

مقاله پژوهشی

## ارزیابی مدل‌های گردش عمومی و رتبه‌بندی آن‌ها به منظور شبیه‌سازی هیدرولوژیک

مونا احمدیان<sup>۱</sup>، مجید منتصری<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۵/۱۹

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۱۸

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.montaseri@urmia.ac.ir

### چکیده

در طی دهه‌های اخیر بیش از ۴۰ مدل گردش عمومی جو<sup>۱</sup> در مراکز علمی دنیا برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی اقلیم جهان توسعه یافته است. این مدل‌ها براساس شرایط اولیه و مرزی، متغیرهای مورد استفاده آب و هوا و ساختار متفاوت می‌باشند. لذا برای استفاده از این مدل‌ها برای پیش‌بینی آب و هوای آینده در هر منطقه، ارزیابی نظام‌مند عملکرد مدل‌های مذکور در شبیه‌سازی سری زمانی پارامترهای اقلیمی تاریخی مانند دما و بارندگی روزانه، ماهیانه و سالیانه الزامی خواهد بود. بدین منظور در این مطالعه یک روش نوآورانه نظام‌مند برای ارزیابی عملکرد ۳۶ مدل گردش عمومی جو از گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم<sup>۲</sup> در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه‌های البرز انجام پذیرفته است. براساس نتایج، به‌کارگیری روش نوآورانه دارای دقت غیرقابل مقایسه‌ای در انتخاب درست مدل گردش عمومی در هر منطقه خواهد بود. همچنین نتایج بیانگر دقت نامناسب اکثر مدل‌ها در شبیه‌سازی دما و به‌ویژه بارندگی تاریخی در منطقه مطالعاتی (همانند سایر مطالعات معتبر در دنیا) بوده و حتی در مدل‌های برتر محدوده مطالعاتی نیز شبیه‌سازی بارندگی ماهیانه تاریخی مناسب نبوده است. در نهایت براساس پنج شاخص آماری ضریب نش<sup>۳</sup>، اریب<sup>۴</sup>، تبیین<sup>۵</sup>، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۶</sup> و متوسط خطای مطلق<sup>۷</sup>، مدل‌های ACCESS1.0 و GFDL-CM3 با اولویت بالاتر و دو مدل CNRM-CM5 و GFDL-ESM2G در اولویت بعدی برای بررسی تغییر اقلیم و پیش‌بینی متغیرهای دما و بارندگی سال‌های آینده در محدوده مطالعاتی رتبه‌بندی و پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، رتبه‌بندی، شاخص‌های آماری، مدل‌های گردش عمومی جو، CMIP5<sup>۷</sup>

<sup>1</sup> Global climate/circulation models (GCMs)

<sup>2</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change

<sup>3</sup> Nash-Sutcliffe efficiency coefficient

<sup>4</sup> Bias

<sup>5</sup> Root mean square error

<sup>6</sup> Mean absolute error

<sup>7</sup> Coupled Model Intercomparison Project Phase 5

## Evaluating Global Climate Models and Ranking them for Hydrological Simulation

M Ahmadian<sup>1</sup>, M Montaseri<sup>2</sup>

Received: 2019-08-10

Accepted: 2021-01-07

<sup>1</sup> PhD student of Water Resources Eng., Dept. of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

<sup>2</sup> Prof., Dept. of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

\* Corresponding Author, Email: m.montaseri@urmia.ac.ir

### Abstract

Over the past decades, more than 40 global climate models have been developed in scientific centers around the world to simulate and predict the world climate change. These models are different depending on the initial and boundary conditions, the variables used in the climate, and the structure. Therefore, to use these models to predict future climate in each region, systematically evaluation performance of these models in simulating the time series of observed climatic parameters such as daily, monthly and annually temperature and precipitation will be required. In this study, an innovative systematic approach was performed for evaluating the performance of 36 global climate models from the Fifth Intergovernmental Panel on Climate Change report on the southern slopes of Alborz Mountains. Based on the results, applying the innovative method will have incomparable accuracy in the right choice of general circulation model in each region. The results also indicate the inappropriate accuracy of most models in simulating temperature and especially historical precipitation in the study area (as in other valid studies in the world); even in the top models of the study area, the historical monthly precipitation simulation was not appropriate. Finally based on five statistical properties of Nash–Sutcliffe, bias, correlation, root mean square error and mean absolute error, ACCESS1.0 and GFDL-CM3 models with higher priority and CNRM-CM5 and GFDL-ESM2G models are proposed in the next priority for climate change studies and future temperature and precipitation values prediction.

**Keywords:** Climate change, CMIP5, Global climate models, Ranking, Statistical characteristics

### مقدمه

طول قرن بیستم ۰/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است (بی‌نام ۲۰۱۴). همچنین اگر انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش نیابد، افزایش متوسط دمای کره زمین در قرن بیست و یکم در حدود ۱/۱ تا ۴/۶ درجه سانتی‌گراد خواهد بود (بی‌نام ۲۰۱۴). هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در سال ۱۹۹۰ اولین گزارش ارزیابی تغییر اقلیم در کره زمین را بر اساس خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) منتشر نمود (بی‌نام ۲۰۱۴). مدل‌های GCM برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی اقلیم در مقیاس جهانی بوده و به‌عنوان عملی‌ترین ابزار جهت استنتاج اطلاعات کاربردی از تغییر اقلیم در مقیاس بزرگ است (رایت و همکاران ۲۰۱۵). در ضمن خروجی مدل‌های

از ابتدای قرن بیستم، فعالیت‌های شتابان بشری در توسعه صنعتی و اقتصادی، تغییر کاربری اراضی و تخریب محیط‌زیست باعث افزایش غلظت برخی گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر کره زمین شده و تبادلات حرارتی نرمال خوشید-اتسفر-زمین را مختل نموده است. این امر موجب افزایش دمای اتمسفر کره زمین و همچنین تغییر در گردش عمومی جریان‌های آب و هوایی جهان شده و از نیمه دوم قرن بیستم، پدیده تغییر اقلیم را در اغلب نقاط مختلف دنیا موجب گردیده است (چن و همکاران ۲۰۱۳، بی‌نام ۲۰۱۴). گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم نشان می‌دهد که متوسط دمای کره زمین در

روش‌های متعددی برای ارزیابی عملکرد مدل‌های GCM در شبیه‌سازی اقلیم سال‌های گذشته پیشنهاد و به‌کار گرفته شده‌اند. اغلب روش‌های پیشنهادی محدود به استفاده از چند آماره عمومی (ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا و ...) و در یک پایه زمانی (سالانه) بدون یک ارزیابی جامع بوده است. از طرف دیگر مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که هیچ توافق پذیرفته‌شده جهانی در مورد روش انتخاب مدل GCM و مقیاس زمانی ارزیابی وجود ندارد (اسمیت و چاندلر ۲۰۱۰ و مک‌ماهان و همکاران ۲۰۱۵). با این حال، مک‌ماهان و همکاران (۲۰۱۵) گزارش دادند که ارزیابی مدل‌های GCM در مقیاس زمانی ماهیانه و سالانه بسیار منطقی‌تر از مقایسه با مقیاس زمانی روزانه است. زیرا تعدادی از مطالعات ارزیابی عملکرد مدل‌های GCM گزارش شده است.

پرز و همکاران (۲۰۱۴) عملکرد مدل‌های CMIP3 و CMIP5 را در محدوده شمال‌شرق آتلانتیک مورد ارزیابی قرار دادند. هدف اصلی این مطالعه ارزیابی صلاحیت پایگاه داده مدل‌های CMIP3 و CMIP5 در این منطقه بود. از آنجایی که متغیرهای درون‌سالی (فصلی) و برون‌سالی سطح زمین (مانند بارندگی و برف) و متغیرهای اقیانوس (مانند ارتفاع موج و افزایش طوفان) مرتبط با الگوهای گردش عمومی جو می‌باشند از این‌رو در مطالعه مذکور، یک طبقه‌بندی خودکار سینوپتیک بر مبنای انواع آب و هوا، برای ارزیابی اینکه آیا این مدل‌ها قادر به تولید الگوهای مکانی و زمانی تغییرات اقلیمی هستند، مورد استفاده قرار گرفته است.

ووچیک (۲۰۱۴) کارکرد ۴۵ مدل گردش عمومی جو CMIP5 در اروپا و شمال آتلانتیک را با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری جهت ارزیابی قابلیت اطمینان مدل‌های GCM در بازتولید الگوهای اقلیمی در دوره تاریخی ۲۰۰۰-۱۹۷۱ مقایسه نمود. در این تحقیق سه شاخص آماری پایه، میانگین خطای مطلق، ضریب همبستگی و انحراف معیار به‌کار گرفته شد. مک‌ماهان و

GCM با استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی به پیش‌بینی‌های قابل‌اطمینان متغیرهای اقلیم دما و بارندگی در مقیاس منطقه‌ای قابل تبدیل بوده و می‌توانند به‌عنوان ورودی مدل‌های هیدرولوژیک در نظر گرفته شوند (مارکوس و همکاران ۲۰۱۱).

