

تحلیل منطقه‌ای دقت مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی بارش ایران

سجاد درزی^{۱*}، عماد محجوبی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
(sajad.darzi1996@gmail.com)

۲- استادیار گروه مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
(emahjoobi@shahroodut.ac.ir)

چکیده

تغییر اقلیم ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای، الگوهای بارش را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار داده و پیامدهای جدی برای منابع آب و محیط زیست به همراه داشته است. از این رو، ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی که برای پیش‌بینی این تغییرات مورد استفاده قرار می‌گیرند، ضروری است. در این راستا، مدل‌های گردش عمومی جو-اقیانوس (AOGCM) مرتبط با ششمین گزارش ارزیابی IPCC (CMIP6) به عنوان ابزاری رایج مورد استفاده قرار می‌گیرند. پژوهش حاضر به ارزیابی عملکرد ۵۱ مدل CMIP6 در شبیه‌سازی بارش در پهنه ایران با استفاده از داده‌های ماهانه ۳۱ ایستگاه سینوپتیک مراکز استان‌ها در دوره آماری ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۴ پرداخت. برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از سه شاخص آماری شامل شاخص کلینگ-گوپتا (KGE)، ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. سپس، مدل‌ها با استفاده از روش میانگین‌گیری ساده (SAW) رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که عملکرد مدل‌ها در ایستگاه‌های مختلف، به‌ویژه در برآورد بارش نواحی مختلف ایران، متفاوت بود. به‌طوری‌که از بین ۵۱ مدل مورد بررسی، ۱۵ مدل مختلف موفق به کسب رتبه اول در حداقل یک ایستگاه شدند. با این حال، مدل‌های IITM-ESM و MIROC-ES2L به عنوان مدل‌های برتر شناسایی شدند. با توجه به محدودیت روش SAW در اختصاص وزن مساوی به شاخص‌ها، پیشنهاد می‌شود برای کاهش عدم قطعیت از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره یا ایجاد مدل همادی استفاده شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب مدل GCM مناسب برای هر منطقه، امری پیچیده و وابسته به عوامل متعدد از جمله ویژگی‌های اقلیمی و توپوگرافی منطقه است و استفاده از یک مدل واحد برای کل ایران مناسب نیست.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، CMIP6، ارزیابی مدل، بارش، SAW.

۱. مقدمه

تغییرات اقلیمی، با توجه به پیامدهای مخرب زیست‌محیطی و اجتماعی-اقتصادی گسترده‌ای که به همراه دارد، به یکی از چالش‌های اصلی قرن بیست‌ویکم مبدل شده است [1]. افزایش قابل توجه در فراوانی و شدت رخداد‌های حدی آب‌وهوایی در دهه‌های اخیر، به طور مستقیم و غیرمستقیم به فعالیت‌های انسانی نسبت داده می‌شود. رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی به عنوان دو عامل کلیدی در تشدید بحران جهانی آب شناخته می‌شوند [2]. گزارش‌های هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم

دانشجویان مهندسی عمران ایران

2nd Congress of Scientific and Technological Development of Civil Engineering Students of Iran

(IPCC¹) نشان داده است که افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در جو زمین در دهه‌های گذشته، باعث کاهش خروج امواج حرارتی طول موج بلند از زمین شده و افزایش دمای هوا را به دنبال داشته است [3]. این تغییرات، اثرات معناداری بر فرایندهای آب‌وهوایی در نقاط مختلف جهان داشته و مدیریت منابع آب را با چالش‌های جدی مواجه ساخته است [4]. بارش، به‌عنوان جزء کلیدی چرخه هیدرولوژیکی، نقشی حیاتی در تأمین منابع آب شیرین، کشاورزی، اکوسیستم‌ها و اقتصاد ایفا می‌کند. تغییرات در الگوهای بارش، شامل تغییر در میزان، زمان وقوع و شدت بارش، می‌تواند منجر به رخدادهای حدی مانند خشک‌سالی و سیلاب شده و پیامدهای جدی برای جوامع و محیط‌زیست به همراه داشته باشد [5]. از این رو، پیش‌بینی دقیق تغییرات بارش، برای برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای، مدیریت بهینه منابع آب و کاهش اثرات مخاطرات اقلیمی از اهمیت بسزایی برخوردار است.

مدل‌سازی اقلیمی، گامی بنیادین در برآورد تأثیر تغییر اقلیم بر جنبه‌های مختلف زندگی بشر محسوب می‌شود. مدل‌های اقلیمی تلاش می‌کنند تا فرایندهایی که روی اقلیم اثر می‌گذارند را شبیه‌سازی نموده و آن را برای سال‌های آینده پیش‌بینی کنند [6]. روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم، وجود دارد. اصلی‌ترین ابزاری که در حال حاضر برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت آب‌وهوای آینده کره زمین وجود دارد، مدل‌های گردش عمومی جوی-اقیانوسی (AOGCM²) می‌باشد که توسط IPCC ارائه می‌شوند [7]. آب‌وهوای شبیه‌سازی شده به‌دلیل ساختار مدل، پارامترسازی، فرضیات، فرایندهای کالیبراسیون و غیره با عدم قطعیت‌های زیادی همراه است. بنابراین، تمام مدل‌های گردش عمومی (GCM³) نمی‌توانند به‌طور مستقیم برای پیش‌بینی آب‌وهوای آینده در منطقه‌ای خاص مورد استفاده قرار گیرند [8]. انتخاب GCM‌های مناسب برای یک منطقه می‌تواند به‌طور قابل توجهی عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های اقلیمی را کاهش دهد [9]. مدل‌های ارائه شده در چارچوب پروژه گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6⁴)، نسبت به نسل‌های قبلی، با بهبود الگوریتم‌ها، فرایندهای فیزیکی و در نظر گرفتن متغیرهای جدید در بخش‌های مختلف بهبود قابل ملاحظه‌ای داشته و عدم قطعیت کمتری در مقیاس جهانی از خود نشان می‌دهند [10, 11, 12].

