

پهنه‌بندی بهترین مدل‌های اقلیمی گزارش ششم تغییر اقلیم در شبیه‌سازی دمای حداکثر ماهانه در ایران

سجاد درزی^{1*}، عماد محجوبی²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(sajad.darzi1996@gmail.com)

2- استادیار گروه مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(emahjoobi@shahroodut.ac.ir)

خلاصه

با توجه به افزایش فزاینده‌ی غلظت گازهای گلخانه‌ای و تأثیرات آن بر تغییرات اقلیمی، ارزیابی دقت مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) در بازتولید متغیرهای اقلیمی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پژوهش حاضر به بررسی عملکرد ۳۲ مدل از مجموعه CMIP6 در شبیه‌سازی دمای حداکثر ماهانه در ۳۱ ایستگاه سینوپتیک واقع در ایران طی دوره آماری ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۴ اختصاص یافت. به منظور کمی‌سازی دقت مدل‌ها، از سه شاخص آماری متداول شامل تابع بازده کلینگ-گوپتا (KGE)، ضریب تبیین (R^2) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. سپس، با به‌کارگیری روش میانگین‌گیری وزنی ساده (SAW)، مدل برتر برای هر ایستگاه تعیین گردید. نتایج حاصل نشان داد که در سطح کشور، همگنی نسبتاً مناسبی در عملکرد مدل‌ها مشاهده می‌شود، اگرچه عملکرد آن‌ها در ایستگاه‌های مختلف، ناهمگونی‌هایی را نیز نشان می‌دهد. با این وجود، یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که مدل‌های EC-Earth3-CC و HadGEM3-GC31-MM به طور کلی عملکرد نسبتاً بهتری در شبیه‌سازی دمای حداکثر در سطح ایران داشته‌اند. نکته قابل توجه آن است که در ۲۲ استان، یکی از چهار مدل EC-Earth3-CC، HadGEM3-GC31-MM، CMCC-ESM2 و MPI-ESM1-2-LR، به عنوان بهترین مدل شبیه‌سازی دمای حداکثر ماهانه شناسایی شد. این امر، مؤید سازگاری و قابلیت اعتماد این مدل‌ها در سطح منطقه‌ی مورد مطالعه است. با این حال، به منظور اتخاذ تصمیمات دقیق در زمینه برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه منابع آب و انرژی، توصیه می‌شود که از خروجی‌های چند مدل با عملکرد مناسب به صورت تلفیقی استفاده شده و نتایج آن‌ها به منظور کاهش عدم قطعیت‌ها مورد مقایسه و تحلیل قرار گیرد.

کلمات کلیدی: ارزیابی عملکرد، ایستگاه‌های سینوپتیک، روش میانگین وزنی ساده، تابع بازده کلینگ-گوپتا، GCM.

1. مقدمه

اقلیم را به‌راحتی می‌توان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در زندگی انسان و حیات جوامع انسانی قلمداد نمود. گرم شدن آب‌وهوای کره زمین و تغییر اقلیم در حال حاضر به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی جهان تبدیل شده است [1]. تأثیر افزایش جمعیت بر روی تغییرات اقلیمی کاملاً واضح و مشخص است [2]. انقلاب صنعتی و متعاقب آن، افزایش تصاعدی مصرف سوخت‌های فسیلی، عامل اصلی تشدید گرمایش جهانی و پدیده تغییر اقلیم در دهه‌های اخیر بوده است. این تغییرات، تأثیرات قابل توجهی بر منابع طبیعی، به ویژه منابع آب، داشته و چالش‌های متعددی را به همراه آورده است [3]. میزان افزایش درجه

حرارت زمین و گرمایش جهانی در سال 2017 یک درجه سانتی‌گراد از دوران قبل از صنعتی شدن بالاتر بوده است [4]. مدتهاست که تغییر در خصوصیات هواشناسی مناطق مختلف دنیا برای محققین و پژوهشگران به اثبات رسیده است [5,6]. به طوری که طبق پیش‌بینی‌ها، میانگین افزایش دمای جهانی در 20 سال آینده به $1/5$ درجه سانتی‌گراد خواهد رسید [7]. علاوه بر این، تغییر اقلیم باعث شده است که سایر فرایندهای آب‌وهواشناسی نظیر مقادیر حدی بارش و سیلاب، طوفان‌ها، خشک‌سالی و ترسالی‌ها و نیاز آبی گیاهان نیز به صورت‌های مختلفی تحت تأثیر قرار گیرد [8]. به دلیل اثرگذاری معنی‌دار تغییر اقلیم در فرایندهای آب‌وهوایی در نقاط مختلف جهان، مدیریت منابع آب در این نواحی نیز با چالش‌هایی مواجه شده است. این موضوع در کلیه نواحی خشک و یا مرطوب باعث تغییر رویکردهای جاری در خصوص عرضه و تقاضای آب و همچنین سیاست‌گذاری کلان در حوضه سازگاری با تغییر اقلیم گردیده است. کشور ایران نیز یکی از نواحی دنیاست که با چالش‌های متعددی در زمینه مدیریت منابع آب مواجه است و این چالش‌ها می‌توانند در اثر تغییر اقلیم تشدید گردند. تنوع اقلیمی در نواحی مختلف ایران علاوه بر این که موجب شکل‌گیری مراکز جمعیتی، صنعتی و کشاورزی در کشور گردیده است، الگوی مصرف آب را نیز در نواحی مختلف با یکدیگر متمایز ساخته است [9]. یکی از مهم‌ترین متغیرهای هواشناسی که تغییر اقلیم می‌تواند باعث اثرگذاری بر مقدار آن شود، دمای بیشینه است. این متغیر به نحو قابل توجهی بر مؤلفه‌های مدیریت آب تأثیرگذار است. افزایش مصرف آب در اثر افزایش دمای بیشینه، وقوع تنش‌های آبی در مصارف مختلف و همچنین اثرگذاری قابل توجه بر مصرف آب و تنش‌های آبی محصولات کشاورزی (به دلیل افزایش تبخیر و تعرق)، از مهم‌ترین مواردی هستند که در اثر تغییر در دمای بیشینه، به وقوع خواهند پیوست. تأمین آب بیشتر برای جبران افزایش مصرف ناشی از افزایش دمای بیشینه، به نوبه خود باعث برهم خوردن تعادل در عرضه و تقاضای آب خواهد شد [10].

مدل‌های گردش عمومی جو ($GCMS^1$) نمایش جامع و فزاینده‌ای از سامانه اقلیم ارائه می‌دهند و به عنوان اصلی‌ترین ابزار برای درک و پیش‌بینی تغییر اقلیم استفاده می‌شوند [11]. علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه در توسعه مدل‌های اقلیمی طی دهه‌های اخیر، همچنان عدم قطعیت‌هایی در شبیه‌سازی دقیق متغیرهای اقلیمی در برخی مناطق وجود دارد و ناهماهنگی‌هایی بین خروجی مدل‌ها و داده‌های مشاهداتی مشاهده می‌شود. این امر، ضرورت بهبود دقت و قابلیت اطمینان این مدل‌ها، به ویژه در مقیاس‌های منطقه‌ای، را بیش از پیش نمایان می‌سازد [12]. با توجه به محدودیت‌های ذاتی موجود در مدل‌های اقلیمی، انتخاب آگاهانه و مبتنی بر ارزیابی دقیق عملکرد آن‌ها برای کاربردهای مختلف مطالعاتی و اجرایی ضروری است. این امر مستلزم بررسی و مقایسه خروجی مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی در مناطق مورد مطالعه است [13]. در این زمینه هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم ($IPCC^2$) به عنوان مهم‌ترین مرجع پژوهش‌ها و پیش‌بینی‌های مربوط به تغییر اقلیم، تاکنون شش نسل از سناریوهای انتشار را ارائه داده است. جدیدترین گزارش IPCC موسوم به CMIP6³ شرایط اقلیم آینده را تحت سناریوهای انتشار (SSP^4) شبیه‌سازی می‌کند [14]. مدل‌های مستخرج از CMIP6، نسبت به نسل‌های قبلی با لحاظ عوامل فیزیکی بیشتر، طیف وسیعی از سناریوها را شامل می‌شوند [15,16].

