

پیش‌بینی عدم قطعیت تغییرات فصلی بارندگی محدوده قم- کهک با استفاده از مدل‌های مختلف اقلیمی و مدل توسعه‌یافته هیبرید

سپیده جلیلی^۱ و پریسادات آشفته^{۲*}

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۲/۳۱ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۷/۲۱

۱- دانشجوی ارشد مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم

۲- استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه قم

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ps.ashofteh@qom.ac.ir

چکیده

در این تحقیق اثر تغییر اقلیم بر بارندگی با استفاده از پنج مدل اقلیمی (AOGCM (CSIRO-CCSR-NIES، HadCM3)، GFDL R30 و CGCM2، MK2) تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 و مدل توسعه‌یافته هیبرید حاصل از این مدل‌ها براساس رویکرد بیزی، به‌منظور لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها در آبخوان قم-کهک بررسی گردید. داده‌ها برای دوره‌های فعلی (۲۰۱۷-۲۰۱۰) و آتی (۲۰۶۹-۲۰۵۴) ریزمقیاس شدند. سپس با استفاده از معیارهای کارآیی این نتیجه به‌دست آمد که HadCM3 و CCSR-NIES نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری دارند. با محاسبه سناریوهای تغییر اقلیم و لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها، تغییرات فصلی بارش آتی با بارش مشاهداتی مقایسه شدند. روند تغییرات فصلی بارش محاسباتی با HadCM3 و CCSR-NIES و مدل توسعه‌یافته هیبرید تحت A2، در بهار و تابستان، منفی خواهد بود. بیش‌ترین کاهش بارندگی به میزان ۴۵/۱۴- درصد نسبت به دوره مشاهداتی بوده که مربوط به HadCM3 در فصل بهار بود. هم‌چنین نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل‌ها تحت B2 نشان می‌دهد که روند تغییرات بارش در زمستان برای بیش‌تر مدل‌ها به‌صورت جزئی مثبت خواهد بود و در بهار و تابستان این روند کاهشی است. بیش‌ترین کاهش بارندگی تحت B2 مربوط به CCSR-NIES در تابستان (۲۲/۶۱- درصد نسبت به مشاهداتی). مدل هیبرید که ترکیبی از مدل‌های مختلف اقلیمی است، تحت A2 روند تغییرات بارش تمام فصول را منفی پیش‌بینی کرده و بیش‌ترین کاهش بارش در این مدل مربوط به تابستان به میزان ۲۹/۷۴- درصد نسبت به دوره مشاهداتی است.

واژه‌های کلیدی: تغییرات فصلی بارش، رویکرد بیزی، عدم قطعیت، مدل توسعه‌یافته هیبرید، AOGCM

Uncertainty Prediction of Seasonal Variations of Rainfall in the Qom-Kahak Using Different Climate Models and Hybrid Developed Model

Sepideh Jalili¹, Parisa-Sadat Ashofteh^{2*}

Received: 21 May 2019

Accepted: 12 October 2020

¹M.Sc. Student of Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran

²Assist. Prof. of Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran

* Corresponding Author, Email: PS.Ashofteh@qom.ac.ir

Abstract

In this research, the effect of climate change on rainfall was investigated using five AOGCM climatic models (HadCM3, CCSR-NIES, CSIRO-MK2, CGCM2 and GFDL R30) under emission scenarios A2 and B2 and Hybrid developed model resulting from these models based on Bayesian approach, in order to account for the uncertainties in the Qom-Kahak aquifer. Data were downscaled for current (2001-2017) and future (2054-2069) periods. Then, it was found that the HadCM3 and CCSR-NIES compared to other models have better performance using criteria of efficiency. By calculating climate change scenarios and taking into account uncertainties, seasonal variations of future rainfall were compared with observed rainfall. The trend of seasonal variations of rainfall simulated by HadCM3 and CCSR-NIES and Hybrid developed model will be negative under the A2 in the spring and summer. The highest decrease in rainfall was by -45.14% relative to the observed period, which was related to the HadCM3 in spring. Also, the results of prediction of models under the B2 indicate that the trend of rainfall changes in winter will be partly positive for most models and this trend is decreasing in the spring and summer. The highest decrease of rainfall under the B2 is relative to CCSR-NIES in summer (-22.61% compared to observed period). The hybrid model, which is a combination of different climatic models, predicts the negative trend for the rainfall changes of all seasons under the A2, and the highest rainfall reduction in this model is related to the summer by -29.44% compared to the observed period.