در طی دهه‌های اخیر مدل‌های GCM زیادی بالغ بر ۴۰ مدل در کشورهای مختلف دنیا (۱۲ کشور) توسعه یافته و این مدل‌ها در قالب پروژه جهانی CMIP<sup>۱</sup> با یک چارچوب مشترک مقایسه‌ای جهت ارتقاء دانش تغییر اقلیم (اقلیم در گذشته، حال و آینده) و نیز ارتقاء عملکرد مدل‌های اقلیمی در گونه‌های<sup>۲</sup> مختلف به‌صورت گام‌به‌گام ارائه شده‌اند (دمیرل و مرادخانی ۲۰۱۵). به‌طوری‌که در سال‌های اخیر نسل جدیدی از مدل‌های اقلیمی به نام مدل‌های زمین<sup>۳</sup> جهت کاهش عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی پیشین (مدل CMIP3) در قالب پروژه جهانی CMIP5 و CMIP6<sup>۴</sup> توسعه یافته یا در حال توسعه است (ایرینگ و همکاران ۲۰۱۶). مدل‌های CMIP5 به‌عنوان جدیدترین مجموعه از مدل‌های GCM، عملکرد قابل‌توجهی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی اقلیم در مقایسه با نسل پیش از خود (مدل‌های CMIP3<sup>۵</sup>) نشان داده‌اند (ونگ و همکاران ۲۰۱۶). این امر به خاطر عملکرد بهتر این مدل‌ها در شبیه‌سازی فرآیندهای کلیدی در پروژه CMIP5 از جمله شبیه‌سازی مطلوب‌تر آب و هوای سال‌های گذشته است (تیلر و همکاران ۲۰۱۲). لازم به ذکر است که عملکرد مدل‌های GCM به‌طور عمده براساس توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی آب و هوای سال‌های گذشته و مقایسه آن‌ها با داده‌های تاریخی انجام می‌گیرد (رایت و همکاران ۲۰۱۵).

<sup>1</sup> Coupled Model Intercomparison Project

<sup>2</sup> Versions

<sup>3</sup> Earth System Models

<sup>4</sup> Coupled Model Intercomparison Project Phase 6

<sup>5</sup> Coupled Model Intercomparison Project Phase 3

علاوه بر این پنج مدل برتر مدل‌های کلی برای LMB مدل‌های CMCC-IPSL-CM5A-MR، MPI-ESM-LR، و CESM1 (CAM5) و BNU-ESM می‌باشند. این امر نشان می‌دهد که عملکرد مدل‌های گردش عمومی جو برتر در بازه‌های زمانی مختلف نیز یکسان نمی‌باشند.

کوهستانی و همکاران (۲۰۱۶) عملکرد ۱۴ مدل اقلیمی CMIP5 را برای بررسی دقت برآورد داده‌های دما در حوضه آبریز زاینده رود مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل MIROC5 بیشترین دقت در برآورد دمای حداکثر و مدل CCSM4 بیشترین دقت در برآورد دمای حداقل را دارا بودند که بیشترین مقدار افزایش دما برای هر دو دمای حداقل و حداکثر در فصل زمستان مشاهده شده است. همچنین معصوم‌پور و همکاران (۲۰۱۷) داده‌های ۸ مدل اقلیمی CMIP5 را برای ارزیابی دقت پیش‌بینی داده‌های بارندگی (۲۰۰۵-۱۹۸۵) در ۸۸ ایستگاه در ایران به‌کار گرفتند. نتایج حاصل از ارزیابی دقت پیش‌بینی ۸ مدل مورد مطالعه نشان داد که مدل‌های بررسی شده از توانایی بالایی در برآورد بارندگی کشور برخوردار نیستند و با توجه به نتایج آماره‌هایی همچون ضریب همبستگی و شیب خط از دقت متوسط تا ضعیفی برخوردارند. با این وجود مدل‌های BCC-CSM1.1 و CCSM4 نسبت به سایر مدل‌ها در پهنه ایران از دقت بالاتری برخوردار بودند.

مدل‌های GCM که شرایط آب و هوایی یک منطقه خاص یا کل جهان را شبیه‌سازی می‌کنند بسته به شرایط اولیه و مرزی، متغیرهای مربوط به آب و هوا و ساختار متفاوت هستند (اونگوما و همکاران ۲۰۱۸). لذا برای استفاده از مدل‌های مختلف GCM در هر منطقه از جهان، ارزیابی نظام‌مند عملکرد مدل‌های مذکور در شبیه‌سازی رخداد‌های اقلیمی سال‌های گذشته (تاریخی) و همچنین باز تولید خصوصیات آماری آن‌ها از جمله میانگین، انحراف معیار، ضریب چولگی، خودهمبستگی، تابع چگالی احتمال، ساختمان همبستگی رخدادها مابین ماه‌ها و همبستگی ماه با سال و ... الزامی خواهد بود.

همکاران (۲۰۱۵) عملکرد ۲۳ مدل CMIP3 در بازتولید داده‌های دما و بارندگی را در سطح جهان با استفاده از یک روش شبه نظام‌مند با چندین شاخص آماری ارزیابی و رتبه‌بندی نمودند. در این مطالعه پارامترهای آماری میانگین و انحراف معیار بارندگی و دمای سالیانه و دمای ماهیانه و کلاس‌بندی Köppen-Geiger داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی مدل‌های GCM در مقیاس جهانی مورد مقایسه قرار گرفتند. در این مطالعه ۸ شاخص آماری انحراف معیار، ضریب نش، ضریب تبیین، ضریب اریب، درصد ضریب اریب<sup>۱</sup>، درصد اریب مطلق<sup>۲</sup>، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق به‌کار گرفته شدند.

راجو و همکاران (۲۰۱۶) ۳۶ مدل گردش عمومی جو CMIP5 را برای ارزیابی عملکرد شبیه‌سازی دمای بیشینه و کمینه در هند با استفاده از چند آماره عمومی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج این مطالعه مدل‌های CNRM-CM5، FGOALS-s2 و MIROC5 برای دمای بیشینه (برای سناریوهای مختلف)، MIROC4h، NorESM1-M و MIROC5، و CESM1-CAM5 برای دمای کمینه (برای سناریوهای مختلف)، CNRM-CM5 و FGOALS-s2 پیشنهاد شدند.

روآن و همکاران (۲۰۱۸) ۳۴ مدل گردش عمومی جو CMIP5 را برای ارزیابی عملکرد شبیه‌سازی بارندگی در چین (Lower Mekong Basin- LMB) با استفاده از روش Score-Based مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نمرات رتبه‌بندی مدل‌های گردش عمومی جو پنج مدل برتر برای فصل پرآبی مدل‌های CMCC-IPSL-CM5A-MR، MPI-ESM-LR، HadGEM2-CC، و CESM1 (CAM5) و HadGEM2-ES برای فصل کم‌آبی مدل‌های MRI-CGCM3، IPSL-CM5A-MR، و BNU-ESM، CCSM4، و MPI-ESM-MR برای بازه سالیانه مدل‌های CMCC-IPSL-CM5A-MR، و CESM1(CAM5) و BNU-ESM به‌دست آمدند.

<sup>1</sup> Percentage bias

<sup>2</sup> Absolute percentage bias

کلان‌شهر تهران است. لذا هر گونه تغییر شرایط آب و هوایی از جمله تغییر دما و بارندگی ناشی از تغییر اقلیم در منطقه مذکور، منابع آب تجدیدپذیر و همچنین تمامی فعالیت‌های وابسته به این منابع از جمله سلامت، بهداشت، کشاورزی، اقتصاد و ... در منطقه را به شدت تحت تأثیر قرار خواهد داد. مطالعات در دسترس نشان می‌دهد، پیش‌بینی مدل‌های GCM در نقاط مختلف دنیا متفاوت بوده و نیز عملکرد مشابهی ندارند. در این راستا در این مطالعه اولاً یک روش سیستماتیک نوآورانه جهت ارزیابی عملکرد مدل‌های GCM و ثانیاً روش پیشنهادی جدید در یک ساختگاه بسیار مهم منابع آب تجدیدپذیر در شمال مرکزی ایران برای اولین بار (با توجه به منابع در دسترس محققین) در کشور مورد استفاده قرار گرفته است.

#### داده‌های تاریخی

در منطقه دامنه‌های جنوبی و شرقی رشته کوه‌های البرز ۱۷ ایستگاه هواشناسی دارای آمار و اطلاعات طولانی‌مدت و در دسترس بوده (برای مطالعه حاضر) که از این تعداد، ۱۳ ایستگاه باران‌سنجی و ۴ ایستگاه تبخیرسنجی است. اکثریت ایستگاه‌های هواشناسی منطقه بیش از ۴۰ سال قدمت داشته و دارای آمار ثبت شده نسبتاً طولانی‌مدت می‌باشند. متأسفانه به دلیل کمبود ایستگاه‌های تبخیرسنجی در منطقه، دسترسی به داده‌های دما به همراه بارندگی در موقعیت‌های مکانی محدودی امکان‌پذیر بوده و انتخاب ایستگاه‌های مبنا یا انتخابی را برای استفاده در مطالعه حاضر محدود کرده است. لذا برای انتخاب مناسب ایستگاه‌های مبنا در این مطالعه، ملاحظات زیر در نظر گرفته شده است: الف- سری زمانی داده‌های (دما و بارندگی) طولانی‌مدت و با کمبود یا نواقص کمتر باشد، ب- موقعیت مناسب در بالادست حوضه‌ها که معرف واقعی از نزولات جوی در فرآیند بارش-رواناب حوضه‌ها در محل سازه‌های کنترل و تنظیم جریان رودخانه‌ای یعنی سدهای مخزنی کرج، لتیان و لار باشد و ج- نزدیک یا منطبق بر مرکز

این در حالی است که در دو دهه گذشته مطالعات بسیار متعددی (از جمله موارد ذکر شده بالا) از اثر تغییر اقلیم بر روی فرایندهای هیدرولوژیک از جمله دما، بارندگی و رواناب سطحی در نقاط مختلف دنیا و کشور ایران انجام پذیرفته است. با این وجود در اکثر مطالعات صورت‌گرفته، مدل‌های مورد استفاده به صورت محدود و تصمیم شخصی انتخاب شده و ارزیابی عملکرد مدل‌های مذکور برای منطقه مطالعاتی در نظر گرفته نشده یا با استفاده از چند آماره کلی و ساده صورت پذیرفته است (رن و همکاران ۲۰۱۷، سانگ و همکاران ۲۰۱۸). همچنین در کشور ایران نیز، در دو دهه اخیر مطالعات بسیار زیادی در نقاط مختلف آن به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر روی پارامترهای اقلیمی به‌ویژه دما و بارندگی با استفاده از یک یا چند مدل گردش عمومی جو خصوصاً مدل HadCM3 از پروژه CMIP3 و CMIP5 انجام پذیرفته است (عارف و علیجانی ۲۰۱۷، قاسمی‌فر و همکاران ۲۰۱۷). لذا در حال حاضر به دلیل خلأ یک روش نظام‌مند صریح و دقیق، نحوه ارزیابی و رتبه‌بندی عملکرد مدل‌های GCM در نقاط مختلف جهان از جمله ایران، یکی از دغدغه‌های مهم و اساسی محققین علوم مختلف وابسته به تغییر اقلیم از جمله منابع آب می‌باشد. بدین منظور در این مطالعه یک روش نظام‌مند برای ارزیابی عملکرد مدل‌های گردش عمومی جریان با استفاده از ۳۶ مدل GCM از گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه‌های البرز از منابع اصلی تأمین‌کننده آب‌های تجدیدپذیر استان‌های تهران، البرز و بخشی از مازندران انجام پذیرفته است.

