

بررسی روند تغییرات دما و بارش حوزه‌های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده براساس برون‌داد مدل‌های CMIP6

ثمین انصاری مهابادی^{۱*}، حسین دهبان^۱، محمدجواد زارعیان^۲ و اشکان فرخ‌نیا^۳

چکیده

تغییر اقلیم با تغییر در دما و بارش بر چرخه هیدرولوژیک، منابع آب در دسترس و تقاضای آب اثر می‌گذارد. در این راستا پیش‌بینی تغییرات دما و بارش توسط مدل‌های گزارش ششم ارزیابی تغییر اقلیم به دلیل افزایش دقت در برون‌داد آن‌ها، می‌تواند کمک شایانی برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در دوره آتی باشد؛ به علاوه، تعیین مدل‌های مناسب از میان این مدل‌های اقلیمی، راهگشای پژوهش‌های آتی در زمینه بررسی اثرات تغییرات اقلیم خواهد بود. تحقیق حاضر به منظور دستیابی به اهداف فوق انجام گرفت. در این زمینه ابتدا به منظور افزایش دقت نتایج مدل‌های اقلیمی، برون‌داد ۱۰ مدل اقلیمی گزارش ششم در دوره تاریخی ۱۹۹۵-۲۰۱۴ در مقایسه داده‌های مشاهداتی براساس سنجه KGE رتبه‌بندی شدند و بر مبنای رتبه‌های حاصل، وزن‌دهی مدل‌ها صورت گرفت. در ادامه، نتایج تصویرسازی مدل‌های اقلیمی تحت سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 دوره آتی، پس از ترکیب برون‌داد مدل‌ها براساس وزن‌های محاسبه‌شده، حاصل شد و در نهایت متوسط تغییرات دما و بارش در افق ۲۰۲۰-۲۰۳۹ نسبت به دوره تاریخی برای حوزه‌های آبریز ایران ارائه شد. نتایج بررسی رتبه‌بندی مدل‌های اقلیمی براساس توانایی آن‌ها در تصویرسازی‌های اقلیمی نشان داد مدل‌های برتر بسته به اقلیم نواحی مختلف، متفاوت هستند و تنوع آن‌ها در شبیه‌سازی بارش نسبت به دما در ایران بیشتر است. به طوری که از میان ۱۰ مدل CMIP6، ۶ مدل برتر برای شبیه‌سازی بارش و ۴ مدل برتر برای شبیه‌سازی دما در نواحی مختلف کشور تعیین شد. به علاوه نتایج حاصل از تصویرسازی اقلیمی حاکی از تغییر بارش از حدود +۱۹ تا -۱۲ درصد و افزایش دما به طور متوسط در دامنه ۰/۱ تا ۰/۶ درجه سلسیوس در حوضه‌های مختلف کشور طی ۲۰ سال آتی خواهد بود، به طوری که نواحی غربی کشور بیشترین کاهش بارندگی را در این دوره تجربه خواهند کرد.

واژه‌های کلیدی: تصویرسازی دما و بارش، تغییر اقلیم، CMIP6، رتبه‌بندی، وزن‌دهی.

ارجاع: انصاری مهابادی ث.، دهبان ح.، زارعیان م. و فرخ‌نیا ا. ۱۴۰۱. بررسی روند تغییرات دما و بارش حوزه‌های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده براساس برون‌داد مدل‌های CMIP6. مجله پژوهش آب ایران. ۱۱-۲۴. DOI: <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2022.11204>

۱- کارشناس پژوهشی، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، تهران.

۲- استادیار، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، تهران.

۳- مدیر پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، تهران.

* نویسنده مسئول: a_ansari25@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۶

مقدمه

شد و قرار است قبل از پایان سال ۲۰۲۲، نتایج کامل و مدل‌های متنوعی منتشر شود. سناریوهای گزارش ششم به‌صورت ترکیبی از خط سیرهای اقتصادی-اجتماعی (SSP)⁶ (توسعه پایدار SSP1، توسعه براساس سیاست‌های میانی SSP2، رقابت منطقه‌ای SSP3، نابرابری SSP4 و توسعه سوخت‌های فسیلی SSP5) و خط سیرهای غلظت گازهای گلخانه‌ای (سطوح واداشت مختلف) تولید می‌شوند؛ به‌طوری‌که امکان تحلیل بازخورد میان تغییرات اقلیمی و عوامل اجتماعی-اقتصادی نظیر رشد جهانی جمعیت، توسعه اقتصادی و پیشرفت‌های فناوری را فراهم می‌آورند.

در این گزارش هشت سناریو با عنوان خطوط سیر توسعه اقتصادی-اجتماعی در دو ردیف ارائه می‌شوند. ردیف ۱، طیف وسیعی از عدم قطعیت‌ها در خطوط سیر واداشت آتی را دربرمی‌گیرد که در مطالعات اقلیمی، ارزیابی یکپارچه مدل‌ها (IAM)⁷ و اثرات، سازگاری و آسیب‌پذیری (IAV)⁸ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این گروه، شامل سناریوهای جدید پایه SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 است که به ترتیب سناریوهای به‌روزرسانی‌شده سطوح واداشت RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 گزارش پنجم هستند. سناریوی SSP1-2.6، پایین‌ترین میزان واداشت تابشی را نشان می‌دهد و پایداری کاربری اراضی در زمان آینده، یکی از خصوصیات اصلی این سناریو است. سناریوی SSP2-4.5 دنیایی با توسعه اقتصادی-اجتماعی در شرایط معمول را با آسیب‌پذیری و سطح واداشت تابشی متوسط در نظر می‌گیرد. سناریوی SSP5-8.5 نیز حد بالای واداشت تابشی را ارائه می‌دهد که در آن پیشرفت با استفاده از سوخت فسیلی و الگوی مصرف بالای انرژی همراه است (استوک و همکاران، ۲۰۲۰؛ روگلج و همکاران، ۲۰۱۸؛ اونیل و همکاران، ۲۰۱۷)؛ علاوه‌براین سناریوها، سناریوی واداشت غیرکاهشی (SSP3-7.0) با انتشار بالای ذرات معلق و تغییر کاربری اراضی در این گروه اضافه شده است.

ردیف ۲ شامل سناریوهای اضافی، اعضای ترکیبی و گسترش بلندمدت اضافی، می‌شود. در این ردیف، دو سناریوی کاهشی به‌منظور دستیابی به برون‌داد واداشت نسبتاً کم و یک سناریو با لحاظ محدودکردن میانگین

پدیده تغییر اقلیم، با تغییر در متغیرهای اقلیمی همچون دما و بارش، سبب تغییر در سیستم یکپارچه منابع آب می‌شود. براساس نتایج تحقیقات هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)¹، این پدیده در کشورهای مناطق خشک و نیمه‌خشک قاره آسیا از جمله ایران اثرات منفی را بر روی منابع آب به‌همراه خواهد داشت (هیجیوکا و همکاران، ۲۰۱۴). مطالعات انجام‌گرفته در ایران نیز بیانگر روند کاهشی بارش، روند افزایشی دما و کاهش منابع آبی تحت‌اثر تغییر اقلیم بوده‌اند (شرافتی و همکاران، ۲۰۲۰؛ زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹؛ فلاح‌قاله‌ری و همکاران، ۲۰۱۹؛ انصاری، ۲۰۱۸). در این میان افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای و تشدید تبعات منفی تغییر اقلیم، ضرورت بررسی شرایط اقلیمی ایران در سال‌های آینده را به‌منظور ارائه راهکارهایی برای افزایش سازگاری با این پدیده دوجندان می‌سازد.

