

صحت‌سنجی عملکرد شبیه‌های گردش عمومی جو (AOGCM) در شبیه‌سازی داده‌های دما در منطقه‌ی کرمان

رضا جاهد^{۱*}، نوید جلال کمالی^۲ و حسین بابازاده^۳

تاریخ دریافت: ۸۹/۸/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۰/۲/۲

چکیده

تغییرات اقلیمی در قرن بیست و یکم مهم‌ترین چالش پیش روی جوامع بشری است. نهادهای پژوهشی بسیاری در سراسر دنیا، شبیه‌های گوناگونی را بمنظور پیش‌بینی اقلیم و فراسنج‌های آن ارایه نموده‌اند. عدم اطمینان ناشی از کاربرد شبیه‌های گوناگون گردش عمومی جو^۴ (AOGCM) سبب شد که در این پژوهش به عنوان هدف اصلی، نتایج شبیه‌های گردش عمومی جو در شبیه‌سازی فراسنج‌های اقلیمی برای سال‌های آماری پایه مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد آن‌ها برای پیش‌بینی داده‌های دما در منطقه‌ی کرمان مورد ارزیابی قرار گیرد. در این پژوهش، نتایج شبیه‌سازی فراسنج‌های دما در ۲۲ شبیه (CM4_IPSL، CM3، CM3، CM2.1، CM2.0، CGCM3، CGCM2.3.2، CCSM3.0، BCM2.0، AOM)، MICRO3.2_HIRES، HadGEM، HadCM3، FGOAL، E_R، E_H، ECHO_G، ECHAM_5، PCM، Mk3.0، MICRO3.2_MENDES و SXG_2005) که مورد تایید هیئت بین‌دول تغییر اقلیم در گزارش چهارم می‌باشد، مورد ارزیابی قرار گرفتند. ارزیابی در سطح کمی در این پژوهش با بررسی شاخص‌های آماری تحلیل خطا، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، حداکثر خطا (ME)، ضریب تبیین یا تغییرات (CD)، کارایی شبیه‌سازی (EF) و ضریب مجموع باقی‌مانده (CRM)، انجام پذیرفت. مشخص گردید که شبیه‌های BCM2.0-CM3.0_INM-AOM در شبیه‌سازی داده‌های کم‌ترین دمای ماهانه، شبیه‌های HadGEM-ECHO_G-Mk3.0 داده‌های دمای میانگین ماهانه و همچنین، شبیه‌های PCM-Mk3.0-AOM در شبیه‌سازی بیش‌ترین دمای ماهانه دارای بهترین عملکرد بودند.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، صحت‌سنجی، شبیه‌های گردش عمومی جو AOGCM، دما، کرمان.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زه‌کشی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، گروه مهندسی آب

۳- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی آب

*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: rezajahed58@yahoo.com

۴ - Atmosphere- Ocean General Circulation Model (AOGCM)

مقدمه

ارتباط تنگاتنگی بین چرخه‌ی آبشناسی و سامانه‌ی اقلیمی وجود دارد. هر تغییری در اقلیم، بر عناصر آبشناسی اثر می‌گذارد. آبدهی رودها، آب‌های زیرزمینی، شدت سیلاب‌ها و خشکی، همگی متأثر از بارش و دما، مهم‌ترین عناصر اقلیمی، می‌باشند. بر اساس گزارش چهارم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم متوسط دمای جهانی در قرن بیستم در حدود ۰/۶ درجه‌ی سانتی‌گراد فزونی داشته است و این افزایش را برای قرن بیست و یکم در حدود ۱/۱ تا ۶/۴ درجه پیش بینی نموده اند (-IPCC 4AR, 2007). همچنین، شواهد بسیاری در مورد وقوع تغییر اقلیم و گرم شدن زمین به وسیله‌ی سازمان‌های مربوطه ارایه شده اند. برای مثال، در اندازه‌گیری‌های انجام شده ۱۱ سال از ۱۲ سال که به عنوان گرم‌ترین سال‌های جهان از ۱۸۵۰ تاکنون اعلام شده اند، در محدوده‌ی ۱۹۹۵-۲۰۰۶ قرار دارند؛ تاکنون افزایش دمای آب اقیانوس‌ها تا اعماق ۳۰۰۰ متری که از سال ۱۹۶۱ نیز ثبت شده است؛ داده‌های جدیدی را از زمان انتشار گزارش سوم هیئت بین‌الدول^۱ تاکنون نشان می‌دهد: کاهش لایه‌های یخی در قطب جنوب و گرین‌لند^۲ به احتمال بسیار زیاد، در بالا آمدن سطح آب اقیانوس‌ها نقش داشته‌اند؛ افزایش معنی‌داری در اندازه‌ی بارش در مناطق شرقی آمریکای شمالی و جنوبی، اروپای شمالی و آسیای مرکزی و شمالی دیده شده است؛ در مناطق ساحل آفریقا، مدیترانه، آفریقای جنوبی و مناطقی از آسیای جنوبی دوره‌های خشکسالی رخ داده‌اند (سولومان و همکاران، ۲۰۰۷).

از این رو پژوهشگران بسیاری در سراسر جهان به بررسی عوامل، تاثیرات و پیامدهای ناشی از این تغییرات پرداخته‌اند.

کتر و پروان (۱۹۹۲) حساسیت رخدادهای حدی جوی را نسبت به تغییر در میانگین و واریانس متغیرهای جوی مورد بررسی قرار دادند. نامبردگان به این نتیجه رسیدند که رخدادهای حدی به تغییر در واریانس بیش‌تر از تغییر در میانگین حساسند. آلیسون و همکاران (۲۰۰۴) تأثیر

تغییر اقلیم را بر وضعیت تناوب سیلاب در انگلستان تحت خروجی‌های شبیه‌گردش عمومی HadRM3H و نمایشنامه‌ی انتشار A2 مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان دادند که به رغم کاهش میانگین سالانه‌ی بارش در اکثر حوضه‌ها، در بیش‌تر دوره‌های بازگشت، تناوب سیلاب‌ها افزایش یافته است. در پژوهشی بر روند تغییرات بارش سالانه در نواحی خشک و نیمه خشک ایران، مدرس و ردیگرز داسیلوا (۲۰۰۷)، با استفاده از داده‌های ۲۰ ایستگاه زمینی دریافتند که تنها در دو ایستگاه زاهدان و سبزوآر روند معنی‌داری مشاهده می‌شود. مساح بوانی و مرید (۱۳۸۵) اثرات تغییر اقلیم را بر جریان زاینده رود اصفهان مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که بارندگی کاهش و دما افزایش یافته است؛ در نتیجه، خروجی شبیه‌های رواناب- بارش کاهش جریان تا ۵/۸ درصد و افزایش تغییرات جریان را تا ۳ برابر برای دوره‌ی آتی نشان می‌دهند. بابائیان و همکاران (۱۳۸۸) در پژوهشی خروجی شبیه‌گردش عمومی جو ECHO-G با نمایشنامه‌ی A1 را در مقیاس شبکه‌ای ۲/۵ در ۲/۵ درجه‌ای جغرافیایی، برای سال‌های ۲۰۳۹-۲۰۱۰ در مورد ۴۳ ایستگاه سینوپتیک در کل کشور با کاربرد شبیه‌سازی LARS-WG کوچک مقیاس نمودند. نتایج این پژوهش حاکی از کاهش ۹ درصدی بارش و افزایش میانگین دمای کشور به اندازه ۰/۵ درجه می‌باشد. آذرانفر و همکاران (۱۳۸۵) در پژوهشی تغییرات بارش و دما را در دو دوره‌ی آماری ۲۰۵۰-۲۰۲۱ و ۲۰۱۰-۲۰۷۱ در حوضه‌ی آبخیز زاینده رود با استفاده از کوچک مقیاس نمایی آماری مورد بررسی قرار داده و اعلام کردند که دما بین ۲ تا ۵ درجه در دوره‌های آتی افزایش یافته و همچنین، افزایش بارش را در دسامبر و ژانویه و بارش سالانه پیش‌بینی کردند.