Keywords: AOGCM, Bayesian approach, Hybrid developed model, Seasonal variations of rainfall, Uncertainty

مقدمه

نیمه خشک دنیا قرار می‌گیرد. بنابراین کل مقدار بارش دریافتی ایران اندک است. از طرفی دیگر، توزیع بارش‌ها در ایران نیز بسیار نامتناسب است و در بسیاری از مناطق کشور مقدار تبخیر و تعرق به مراتب بیش از مقدار بارش سالانه است (دین پژوه ۲۰۰۶). بیش از ۸۲ درصد قلمرو کشور در منطقه خشک و نیمه خشک قرار داشته و بنابراین مسئله کمبود آب در کنار پدیده تغییر اقلیم در ایران کاملاً جدی و حیاتی می‌باشد و مطالعاتی در این

تغییر اقلیم عبارت است از تغییر برگشت‌ناپذیر در متوسط شرایط آب و هوایی یک منطقه نسبت به رفتاری که در طول یک افق زمانی بلندمدت از اطلاعات مشاهده یا ثبت شده در آن منطقه مورد انتظار است (بی‌نام ۲۰۰۷). کشورهای در حال توسعه آسیب‌پذیری^۱ بیشتری در اثر تغییر اقلیم نسبت به کشورهای توسعه‌یافته دارند. قسمت‌های وسیعی از ایران در پهنه‌بندی اقلیمی هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم^۲ (IPCC)، جزو مناطق خشک و

² Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)

¹ Vulnerability

استفاده کردند. با وجود عدم قطعیت ذاتی مدل‌های پیش‌بینی‌کننده، نتایج آنان حاکی از افزایش سیل‌های منطقه‌ای و کاهش کلی رواناب بوده است. نکوموزپی و چانگ (۲۰۱۴) با بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آبی حوضه آبریز گمهور^۵ جمهوری کره به این نتیجه رسیدند که ارزیابی همزمان چندین مدل تغییر اقلیم باعث کاهش عدم قطعیت می‌شود آنها بیش‌تر کاهش سطح آب‌های منطقه گمهور را برای دهه‌های آتی پیش‌بینی کرده‌اند. واتس و همکاران (۲۰۱۵) تغییرات اقلیمی و چشم‌انداز آینده منابع آب انگلستان را مورد توجه قرار دادند. ایشان در تحقیق خود از معادلات رگرسیونی برای پیش‌بینی شرایط آینده استفاده کردند. نتایج نشان دادند که تغییرات آینده در بارندگی و تبخیر و تعرق می‌تواند بر رژیم‌های جریان آب تأثیر بگذارد و همچنین موجب نابودی زیست‌بوم‌های آبی شود. در نتیجه ممکن است سیل‌های بزرگ‌تر و بیش‌تری رخ دهد. از طرفی افزایش دمای آب موجب افزایش جلبک‌های سطح آب شده که برای حیات آبریان یک خطر جدی می‌باشد. گورگنر و همکاران (۲۰۱۷) تأثیرات تغییر اقلیم را بر روی رژیم‌های جریان ورودی مخزن در حوضه گدیز در ترکیه غربی^۶ تحت پیش‌بینی‌های اقلیمی CMIP5 بررسی کردند. ایشان در تحقیق خود برای ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی از خروجی دو مدل اقلیمی HadGEM2 و GFDL-ESM2M تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 از مدل تحقیقی و پیش‌بینی آب‌وهوا^۷ (WRF) استفاده کردند. سپس داده‌های جوی ریزمقیاس‌شده وارد مدل هیدرولوژی زیست‌محیطی حوضه آبریز^۸ (WEHY) شد. نتایج نشان دادند که مقدار جریان‌های پیش‌بینی‌شده در طول قرن ۲۱م افزایش خواهد یافت. منصور و همکاران (۲۰۱۵) اثرات تغییر اقلیم را بر دما، بارندگی و رواناب حوضه زربینه‌رود (بزرگ‌ترین زیرحوضه دریاچه ارومیه) با

زمینه در سطح ملی و بین‌المللی انجام شده است که در ادامه به بخشی از این تحقیقات اشاره می‌شود.