به‌منظور تصویرسازی تغییرات اقلیم در دوره‌های آتی، مدل‌های سه‌بعدی جفت‌شده گردش عمومی جو-اقیانوس² معتبرترین ابزار هستند. با توجه به وابستگی اثرات تغییر اقلیم به نتایج مدل‌های اقلیمی (چن و همکاران، ۲۰۱۵)، دستیابی به تصویرسازی معتبرتر در دوره آتی با استفاده از مدل‌های اقلیمی ارائه‌شده در گزارش جدید ششم ارزیابی به سبب دقت بیشتر امکان‌پذیر می‌شود (ایرینگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ استوفر و همکاران، ۲۰۱۷).

محدودیت‌ها و نقص‌های مدل‌های گزارش پنجم (CMIP5) از جمله درک ضعیف واداشت تابشی در مدل‌های اقلیمی همراه با خطاهای سیستماتیک، مشکل تعیین منافع و هزینه‌های هریک از عملیات‌های کاهشی به‌طور جداگانه و عدم‌تمرکز روی علوم خاص در مدل‌سازی (استوفر و همکاران، ۲۰۱۷)، منجر به شکل‌گیری سری مدل‌های جفت‌شده درون‌مقیاسه‌ای CMIP6³ در گزارش ششم شد (اونیل و همکاران، ۲۰۱۶). نسخه نهایی طراحی مدل‌های CMIP6 توسط دو کارگروه CMIP⁴ و کارگروه مدل‌های جفت‌شده WGCM⁵ در اکتبر سال ۲۰۱۴ نهایی

1- Intergovernmental Panel on Climate Change

2- AOGCM

3- Coupled Model Inter Comparison Phase 6

4- Coupled Model Intercomparison Project Phase

5- Working Group of Coupl Modeling

6- The Shared Socioeconomic Pathways

7- Integrated assessment modeling

8- Impacts, adaptation, and vulnerability

برای متغیرهای بارش و دما اشاره کرد (سو و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین انتخاب مدل‌های GCM گزارش پنجم با معیارهای الگوی همبستگی میان مقادیر میانگین ماهانه و ریشه میانگین خطای نسبی انجام گرفته است (مک سوین، ۲۰۱۵). سه سنجه 2gm ، 3gc و 4gv (داگلاس و همکاران، ۱۹۹۹؛ واگ و ایرینگ، ۲۰۰۸؛ گتلمن و همکاران، ۲۰۱۰) از معیارهای دیگری بودند که برای رتبه‌بندی ۱۴ مدل GCM گزارش پنجم مورد استفاده قرار گرفته‌اند (شو و همکاران، ۲۰۱۷). از دیگر تحقیقات صورت‌گرفته، ارزیابی توانایی ۳۷ مدل اقلیم جهانی (GCMs) گزارش پنجم به‌منظور شبیه‌سازی بارش تاریخی در آسیای مرکزی با استفاده از معیارهای ریشه نسبی میانگین مربعات^۵ (RRMSE)، ضریب همبستگی مکانی و کارایی کلنگ گوپتا (KGE)^۶ است که مزیت سنجه گوپتا در ارزیابی مدل‌ها را نشان می‌دهد (تاو و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین در تحقیقی، GCM‌های گزارش پنجم با توجه به توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی میانگین ماهانه حداکثر و حداقل دمای روزانه توسط روش عدم قطعیت متقارن (SU)^۷ رتبه‌بندی شدند (سلمان، ۲۰۱۸)؛ به‌علاوه، عملکرد ۱۲ مدل اقلیم جهانی گزارش پنجم در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی بارش و دما با استفاده از سنجه اولویت حاصل از فرایند سلسله‌مراتبی تحلیلی فازی (FAHP)^۸ و سنجه قابلیت مورد مقایسه قرار گرفتند (پنجوانی و همکاران، ۲۰۱۹). ازجمله مطالعات در زمینه رتبه‌بندی در ایران، ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP5 در شبیه‌سازی طول دوره‌های خشک در ایران با استفاده از شاخص‌های ضریب تعیین، خطای جذر میانگین مربعات و شاخص آماری توافقی است (هوشمند و خردادی، ۱۳۹۳). همچنین در حوزه آبخیز کشف‌رود، نتایج ۱۴ مدل از مدل‌های CMIP5 توسط چهار معیار ارزیابی ضریب نش-سانکلیف، درصد اریبی، ضریب تعیین و نسبت جذر ریشه مربعات خطا به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند (آقاخانی افشار و همکاران، ۱۳۹۵).

دمای جهانی تا زیر ۱/۵ درجه نسبت به سطوح واداشت پیش از صنعتی‌شدن و یک سناریو با خط سیر بسیار زیاد اضافه شده‌اند. در جدول ۱ نحوه نام‌گذاری دو ردیف سناریوهای گزارش ششم براساس مشخصات آن‌ها نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات سناریوهای ردیف ۱ و ۲ گزارش ششم

نام سناریو	دسته واداشت	واداشت	
		۲۱۰۰	SSP
SSP5-8.5	زیاد	۸/۵	۵
SSP3-7.0	زیاد	۷/۰	۳
SSP2-4.5	متوسط	۴/۵	۲
SSP1-2.6	کم	۲/۶	۱
SSP4-6.0	متوسط	۶/۰	۴
SSP4-3.4	کم	۳/۴	۴
SSP5-3.4-os	بسیار زیاد	۳/۴	۵
SSP x-y (1-2.0)	کم	۲/۶	۱

برخلاف توانمندی بالای مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی، مدل‌سازی‌های انجام‌شده به‌دلایلی ازجمله ساده‌سازی‌های صورت‌گرفته در شرایط اولیه و پارامترهای مدل‌ها، همچنان با عدم قطعیت همراه هستند (سمنوف و پیر، ۲۰۱۰؛ هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۱۰؛ فنگ و فو، ۲۰۱۲). با توجه به تعدد این مدل‌ها و عدم قطعیت هرکدام از آن‌ها در تصویرسازی مؤلفه‌های اقلیمی، تعیین مدل‌های مناسب براساس میزان دقت آن‌ها در شبیه‌سازی وضعیت اقلیم دوره تاریخی و ارائه روشی به‌منظور افزایش دقت نتایج این مدل‌ها در تصویرسازی دوره آتی، می‌تواند کمک شایانی به کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های اقلیمی کند.

در این راستا تعدادی از مطالعات انجام‌گرفته به‌منظور کاهش عدم قطعیت نتایج مدل‌های GCM، بر وزن‌دهی و اجرای گروهی و عده‌ای دیگر بر رتبه‌بندی و انتخاب منفرد این مدل‌ها متمرکز شده‌اند. از تحقیقات انجام‌شده به‌منظور رتبه‌بندی مدل‌های اقلیمی، می‌توان به ارزیابی عملکرد ۲۴ مدل GCMs گزارش پنجم با معیارهای نارایی^۱، نارایی نسبی، ضریب همبستگی و ریشه میانگین خطای نسبی نرمال‌سازی‌شده و رتبه‌بندی پنج مدل برتر

2- Grade Mean
3- Grade Correlation
4- Grade variance
5- Relative root mean square error
6- Kling-Gupta efficiency
7- Symmetric uncertainty
8- Fuzzy Analytic Hierarchy Process

1- Bias

همکاران، ۱۳۹۸) در تصویرسازی دما اشاره کرد (زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹). همچنین همین پژوهشگران، ۵ مدل از مدل‌های گزارش ششم را توسط سنجه KGE با هدف بررسی تغییر در مقدار بارش‌های حدی توسط سنجه‌های حداکثر مقدار بارش یک‌روزه و نسبت بارش سالانه به تعداد روزهای تر در دوره آتی، مورد ارزیابی قرار دادند. (زرین و داداشی رودباری، ۲۰۲۱).