نکته‌ی دارای اهمیت در تمامی این پژوهش‌ها، استفاده از نتایج شبیه‌سازی و پیش‌بینی شبیه‌های گردش عمومی جو (GCM) به عنوان معتبرترین منبع ارایه‌ی نمایشنامه‌های اقلیمی است. شبیه‌های گردش عمومی جو می‌توانند بهترین داده‌ها را درباره‌ی پاسخ جو به افزایش تمرکز گازهای گلخانه‌ای فراهم کنند. این شبیه‌ها وابسته به زمان و دارای شبیه‌سازی‌های عددی سه بعدی شامل حرکات جوی، تبادلات گرمایی و اندرکنش‌های یخ،

¹-Third assessment Report

²-Greenland

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، منطقه‌ای از استان کرمان از ۵۴ درجه تا ۵۸ درجه طول شرقی و از ۲۹ درجه تا ۳۱ درجه عرض شمالی که منطبق با پیکسل وضوح نمایش شبیه‌های GCM مورد تأیید گزارش چهارم IPCC می‌باشد، به عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب گردید. فراسنج‌های جوی دما در منطقه‌ی کرمان از دو منبع استخراج شده‌اند. به عنوان نخستین منبع به بررسی داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک و اقلیم‌شناسی استان کرمان که در محدوده منطقه‌ی پژوهش قرار داشتند، پرداخته شد. با توجه به سال آماری پایه (۱۳۷۰-۱۳۴۵)، تنها ایستگاه سینوپتیک کرمان از این لحاظ دارای آمار مناسب بود. همچنین از میان ۲۰۵ ایستگاه باران‌سنجی و تبخیرسنجی وزارت نیرو تنها ۱۸ ایستگاه درون محدوده‌ی منطقه‌ی مطالعه قرار داشتند که دارای آمار مناسب در سال‌های آماری مورد نظر (پایه) بودند؛ به این دلیل، به عنوان دومین منبع تهیه آمار انتخاب شدند. داده‌های جوی ایستگاه سینوپتیک کرمان به صورت روزانه بوده که با توجه به نیاز طرح برای داده‌های دما از میانگین‌ماهانه دما (دماهای میانگین، بیشینه و کمینه) استفاده شد. آمار موجود برای ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی وزارت نیرو به صورت ماهانه تهیه شده است که به همان صورت مورد استفاده قرار گرفتند. پس از بررسی همگنی داده‌ها با کاربرد دو روش آزمون توالی و خود همبستگی مرتبه‌ی اول، تعیین دوره‌ی آماری مشترک، استخراج داده‌های پرت و بازسازی و تطویل سال‌های آماری، بمنظور بالا بردن دقت نتایج پژوهش، بر اساس روشی که هولمه و جونز (۱۹۹۶) ارائه نموده است، نسبت به محاسبه‌ی میانگین منطقه‌ای برای داده‌های دما در منطقه‌ی مطالعاتی اقدام شد. از این راه و با استفاده از معادله‌ی زیر مقادیر منطقه‌ای شده هر یک از فراسنج‌های دما برای هر یک از ماه‌های سال‌های آماری پایه، محاسبه و تعیین گردید (هولمه، ۱۹۹۶).

$$W_i = \frac{a_i}{A} * 100$$

Wi: ضریب وزنی تیسین ایستگاه i ام

اقیانوس و خشکی می‌باشند (آذرانفر و همکاران، ۱۳۸۵). این شبیه‌ها به وسیله‌ی موسسات پژوهشی در نقاط گوناگون دنیا تهیه شده و به رایج‌ی نمایشنامه‌های اقلیمی برای دوره‌های آتی می‌پردازند. با توجه به مطالب مربوط به عدم اطمینان نتایج این شبیه‌ها در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی که بتازگی در محافل علمی مطرح می‌باشد، پژوهش‌هایی نیز در خصوص بررسی کیفیت عملکرد این شبیه در کشورهای گوناگون صورت پذیرفته است. راماراج و همکاران (۲۰۰۹) نتایج شبیه‌سازی شبیه PRECIS را در مورد داده‌های بارش و دماهای بیشینه و کمینه در استان Tamil Nadu هندوستان مورد بررسی قرار دادند. این شبیه، داده‌ها را بر اساس خروجی شبیه گردش عمومی جو HadCM3Q شبیه‌سازی می‌کند. در پژوهش مزبور با محاسبه‌ی شاخص آماری RMSE مشخص گردید که این شبیه داده‌های دمای بیشینه را بهتر از دمای کمینه شبیه‌سازی کرده است. میرنز و همکاران (۱۹۹۵) در پژوهشی که به منظور مقایسه بین نتایج run control شبیه‌های جوی منطقه‌ای (RegCM) و داده‌های مشاهداتی انجام شده است، نشان دادند که دوره‌های زمانی دما در run control بسیار کوتاه و تغییرات روزانه‌ی دما نیز کم‌تر پیش بینی شده است. همچنین، میانگین دمای روزانه به خوبی بازسازی شده است. در پژوهشی دیگر قربانی و همکاران (۱۳۸۷) عملکرد شبیه‌های GCM را در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی در بندرانزلی مورد بررسی و صحت‌سنجی قرار داده و نتیجه‌گیری کردند که به دلیل اختلاف زیاد بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک بندر انزلی بر اساس شاخص‌های آماری، عملاً این شبیه‌ها کارایی لازم را برای شبیه‌سازی داده‌های بارندگی در این منطقه ندارند. در حالی که این شبیه‌ها داده‌های میانگین دما سالانه را برای این ایستگاه به خوبی شبیه‌سازی نموده‌اند.

در این پژوهش، عدم اطمینان ناشی از کاربرد شبیه‌های گردش عمومی جو (GCM) را در دوره‌ی پایه برای منطقه‌ی کرمان بررسی نموده و در نهایت چند شبیه برتر و کارا تر را معرفی کرده‌ایم.

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n Q_i}$$

$$ME = \max |P_i - Q_i|_{i=1}^n$$

در این معادلات P_i مقادیر شبیه سازی شده، Q_i مقادیر مشاهداتی، n تعداد سال‌های آماری مورد مطالعه و علامت «-» در بالای Q نشانگر مقدار میانگین داده‌های مشاهداتی می‌باشند.

کمترین مقدار ME ، $RMSE$ و CD صفر است. بیشترین مقدار EF برابر یک می‌باشد. CRM و EF می‌توانند مقادیر منفی نیز داشته باشند؛ مقدار زیاد ME نشانگر بدترین حالت کارکرد شبیه است در حالی که $RMSE$ نشان می‌دهد که برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد شبیه در مقایسه با داده‌های مشاهداتی چقدر است. شاخص CD نسبت پراکندگی را بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نشان می‌دهد. مقدار شاخص EF مقادیر شبیه سازی شده را با میانگین مشاهداتی مقایسه می‌کند. مقادیر منفی EF بیانگر عملکرد نامناسب شبیه می‌باشد. شاخص CRM نشانگر تمایل شبیه برای برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد در مقایسه با مقادیر مشاهداتی است. در بهترین حالت، مقادیر عددی CRM ، ME ، $RMSE$ نزدیک به صفر و مقدار CD و EF نیز نزدیک به عدد ۱ خواهد بود (همایی و همکاران، ۲۰۰۲؛ فتحی و همکاران، ۱۳۸۸؛ پارسى نژاد و همکاران، ۱۳۸۸؛ قربانی و مساح بوانی، ۱۳۸۷).