#### مواد و روش‌ها

##### منطقه مورد مطالعه

منابع آب سطحی و زیرزمینی حوضه‌های آبریز دامنه‌های جنوبی و شرقی رشته کوه‌های البرز به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی استان‌های تهران، البرز و بخشی از مازندران از جمله آب شرب

دو سطح سالیانه و ماهیانه (و حتی روزانه) در داده‌های شبیه‌سازی شده تاریخی توسط مدل‌ها است. نتیجتاً یک فرآیند ارزیابی نظام‌مند عملکرد مدل‌های GCM برای تحلیل و مطالعه اثر تغییر اقلیم در سیستم‌های منابع آب، ترجیحاً مقایسه‌های ذیل را برای داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دما و بارندگی در دوره تاریخی لازم دارد: الف- پارامترهای آماری پایه، یعنی؛ میانگین، انحراف معیار، ضریب چولگی و ... در دو سطح سالیانه و ماهیانه؛ ب- توزیع فراوانی داده‌های سالیانه و ماهیانه، ت- نمودار پراکنندگی داده‌های پیش‌بینی شده و تاریخی در دو سطح سالیانه و ماهیانه ج- انطباق سری زمانی داده‌ها به‌ازای آماره‌های ارزیابی نش، اریب، ضریب تبیین و ... در دو سطح سالیانه و ماهیانه و د- رفتار همزمان مدل در بازتولید دما و بارندگی در دو سطح سالیانه و ماهیانه.

در مطالعه حاضر به‌دلیل محدودیت صفحات مقاله و درجه اهمیت، تعدادی از معیارهای ارزیابی مذکور مورد ملاحظه قرار گرفته است. در ضمن جهت انطباق و مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و تاریخی اقلیمی دو روش کیفی و کمی مورد استفاده قرار گرفته که آماره‌های کمی شامل پنج آماره یا خصیصه آماری استاندارد مطرح و مورد توجه اکثر محققین یعنی ضرایب نش، تبیین، اریب و ریشه میانگین مربعات خطا و متوسط خطای مطلق بود (مک‌ماهان و همکاران ۲۰۱۵، مک‌لین ۲۰۰۵). فرمول آماره‌های مذکور در روابط ۱ الی ۵ نشان داده شده است.

$$NSE=1-\left(\frac{\sum_{i=1}^N (o_i-m_i)^2}{\sum_{i=1}^N (o_i-\bar{o}_i)^2}\right) \quad [1]$$

$$R^2=\left(\frac{\sum mo-n\bar{m}\bar{o}}{\sqrt{(\sum m^2-n\bar{m}^2)(\sum o^2-n\bar{o}^2)}}\right)^2 \quad [2]$$

$$BIAS=\frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^N (m_i -o_i)\right) \quad [3]$$

سلول‌های مدل‌های GCM برای رسیدن به شرایط واقعی‌تر مقایسه نتایج مدل‌ها و داده‌های مشاهداتی باشد. براساس ملاحظات فوق و مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی منطقه تنها دو ایستگاه شهرستانک (حوضه آبریز کرج) و امامه (حوضه آبریز لتیان) دارای شرایط لازم مورد نظر بوده و به‌عنوان ایستگاه‌های مبنا در این مطالعه انتخاب شدند. پارامترهای آماری دما و بارندگی سالیانه ایستگاه‌های تبخیرسنجی مبنا در جدول ۱ نشان داده شده است. مقادیر جدول ۱ نشان می‌دهد که منطقه بر اساس اقلیم‌نمای دومارتن دارای اقلیم مرطوب بوده و دامنه تغییرات دما و بارندگی سالیانه به‌ترتیب برای ایستگاه‌های امامه و شهرستانک ۷/۸-۱۴/۰ و ۱۰/۹-۵/۵ درجه سانتی‌گراد و ۳۷۲/۰-۹۵۵/۴ و ۳۲۳/۳-۸۷۳/۰ میلی‌متر می‌باشد.

#### داده‌های مدل‌های گردش عمومی

داده‌های دوره تاریخی ۳۶ مدل GCM از پایگاه داده Cera به عنوان یکی از معتبرترین پایگاه داده‌ها تهیه گردید. شبکه سلولی فضایی پایگاه داده Cera به‌ازای مدل‌های مختلف متفاوت بوده و در هر مدل سلول دارای انطباق بهتر با ایستگاه‌های زمینی (فاصله نزدیکتر مرکز سلول با ایستگاه زمینی) مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ۲ لیست مدل‌های گردش عمومی جو در پایگاه داده Cera را نشان می‌دهد. در این مطالعه مطابق پیشنهاد مک‌ماهان و همکاران (۲۰۱۵) برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها، سری‌های زمانی پیش‌بینی شده سالیانه و ماهیانه دما و بارندگی در دوره تاریخی ۱۹۷۰-۲۰۰۵ جهت مقایسه با سری‌های زمانی متناظر تاریخی در ایستگاه‌های مبنا استفاده شده است.

#### روش پیشنهادی رتبه‌بندی

مدل‌های GCM برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی اقلیم در مقیاس بزرگ برای گذشته، حال و آینده توسعه یافته‌اند. استفاده از این مدل‌ها جهت پیش‌بینی اقلیم در هر منطقه از جهان وابسته به توانایی مدل‌های مذکور در باز تولید خصوصیات آماری داده‌های تاریخی در

در روابط فوق،  $m_i$  و  $o_i$  به ترتیب مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده،  $\bar{m}$  و  $\bar{o}$  به ترتیب میانگین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و  $N$  طول دوره آماری است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (m_i - o_i)^2}{n}} \quad [۴]$$

$$MAE = \frac{1}{n} \left| \sum_{i=1}^N (m_i - o_i) \right| \quad [۵]$$

جدول ۱- ارتفاع و مشخصات آماری دما و بارندگی سالیانه در دو ایستگاه شهرستانک و امامه.

ایستگاه	ارتفاع (m)	بارندگی (mm)			دما (C°)		
		متوسط	بیشینه	کمینه	ضریب تغییرات	متوسط	بیشینه
امامه	۲۲۴۸	۷۱۳/۶	۹۵۵/۴	۳۷۲/۰	۰/۳۸	۱۰/۹	۱۴/۰
شهرستانک	۲۱۵۰	۶۸۳/۳	۸۷۳/۰	۳۲۳/۳	۰/۳۳	۸/۲	۱۰/۹

## نتایج و بحث

نتایج این مطالعه جهت ارزیابی بهتر مدل‌ها در باز تولید خصوصیات درون‌سالی و برون‌سالی تاریخی، در چهار بخش مشخصات سالیانه، مشخصات ماهیانه، رفتار همزمان یا مشترک دما و بارندگی و رتبه‌بندی نهایی تفکیک و ارائه شده است.

## نتایج سالیانه

### پارامترهای آماری دما و بارندگی سالیانه

بازتولید پارامترهای آماری از جمله میانگین و انحراف معیار و ضریب چولگی تاریخی در داده‌های شبیه‌سازی شده یکی از معیارهای اساسی درستی فرضیه مشترک بودن جامعه آماری داده‌های شبیه‌سازی شده و تاریخی است. مقایسه مقادیر پارامترهای آماری پایه، یعنی؛ میانگین و انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی شده مدل‌های GCM و تاریخی دما و بارندگی سالیانه در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج مذکور نشان می‌دهد که اولاً تقریباً اکثریت مدل‌ها در حفظ پارامتر میانگین دما و بارندگی سالیانه نامطلوب عمل کرده و مقادیر میانگین دما/بارندگی را بیش/کم برآورد می‌کنند.

این عملکرد نامطلوب در حدود ۵۰ درصد مدل‌ها با افزایش ۲-۷ درجه دمای سالیانه و کاهش ۳۵۰-۶۵۰ میلی‌متر بارندگی سالیانه نمود پیدا کرده است. ثانیاً در

تمام مدل‌ها بدون استثناء انحراف معیار مقادیر دما و بارندگی سالیانه بسیار کمتر از مقدار تاریخی بازتولید شده و این نشان می‌دهد که در ساختار تمامی مدل‌ها تأکید مؤلفه گرایش به شاخص مرکزی میانگین نسبت به شاخص پراکندگی دارای وزن بالایی است. ثالثاً ضریب چولگی مقادیر شبیه‌سازی شده دما و بارندگی سالیانه مدل‌ها حتی در مدل‌های با پایه مشترک مانند HadGEM و IPSL دارای رفتاری مشابه نبوده و لذا به نظر می‌رسد در اغلب مدل‌ها بازتولید ضریب چولگی مقادیر دما و بارندگی سالیانه منظور نگردیده و مقادیر ضریب چولگی داده‌های تولیدی و تاریخی دارای تفاوت معنی‌داری است (چولگی در جدول ارائه نشده است).