در دو تحقیق اخیر تنها تعداد معدودی از مدل‌های گزارش ششم برای تصویرسازی دوره آتی مورد ارزیابی قرار گرفته است؛ به‌علاوه تصویرسازی دما و بارش حدی برای کل ایران براساس نتایج تنها ۴۳ ایستگاه انجام شده است. درحالی‌که با توجه به انتشار مدل‌های بیشتری از گزارش ششم و دقت متفاوت این مدل‌ها، ضروری است تصویرسازی از تغییرات متغیرهای اقلیمی در دوره آتی براساس برون‌داد مدل‌های بیشتری انجام گیرد تا بتوان عدم قطعیت موجود در تصویرسازی اقلیمی آینده را بهتر ارزیابی کرد؛ علاوه‌براین با توجه به وسعت ایران نیاز است تعداد ایستگاه‌های بیشتری با توزیع مکانی مناسب برای تصویرسازی اقلیمی لحاظ شود. همچنین ارائه چشم‌اندازی از میانگین تغییرات بارش و دما در مقیاس حوزه‌های آبریز می‌تواند در مدیریت منابع آب کشور قابل‌استفاده و مفید باشد.

در این تحقیق، دقت مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی دما و بارش در مقیاس حوزه‌های آبریز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج رتبه‌بندی مدل‌ها براساس سنجه KGE ارائه می‌شود؛ به‌طوری‌که بر مبنای رتبه‌های حاصل، وزن‌دهی مدل‌ها صورت می‌گیرد. با توجه وزن‌های محاسبه‌شده، ترکیب نتایج شبیه‌سازی مدل‌های مختلف گزارش ششم برای سناریوهای دوره آتی انجام می‌گیرد. در این راستا از سه سناریوی گزارش ششم (حدی و متوسط) استفاده شده است و درنهایت به‌منظور یاری‌رساندن به مدیران در امر برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات پدیده تغییر اقلیم، تغییرات دما و بارش در افق (۲۰۲۰-۲۰۳۹) میلادی به‌صورت تحلیل منطقه‌ای در سطح حوضه‌های آبریز درجه دو کشور ارائه شده است.

در مطالعات مرور شده فوق، مدل‌های تغییر اقلیمی براساس روش‌های آماری رتبه‌بندی شده و یک یا چند مدل جداگانه به‌منظور تصویرسازی اقلیم آتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، درحالی‌که بنا به توصیه IPCC، استفاده گروهی از مدل‌ها سبب کاهش عدم قطعیت‌های پیش‌بینی اقلیمی می‌شود (IPCC, 2010)؛ بنابراین برخی از مطالعات به وزن‌دهی مدل‌ها پرداخته‌اند. ازجمله اثر روش وزن‌دهی ۲۸ مدل GCM گزارش پنجم برای مطالعات هیدرولوژیک مورد بررسی قرار گرفت (چن و همکاران، ۲۰۱۷). نتایج این تحقیق بیانگر اثر اندک روش وزن‌دهی روی پیش‌بینی دما، بارش و جریان سطحی است. این درحالی‌ست که نتایج این تحقیق محدود به منطقه‌ای مشخص است و این رویکرد در بسیاری از تحقیقات مورد پذیرش قرار نگرفته است. از میان روش‌های ارائه‌شده با رویکرد وزن‌دهی متفاوت، می‌توان به روش قابلیت اطمینان میانگین‌گیری گروهی REA^۱ اشاره کرد که در مقایسه با رویکرد میانگین‌گیری ساده گروهی کاهش در حدود ۱۵۰ درصد را در دامنه عدم قطعیت نشان داده است (نانویر و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین در ارزیابی میانگین ساده (SM)^۲ و رگرسیون جنگل تصادفی (RF)^۳ از ۲۰ مدل مختلف اقلیمی، نتایج بیانگر عملکرد بهتر ترکیب مدل‌ها در روش رگرسیون جنگل تصادفی بوده است (احمد و همکاران، ۲۰۱۹).

با بررسی مطالعات پیشین مشخص می‌شود که بیشتر مطالعات انجام‌شده به‌خصوص در کشور ایران، در راستای ارزیابی دقت و وزن‌دهی مدل‌های CMIP5 و تصویرسازی دوره آتی براساس برون‌داد این مدل‌ها است. از میان اندک مطالعاتی که با مدل‌های گزارش ششم انجام شده است، می‌توان به ارزیابی عملکرد سه مدل گزارش ششم توسط سنجه‌های ریشه دوم میانگین مربع خطا RMSE^۴، نش-ساتکلیف NSE^۵ و کلینگ-گوپتا KGE (زرین و همکاران، ۱۳۹۹) و ارزیابی عملکرد همین سه مدل گزارش ششم توسط سنجه‌های RMSE، میانگین اریبی خطا MBE^۶ و میانگین خطای مطلق MAE^۷ و t-Jacovids (احمدی و

1- Reliability ensemble averaging

2- Simple Mean

3- Random Forest

4- Root mean square error

5- Nash-Sutcliffe

6- Mean bias error

7- Mean absolute error

مواد و روش‌ها

روش‌شناسی تحقیق

در شکل ۱ مراحل مختلف روش‌شناسی تحقیق نشان داده شده است. این تحقیق در دو بستر اصلی ارزیابی دقت مدل‌های گزارش ششم IPCC (CMIP6) و تصویرسازی وضعیت دما و بارش ۲۰ سال آتی کشور (۲۰۲۰-۲۰۳۹) انجام گرفت.

بارش و دمای مشاهداتی حوزه‌های آبریز در دوره تاریخی ۱۹۹۵-۲۰۱۴

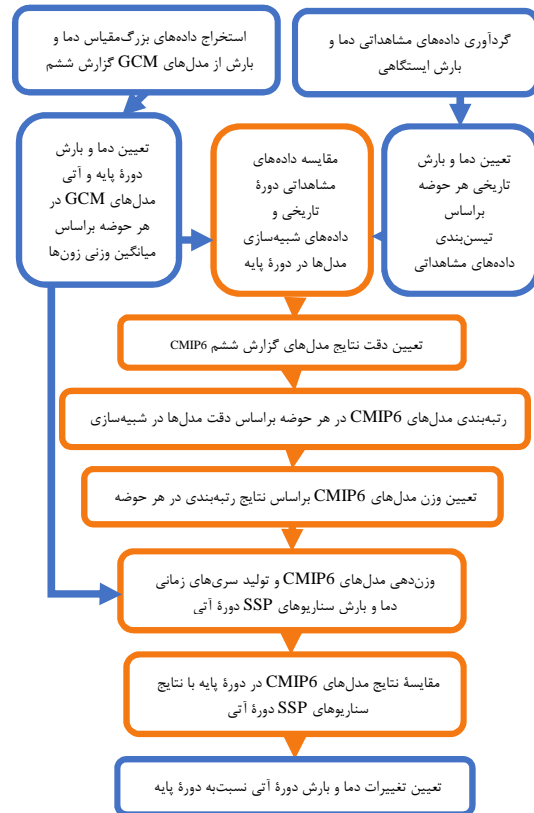
با توجه به تنوع آب‌وهوایی در ایران، برنامه‌ریزی برای مدیریت یکپارچه منابع آب نیازمند بررسی تغییرات پارامترهای اقلیمی در مناطق مختلف است. در این راستا با توجه به اهمیت مدیریت حوضه‌ای، مقیاس حوضه ۲ درجه برای این مطالعه در نظر گرفته شد و داده‌های مشاهداتی نیز برای متوسط مکانی در سطح هریک از حوضه‌های آبریز توسعه داده شد.

