

مقاله علمی-پژوهشی

اولویت‌بندی مدل‌های گردش عمومی مبتنی بر گزارش ششم تغییر اقلیم با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در حوضه آبریز نکارود

پوریا مقدس^۱، عماد محجوبی^{۲*}، سعید قره‌چلو^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۳

چکیده

با توجه به تنوع و تعدد مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) بهره‌گیری از تمامی آن‌ها در برآورد و تخمین پارامترهای اقلیمی میسر نیست. بی‌شک به کارگیری مدل مناسب در شبیه‌سازی‌های اقلیمی می‌تواند دقت و میزان قطعیت مدل‌سازی را بهبود بخشد. در مطالعه حاضر، مدل‌های ACCESS-ESM1-5، GFDL-CM4، JIITM-ESM، JINM-CM4-8، IPSL-CM6A-LR، MPI-ESM1-2 و MRI-ESM2-0 از مجموعه گزارش ششم تغییر اقلیم بر اساس شرایط اقلیمی حوضه رودخانه نکارود با به‌کارگیری رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) شامل روش‌های برنامه‌ریزی‌سازی (CP)، تئوری بازی همکارانه (CGT)، روش اولویت‌دهی بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS) و روش میانگین وزنی (WAT) ارزیابی شده و رتبه‌نهایی مدل‌ها بر مبنای روش تصمیم‌گیری گروهی (GDM) تعیین گردید. برای بررسی کیفیت بارش برآوردی این مدل‌ها در تناسب با بارش مشاهداتی، از شاخص‌های ضریب همبستگی (CC)، ریشه میانگین انحراف مربع نرمال شده (NRMSD)، میانگین انحراف نسبی مطلق (AARD)، انحراف میانگین نرمال شده مطلق (ANMBD) و امتیاز مهارت (SS) استفاده شد. اثر وزنی شاخص‌های ارزیابی در هر یک از رویکردهای رتبه‌بندی، با روش آن‌تروپی مشخص شد. نتایج حاکی از آن است که شاخص CC، بالاترین اثرگذاری را در فرایند رتبه‌بندی مدل‌ها با اهمیت وزنی حدود ۴۵ درصد دارد. در نهایت، مدل GFDL-CM4 با امتیاز خالص ۱۸ در روش تصمیم‌گیری گروهی به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برآوردکننده بارش در این حوضه آبریز شناخته شد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌نویسی‌سازی، تپسیس، تئوری بازی همکارانه، روش میانگین وزنی، مدل گردش عمومی

مقدمه

دوره‌ای خاص مدنظر نیست و می‌تواند در چند دهه آینده اثربخشی خود را حفظ و یا تشدید کند. بر اساس پیش‌بینی و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، گرم شدن کره زمین، باعث خشک‌سالی شدید، گرمای سوزان و طوفان‌های وحشتناک تا سال ۲۱۰۰ خواهد شد (Rom and Pinkerton, 2021). در خصوص این پدیده، نه‌تنها فعالیت‌های وابسته به انسان بلکه افزایش رخداد فرایندهایی از قبیل فعالیت‌های آتش‌فشانی و در پی آن گرمایش زمین و همچنین فعالیت‌های خورشیدی می‌تواند مؤثر باشد (Solomon et al., 2007).

بارش یکی از کلیدی‌ترین متغیرهای آب‌وهوایی است که اثرات زیادی بر فرایندهای شیمیایی و فیزیکی از جمله چرخه هیدرولوژیکی، رشد گیاهان و تأمین منابع آبی دارد. تغییرات رژیم بارش که در اکثر نقاط جهان دیده می‌شود، می‌تواند حاکی از تشدید غلظت گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی باشد؛ به طوری که بر اساس گزارش پنجم هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم انتظار افزایش ۱/۸ تا ۴ درجه

در چند دهه اخیر رشد و توسعه فعالیت‌های صنعتی، تغییر کاربری اراضی و تخریب محیط‌زیست در پی رشد جمعیت منجر به افزایش گازهای گلخانه‌ای و برهم خوردن تعادل اقلیمی کره زمین شده که به آن پدیده تغییر اقلیم می‌گویند (Abbas et al., 2022). این پدیده می‌تواند روند درازمدت پارامترهای اقلیمی در منطقه‌ای خاص یا در سطح وسیعی از جهان را دچار تغییر سازد. این تغییرات صرفاً برای

- ۱- کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
- ۲- استادیار گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
- ۳- استادیار گروه نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: emahjoobi@shahroodut.ac.ir)

چندمعیاره^۹ (MCDM) بهره گرفتند. آن‌ها دریافتند که افزودن شاخص‌های ارزیابی بیشتر، در نظرگیری متغیرهای آب‌وهوایی بیشتر، به کارگیری مدل‌های GCM مختلف و تغییر در شیوه وزن‌دهی شاخص‌ها می‌تواند الگوی رتبه‌بندی حاصل را تغییر دهد (Raju and Kumar, 2014). نئوپانه و همکاران در پژوهشی در زمینه شبیه‌سازی حدی متغیرهای آب‌وهوایی، ارزیابی ۲۱ مدل گردش منطقه‌ای^{۱۰} (RCM) برای سه شهر آسیایی (بانکوک، هوشیمن و دره کاتماندو) را انجام دادند. آن‌ها چهار شاخص AARD، CC، NRMSD و ANMBD را برای ارزیابی کیفیت شش متغیر آب‌وهوایی روزهای خشک متوالی (SDD)، شاخص شدت روزانه (SDII)، تعداد روزهای بارندگی حدی (R50mm)، حداکثر بارش روزانه (RX1day)، میانگین حداکثر دمای روزانه و میانگین دمای حداقل روزانه به کار گرفتند. پروسه وزن‌دهی شاخص‌های چهارگانه توسط رویکرد آنتروپی صورت گرفت و در پی آن فرایند رتبه‌بندی این مدل‌ها با استفاده از روش میانگین وزنی^{۱۱} (WAT) انجام شد (Neupane et al., 2021). انیل و همکاران عملکرد ۲۴ مدل GCM را در شبیه‌سازی دمای حداقل و حداکثر برای کشور هند بررسی کردند. در مطالعه آن‌ها، رتبه‌بندی مدل‌ها بر اساس روش‌های برنامه‌ریزی سازشی^{۱۲} (CP) و اولویت‌دهی بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل^{۱۳} (TOPSIS) با بهره‌گیری از شاخص‌های ضریب کارایی نش ساتکلیف^{۱۴} (NSE)، فاصله باتاچاریا^{۱۵} (BD)، میانگین خطای مطلق^{۱۶} (MAE)، ریشه چهارم میانگین خطای چهار برابری (R4MS4E)، ضریب کارایی کلینگ-گوپتا^{۱۷} (KGE) و ضریب عدم قطعیت متقارن^{۱۸} (SU) انجام شد. همچنین این شاخص‌ها به وسیله روش آنتروپی وزن‌دهی شدند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که فرایند رتبه‌بندی مدل‌های GCM به طور گسترده به انتخاب مجموعه داده استخراج‌شده از نقاط شبکه‌بندی بستگی دارد. همچنین آن‌ها اذعان داشتند که انتخاب شاخص‌های ورودی برای ارزیابی کیفیت مدل‌ها و وزن‌های تخصیص داده شده به آن‌ها، نقش بسزایی در رتبه‌بندی مدل‌ها ایفا می‌کنند (Anil et al., 2021).