نتایج

در این پژوهش بمنظور بررسی عملکرد شبیه‌های GCM ، مقادیر آماره‌های تحلیل خطا که تشریح شدند، محاسبه و نتایج مورد ارزیابی قرا گرفتند. بمنظور این ارزیابی از داده‌های ماهانه‌ی دما برای سال‌های دوره‌ی آماری پایه در داده‌های مشاهداتی و شبیه، استفاده شده است.

i : مساحت تحت پوشش ایستگاه i ام در شبکه‌ی

تیسن

A : مساحت کل منطقه

$$T_R = \sum_{i=1}^N W_i T_{ik}$$

T_R : میانگین منطقه ای دما ($^{\circ}C$)

T_{ik} : دمای ایستگاه i ام در سال k ($^{\circ}C$)

بمنظور ارزیابی عملکرد شبیه‌های GCM در این پژوهش نتایج شبیه سازی شبیه‌ها با داده های مشاهداتی منطقه ای شده دما (بیشینه، کمینه و میانگین) در منطقه‌ی کرمان مورد مقایسه قرار گرفتند. به این منظور، از تحلیل خطاهای باقی‌مانده (اختلاف بین مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده) استفاده شده است. در این مقایسه از داده‌های ماهانه برای سال‌های دوره‌ی آماری نظیر به نظیر استفاده شده است. آماره‌های بسیاری برای ارزیابی عملکرد شبیه‌ها وجود دارند (همایی و همکاران، ۲۰۰۲؛ فتحی و همکاران، ۱۳۸۸؛ پارسى نژاد و همکاران، ۱۳۸۸؛ قربانی و مساح بوانی، ۱۳۸۷) که در این پژوهش از شاخص‌های آماری مجذور میانگین مربعات خطا^۱ ($RMSE$)، حداکثر خطا^۲ (ME)، ضریب تبیین^۳ (CD)، کارایی شبیه‌سازی^۴ (EF) و ضریب مجموع باقی‌مانده^۵ (CRM) استفاده شده است.

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{n} \right]^{1/2}$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

¹ - Root mean square error

² - Maximum error

³ - Coefficient of determination

⁴ - Modeling efficiency

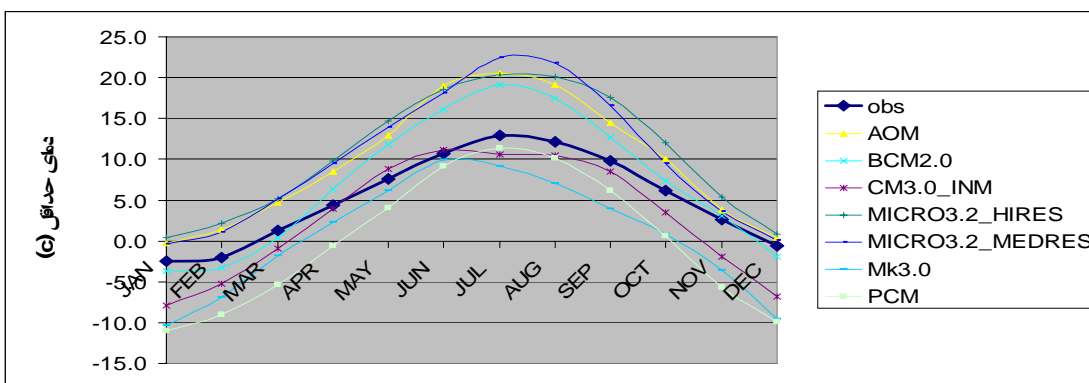
⁵ - Coefficient of residual mass

مقایسه‌ی کمی داده‌های دمای کمینه از میان شبیه‌هایی که داده‌های شبیه‌سازی شده دمای کمینه را ارائه نموده‌اند، شبیه‌های BCM2.0-MICRO3.2_HIRES-Mk3.0 کم‌ترین مقدار شاخص ME را دارا بودند. شاخص RMSE در شبیه‌های BCM2.0-CM3.0_INM-AOM دارای کم‌ترین مقدار نسبت به دیگر شبیه‌ها بود. شاخص CD در شبیه‌های CM3.0_INM-BCM2.0-Mk3.0 مناسب‌ترین مقدار را دارا می‌باشد و این نشان‌دهنده‌ی پراکندگی کم‌تر داده‌های شبیه‌سازی شده نسبت به داده‌های مشاهداتی در شبیه‌های یاد شده است. بررسی شاخص EF نشان داد که شبیه‌های

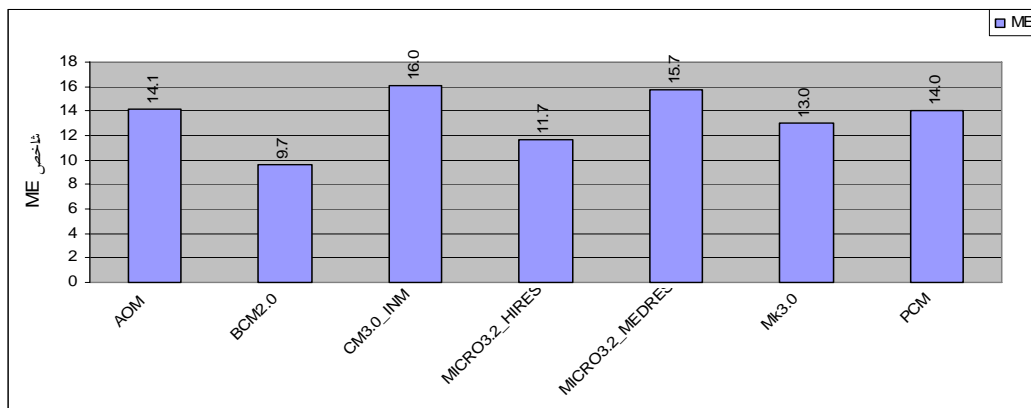
شبیه‌ها از کارایی بالاتری برخوردار بودند. بررسی شاخص CRM در شبیه‌ها نشان داد که شبیه‌های BCM2.0-CM3.0_INM برآوردی نزدیک‌تر را نسبت به داده‌های مشاهداتی ارائه نموده‌اند. با وجود این شبیه BCM2.0 برآوردی کم‌تر و شبیه CM3.0_INM برآوردی بیش‌تر را در شبیه‌سازی داده‌های دمای کمینه داشتند. در جدول ۱ نتایج محاسبه شاخص‌های آماری برای فراسنج دمای کمینه ارائه شده‌اند. شکل‌های ۱ تا ۶ نتایج این مقایسه‌های کمی را بین شاخص‌های یاد شده ارائه می‌کنند.

جدول ۱- مقادیر شاخص‌های آماری تحلیل خطا برای داده‌های دمای کمینه در شبیه‌های GCM

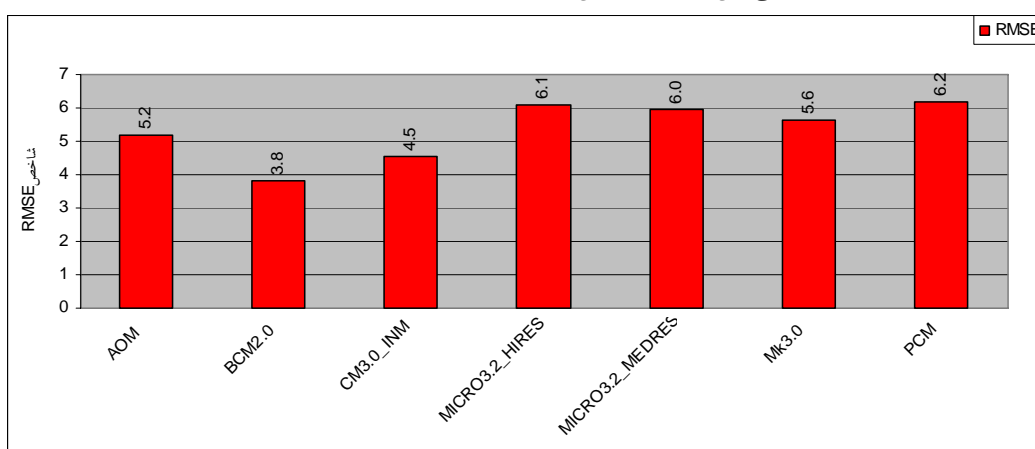
MODEL	ME	RMSE	CD	EF	CRM	R ²
AOM	14/13	5/20	2/53	0/07	-0/83	0/89
BCM2.0	9/67	3/81	2/35	0/50	-0/37	0/92
CM3.0_INM	16/04	4/53	2/12	0/30	0/46	0/75
MICRO3.2_HIRES	11/72	6/07	2/89	-0/27	-1/03	0/91
MICRO3.2_MEDRES	15/73	5/97	3/08	-0/22	-0/94	0/91
Mk3.0	12/98	5/63	2/41	-0/09	0/89	0/80
PCM	14/02	6/20	3/12	-0/32	1/00	0/89