مؤسسات علمی و تحقیقاتی مختلف در سراسر جهان تاکنون ۵۱ مدل شبیه‌سازی بارش بر مبنای سناریوهای گزارش ششم ارائه داده‌اند. در این میان، ارزیابی و اولویت‌بندی این مدل‌ها برای مطالعه این پارامتر در ایران حائز اهمیت است. در این راستا، Yazdandoost و همکاران (2020)، به بررسی عدم قطعیت و مقایسه مدل‌های اقلیمی بارش CMIP6 در ایران پرداختند. آن‌ها اطلاعات ۱۲ مدل FGOALS-g3, CNRM-CM6-1, CESM2, CanESM5, BCC-CSM2-MR, MRI-ESM2-0, MIROC6, IPSL-CM6A-LR, HADGEM3-GC31-LL, GISS-E2-1, GFDL-ESM4 و NorESM2-LM و داده‌های تاریخی مرکز جهانی اقلیم‌شناسی بارش (GPCC⁵) را در پنج پهنه بسیار خشک، خشک، نیمه‌خشک، نیمه‌مرطوب و مرطوب در دوره تاریخی ۶۴ ساله ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۴ به‌وسیله پنج شاخص انحراف (BIAS⁶)، ضریب

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change

² Atmosphere Ocean General Circulation Model

³ General Circulation Model

⁴ Six Phase of the Coupled Model Intercomparison Project

⁵ Global Precipitation Climatology Centre

⁶ Classification Measurement Bias

دانشجویان مهندسی عماران ایران

2nd Congress of Scientific and Technological Development of Civil Engineering Students of Iran

همبستگی (CC^7)، میانگین خطای مطلق (MAE^8)، مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE^9$) و نمودار تیلور در مقیاس زمانی ماهانه، فصلی و سالانه ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل‌های CMIP6 ویژگی‌های اقلیمی بارش و تغییرات زمانی-مکانی آن را در مناطق خشک و بسیار خشک کشور به بهترین شکل بازتولید می‌کنند. با این وجود عدم قطعیت بالایی در مناطق مرطوب وجود دارد. ضمن اینکه هر یک از مدل‌های CMIP6 در یک منطقه آب‌وهوایی خاص مناسب‌تر به نظر می‌رسد. مدل‌های CNRM-CM6-1 و MRI-ESM2-0 بهترین عملکرد را در مناطق مرطوب و مدل‌های HadGEM3-GC31-LL، BCC-CSM2-MR و CanESM5 بهترین عملکرد را در مناطق بسیار خشک داشتند [13]. انصاری مهابادی و همکاران (۱۴۰۱)، به بررسی روند تغییرات بارش حوضه‌های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده بر اساس برون‌داد ماهانه مدل‌های CMIP6 پرداختند. آن‌ها از داده‌های ۱۰ مدل اقلیمی CESM2، CNRM-CM6-1، CanESM5، MIROC6، MRI-ESM2-0، IPSL-CM6A-LR، GISS-E2-1-G، HADGEM3-GC31-LL و NESM3 و داده‌های مشاهداتی ۱۳۸ ایستگاه باران‌سنجی در طول دوره تاریخی ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ استفاده کردند. عملکرد مدل‌ها بر مبنای تابع بازده کلینگ-گوپتا (KGE^{10}) ارزیابی شده و برای هر یک از حوضه‌های شش‌گانه اصلی ایران یک مدل منتخب تعیین شد. نتایج نشان داد مدل‌های برتر بسته به اقلیم نواحی مختلف متفاوت بوده و تنوع آن‌ها در شبیه‌سازی بارش نسبت به دما در ایران بیشتر است؛ به این ترتیب مدل HADGEM3-GC31-LL در نواحی شرقی کشور، مدل BCC-CSM2-MR در سواحل جنوبی، مدل CNRM-CM6-1 در سواحل شمالی، مدل MIROC6 در شمال غرب و مدل MRI-ESM2-0 در نواحی غربی قادر به تصویرسازی مناسب‌تر بارش هستند. پهنه‌بندی اقلیمی حاکی از تغییرات حدود ۱۲- تا ۱۹+ درصدی بارش در حوضه‌های مختلف کشور طی ۲۰ سال آتی است. لازم به ذکر است که نواحی غربی کشور بیشترین کاهش بارندگی را در این دوره تجربه خواهند کرد [14]. زارعیان و همکاران (۱۴۰۱)، به مطالعه ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 در برآورد بارش ایران بر اساس تحلیل شبکه‌ای پرداختند. آن‌ها داده‌های ماهانه ۱۰ مدل CNRM-، CESM2، BCC-CSM2-MR، GFDL-، CMCC-ESM2، CAMS-CSM1-0، IPSL-CM6A-LR، MRI-ESM2-0، MIROC6، CM6-1 و ESM4 و HADGEM3-GC31-LL را در دوره پایه ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ استخراج کرده و با داده‌های باز تحلیل شده ERA5 بر مبنای شاخص‌های CC، RMSE و KGE مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مدل‌های مختلف در ماه‌های متفاوت سال، دقت یکسانی در برآورد بارش کشور ندارند. در مقیاس سالانه نتایج نشان داد که مدل HADGEM3-GC31-LL بهترین عملکرد را در برآورد بارش دارد. همچنین میزان خطای این مدل‌ها در نواحی مرکزی و شرقی ایران کمتر از سایر نواحی است [15]. بابائیان و همکاران (۱۴۰۲)، چشم‌انداز بارش ایران را در قرن ۲۱ با به‌کارگیری مقیاس‌های آماری برون‌داد مدل‌های منتخب CMIP6 مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با استفاده از داده‌های روزانه ۴۳ ایستگاه هواشناسی و چهار مدل ACCESS-، ESM1-5، BCC-CSM2-MR، FGOALS-g3 و MIROC6 در دوره ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴، به پیش‌بینی پارامترها در دوره آینده پرداختند. نتایج نشان داد که تغییرات بارش آینده در ۱۹ درصد ایستگاه‌ها، افزایشی و در ۳ درصد کاهش‌ی خواهد بود. ضمن اینکه این تغییرات در حدود ۷۸ درصد از ایستگاه‌ها معنادار نیست. بیشترین افزایش بارش در جنوب و جنوب شرق و

⁷ Pearson Correlation Coefficient

⁸ Mean Absolute Error

⁹ Root Mean Squared Error

¹⁰ Kling-Gupta efficiency

بیشترین کاهش در زاگرس مرکزی رخ خواهد داد [16]. رضائی و همکاران (۱۴۰۳)، به ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 و پیش‌نگری تغییرات بارش تحت سناریوهای SSP در ایران پرداختند. بدین منظور آن‌ها از داده‌های ۶۰ ایستگاه همدید و هشت مدل FGOALS-g3, MIROC-ES2L, MIROC6, GFDL-ESM4, MRI-ESM2-0, MRI-ESM-1-2-LR, BCC-CSM2-MR و CanESM5 بهره گرفتند و با استفاده از سنج‌های RMSE, MAE و ضریب تبیین (R^2) مدل‌ها را ارزیابی کردند. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مدل MPI-ESM1-2-LR بهترین عملکرد را برای شبیه‌سازی بارش داشت. میزان بارش در منطقه مورد مطالعه بین ۱۲ تا ۲۸ درصد کاهش پیدا خواهد کرد [17].