برای این کار به ترتیب از ۱۳۸ و ۱۱۳ ایستگاه هواشناسی به‌منظور بررسی بارش و دما براساس توزیع مناسب مکانی استفاده شد. در ادامه با به‌کارگیری روش چندضلعی‌های تیسن، داده‌های ماهانه بارش و دمای دوره تاریخی ۱۹۹۵-۲۰۱۴ در ۳۰ حوضه ۲ درجه کشور پهنه‌بندی شد. شکل (۲ الف و ب) پراکندگی ایستگاه‌های در نظر گرفته شده و تیسن‌بندی انجام شده برای استخراج داده‌های مشاهداتی بارش و دما در حوضه‌های ۲ درجه کشور را نشان می‌دهند.

شبیه‌سازی دما و بارش دوره پایه ۱۹۹۵-۲۰۱۴ مدل‌های اقلیمی

با توجه به میزان در دسترس بودن آمار و اطلاعات دوره پایه و آتی مدل‌های CMIP6 در زمان انجام این پژوهش، نتایج شبیه‌سازی بارش و دمای ۱۰ مدل از سری مدل‌های گزارش ششم از درگاه اینترنتی استخراج شد. سپس به‌منظور یکسان‌سازی بازه زمانی دوره پایه مدل‌های اقلیمی با دوره مشاهداتی، از نتایج شبیه‌سازی سال‌های ۱۹۹۵-۲۰۱۴، مدل‌ها به‌صورت ماهانه استفاده شد. در جدول ۲ مشخصات مدل‌های به‌کاررفته در این تحقیق، ارائه شده است.

شبکه‌بندی مدل‌های اقلیمی به‌دلیل قدرت متفاوت تفکیک مکانی بر هم منطبق نیست؛ به همین سبب برای هر مدل، موقعیت زون‌ها (سلول‌های شبکه‌بندی) پوشاننده ۳۰ حوضه آبریز ۲ درجه کشور مشخص و با توجه به



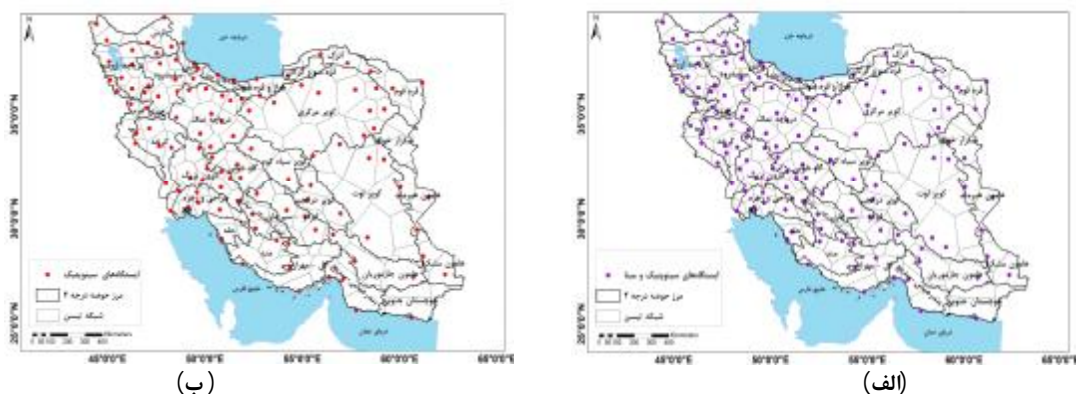
شکل ۱- روش‌شناسی تحقیق

داده‌های مورد استفاده در تحقیق

داده‌های مدل‌های گزارش ششم

نتایج مدل‌های گزارش ششم از سایت <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/> برای دوره تاریخی و دوره آتی تحت سناریوهای مختلف براساس نیاز این تحقیق به‌صورت ماهانه استخراج شد. در این تحقیق سناریوهای اصلی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به‌منظور تصویرسازی تغییرات دما و بارش متوسط دوره‌های آتی مورد استفاده قرار گرفت. با تحلیل این سناریوها، نخست امکان بررسی آسیب‌پذیری‌های حاصل از تغییرات اقلیمی در خوش‌بینانه تا بدبینانه‌ترین حالت فراهم می‌شود و

درصد مساحت واقع‌شده هر زون (سلول) در آن حوضه، متوسط دما و بارش دوره پایه مدل‌های GCM در سطح هر حوضه استخراج شد.



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی منتخب برای (الف) بارش (ب) دما در سطح کشور

جدول ۲- مشخصات مدل‌های CMIP6 مورد استفاده در پژوهش

ردیف	نام مدل	کشور توسعه‌دهنده	نام مرکز تحقیقاتی	دقت مکانی مدل (درجه)
۱	BCC-CSM2-MR	China	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	$1.12^\circ \times 1.12^\circ$
۲	CESM2	USA	Community Earth System Model Contributors	$1.25^\circ \times 0.94^\circ$
۳	CNRM-CM6-1	France	Centre National de Recherches Météorologiques Scientifique (CNRM)	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$
۴	CanESM5	Canada	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis-Canada	$2.81^\circ \times 2.78^\circ$
۵	MIROC6	Japan	National Institute for Environmental Studies, The University of Tokyo	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$
۶	MRI-EMS2-0	Japan	Meteorological Research Institute	$1.12^\circ \times 1.12^\circ$
۷	IPSL-CM6A-LR	France	Institut Pierre-Simon Laplace	$2.5^\circ \times 1.26^\circ$
۸	GISS-E2-1-G	USA	NASA Goddard Institute for Space Studies	$2.5^\circ \times 2^\circ$
۹	HadGEM3-GC31-LL	UK	Meteorological Office Hadley Centre	$1.88^\circ \times 1.25^\circ$
۱۰	NESM3	China	Nanjing university of Information and Technology (NUIST)	$1^\circ \times 1.3^\circ$

سنجه، می‌تواند کمک شایانی را در افزایش دقت نتایج تصویرسازی مدل‌ها داشته باشد. هرچه میزان این سنجه به ۱ نزدیک‌تر باشد، توانایی مدل GCM در شبیه‌سازی دما یا بارش دوره تاریخی بهتر خواهد بود. معادلات (۱) تا (۳) نحوه محاسبه سنجه KGE را نشان می‌دهند.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad (3)$$

رتبه‌بندی مدل‌های GCM براساس دقت در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی

برای تعیین دقت هر یک از مدل‌های CMIP6، نتایج شبیه‌سازی بارش و دمای هر حوضه در دوره تاریخی با آمار دوره مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت. در این مرحله، از سنجه آماری کلینگ-گوپتا (KGE) برای تعیین میزان دقت هر مدل (روابط ۱ تا ۳) استفاده شد. این سنجه در عین سادگی، آماره میانگین، انحراف معیار و ضریب همبستگی سری داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی حاصل از مدل را لحاظ کرده و وزن‌دهی براساس این

از سنجه KGE استفاده شد؛ به گونه‌ای که سنجه KGE در هر حوضه برای هر یک از ۱۰ مدل محاسبه شد و بر مبنای مقادیر آن، مدل‌ها در هر حوضه رتبه‌بندی شدند؛ به طوری که مدلی که در هر حوضه دارای بالاترین مقدار سنجه KGE بوده و به عنوان مدل برتر در شبیه‌سازی متغیر مربوط معرفی شده است؛ به طور کلی مقادیر سنجه KGE در شبیه‌سازی متغیرهای بارش و دما بیشتر از ۰/۵ بوده و عملکرد قابل قبول مدل‌ها را نشان می‌دهد؛ به علاوه، مقادیر سنجه KGE در شبیه‌سازی دما بیشتر از مقادیر آن در شبیه‌سازی بارش است که بیانگر عملکرد بهتر مدل‌ها در تصویرسازی متغیر دما است (جدول ۳).