استیل‌دانی و همکاران (۲۰۰۸) برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر هیدرولوژی^۱ نه حوضه در ایرلند از مدل ECHAM5 استفاده کردند و مدل اقلیمی منطقه‌ای RCA3 را برای ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی داده‌های بارندگی و دما به‌کار بردند. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده وجود یک چرخه فصلی به‌صورت افزایش بارندگی زمستانه، کاهش بارندگی تابستانه و افزایش دما در سراسر کشور ایرلند بود. سو و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از یک مدل هیدرولوژیکی که اساس آن اطلاعات زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و ژئوشیمی و همچنین با کاربرد یک رگرسیون خطی، بارش را برای ۲۰ سال آینده شبیه‌سازی کردند. نتایج آنان حاکی از کاهش تدریجی تراز آب زیرزمینی تحت تأثیر تغییر اقلیم بود. تراینهام و همکاران (۲۰۱۱) اثرات شرایط اقلیمی آینده و پیش‌بینی رشد جمعیت را بر سامانه‌های منابع آب در منطقه پیوجت ساوند^۱ بررسی نمودند. برای ارزیابی تأمین آب منطقه در افق ۷۵ ساله، سه شبیه‌سازی گردش جهانی و دو سناریوی انتشار به‌کار گرفته شدند. عمل‌کرد هر سامانه تأمین آب با معیارهای اطمینان‌پذیری^۲ و آبدهی مطمئن^۳ تعیین شد. نتایج نشان دادند که تغییر اقلیم، آبدهی مطمئن سامانه را در آینده کاهش خواهد داد و تغییر سیاست‌های بهره‌برداری برای تأمین تقاضا در افق آتی ضروری خواهد بود. آریستدیس و همکاران (۲۰۱۳) اثر تغییر اقلیم را بر روی منابع آب جزیره کرت^۴ یونان بررسی نمودند. ایشان در تحقیق خود با استفاده از مدل‌های آماری GCM و دینامیکی RCM به ریزمقیاس‌نمایی بارش و دما برای سه سناریوی انتشار A1B، A2 و B1 برای دوره آماری (۲۰۱۰-۲۰۱۵) پرداختند. همچنین برای شبیه‌سازی رواناب جزیره کرت از مدل بارش-رواناب SAC-SMA

⁵ Geumho

⁶ Gediz basin in western Turkey

⁷ Weather research and forecasting

⁸ Watershed environmental hydrology

¹ Puget sound

² Reliability

³ Firm yield

⁴ Crete

درجه سلسیوس و $1/4$ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد و میانگین بارش کشور تحت سناریوهای A2 و B1 به ترتیب با ۳۳ درصد و ۱۴ درصد کاهش همراه است. داودی و همکاران (۲۰۱۷) اثر تغییر اقلیم را بر پارامترهای اقلیمی دما و بارش را با استفاده از خروجی مدل گردش عمومی جو HadCM3 تحت سناریوهای اقلیمی B1، A1B و در حوضه سد لار مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد تحت هر سه سناریو افزایش دما وجود داشت. بارش تحت سناریوی B1 کاهش یافت و تحت دو سناریوی دیگر افزایش بارش پیش‌بینی شد. ایزدی و همکاران (۲۰۱۷) تغییرات فصلی بارش در دوره‌های آبی (۲۰۳۰-۲۰۱۱) و (۲۰۶۵-۲۰۴۶) را با استفاده از مدل HadCM3 تحت سناریوهای A2، A1B و B1 در شهرکرد شبیه‌سازی کردند. نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل در دوره (۲۰۳۰-۲۰۱۱) حاکی از افزایش بارندگی تحت سناریوی A2 و B1 و کاهش آن تحت سناریوی A1B نسبت به دوره پایه (۱۹۹۵-۱۹۷۱) بود. همچنین تغییر در الگوی زمانی بارندگی مشاهده شد. نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل در دوره (۲۰۶۵-۲۰۴۶) نشان از کاهش بارندگی تحت همه سناریوها در منطقه مطالعاتی نسبت به دوره پایه داشت، هرچند که تغییر در الگوی زمانی بارش در این دوره نیز مشاهده شد. مهدی‌زاده و همکاران (۲۰۱۸) اثرات تغییر اقلیم را جریان رودخانه ایستگاه تمر استان گلستان بررسی کردند. ایشان از داده‌های بارش و دمای ریز مقیاس‌شده مدل CGCM3 تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 به عنوان ورودی مدل هیدرولوژیکی SWAT با هدف شبیه‌سازی جریان در دو دوره زمانی (۲۰۵۰-۲۰۲۱) و (۲۱۰۰-۲۰۷۱) استفاده کردند. نتایج نشان دادند که جریان در فصول بهار و تابستان کاهش و پاییز و زمستان افزایش خواهد یافت. تغییرات جریان در این حوضه طبق انتظار تحت سناریوی A2 شدیدتر بود. همچنین به‌طور کلی تغییرات جریان در دوره زمانی (۲۱۰۰-۲۰۷۱) نسبت به