علی‌رغم در دسترس بودن تعداد زیادی GCM و پیشرفت‌های مداوم در توسعه مدل‌های جدید، هنوز مسائل مربوط به

سانتی‌گراد در متوسط دمای کره زمین تا پایان قرن ۲۱ می‌رود (Stocker et al., 2013). از این رو برای ارزیابی اثرات بالقوه این پدیده بر بارش و پیش‌بینی وضعیت اقلیمی در آینده، مدل‌های اقلیمی در سطوح وسیعی به کار گرفته می‌شوند (Gouda et al., 2018). مدل گردش عمومی جو^۱ (GCM)، مکانیسم سامانه‌های اقلیمی حاکم بر کره زمین را بررسی می‌کنند. مدل‌های GCM بر پایه قوانین فیزیکی و مبادله انرژی بین اتمسفر، اقیانوس و خشکی بوده و از معادلات دینامیکی و ترمودینامیکی سیالات پیروی می‌کنند. شبکه‌بندی لایه‌های تقسیم‌بندی شده در ابعادی به نام عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و عمق در اقیانوس‌ها و ارتفاع در اتمسفر شناخته می‌شود. اندازه تفکیک افقی شبکه‌بندی این مدل‌ها در حدود ۳۰۰ کیلومتر بوده و قادرند سیستم اقلیمی را با لحاظ نمودن اکثر فرایندها در مقیاس جهانی و یا قاره‌ای شبیه‌سازی کنند. این مدل‌ها برای مدل‌سازی هر یک از متغیرهای اقلیمی نیازمند محاسبه، ذخیره و تکرار محاسبات در هر یک از نقاط شبکه هستند (Kheireldin et al., 2020).

با توجه به تنوع مؤسسات و پژوهشکده‌های مختلف توسعه‌دهنده این مدل‌ها که هر یک نیز بر پایه معادلات و فرضیات خاصی اقدام به مدل‌سازی فرایندهای اقیانوسی و جوی می‌کنند، محققین زیادی در مطالعات در زمینه تغییر اقلیم از روش‌های رتبه‌بندی با هدف انتخاب مدل یا مدل‌های برتر GCM بهره گرفته‌اند. فوردهام و همکاران با استفاده از شاخص امتیاز مهارت^۲ (SS)، مهارت بارش برآوردی ۲۰ مدل GCM بر روی استرالیا را در بازتولید الگوهای مشاهداتی ۲۰ ساله ارزیابی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که رتبه‌بندی مدل بر اساس این شاخص می‌تواند تطابق بارش شبیه‌سازی‌شده مدل و بارش مشاهداتی را به خوبی ارزیابی کند (Fordham et al., 2011). راجو و کومار برای رتبه‌بندی ۱۱ مدل GCM با هدف انتخاب بهترین بارش برآوردی، از پنج شاخص ضریب همبستگی^۳ (CC)، ریشه میانگین انحراف مربع نرمال شده^۴ (NRMSD)، انحراف میانگین نرمال شده مطلق^۵ (ANMBD)، میانگین انحراف نسبی مطلق^۶ (AARD) و SS استفاده کردند. آن‌ها از روش آنتروپی^۷ برای تعیین وزن شاخص‌ها و از روش PROMETHEE-2^۸ به عنوان روش تصمیم‌گیری

9 Multi Criterion Decision-Making Techniques

10 Regional Climate Model

11 Weighted Average

12 Compromise Programming

13 Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution

14 Nash Sutcliff Efficiency

15 Bhattachary Distance

16 Mean Absolute Error

17 Kling-Gupta Efficiency

18 Symmetrical Uncertainty

1 General Circulation Model

2 Skill Score

3 Pearson Correlation Coefficient

4 Normalized Root Mean Square Deviation

5 Absolute Normalized Mean Bias Deviation

6 Average Absolute Relative Deviation

7 Entropy Technique

8 Preference Ranking Organization Method of Enrichment Evaluation

داده‌های مورد استفاده

داده‌های مشاهداتی حوضه آبریز رودخانه نکارود مربوط به بازه ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۴ شامل بارش روزانه ایستگاه‌های باران‌سنجی سفیدچاه، پچیم، بارکلا، تاش و گلورد برحسب میلی‌متر از سازمان آب منطقه‌ای استان مازندران و سازمان هواشناسی کشور گردآوری شد. برای یکپارچه‌سازی و دستیابی به بارش توزیعی منطقه از روش چندضلعی‌های تیسن استفاده شد (جدول ۱). داده‌های بارش برآوردی هفت مدل GCM مبتنی بر گزارش ششم تغییر اقلیم نیز از وبگاه www.esgf-node.llnl.gov در مقیاس روزانه و در بازه زمانی ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۴ استخراج شد (جدول ۲).

در شکل (۲) روندنمای پژوهش حاضر نشان داده شده است. بر این اساس پس از گردآوری داده‌های مشاهداتی و استخراج داده‌های مدل‌های GCM، اقدام به محاسبه شاخص‌های ارزیابی عملکرد و تعیین ماتریس بازده مربوطه شد. پس از نرمال‌سازی این ماتریس، وزن هر یک از شاخص‌ها به روش آنتروپی تعیین گردید. سپس با استفاده از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره، اولویت‌بندی هر یک از مدل‌های GCM مشخص و در نهایت مدل برتر انتخاب شد.

شاخص‌های ارزیابی مدل‌های اقلیمی

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های GCM باید توانایی داده‌های شبیه‌سازی شده این مدل‌ها را در برآورد سری زمانی مشاهداتی تاریخی مورد بررسی قرار داد (Nashwan and Shahid, 2020). این شاخص‌ها مبنایی برای ارزیابی سطح اطمینان خروجی مدل‌های GCM فراهم می‌آورند. در این مطالعه، از میان شاخص‌های شناخته شده مورد استفاده در مطالعات مختلف در زمینه ارزیابی عملکرد، از شاخص‌های CC، NRMSD، AARD، ANMBD و SS بهره گرفته شد (Anandhi and Nanjundiah, 2015; Li et al., 2016; Raju et al., 2017; Raju and Kumar, 2020; Sreelatha and Anand Raj, 2021; Neupane et al., 2021). در جدول ۳، x_i مقادیر مشاهداتی، y_i مقادیر شبیه‌سازی، \bar{x} میانگین مقادیر مشاهداتی، \bar{y} میانگین مقادیر شبیه‌سازی، n تعداد داده‌ها، b تعداد دسته‌های انتخابی برای محاسبه تابع چگالی احتمال^۲ (PDF) منطقه، f_o فراوانی مقادیر مشاهداتی در هر دسته و f_m فراوانی مقادیر شبیه‌سازی در هر دسته هستند.