شکل‌های ۳ و ۴ نتایج انتخاب مدل‌های مناسب را برای پیش‌بینی وضعیت بلندمدت بارش و دما در دوره تاریخی به تفکیک حوزه‌های آبریز مختلف کشور نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۴، چهار مدل BCC-CSM2-MR، CESM2، GISS-E2-1-G و IPSL-CM6A-LR بیشترین دقت را از بین ۱۰ مدل CMIP6 برای شبیه‌سازی دمای نواحی مختلف کشور دارند. با این وجود، مدل GISS-E2-1-G قادر به شبیه‌سازی دمای کشور در پهنه وسیع‌تری از حوضه‌ها است. در حالت کلی مدل BCC-CSM2-MR دمای نواحی شرق و جنوب غربی کشور را نسبتاً دقیق‌تر از سایر مدل‌ها پیش‌بینی می‌کند. این در حالی است که مدل CESM2 در سواحل جنوبی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. مدل IPSL-CM6A-LR نیز دمای سواحل شمالی و برخی نواحی مرتفع‌تر فلات مرکزی و مدل BCC-CSM2-MR دمای نواحی شمال غربی را بهتر شبیه‌سازی کرده است.

بررسی نتایج مربوط به تعیین مناسب‌ترین مدل‌های GCM گزارش ششم در پیش‌بینی بارش نشان می‌دهد (شکل ۵) که این مدل‌ها نیز مانند دقت پیش‌بینی دما، دقت‌های متفاوتی در نواحی مختلف کشور دارند؛ به نحوی که مدل HadGEM3-GC31-LL قادر به تصویرسازی مناسب‌تر بارش عمدتاً در نواحی شرقی کشور است؛ در حالی که مدل BCC-CSM2-MR بارش سواحل جنوبی و مدل CNRM-CM6-1 بارش سواحل شمالی، مدل بارش MIROC6 شمال غرب و مدل MRI-ESM2-0 بارش نواحی غربی را دقیق‌تر تصویرسازی کرده‌اند.

که در معادلات فوق μ_s و μ_o به ترتیب میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، Γ ضریب همبستگی پیرسون و σ_s و σ_o به ترتیب انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی هستند.

تعیین وزن (وزن‌دهی) مدل‌های GCM در حوزه‌های آبریز

با هدف کاهش عدم قطعیت در نتایج حاصل از مدل‌های CMIP6، این مدل‌ها بر مبنای دقت محاسبه شده در مرحله قبل بر اساس معادله (۴) وزن‌دهی شدند. در این معادله، R_i رتبه هر مدل و W_i وزن هر مدل است (چن و همکاران، ۲۰۱۱).

$$W_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (4)$$

تصویرسازی دما و بارش دوره آتی در مقیاس حوزه‌های آبریز

پس از ارزیابی و وزن‌دهی مدل‌ها که در مرحله قبل انجام شد، به منظور پیش‌بینی تغییرات دما و بارش حوضه‌های مختلف کشور در طی ۲۰ سال آتی (۲۰۲۰-۲۰۳۹)، متغیرهای دما و بارش مدل‌های مختلف CMIP6 تحت سناریوهای انتشار (SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5) استخراج شد. سپس برون‌داد مدل‌ها (سری‌های زمانی بارش و دما) بر اساس وزن‌های محاسبه شده در هر حوضه ترکیب شدند؛ به طوری که برای هر حوزه آبریز و هر سناریوی انتشار، یک سری زمانی بارش و یک سری زمانی دما حاصل شد. در مرحله بعد، از سری‌های زمانی میانگین‌گیری شده و برای هر سناریو یک مقدار متوسط تعیین شد. در نهایت، میانگین سری‌های زمانی بارش و دمای دوره آتی در هر سناریو با ترکیب نتایج مدل‌ها در دوره پایه (تاریخی) مقایسه شدند تا میزان تغییرات دما و بارش ۲۰ سال آتی حوزه‌های آبریز مختلف کشور تعیین شود.

نتایج و بحث

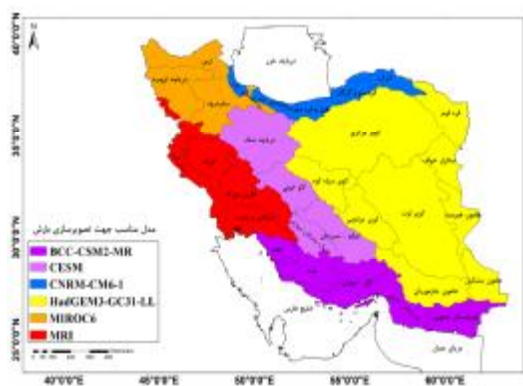
رتبه‌بندی مدل‌های CMIP6 بر اساس توانایی

شبیه‌سازی در دوره تاریخی

همان‌گونه که ذکر شد، به منظور رتبه‌بندی مدل‌های گزارش ششم IPCC در شبیه‌سازی متغیرهای بارش و دما،

جدول ۳ - مقادیر KGE مدل‌های برتر در شبیه‌سازی دما و بارش حوزه‌های آبریز

بارش		دما		حوضه آبریز
KGE	مدل برتر	KGE	مدل برتر	
-۰/۷۴		-۰/۹۶		ارس
-۰/۷	MIROC6	-۰/۹۵	BCC-CSM2-MR	دریاچه ارومیه
-۰/۷۳		-۰/۹۷		سفید رود
-۰/۶۵		-۰/۹۸		حله
-۰/۶		-۰/۹۸		مند
-۰/۵۴	BCC-CSM2-MR	-۰/۹۷	CESM2	کل - مهران
-۰/۵۱		-۰/۹۷		بندهعباس - سدیح
-۰/۵		-۰/۹۷		بلوچستان جنوبی
-۰/۵۸		-۰/۹۴		اترک
-۰/۵۳		-۰/۹۷		قره سو و گرگان
-۰/۵۶	CNRM-CM6-1	-۰/۹۸		هراز و قره‌سو
-۰/۵		-۰/۹۷		رودخانه‌های بین
-۰/۵۲		-۰/۹۷	IPSL-CM6A-LR	رودخانه‌های تالش
-۰/۷۲		-۰/۹۷		دریاچه نمک
-۰/۵۵		-۰/۹۸		طشک - بختگان
-۰/۷	CESM2	-۰/۹۶		گلوخونی
-۰/۵۳		-۰/۹۷		ابرقو و سیرجان
-۰/۷۶		-۰/۹۷		مرزی غرب
-۰/۷۳	MRI-ESM2-0	-۰/۹۷		کرخه
-۰/۷۳		-۰/۹۸		کارون
-۰/۶۴		-۰/۹۸		جراحی و زهره
-۰/۶۳		-۰/۹۷		کوبرسیاه کوه
-۰/۵۶		-۰/۹۷		کوپر انجیر
-۰/۵۸		-۰/۹۷	GISS-E2-1-G	قره قوم
-۰/۶۳		-۰/۹۷		هامون هیرمند
-۰/۵۱	HadGEM3-GC31-LL	-۰/۹۶		هامون مشکیل
-۰/۶۲		-۰/۹۷		کوپر مرکزی
-۰/۵۸		-۰/۹۷		کوپر لوت
-۰/۶۶		-۰/۹۷		نمکزار خواف
-۰/۵۵		-۰/۹۷		هامون جازموربان