### مقایسه سری زمانی دما و بارندگی سالیانه

نمودار مقایسه سری زمانی دما و بارندگی سالیانه شبیه‌سازی شده مدل و مشاهداتی ممتازترین و گویاترین معیار کیفی ارزیابی عملکرد مدل‌های GCM بوده و میزان دقت و کارایی مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد. نمودارهای مذکور برای تمامی مدل‌ها در دو ایستگاه مبنا تهیه و یک نمودار برای مدل مطلوبی در ایستگاه مبنای امامه در شکل ۱ ارائه شده است و چنین نتایجی تا کنون در هیچ یک از مطالعات انجام شده در سطح کشور و دنیا ارائه نشده است. براساس نتایج مذکور اکثر مدل‌ها دارای خطای زیاد به صورت بیش/کم برآورد در بازتولید داده‌های تاریخی دما/بارندگی است.

تنها در چند مدل محدود داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دما یا بارندگی کاملاً مشابه بوده، هرچند اختلاف فاز رخداد در سری زمانی تولیدی و تاریخی مشهود است.

تنها در چند مدل محدود داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دما یا بارندگی کاملاً مشابه بوده، هرچند

جدول ۲- اطلاعات نام، کشور و وضوح اتمسفریک مدل‌های گردش عمومی جو.

ردیف	مدل	کشور	وضوح	ردیف	مدل	کشور	وضوح
۱	ACCESS1.0	استرالیا	$1/25^{\circ} \times 1/9^{\circ}$	۱۹	GFDL-ESM2M	امریکا	$2^{\circ} \times 2/5^{\circ}$
۲	ACCESS1.3	چین	$1/25^{\circ} \times 1/9^{\circ}$	۲۰	GISS-E2-H	امریکا	$2^{\circ} \times 2/5^{\circ}$
۳	BCC-CSM1.1	چین	$2/8^{\circ} \times 2/8^{\circ}$	۲۱	GISS-E2-R	امریکا	$2^{\circ} \times 2/5^{\circ}$
۴	BCC-CSM1.1(m)	کانادا	$1/12^{\circ} \times 1/12^{\circ}$	۲۲	HadCM3	انگلستان	$2/5^{\circ} \times 2/7^{\circ}$
۵	BNU-ESM	کانادا	$2/8^{\circ} \times 2/8^{\circ}$	۲۳	HadGEM2-AO	انگلستان	$1/25^{\circ} \times 1/9^{\circ}$
۶	CanCM4	امریکا	$2/8^{\circ} \times 2/8^{\circ}$	۲۴	HadGEM2-CC	انگلستان	$1/25^{\circ} \times 1/9^{\circ}$
۷	CanESM2	امریکا	$2/8^{\circ} \times 2/8^{\circ}$	۲۵	HadGEM2-ES	انگلستان	$1/25^{\circ} \times 1/9^{\circ}$
۸	CCSM4	امریکا	$0/94^{\circ} \times 1/25^{\circ}$	۲۶	INMCM4	روسیه	$1/5^{\circ} \times 1/2^{\circ}$
۹	CESM1(BGC)	امریکا	$0/94^{\circ} \times 1/25^{\circ}$	۲۷	IPSL-CM5A-LR	فرانسه	$1/9^{\circ} \times 2/7^{\circ}$
۱۰	CESM1(CAM5)	امریکا	$0/94^{\circ} \times 1/25^{\circ}$	۲۸	IPSL-CM5A-MR	فرانسه	$1/25^{\circ} \times 2/5^{\circ}$
۱۱	CMCC-CM	ایتالیا	$0/75^{\circ} \times 0/75^{\circ}$	۲۹	IPSL-CM5B-LR	فرانسه	$1/9^{\circ} \times 2/7^{\circ}$
۱۲	CMCC-CMS	ایتالیا	$1/9^{\circ} \times 1/9^{\circ}$	۳۰	MIROC5	ژاپن	$2/8^{\circ} \times 2/8^{\circ}$
۱۳	CNRM-CM5	فرانسه	$1/4^{\circ} \times 1/4^{\circ}$	۳۱	MIROC-ESM	ژاپن	$2/8^{\circ} \times 2/8^{\circ}$
۱۴	CSIRO-Mk3.6.0	استرالیا	$1/9^{\circ} \times 1/9^{\circ}$	۳۲	MIROC-ESM-CHEM	ژاپن	$1/4^{\circ} \times 1/4^{\circ}$
۱۵	EC-EARTH	چندگانه	$1/1^{\circ} \times 1/1^{\circ}$	۳۳	MPI-ESM-LR	آلمان	$1/9^{\circ} \times 1/9^{\circ}$
۱۶	FGOALS-g2	چین	$2/8^{\circ} \times 2/8^{\circ}$	۳۴	MPI-ESM-MR	آلمان	$1/9^{\circ} \times 1/9^{\circ}$
۱۷	GFDL-CM3	امریکا	$2^{\circ} \times 2/5^{\circ}$	۳۵	MRI-CGCM3	ژاپن	$1/1^{\circ} \times 1/1^{\circ}$
۱۸	GFDL-ESM2G	امریکا	$2^{\circ} \times 2/5^{\circ}$	۳۶	NorESM1-M	نروژ	$1/9^{\circ} \times 2/5^{\circ}$

داده‌های مشاهداتی و تولیدی مدل‌های مختلف برای ایستگاه مبنای امامه را نشان می‌دهد. شکل ۲-الف نشان می‌دهد که در هیچکدام از مدل‌های GCM انطباق کامل یا نزدیک به کامل مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل یعنی ضریب نش برابر ۱ محقق نشده و تمام مقادیر ضریب نش به استثنای ۳-۲ مورد (ACCESS1.0، CNRM-CM5 و HadGEM2-AO) که به صفر نزدیک بوده، منفی است، یعنی؛ پیش‌بینی مدل‌ها بیش یا کم برآورد دما/بارندگی سالیانه بوده است.

شایان ذکر است که مقادیر ضریب نش تعدادی از مدل‌ها کوچکتر از ۸- بوده که برای ارتقاء وضوح تغییرات در شکل ۲-الف با رقم ۸- نمایش داده شده

این مسئله می‌تواند ناشی از مقیاس بزرگ مدل‌ها و اثر قابل‌توجه خصوصیات میکرو اقلیم در دما و بارندگی سالیانه در نقاط مختلف دنیا و خطاهای اندازه‌گیری زمینی خصوصاً در مناطق کوهستانی و دور از مراکز شهری باشد.

به‌منظور تکمیل مقایسه و ارزیابی کیفی فوق، آماره‌های ۵ گانه ضرایب نش، تبیین، اریب، ریشه میانگین مربعات خطا و متوسط خطای مطلق به‌ازای مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دما و بارندگی سالیانه دو ایستگاه مبنا جهت کمی کردن عملکرد مدل‌های مختلف محاسبه شد. شکل ۲ تغییرات آماره‌های ارزیابی ضریب نش و ضریب همبستگی



نمودارهای مذکور نشان می‌دهد: الف: سه الگوی غالب در نمودار پراکندگی دمای تاریخی و تولیدی ماهیانه برای مدل‌های مختلف GCM وجود دارد و ب: یک الگوی عمومی کم برآوردی بارندگی با درجات متفاوت برای مدل‌های مختلف همزمان با عدم همبستگی معنی‌دار مابین مقادیر شبیه‌سازی شده و تاریخی برای تمام مدل‌ها حاصل شده است. در شکل ۳ یکی از سه الگوی غالب (الگوی اول) در نمودار پراکندگی دمای تاریخی و شبیه‌سازی شده به همراه نمودارهای پراکندگی بارندگی تاریخی و شبیه‌سازی شده مربوطه تنظیم و ارائه شده است.

الگوی اول (شکل ۳-b) نشان از رابطه مستقیم با همبستگی بالای دمای ماهیانه تاریخی و شبیه‌سازی شده گروه اول مدل‌ها است. الگوی دوم و سوم یک رابطه حلقوی و کویپه‌ای به ترتیب با رابطه معکوس و مستقیم دمای تاریخی و تولیدی مدل‌ها را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که نتایج مذکور برای اولین بار در دنیا ارائه شده و چنین موردی در مطالعات گذشته گزارش نشده است (مک‌ماهان و همکاران ۲۰۱۵، پرز و همکاران ۲۰۱۴، راجو و همکاران ۲۰۱۶ و روان، همکاران ۲۰۱۸). از طرف دیگر در هر سه الگوی دمایی فوق، بارندگی توسط مدل‌ها دارای الگوی کم برآوردی بدون هیچ رابطه معنی‌داری مابین بارندگی تاریخی و تولیدی است (شکل ۳-a). این امر به دلیل ساختمان مدل‌های GCM بوده که بر پایه دما و گردش آن در جو توسعه یافته‌اند و احتمالاً پارامتر بارندگی در مدل‌های مختلف به‌طور مستقیم در مدل‌سازی GCM منظور نگردیده است.

به‌منظور کمی نمودن ارزیابی و مقایسه فوق، آماره‌های ارزیابی ضریب نش، ضریب اریب، ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا و متوسط خطای مطلق بازای داده‌های تاریخی و شبیه‌سازی شده دما و بارندگی ماهیانه (۲۰۰۵-۱۹۷۰) دو ایستگاه مبنا محاسبه شد.