پس از محاسبه شاخص‌های فوق برای تسهیل سنجش شاخص‌های مختلف غیرقابل مقایسه در یک فضای یکسان، اقدام به نرمال‌سازی آن‌ها طبق رابطه زیر شد (Anil et al., 2021):

عدم قطعیت‌های بزرگ با توجه به شرایط اقلیمی آینده قابل اجتناب نیستند. از طرفی عدم قطعیت‌های ذاتی، همراه با عوامل دیگری مانند محدودیت‌های زمانی، دسترسی به منابع انسانی، یا محدودیت‌های محاسباتی، انتخاب مناسب‌ترین مجموعه مدل‌های GCM را برای مطالعات در زمینه اثرات ارزیابی تغییرات اقلیمی ضروری می‌کند (Khan et al., 2018).

هدف اصلی این مطالعه ارزیابی و انتخاب مناسب‌ترین مدل اقلیمی از میان هفت مدل GCM شامل ACCESS-ESM1-5، IPSL-CM6A-، INM-CM4-8، IITM-ESM، GFDL-CM4، MRI-ESM2-0 و MPI-ESM1-2، LR می‌باشد. در این راستا برای انتخاب بهترین مدل، از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره بر پایه روش‌های CP، تئوری بازی همکارانه^۱ (CGT)، TOPSIS و WAT استفاده شد. نحوه رتبه‌بندی این روش‌های چندمعیاره بر اساس به کارگیری شاخص‌هایی همچون CC، NRMSD، AARD، ANMBD و SS می‌باشد. در نهایت مدل برتر بر اساس روش تصمیم‌گیری گروهی (GDM) مشخص شد. اهداف خاص این مطالعه عبارت‌اند از: الف) ارزیابی عملکرد پارامتر بارش مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی بارش اقلیمی گذشته (ب) نمایش وزن هر شاخص با به کارگیری روش آنتروپی (ج) رتبه‌بندی مدل‌های GCM بر اساس روش‌های MCDM. مهم‌ترین فرضیه در این تحقیق بر این اصل استوار است که مدل اقلیمی با مهارت بالا در بازتولید اقلیم گذشته، عملکرد بهتری را در ارزیابی روند اقلیمی آینده ارائه خواهد داد.

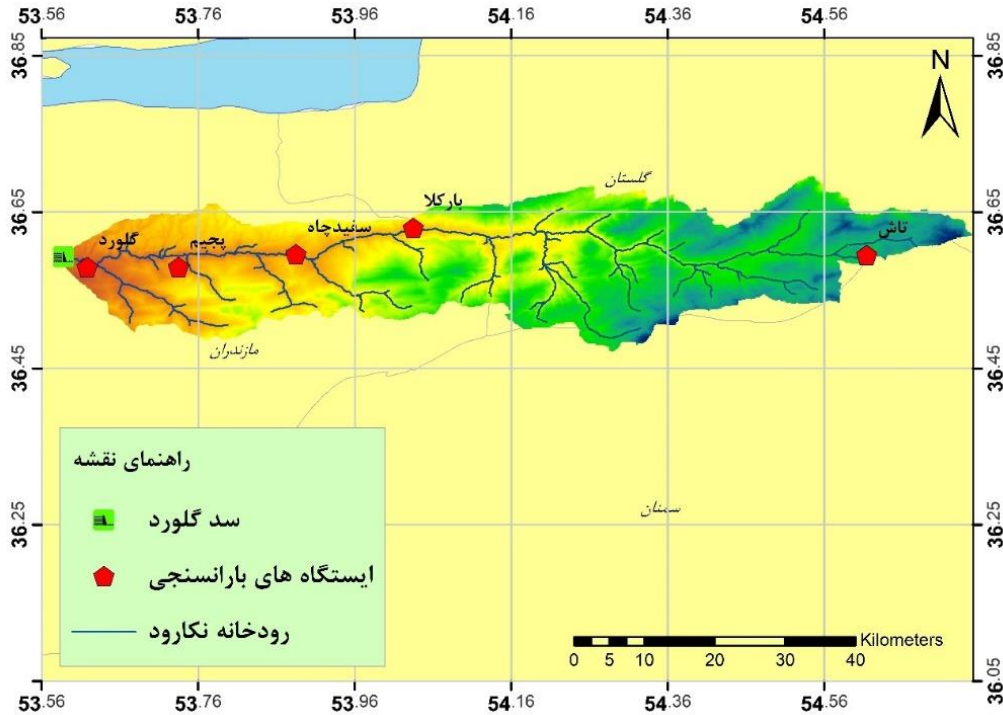
روش انجام کار

منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه این پژوهش، حوضه آبریز رودخانه نکارود با مساحت ۱۴۳۶ کیلومتر مربع واقع در استان مازندران با مختصات طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۴۴ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۱ دقیقه شمالی است. این رودخانه از شاهکوه در جنوب شرقی شهرستان گرگان سرچشمه گرفته و پس از پیمایش ۱۷۵ کیلومتر که بخش عمده آن در رشته‌کوه البرز قرار دارد، نهایتاً به دریای خزر می‌ریزد. در بالادست این حوضه پوشش گیاهی از نوع مرتع و جنگلی و در پایین دست کاربری کشاورزی و مسکونی است. همچنین زمین‌شناسی حوضه از جنس لایه نازک آهکی تشکیل شده است. شکل (۱) حوضه آبریز رودخانه نکارود تا قبل از سد گلورد را به همراه موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی نشان می‌دهد.