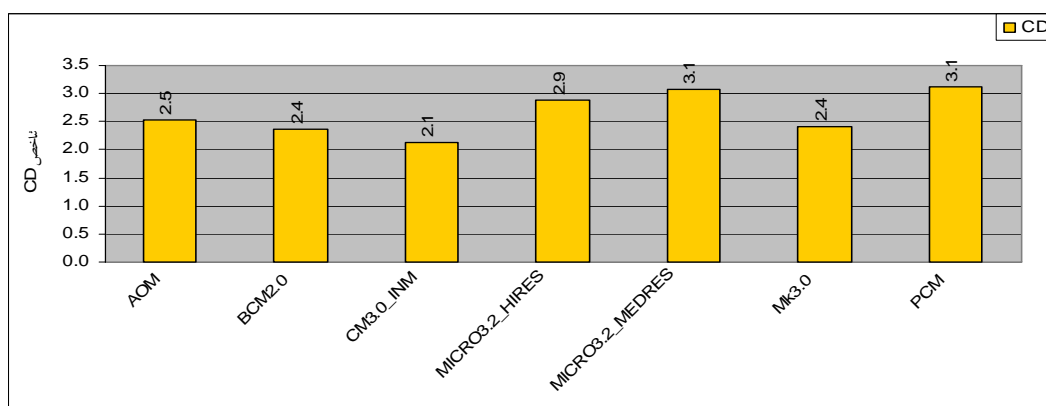
شکل ۱- مقایسه‌ی کیفی نتایج شبیه‌سازی داده‌ی دماهای کمینه شبیه‌های GCM با داده‌های مشاهداتی.



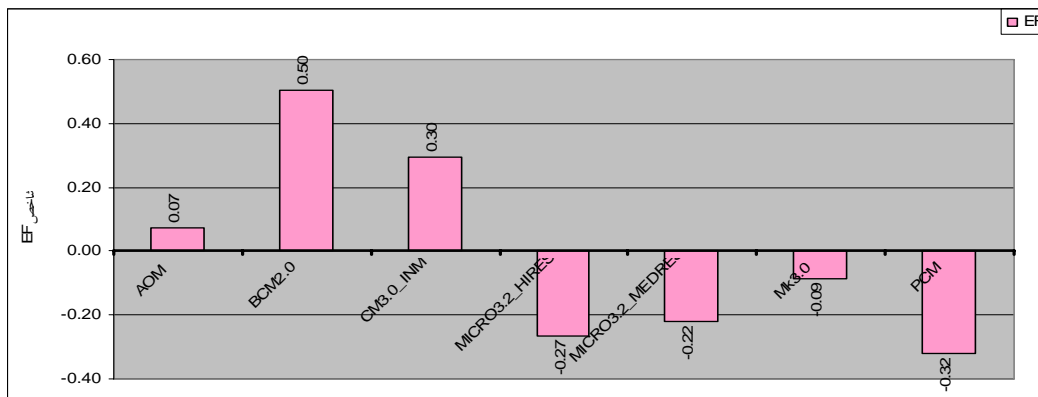
شکل ۲- مقایسه کمی بین مقادیر شاخص ME در شبیه‌های GCM برای داده‌های دمای کمینه.



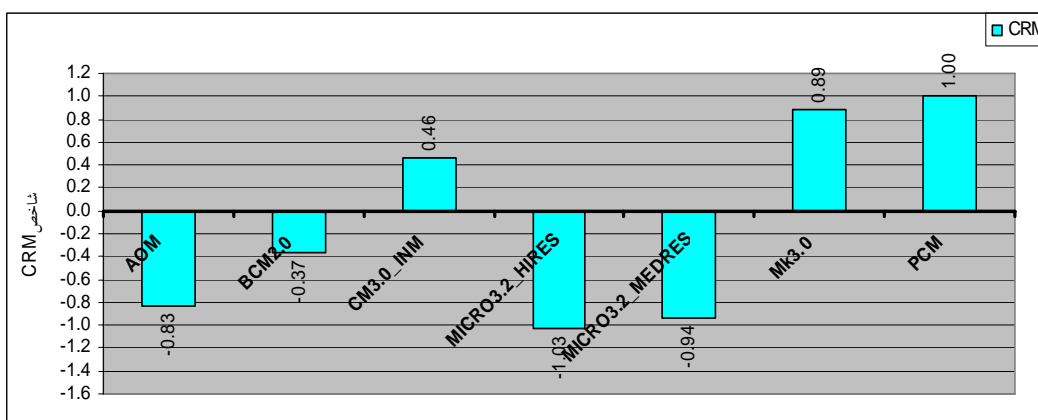
شکل ۳- مقایسه کمی بین مقادیر شاخص RMSE در شبیه‌های GCM برای داده‌های دمای کمینه.



شکل ۴- مقایسه کمی بین مقادیر شاخص CD در شبیه‌های GCM برای داده‌های دمای کمینه.



شکل ۵- مقایسه‌ی کمی بین مقادیر شاخص EF در شبیه‌های GCM برای داده‌های دمای کمینه.



شکل ۶- مقایسه‌ی کمی بین مقادیر شاخص CRM در شبیه‌های GCM برای داده‌های دمای کمینه.

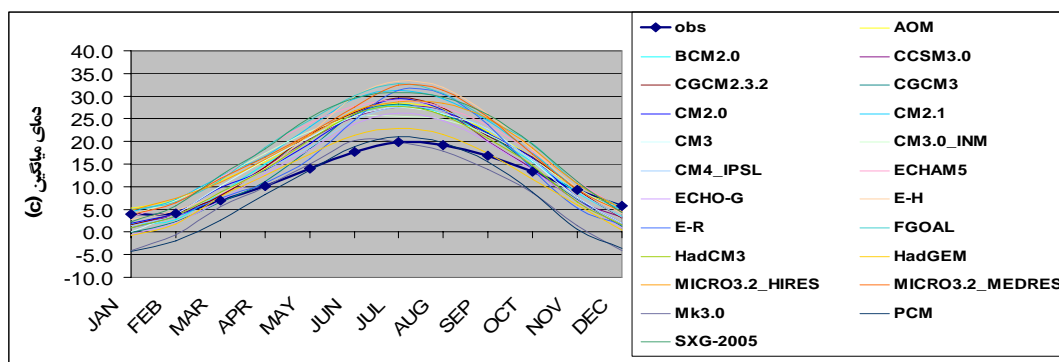
در شبیه‌های HadGEM-ECHO_G-CM3.0_INM مقادیری بزرگ‌تر را به خود اختصاص داده است که این نمایان‌گر کارایی بالاتر این شبیه‌ها در شبیه‌سازی داده‌های دمای میانگین در منطقه‌ی کرمان است. بررسی شاخص CRM نشان داد که شبیه‌های HadGEM-ECHO_G-Mk3.0 بهترین برآورد را در مقایسه با دیگر شبیه‌ها ارائه کرده‌اند. همچنین، مشاهده شد که بیش‌تر شبیه‌ها تمایل به برآوردی بیش‌تر نسبت به داده‌های مشاهداتی داشتند. در جدول ۲ نتایج محاسبه‌ی شاخص‌های آماری برای فراسنج دمای میانگین ارائه شده است. شکل‌های ۷ تا ۱۲ نتایج این مقایسه‌های کمی را بین شاخص‌های آماری بالا ارائه می‌نمایند.