شکل ۴ - مدل‌های GCM مناسب در جهت تصویرسازی بارش در حوضه‌های مختلف کشور



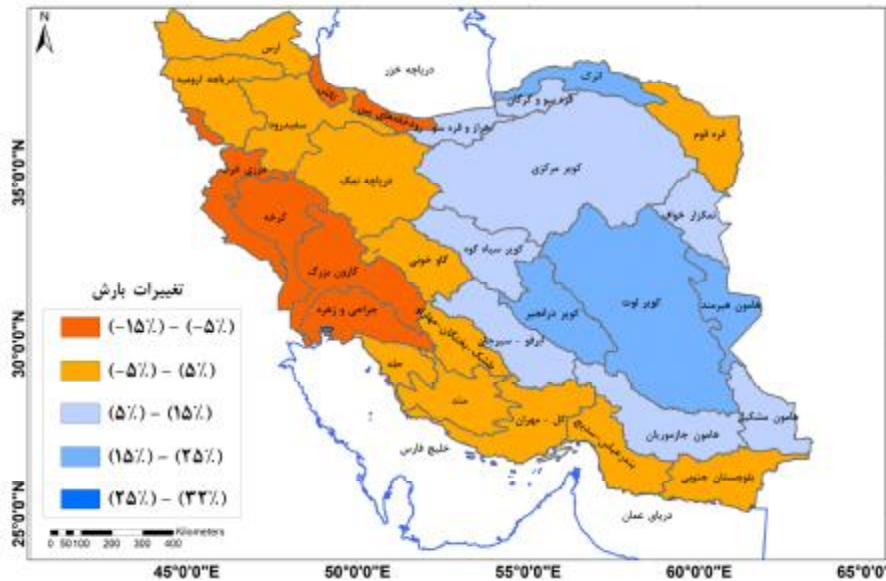
شکل ۳ - مدل‌های GCM مناسب در جهت تصویرسازی دما در حوضه‌های مختلف کشور

تغییرات بارش دوره ۲۰ ساله آبی حوضه‌های مختلف کشور

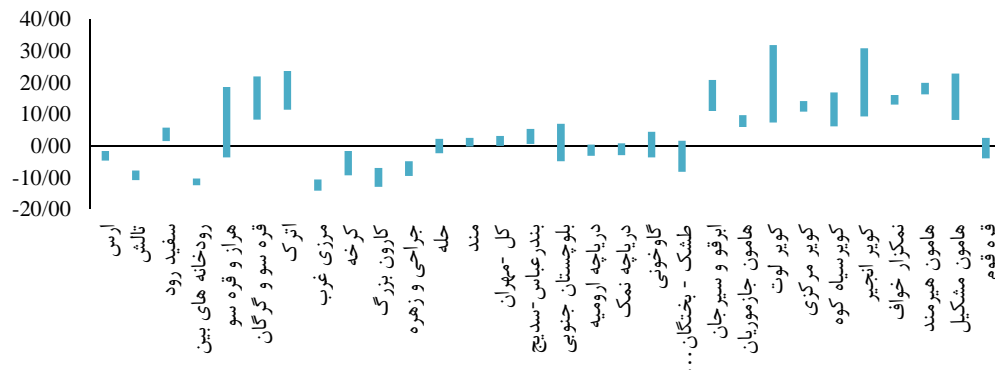
بررسی تغییرات بارش در ۲۰ ساله آبی توسط مقایسه مقدار متوسط بارش در هر سناریوی SSP با متوسط دوره پایه صورت گرفت. در شکل ۵، تغییرات بارش ۲۰ ساله آبی حوضه‌های آبریز کشور نسبت به دوره تاریخی به صورت متوسطی از سناریوهای SSP مختلف و در شکل ۶،

دامنه تغییرات بارش سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 نشان داده شده است.

براساس نتایج سناریوی SSP126 به عنوان سناریوی خوش‌بینانه، بارش حوضه‌های مختلف کشور از ۱۳- درصد (مرزی غرب) تا ۱۶+ درصد (هامون هیرمند) تغییر خواهد کرد. همچنین متناسب با این سناریو به جز مناطق غربی، بقیه مناطق با کاهش بارشی کمتر از ۵ درصد یا افزایش بارش مواجه می‌شوند.



شکل ۵- تغییرات بارش در ۲۰ سال آبی (۲۰۲۰-۲۰۳۹) تحت متوسط سناریوهای انتشار SSP در حوضه‌های آبریز کشور



شکل ۶- دامنه تغییرات بارش دوره آبی (۲۰۲۰-۲۰۳۹) تحت سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585

غربی و شمالی غربی (حدود ۵ تا ۱۵ درصد) قابل مشاهده است.

به طور کلی نتایج میانگین تغییرات بارش دوره آبی در سناریوهای مختلف SSP نشان می‌دهد که بارش حوضه‌های مختلف کشور در طی ۲۰ سال آبی بین ۱۹+ (نواحی شرقی) تا ۱۲- (نواحی غربی) درصد تغییر خواهد

در سناریوی SSP245 به عنوان سناریوی متوسط، مقادیر بارش دامنه تغییراتی بین ۱۰- (مرزی غرب) تا ۲۳+ (آترک) درصد و در سناریوی بدبینانه SSP585 تغییراتی حدود ۱۴- (مرزی غرب) تا ۲۲+ (هامون مشکیل) درصد را از خود نشان می‌دهد. در این دو سناریو در مقایسه با سناریوی SSP126، کاهش بیشتری در بارش‌های مناطق

نتایج رتبه‌بندی در این تحقیق حاکی از تفاوت و تنوع بیشتر مدل‌های برتر در تصویرسازی بارش نسبت به مدل‌های برتر در تصویرسازی دما است که این تنوع به دلیل نوسانات بیشتر بارش در گستره ایران نسبت به دما است. همچنین مقادیر بالاتر سنجه KGE در تصویرسازی دما (حدود ۰/۹) نسبت به مقادیر این سنجه در تصویرسازی بارش (۰/۸-۰/۵)، بیانگر توانایی بیشتر مدل‌های CMIP6 در تصویرسازی دما هستند.

نتایج تصویرسازی متغیر بارش توسط مدل‌های اقلیمی تحت سه سناریوی SSP در افق ۲۰۲۰-۲۰۳۹ برای حوزه‌های آبریز نشان داد که دامنه تغییرات بارش از حدود ۱۹+ تا ۱۲- درصد و افزایش دما به طور متوسط در دامنه ۰/۱ تا ۰/۶ در حوزه‌های مختلف کشور طی ۲۰ سال آتی خواهد بود. در اثر وقوع تغییر اقلیم، بارش دوره آتی در برخی از حوزه‌های آبریز کشور از جمله حوزه‌های شرقی افزایش و در برخی دیگر مانند حوزه‌های غربی کاهش خواهد یافت. این در صورتی است که این نوع از مدل‌های تغییر اقلیم دارای عدم قطعیت بوده و می‌بایست در زمان تصمیم‌گیری، می‌زان عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی لحاظ شود. با توجه به موقعیت استراتژیک حوزه‌های غربی، هم از لحاظ مجاورت با کشورهای همسایه و هم از لحاظ فعالیت‌های کشاورزی و امنیت غذایی، کمبود منابع آبی ناشی از کاهش بارش‌ها می‌تواند منجر به بروز مشکلات شود.