مقدار k_{aj} مقدار نرمال شده شاخص z برای مدل a ، مقدار $K_j(a)$ مقدار شاخص z برای مدل a و T نشان دهنده تعداد مدل هاست.

$$k_{aj} = \frac{K_j(a)}{\sum_{a=1}^T K_j(a)} \quad (1)$$



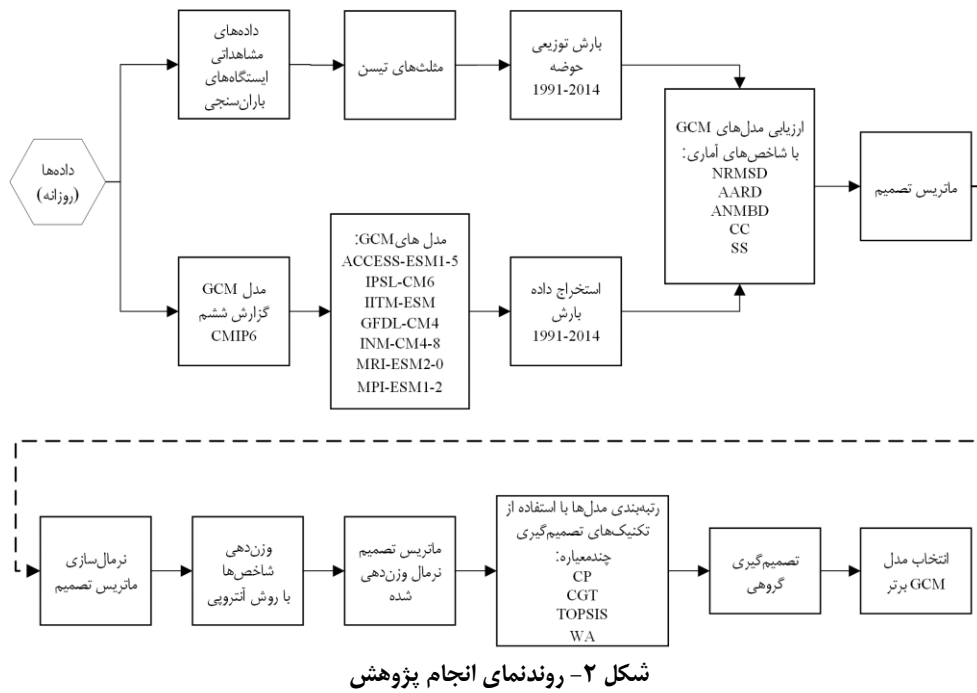
شکل ۱- حوضه مورد مطالعه و پراکندگی ایستگاه های باران سنجی منتخب

جدول ۱- مشخصات ایستگاه های باران سنجی مورد استفاده

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	مساحت تحت پوشش (Km ²)
سفیدچاه	۵۳/۸۷	۳۶/۵۷	۱۰۴۰	۱۸۷
بارکلا	۵۴/۰۱	۳۶/۶۲	۱۴۳۰	۵۳۲
پجیم	۵۳/۷۲	۳۶/۵۶	۱۲۵۰	۲۰۵
گلورد	۵۳/۶۳	۳۶/۵۷	۶۰۰	۷۳
تاش	۵۴/۵۸	۳۶/۵۷	۲۴۸۸	۴۳۳

جدول ۲- مشخصات مدل های اقلیمی

مدل	قدرت تفکیک	کشور	مؤسسه
ACCESS-ESM1-5	۱/۲۵° × ۱/۸۷°	استرالیا یا	انجمن اقلیم استرالیا
IPSL-CM6	۱/۳° × ~۲/۵°	فرانسه	مؤسسه پیر سیمون لاپلاس
IITM-ESM	۱/۲۵° × ۱/۸۷۵°	هند	مؤسسه هواشناسی گرمسیری هند
GFDL-CM4	۱° × ۱/۲۵°	آمریکا	آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیک
INM-CM4-8	۱/۵° × ۲°	روسیه	مؤسسه ریاضیات عددی آکادمی علوم روسیه
MRI-ESM2-0	۱/۱° × ~۱/۱۲۵°	ژاپن	مؤسسه تحقیقات هواشناسی
MPI-ESM1-2	۱/۱° × ~۱/۱۲۵°	آلمان	مؤسسه ماکس پلانک



شکل ۲- روندنمای انجام پژوهش

جدول ۳- شاخص‌های آماری ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی

شاخص	نماد	رابطه ریاضی	کمینه، بیشینه، بهینه
ضریب همبستگی	CC	$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$	منفی یک، یک، یک
ریشه میانگین انحراف مربع نرمال شده	NRMSD	$NRMSD = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}}{\bar{x}}$	صفر، بی‌نهایت، صفر
میانگین انحراف نسبی مطلق	AARD	$AARD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{y_i - x_i}{x_i} \right $	صفر، بی‌نهایت، صفر
انحراف میانگین نرمال شده مطلق	ANMBD	$ANMBD = \left \frac{\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n (y_i - x_i))}{\bar{x}} \right $	صفر، بی‌نهایت، صفر
امتیاز مهارت	SS	$SS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^b \min(f_m, f_o)$	صفر، یک، یک

وزن‌دهی شاخص‌ها به روش آنتروپی

در ادامه برای تعیین وزن شاخص‌ها از روش وزن‌دهی به روش آنتروپی (Entropy) استفاده شد. در این روش که مقدار عدم اطمینان در یک توزیع احتمال را بیان می‌کند، وزن‌دهی بر اساس میزان درجه انحراف^۱ (Dd_j) هر شاخص که مبین میزان اطلاعات مفید هر شاخص برای تصمیم‌گیری است انجام می‌شود؛ به طوری که هر چه میزان پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد آن شاخص از اهمیت بیشتری برخوردار است و هر چه مقادیر اندازه‌گیری شده، به هم نزدیک باشند، نشان‌دهنده آن است که

گزینه‌های متقابل از نظر آن شاخص تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند؛ به عبارت دیگر وقایع با احتمال وقوع زیاد، اطلاعات کمتری در اختیار می‌گذارند و برعکس هر چقدر احتمال وقوع یک رخداد کمتر باشد، اطلاعات حاصل از آن بیشتر است (Refaey et al., 2019; Anil et al., 2021).

$$En_j = -\frac{1}{\ln(T)} \sum_{a=1}^T k_{aj} \ln(k_{aj}) \quad (۲)$$

$$Dd_j = 1 - En_j \quad (۳)$$

(T)، گروه رتبه‌های بالا و پایین مشخص می‌شوند؛ به این ترتیب که حد پایین گروه بالایی (X) برای تعداد زوج مدل‌ها به صورت $\frac{T}{2}$ و برای تعداد فرد مدل‌ها به صورت $\frac{T}{2} + 1$ و حد بالای گروه پایینی (Y) معادل X+1 تعیین می‌شود. سپس قدرت هر مدل از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$ST_a = \sum_{k=1}^m \sum_{z=1}^X (X - z + 1) q_{az}^k \quad (11)$$

به طوری که اگر مدل a در روش تصمیم‌گیری k در رتبه z که بین ۱ تا X است قرار داشته باشد، q_{az}^k برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است. به طور مشابه ضعف هر مدل نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$WE_a = \sum_{k=1}^m \sum_{z=y}^T (z - Y + 1) q_{az}^k \quad (12)$$

به طوری که اگر مدل a در روش تصمیم‌گیری k در رتبه z که بین Y تا T است قرار داشته باشد، q_{az}^k برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است. در نهایت قدرت خالص هر مدل به صورت زیر مشخص می‌شود. هر چه این شاخص بیشتر باشد، مدل مناسب‌تر است.