بررسی مطالعات پیشین حاکی از آن است که ارزیابی مدل‌های مبتنی بر CMIP6 در پهنه ایران، با محدودیت‌هایی مواجه بوده است. عمده این مطالعات، با تمرکز بر تعداد محدودی از مدل‌های GCM و بدون در نظر گرفتن تنوع موجود در این مجموعه، انجام شده‌اند. این در حالی است که پایگاه داده کوپرنیکوس، امکان دسترسی به ۵۱ مدل GCM برای پارامتر بارش را فراهم آورده است، که تنوع در خروجی‌ها و دقت شبیه‌سازی‌ها را پوشش می‌دهد. این محدودیت در تعداد مدل‌های مورد بررسی، می‌تواند منجر به عدم شناسایی مدل‌های با عملکرد بهینه برای منطقه مورد مطالعه و در نتیجه، افزایش عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های اقلیمی گردد. همچنین، انتخاب شاخص‌های ارزیابی در مطالعات پیشین، غالباً فاقد یک رویکرد جامع بوده است. این امر به‌ویژه در ارزیابی مدل‌های بارش، که دارای پیچیدگی‌های خاص خود هستند، از اهمیت بسزایی برخوردار است. از طرفی، به اهمیت دوره آماری ایستگاه‌های هواشناسی به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در دقت ارزیابی، توجه کافی نشده است. داده‌های با دوره آماری طولانی‌تر، تصویر دقیق‌تری از تغییرات اقلیمی منطقه ارائه می‌دهند و ارزیابی دقیق‌تری از عملکرد مدل‌ها را امکان‌پذیر می‌سازند. در پژوهش حاضر، با هدف رفع محدودیت‌های ذکر شده و ارائه یک ارزیابی جامع از مدل‌های CMIP6 برای پارامتر بارش در پهنه ایران، تمامی ۵۱ مدل GCM موجود در پایگاه داده کوپرنیکوس، با استفاده از داده‌های آماری دوره ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۴ در ۳۱ ایستگاه سینوپتیک مراکز استان، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. برای کاهش عدم قطعیت و ارائه یک ارزیابی جامع، از آماره‌های KGE به‌عنوان شاخص کارایی، R^2 به‌عنوان شاخص همبستگی و RMSE به‌عنوان شاخص خطا استفاده شده است. همچنین، به منظور رتبه‌بندی مدل‌ها و شناسایی مدل‌های برتر برای هر استان، از روش میانگین وزنی ساده (SAW^{11}) استفاده شده است. این ارزیابی جامع، با تمرکز بر بازتولید شرایط بارش گذشته، به شناسایی دقیق‌ترین مدل‌ها برای پیش‌بینی‌های اقلیمی آینده کمک می‌کند و گامی مؤثر در جهت کاهش عدم قطعیت در مطالعات اقلیمی در پهنه ایران خواهد بود.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱ منطقه مورد مطالعه

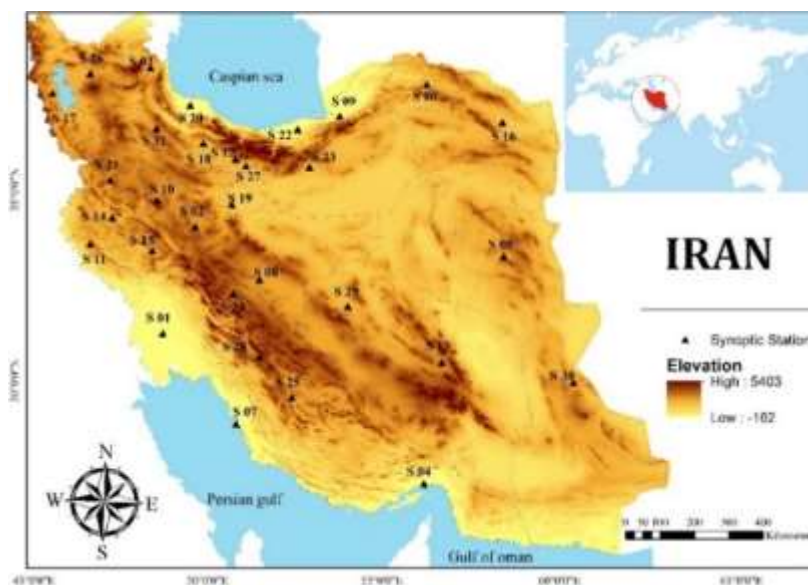
ایران با وسعتی بیش از ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع، در جنوب غربی آسیا واقع شده است. ایران، واقع در منطقه‌ای با اقلیم گذرای بین مناطق خشک و نیمه‌خشک، تغییرات قابل توجهی در الگوهای بارش به‌ویژه از نظر مکانی و زمانی نشان می‌دهد. تنوع کوهساری کشور که شامل رشته‌کوه‌ها، فلات‌ها و دشت‌ها می‌شود، بر اقلیم محلی و سامانه‌های جوی تأثیر

¹¹ Simple Average Weighting Method

دانشجویان مهندسی عمران ایران

2nd Congress of Scientific and Technological Development of Civil Engineering Students of Iran

می‌گذارد و منجر به تفاوت‌های بارز در توزیع بارش می‌گردد [18]. ایران به‌طور کلی به دو بخش سرد کوهستانی و گرم کم ارتفاع تقسیم می‌شود. میانگین بارش سالانه در ایران حدود ۲۵۰ میلی‌متر است که ایران را جزو کشورهای خشک دنیا قرار داده‌است. توزیع زمانی و مکانی بارش در کشور نیز پراکندگی یکسانی ندارد و بیش از ۷۰ درصد مناطق کشور بارش کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر دارند. بیش‌ترین مقدار بارش‌ها مربوط به کرانه‌های جنوبی دریای خزر با میانگین ۱۵۰۰ میلی‌متر در سال و کم‌ترین مقدار مربوط به بیابان‌های مرکزی لوت و کویر نمک با میانگین کمتر از ۵۰ میلی‌متر در سال است [19]. شکل ۱



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه

۲.۲ داده‌های مورد استفاده

در بخش داده‌های مشاهداتی، داده‌های ماهانه بارش ۳۱ ایستگاه سینوپتیک مراکز استان‌ها به‌عنوان نماینده هر استان در دوره آماری آوریل ۱۹۷۰ تا دسامبر ۲۰۱۴ از سازمان هواشناسی کشور گردآوری شد. مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. سپس، شبیه‌سازی‌های ماهانه بارش تمامی ۵۱ مدل GCM در دسترس از پایگاه داده کوپرنیکوس به آدرس www.cds.climate.copernicus.eu در فرمت nc استخراج شد. داده‌های مربوط به هر ایستگاه با استفاده از روش نزدیک‌ترین نقطه (Nearest Grid Point) استخراج شدند. فایل‌های دریافتی با استفاده از ابزار Make NetCDF Table View از مجموعه ابزارهای Multidimension در نرم‌افزار ArcMap به فرمت txt و سپس excel تبدیل شدند. مشخصات مدل‌های اقلیمی سناریوی ششم تغییر اقلیم در جدول ۲ آمده است. بدین ترتیب، برای هر ایستگاه، یک ماتریس داده با ابعاد ۵۲×۵۳۷ (شامل ۵۱ مدل GCM و یک مجموعه داده مشاهداتی برای ۵۳۷ ماه) تشکیل شد. در این پژوهش، با هدف مقایسه خروجی مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های هواشناسی مراکز استان‌ها طی دوره زمانی ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۴، از سه شاخص R^2 ، RMSE و KGE بهره گرفته شد. ضریب تبیین (R^2) میزان همبستگی بین داده‌های مدل‌سازی شده و