مقایسه تحقیقات پراکنده انجام شده براساس مدل‌های گزارش پنجم با نتایج برون‌داد مدل‌های گزارش ششم نشان داد که در برخی تحقیقات انجام شده (دولابیان و همکاران، ۲۰۲۱) افزایش بارش در مناطق شرقی (۲۶ درصد) و محدوده‌ای از شمال ایران با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (باغبانان و همکاران، ۱۳۹۹)، در صورتی که برآورد کاهش بارش در نواحی جنوب‌غربی توسط سناریوهای SSP بیشتر از سناریوهای RCP (۱۰ درصد) پیش‌بینی شده است. این درحالی‌ست که بنا به مطالعات صورت‌گرفته، مدل‌های گزارش ششم دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های گزارش پنجم در شبیه‌سازی بارش هستند (زمانی و همکاران، ۲۰۲۰) و در این صورت لحاظ کاهش بارش‌ها در نواحی جنوب‌غربی به منظور برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب اهمیت می‌یابد.

در حالت کلی و با بررسی نقشه متوسط تغییرات دمای ۲۰ سال آتی کشور، می‌توان نتیجه گرفت که در نواری از شمال‌شرقی تا شمال‌غربی کشور بیشترین افزایش دما (متوسطی حدود ۰/۴ تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد) تجربه خواهد شد. همچنین حوضه‌های کویر در انجیر، طشک-بختگان-مهارلو و ابرقو-سیرجان نیز جزو مناطق با بیشترین میزان افزایش دما خواهند بود؛ علاوه بر این در بیشتر حوضه‌های شرقی و مرکزی و نواحی جنوبی کشور، متوسط افزایش دمای در حدود ۰/۳ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی می‌شود. در این شرایط با توجه به اینکه افزایش دما منجر به افزایش نیاز آبی در بخش‌های مختلف خواهد شد، بسیاری از نواحی به خصوص حوزه‌های آبریز با تراکم جمعیت و فعالیت کشاورزی بالا، نیازمند برنامه‌ریزی برای تأمین و مدیریت تقاضای آب در دوره آتی هستند.

نتیجه‌گیری

به طور کلی می‌توان گفت که توانایی مدل‌های GCM در تصویرسازی دوره آتی بسته به اقلیم هر منطقه و متغیر اقلیمی پیش‌بینی شده متفاوت است. با توجه به حجم بالای داده‌های مدل‌های GCM و افزایش دقت این مدل‌ها در گزارش ششم IPCC، تعیین مدل‌های مناسب CMIP6 در تصویرسازی دما و بارش در حوزه‌های آبریز مختلف و انتخاب مدل‌های برتر به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آبی ضرورت دارد. بدین منظور در این پژوهش داده‌های دما و بارش مدل‌های CMIP6 در دوره تاریخی (۱۹۹۵-۲۰۱۴) با داده‌های مشاهداتی نظیر ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی مقایسه شدند و مدل‌های برتر CMIP6 در تصویرسازی دما و بارش براساس رتبه‌بندی توسط سنجه KGE در مناطق مختلف ایران مشخص شد. در ادامه مدل‌های مختلف CMIP6 براساس رتبه کسب شده، وزن دهی و با هم ترکیب شدند.

با تعیین وزن مدل‌های CMIP6، سری‌های زمانی برون‌داد این مدل‌ها نیز وزن دهی شدند و در ادامه به منظور ارائه چشم‌اندازی بهتر از تغییرات اقلیمی دوره آتی، مقدار متوسط وزنی سری زمانی ترکیبی حاصل از برون‌داد مدل‌ها در دوره تاریخی (۱۹۹۵-۲۰۱۴) با متوسط مقادیر متناظر در سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۳۹) مورد مقایسه قرار گرفت.

منابع

۱. احمدی ح.، فلاح قاله‌ری غ. و باعقیده م. ۱۳۹۸. پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم بر بارش فصلی مناطق سردسیر ایران براساس سناریوهای واداشت تابشی (RCP)، فیزیک زمین و فضا، ۴۵(۱): ۱۷۷-۱۹۶.
 ۲. آقاخانی افشار ا.، حسن‌زاده ی.، بسالت‌پور ع. ا.، پوررضا و بیلندی م. ۱۳۹۵. تغییرات فصلی بارش و درجه حرارت حوضه آبخیز کشف رود در دوره‌های آتی با رویکرد مدل‌های گردش کلیسری CMIP5. آب و خاک، ۳۰(۵): ۱۷۱۸-۱۷۳۲.
 ۳. باغبانان پ.، احمدآبادی ع.، کریمی آ. ۱۳۹۹. بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر تغییرات هیدرولوژی حوضه آبریز حبله‌رود، پژوهش‌های آب‌وهوایی، ۲(۵): ۲۷-۴۰.
 ۴. زرین آ.، داداشی رودباری ع. و صالح‌آبادی ن. ۱۳۹۹. بررسی بی‌هنجاری و روند دمای ایران در پهنه‌های مختلف اقلیمی با استفاده از پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6)، مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۵(۱): ۳۵-۵۴.
 ۵. زرین آ. و داداشی رودباری ع. ۱۳۹۹. پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برون‌داد پروژه مقایسه مدل‌های فاز ششم (CMIP6)، مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۶(۳): ۵۸۳-۶۰۲.
 ۶. هوشمند د.، آ. و خردادی م. ج. ۱۳۹۳. بررسی عدم قطعیت مدل‌های AOGCM و سناریوهای انتشار در برآورد پارامترهای اقلیمی (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک مشهد)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۳(۳): ۷۷-۹۲.
 7. Ahmed K. Sachindra D. A. Shahid S. Demirel M. C. and Chung E. S. 2019. Selection of multi-model ensemble of GCMs for the simulation of precipitation based on spatial assessment metrics. *Hydrology and Earth System Sciences*. 23: 4803-4824..
 8. Ansari Mahabadi S. Massah Bavani A. R. and Bagheri A. 2018. Improving adaptive capacity of social-ecological system of Tashk-Bakhtegan Lake Basin to climate change effects – A methodology based on Post-Modern Portfolio Theory. *Ecohydrology & Hydrobiology*. 18(4): 365-378.
- بررسی روند کلی تغییرات دمای آتی کشور نیز حاکی از افزایش دما در همه حوزه‌های آبریز کشور است. در حالت کلی و با بررسی نقشه متوسط تغییرات دمای ۲۰ سال آتی کشور، می‌توان دریافت که نواحی شمالی کشور افزایش دمای بیشتری را نسبت به نواحی جنوبی کشور تجربه خواهند کرد.
- افزایش دما در دوره آتی ضمن اینکه باعث افزایش تبخیر و تعرق می‌شود، بر افزایش تقاضا و مصارف آب در بخش‌های مختلف نیز اثرگذار خواهد بود؛ بنابراین توجه به تدوین سیاست‌های سازگاری با تغییر اقلیم در بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت، بیش‌ازپیش احساس می‌شود.
- برون‌داد مدل‌های گزارش پنجم نیز همانند مدل‌های گزارش ششم، افزایش دما را در بیشتر حوزه‌های آبریز ایران در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۳۹) پیش‌بینی کرده‌اند (بوستا و همکاران، ۲۰۲۱). در مقایسه نتایج تحقیقات صورت‌گرفته در نقاط مختلف ایران توسط مدل‌های مختلف GCM و سناریوهای مختلف RCP، نتایج این تحقیق دامنه تغییرات کمتری در تغییرات دمایی در گستره ایران نشان می‌دهد؛ به عبارتی حوزه‌های آبریز در پهنه‌های مختلف تفاوت فاحشی را در افزایش دما نسبت به یکدیگر نشان نمی‌دهد.
- براساس نتایج به‌دست‌آمده، حوزه‌های آبریز دریاچه ارومیه، دریاچه نمک و همچنین قره‌قوم از حوضه‌های مهمی هستند که افزایش دما در آن‌ها چشمگیر خواهد بود. افزایش دما در این نواحی قطعاً منجر به افزایش نیاز آبی شده و با توجه به کاهش بارندگی (حدود ۵ درصد)، به‌هم‌خوردن بیلان آبی در این نواحی محتمل خواهد بود؛ بنابراین لازم است تمهیداتی به‌منظور کاهش مصرف آب از جمله تغییر الگوی مصرف و برنامه‌ریزی در راستای جبران خسارات اقتصادی و برقراری تعادل میان عرضه و تقاضا در این مناطق صورت گیرد.