$$NS_a = ST_a - WE_a \quad (13)$$

نتایج و بحث

به منظور رتبه‌بندی مدل‌های GCM، ماتریس بازده بر اساس مقادیر کمی هر شاخص ارزیابی عملکرد تشکیل شد (جدول ۴). مقادیر محاسباتی این شاخص‌ها، بر اساس ارزیابی میان بارش برآوردی نزدیک‌ترین نقطه شبکه‌بندی از هر مدل GCM و بارش مشاهداتی به دست آمد. بررسی مقادیر شاخص‌های مختلف نشان می‌دهد که از منظر شاخص NRMSD مدل INM-CM4-8، شاخص AARD مدل IITM-ESM، شاخص ANMBD مدل MRI-ESM2-0 و بر اساس شاخص‌های CC و SS مدل GFDL-CM4 شرایط بهتری را ارائه می‌دهد؛ بنابراین برای انتخاب مدل برتر نیاز به تعیین وزن هر شاخص است. بر این اساس مقادیر نرمال شده محاسباتی هر یک از شاخص‌های ارزیابی عملکرد با به‌کارگیری رابطه ۲، در جدول ۵ نشان داده شده است. میزان آنتروپی و Ddj هر یک از شاخص‌ها نیز بر اساس رابطه ۳ و ۴ به دست آمده و در نهایت فرایند وزن‌دهی شاخص‌ها مطابق رابطه ۵ انجام شد (جدول ۶).

$$r_j = \frac{Dd_j}{\sum_{j=1}^J Dd_j} \quad (4)$$

در روابط فوق، En_j ، مقدار آنتروپی، Dd_j ، میزان درجه انحراف و T_j وزن هر شاخص است.

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

رویکرد CP بر اساس کمترین فاصله‌ی اندازه‌گیری شده از یک مقدار ایده‌آل ارائه شده است (Sreelatha and Anand Raj, 2021).

$$Lp_a = \left[\sum_{j=1}^J r_j^p |k_j^* - k_j(a)|^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (5)$$

در این رابطه Lp_a فاصله اندازه‌گیری شده مدل k_j^* مقدار ایده‌آل شاخص j ، p یک پارامتر انتخابی ($1, 2, \dots, \infty$) است. روش CGT بر اساس بیشترین فاصله هندسی از مقدار غیر ایده‌آل پایه‌ریزی شده است (Vassoney et al., 2021).

$$D_a = \prod_{j=1}^J |k_j(a) - k_j^{**}|^{r_j} \quad (6)$$

در این رابطه D_a فاصله هندسی مدل a و k_j^{**} مقدار غیر ایده‌آل شاخص j است.

TOPSIS مبتنی بر فاصله تا مقدار ایده‌آل و غیر ایده‌آل بوده و به دنبال بیشترین نزدیکی نسبی^۱ با مقدار غیر ایده‌آل است (Sharma and Kale, 2022).

$$DS_a^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^J r_j^2 (k_j(a) - k_j^*)^2} \quad (7)$$

$$DS_a^- = \sqrt{\sum_{j=1}^J r_j^2 (k_j(a) - k_j^{**})^2} \quad (8)$$

$$CR_a = DS_a^- / (DS_a^- + DS_a^+) \quad (9)$$

در روابط فوق اندازه‌گیری DS_a^+ فاصله تا مقدار ایده‌آل، DS_a^- فاصله تا مقدار غیر ایده‌آل و CR_a بیانگر نزدیکی نسبی مدل a است. WAT بر مبنای میانگین وزنی شاخص‌ها استوار بوده و دربرگیرنده اهمیت نسبی هر شاخص است (Raju et al., 2018).

$$V_a = \sum_{j=1}^J r_j k_j \quad (10)$$

روش تصمیم‌گیری گروهی (GDM) فرآیندی است که نتایج اولویت‌دهی رویکردهای مختلف را با هم ادغام نموده و رتبه نهایی مدل‌ها را تعیین می‌کند. در این روش ابتدا بر اساس تعداد مدل‌ها

جدول ۴- ماتریس بازده شاخص‌های ارزیابی عملکرد هر مدل

SS	CC	ANMBD	AARD	NRMSD	GCM
۰/۹۵۰	۰/۰۰۸	۰/۴۹۰	۰/۲۸۲	۰/۸۶۴	ACCESS-ESM1-5
۰/۹۸۶	۰/۰۰۵	۰/۲۶۶	۰/۲۱۳	۰/۳۸۱	IPSL-CM6A-LR
۰/۹۸۹	۰/۰۲۲	۰/۱۷۴	۰/۶۷۸	۰/۳۰۵	GFDL-CM4
۰/۹۴۳	۰/۰۰۹	۰/۶۷۱	۰/۱۸۹	۰/۸۱۰	IITM-ESM
۰/۹۳۹	۰/۰۰۴	۰/۷۰۲	۰/۲۱۳	۰/۷۳۸	INM-CM4-8
۰/۹۴۷	۰/۰۰۵	۰/۶۷۱	۰/۰۳۹	۰/۰۳۸	MPI-ESM1-2
۰/۹۸۳	۰/۰۱۱	۰/۱۵۶	۰/۰۰۷	۰/۷۴۶	MRI-ESM2-0

جدول ۵- ماتریس بازده نرمال شده شاخص‌های ارزیابی عملکرد هر مدل

SS	CC	ANMBD	AARD	NRMSD	GCM
۰/۱۴۱	۰/۱۳۴	۰/۱۵۷	۰/۰۹۴	۰/۱۳۱	ACCESS-ESM1-5
۰/۱۴۶	۰/۰۷۹	۰/۰۸۵	۰/۱۶۲	۰/۱۵۵	IPSL-CM6A-LR
۰/۱۴۷	۰/۳۴۶	۰/۰۵۶	۰/۱۹۷	۰/۱۵۱	GFDL-CM4
۰/۱۴۰	۰/۱۴۱	۰/۲۱۴	۰/۰۸۷	۰/۱۲۸	IITM-ESM
۰/۱۳۸	۰/۰۵۹	۰/۲۲۴	۰/۰۸۹	۰/۱۲۵	INM-CM4-8
۰/۱۴۱	۰/۰۸۱	۰/۲۱۴	۰/۱۵۰	۰/۱۳۹	MPI-ESM1-2
۰/۱۴۶	۰/۱۶۹	۰/۰۵۰	۰/۲۲۱	۰/۱۷۱	MRI-ESM2-0

جدول ۶- مقادیر وزن نرمال شده هر یک از شاخص‌ها

SS	CC	ANMBD	AARD	NRMSD	
۰/۹۹۹۹	۰/۹۱۲۲	۰/۹۲۷۹	۰/۹۶۷۹	۰/۹۹۷۰	En_j
۰/۰۰۰۱	۰/۰۸۷۸	۰/۰۷۲۱	۰/۰۳۲۱	۰/۰۰۳۰	Dd_j
۰/۰۰۰۷	۰/۴۵۰۱	۰/۳۶۹۵	۰/۱۶۴۴	۰/۰۱۵۳	r_j