مقایسه‌ی کمی داده‌های دمای میانگین

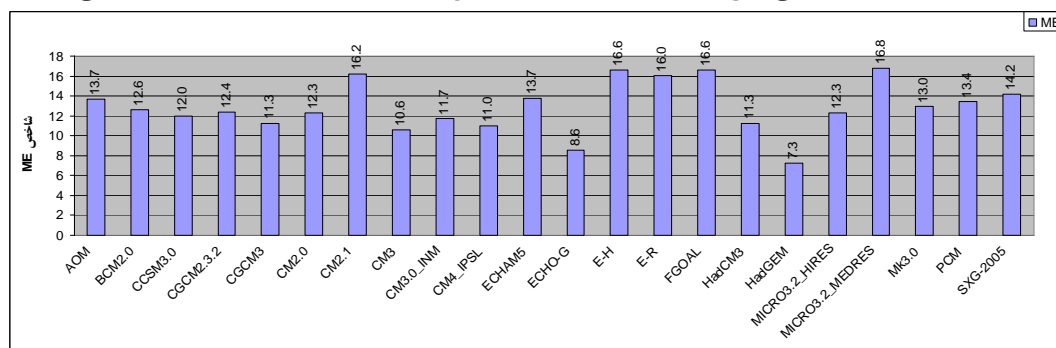
در ارزیابی کمی شاخص ME ملاحظه گردید که شبیه‌های HadGEM-ECHO_G-CM3 کم‌ترین مقدار خطای بیشینه را ارائه داده‌اند. شاخص RMSE در شبیه‌های HadGEM-ECHO_G-CM4_IPSL کم‌تر از دیگر شبیه‌ها دیده شد که این نشان دهنده‌ی نزدیکی داده‌های شبیه‌سازی شده به داده‌های مشاهداتی در شبیه‌های یاد شده بود. شاخص CD در داده‌های دمای میانگین برای شبیه‌های HadGEM-CM3.0_INM- Mk3.0 دارای مقداری مناسب‌تر نسبت به دیگران بود. با این حال، این شاخص در این شبیه‌ها بزرگ‌تر از عدد ۱ بوده که نشانگر پراکنش بیش‌تر داده‌های شبیه نسبت به داده‌های مشاهداتی از مقدار میانگین است. شاخص EF

جدول ۲- مقادیر شاخص‌های آماری تحلیل خطا برای داده‌های دمای میانگین در شبیه‌های GCM.

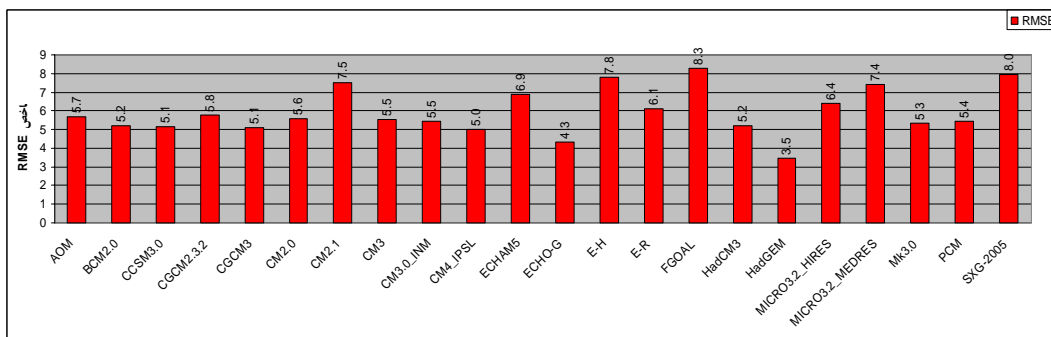
MODEL	RMSE	ME	CD	EF	CRM	R ²
AOM	5/69	13/67	2/79	0/00	-0/38	0/902
BCM2.0	5/21	12/59	2/99	0/16	-0/26	0/919
CCSM3.0	5/13	12/00	2/91	0/19	-0/22	0/887
CGCM2.3.2	5/79	12/41	3/31	-0/04	-0/30	0/914
CGCM3	5/11	11/28	3/21	0/19	-0/15	0/932
CM2.0	5/60	12/31	3/19	0/03	-0/27	0/9
CM2.1	7/49	16/20	3/94	-0/73	-0/49	0/88
CM3	5/52	10/59	3/12	0/06	-0/26	0/89
CM3.0_INM	5/46	11/73	2/54	0/08	-0/35	0/844
CM4_IPSL	5/00	11/03	2/89	0/23	-0/25	0/925
ECHAM5	6/87	13/74	3/46	-0/46	-0/46	0/886
ECHO-G	4/34	8/59	2/73	0/42	-0/10	0/923
E-H	7/78	16/59	4/59	-0/87	-0/45	0/93
E-R	6/10	16/03	3/73	-0/15	-0/20	0/9
FGOAL	8/27	16/59	4/46	-1/11	-0/56	0/9
HadCM3	5/18	11/25	3/03	0/17	-0/21	0/9
HadGEM	3/48	7/26	2/14	0/63	0/01	0/894
MICRO3.2_HIRES	6/41	12/28	3/24	-0/27	-0/44	0/921
MICRO3.2_MEDRES	7/40	16/75	4/04	-0/69	-0/47	0/91
Mk3.0	5/32	12/99	2/67	0/13	0/27	0/827
PCM	5/43	13/44	2/97	0/09	0/30	0/903
SXG-2005	7/96	14/21	4/36	-0/96	-0/52	0/905



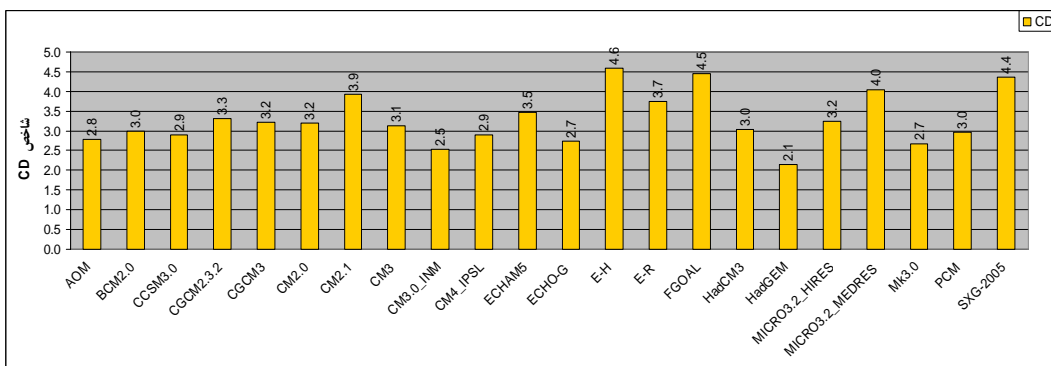
شکل ۷- مقایسه‌ی کیفی نتایج شبیه‌سازی داده‌های میانگین شبیه‌های GCM با داده‌های مشاهده‌ای.