است. اغلب مدل‌های GCM بر اساس آماره ضریب اریب با بیش یا کم برآوردی مقادیر دما و بارندگی سالیانه تاریخی دارای عملکرد مطلوبی در منطقه نبوده و درجه بیش یا کم برآوردی مقادیر دما و بارندگی توسط مدل‌های مختلف توسط این آماره کمی شده است. مقادیر ضریب همبستگی داده‌های تولیدی و مشاهداتی دما و بارندگی سالیانه (شکل ۲-b) به ترتیب کمتر از ۰/۶ و ۰/۴ بوده که بیانگر عدم قطعیت بالای مدل‌ها در بازتولید رفتار سری زمانی مشاهداتی در داده‌های برآوردی مدل‌ها به‌ویژه بارندگی بدون در نظر گرفتن بیش یا کم برآوردی مدل‌ها است. با این وجود با مرور عملکرد مدل‌های GCM در بازتولید توأم دما و بارندگی سالیانه مشاهداتی به‌ازای آماره‌های چهارگانه ضریب نش، ضریب همبستگی، اریب، ریشه میانگین مربعات خطا، عملکرد دو مدل ACCESS-1.0 و GFLD-CM3 با اولویت بالاتر و مدل‌های GFLD-ESM2G و CNRM-CM5 در اولویت بعدی نسبت به سایر مدل‌ها دارای ارجحیت نسبی بالایی است. شایان ذکر است که مک‌ماهان و همکاران (۲۰۱۵) برای بررسی عملکرد مدل‌های CMIP3 در سطح جهان، آماره‌های ارزیابی چهارگانه مذکور را استفاده کرده و آن را به‌عنوان یک بخش ضروری در بررسی عملکرد مدل‌های گردش عمومی جو معرفی نمودند.

### نتایج ماهیانه

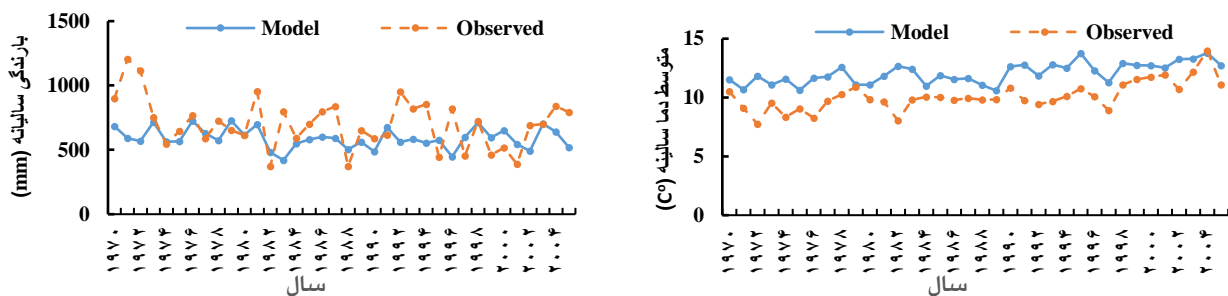
#### نمودار پراکندگی دما و بارندگی ماهیانه شبیه‌سازی شده و تاریخی

عملکرد مطلوب یک مدل GCM در پیش‌بینی داده‌های اقلیمی در گرو باز تولید خصوصیات داده‌های دما و بارندگی مشاهداتی در دو سطح سالیانه و ماهیانه است (مک‌ماهان و همکاران ۲۰۱۵). به این منظور نمودار پراکندگی دما و بارندگی ماهیانه شبیه‌سازی شده و تاریخی برای ۳۶ مدل گردش عمومی جو تهیه و ترسیم شد که متأسفانه به دلیل محدودیت صفحات مقاله تنها به ارائه نتایج یک یا دو مدل اکتفا شده است. بررسی

جدول ۳- پارامترهای آماری میانگین و انحراف معیار دما و بارندگی سالیانه مشاهداتی ایستگاه‌ها و شبیه‌سازی شده با مدل‌های مختلف GCM.

ردیف	نام ایستگاه یا مدل	بارندگی سالیانه		دمای سالیانه		ردیف	نام مدل	بارندگی سالیانه		دمای سالیانه	
		متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار			متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار
-	Amameh*	۷۱۳/۶	۲۷۰/۶	۱۰/۹	۲/۳	۱۸	GFDL-ESM2G	۳۵۳/۷	۹۲/۴	۱۱/۴	۰/۷
-	Shahrestanak*	۵۸۳/۳	۱۹۲/۱	۸/۲	۱/۰	۱۹	GFDL-ESM2M	۳۳۸/۸	۱۱۵/۸	۱۲/۲	۰/۹
۱	ACCESS1.0	۵۸۶/۳	۸۳/۰	۱۲/۰	۰/۹	۲۰	GISS-E2-H	۴۳۷/۳	۶۵/۱	۱۳/۸	۰/۵
۲	ACCESS1.3	۳۸۹/۰	۵۰/۷	۱۳/۱	۰/۶	۲۱	GISS-E2-R	۴۵۱/۰	۵۶/۸	۱۴/۶	۰/۶
۳	BCC-CSM1.1	۴۷۷/۱	۷۲/۹	۱۳/۲	۰/۵	۲۲	HadCM3	۲۲۹/۶	۵۴/۷	۱۱/۷	۰/۸
۴	BCC-CSM1.1 (m)	۲۹۳/۳	۷۶/۲	۱۲/۶	۰/۸	۲۳	HadGEM2-AO	۵۱۳/۴	۶۷/۸	۱۲/۶	۰/۸
۵	BNU-ESM	۲۱۴/۸	۷۶/۱	۱۶/۳	۰/۸	۲۴	HadGEM2-CC	۵۱۳/۹	۶۹/۹	۱۲/۱	۰/۶
۶	CanCM4	۲۳۸/۸	۱۰۱/۷	۱۱/۹	۰/۷	۲۵	HadGEM2-ES	۵۱۲/۶	۶۹/۱	۱۲/۵	۰/۶
۷	CanESM2	۲۲۴/۸	۱۱۳/۲	۱۱/۹	۰/۸	۲۶	INMCM4	۲۳۹/۲	۱۰/۳	۹/۴	۰/۶
۸	CCSM4	۳۵۵/۱	۸۶/۵	۱۵/۷	۰/۸	۲۷	IPSL-CM5A-LR	۱۰۷/۴	۳۳/۸	۱۳/۹	۰/۶
۹	CESM1(BGC)	۳۴۰/۴	۸۸/۶	۱۳/۹	۰/۶	۲۸	IPSL-CM5A-MR	۶۲/۲	۳۰/۳	۱۴/۱	۰/۴
۱۰	CESM1(CAM5)	۲۹۳/۲	۱۰۰/۲	۱۳/۴	۰/۶	۲۹	IPSL-CM5B-LR	۳۴۷/۸	۹۹/۶	۱۰/۸	۰/۷
۱۱	CMCC-CM	۱۰۷/۷	۴۸/۷	۱۶/۱	۰/۷	۳۰	MIROC-ESM	۴۸۸/۹	۷۷/۵	۱۶/۸	۰/۵
۱۲	CMCC-CMS	۲۱۴/۴	۶۴/۷	۱۲/۶	۰/۷	۳۱	MIROC-ESM-CHEM	۴۸۸/۲	۸۸/۱	۱۶/۸	۰/۶
۱۳	CNRM-CM5	۸۳۴/۵	۱۰۴/۲	۸/۸	۰/۹	۳۲	MIROC5	۴۵۰/۸	۸۲/۹	۱۷/۹	۰/۵
۱۴	CSIRO-Mk03.6.0	۱۹۸/۴	۷۲/۸	۱۱/۸	۰/۵	۳۳	MPI-ESM-MR	۳۵۰/۷	۹۵/۸	۱۵/۳	۰/۷
۱۵	EC-EARTH	۴۳۳/۹	۷۶/۶	۱۲/۹	۰/۶	۳۴	MPI-ESM-LR	۲۸۱/۵	۷۱/۰	۱۵/۶	۰/۶
۱۶	FGOALS-g2	۴۳۱/۰	۸۸/۳	۱۳/۱	۰/۵	۳۵	MRI-CGCM3	۳۹۶/۴	۷۸/۸	۱۱/۹	۰/۷
۱۷	GFDL-CM3	۴۷۳/۴	۱۰۷/۴	۹/۹	۰/۹	۳۶	NorESM1-M	۲۴۵/۲	۸۲/۰	۱۳/۴	۰/۵