جدول ۸- رتبه‌بندی مدل‌های GCM به روش CP

Rank	L_p	GCM
۳	۰/۱۰۸	ACCESS-ESM1-5
۵	۰/۱۲۲	IPSL-CM6A-LR
۱	۰/۰۱۸	GFDL-CM4
۴	۰/۱۱۱	IITM-ESM
۷	۰/۱۴۴	INM-CM4-8
۶	۰/۱۳۴	MPI-ESM1-2
۲	۰/۰۸۳	MRI-ESM2-0

رتبه‌بندی مدل‌ها به روش CP

محاسبه شاخص اندازه‌گیری L_p برای هر مدل GCM مطابق با رابطه ۶ بر اساس ماتریس بازده نرمال شده (جدول ۵) و مقادیر وزن‌های تخصیص داده شده r_j (جدول ۶) صورت گرفت. پارامتر انتخابی p برابر ۲ فرض شد؛ همچنین k_j^* بر اساس مقادیر ایده‌آل شاخص‌های ارزیابی عملکرد CC ، SS ، $NRMSD$ ، $AARD$ و $ANMBD$ تعیین شد (جدول ۷). الگوی رتبه‌بندی با روش CP بر این اساس استوار است که مقادیر پایین L_p مناسب‌ترین مدل را تعیین می‌سازد. نتایج رتبه‌بندی مدل‌های GCM به روش CP در جدول ۸ آورده شده است. مشاهده می‌شود که مدل‌های GFDL-CM4، ACCESS-ESM1-5 و MRI-ESM2-0 در رتبه‌های اول تا سوم این روش قرار دارند.

رتبه‌بندی مدل‌ها به روش CGT

فرایند محاسبه مقادیر D_a هر مدل بر اساس رابطه ۷ با به‌کارگیری مقادیر نرمال شاخص‌های ارزیابی عملکرد (جدول ۵) و با اعمال مقادیر وزن‌های تخصیص داده شده r_j به هر یک از شاخص‌ها (جدول ۶) صورت گرفت. مقدار غیر ایده‌آل هر شاخص در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۹- مقادیر غیر ایده‌آل هر یک از شاخص‌ها

SS	CC	ANMBD	AARD	NRMSD	شاخص
۰/۱۴	۰/۰۶	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۱۷	k_j^{**}

جدول ۷- مقادیر ایده‌آل هر یک از شاخص‌ها

SS	CC	ANMBD	AARD	NRMSD	شاخص
۰/۱۵	۰/۳۵	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۱۳	k_j^*

فرایند رتبه‌بندی بر اساس D_a بیشتر انجام می‌گیرد. به طوری که

نرمال شده (جدول ۵) و مقادیر r_j (جدول ۶)، تعیین شدند. بر این اساس مدل‌های GFDL-CM4، IITM-ESM و MPI-ESM1-2 در رتبه‌های اول تا سوم این روش قرار دارند (جدول ۱۲).

جدول ۱۲- رتبه‌بندی مدل‌های GCM به روش WAT

Rank	V_a	GCM
۵	۰/۱۳۱	ACCESS-ESM1-5
۷	۰/۰۹۶	IPSL-CM6A-LR
۱	۰/۲۱۱	GFDL-CM4
۲	۰/۱۵۹	IITM-ESM
۶	۰/۱۲۶	INM-CM4-8
۳	۰/۱۴۳	MPI-ESM1-2
۴	۰/۱۳۴	MRI-ESM2-0

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مطالعه، رتبه‌بندی و انتخاب مناسب‌ترین مدل GCM در حوضه رودخانه نکارود است. این امر در توسعه سیاست‌های قابل‌اعتماد در راستای مطالعات در زمینه کاهش اثرات تغییر اقلیم ضروری است. به همین جهت با به‌کارگیری شاخص‌های CC، NRMSD، ANMBD، AARD و SS ارزیابی کیفی هفت مدل GCM در برآورد بارش مشاهداتی توزیعی حوضه انجام شد. سپس این شاخص‌ها با استفاده از رویکرد آنتروپی وزن‌دهی شدند. میزان وزن‌های تخصیص داده شده، نقش بسیار زیادی در تعیین رتبه‌بندی با روش‌های MCDM دارند؛ به طوری که شاخص‌های CC و SS به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین میزان اثرگذاری را در نتایج رتبه‌بندی با روش‌های مختلف داشتند. وزن هر یک از شاخص‌ها در روش آنتروپی بر اساس میزان پراکندگی مقادیر نرمال شده و مقدار درجه انحراف آن‌ها مشخص می‌شود؛ به طوری که پراکندگی و تنوع عددی مقادیر هر شاخص به مفهوم بیشتر بودن درجه انحراف آن و در نتیجه بالاتر بودن وزن اهمیت شاخص است. با وجود اینکه مقادیر عددی شاخص CC برای تمامی مدل‌ها در محدوده کمی قرار دارد، اما میزان پراکندگی و به دنبال آن درجه انحراف این شاخص باعث بالاتر بودن وزن آن نسبت به سایر شاخص‌ها شده و لذا بیشترین تأثیرگذاری را در فرایند رتبه‌بندی ارائه داده است. شکل (۳) درصد اهمیت وزنی هر شاخص را نشان می‌دهد. همچنین با مقایسه‌ی ضریب همبستگی میان نتایج رتبه‌بندی این چهار روش می‌توان نتیجه گرفت، رویکرد CP و Topsis رتبه‌بندی مشابهی را ارائه می‌دهند. ارتباط خطی میان نتایج رتبه‌بندی در جدول ۱۳ قابل‌مشاهده است.

اولین رتبه به مدلی تعلق می‌گیرد که مقدار حداکثری از معیار D_a را داشته باشد. در نتیجه مدل GFDL-CM4 به‌عنوان متناسب‌ترین مدل تعیین شد. نتایج رتبه‌بندی مدل‌ها به‌وسیله رویکرد CGT در جدول ۱۰ آورده شده است. بر این اساس مدل‌های GFDL-CM4، ACCESS-ESM1-5 و IPSL-CM6A-LR در رتبه‌های اول تا سوم این روش قرار دارند.