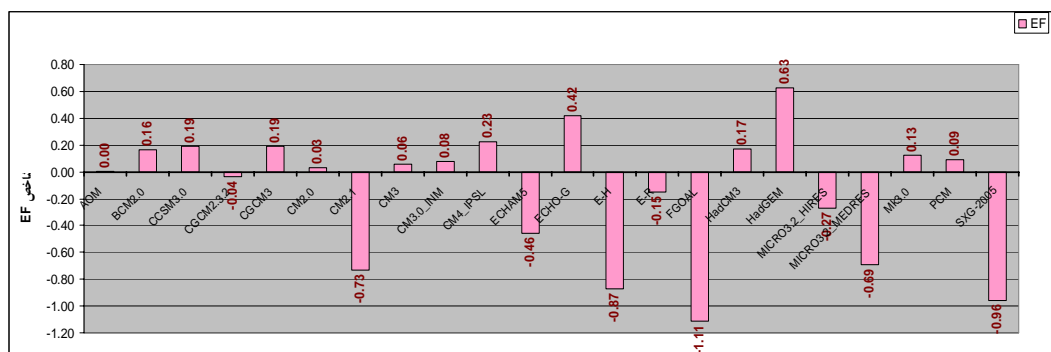
شکل ۸- مقایسه‌ی کمی بین مقادیر شاخص ME در شبیه‌های GCM برای داده‌های دمای میانگین.



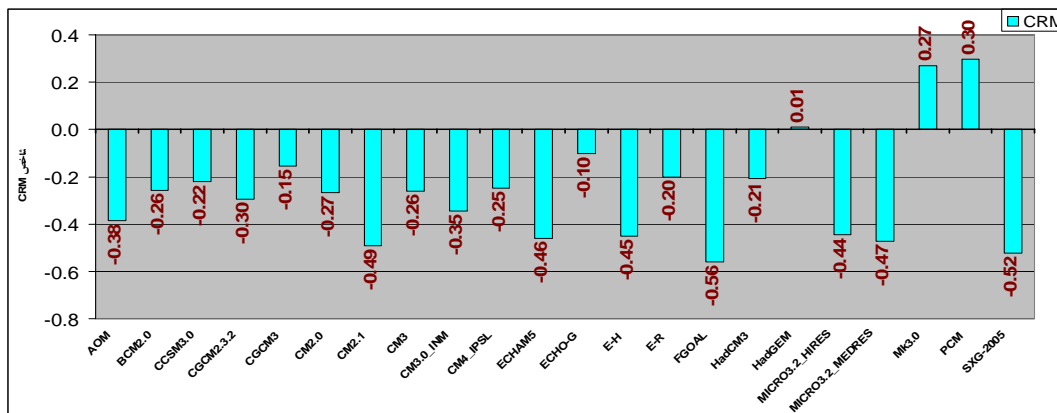
شکل ۹- مقایسه‌ی کمی بین مقادیر شاخص RMSE در شبیه‌های GCM برای داده‌های دمای میانگین.



شکل ۱۰- مقایسه‌ی کمی بین مقادیر شاخص CD در شبیه‌های GCM برای داده‌های دمای میانگین.



شکل ۱۱- مقایسه‌ی کمی بین مقادیر شاخص EF در شبیه‌های GCM برای داده‌های دمای میانگین.



شکل ۱۲- مقایسه کمی بین مقادیر شاخص CRM در شبیه‌های GCM برای داده‌های دمای میانگین.

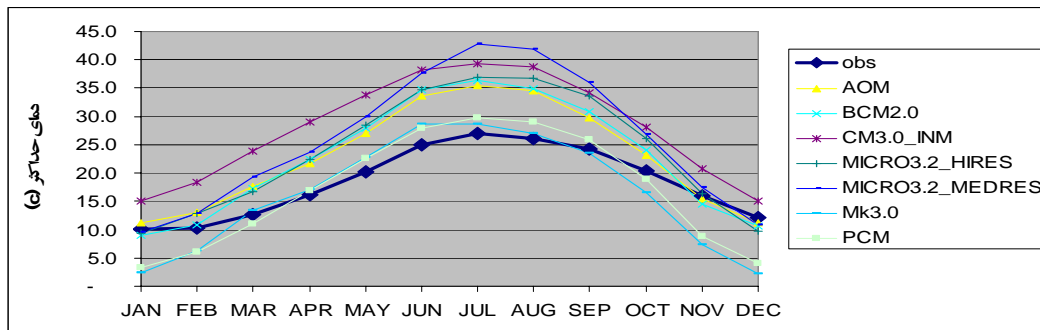
نسبت به دیگر شبیه‌ها بود. شاخص CRM در شبیه‌های PCM-BCM2.0-Mk3.0 دارای مقادیر نزدیک‌تر به عدد صفر بود. این نمایانگر نزدیک‌تر بودن نتایج این شبیه‌ها به داده‌های مشاهداتی است و مقدار عددی این شاخص نشان می‌دهد که شبیه‌های PCM و Mk3.0 تمایل به برآورد بیشتر و شبیه BCM2.0 تمایل به برآورد کمتر داده‌های دمای بیشینه در منطقه‌ی کرمان دارند. در جدول ۳ نتایج محاسبه‌ی شاخص‌های آماری برای فراسنج دمای بیشینه ارائه شده است. شکل‌های ۱۳ تا ۱۸ نتایج این مقایسه‌های کمی را بین شاخص‌های آماری یاد شده ارائه می‌نمایند.

مقایسه کمی داده‌های دمای بیشینه

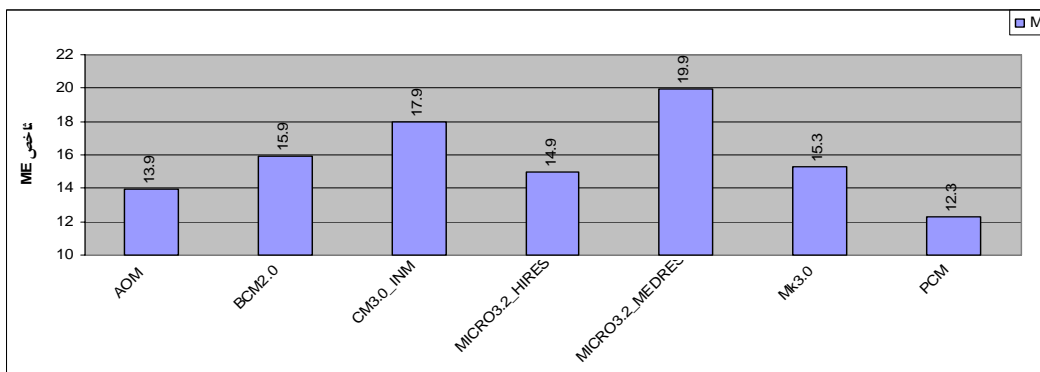
ارزیابی شاخص ME برای داده‌های دمای بیشینه شبیه‌سازی شده شبیه‌های مذکور نشان داد که شبیه‌های PCM-AOM-MICRO3.2_HIRES کم‌ترین خطای بیشینه را دارا هستند. شاخص RMSE در شبیه‌های PCM-Mk3.0-AOM کم‌ترین مقدار را دارا بود. شبیه‌های PCM-Mk3.0-AOM در ارزیابی شاخص CD دارای مناسب‌ترین مقدار بین دیگر شبیه‌ها بودند. شاخص EF که نشان دهنده‌ی کارایی شبیه‌ها در شبیه‌سازی داده‌های دمای بیشینه است، در شبیه‌های PCM-Mk3.0-AOM دارای مقادیر قابل قبول‌تری

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های آماری تحلیل خطا برای داده‌های دمای بیشینه در شبیه‌های GCM.