دانشجویان مهندسی عمران ایران

2nd Congress of Scientific and Technological Development of Civil Engineering Students of Iran

مشاهداتی را نشان می‌دهد و هرچه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تطابق بهتر مدل با واقعیت است. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز به‌عنوان معیاری برای میانگین اختلاف بین مقادیر مدل‌سازی‌شده و مشاهداتی به کار می‌رود و هرچه مقدار آن کمتر باشد، نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل است. شاخص کلینگ-گوپتا (KGE) به‌عنوان یک شاخص جامع، ترکیبی از سه مؤلفه مهم همبستگی، اریبی و نسبت واریانس‌ها است [20]. مقادیر بالاتر از صفر این شاخص مورد توجه بوده و هر چه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد بیانگر کارایی بالاتر مدل است.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مراکز استان‌ها

کد ایستگاه	نام ایستگاه	استان	ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	کد ایستگاه	نام ایستگاه	استان	ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
S01	اهواز	خوزستان	31.3	48.7	23	1970	S17	ارومیه	آذربایجان غربی	37.7	45.1
S02	اراک	مرکزی	34.1	49.8	1703	1970	S18	قزوین	قزوین	36.3	50.0
S03	اردبیل	اردبیل	38.2	48.3	1335	1976	S19	قم	قم	34.8	50.9
S04	بندرعباس	هرمزگان	27.2	56.4	10	1970	S20	رشت	گیلان	37.3	49.6
S05	بیرجند	خراسان جنوبی	32.9	59.3	1491	1970	S21	سنندج	کردستان	35.3	47.0
S06	بجنورد	خراسان شمالی	37.5	57.3	1065	1977	S22	ساری	مازندران	36.5	53.0
S07	بوشهر	بوشهر	28.9	50.8	8	1970	S23	سمنان	سمنان	35.6	53.4
S08	اصفهان	اصفهان	32.5	51.7	1550	1970	S24	شهرکرد	چهارمحال بختیاری	32.3	50.8
S09	گرگان	گلستان	36.9	54.4	0	1970	S25	شیراز	فارس	29.6	52.6
S10	همدان	همدان	34.9	48.5	1741	1976	S26	تبریز	آذربایجان شرقی	38.1	46.2
S11	ایلام	ایلام	33.6	46.4	1337	1986	S27	تهران	تهران	35.7	51.4
S12	کرج	البرز	35.8	51.0	1293	1985	S28	یاسوج	کهگیلویه و بویراحمد	30.7	51.6
S13	کرمان	کرمان	30.3	57.0	1754	1970	S29	یزد	یزد	31.9	54.3
S14	کرمانشاه	کرمانشاه	34.4	47.2	1319	1970	S30	زاهدان	سیستان و بلوچستان	29.5	60.9
S15	خرم‌آباد	لرستان	33.4	48.3	1148	1970	S31	زنجان	زنجان	36.7	48.5
S16	مشهد	خراسان رضوی	36.2	59.6	999	1970					

جدول ۲- مشخصات مدل‌های اقلیمی سناریوی ششم تغییر اقلیم

کد مدل	نام مدل	تفکیک مکانی	کد مدل	نام مدل	تفکیک مکانی	کد مدل	نام مدل	تفکیک مکانی
G01	ACCESS-CM2	250	G18	CNRM-CM6-1-HR	50	G35	INM-CM5-0	100
G02	ACCESS-ESM1-5	250	G19	CNRM-ESM2-1	250	G36	IPSL-CM5A2-INCA	500
G03	AWI-CM-1-1-MR	100	G20	E3SM-1-0	100	G37	IPSL-CM6A-LR	250
G04	AWI-ESM-1-1-LR	250	G21	E3SM-1-1	100	G38	KACE-1-0-G	250
G05	BCC-CSM2-MR	100	G22	E3SM-1-1-ECA	100	G39	MCM-UA-1-0	250
G06	BCC-ESM1	250	G23	EC-Earth3-AerChem	100	G40	MIROC6	250

دانشجویان مهندسی عمران ایران

2nd Congress of Scientific and Technological Development of Civil Engineering Students of Iran

250	MIROC-ES2H	G41	100	EC-Earth3-CC	G24	100	CAMS-CSM1-0	G07
500	MIROC-ES2L	G42	100	EC-Earth3-Veg-LR	G25	100	CanESM5	G08
100	MPI-ESM1-2-HR	G43	100	FGOALS-f3-L	G26	500	CanESM5-CanOE	G09
250	MPI-ESM1-2-LR	G44	100	FGOALS-g3	G27	100	CESM2	G10
500	MRI-ESM2-0	G45	100	FIO-ESM-2-0	G28	100	CESM2-FV2	G11
100	NESM3	G46	100	GFDL-ESM4	G29	100	CESM2-WACCM	G12
250	NorCPM1	G47	250	GISS-E2-1-H	G30	100	CESM2-WACCM-FV2	G13
100	NorESM2-MM	G48	250	HadGEM3-GC31-LL	G31	100	CMCC-CM2-HR4	G14
100	SAM0-UNICON	G49	100	HadGEM3-GC31-MM	G32	100	CMCC-CM2-SR5	G15
100	TaiESM1	G50	250	IITM-ESM	G33	100	CMCC-ESM2	G16
250	UKESM1-0-LL	G51	100	INM-CM4-8	G34	250	CNRM-CM6-1	G17

با استفاده از این شاخص‌ها، می‌توان مدل‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه کرده و مدلی را که بیشترین تطابق را با داده‌های مشاهداتی دارد، انتخاب نمود. به عبارت دیگر، این شاخص‌ها به عنوان ابزاری برای رتبه‌بندی مدل‌ها و انتخاب بهترین مدل برای مطالعات آتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(R - 1)^2 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_s/\sigma_s}{\mu_o/\sigma_o} - 1\right)^2} \quad (3)$$

در معادلات فوق X مقادیر شبیه‌سازی شده، Y مقادیر مشاهداتی، n تعداد داده، μ_s و μ_o به ترتیب میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، R ضریب همبستگی پیرسون و σ_s و σ_o به ترتیب انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی هستند.