جدول ۱۰- رتبه‌بندی مدل‌های GCM به روش CGT

Rank	D_a	GCM
۲	۰/۰۷۳	ACCESS-ESM1-5
۳	۰/۰۴۸	IPSL-CM6A-LR
۱	۰/۱۵۰	GFDL-CM4
۴	۰/۰۴۰	IITM-ESM
۶	.	INM-CM4-8
۵	۰/۰۲۰	MPI-ESM1-2
۶	.	MRI-ESM2-0

رتبه‌بندی مدل‌ها به روش TOPSIS

مقادیر ایده‌آل شاخص‌های ارزیابی عملکرد در جدول ۷ و مقادیر غیر ایده‌آل آن‌ها در جدول ۹ نشان داده شده است. فاصله تا مقدار ایده‌آل DS_a^+ و غیر ایده‌آل DS_a^- به ترتیب مطابق روابط ۸ و ۹ بر اساس مقادیر نرمال شده شاخص‌ها (جدول ۵) و اعمال وزن‌های تخصیص داده شده r_j (جدول ۶)، به دست آمده و نهایتاً مقادیر CR_a بر اساس رابطه ۱۰ محاسبه شدند. نظر بر اینکه سازوکار رتبه‌بندی روش TOPSIS بر اساس مقادیر بیشینه پارامتر CR_a می‌باشد، مدل GFDL-CM4 بالاترین رتبه را به خود اختصاص داد. نتایج رتبه‌بندی به روش TOPSIS در جدول ۱۱ آورده شده‌اند. مشاهده می‌شود که مدل‌های GFDL-CM4، MRI-ESM2-0 و IPSL-CM6A-LR در رتبه‌های اول تا سوم این روش قرار دارند.

جدول ۱۱- رتبه‌بندی مدل‌های GCM به روش TOPSIS

Rank	CR_a	DS_a^-	DS_a^+	GCM
۴	۰/۲۸۸	۰/۰۴۴	۰/۱۰۸	ACCESS-ESM1-5
۳	۰/۳۰۴	۰/۰۵۳	۰/۱۲۲	IPSL-CM6A-LR
۱	۰/۸۸۸	۰/۱۴۳	۰/۰۱۸	GFDL-CM4
۵	۰/۲۷۹	۰/۰۴۳	۰/۱۱۱	IITM-ESM
۶	۰/۱۳۰	۰/۰۲۲	۰/۱۴۴	INM-CM4-8
۷	۰/۱۰۵	۰/۰۱۶	۰/۱۳۴	MPI-ESM1-2
۲	۰/۴۹۶	۰/۰۸۱	۰/۰۸۳	MRI-ESM2-0

رتبه‌بندی مدل‌ها به روش WAT

پارامتر V_a مطابق رابطه ۱۱ و بر اساس مقادیر شاخص‌های

بررسی اثرات تغییر اقلیم برای حوضه رودخانه نکارود می‌باشد. مدل‌های ACCESS-ESM1-5 و MRI-ESM2-0 با عملکردی تقریباً مشابه در جایگاه بعدی قرار دارند. مدل INM-CM4-8 نیز ضعیف‌ترین عملکرد را در برآورد بارش این منطقه داشته است (جدول ۱۴).

جدول ۱۴- رتبه‌بندی مدل‌های GCM به روش‌های MCDM

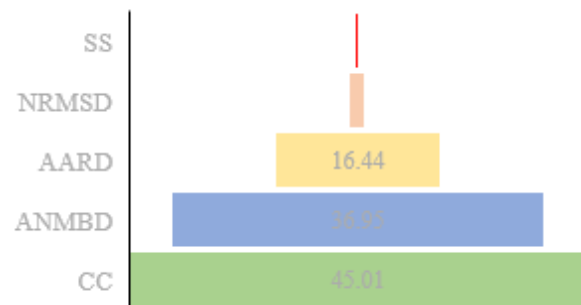
WAT	TOPSIS	CGT	CP	GCM
۵	۴	۲	۳	ACCESS-ESM1-5
۷	۳	۳	۵	IPSL-CM6
۱	۱	۱	۱	GFDL-CM4
۲	۵	۴	۴	IITM-ESM
۶	۶	۶	۷	INM-CM4-8
۳	۷	۵	۶	MPI-ESM1-2
۴	۲	۶	۲	MRI-ESM2-0

در نهایت با استفاده از روش تصمیم‌گیری گروهی، رتبه نهایی هر یک از مدل‌ها بر اساس نتایج اولویت‌بندی روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره مشخص شد. جدول (۱۵) محاسبات مربوطه را نشان می‌دهد.

جدول ۱۵- رتبه‌بندی مدل‌های GCM به روش‌های MCDM

Rank	NS _a	WE _a	ST _a	GCM
۲	۷	$(5-5.5+1) = 0.5$	$(4.5-3+1) + (4.5-2+1) + (4.5-4+1) = 7.5$	ACCESS-ESM1-5
۴	۲	$(5-5.5+1) + (7-5.5+1) = 3$	$(4.5-3+1)*2 = 5$	IPSL-CM6A-LR
۱	۱۸	0	$(4.5-1+1)*4 = 18$	GFDL-CM4
۳	۶	$(5-5.5+1) = 0.5$	$(4.5-4+1)*2 + (4.5-2+1) = 6.5$	IITM-ESM
۶	۷-	$(7-5.5+1) + (6-5.5+1)*3 = 7$	0	INM-CM4-8
۵	۲-	$(6-5.5+1) + (5-5.5+1) + (7-5.5+1) = 4.5$	$(4.5-3+1) = 2.5$	MPI-ESM1-2
۲	۷	$(6-5.5+1) = 1.5$	$(4.5-2+1)*2 + (4.5-4+1) = 8.5$	MRI-ESM2-0

مدل GCM، می‌تواند عدم قطعیت موجود در مدل‌سازی‌های اقلیمی را کاهش داده و شرایط پایدارتری را فراهم آورد. فرایند یکپارچه‌سازی مدل‌ها را می‌توان با محاسبه میانگین حسابی یا با پیروی از یک روش وزن‌دهی توسعه‌یافته انجام داد تا عدم قطعیت در مدل‌سازی کاهش یابد. مدل‌های در نظر گرفته شده در این راستا باید قابل اعتماد باشند، به عنوان مثال، می‌بایست مقایسه شبیه‌سازی مدل‌های GCM با اقلیم مشاهده‌شده، با در نظر گرفتن معیارهای عملکرد، باشد. لازم به ذکر است، یافته‌های این پژوهش می‌تواند در مطالعات ارزیابی مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی در حوضه رودخانه نکارود مفید واقع شود.



