller-scale cells or specific points. In this research, rainfall data from CMIP6 climate models (such as TaiESM1, ACCESS-CM2, and CanESM5) were employed to project future rainfall patterns in Yazd Province, located in central Iran. As an arid region, Yazd heavily relies on rainfall as a fundamental component of the hydrological cycle, making it a critical factor in groundwater resource management.

Materials and methods: the study area is Yazd Province, covering an area of 73,000 square kilometers. It is geographically located between latitudes 29.5° to 33.5° N and longitudes 52.5° to 56.5° E. The data used in this research include:

1. Annual rainfall records from 53 rain gauge stations across Yazd Province.
2. A Digital Elevation Model (DEM) map with a spatial resolution of 90 meters.
3. Rainfall data from several climate models included in the Sixth Assessment Report (AR6) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), specifically the TaiESM1, ACCESS-CM2, and CanESM5 models.

These models have spatial resolutions of 0.942° × 1.25°, 1.875° × 1.25°, and 2.813° × 2.791°, respectively, corresponding to approximate cell dimensions of 105 × 118 km, 175 × 138 km, and 270 × 310 km. The area covered by each cell of the TaiESM1, ACCESS-CM2, and CanESM5 models is approximately 12,400 km², 23,600 km², and 83,700 km², respectively. Each model incorporates four Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios for carbon dioxide emissions: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5. These scenarios were used to simulate monthly and annual rainfall for future periods. Monthly rainfall data were extracted for two time periods: the base period (1850–2014) and the future period (2015–2100), under the aforementioned emission scenarios. Additionally, a regression-based relationship between annual rainfall data and the altitudes of the rain gauge stations was established to derive the rainfall-altitude gradient for the study area. This relationship was then used to generate a rainfall map and, subsequently, a dimensionless rainfall map with a spatial resolution of 90 × 90 meters. The dimensionless rainfall map represents the ratio of each pixel's annual rainfall to the long-term average rainfall of the region. This map was instrumental in downscaling the coarse-resolution rainfall data from the CMIP6 models into high-resolution rainfall maps with a pixel size of 90 × 90 meters.

Results: the results of this study indicate that the proposed method for downscaling CMIP6 rainfall data exhibits varying levels of efficiency across the three climate models with different spatial resolutions. Specifically, the method demonstrated higher accuracy with the TaiESM1 model compared to the ACCESS-CM2 and CanESM5 models. As previously mentioned, the area covered by each cell of the TaiESM1, ACCESS-CM2, and CanESM5 models is relatively large, resulting in low spatial resolution for these models. It is concluded that the accuracy of the proposed downscaling method is generally higher

1. PHD student of Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Desertology, Yazd University; Email: mahdavi30@gmail.com

2. Associate Professor, Pasture and Watershed Department, Faculty of Natural Resources and Desertology, Yazd University; Email: zhosseini@yazduni.ac.ir

3. Associate Professor, Pasture and Watershed Department, Faculty of Natural Resources and Desertology, Yazd University; Email: malekinezhad.h@gmail.com

4. Assistant Professor of the National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Yazd, Iran; Email: mrahamian@gmail.com

5 Assistant Professor, Department of Pasture and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Desertology, Yazd University; Email: amin.asadi4@gmail.com

for climate models with finer spatial resolutions. Among the CMIP6 climate models examined, the following models have smaller cell sizes and are therefore recommended for applying the proposed downscaling method: BCC-CSM2-MR, CAMS-CSM1-0, CESM2-WACCM, CIesm, CMCC-CM2-SR5, FIO-ESM-2-0, GFDL-ESM4, MRI-ESM2-0, INM-CM4-8. Additionally, the findings of this research suggest that the average annual rainfall in Yazd Province is projected to increase in the coming decades. The models predict a rainfall increase ranging from 1% to 23%, with an average increase of 13% compared to the base period. Among the three climate models analyzed, the ACCESS-CM2 model predicted the highest increase in rainfall, particularly under the SSP3-7.0 scenario.

Discussion and Conclusion: In this research, a method for downscaling large-scale rainfall data from CMIP6 climate models was introduced, utilizing the rainfall-altitude gradient and a Digital Elevation Model (DEM) of the region. This method was successfully applied to downscale data from three CMIP6 models: TaiESM1, ACCESS-CM2, and CanESM5. Although these models have relatively large cell sizes, the proposed method enabled the generation of high-resolution rainfall maps for the study area with a spatial resolution of 90×90 meters. The results indicate that the accuracy of the proposed downscaling approach is higher for CMIP6 climate models with finer spatial resolutions compared to those with coarser resolutions. This method is recommended for downscaling CMIP6 rainfall data in regions with similar land surface topography. However, for regions with different topographical characteristics, further investigations may be required to adapt and validate the method.

Keywords: land surface topography, rainfall-altitude gradient, dimensionless rainfall map, General Circulation Models, SSP scenarios.