در راستای کاهش عدم قطعیت در خروجی مدل‌های CMIP6، ارزیابی و رتبه‌بندی مدل‌ها بر مبنای دقت محاسبه شده توسط شاخص‌های عملکرد، با بهره‌گیری از روش SAW و با فرض تخصیص وزن یکسان به تمامی شاخص‌ها، صورت پذیرفت. به منظور فراهم آوردن امکان مقایسه شاخص‌ها با واحدهای اندازه‌گیری متفاوت، پیش از هر چیز، داده‌های اولیه با استفاده از رابطه (۴) به بازه صفر تا یک نرمال شدند. در خصوص شاخص‌هایی که کمینه مقدار آن‌ها نشان‌دهنده عملکرد مطلوب‌تر مدل بود (مثل RMSE)، مقادیر در عدد منفی یک ضرب گردیدند. در گام بعد، با محاسبه میانگین مقادیر نرمال شده برای هر مدل بر اساس رابطه (۵)، امتیاز نهایی هر مدل تعیین و مدل‌های دارای بالاترین امتیاز به عنوان مدل‌های برتر شناسایی شدند.

$$z' = \frac{z - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} \quad (4)$$

$$Score = \frac{\sum z'}{m} \quad (5)$$

در روابط بالا z مقدار شاخص، z' مقدار نرمال شده شاخص، z_{max} بیشترین مقدار شاخص، z_{min} کمترین مقدار شاخص، m تعداد شاخص ها و $Score$ امتیاز هر مدل است.

۳. نتایج و بحث

به منظور ارزیابی توانایی مدل های CMIP6 در شبیه سازی دقیق بارش، خروجی های مدل در بازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۴ با داده های مشاهداتی ایستگاه های هواشناسی مقایسه شد. نتایج حاصل از محاسبه شاخص های آماری به صورت حداقل، میانگین و حداکثر برای هر ایستگاه هواشناسی در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین، شکل ۲ تغییرات مکانی میانگین مقادیر شاخص های آماری را در ایستگاه های مختلف نشان می دهد.

همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود، مقادیر شاخص ها برای ایستگاه های مختلف متفاوت است. این نشان می دهد که عملکرد مدل ها در ایستگاه های مختلف متفاوت بوده و عوامل مختلفی مانند شرایط اقلیمی، توپوگرافی و ویژگی های مدل ها بر این تفاوت ها مؤثر هستند. با مقایسه مقادیر شاخص ها برای ایستگاه های مختلف می توان به طور نسبی به عملکرد مدل ها پی برد. مدل های اقلیمی به طور متوسط در ایستگاه های مشهد، بجنورد و سنج بشتین کارایی، در ایستگاه های مشهد، سنج و کرمانشاه بیشترین همبستگی و در ایستگاه های زاهدان، یزد و بیرجند کمترین خطا را دارند. در مقابل این مدل ها به طور متوسط در ایستگاه های یزد، اصفهان و اردبیل کمترین کارایی، در ایستگاه های بندرعباس، زاهدان و یزد کمترین همبستگی، و در ایستگاه های رشت، یاسوج و ساری بیشترین خطا را دارند. بیشترین مقدار کارایی مدل ها در ایستگاه سنج با مقدار ۰/۵۰، بیشترین مقدار همبستگی مدل ها در ایستگاه مشهد با مقدار ۰/۳۸، و کمترین مقدار خطای مدل ها در ایستگاه یزد با مقدار ۱۲/۵ میلی متر در ماه دیده می شود.

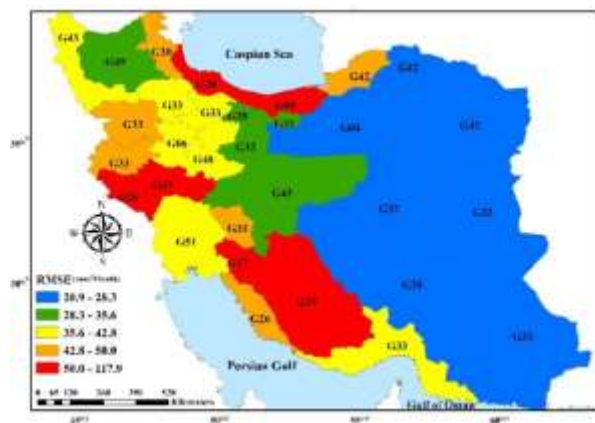
در شکل ۲ الف مشاهده می شود که متوسط همبستگی مدل های اقلیمی با ایستگاه های سینوپتیک در بازه ۰/۱۹ تا ۰/۱۹ نوسان داشته است. بالاترین مقادیر این شاخص مربوط به ایستگاه های مشهد و سنج است. به طور کل، با توجه به مقادیر پایین R^2 ، متوسط همبستگی مدل های اقلیمی با ایستگاه ها در محدوده نامطلوب قرار دارد. تغییرات متوسط خطای مدل های اقلیمی در مقایسه با ایستگاه های سینوپتیک در بازه ۲۰ تا ۱۱۸ میلی متر در ماه است (شکل ۲ ب). بر این اساس، مدل های اقلیمی در ایستگاه های حوضه فلات مرکزی (سمنان، یزد و کرمان)، حوضه مرزی شرق (بیرجند و زاهدان) و حوضه قره قوم (مشهد و بجنورد) کمترین خطا و در ایستگاه های حوضه دریای خزر (ساری و رشت) و حوضه خلیج فارس (شیراز، یاسوج، ایلام و خرم آباد) بیشترین خطا را داشته اند. ضمن اینکه دامنه تغییرات متوسط کارایی مدل های اقلیمی در شبیه سازی بارش ایستگاه های سینوپتیک بین ۱/۵- و ۰/۳ قرار دارد (شکل ۲ ج). بر مبنای این شاخص، این مدل ها در ایستگاه های مشهد، بجنورد و کرمانشاه بالاترین کارایی را در شبیه سازی بارش ایستگاه های سینوپتیک دارند.

دانشجویان مهندسی عمران ایران

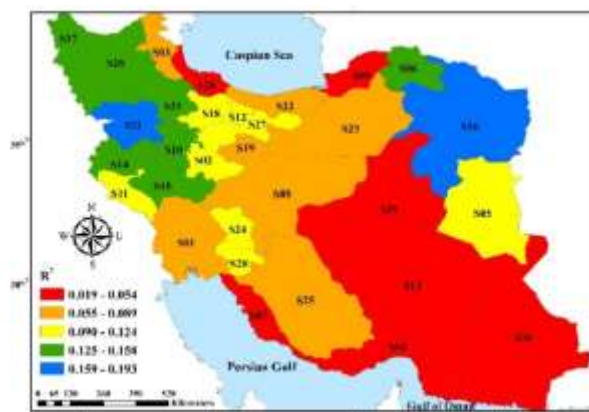
2nd Congress of Scientific and Technological Development of Civil Engineering Students of Iran

جدول ۳- بازه تغییرات شاخص‌های ارزیابی مدل‌های اقلیمی در هر ایستگاه (بیشینه، میانگین، کمینه)