شکل ۳- درصد اهمیت وزنی هر شاخص

جدول ۱۳- ضریب همبستگی میان نتایج رتبه‌بندی روش‌های مختلف

WAT	TOPSIS	CGT	CP	ضریب همبستگی
۰/۵۴	۰/۱۶	۰/۵۹	۱	CP
۰/۳۴	۰/۵۵	۱		CGT
۰/۱۸	۱			TOPSIS
۱				WAT

با مقایسه کلی نتایج رتبه‌بندی این روش‌ها می‌توان اذعان داشت، مدل GFDL-CM4 نخستین رتبه را در هر چهار روش کسب نموده و متناسب‌ترین مدل برای ارزیابی پژوهش‌های در زمینه

بر این اساس مدل GFDL-CM4 به طور قابل ملاحظه‌ای از باقی مدل‌ها در برآورد بارش حوضه آبریز نکارود برتری دارد. مدل‌های ACCESS-ESM1-5، MRI-ESM2-0 و IITM-ESM عملکرد تقریباً مشابهی داشته و در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارند. مدل‌های MPI-ESM1-2 و INM-CM4-8 نیز در برآورد بارش این حوضه ضعف داشته و مناسب نیستند. تعمیم فرایند ارزیابی مدل‌های اقلیمی بر اساس سایر پارامترهای هیدروکلیماتولوژی همچون دما (متوسط، حداقل و حداکثر)، رطوبت، باد و غیره می‌تواند پروسه انتخاب مناسب‌ترین مدل GCM را دقیق‌تر سازد. در چنین شرایطی، به کارگیری هر پارامتر اقلیمی از هر

- analysis. *Climate Research*, 60(2): 103-117.
- Raju, K. S., Sonali, P. and Nagesh Kumar, D. 2017. Ranking of CMIP5-based global climate models for India using compromise programming. *Theoretical and Applied Climatology*. 128(3): 563-574.
- Raju, K. S., Nagesh Kumar, D., Srinivasa Raju, K. and Kumar, D. N. 2018. Selection of global climate models. *Impact of Climate Change on Water Resources: With Modeling Techniques and Case Studies*. 27-75.
- Raju, K. S. and Kumar, D. N. 2020. Review of approaches for selection and ensembling of GCMs. *Journal of Water and Climate Change*. 11(3): 577-599.
- Refaey, M. A., MHassan, H. M. and Aboelkhear, M. 2019. Multi Criterion Decision Making Techniques for Ranking Regional climate models Over Wadi El-Natron Catchment. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 13(5): 85-96.
- Rom, W. N. and Pinkerton, K. E. 2021. Introduction: Consequences of Global Warming to Planetary and Human Health. *Climate Change and Global Public Health*, 1-33.
- Sharma, A. and Kale, G. D. 2022. Ranking of general circulation models for Surat City by using a hybrid approach. *Water Practice & Technology*. 17(10): 2186-2198.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., and Miller, H. L. 2007. IPCC fourth assessment report: The physical science basis.
- Sreelatha, K. and Anand Raj, P. 2021. Ranking of CMIP5-based global climate models using standard performance metrics for Telangana region in the southern part of India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 27(1): 556-565.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M. M. M. B., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P. M. 2013. The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Computational Geometry*. 18(2): 95-123.
- Vassoney, E., Mammoliti Mochet, A., Desiderio, E., Negro, G., Pilloni, M. G. and Comoglio, C. 2021. Comparing multi-criteria decision-making methods for the assessment of flow release scenarios from small hydropower plants in the alpine area. *Frontiers in Environmental Science*. 9: 635100.
- Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H. and Younis, I. 2022. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*. 29(28): 42539-42559.
- Anandhi, A. and Nanjundiah, R. S. 2015. Performance evaluation of AR4 climate models in simulating daily precipitation over the Indian region using skill scores. *Theoretical and Applied Climatology*. 119(3): 551-566.
- Anil, S., Manikanta, V. and Pallakury, A. R. 2021. Unravelling the influence of subjectivity on ranking of CMIP6 based climate models: A case study. *International Journal of Climatology*. 41(13): 5998-6016.
- Fordham, D. A., Wigley, T. M. and Brook, B. W. 2011. Multi-model climate projections for biodiversity risk assessments. *Ecological Applications*. 21(8): 3317-3331.
- Gouda, K. C., Nahak, S. and Goswami, P. 2018. Evaluation of a GCM in seasonal forecasting of extreme rainfall events over continental India. *Weather and Climate Extremes*. 21: 10-16.
- Khan, N., Shahid, S., Ahmed, K., Ismail, T., Nawaz, N. and Son, M. 2018. Performance assessment of general circulation model in simulating daily precipitation and temperature using multiple gridded datasets. *Water*. 10(12): 1793.
- Kheireldin, K., Roushdi, M. and Aboelkhear, M. 2020. Selection of the optimum global circulation model that mimics the circumstances of Egypt. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 9: 784-793.
- Li, Z., Ye, L., Zhao, Y., Song, X., Teng, J. and Jin, J. 2016. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 1(1): 1-8.
- Nashwan, M. S. and Shahid, S. 2020. A novel framework for selecting general circulation models based on the spatial patterns of climate. *International Journal of Climatology*. 40(10): 4422-4443.
- Neupane, S., Shrestha, S., Ghimire, U., Mohanasundaram, S. and Ninsawat, S. 2021. Evaluation of the CORDEX regional climate models (RCMs) for simulating climate extremes in the Asian cities. *Science of The Total Environment*. 797: 149137.
- Raju, K. S. and Kumar, D. N. 2014. Ranking of global climate models for India using multicriterion

Prioritization of the CMIP6 General Circulation Models Using Multi-Criteria Decision-Making Methods in the Nekarood Watershed

P. Moghadas¹, E. Mahjoobi^{2*}, S. Gharechelou³
Received: Jul.10, 2023 Accepted: Nov.24, 2023

Abstract

Due to the diversity and multiplicity of atmospheric general circulation models (GCM), it is not possible to use all of them in the estimation of climatic parameters. Undoubtedly, using the right model in climate simulations can improve the accuracy and certainty of the modeling. In this study, ACCESS-ESM1-5, GFDL-CM4, IITM-ESM, INM-CM4-8, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2 and MRI-ESM2-0 from the CMIP6 was evaluated in Nekarood river basin by applying multi-criteria decision-making (MCDM) approaches including compromise programming (CP), cooperative game theory (CGT), the technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) and weighted average technique (WAT). Then the final ranks were determined based on the group decision making method (GDM). To check the quality of the estimated rainfall of GCMs in accordance with the observed rainfall, correlation coefficient (CC), normalized root means square deviation (NRMSD), average absolute relative deviation (AARD), absolute normalized mean bias deviation (ANMBD) and skill score (SS) were used. The weight effect of the evaluation indices in each of the MCDMs was determined by the entropy technique. The results indicate that the CC has the highest effect in the ranking process of GCMs with a weighted importance of about 45%. Finally, the GFDL-CM4 with a net strength of 18 in the group decision-making method was recognized as the most appropriate GCM, simulating precipitation for this watershed.

Keywords: Compromise Programming, Cooperative Game Theory, General Circulation Model, TOPSIS, Weighted Average Technique

1- M.Sc. in Water Resource Management and Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Assistant Professor, Department of Surveying, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

(*- Corresponding Author Email: emahjoobi@shahroodut.ac.ir)