مؤسسات علمی و تحقیقاتی مختلف در سراسر جهان تاکنون 32 مدل شبیه‌سازی دمای حداکثر بر مبنای سناریوهای گزارش ششم ارائه داده‌اند. در این میان، ارزیابی و اولویت‌بندی این مدل‌ها برای مطالعه این پارامتر در مناطق مختلف حائز اهمیت است. در این راستا، زرین و همکاران (1399) سه مدل BCC-CSM2-MR، CAMS-CSM1-0 و MRI-ESM2-0 از مجموعه

¹ General Circulation Model

² Intergovernmental Panel on Climate Change

³ Coupled Model Intercomparison Project

⁴ Shared Socioeconomic Pathways

مدل‌های CMIP6 را در دوره تاریخی 1990 تا 2009 بر مبنای داده‌های میانگین دمای سالانه 43 ایستگاه همدید ارزیابی کردند. به این منظور از شاخص‌های آماری مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE^5$)، ضریب نش-ساتکلیف (NSE^6) و شاخص کلینگ-گوپتا (KGE^7) جهت درستی‌سنجی مدل‌ها بهره گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل BCC-CSM2-MR در دو پهنه اقلیمی بیابان خشک و بسیار گرم (زاهدان، اهواز، بوشهر، یزد و بندرعباس) و نیمه بیابانی خشک و بسیار گرم (شیراز) و مدل CAMS-CSM1-0 در پنج پهنه اقلیمی بیابان خشک و سرد (مشهد، سمنان، اصفهان و کرمان)، نیمه بیابانی خشک و سرد (تبریز، بیرجند، بجنورد، زنجان، ارومیه، همدان، قم، تهران و گرگان)، معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم (بابلسر و خرم‌آباد)، معتدل پرباران با تابستان‌های گرم (رشت) و اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم (سنندج، کرمانشاه، اراک و شهرکرد) بهترین عملکرد را دارد [17]. زرین و داداشی (1399) به پیش‌نگری دمای ایران در بازه 2021 تا 2040 بر اساس رویکرد همادی چند مدلی CMIP6 پرداختند. آن‌ها از خروجی پنج مدل GFDL-ESM4، IPSL-CM6A-LR، MRI-ESM2-0، MPI-ESM1-2-HR و UKESM1-0-LL و داده‌های 120 ایستگاه همدید در دوره تاریخی 1995 تا 2014 در مقیاس میانگین سالانه استفاده کردند. برای صحت‌سنجی مدل‌ها از سنجه‌های آماری میانگین انحراف خطا (MBE^8) و مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده ($NRMSE^9$) استفاده کرده و یک مدل همادی تشکیل دادند. نتایج نشان داد که تصحیح اریبی و همادی کردن مدل‌ها به روش میانگین وزنی مستقل (IWM^{10}) پیش‌نگری دمای سالانه را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک نسبت به مناطق مرطوب شمالی بهبود می‌بخشد. ضمناً بر اساس سناریوهای SSP370 و SSP585 میانگین دمای سالانه کشور در دوره 20 ساله آتی به ترتیب 1/13 و 1/26 درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. کمینه بی‌هنجاری در جنوب شرق و بیشینه آن در مناطق شمال غربی و مرکزی ایران اتفاق می‌افتد. همچنین در پهنه‌های مختلف دو مدل UKESM1-0-LL و IPSL-CM6A-LR بیشترین وزن را در تولید مدل همادی به خود اختصاص دادند [18]. زارعیان و همکاران (1401) به مطالعه ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 در برآورد دمای ایران بر اساس تحلیل شبکه‌ای پرداختند. آن‌ها داده‌های 10 مدل BCC-CSM2-MR، CESM2، CNRM-CM6-1، HadGEM3-GC31-LL و GFDL-ESM4، CMCC-ESM2، CAMS-CSM1-0، IPSL-CM6A-LR، MRI-ESM2-0، MIROC6 را در دوره پایه 1980 تا 2014 به‌صورت ماهانه استخراج کرده و با داده‌های باز تحلیل شده (ERA5) بر مبنای شاخص‌های همبستگی پیرسون (CC^{11})، $RMSE$ و KGE ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مدل‌های مختلف در ماه‌های متفاوت سال، دقت یکسانی در برآورد دمای کشور ندارند. در مقیاس سالانه نیز نتایج نشان داد که مدل IPSL-CM6A بهترین عملکرد را در برآورد دمای سالانه دارد. همچنین میزان خطای این مدل در نواحی مرکزی و شرقی ایران کمتر از سایر نواحی است [19]. انصاری مهابادی و همکاران (1401) به بررسی روند تغییرات دمای حوضه‌های آبریز ایران در افق 20 سال آینده بر اساس برون‌داد 10 مدل GISS، IPSL-CM6A-LR، MRI-ESM2-0، MIROC6، CanESM5، CNRM-CM6-1، CESM2، BCC-CSM2-MR، HadGEM3-GC31-LL، E2-1-G و NESM3 از سری مدل‌های CMIP6 پرداختند. آن‌ها از داده‌های مشاهداتی 113 ایستگاه هواشناسی در طول دوره تاریخی 1995 تا 2014 در مقیاس ماهانه استفاده کردند. عملکرد مدل‌ها بر مبنای شاخص KGE ارزیابی شده و برای هر یک از حوضه‌های شش‌گانه اصلی ایران یک مدل منتخب تعیین شد. نتایج نشان داد مدل‌های برتر بسته