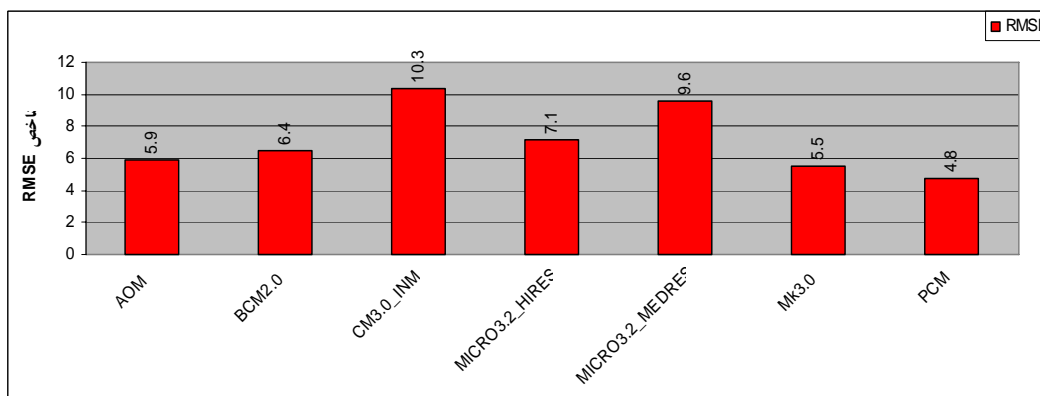
MODEL	RMSE	ME	CD	EF	CRM	R ²
AOM	5/89	13/95	2/60	0/10	-0/24	0/87
BCM2.0	6/45	15/95	3/08	-0/08	-0/24	0/87
CM3.0_INM	10/33	17/95	4/39	-1/78	-0/52	0/84
MICRO3.2_HIRES	7/13	14/95	3/43	-0/32	-0/29	0/89
MICRO3.2_MEDRES	9/61	19/95	4/94	-1/41	-0/40	0/89
Mk3.0	5/48	15/28	2/58	0/22	0/11	0/79
PCM	4/76	12/25	2/55	0/41	0/07	0/87



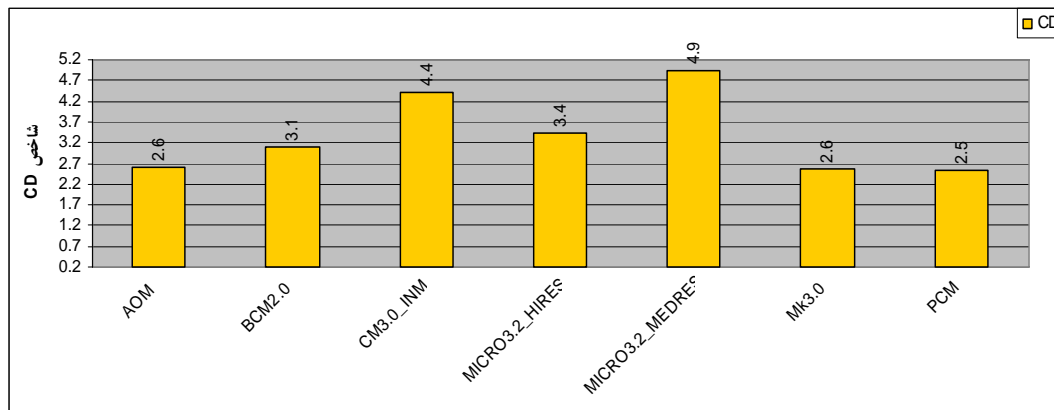
شکل ۱۳- مقایسه‌ی کیفی نتایج شبیه‌سازی داده دمای بیشینه‌ی شبیه‌های GCM با داده‌های مشاهده‌ای.



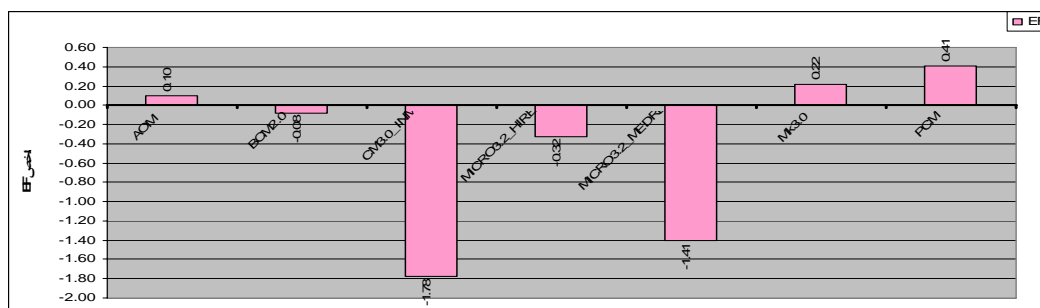
شکل ۱۴- مقایسه‌ی کمی بین مقادیر شاخص ME در شبیه‌های GCM برای داده‌های دمای بیشینه.



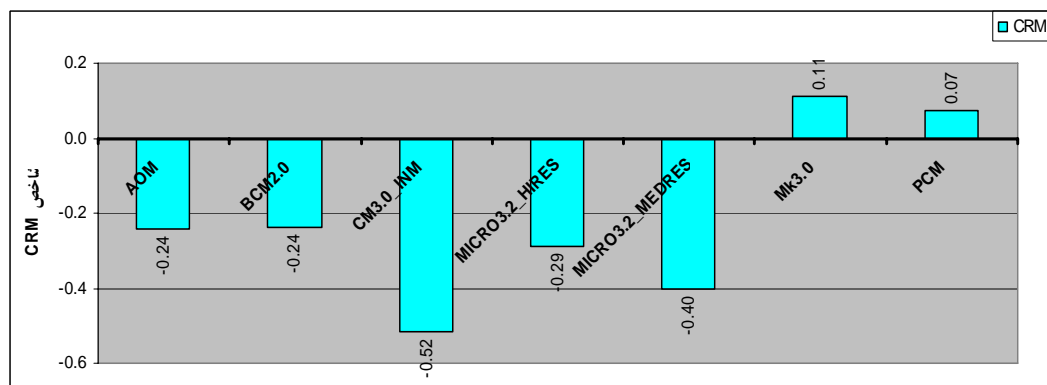
شکل ۱۵- مقایسه‌ی کمی بین مقادیر شاخص RMSE در شبیه‌های GCM برای داده‌های دمای بیشینه.



شکل ۱۶- مقایسه کمی بین مقادیر شاخص CD در شبیه‌های GCM برای داده‌های دمای بیشینه.



شکل ۱۷- مقایسه کمی بین مقادیر شاخص EF در شبیه‌های GCM برای داده‌های دمای بیشینه.



شکل ۱۸- مقایسه کمی بین مقادیر شاخص CRM در شبیه‌های GCM برای داده‌های دمای بیشینه.

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های آماری تحلیل خطا برای داده‌های دمای بیشینه در شبیه‌های GCM.

MODEL	RMSE	ME	CD	EF	CRM	R ²
AOM	5/89	13/95	2/60	0/10	-0/24	0/87
BCM2.0	6/45	15/95	3/08	-0/08	-0/24	0/87
CM3.0_INM	10/33	17/95	4/39	-1/78	-0/52	0/84
MICRO3.2_HIRES	7/13	14/95	3/43	-0/32	-0/29	0/89
MICRO3.2_MEDRES	9/61	19/95	4/94	-1/41	-0/40	0/89
Mk3.0	5/48	15/28	2/58	0/22	0/11	0/79
PCM	4/76	12/25	2/55	0/41	0/07	0/87

نتیجه‌گیری و بحث

در این پژوهش در منطقه‌ی کرمان دیده شد که شبیه‌های GCM، داده‌های دمای بیشینه را بهتر از دمای کمینه شبیه‌سازی کرده‌اند، در حالی که راماراج و همکاران (۲۰۰۹)، در پژوهشی که در استان Tamil Nadu کشور هندوستان انجام دادند، نتایج خروجی شبیه HadCM3Q را مورد ارزیابی قرار دادند و عنوان نمودند که این شبیه‌ها داده‌های دمای بیشینه را بهتر از دمای کمینه شبیه‌سازی کرده‌اند.