کمک مدل آماری LARS-WG و مدل مفهومی هیدرولوژیکی^۱ SWAT و خروجی ۱۴ مدل مختلف AOGCM برای دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۵ مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان دادند که متوسط ماهانه دمای کمینه و بیشینه در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۵ افزایش خواهد یافت. همچنین متوسط ماهانه بارندگی در فصل بهار کاهش یافته، در حالی که مقدار آن در فصل‌های تابستان و پاییز افزایش خواهد یافت و الگوی بارندگی تغییر خواهد کرد. در نهایت، نتایج نشان از کاهش ۲۸ درصدی رواناب ورودی به سد زرینه‌رود در دوره آبی نسبت به دوره پایه داشت. جهانبخش اصل و همکاران (۲۰۱۶) رواناب ذوب برف در حوضه شهرچای را با استفاده از مدل SRM شبیه‌سازی کردند. ایشان بدین منظور ابتدا سطح پوشش برف برای سال آبی ۱۳۹۲ را با تفکیک مکانی یک کیلومتر در محیط نرم‌افزار ENVI استخراج کردند. سپس با استفاده از الحاقیه Hec_GeoHMS در نرم‌افزار GIS، مشخصات فیزیوگرافی حوضه به‌دست آمد. در نهایت با وارد کردن داده‌های لازم به مدل SRM، رواناب ناشی از ذوب برف شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد، سهم جریان رودخانه از ذوب برف در ماه‌های فروردین و اردیبهشت چشمگیر است، ولی با افزایش درجه حرارت هوا در خرداد ماه، سهم باران در جریان پررنگ‌تر است. همچنین نتایج شبیه‌سازی بیانگر دقت بالای این مدل است، به‌طوری که ضریب تعیین معادل $0/9$ و درصد خطای حجمی آن $96/1$ به‌دست آمد. هاشمی‌عنا و همکاران (۲۰۱۷) توانمندی مدل‌های AOGCM را در شبیه‌سازی طول دوره‌های خشک با رویکرد بررسی عدم قطعیت و تغییر اقلیم در گستره ایران ارزیابی کردند. ایشان در تحقیق خود مقادیر بارش ماهانه بارش ۱۵ مدل AOGCM را برای دهه‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ بر روی ۴۵ ایستگاه سینوپتیک در شبیه‌سازی طول دوره‌های خشک در ایران مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد میانگین دمای کشور تحت سناریوهای A2 و B1 به ترتیب برابر $2/7$

¹ Soil and water assessment tools

کل حوضه در حدود ۶ تا ۹ درصد خواهد بود. به طور متوسط، شدت افزایش شاخص‌های اگروکلیماتیک در سناریوی RCP8.5 حدود چهار درصد بیشتر از سناریوی RCP4.5 می‌باشد. در بین روش‌های میان‌یابی، روش کوکریجینگ با استفاده از داده کمکی مدل رقومی ارتفاع (DEM) کارایی بهتری را نشان داد. در افق مورد نظر، طول فصل رشد بین ۱۵ تا ۳۵ روز افزایش خواهد یافت، با این حال، طول دوره خشکی تغییر محسوسی نخواهد داشت. نتایج نشان دادند که در آینده، تغییرات مکانی متغیرهای اقلیمی کم و بیش مشابه با تغییرات نظیر دوره پایه خواهد بود.

با توجه به تحقیقات انجام شده، مشخص است که در مباحث مربوط به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی نظیر بارش، بحث عدم قطعیت به ندرت مورد توجه و بررسی قرار گرفته است و در بیشتر تحقیقات مشابه تنها از یک مدل اقلیمی استفاده شده است، در حالی که در مباحث مربوط به تغییر اقلیم استفاده از یک مدل اقلیمی نمی‌تواند تمام عدم قطعیت‌های موجود را در بر گرفته و خطای مربوط به عدم قطعیت را کاهش دهد. بنابراین هدف این مطالعه بررسی اثر تغییر اقلیم بر پارامتر اقلیمی بارش در آبخوان قم-کهک در دوره آتی (۲۰۵۴-۲۰۶۹)، از پنج مدل اقلیمی و مدل توسعه یافته هیبرید تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود است.

مواد و روش‌ها

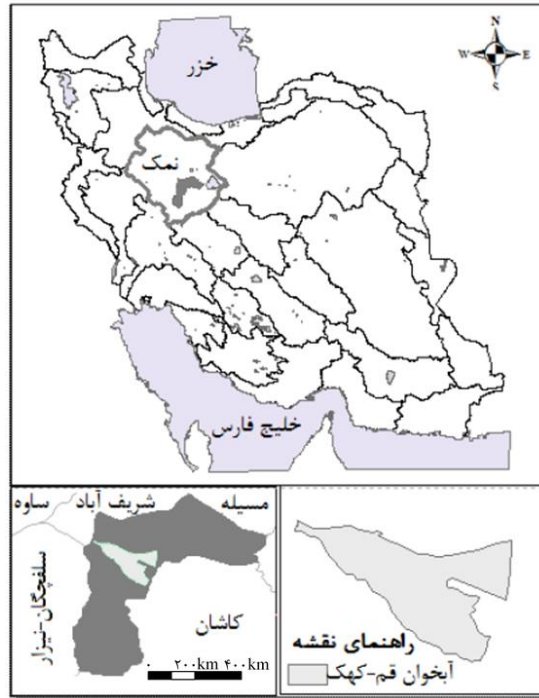
محدوده مطالعاتی

محدوده مطالعاتی قم-کهک، بخشی از حوضه آبریز ایران بوده که در شمال مرکزی کشور ایران و با مساحت ۴۲۱/۶ کیلومتر مربع در بخش جنوبی استان قم بین طول‌های جغرافیایی ۴۵° ۵۰' تا ۳۲° ۵۱' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۱۲° ۳۴' تا ۲۴° ۳۴' شمالی گسترده شده است، شکل ۱ موقعیت آبخوان قم-کهک را نسبت به حوضه‌های آبریز کشور نشان می‌دهد. این