⁵ Root Mean Squared Error

⁶ Nash-Sutcliffe Efficiency

⁷ Kling-Gupta Efficiency

⁸ Mean Bias Error

⁹ Normalized Root Mean Square Error

¹⁰ Independent Weight Mean

¹¹ Pearson Correlation Coefficient

به اقلیم نواحی مختلف متفاوت هستند؛ به این ترتیب که BCC-CSM2-MR برای نواحی شرق و جنوب غربی کشور، CESM2 برای سواحل جنوبی، GISS-E2-1-G برای نواحی شرقی، کویر مرکزی و نواحی مرزی غرب و IPSL-CM6A-LR برای سواحل شمالی و نواحی مرتفع فلات مرکزی برای شبیه‌سازی دما بالاترین اولویت را دارند. پهنه‌بندی اقلیمی حاکی از افزایش 0/1 تا 0/6 درجه سانتی‌گراد در دمای حوضه‌های مختلف کشور طی 20 سال آتی است [20]. در مطالعه‌ای دیگر احمدی و کمانگر (1402) به پیش‌نگری دماهای حدی فصل سرد ایران با استفاده از یک مدل همادی از ترکیب مدل‌های CMIP6 پرداختند. برای این کار آن‌ها با استفاده از پنج مدل GFDL-ESM4، MPI-ESM1-2-HR، IPSL-CM6A-LR، MRI-ESM2، UKESM1-0-LL و داده‌های 95 ایستگاه هواشناسی در دوره تاریخی 1981 تا 2014 بر اساس داده‌های ماهانه به ارزیابی وضعیت دما به کمک نمودار تیلور و ایجاد یک مدل همادی پرداختند. به دلیل بالابودن تعداد ایستگاه‌های موردنظر، 10 ایستگاه گرگان، تهران، بندرانزلی، یزد، اصفهان، زنجان، ایرانشهر، یاسوج، ایلام و اهواز به عنوان نماینده از تمامی پهنه‌های اقلیمی مختلف کشور انتخاب و صحت‌سنجی روی آن‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که مقادیر پیش‌بینی‌شده برای کمینه دما شباهت بیشتری با داده‌های واقعی نسبت به دمای بیشینه دارد. توزیع مکانی دمای کمینه در دوره آینده نزدیک نیز تحت تأثیر ارتفاعات عمده‌ی کشور و نیز عرض جغرافیایی خواهد بود. همچنین دمای کمینه در دوره آتی نسبت به دوره پایه در مقایسه با تغییرات دمای بیشینه، افزایش قابل‌توجهی خواهد داشت. به‌طوری‌که در ماه ژانویه در دو سناریوی SSP126 و SSP585 در آینده نزدیک 2021 تا 2040، حدود هفت درجه سانتی‌گراد افزوده خواهد شد [5]. زارعیان و همکاران (1403)، به بررسی اثر تغییر اقلیم بر مقادیر حدی دمای بیشینه در حوضه سفیدرود براساس مدل‌های CMIP6 پرداختند. آن‌ها خروجی 10 مدل BCC-CSM2-MR، CESM2، CNRM-CM6-1، MIROC6، MRI-ESM2-0، IPSL-CM6A-LR، CAMS-CSM1-0، CMCC-ESM2، GFDL-ESM4 و HadGEM3-GC31-LL را در دوره تاریخی 1980 تا 2014 به‌صورت ماهانه استخراج کرده و با استفاده از داده‌های 16 ایستگاه سینوپتیک به کمک شاخص KGE به ارزیابی داده‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که مدل‌های مختلف در نواحی مختلف حوضه، دارای دقت‌های متفاوتی در شبیه‌سازی دمای بیشینه هستند. به‌طور کلی، مدل IPSL-CM6A-LR بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی دمای بیشینه نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که متوسط دمای بیشینه در سناریوهای مختلف بین 0/9 تا 2/8 درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت [21].

مطالعات پیشین در زمینه ارزیابی مدل‌های مبتنی بر CMIP6، عمدتاً به بازه زمانی پنج سال اخیر محدود می‌شوند که با برنامه زمانی انتشار گزارش ششم IPCC همخوانی دارد. این مطالعات، با وجود اهمیت‌شان، با محدودیت‌هایی مواجه هستند. نخست آنکه، خروجی مدل‌های GCM توسط مؤسسات مختلف به طور مداوم در حال به‌روزرسانی بوده است که این امر، لزوم ارزیابی مجدد با داده‌های به‌روز را ایجاب می‌کند. دوم آنکه، مطالعات انجام شده در پهنه ایران، اغلب با استفاده از تعداد محدودی از مدل‌ها صورت گرفته‌اند، این درحالی است که هم‌اکنون، 32 مدل GCM برای پارامتر دما از طریق پایگاه کوپرنیکوس در دسترس است. این تنوع مدل‌ها، فرصتی برای انتخاب مدل‌های مناسب‌تر و افزایش دقت پیش‌بینی‌ها فراهم می‌آورد. علاوه بر این، انتخاب شاخص‌های ارزیابی در مطالعات پیشین، به نظر می‌رسد از رویکردی نظام‌مند پیروی نکرده است. انتخاب دقیق این شاخص‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است، زیرا باید تمامی جنبه‌های همبستگی، خطا و کارایی را به منظور انتخاب مناسب‌ترین مدل و کاهش عدم قطعیت پوشش دهند. برای ایجاد بهترین خروجی باید در انتخاب بهترین ایستگاه‌ها با بیشترین طول دوره آماری دقت شود. در راستای رفع محدودیت‌های موجود در مطالعات پیشین، پژوهش حاضر به ارزیابی جامع عملکرد 32 مدل GCM موجود در پایگاه کوپرنیکوس برای شبیه‌سازی دمای حداکثر در پهنه ایران پرداخته است. به این منظور، داده‌های دمای حداکثر ماهانه 31 ایستگاه سینوپتیک مراکز استان‌های کشور در دوره آماری 1970 تا 2014 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

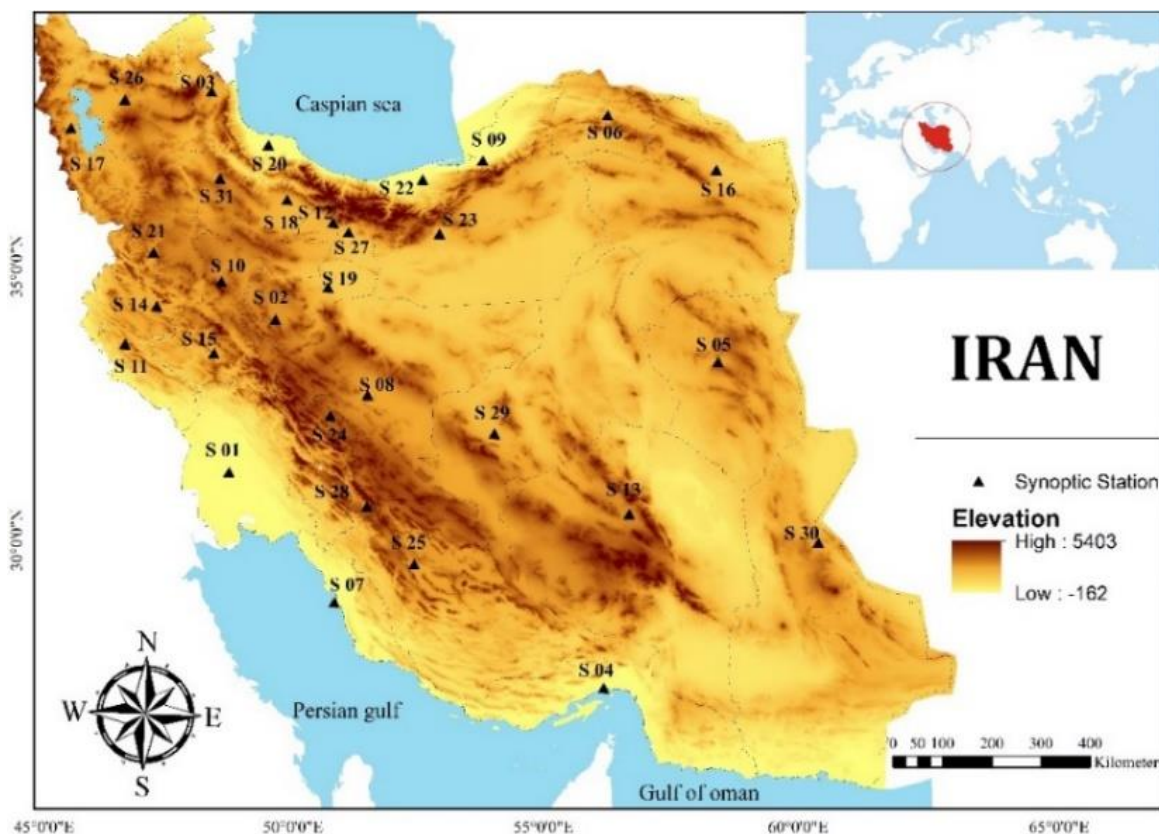
ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از سه شاخص آماری KGE به منظور بررسی کارایی، ضریب تبیین (R^2) به عنوان معیاری از همبستگی و RMSE به منظور سنجش میزان خطا صورت پذیرفت. در نهایت، به منظور رتبه‌بندی مدل‌ها در هر استان و تعیین مناسب‌ترین آن‌ها، از روش میانگین وزنی ساده (SAW^{12}) استفاده شد. با توجه به اهمیت ارزیابی عملکرد مدل‌ها در بازتولید شرایط اقلیمی گذشته به عنوان معیاری اساسی برای سنجش قابلیت اعتماد پیش‌بینی‌های آتی، در این پژوهش مقایسه‌ای نظام‌مند بین خروجی مدل‌های GCM و داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی انجام پذیرفت. این ارزیابی کمی، امکان تعیین میزان تطابق خروجی مدل‌ها با شرایط واقعی و شناسایی دقیق‌ترین مدل یا مجموعه مدل‌هایی که بالاترین سطح انطباق را با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهند، فراهم می‌سازد. نتایج حاصل از این مقایسه و رتبه‌بندی مدل‌ها، به ما در انتخاب مناسب‌ترین مدل هر منطقه برای پیش‌بینی آب‌وهوای آینده کمک خواهد کرد.