جنبه‌ی دیگری که در این پژوهش مشخص گردید، ناکارایی مشابه در پیش‌بینی داده‌های جوی در شبیه‌های گوناگون بود. این بدان معنی است که هر یک از این شبیه‌ها در مقایسه با دیگر شبیه‌های ارایه شده، در شبیه‌سازی یکی از فراسنج‌های جوی توانا بوده و این توانایی نمی‌تواند برای دیگر فراسنج‌های جوی نیز در آن شبیه صادق باشد. به گونه‌ای که برای مثال، شبیه‌های BCM2.0، CM3.0_INM و MICRO3.2_MEDRES در شبیه‌سازی داده‌های کمینه از کارایی بیش‌تری نسبت به داده‌های بیشینه‌ی دما برخوردار بوده‌اند.

در این پژوهش بر اساس ارزیابی‌های انجام گرفته بر پایه‌ی نتایج محاسبات شاخص‌های آماری تحلیل خطا، شبیه‌های BCM2.0-CM3.0_INM-AOM در شبیه‌سازی داده‌های دمای کمینه‌ی ماهانه، شبیه‌های HadGEM-ECHO_G-Mk3.0 داده‌های دمای میانگین و شبیه‌های PCM-Mk3.0-AOM در شبیه‌سازی داده‌های دمای بیشینه در منطقه‌ی کرمان دارای بهترین عملکرد می‌باشند.

آنچه را در این پژوهش به عنوان نتیجه بدان اشاره شده است، باید در کنار مباحث مربوط به عدم اطمینان و عدم قطعیت نتایج شبیه‌ها دانست. این عدم اطمینان از منابع گوناگون حادث می‌گردد. نبود داده‌ها و آمار دقیق جوی برای دوره‌های گذشته در بسیاری از مناطق، ایستگاهها و کشورها می‌تواند در مراحل واسنجی این شبیه‌ها باعث ایجاد نبودن قطعیت و عدم اطمینان در نتایج شبیه‌ها شود. تفاوت در ساختار و مراحل فراسنجی پدیده‌های جوی در این شبیه‌ها، یکی دیگر از دلایل ایجاد عدم اطمینان در نتایج آن‌ها می‌باشد. عدم قطعیت در شبیه‌سازی مراحل تشکیل ابر و واکنش آن به تغییرات اقلیمی یکی از نتایج این تفاوت در مراحل فراسنجی کردن است. از موارد مورد توجه در فرآیندهای شبیه‌سازی، بُعد زمان در حل معادله‌های فیزیکی است. کم‌ترین مقیاس زمانی برای حل این معادلات در شبیه‌های GCM ۳۰ دقیقه می‌باشد، در حالی که فرآیندهای فیزیکی بسیاری نظیر فرآیندهای مربوط به ابرها و اقیانوس‌ها، در مقیاس‌های زمانی کم‌تر رخ می‌دهند که نمی‌توانند به گونه‌ی صحیح، به صورت شبیه درآمده و در نتیجه، شبیه‌سازی پدیده‌های جوی نیز از دقت بالایی برخوردار نخواهد بود. اختلاف و عدم تطابق میان پستی و بلندی واقعی منطقه با آنچه شبیه در مراحل شبیه‌سازی در نظر گرفته است- که با توجه به کمی دقت شبیه‌ها معمولاً دارای سطوح مستوی و هموارتری می‌باشد- خود در اعتدال نتایج خروجی شبیه‌ها بسیار مؤثر بوده و دلیلی دیگر بر این عدم اعتماد به داده‌های بارش و دماست. در نهایت، عدم قطعیت در به تحقق درآوردن هر یک از نمایشنامه‌های غیر اقلیمی و حدوث شرایط آینده نیز از

داده های اقلیمی بندر انزلی. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران.

۶- مساح بوانی، ع و س. مرید. ۱۳۸۵. اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده رود اصفهان. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۹(۴): ۱۷-۲۷.

7- Alison, L. K., G. L. Richard., and S. R. Nicholas. 2004. RCM rainfall for UK flood frequency estimation. II. Climate change results. *J. Hydrol.* 318: 163-172.

8- Homaei, M., C. Dirksen., and R. A. Feddes. 2002. Simulation of root water uptake I. non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction function. *Agric. Water Manage.* 57: 89-109.

9- Hulme, M., and P. D. Jones. 1996. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: METHODS AND ILLUSTRATION. *Int. J. Climatol.* 16: 361-377.

10- Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and M. Miller. 2007. Summary for policymakers: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, 1-18.

11- Katz, R. W., and B. G. Brown. 1992. Extreme events in a changing climate—variability is more important than averages. *Climatic Change.* 21: 289–302.

12- Mearns, L. O., F. Giorgi., L. McDaniel., and C. Shields. 1995. Analysis of variability and diurnal range of daily temperature in a nested regional climate model comparison with observations and doubled CO₂ results. *Clim. Dynam* 11: 193–209.

13- Modarres, R., and V. P. Rodriguez da silva. 2007. Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. *J. Arid Environ.* 70: 344-355.

14- Ramaraj, A. P., R. Jagannathan., and G. A. Dheebakaran. 2009. ISPRS Ahmedabad 2009 Workshop: Impact of Climate Change on Agriculture.

دیگر مباحث عدم اطمینان در نتایج این شبیه‌ها بشمار می‌آید.

نتیجه گیری

در این پژوهش مشخص گردید که بین نتایج شبیه‌های GCM تفاوت‌هایی وجود داشته که باعث عدم قطعیت در این نتایج بوده، کاربردی آن‌ها را دچار تردید می‌نماید. از این رو، لازم است در طرح‌های پژوهشی و کاربردی که در منطقه‌ی کرمان و یا دیگر مناطق کشور صورت می‌پذیرد، بمنظور بررسی وضعیت اقلیم آینده و به تبع آن برنامه ریزی‌های مدیریتی منابع آب این عدم اطمینان و عدم قطعیت لحاظ گردیده و با بررسی شبیه‌ها، بهترین آن‌ها را برای هر منطقه معرفی کرده و مورد استفاده قرار داد.

منابع

۱- آذرانفر، آ.، ا. ابریشم چی و م. تجربی. ۱۳۸۵. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر بارش و دما در حوضه آبریز زاینده رود با استفاده از خروجی شبیه‌های چرخش عمومی. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران.

۲- بابائیان، ا.، ز. نجفی نیک، ف. زابل عباسی، م. حبیبی نوخندان، ح. ادب و ش. ملبوسی. ۱۳۸۸. ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره‌ی آماری ۳۰۳۹-۲۰۱۰ میلادی با استفاده از ریز مقیاس نمایی داده‌های شبیه‌گردش عمومی جو ECHO_G. جغرافیا و توسعه. ۱۶: ۱۳۵-۱۵۲.

۳- پارسی نژاد، م. ه. رضانی، ب. نظری و ع. توکلی. ۱۳۸۸. ارزیابی شبیه CROPWAT در مدیریت کم آبیاری گندم و جو در منطقه کرج. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۳(۱): ۱۱۹-۱۲۹.

۴- فتحی، پ. ی. محمدی و م. همایی. ۱۳۸۸. شبیه‌سازی هوشمند سری زمانی آورد ماهانه ورودی به سد وحدت سندنجد. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۳(۱): ۲۰۹-۲۲۰.

۵- قربانی واقعی، ح. ع. مساح بوانی و ح. بهرامی. ۱۳۸۷. ارزیابی عملکرد شبیه‌های AOGCM در شبیه‌سازی