دوره زمانی (۲۰۵۰-۲۰۲۱) شدیدتر خواهد بود. معروف‌پور و همکاران (۲۰۱۸) از داده‌های مصارف و دبی جریان سطحی به‌عنوان ورودی‌های مدل‌های رگرسیون غیرخطی و برنامه‌ریزی بیان ژن جهت برآورد سطح آب‌زیرزمینی در دشت بم‌نرماشیر (استان کرمان) استفاده نمودند. نتایج نشان دادند که مدل برنامه‌ریزی بیان ژن بهتر از مدل رگرسیونی عمل کرد. به‌لکه و همکاران (۲۰۱۹) اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه آبخیز اراز کوسه را با مدل هیدرولوژیکی HBV و نمایه‌های رواناب بررسی نمودند. بارش و دمای پیش‌بینی‌شده تحت سه سناریوی اقلیمی RCP2.6, RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره آینده اول (۲۰۵۱-۲۰۲۱) و دوره آینده دوم (۲۰۷۱-۲۰۵۱) در مدل واسنجی‌شده HBV استفاده شد. پارامترهای مدل HBV با الگوریتم بهینه‌سازی DDS واسنجی شدند. نتایج نشان دادند که دبی‌های اوج و کم‌آبی دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه به‌ترتیب تا ۶۰٪ و تا ۲۵٪ کاهش خواهد یافت. صادقی و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از چهار مدل GCM و دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 اقدام به تولید داده برای افق ۲۰۵۰ کردند. سپس، پارامترهای دمای هوا، بارش، تبخیر-تعرق (ET0) و کمبود بارش (PD) در طول فصل رشد ارزیابی گردید و مقادیر کمیت‌های شدت خشکی و طول دوره خشکی تخمین زده شدند. ET0 با دو روش پرستلی-تیلور (PT) و پنمن مانیتث (PM) محاسبه شد. ET0 محاسبه شده با روش PT با استفاده از چهار مدل هوشمند شامل Eureka Formulize, ANN, ANFIS و SVM با روش PM برای هر ایستگاه واسنجی گردید. برای پهنه‌بندی شاخص‌های مذکور، از سه روش زمین آمار IDW، کریجینگ و کوکریجنگ بهره گرفته شد. نتایج نشان دادند که در ایستگاه‌های منتخب، میانگین دمای هوا و بارش (در طول فصل رشد) به‌ترتیب، بین ۰/۹ تا ۲ درجه سلسیوس و ۲۷ تا ۴۹ میلی‌متر افزایش خواهد یافت. همچنین، پارامترهای ET0 و شدت خشکی در همه ایستگاه‌ها افزایش خواهد یافت. میانگین افزایش PD در

و به نسبت کامل می‌باشند (بی‌نام ۲۰۱۲)، در این تحقیق از اطلاعات ایستگاه سالاریه که معرف ایستگاه باران‌سنجی در منطقه مورد نظر می‌باشد از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۷ به صورت داده‌های ماهانه از سازمان آب منطقه‌ای استان قم استفاده شده است.

محدوده از شمال و غرب، به سایر بخش‌های استان قم محدود شده، از جنوب به استان اصفهان و از شرق به دریاچه نمک محدود می‌باشد. ایستگاه سینوپتیک قم و ایستگاه تخیرسنجی سالاریه مهم‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی داخل محدوده می‌باشند و از آنجا که آمار سالاریه مشاهده‌شده، واقعی



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی قم-کهک نسبت به کشور ایران.

ارزیابی عملکرد

همان‌طور که ذکر شد در این تحقیق از پنج مدل اقلیمی برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر پارامتر اقلیمی بارش با رویکرد بررسی عدم قطعیت استفاده شده است. قبل از شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی آینده، باید کارایی مدل‌ها نسبت به وضعیت موجود سنجیده شود. بدین منظور از معیارهای ارزیابی متداول $RMSE$ ، MAE و r و VAF (بیلماز و یوکسک ۲۰۰۹) استفاده شد که روابط مربوطه ارائه شده‌اند.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{i,o} - x_{i,s}|}{n} \quad [1]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,o} - x_{i,s})^2}{n}} \quad [2]$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,o} - \bar{x}_{i,o})(x_{i,s} - \bar{x}_{i,s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{i,o} - \bar{x}_{i,o})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{i,s} - \bar{x}_{i,s})^2}} \quad [3]$$

$$VAF = \left[1 - \frac{\text{var}(x_o - x_s)}{\text{var}(x_o)} \right] \times 100 \quad [4]$$

که در آنها، x_o : مقدار مشاهداتی؛ x_s : مقدار شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های اقلیمی؛ \bar{x}_o : میانگین مقادیر مشاهداتی در دوره آماری؛ \bar{x}_s : میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده در دوره آماری؛ و var : مقدار واریانس برای VAF ؛ n : تعداد کل نمونه‌های دوره، هستند.