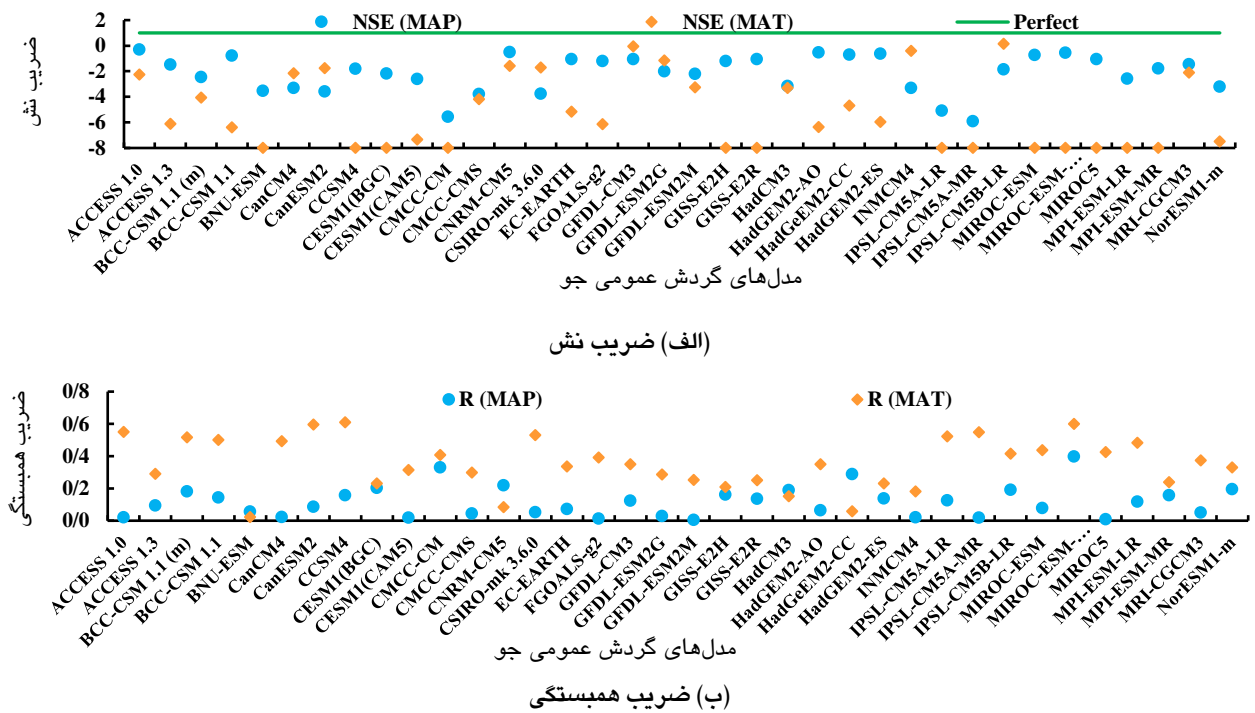
\* ایستگاه هواشناسی



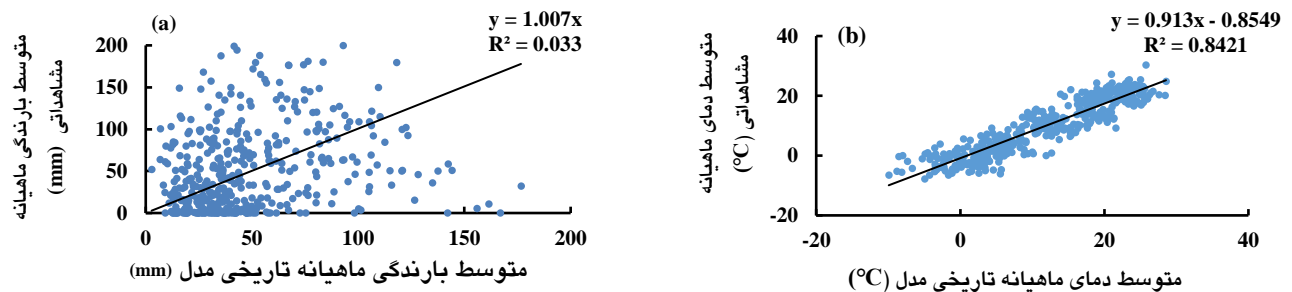
شکل ۱- مقایسه سری زمانی مقادیر متوسط دما و بارندگی سالیانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای مدل ACCESS1.0 در ایستگاه مینای امامه.

تاریخی نداشته (۴۵ درصد مدل‌ها  $NSE \approx 0.0$  یعنی؛  $-0.2 < NSE < 0.2$ ) و ۵۵ درصد مدل‌ها  $NSE < -0.2$ ) ولی حدود یک سوم مدل‌ها در بازتولید مقادیر دمای ماهیانه عملکرد نسبتاً مطلوبی ( $NSE \geq 0.8$ ) را نشان می‌دهند.

جدول ۴ مقادیر آماره‌های ۵ گانه فوق را جهت ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف GCM (۱۰ مدل) در شبیه‌سازی دما و بارندگی ماهیانه تاریخی در ایستگاه امامه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج آماره ضریب نش، هیچ یک از مدل‌ها عملکرد خوبی در بازتولید بارندگی ماهیانه



شکل ۲- تغییرات آماره‌های ارزیابی الف- ضریب نش و ب- ضریب همبستگی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل‌های گردش عمومی جو برای ایستگاه مبنای امامه.



شکل ۳- نمایش یکی از سه الگوی غالب (الگوی اول)، رابطه دما و بارندگی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ماهیانه برای ایستگاه امامه.

جدول ۴- آماره‌های ضرایب نش، همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا و اریب مقادیر دما و بارندگی ماهیانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با ۱۰ مدل مختلف در ایستگاه امامه.

ردیف	متوسط بارندگی ماهیانه			متوسط دمای ماهیانه			مدل گردش عمومی جو	نشان	
	اریب	ریشه میانگین مربعات خطا	همبستگی	اریب	ریشه میانگین مربعات خطا	همبستگی			
۱	۱/۸۹	۴/۱۶	۰/۹۲	۰/۷۹	-۱۰/۶۱	۶۷/۰۷	۰/۲۳	-۰/۰۳	ACCESS 1.0
۲	۲/۹۸	۴/۹۲	۰/۹۲	۰/۷۱	-۲۶/۹۳	۶۸/۸۲	۰/۳۰	-۰/۰۹	ACCESS 1.3
۳	۲/۵۳	۳/۹۹	۰/۹۵	۰/۸۱	-۳۵/۰۲	۷۳/۱۴	۰/۲۵	-۰/۲۳	BCC-CSM 1.1 (m)
۴	۳/۱۰	۶/۹۰	۰/۹۰	۰/۴۳	-۱۹/۶۲	۷۴/۴۵	۰/۰۹	-۰/۲۷	BCC-CSM 1.1
۵	۶/۲۲	۷/۲۴	۰/۹۵	۰/۳۷	-۴۱/۱۷	۷۶/۶۹	۰/۲۲	-۰/۳۵	BNU-ESM
۶	۱/۹۵	۷/۶۶	۰/۷۴	۰/۲۹	-۳۹/۱۸	۷۹/۵۸	۰/۰۸	-۰/۴۵	CanCM4
۷	۱/۷۴	۷/۳۶	۰/۷۳	۰/۳۵	-۴۰/۳۴	۸۰/۸۴	۰/۰۵	-۰/۵۰	CanESM2
۸	۵/۶۰	۶/۲۷	۰/۹۶	۰/۵۳	-۲۹/۶۲	۷۳/۷۷	۰/۱۳	-۰/۲۵	CCSM4
۹	۳/۷۷	۴/۷۱	۰/۹۵	۰/۷۳	-۳۰/۷۸	۷۴/۸۷	۰/۱۵	-۰/۲۵	CESM1(BGC)
۱۰	۳/۳۰	۴/۲۸	۰/۹۶	۰/۷۸	-۳۴/۷۲	۷۱/۳۹	۰/۳۳	-۰/۱۷	CESM1(CAM5)

### پارامترهای آماری دما و بارندگی ماهیانه

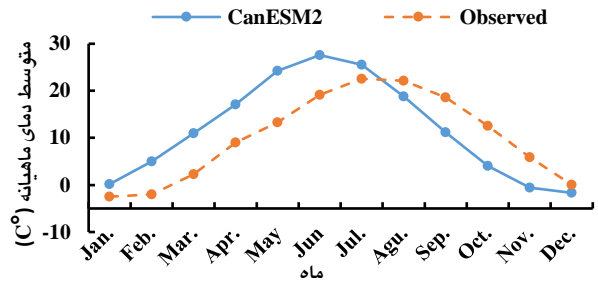
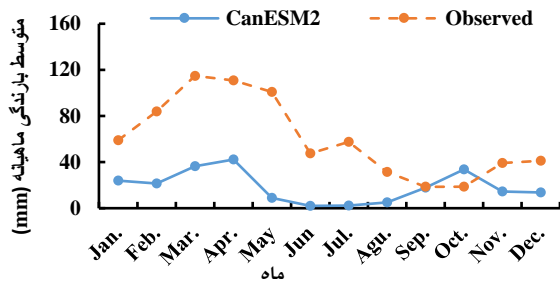
بازتولید ممان‌های آماری مانند میانگین و انحراف معیار تاریخی در سری زمانی شبیه‌سازی شده با مدل‌های GCM یکی دیگر از معیارهای اساسی ارزیابی عملکرد این مدل‌هاست. لذا ممان‌های آماری سری زمانی شبیه‌سازی شده مدل‌های ۳۶ گانه محاسبه و با مقادیر متناظر تاریخی مقایسه شد. در شکل ۴ مقایسه میانگین دما و بارندگی ماهیانه سری زمانی تاریخی و شبیه‌سازی شده برای الگوی سوم (یک مدل غیر مطلوب) از سه الگوی دمای مشاهداتی و تولیدی مدل‌ها در شکل ۳ تنظیم و ارائه شده است. براساس نتایج، کم برآوردی مقادیر بارندگی ماهیانه شبیه‌سازی شده مدل‌ها خصوصاً در گروه دوم و سوم (شکل ۴) مدل‌ها که اکثریت ۳۶ مدل مورد مطالعه را شامل شده به وضوح دیده می‌شود و میزان کم برآوردی بارندگی مدل‌ها در ماه‌های مرطوب نیز نمود بیشتری دارند. همچنین مقایسه میانگین دمای ماهیانه مشاهداتی و تولیدی نشان از رفتار متفاوت مدل‌های GCM در گروه‌های سه‌گانه است. به طوری که در گروه اول مدل‌ها به صورت نسبتاً مطلوبی توانایی بازتولید میانگین دمای ماهیانه تاریخی در ۱۲ ماه سال را دارا می‌باشند. در گروه دوم مقادیر متوسط دمای ماهیانه شبیه‌سازی شده در ماه‌های گرم سال، یعنی؛ آوریل تا اکتبر کمتر از مقادیر تاریخی و در ماه‌های سرد سال، یعنی؛ نوامبر تا آوریل بیشتر از مقادیر تاریخی بوده است. در گروه سوم (شکل ۴)، مقادیر متوسط دمای ماهیانه تولیدی در ۷-۶ ماه ابتدای سال بیشتر و در ۵-۶ ماه بعدی سال کمتر از مقادیر مشاهداتی شبیه‌سازی شده است. قابل توجه است که چنین نتایجی از رفتار عمومی عملکرد مدل‌های گردش عمومی جو در مطالعات گذشته ارائه نشده و این مطالعه برای اولین بار در دنیا آن‌ها ارائه می‌کند (مک‌ماهان و همکاران ۲۰۱۵، پرز و همکاران ۲۰۱۴، راجو و همکاران ۲۰۱۶، روان و همکاران ۲۰۱۸).