2. مواد و روش‌ها

1.2 منطقه مورد مطالعه

ایران با وسعتی بیش از 1648000 کیلومتر مربع، در جنوب غربی آسیا و در موقعیتی استراتژیک در خاورمیانه واقع شده و به دلیل قرارگیری در عرض‌های میانی و مجاورت با پهنه‌های آبی گوناگون از جمله دریای خزر، خلیج فارس و دریای عمان، از تنوع اقلیمی چشمگیری از اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک در فلات مرکزی تا مدیترانه‌ای در سواحل شمالی و کوهستانی سرد در امتداد رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس برخوردار است. این رشته‌کوه‌ها با ایفای نقش مهم در توزیع بارش و تعدیل دما، به شکل‌گیری الگوهای اقلیمی متنوع در کشور کمک می‌کنند [22]. ایران به طور کلی به دو بخش سرد کوهستانی و گرم کم ارتفاع تقسیم می‌شود. میانگین دمای کشور حدود 18 درجه سانتیگراد است [23]. با این حال، تغییرات اقلیمی اخیر، به‌ویژه افزایش دمای حداکثر، الگوهای اقلیمی سنتی ایران را تحت تأثیر قرار داده و پیامدهایی مانند تغییر در الگوهای بارش و افزایش پدیده‌های حدی را به دنبال داشته است. افزایش دمای حداکثر، تأثیرات گسترده‌ای بر بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی (با ایجاد تنش گرمایی و کاهش عملکرد)، بهداشت عمومی (با افزایش بیماری‌های مرتبط با گرما)، منابع آب (با کاهش منابع سطحی و زیرزمینی) و اکوسیستم‌های طبیعی داشته و چالش‌های جدی برای جامعه و اقتصاد ایران ایجاد کرده است. (شکل 1) موقعیت و توپوگرافی ایران به همراه پراکندگی ایستگاه‌های سینوپتیک مراکز استان‌ها را نشان می‌دهد.

¹² Simple Weighted Average Method



شکل 1- موقعیت محدوده مورد مطالعه

2.2 داده‌های مورد استفاده

در بخش داده‌های مشاهداتی، داده‌های دمای حداکثر ماهانه 31 ایستگاه سینوپتیک مراکز استان‌ها به عنوان نماینده هر استان در دوره آماری آوریل 1970 تا دسامبر 2014 از سازمان هواشناسی کشور گردآوری شد. در جدول (1) مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک آمده است. سپس شبیه‌سازی‌های دمای حداکثر ماهانه تمامی 32 GCM در دسترس از سری مدل‌های گزارش ششم تغییر اقلیم در موقعیت هر یک از ایستگاه‌های سینوپتیک از پایگاه داده کوپرنیکوس به آدرس www.cds.climate.copernicus.eu در فرمت nc استخراج شد. در ادامه، فرمت فایل‌های دریافتی با استفاده از ابزارهای ArcGIS به فرمت txt و سپس excel تبدیل شد. در جدول (2) نیز مشخصات مدل‌های اقلیمی سناریوی ششم تغییر اقلیم آمده است. به این ترتیب، در موقعیت هر ایستگاه، یک ماتریس 33 (تعداد مجموعه داده) در 537 (تعداد ماه) به دست آمد.

جدول 1- مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مراکز استان‌ها

کد ایستگاه	نام ایستگاه	استان	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	شروع دوره آماری	کد ایستگاه	نام ایستگاه	استان	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	شروع دوره آماری
S01	اهواز	خوزستان	31.3	48.7	23	1970	S17	ارومیه	آذربایجان غربی	37.7	45.1	1328	1970
S02	اراک	مرکزی	34.1	49.8	1703	1970	S18	قزوین	قزوین	36.3	50.0	1279	1970
S03	اردبیل	اردبیل	38.2	48.3	1335	1976	S19	قم	قم	34.8	50.9	879	1986
S04	بندرعباس	هرمزگان	27.2	56.4	10	1970	S20	رشت	گیلان	37.3	49.6	-9	1970
S05	بیرجند	خراسان جنوبی	32.9	59.3	1491	1970	S21	سنندج	کردستان	35.3	47.0	1373	1970
S06	بجنورد	خراسان شمالی	37.5	57.3	1065	1977	S22	ساری	مازندران	36.5	53.0	23	1999
S07	بوشهر	بوشهر	28.9	50.8	8	1970	S23	سمنان	سمنان	35.6	53.4	1127	1970
S08	اصفهان	اصفهان	32.5	51.7	1550	1970	S24	شهرکرد	چهارمحال بختیاری	32.3	50.8	2049	1970
S09	گرگان	گلستان	36.9	54.4	0	1970	S25	شیراز	فارس	29.6	52.6	1488	1970
S10	همدان	همدان	34.9	48.5	1741	1976	S26	تبریز	آذربایجان شرقی	38.1	46.2	1361	1970
S11	ایلام	ایلام	33.6	46.4	1337	1986	S27	تهران	تهران	35.7	51.4	1419	1970
S12	کرج	البرز	35.8	51.0	1293	1985	S28	یاسوج	کهگیلویه و بویراحمد	30.7	51.6	1821	1987
S13	کرمان	کرمان	30.3	57.0	1754	1970	S29	یزد	یزد	31.9	54.3	1230	1970
S14	کرمانشاه	کرمانشاه	34.4	47.2	1319	1970	S30	زاهدان	سیستان و بلوچستان	29.5	60.9	1370	1970
S15	خرم آباد	لرستان	33.4	48.3	1148	1970	S31	زنجان	زنجان	36.7	48.5	1659	1970
S16	مشهد	خراسان رضوی	36.2	59.6	999	1970							