تولید سناریوهای تغییر اقلیم و مدل توسعه‌یافته هیبرید

عدم قطعیت

پس از شبیه‌سازی متغیر اقلیمی بارش توسط مدل‌های AOGCM و محاسبه سناریوهای تغییر اقلیم به منظور لحاظ کردن عدم قطعیت‌های موجود، مدل توسعه‌یافته هیبرید براساس رویکرد بیزی ساخته خواهد شد. مراحل محاسباتی رویکرد بیزی عبارتند از: تولید توزیع احتمالاتی پیشین، تعیین تابع درست‌نمایی احتمالاتی، تولید توزیع احتمالاتی پسین. معادله رویکرد بیزی در رابطه ۶ آورده شده است (رشید بنام ۱۹۹۹):

$$\pi(\theta|x) = \frac{f(x|\theta)\pi(\theta)}{\int_{-\infty}^{\infty} f(x|\theta)\pi(\theta)dx} \quad [6]$$

که در آن، $f(x|\theta)$: تابع درست‌نمایی x با معلوم بودن θ ؛ $\pi(\theta)$: توزیع پیشین؛ و $\pi(\theta|x)$: توزیع پسین θ با معلوم بودن x هستند. بدین منظور مدل‌های اقلیمی با روش میانگین مشاهداتی بارش وزندهی می‌شوند. روش میانگین مشاهداتی بارش بیانگر میزان اختلاف میانگین بارش شبیه‌سازی‌شده (توسط مدل‌های GCM) با میانگین داده‌های مشاهداتی می‌باشد (رابطه ۷) (آشفته و همکاران ۲۰۱۵).

$$WM_{t,i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{\delta ARML_{t,i}}{1}} \quad [7]$$

که در آن، $WM_{t,i}$: وزن داده‌شده به مدل i ام در ماه t ام؛ $\delta ARML_{t,i}$: میزان اختلاف میانگین بارش ماهانه بلندمدت شبیه‌سازی‌شده (توسط مدل‌های GCM) با میانگین بارش ماهانه بلندمدت مشاهداتی؛ و N : تعداد مدل‌های GCM، هستند. در نهایت با معرفی سناریوهای تغییر اقلیم و مقادیر وزندهی تمام مدل‌های اقلیمی به نرم‌افزار Simlab، مدل توسعه‌یافته هیبرید با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و نمونه‌گیری تصادفی، ساخته می‌شود.

به دلیل بزرگ مقیاس بودن مدل‌های AOGCM،

برای تبدیل خروجی مدل‌های GCM به مقیاس محلی ابتدا از میانگین دوره‌ای این داده‌ها استفاده می‌شود (آشفته ۲۰۱۴). با شبیه‌سازی متغیر اقلیمی بارش در دوره فعلی (۲۰۱۷-۲۰۰۱) و دوره آتی (۲۰۶۹-۲۰۵۴) توسط مدل‌های اقلیمی، می‌توان نسبت تغییرات پارامتر اقلیمی بارش آینده را نسبت به بارش فعلی محاسبه کرد. به مقادیر به‌دست آمده سناریوی تغییر اقلیم گفته می‌شود. در واقع سناریوی تغییر اقلیم بارش نشان‌دهنده تغییرات بارش در دوره آتی نسبت به دوره پایه می‌باشد. در نهایت برای ریزمقیاس نمودن داده‌های مورد نظر طبق رابطه ۴ از روش عامل تغییر (CF) استفاده می‌شود. برای به دست آوردن سری زمانی بارش آینده، مقادیر سناریوی تغییر اقلیم بارش به مقادیر مشاهداتی اضافه می‌شود.

$$P_i = P_{obs,i} \times \Delta P_i \quad [8]$$

که در آن، $P_{obs,i}$: بیانگر سری زمانی بارش مشاهداتی (در اینجا ماهانه) در دوره فعلی (۲۰۱۷-۲۰۰۱)؛ P_i : سری زمانی بارندگی حاصل از پدیده تغییر اقلیم در دوره آتی (۲۰۶۹-۲۰۵۴)؛ و ΔP_i : سناریوی تغییر اقلیم بارندگی ریزمقیاس‌شده، هستند. مهم‌ترین ورودی مدل‌های AOGCM میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای است و به دلیل این که میزان انتشار این گازها به عوامل مختلف اقتصادی، اجتماعی، تغییر کاربری اراضی، توسعه انقلاب صنعتی، عوامل زیست محیطی و ... وابسته است و مشخص نیست چه مقدار از این گازها توسط فعالیت‌های بشری ساخته می‌شود، سناریوهای مختلف انتشار معرفی شدند تا هرکدام دربرگیرنده مقادیر مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای برای پیش‌بینی متغیر اقلیمی آینده باشند. در این تحقیق از دو سناریوی انتشار A2 (بیش‌ترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای) و B2 (مشابه وضعیت اقلیم ایران) استفاده شده است.