سیاسگزاری

مقاله حاضر براساس نتایج پروژه «بررسی عدم قطعیت نتایج مدل‌های جهانی تغییر اقلیم براساس داده‌های تاریخی» که در مؤسسه تحقیقات آب انجام قرار گرفته، تدوین شده است. نویسندگان بدین‌وسیله از حمایت‌های مالی و پشتیبانی این مؤسسه در طی فرایند انجام پروژه و تدوین مقاله حاضر، قدردانی می‌کنند.

19. Hijjoka Y. Lin E. Pereira J.J. Corlett R. Cui X. Inzarov G. Surjan A. Field C. Barros V. and Mach K. 2014. Chapter 24: Asia Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, IPCC Working Group II Contribution to AR5. Cambridge, U. Press, Cambridge UK and New York, USA. 139(3): 351-365.
20. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2010. Meeting Report IPCC Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections, National Center for Atmospheric Research, Boulder Colorado, USA. 115 p.
21. McSweeney C. F. Jones R. G. Lee R. W. and Rowell D. P. 2015. Selecting CMIP5 GCMs for downscaling over multiple regions. *Climate Dynamics*. 44(11-12): 3237-3260.
22. O'Neill B. C. Kriegler E. Ebi K. L. Kemp-Benedict E. Riahi K. Rothman D. S. van Ruijven B. J. van Vuuren D.P. Birkmann J. Kok K. and Levy M. 2017. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*. 42: 169-180
23. O'Neill B. C. Tebaldi C. van Vuuren D. P. Eyring V. Friedlingstein P. Hurtt G. Knutti R. Kriegler E. Lamarque J.-F. Lowe J. Meehl G. A. Moss R. Riahi K. and Sanderson B. M. 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geosci. Model Dev*. 9: 3461-3482.
24. Panjwani S. Kumar S. N. Ahuja L. and Islam A. 2019. Prioritization of global climate models using fuzzy analytic hierarchy process and reliability index. *Theoretical and Applied Climatology*. 137(3-4): 2381-2392.
25. Rogelj J. Popp A. Calvin K.V. Luderer G. Emmerling J. Gernaat D. Fujimori S. Streffler J. Hasegawa T. Marangoni G. and Krey V. 2018. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 C. *Nature Climate Change*. 8(4): 325.
26. Salman S. A. Shahid S. Ismail T. Ahmed K. and Wang X.-J. 2018. Selection of climate models for projection of spatiotemporal changes in temperature of Iraq with uncertainties, *Atmospheric Research*. 213: 509-522.
27. Semenov M. and Pierre Stratonovitch P. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*. 41: 1-14.
28. Sharafati A. Nabaei S. and Shahid S. 2020. Spatial assessment of meteorological drought features over different climate
9. Chen W. Jiang Z. and Li L. 2011. Probabilistic projections of climate change over China under the SRES A1B scenario using 28 AOGCMs. *Journal of Climate*. 24(17): 4741-4756.
10. Chen J.F. Brissette P. Liu P. and Xia J. 2017. Using raw regional climate model outputs for quantifying climate change impacts on hydrology. *Hydrol. Processes*. 31: 4398-4413.
11. Chen H. Zhao Y. Feng H. Li H. and Sun B. 2015. Assessment of climate change impacts on soil organic carbon and crop yield based on long-term fertilization applications in Loess Plateau, China. *Plant and Soil*. 390(1): 401-417.
12. Douglass A. R. Prather M. J. Hall T. M. Strahan S. E. Rasch P. J. Sparling L. C. Coy L. and Rodriguez J. M. 1999. Choosing meteorological input for the global modeling initiative assessment of high-speed aircraft. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 104(D22): 27545-27564.
13. Doulabian S. Golian S. Toosi A. S. and Murphy C. 2021. Evaluating the effects of climate change on precipitation and temperature for Iran using RCP scenarios. *Journal of Water and Climate Change*. 12(1): 166-184.
14. Estoque R. C. Ooba M. Togawa T. and Hijjoka Y. 2020. Projected land-use changes in the Shared Socioeconomic Pathways: Insights and implications. *Ambio*. 49(12): 1972-1981.
15. Eyring V. Bony S. Meehl G.A. Senior C. A. Stevens B. Stouffer R. J. and Taylor K. E. 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*. 9(5): 1937-1958.
16. Fallah-Ghalhari G. Shakeri F. and Dadashi-Roudbari A. 2019. Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 138(3-4): 1539-1562.
17. Feng J. and Fu C. 2012. A multi-ensemble of regional climate simulation from RMIP for Asia. Report of key laboratory of regional climate-environment for east Asia, START regional center for temperature east Asia, IAP, CAS: 1-38.
18. Gettelman A. Hegglin M. I. Son S. W. Kim J. Fujiwara M. Birner T. Kremser S. Rex M. Añel J. A. Akiyoshi H. and Austin J. 2010. Multimodel assessment of the upper troposphere and lower stratosphere: Tropics and global trends. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 115(D3).

- regions in Iran. *International Journal of Climatology*. 40(3): 1864-1884.
29. Stouffer R. J. Eyring V. Meehl G. A. Bony S. Senior C. Stevens B. and Taylor K. E. 2017. CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 98(1): 95-105.
30. Su F. Duan X. Chen D. Hao Z. and Cuo L. 2013. Evaluation of the global climate models in the CMIP5 over the Tibetan Plateau. *Journal of Climate*. 26(10): 3187-3208.
31. Ta Z. Yu Y. Sun L. Chen X. Mu G. and Yu R. 2018. Assessment of Precipitation Simulations in Central Asia by CMIP5 Climate Models. *Water*. 10(11): 1516.
32. Tanveer M. E. Lee M. H. and Bae D. H. 2016. Uncertainty and reliability analysis of CMIP5 climate projections in South Korea using REA method. *Procedia engineering*. 154: 650-655.
33. Usta D. F. B. Teymouri M. Chatterjee U. and Koley B. 2021. Temperature projections over Iran during the twenty-first century using CMIP5 models. *Modeling Earth Systems and Environment*. pp. 1-12.
34. Waugh D. W. and Eyring V. 2008. Quantitative performance metrics for stratospheric-resolving chemistry-climate models. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 8(18): 5699-5713.
35. Xu J. Gao Y. Chen D. Xiao L. and Ou T. 2017. Evaluation of global climate models for downscaling applications centred over the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*. 37(2): 657-671.
36. Zamani Y. Monfared S. A. H. and Hamidianpour M. 2020. A comparison of CMIP6 and CMIP5 projections for precipitation to observational data: the case of Northeastern Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 142(3): 1613-1623.
37. Zarrin A. and Dadashi-Roudbari A. 2021. Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*. 144(1): 643-660.