در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی کمی انطباق خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) با داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی مراکز استان‌ها در بازه زمانی 1970 تا 2014، از سه شاخص آماری ضریب تبیین (R^2)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص کارایی کلینگ-گوپتا (KGE) استفاده شد. ضریب تبیین (R^2) میزان همبستگی خطی بین داده‌های مدل‌سازی شده و مشاهداتی را ارزیابی می‌کند و مقادیر نزدیک به عدد 1 نشان‌دهنده تطابق مطلوب مدل با داده‌های مشاهداتی است. RMSE به عنوان معیاری از دقت مدل، میانگین اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر واقعی را محاسبه می‌کند و مقادیر کمتر آن، بیانگر عملکرد بهتر مدل است. شاخص KGE نیز به عنوان شاخصی جامع، عملکرد مدل را با در نظر گرفتن سه مؤلفه همبستگی، اریبی و نسبت واریانس‌ها ارزیابی می‌کند. مقادیر KGE بالاتر از صفر مطلوب بوده و مقادیر نزدیک به عدد 1 نشان‌دهنده کارایی بالاتر مدل در شبیه‌سازی داده‌های مشاهداتی است [24]. بدین ترتیب، با بهره‌گیری از این شاخص‌ها، امکان مقایسه کمی عملکرد مدل‌های مختلف و انتخاب مدل یا مجموعه مدل‌هایی با بالاترین سطح انطباق با داده‌های مشاهداتی فراهم می‌گردد.

جدول 2- مشخصات مدل‌های اقلیمی سناریوی ششم تغییر اقلیم

کد مدل	نام مدل	کشور	تنگنیک مکانی (کیلومتر)	کد مدل	نام مدل	کشور	تنگنیک مکانی (کیلومتر)
G01	ACCESS-CM2	Australia	250	G17	FIO-ESM-2-0	China	1000

100	USA	GFDL-ESM4	G18	250	Australia	ACCESS-ESM1-5	G02
250	USA	GISS-E2-1-H	G19	100	Germany	AWI-CM-1-1-MR	G03
250	UK	HadGEM3-GC31-LL	G20	250	Germany	AWI-ESM-1-1-LR	G04
100	UK	HadGEM3-GC31-MM	G21	250	China	BCC-ESM1	G05
100	Russia	INM-CM4-8	G22	100	Canada	CanESM5	G06
100	Russia	INM-CM5-0	G23	500	Canada	CanESM5-CanOE	G07
250	France	IPSL-CM6A-LR	G24	100	China	CIESM	G08
250	Japan	MIROC6	G25	100	Italy	CMCC-ESM2	G09
250	Japan	MIROC-ES2H	G26	250	France	CNRM-CM6-1	G10
500	Japan	MIROC-ES2L	G27	50	France	CNRM-CM6-1-HR	G11
100	Germany	MPI-ESM1-2-HR	G28	250	France	CNRM-ESM2-1	G12
250	Germany	MPI-ESM1-2-LR	G29	100	Europe	EC-Earth3-AerChem	G13
500	Japan	MRI-ESM2-0	G30	100	Europe	EC-Earth3-CC	G14
100	China	NESM3	G31	100	Europe	EC-Earth3-Veg-LR	G15
100	South Korea	SAM0-UNICON	G32	100	China	FGOALS-g3	G16

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

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

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

در معادلات فوق x مقادیر شبیه‌سازی‌شده، y مقادیر مشاهداتی، n تعداد داده، R ضریب همبستگی پیرسون و σ_o و σ_s به ترتیب انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی هستند.

به منظور کاهش عدم قطعیت مرتبط با خروجی مدل‌های CMIP6 و انتخاب مدل‌های با عملکرد برتر، رتبه‌بندی مدل‌ها بر اساس دقت محاسبه‌شده با استفاده از شاخص‌های عملکرد (R^2 ، KGE و RMSE) انجام شد. در این راستا، از روش وزن‌دهی خطی ساده (SAW) با فرض وزن برابر برای تمامی شاخص‌ها استفاده گردید. به منظور ایجاد مقایسه‌ای منصفانه بین شاخص‌ها با مقیاس‌های متفاوت، نرمال‌سازی داده‌های خام با استفاده از رابطه (4) صورت پذیرفت. این فرایند، مقادیر هر شاخص را به بازه صفر تا یک تبدیل نموده و امکان مقایسه مستقیم آن‌ها را فراهم می‌سازد. به منظور هماهنگ‌سازی جهت مطلوبیت شاخص‌ها، شاخص‌هایی که مقادیر کمتر آن‌ها نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است مانند (RMSE)، در عدد منفی ضرب شدند. سپس، با محاسبه میانگین ساده مقادیر نرمال‌شده برای هر مدل بر اساس رابطه (5)، امتیاز نهایی هر مدل محاسبه گردید. مدل‌هایی که بالاترین امتیاز را کسب نمودند، 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 شاخص‌ها و Score امتیاز هر مدل است.

3- نتایج و بحث

نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های آماری به صورت مقادیر حداقل، میانگین و حداکثر برای هر ایستگاه هواشناسی در جدول (3) ارائه شده است.

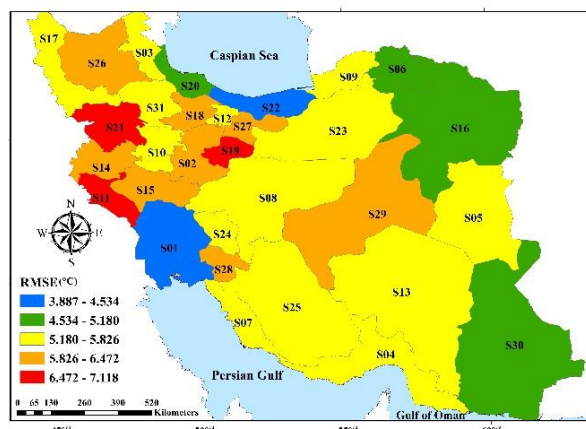
جدول 3- بازه تغییرات شاخص‌های ارزیابی مدل‌های اقلیمی در هر ایستگاه (بیشینه، میانگین، کمینه)