نتایج و بحث

نتایج معیارهای عملکرد

همانطور که در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است، با این که هرکدام از مدل‌ها دارای دقت متفاوتی در شبیه‌سازی هستند ولی مدل‌های HadCM3 و CCSR-NIES برخلاف مدل‌های CSIRO-MK2 و CGCM2 تحت هر دو سناریوی انتشار A2 و B2 بهترین عملکرد و سازگاری را با داده‌های مشاهداتی نسبت به سایر مدل‌ها دارند. در بررسی کارایی مدل‌های اقلیمی با استفاده از معیارهای ارزیابی خطا، هرچه مقادیر $RMSE$ و MAE کم‌تر باشد نشان‌دهنده خطای پایین و دقت بالای

مدل و هرچه ضریب همبستگی r و شاخص VAF بالا باشد نشان‌دهنده همبستگی بالای داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی است. با توجه به جداول ۱ و ۲ مدل HadCM3 تحت هر دو سناریو بهترین عملکرد را نسبت به دیگر مدل‌ها داشته و پس از آن مدل CCSR-NIES مدل خوبی است. همچنین نتایج مطالعه مدرسی و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی اثر تغییر اقلیم بر میزان آبدهی سالانه رودخانه گرگان و مطالعه یوسف‌دوست و همکاران (۲۰۱۶) در مقایسه مدل‌های مختلف اقلیمی در تخمین آثار تغییر اقلیم بر دما و بارش نشان داد که مدل HadCM3 بهترین عملکرد را دارد.

جدول ۱- کارایی مدل‌های اقلیمی تحت سناریوی A2.

Model	MAE (mm)	$RMSE$ (mm)	r	VAF (%)
HadCM3	۶/۴	۹/۸	۰/۷۷	۸۳
CCSR-NIES	۸/۵	۹/۴	۰/۶۲	۷۳
CSIRO-MK2	۱۰/۹	۱۶/۹	۰/۵۹	۵۵
CGCM2	۲۳/۲	۳۴/۳	۰/۵۸	۳۹
GFDL R30	۹/۷	۱۴/۴	۰/۷۶	۵۲

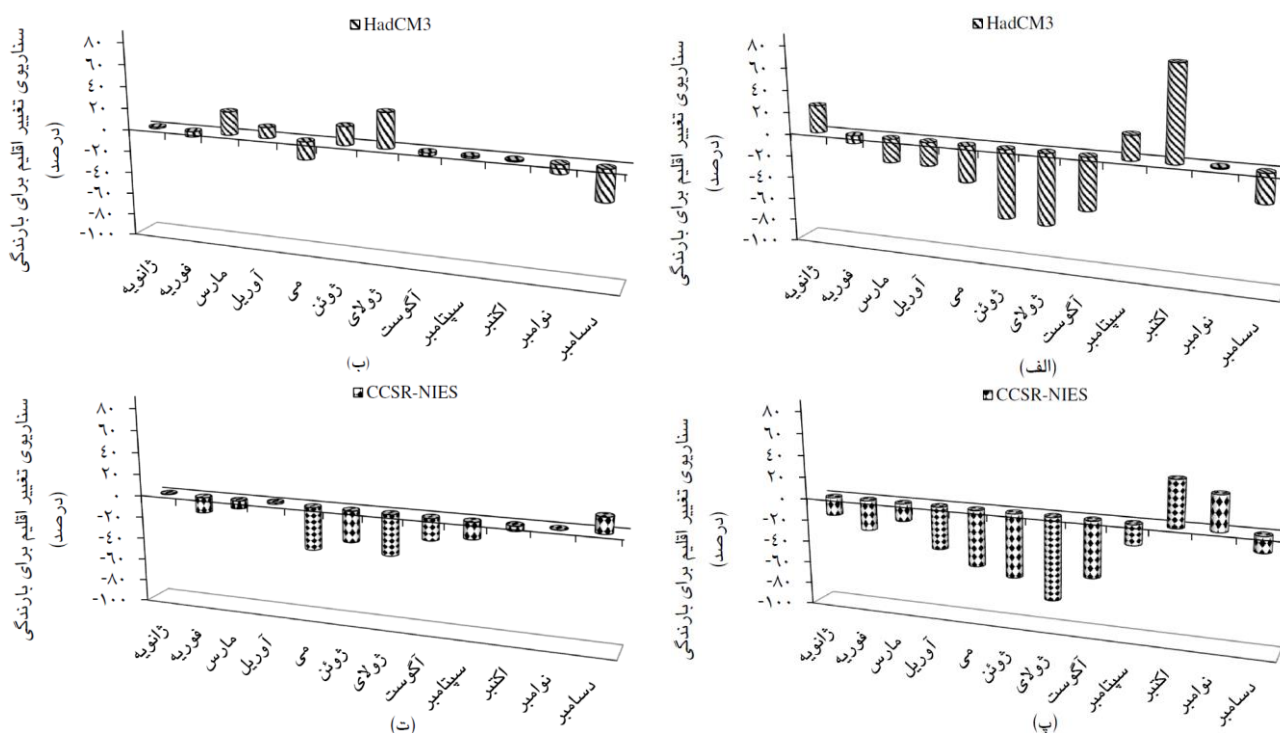
جدول ۲- کارایی مدل‌های اقلیمی تحت سناریوی B2.