### رتبه بندی نهایی عملکرد مدل های GCM

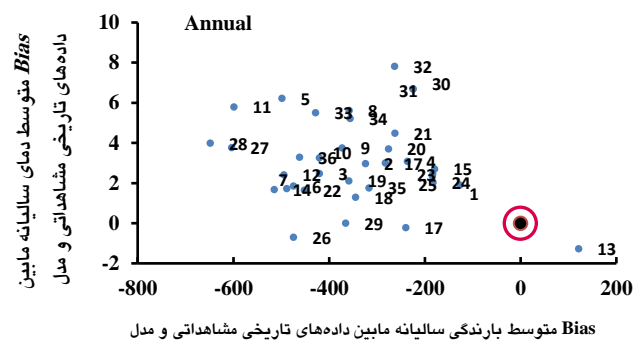
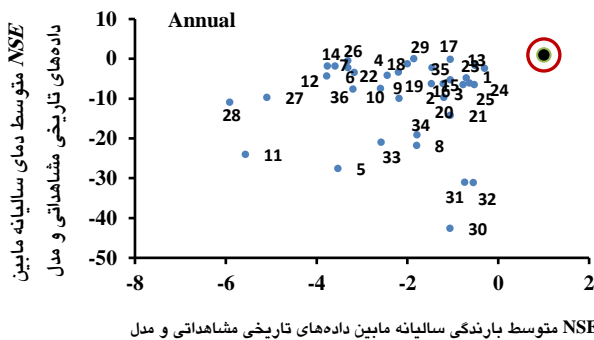
در این مطالعه به منظور رتبه‌بندی نهایی عملکرد مدل‌ها، دو روش الف: رفتار همزمان مدل در بازتولید دما و بارندگی تاریخی ب: رفتار مستقل مدل در بازتولید دما و بارندگی تاریخی در نظر گرفته شد.

در روش اول مدل‌های مختلف GCM بر اساس میزان اطمینان از مطلوبیت توأم بین بارندگی و دمای شبیه‌سازی شده رتبه‌بندی شده‌اند (مک‌ماهان و همکاران ۲۰۱۵). بدین منظور موقعیت پراکندگی توأم آماره‌های ارزیابی ضریب نش و ضریب اریب دما و بارندگی نسبت به مرکز مطلوبیت مطلق در دو سطح سالیانه و ماهیانه تعیین و در شکل ۵ برای مقادیر سالیانه نشان داده شده است. براساس شکل ۵ موقعیت توأم آماره‌های ارزیابی هیچکدام از مدل‌ها منطبق یا بسیار نزدیک به نقاط مطلوب مطلق یعنی  $NSE(1,1)$  و  $BIAS(0,0)$  هم در سطح سالیانه و هم در سطح ماهیانه نبوده و تعداد اندکی از مدل‌ها (۳-۲) در محدوده نسبتاً قابل قبول از مرکز مطلوبیت مطلق قرار گرفته‌اند. نهایتاً در یک ارزیابی کلی براساس راهبرد مذکور، مدل‌های ACCESS1.0، CNRM-CM5، GFDL-CM3 و GFDL-ESM2G دارای ارجحیت نسبی بالا نسبت به سایر مدل‌ها برای بررسی تغییر اقلیم و پیش‌بینی متغیرهای دما و بارندگی آینده در محدوده مطالعاتی است.

در روش دوم، ابتدا مدل‌های مختلف به‌ازای هرکدام از هفت آماره ارزیابی پیشنهادی (میانگین، انحراف معیار، نش، اریب، ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق) در بازتولید دما و بارندگی سالیانه و ماهیانه رتبه‌بندی گردیده است. جدول ۵ رتبه‌بندی مدل‌های مختلف GCM به‌ازای آماره هفتگانه در بازتولید خصوصیات دما و بارندگی سالیانه تاریخی را برای ۱۰ مدل برتر نشان می‌دهد. سپس رتبه‌بندی کلی هر کدام از مدل‌ها در بازتولید دما و بارندگی سالیانه و ماهیانه به‌ازای مجموع/متوسط رتبه‌بندی آماره‌های هفتگانه تعیین شده‌اند (جدول ۵).



شکل ۴- مقایسه میانگین دما و بارندگی ماهیانه سری زمانی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای یکی از الگوهای نمودار پراکندگی مدل‌های گردش عمومی جو برای ایستگاه امامه.



شکل ۵- موقعیت توأم یا هم‌زمان آماره‌های ارزیابی (الف) ضرایب نش و (ب) اریب سالیانه نسبت به مرکز مطلوبیت مطلق یعنی (1,1) NSE و (0,0) Bias برای ایستگاه امامه.

### نتیجه‌گیری کلی

در حال حاضر پدیده گرمایش جهانی و تغییر اقلیم بر چرخه هیدرولوژیک جهانی به یکی از مخاطرات بسیار جدی برای حیات انسانی، گیاهی و جانوری در برخی نقاط مختلف کره زمین تبدیل شده است. براساس گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، متوسط دمای کره زمین در طول قرن بیستم ۰/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و در صورت عدم کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، متوسط دمای کره زمین در قرن بیست و یکم در حدود ۱/۱ تا ۴/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد داشت (بی‌نام ۲۰۱۴). در طول چند دهه گذشته تعداد قابل توجه مدل گردش عمومی جو (بیش از ۴۰ مدل) با ساختار، پایگاه داده و تئوری‌های متفاوت در مراکز علمی دنیا برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی اقلیم در نقاط مختلف جهان توسعه یافته است. مدل‌های گردش

در نهایت رتبه‌بندی نهایی مدل‌ها از مجموع رتبه‌بندی کلی مدل‌ها در بازتولید دما و بارندگی در دو سطح سالیانه و ماهیانه حاصل شده و نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است. مجموع رتبه مدل‌های مختلف در رتبه‌بندی نهایی در محدوده ۹ الی ۱۱۶ متغیر بوده که دو مدل رتبه اول و دوم یعنی ACCESS1.0 و GFDL-CM3 با مجموع رتبه ۹ و ۱۵ دارای مطلوبیت نسبی بسیار بالاتری نسبت به مدل‌های بعدی (از جمله مدل سوم CNRM-CM5 و چهارم GFDL-ESM2G) با مجموع رتبه ۴۳ و ۴۵ است. نتیجتاً با جمع‌بندی نتایج رتبه‌بندی دو راهبرد به‌کار رفته، مدل‌های ACCESS1.0 و GFDL-CM3 با اولویت بالاتر و دو مدل CNRM-CM5 و GFDL-ESM2G در اولویت بعدی به‌عنوان مدل‌های برتر جهت بررسی تغییر اقلیم و پیش‌بینی متغیرهای دما و بارندگی آینده در محدوده مطالعاتی تعیین می‌شوند.

تاریخی و (ج) رفتار همزمان مدل در بازتولید دما و بارندگی تاریخی می‌باشد.

نتایج حاصل در سطح سالیانه در منطقه مطالعاتی بیانگر عملکرد نامطلوب اکثریت مدل‌ها در بازتولید دما (حالت بیش برآورد) و بارندگی (حالت کم برآورد) سالیانه بوده است. نتایج درون‌سالی مدل‌ها نشان داد که نمودار پراکندگی دمای ماهیانه تولیدی و تاریخی دارای سه الگوی متفاوت (رابطه خطی مستقیم، رابطه کوپه‌ای و حلقوی مستقیم و رابطه کوپه‌ای غیر مستقیم) بوده و در هر سه الگوی دمایی مذکور، بارندگی توسط تمام مدل‌ها (باستثنای یک مدل) دارای الگوی کم برآوردی بدون هیچ رابطه معنی‌داری مابین بارندگی تاریخی مشاهداتی و تولیدی مدل است.

نهایتاً برای بررسی تغییر اقلیم و پیش‌بینی متغیرهای دما و بارندگی سال‌های آتی در محدوده مطالعاتی، مدل‌های ACCESS1.0 و GFDL-CM3 با اولویت بالاتر و دو مدل CNRM-CM5 و GFDL-ESM2G در اولویت بعدی پیشنهاد می‌گردد.

عمومی به‌طور وسیع در طول دهه‌های اخیر با تعداد محدود و تصمیم شخصی و بدون ارزیابی لازم عملکرد مدل‌ها برای پیش‌بینی شرایط اقلیمی آتی (از جمله دما و بارندگی) در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته است. لذا در این مطالعه یک روش نوآورانه نظام‌مند برای ارزیابی عملکرد ۳۶ مدل گردش عمومی جو از گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم ارائه شده و با استفاده از داده‌های مشاهداتی زمینی در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز مورد آزمون قرار گرفت. بر اساس نتایج اکیداً توصیه می‌شود که در توصیف اثر تغییر اقلیم در آب و هوای آینده در هر نقطه کره زمین، استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو بدون ارزیابی نظام‌مند عملکرد آن‌ها در دو سطح سالیانه و ماهیانه می‌تواند منجر به خطا و انحراف بزرگی گردد. نتایج همچنین حاکی از آن است که عملکرد این مدل‌ها برای استفاده در پیش‌بینی شرایط آب و هوایی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر (الف) بازتولید خصوصیات سالیانه دما و بارندگی تاریخی، (ب) بازتولید خصوصیات ماهیانه دما و بارندگی

جدول ۵- رتبه‌بندی مدل‌های مختلف گردش عمومی جو به‌ازای آماره هفتگانه در بازتولید خصوصیات بارندگی سالیانه ایستگاه امامه.