ایستگاه	KGE	R ²	RMSE	ایستگاه	KGE	R ²	RMSE
اهواز	(0.51, 0.87 , 0.96)	(0.88, 0.94 , 0.96)	(2.2, 3.90 , 13.7)	ارومیه	(0.09, 0.69, 0.92)	(0.89, 0.92, 0.93)	(3.2, 5.7, 15.3)
اراک	(0.09, 0.75, 0.89)	(0.89, 0.91, 0.92)	(3.3, 5.9, 18.2)	قزوین	(0.36, 0.73, 0.88)	(0.76, 0.89, 0.92)	(3.3, 5.8, 12.6)
اردبیل	(0.12, 0.67, 0.87)	(0.79, 0.82 , 0.86)	(3.6, 5.7, 13.2)	قم	(0.35, 0.72, 0.90)	(0.89, 0.92, 0.95)	(3.2, 7.1 , 15.0)
بندرعباس	(-0.58, 0.45 , 0.89)	(0.85, 0.89, 0.92)	(2.4, 5.4, 15.6)	رشت	(0.29, 0.69, 0.84)	(0.78, 0.86, 0.90)	(3.3, 4.8, 9.0)
بیرجند	(-0.02, 0.72, 0.87)	(0.89, 0.91, 0.92)	(3.1, 5.5, 21.2)	سنندج	(0.37, 0.70, 0.94)	(0.90, 0.93, 0.94)	(2.9, 6.9, 13.0)
بجنورد	(-0.09, 0.77, 0.91)	(0.88, 0.91, 0.92)	(3.1, 4.5, 20.1)	ساری	(0.32, 0.69, 0.91)	(0.79, 0.88, 0.91)	(2.7, 4.3, 7.7)
بوشهر	(-0.04, 0.68, 0.94)	(0.82, 0.91, 0.94)	(2.2, 5.3, 15.1)	سمنان	(0.24, 0.78, 0.93)	(0.88, 0.92, 0.94)	(3.2, 5.8, 17.0)
اصفهان	(0.18, 0.75, 0.95)	(0.90, 0.93, 0.94)	(2.6, 5.8, 16.2)	شهرکرد	(-0.01, 0.74, 0.94)	(0.90, 0.92, 0.93)	(2.9, 5.7, 19.3)
گرگان	(-0.09, 0.64, 0.86)	(0.83, 0.89, 0.91)	(3.4, 5.3, 19.2)	شیراز	(0.18, 0.75, 0.94)	(0.92, 0.94 , 0.95)	(2.3, 5.8, 17.1)
همدان	(0.17, 0.75, 0.93)	(0.90, 0.92, 0.93)	(3.3, 5.7, 15.7)	تبریز	(0.26, 0.72, 0.90)	(0.89, 0.92, 0.93)	(3.7, 5.9, 13.2)
ایلام	(-0.01, 0.68, 0.85)	(0.91, 0.94 , 0.96)	(3.0, 6.7, 21.8)	تهران	(0.24, 0.75, 0.93)	(0.85, 0.92, 0.94)	(3.0, 6.0, 15.7)
کرج	(0.13, 0.78, 0.95)	(0.85, 0.91, 0.94)	(2.8, 5.3, 23.6)	یاسوج	(0.04, 0.72, 0.95)	(0.92, 0.93, 0.95)	(2.5, 5.9, 19.4)
کرمان	(-0.09, 0.75, 0.91)	(0.89, 0.91, 0.93)	(2.8, 5.3, 17.4)	یزد	(0.29, 0.77, 0.89)	(0.90, 0.92, 0.94)	(3.5, 6.0, 15.8)
کرمانشاه	(0.32, 0.75, 0.94)	(0.91, 0.93, 0.95)	(2.8, 5.9, 14.6)	زاهدان	(0.02, 0.73, 0.90)	(0.89, 0.91, 0.93)	(2.7, 4.7, 21.6)
خرم‌آباد	(0.29, 0.75, 0.90)	(0.92, 0.94 , 0.96)	(2.6, 5.9, 14.0)	زنجان	(0.10, 0.77, 0.90)	(0.87, 0.92, 0.92)	(3.5, 5.2, 15.9)
مشهد	(-0.04, 0.79, 0.93)	(0.87, 0.90, 0.92)	(3.3, 5.1, 21.1)				

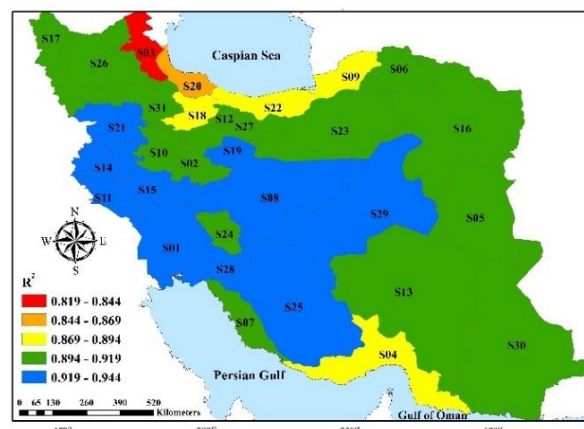
همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر شاخص‌ها برای ایستگاه‌های مختلف متفاوت است. این نشان می‌دهد که عملکرد مدل‌ها در ایستگاه‌های مختلف متفاوت بوده و عوامل مختلفی مانند شرایط اقلیمی، توپوگرافی و ویژگی‌های مدل‌ها بر این تفاوت‌ها مؤثر هستند. با مقایسه مقادیر شاخص‌ها برای ایستگاه‌های مختلف می‌توان به طور نسبی به عملکرد مدل‌ها پی برد. مدل‌های اقلیمی به طور متوسط در ایستگاه‌های اهواز، مشهد، سمنان و کرج بیشترین کارایی، در ایستگاه‌های خرم‌آباد، اهواز، شیراز و ایلام بیشترین همبستگی و در ایستگاه‌های اهواز، ساری، بجنورد و زاهدان کمترین خطا را دارند. در مقابل این مدل‌ها به طور متوسط در ایستگاه‌های بندرعباس، گرگان، اردبیل و بوشهر کمترین کارایی، در ایستگاه‌های اردبیل، رشت و ساری کمترین همبستگی، و در ایستگاه‌های قم، سنندج و ایلام بیشترین خطا را دارند. بیشترین مقدار مطلق کارایی مدل‌ها در ایستگاه اهواز با مقدار 0/96.

بیشترین مقدار مطلق همبستگی مدل‌ها در ایستگاه اهواز، ایلام و خرم‌آباد با مقدار 0/96، و کمترین مقدار مطلق خطای مدل‌ها در ایستگاه بوشهر با مقدار 2/25 درجه سانتی‌گراد دیده می‌شود.

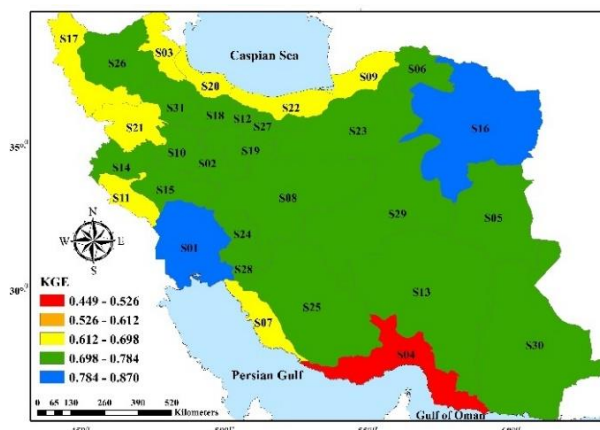
توزیع مکانی میانگین مقادیر این شاخص‌ها در ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل (2) به تصویر کشیده شده است. در شکل (2الف) مشاهده می‌شود که متوسط همبستگی مدل‌های اقلیمی با ایستگاه‌های سینوپتیک در بازه 0/81 تا 0/95 نوسان داشته است. بالاترین مقادیر این شاخص مربوط به ایستگاه‌های واقع در حوضه آبریز فلات مرکزی (یزد، اصفهان و قم) و حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان (شیراز، یاسوج، خرم‌آباد، سنندج، کرمانشاه، اهواز و ایلام) است. به طور کل، متوسط همبستگی مدل‌های اقلیمی با ایستگاه‌ها در محدوده بسیار مطلوب قرار دارد.