ایستگاه	KGE	R ²	RMSE	ایستگاه	KGE	R ²	RMSE
اهواز	(-1.04, 0.02, 0.37)	(0.000, 0.06, 0.19)	(29.9, 36.6, 57.3)	ارومیه	(-1.55, 0.07, 0.38)	(0.007, 0.13, 0.20)	(28.6, 41.3, 102)
اراک	(-0.67, 0.16, 0.43)	(0.002, 0.12, 0.24)	(28.7, 37.1, 70.1)	قزوین	(-0.78, 0.11, 0.43)	(0.001, 0.12, 0.23)	(28.2, 39.7, 93)
اردبیل	(-3.52, -0.36 , 0.32)	(0.001, 0.08, 0.18)	(26.8, 49.6, 134)	قم	(-1.42, -0.32, 0.34)	(0.001, 0.08, 0.19)	(16.4, 28.8, 46)
بندرعباس	(-0.67, -0.06, 0.24)	(0.000, 0.02 , 0.10)	(34.8, 40.4, 50.4)	رشت	(-0.44, -0.05, 0.36)	(0.000, 0.05, 0.21)	(97, 118 , 137)
بیرجند	(-0.58, 0.08, 0.44)	(0.004, 0.12, 0.26)	(20.4, 25.8 , 38.6)	سنندج	(-0.79, 0.22 , 0.50)	(0.001, 0.17 , 0.33)	(35.7, 45.2, 99)
بجنورد	(-0.34, 0.24 , 0.46)	(0.057, 0.15, 0.24)	(19.7, 27.0, 46.6)	ساری	(-0.92, -0.08, 0.28)	(0.000, 0.06, 0.27)	(55, 68 , 176)
بوشهر	(-0.41, 0.04, 0.39)	(0.001, 0.05, 0.16)	(39.0, 44.5, 61.7)	سمنان	(-3.04, -0.31, 0.33)	(0.003, 0.07, 0.13)	(16.5, 27.4, 67)
اصفهان	(-2.61, -0.43 , 0.30)	(0.007, 0.08, 0.17)	(16.9, 30.0, 63.6)	شهرکرد	(-1.27, 0.08, 0.48)	(0.014, 0.12, 0.25)	(33.5, 44.9, 94)
گرگان	(-0.86, -0.08, 0.17)	(0.001, 0.05, 0.10)	(37.3, 45.1, 96.8)	شیراز	(-0.76, 0.04, 0.36)	(0.001, 0.07, 0.18)	(43.7, 52.7, 84)
همدان	(-0.74, 0.17, 0.44)	(0.001, 0.15, 0.27)	(26.5, 36.3, 69.4)	تبریز	(-0.87, 0.04, 0.40)	(0.003, 0.14, 0.23)	(23.1, 33.4, 57)
ایلام	(-0.74, 0.03, 0.47)	(0.001, 0.10, 0.24)	(56.6, 65.7, 93.1)	تهران	(-2.21, 0.03, 0.38)	(0.000, 0.10, 0.20)	(23.6, 33.7, 86)
کرج	(-1.54, 0.08, 0.44)	(0.000, 0.10, 0.20)	(25.5, 33.7, 73.7)	یاسوج	(-0.49, 0.02, 0.46)	(0.000, 0.10, 0.25)	(90, 105 , 135)
کرمان	(-4.00, -0.18, 0.31)	(0.000, 0.05, 0.13)	(17.8, 27.2, 89.0)	یزد	(-4.30, -1.48 , 0.21)	(0.004, 0.04 , 0.16)	(12.5, 23.8 , 43)
کرمانشاه	(-0.65, 0.23, 0.47)	(0.001, 0.16 , 0.30)	(40.0, 49.2, 95.7)	زاهدان	(-2.24, -0.41, 0.18)	(0.000, 0.03 , 0.12)	(13.2, 20.9 , 42)
خرم‌آباد	(-1.39, 0.13, 0.47)	(0.006, 0.14, 0.25)	(44.8, 55.4, 148)	زنجان	(-1.87, 0.09, 0.44)	(0.003, 0.13, 0.25)	(24.8, 36.1, 89)
مشهد	(-0.15, 0.30 , 0.56)	(0.028, 0.19 , 0.38)	(22.7, 27.2, 41.9)				



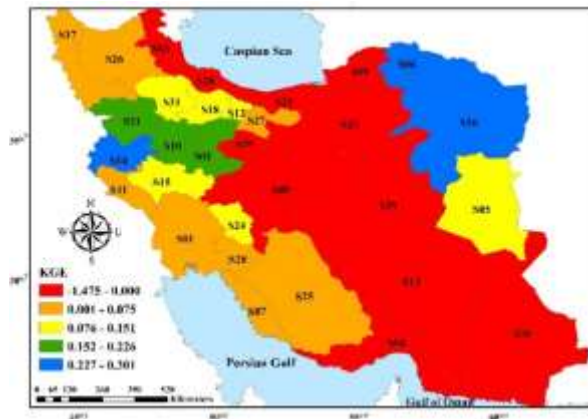
ب



الف

دانشجویان مهندسی عماران ایران

2nd Congress of Scientific and Technological Development of Civil Engineering Students of Iran



ج

شکل ۲- پهنه‌بندی متوسط الف) همبستگی، ب) خطا، ج) کارایی بارش ماهانه ایستگاه‌های سینوپتیک

در ادامه، با نرمال‌سازی مقادیر شاخص‌ها و محاسبه امتیاز هر مدل، مدل برتر در هر یک از ایستگاه‌های سینوپتیک مشخص شدند. جدول ۴ امتیاز و مقادیر شاخص‌های ارزیابی مربوط به مدل برتر در هر یک از ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۳ نیز پهنه‌بندی مدل برتر و جدول مدل‌های در اولویت یک تا سه در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. نتایج ارزیابی مدل‌های GCM در ۳۱ ایستگاه هواشناسی نشان می‌دهد که تنوع مطلوبی در عملکرد مدل‌ها در مناطق مختلف کشور وجود دارد. به‌طوری‌که از بین ۵۱ مدل مورد بررسی، ۱۵ مدل مختلف موفق به کسب رتبه اول در حداقل یک ایستگاه شده‌اند. با این حال، مدل IITM-ESM با کسب رتبه اول در ۱۱ ایستگاه زاهدان، بیرجند، بندرعباس، شیراز، شهرکرد، خرم‌آباد، کرمانشاه، سنندج، زنجان، قزوین و تهران و همچنین کسب رتبه‌های بالا در سایر ایستگاه‌ها، عملکرد قابل‌توجهی از خود نشان داده است. این امر حاکی از توانایی بالای این مدل در شبیه‌سازی شرایط اقلیمی متنوع در مناطق مختلف کشور است. علاوه بر این، مدل MIROC-ES2L نیز با کسب رتبه نخست در سه ایستگاه مشهد، بجنورد و گرگان به‌عنوان دومین مدل برتر شناخته شده است. پس از آن مدل‌های GGOALS-f3, HADGEM3-GC31-MM, KACE-1-0-G, MPI-ESM1-2-HR, NORCPM1 و NORESM2-MM نیز از عملکرد مناسبی برخوردار بودند. نتایج این پژوهش در شناسایی مدل‌های برتر شبیه‌ساز بارش با یافته‌های مطالعات پیشین همخوانی قابل‌توجهی دارد. به عنوان مثال، Yazdandoost و همکاران (۲۰۲۰)، مدل BCC-CSM2 را به عنوان یکی از مدل‌های با عملکرد مطلوب در مناطق خشک ایران معرفی کردند، که با یافته‌های این پژوهش مبنی بر برتری این مدل در ایستگاه شیراز، مطابقت دارد. به طور مشابه، مدل CNRM-CM6A که توسط Yazdandoost و همکاران (۲۰۲۰)، در مناطق مرطوب به عنوان مدل برتر شناخته شده بود، در این پژوهش نیز در ایستگاه ایلام با اقلیم نیمه‌مرطوب، عملکرد مطلوبی نشان داد. این تطابق در مورد سایر مطالعات نیز مشاهده می‌شود؛ به طوری که برتری مدل BCC-CSM2-MR در سواحل جنوبی در مطالعه مهابادی و همکاران (۱۴۰۱) با یافته‌های این پژوهش در بندرعباس و برتری مدل HadGEM3-GC31-LL در نواحی مرکزی در مطالعه زارعیان و همکاران (۱۴۰۱) با نتایج ایستگاه شیراز همسو است.