ردیف	مدل گردش عمومی جو	میانگین	انحراف معیار	نش	همبستگی	ریشه میانگین مربعات خطا	متوسط خطای مطلق	اریب	مجموع	وزن	رتبه‌بندی
۱	CNRM-CM5	۱	۴	۲	۴	۱۳	۶	۱	۳۱	۴/۴	۱
۲	ACCESS1.0	۲	۱۴	۱	۲۹	۱	۲	۲	۵۱	۷/۳	۲
۳	BCC-CSM1.1	۸	۲۲	۸	۱۳	۳	۹	۹	۷۲	۱۰/۳	۳
۴	HadGEM2-AO	۴	۲۷	۶	۳	۲۳	۵	۴	۷۲	۱۰/۳	۴
۵	GFDL-CM3	۹	۳	۹	۱۷	۱۷	۱۲	۱۰	۷۷	۱۱/۰	۵
۶	MIROC5	۱۱	۱۵	۴	۱	۳۲	۷	۸	۷۸	۱۱/۱	۶
۷	EC-EARTH	۱۳	۱۹	۱۰	۲۲	۱۵	۱	۳	۸۳	۱۱/۹	۷
۸	HadGEM2-ES	۵	۲۶	۵	۱۳	۲۵	۴	۶	۸۴	۱۲/۰	۸
۹	HadGEM2-CC	۳	۲۵	۳	۲۳	۲۴	۳	۵	۸۶	۱۲/۳	۹
۱۰	MIROC-ESM-CHEM	۷	۱۲	۷	۲۱	۳۱	۸	۷	۹۳	۱۳/۳	۱۰
۱۱	CCSM4	۱۷	۱۳	۱۸	۱۰	۸	۲۰	۱۹	۱۰۵	۱۵/۰	۱۱

جدول ۶- رتبه‌بندی نهایی مدل‌های مختلف گردش عمومی جو به‌ازای مجموع رتبه در بازتولید دما و بارندگی سالیانه و ماهیانه ایستگاه امامه.

رتبه‌بندی نهایی	رتبه‌بندی نهایی	مدل گردش عمومی جو	مدل گردش عمومی جو	بارندگی سالیانه	بارندگی سالیانه	دمای ماهیانه	دمای ماهیانه	کل	کل	دمای ماهیانه	دمای سالیانه	بارندگی ماهیانه	بارندگی سالیانه	مدل گردش عمومی جو	ردیف
۹	۱	GFDL-ESM2M	GFDL-ESM2M	۲۳	۱۴	۱۳	۲	۵۲	۹	۱	۵	۱	۲	ACCESS1.0	۱
۱۵	۵	GISS-E2-H	GISS-E2-H	۱۴	۸	۲۹	۲۱	۷۲	۲۰	۳	۱۹	۹	۱۶	ACCESS1.3	۲
۱۶	۱۷	GISS-E2-R	GISS-E2-R	۱۲	۷	۳۲	۲۲	۷۳	۲۱	۲۹	۲۰	۲۸	۳	BCC-CSM1.1	۳
۲۱	۱۱	HadCM3	HadCM3	۲۸	۳۰	۱۰	۳۶	۱۰۴	۲۲	۵	۱۲	۱۸	۲۰	BCC-CSM1.1 (m)	۴
۱۲	۳۶	HadGEM2-AO	HadGEM2-AO	۴	۶	۱۴	۳۳	۵۷	۲۳	۲۰	۳۴	۳۲	۳۰	BNU-ESM	۵
۱۳	۲۲	HadGEM2-CC	HadGEM2-CC	۹	۴	۱۵	۳۴	۶۲	۲۴	۲۷	۸	۲۲	۲۶	CanCM4	۶
۱۴	۲۳	HadGEM2-ES	HadGEM2-ES	۸	۳	۱۷	۳۵	۶۳	۲۵	۲۶	۳	۲۹	۲۵	CanESM2	۷
۳۰	۱۸	INMCM4	INMCM4	۳۴	۲۵	۱۱	۲۲	۱۰۲	۲۶	۲۴	۲۴	۲۱	۱۱	CCSM4	۸
۳۳	۱۹	IPSL-CM5A-LR	IPSL-CM5A-LR	۳۵	۳۵	۲۲	۱۹	۱۱۱	۲۷	۱۶	۲۷	۲۴	۱۳	CESM1(BGC)	۹
۳۴	۲۴	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5A-MR	۳۶	۳۶	۲۶	۲۶	۱۱۳	۲۸	۱۷	۲۳	۱۹	۲۴	CESM1(CAM5)	۱۰
۱۰	۳۵	IPSL-CM5B-LR	IPSL-CM5B-LR	۱۷	۲۶	۲	۸	۵۳	۲۹	۱۸	۲۱	۳۴	۳۱	CMCC-CM	۱۱
۲۵	۲۸	MIROC5	MIROC5	۶	۱۵	۳۶	۲۸	۸۵	۳۰	۱۲	۱۶	۳۱	۳۳	CMCC-CMS	۱۲
۲۹	۳	MIROC-ESM	MIROC-ESM	۱۸	۱۷	۳۵	۲۱	۱۰۱	۳۱	۱۳	۹	۲۰	۱	CNRM-CM5	۱۳
۲۶	۲۱	MIROC-ESM-CHEM	MIROC-ESM-CHEM	۱۰	۱۲	۲۳	۲۰	۸۵	۳۲	۱۱	۶	۳۳	۳۲	CSIRO-Mk 3.6.0	۱۴
۳۲	۷	MPI-ESM-LR	MPI-ESM-LR	۲۹	۲۷	۲۸	۲۳	۱۰۷	۳۳	۱۴	۱۸	۱۱	۷	EC-EARTH	۱۵
۲۷	۸	MPI-ESM-MR	MPI-ESM-MR	۱۹	۱۳	۳۰	۲۵	۸۷	۳۴	۹	۲۱	۵	۱۵	FGOALS-g2	۱۶
۶	۲	MRI-CGCM3	MRI-CGCM3	۲۲	۱۰	۷	۱۰	۴۹	۳۵	۷	۱	۲	۵	GFDL-CM3	۱۷
۲۰	۴	NorESM1-M	NorESM1-M	۲۷	۲۳	۲۵	۶	۸۱	۳۶	۴	۴	۱۶	۲۱	GFDL-ESM2G	۱۸

#### منابع مورد استفاده

- Anonymous, 2014. Climate Change: Synthesis Report. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Russian Federation.
- Aref MR and Alijani B, 2017. Investigation of temperature and precipitation variations of Yazd-Ardakan basin with SDSM under the conditions of future climate change. Arid Biome Scientific and Research Journal 8(1): 89-100. (In Persian with English abstract)
- Chen HPJQ and Chen XL, 2013. Future changes of drought and flood events in China under a global warming scenario. Atmospheric and Oceanic Science Letters 6:8-13.
- Demirel MC and Moradkhani H, 2015. Assessing the impact of CMIP5 climate multi-modeling on estimating the precipitation 25 seasonality and timing. Climate Change 135:357-372.
- Eyring V, Bony S, Meehl GA, Senior CA, Stevens B, Stouffer RJ and Taylor KE, 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development 9:1937-1958.
- Ghasemifar A, Alijani B and Saligheh M, 2017. Investigation of temperature changes on the southern shores of the Caspian Sea using three models SDSM, LARSWG and artificial neural network model. Quarterly Journal of Natural Geography 9 (34):23-41. (In Persian with English abstract)
- Kouhestani Sh, Eslamian S and Besalatpour A, 2016. The Effect of climate change on the Zayandeh-Rud River Basin's temperature using a Bayesian machine learning soft computing technique. Journal of Water and Soil Science 21(1): 203-2016. (In Persian with English abstract)
- MacLean A, 2005. Statistical Evaluation of WATFLOOD (Ms), Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of Waterloo, Ontario, Canada.

- Marcos M, Jorda J, Gomis D and Perez B, 2011. Changes in storm surges in southern Europe from a regional model under climate change scenarios. *Global and Planetary Change* 77(3-4):116-128.
- Masoompour Samakosh J, Miri M and Porkamar F, 2017. Assessment of CMIP5 climate models with observed precipitation in Iran. *Iranian Journal of Geophysics* 11(4): 40-53. (In Persian with English abstract)
- McMahon T, Peel M and Karoly D, 2015. Assessment of precipitation and temperature data from CMIP3 global climate models for hydrologic simulation. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences* 19:361-377.
- Nash JE and Sutcliffe JV, 1970. River flow forecasting through conceptual model. *Journal of Hydrology* 10:282-290.
- Ongoma V, Chen H and Gao C, 2018. Evaluation of CMIP5 twentieth century rainfall simulation over the equatorial East Africa. *Theoretical and Applied Climatology* 135:893-910.
- Perez J, Menendez M and Mendez FJ, 2014. Evaluating the performance of CMIP3 and CMIP5 global climate models over the north-east Atlantic region. *Climate Dynamic* 43:2663-2680.
- Raju KS, Sonali P and Kumar DN, 2016. Ranking of CMIP5-based global climate models for India using compromise programming. *Theoretical and Applied Climatology* 128:563-574.
- Ren L, Xue LQ, Liu YH, Shi J, Han Q and Yi PF, 2017. Study on variations in climatic variables and their influence on runoff in the Manas River Basin, China. *Water* 9, 258, 1-19.
- Ruan Y, Yao Z, Wang R and Liu Z, 2018. Ranking of CMIP5 GCM skills in simulating observed precipitation over the Lower Mekong Basin, using an improved score-based method. *Water* 10, 1886, 1-22.
- Smith I and Chandler E, 2010. Refining rainfall projections for the Murray Darling Basin of south-east Australia the effect of sampling model results based on performance. *Climate Change* 102: 377-393.
- Sung JH, Chung ES and Shahid Sh, 2018. Reliability-resiliency-vulnerability approach for drought analysis in south Korea using 28 GCMs. *Sustainability* 10, 3043, 1-16.
- Taylor EK, Stouffer RJ and Meehl GA, 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(4):485-498.
- Wang X, Yang T, Li X, Shi P and Zhou X, 2016. Spatio-temporal changes of precipitation and temperature over the Pearl River basin based on CMIP5 multi-model ensemble. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 31:1077-1089.
- Wójcik R, 2014. Reliability of CMIP5 GCM simulations in reproducing atmospheric circulation over Europe and the north Atlantic: A statistical downscaling perspective. *International Journal of Climatology* 732:714-732.
- Wright DB, Knutson TR and Smith JA, 2015. Regional climate model projections of rainfall from US landfalling tropical cyclones. *Climate Dynamics* 45: 3365-3379.