ب



الف



ج

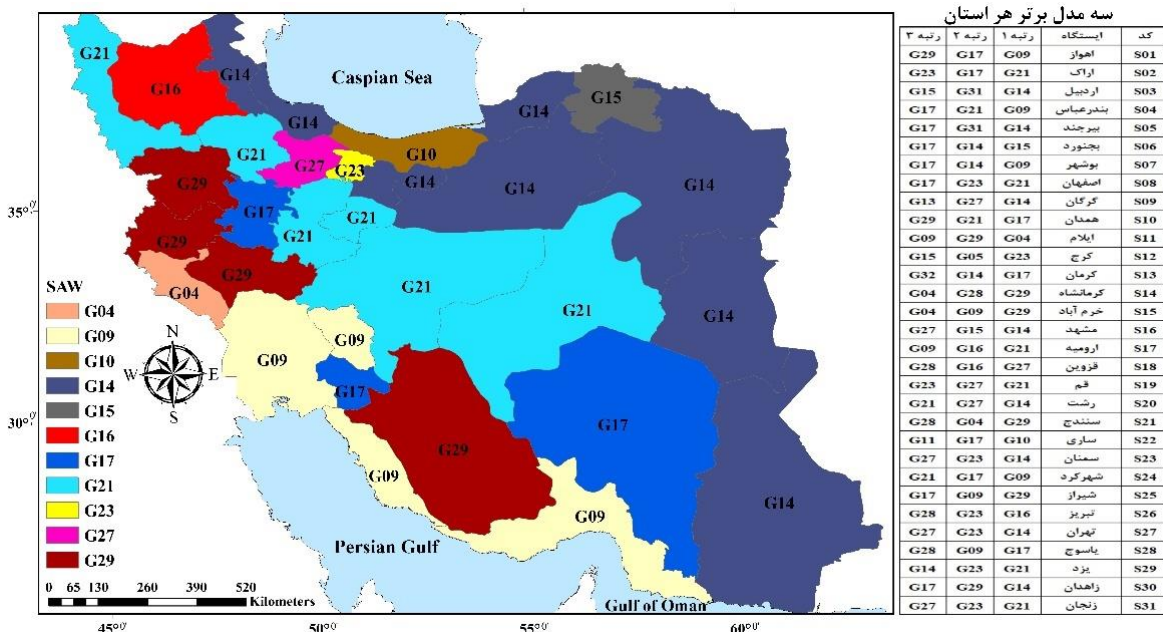
شکل 2- پهنه‌بندی متوسط الف) همبستگی، ب) خطا، ج) کارایی دمای حداکثر ماهانه ایستگاه‌های سینوپتیک با مدل‌های اقلیمی

تغییرات متوسط خطای مدل‌های اقلیمی در مقایسه با ایستگاه‌های سینوپتیک در بازه 3/88 تا 7/12 درجه سانتی‌گراد است (شکل 2ب). بر این اساس، مدل‌های اقلیمی در ایستگاه‌های ساری و اهواز کمترین خطا و در ایستگاه‌های ایلام، سنندج و

قم بیشترین خطا را داشته‌اند. شکل (2ج) نیز دامنه تغییرات متوسط کارایی مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی دمای حداکثر ماهانه ایستگاه‌های سینوپتیک را بین 0/44 و 0/87 نشان می‌دهد. بر مبنای این شاخص، این مدل‌ها در ایستگاه‌های اهواز و مشهد بالاترین کارایی و در ایستگاه بندرعباس پایین‌ترین کارایی را در شبیه‌سازی دمای حداکثر ماهانه ایستگاه‌های سینوپتیک دارند. در ادامه، با نرمال‌سازی مقادیر شاخص‌ها و محاسبه امتیاز هر مدل، مدل برتر در هر یک از استان‌های کشور سینوپتیک مشخص شد. جدول (4) امتیاز و مقادیر شاخص‌های ارزیابی مربوط به مدل برتر در هر یک از ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. شکل (3) نیز پهنه‌بندی مدل برتر و جدول مدل‌های در اولویت یک تا سه در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. نتایج ارزیابی مدل‌های GCM در 31 استان نشان می‌دهد که تنوع مطلوبی در عملکرد مدل‌ها در مناطق مختلف کشور وجود دارد. از بین 32 مدل مورد بررسی، 11 مدل مختلف موفق به کسب رتبه اول در حداقل یک استان شده‌اند. در میان مدل‌های مورد بررسی، مدل EC-Earth3-CC با کسب رتبه نخست در هشت استان شامل سیستان و بلوچستان، خراسان جنوبی، خراسان رضوی، سمنان، گلستان، تهران، گیلان و اردبیل و همچنین عملکرد مطلوب در سایر ایستگاه‌ها، برتری قابل توجهی را نشان داد. این امر نشان‌دهنده توانایی بالای این مدل در شبیه‌سازی شرایط اقلیمی متنوع در مناطق شرقی و شمالی کشور است. مدل HadGEM3-GC31-MM نیز با کسب رتبه اول در شش استان یزد، اصفهان، قم، مرکزی، آذربایجان غربی و زنجان به عنوان دومین مدل برتر شناخته شد. همچنین مدل‌های MPI-ESM1-2-LR و CMCC-ESM2 نیز هر کدام با کسب رتبه نخست در چهار استان، عملکرد قابل قبولی را از خود نشان دادند.

جدول 4- امتیاز و مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل برتر هر ایستگاه

ایستگاه	مدل برتر	KGE	R ²	RMSE	Score	ایستگاه	مدل برتر	KGE	R ²	RMSE	Score
اهواز	CMCC-ESM2	0.96	0.96	2.26	1.00	ارومیه	HadGEM3-GC31-MM	0.78	0.93	4.64	0.94
اراک	HadGEM3-GC31-MM	0.88	0.92	3.93	0.99	قزوین	MIROC-ES2L	0.87	0.92	3.26	0.99
اردبیل	EC-Earth3-CC	0.87	0.85	3.63	0.96	قم	HadGEM3-GC31-MM	0.90	0.95	3.45	1.00
بندرعباس	CMCC-ESM3	0.87	0.92	2.50	1.00	رشت	EC-Earth3-CC	0.84	0.89	3.55	0.96
بیرجند	EC-Earth3-CC	0.86	0.92	3.46	0.97	سنندج	MPI-ESM1-2-LR	0.93	0.94	2.86	1.00
بجنورد	EC-Earth3-Veg-LR	0.87	0.92	3.13	0.99	ساری	CNRM-CM6-1	0.85	0.90	3.06	0.93
بوشهر	CMCC-ESM4	0.84	0.94	2.49	0.97	سمنان	EC-Earth3-CC	0.85	0.94	4.36	0.96
اصفهان	HadGEM3-GC31-MM	0.89	0.94	3.32	0.97	شهرکرد	CMCC-ESM5	0.94	0.93	2.88	0.98
گرگان	EC-Earth3-CC	0.86	0.91	3.42	1.00	شیراز	MPI-ESM1-2-LR	0.92	0.95	2.31	0.96
همدان	FIO-ESM-2-0	0.92	0.92	3.28	0.99	تبریز	FGOALS-g3	0.75	0.93	5.35	0.92
ایلام	AWI-ESM-1-1-LR	0.80	0.95	3.15	0.94	تهران	EC-Earth3-CC	0.86	0.94	3.81	0.97
کرج	INM-CM5-0	0.94	0.93	2.77	0.97	یاسوج	FIO-ESM-2-0	0.81	0.95	3.89	0.94
کرمان	FIO-ESM-2-0	0.77	0.93	4.26	0.95	یزد	HadGEM3-GC31-MM	0.88	0.94	3.85	0.99
کرمانشاه	MPI-ESM1-2-LR	0.89	0.95	3.13	0.95	زاهدان	EC-Earth3-CC	0.85	0.93	2.78	0.96
خرم‌آباد	MPI-ESM1-2-LR	0.88	0.95	2.64	0.96	زنجان	HadGEM3-GC31-MM	0.83	0.92	4.04	0.97
مشهد	EC-Earth3-CC	0.88	0.92	3.76	0.98						