جدول ۴- امتیاز و مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل برتر هر ایستگاه

دانشجویان مهندسی عمران ایران

2nd Congress of Scientific and Technological Development of Civil Engineering Students of Iran

Score	RMSE	R ²	KGE	مدل برتر	ایستگاه	Score	RMSE	R ²	KGE	مدل برتر	ایستگاه
0.94	34.22	0.19	0.37	MPI-ESM1-2-HR	ارومیه	0.97	29.92	0.19	0.26	UKESM1-0-LL	اهواز
0.97	28.16	0.21	0.41	IITM-ESM	قزوین	0.98	28.70	0.24	0.36	NorESM2-MM	اراک
0.85	18.45	0.12	0.34	HadGEM3-GC31-MM	قم	0.95	33.62	0.17	0.13	E3SM-1-0	اردبیل
0.98	100.50	0.21	0.26	FIO-ESM-2-0	رشت	0.96	36.66	0.10	0.24	IITM-ESM	بندرعباس
0.97	41.18	0.33	0.50	IITM-ESM	سنندج	0.97	21.85	0.26	0.44	IITM-ESM	بیرجند
0.80	60.84	0.17	0.08	CanESM5	ساری	0.99	19.69	0.24	0.46	MIROC-ES2L	بجنورد
0.95	19.67	0.12	0.32	AWI-ESM-1-1-LR	سمنان	0.97	41.19	0.16	0.39	FGOALS-f3-L	بوشهر
0.98	36.79	0.25	0.48	IITM-ESM	شهرکرد	0.91	23.72	0.16	0.11	MPI-ESM1-2-HR	اصفهان
0.93	45.48	0.15	0.36	IITM-ESM	شیراز	0.99	37.31	0.10	0.21	MIROC-ES2L	گرگان
0.95	26.69	0.22	0.38	SAM0-UNICON	تبریز	0.92	27.25	0.21	0.44	BCC-ESM1	همدان
0.91	34.48	0.20	0.15	IITM-ESM	تهران	0.99	57.08	0.23	0.47	FGOALS-f3-L	ایلام
0.99	89.97	0.24	0.46	CNRM-CM6-1	یاسوج	0.99	27.57	0.20	0.44	KACE-1-0-G	کرج
0.85	13.34	0.10	0.00	HadGEM3-GC31-MM	یزد	0.94	19.26	0.11	0.31	KACE-1-0-G	کرمان
0.82	16.53	0.08	0.05	IITM-ESM	زاهدان	0.98	43.59	0.30	0.47	IITM-ESM	کرمانشاه
0.95	32.16	0.25	0.36	IITM-ESM	زنجان	0.98	46.29	0.24	0.47	IITM-ESM	خرم آباد
						1.00	22.70	0.38	0.56	MIROC-ES2L	مشهد

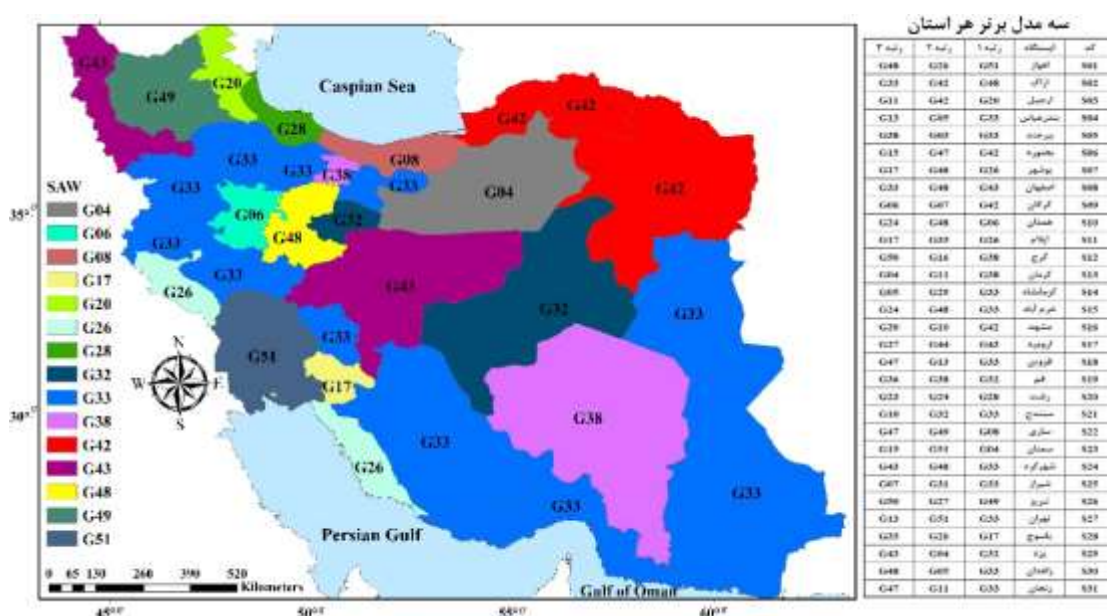
۴. نتیجه گیری

مدل های GCM برگرفته از CMIP6 به عنوان ابزاری رایج در شبیه سازی متغیرهای اقلیمی، به ویژه دما و بارش، شناخته می شوند. تنوع و تعدد این مدل ها و توسعه نسخه های گوناگون آن ها توسط مراکز علمی و پژوهشی در سطح جهانی، ارزیابی عملکرد این مدل ها را در مقیاس های منطقه ای و محلی اجتناب ناپذیر ساخته است. مطالعه حاضر به ارزیابی مدل های موجود برای متغیر بارش در پهنه ایران پرداخت. در این راستا، از ۵۱ مدل موجود در گزارش ششم تغییر اقلیم و داده های ۳۱ ایستگاه سینوپتیک مراکز استان های کشور در دوره آماری ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۴ استفاده شد. به کمک سه شاخص ارزیابی KGE، R² و RMSE، داده ها ارزیابی و با استفاده از روش میانگین گیری ساده (SAW) رتبه بندی شدند. نتایج نشان داد که دقت این مدل ها در زمینه برآورد بارش نواحی مختلف ایران دارای اختلاف هایی با یکدیگر است. البته این اختلاف به کمک روش رتبه بندی SAW کاهش پیدا کرد؛ به طوری که مدل های IITM-ESM و MIROC-ES2L بهترین عملکرد را در ایستگاه های مختلف داشتند. با توجه به جامعیت این مطالعه، بر اساس تکرار مدل ها در اولویت های یک تا سه در استان های مختلف، توصیه می شود مدل های IITM-ESM، NorESM2-MM، MIROC-ES2L، FGOALS-f3-L، MPI-ESM1-2-HR، KACE-1-0-G و NorCPM1 در هر مطالعه بررسی و ارزیابی مدل های CMIP6 بر روی بارش ماهانه در پهنه ایران مورد توجه قرار گیرد. بررسی تفکیک مکانی مدل های برتر نشان می دهد که لزوماً مدل هایی با بالاترین تفکیک مکانی، بهترین عملکرد را در شبیه سازی بارش در ایران نداشته اند. در واقع، مدل های برتر دارای تفکیک مکانی متوسطی هستند که این موضوع بیانگر عدم کفایت تفکیک مکانی به تنهایی به عنوان شاخصی برای برتری مدل ها است. با توجه به لحاظ وزن برابر شاخص ها در روش SAW، همچنان عدم قطعیت هایی در این تحلیل وجود خواهد داشت. برای کاهش این عدم قطعیت ها

دانشجویان مهندسی عمران ایران

2nd Congress of Scientific and Technological Development of Civil Engineering Students of Iran

می‌توان از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و یا ایجاد یک مدل همادی به کمک مدل‌های برتر استفاده کرد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب مناسب‌ترین مدل GCM برای هر منطقه، امری پیچیده و وابسته به عوامل متعدد است. با توجه به تنوع اقلیمی ایران، استفاده از یک مدل واحد برای تمامی مناطق کشور مناسب نیست. بنابراین، برای انجام مطالعات تغییر اقلیم در مقیاس محلی، توصیه می‌شود که چندین مدل مختلف ارزیابی شده و سپس با توجه به ویژگی‌های هر منطقه، مناسب‌ترین مدل انتخاب شود.



شکل ۳- پهنه‌بندی مدل برتر و جدول مدل‌های در اولویت یک تا سه در هر ایستگاه

۵. مراجع

- 1- Goodarzi, M. R., Abedi, M. J., & Pour, M. H. (2022). Climate change and trend analysis of precipitation and temperature: A case study of Gilan, Iran. In Current Directions in Water Scarcity Research (Vol. 7, pp. 561-587). Elsevier.
- 2- Mishra, B. K., Kumar, P., Saraswat, C., Chakraborty, S., & Gautam, A. (2021). Water security in a changing environment: Concept, challenges and solutions. Water, 13(4), 490.
- 3- IPCC, 2021: Climate change 2021-the physical science basis. Interaction, 49(4), 44-45.
- 4- Zareian, M. J. (2021). Optimal water allocation at different levels of climate change to minimize water shortage in arid regions (Case Study: Zayandeh-Rud River Basin, Iran). Journal of Hydro-Environment Research, 35, 13-30.
- 5- Liu, C., Yang, C., Yang, Q., & Wang, J. (2021). Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. Scientific reports, 11(1), 1280.

- 6- Khan, A. J., Koch, M., & Tahir, A. A. (2020). Impacts of climate change on the water availability, seasonality and extremes in the Upper Indus Basin (UIB). *Sustainability*, 12(4), 1283.
- 7- Zahmatkesh, Z., Karamouz, M., Goharian, E., & Burian, S. J. (2015). Analysis of the effects of climate change on urban storm water runoff using statistically downscaled precipitation data and a change factor approach. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(7), 05014022.
- 8- Khan, N., Shahid, S., Ahmed, K., Ismail, T., Nawaz, N., & Son, M. (2018). Performance assessment of general circulation model in simulating daily precipitation and temperature using multiple gridded datasets. *Water*, 10(12), 1793.
- 9- Salman, S. A., Nashwan, M. S., Ismail, T., & Shahid, S. (2020). Selection of CMIP5 general circulation model outputs of precipitation for peninsular Malaysia. *Hydrology Research*, 51(4), 781-798.
- 10- Gusain, A., Ghosh, S., & Karmakar, S. (2020). Added value of CMIP6 over CMIP5 models in simulating Indian summer monsoon rainfall. *Atmospheric Research*, 232, 104680.
- 11- Zhu, Y. Y., & Yang, S. (2020). Evaluation of CMIP6 for historical temperature and precipitation over the Tibetan Plateau and its comparison with CMIP5. *Advances in Climate Change Research*, 11(3), 239-251.
- 12- Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M. N., Rashid, I. U., Kamil, S., Abid, M. A., ... & Sylla, M. B. (2021). Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. *Earth Systems and Environment*, 5(2), 155-183.
- 13- Yazdandoost, F., Moradian, S., Izadi, A., & Aghakouchak, A. (2021). Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison. *Atmospheric Research*, 250, 105369.
- ۱۴- انصاری مهابادی, ثمین, دهیان, حسین, زارعیان, محمد جواد و فرخ نیا, اشکان. (۱۴۰۱). بررسی روند تغییرات دما و بارش حوضه‌های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده بر اساس برونداد مدل‌های CMIP6 پژوهش آب ایران.
- ۱۵- زارعیان, دهیان و گوهری. (۱۴۰۱). ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 در برآورد دما و بارش ایران بر اساس تحلیل شبکه‌ای. مدیریت آب و آبیاری.
- ۱۶- بابائیان, ایمان, مدیریان, راهله, کریمیان, مریم و جوانشیری, زهره (۱۴۰۰). پیش‌بینی چندسالانه بارش ایران با مقیاس‌کاهی برونداد مدل‌های DCP, مطالعه موردی: دوره ۲۰۲۳-۲۰۱۹. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی.
- ۱۷- رضائی, حسن, پاشاپور, حجت‌الله و صادقی, فرشید (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 و پیش‌نگری تغییرات دما و بارش تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) در ایران.
- 18- Heydarizad, M., Raeisi, E., Sorí, R., & Gimeno, L. (2019). Developing meteoric water lines for Iran based on air masses and moisture sources. *Water*, 11(11), 2359.
- ۱۹- احمدی محمود و کمانگر محمد. (۱۴۰۲). پیش‌نگری دماهای حدی فصل سرد ایران با استفاده از یک سامانه همادی چند مدلی با سناریوهای اجتماعی-اقتصادی مدل‌های CMIP6.
- 20- Kling, H., Gupta, H. K., & Jagermeyr, J. (2006). A quasi-analytical approach to identify model parameter sensitivity and identifiability. *Journal of hydrology*, 316(1-4), 237-251.