شکل 3- پهنه‌بندی مدل برتر و جدول مدل‌های در اولویت یک تا سه در هر ایستگاه

4- نتیجه‌گیری

با وجود آن‌که مدل‌های AOGCM^{۱۳} مرتبط با ششمین گزارش ارزیابی IPCC (CMIP6) در حال حاضر به‌عنوان متداول‌ترین ابزار جهت شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی به ویژه دما و بارش مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما تعدد این مدل‌ها و توسعه نسخه‌های مختلفی از آن‌ها توسط مراجع علمی و پژوهشی در سراسر جهان باعث شده است تا لزوم ارزیابی این مدل‌ها برای مطالعه در نواحی مختلف ضروری گردد. مطالعه حاضر به ارزیابی مدل‌های موجود پارامتر دمای حداکثر ماهانه در پهنه ایران پرداخت. در این راستا از 32 مدل موجود گزارش ششم تغییر اقلیم و داده‌های 31 ایستگاه سینوپتیک مراکز استان‌های کشور استفاده شد. به کمک سه شاخص ارزیابی KGE، R^2 و RMSE داده‌ها ارزیابی و با استفاده از روش میانگین‌گیری وزنی ساده رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که دقت این مدل‌ها در زمینه برآورد دمای بیشینه نواحی مختلف ایران دارای اختلاف‌هایی با یکدیگر است. البته این اختلاف به کمک روش رتبه‌بندی SAW کاهش پیدا کرد؛ به طوری که مدل‌های EC-Earth3-CC و HadGEM3-GC31-MM بهترین عملکرد را در ایستگاه‌های مختلف داشتند. با توجه به جامعیت این مطالعه، بر اساس تکرار مدل‌ها در اولویت‌های یک تا سه در استان‌های مختلف، توصیه می‌شود مدل‌های FIO-ESM-2-0، EC-Earth3-CC، HadGEM3-، CMCC-ESM2، INM-CM4-8، MPI-ESM1-2-LR و MIROC-ES2L در هر مطالعه بررسی و ارزیابی مدل‌های CMIP6 بر روی دمای حداکثر ماهانه در پهنه ایران مورد توجه قرار گیرد. این در حالی است که در اغلب مطالعات گذشته تنها مدل CMCC-ESM2 از لیست فوق در بین مدل‌های مورد بررسی مورد توجه محققین قرار گرفته است. به هر حال، با توجه به لحاظ وزن برابر شاخص‌ها در روش SAW، همچنان عدم قطعیت‌هایی در این تحلیل وجود خواهد داشت. برای کاهش این عدم

¹³ Atmosphere Ocean General Circulation Model

قطعی‌ها 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.

5- منابع

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. Masson-Delmotte, V. P., Zhai, P., Pirani, S. L., Connors, C., Péan, S., Berger, N., ... & Scheel Monteiro, P. M. (2021). *Ipcc, 2021: Summary for policymakers. in: Climate change 2021: The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.*
3. Olhoff, A., Christensen, J. M., Kappelle, M., & Liu, J. (2020). Emissions Gap (UNEP). In *United in Science 2020: A multi-organization high-level compilation of the latest climate science information.*
4. نیرومندفرد، خاشعی سیوکی، هاشمی، سید رضا هاشمی، قربانی خلیل. (1402). بررسی پیش‌نگری تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: ایستگاه بیرجند). تحقیقات آب و خاک ایران.
5. احمدی محمود و کمانگر محمد. (1402). پیش‌نگری دماهای حدی فصل سرد ایران با استفاده از یک سامانه همادی چند مدلی با سناریوهای اجتماعی-اقتصادی مدل‌های CMIP6.
6. Zhao, Y., Qian, C., Zhang, W., He, D., & Qi, Y. (2021). Extreme temperature indices in Eurasia in a CMIP6 multi-model ensemble: Evaluation and projection. *International Journal of Climatology*, 41(11), 5368-5385.
7. 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.
8. Ashraf, S., Nazemi, A., & Aghakouchak, A. (2021). Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Scientific reports*, 11(1), 9135.
9. Ding, Y., Mu, C., Wu, T., Hu, G., Zou, D., Wang, D., ... & Wu, X. (2021). Increasing cryospheric hazards in a warming climate. *Earth-Science Reviews*, 213, 103500.
10. Stouffer, R. J., Eyring, V., Meehl, G. A., Bony, S., Senior, C., Stevens, B., & Taylor, K. E. (2017). CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 95-105.
11. 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.
12. Rivera, J. A., & Arnould, G. (2020). Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014). *Atmospheric Research*, 241, 104953.
13. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... & Zhou, B. (2021). *Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, 2(1), 2391.
14. Gusain, A., Ghosh, S., & Karmakar, S. (2020). Added value of CMIP6 over CMIP5 models in simulating Indian summer monsoon rainfall. *Atmospheric Research*, 232, 104680.

15. 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.
16. زرین آذر، داداشی رودباری و صالح آبادی. (1399). بررسی بی‌هنجاری و روند دمای ایران در پهنه‌های مختلف اقلیمی با استفاده از مدل‌های جفت شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم (CMIP6). *مجله ژئوفیزیک ایران*, 15(1), 35-54.
17. زرین، آذر و رودباری، داداشی. (1399). پیش‌نگری دمای ایران در آینده نزدیک (2021-2040) بر اساس رویکرد همادی چند مدلی CMIP6. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*, 53(1), 75-90.
18. زارعیان، دهبان و گوهری. (1401). ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 در برآورد دما و بارش ایران بر اساس تحلیل شبکه‌ای مدیریت آب و آبیاری، 12(4), 783-797.
19. مه‌بادی انصاری، ثمین؛ دهبان، زارعیان و فرخ‌نیا. (1401). بررسی روند تغییرات دما و بارش حوضه‌های آبریز ایران در افق 20 سال آینده بر اساس برونداد مدل‌های CMIP6. *پژوهش آب ایران*, 16(1), 11-24.
20. محمد جواد زارعیان، رضا سراج ابراهیم و حسین دهبان. (1403). بررسی اثر تغییر اقلیم بر مقادیر حدی دما و بارش در حوضه سفیدرود بر اساس مدل‌های CMIP6.
21. 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.
22. کاویانی محمدرضا، مسعودیان سیدابوالفضل و شبانکاری مهران، (1386). شناسایی رفتار زمانی-مکانی پرفشار سیبری در تراز دریا.
23. چمانه فر ساناز، موسوی بایگی سیدمحمد، بابائیان ایمان و مدرسی فرشته. (1402). پیش‌نگری شاخص‌های حدی بارشی و دمایی در دوره 2026-2100 بر اساس برونداد مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: مشهد).