Model	MAE (mm)	$RMSE$ (mm)	r	VAF (%)
HadCM3	۵/۵	۷/۱	۰/۸۲	۹۵
CCSR-NIES	۸/۸	۱۰/۱	۰/۵۸	۸۱
CSIRO-MK2	۱۱/۷	۱۵/۵	۰/۵۶	۵۷
CGCM2	۲۱/۱	۳۱/۵	۰/۵۶	۴۱
GFDL R30	۱۰/۰	۱۲/۱	۰/۸۳	۵۳

نتایج سناریوهای تغییر اقلیم

سناریوی تغییرات بارش در دوره آتی (۲۰۶۹-۲۰۵۴) نسبت به دوره فعلی (۲۰۱۷-۲۰۰۱) که توسط

مدل‌های HadCM3 و CCSR-NIES تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 ساخته شده، در شکل ۲ نشان داده شده و مقادیر آنها در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۲- نتایج مدل‌های مختلف اقلیمی برای بارندگی در دوره (۲۰۶۹-۲۰۵۴) تحت سناریوی انتشار A2 به ترتیب برای (الف) HadCM3، (ب) CCSR-NIES؛ و تحت سناریوی انتشار B2 برای (ب) HadCM3، (ت) CCSR-NIES.

جدول ۳- محدوده تغییرات سناریوهای تغییر اقلیم بارندگی.

مدل‌های اقلیمی	بارندگی تحت سناریوی A2 (%)	بارندگی تحت سناریوی B2 (%)
HadCM3	۸۲ تا -۶۳	۳۱ تا -۲۷
CCSR-NIES	۴۰ تا -۷۴	۱۴ تا -۳۸

دوره فعلی دارند که این امر نشان‌دهنده عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی و سناریوهای انتشار است.

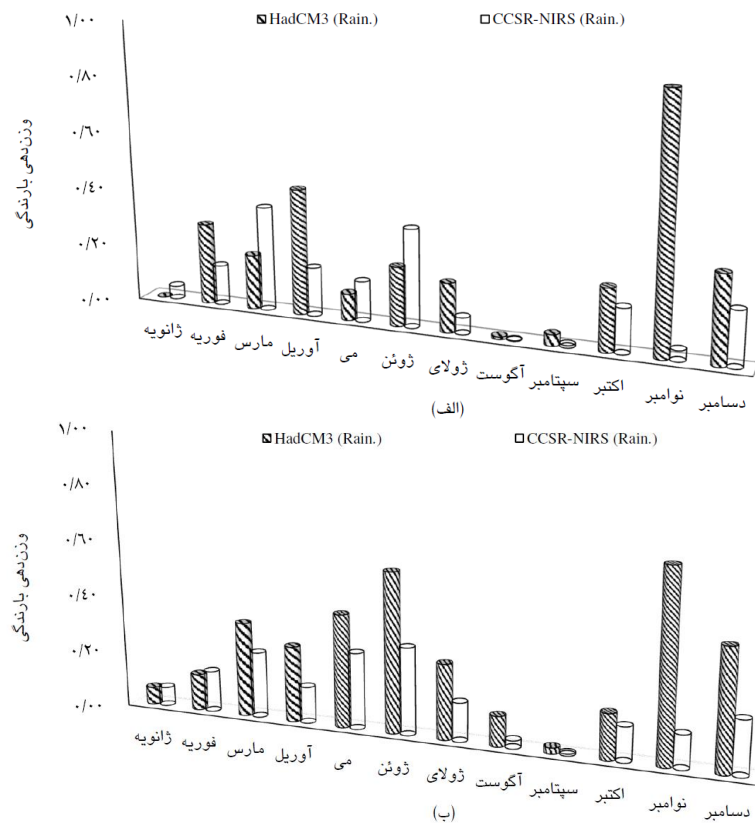
نتایج سناریوهای تغییر اقلیم

همان‌طور که ذکر شد برای تحلیل عدم قطعیت‌های موجود و ساخت مدل توسعه‌یافته هیبرید باید مدل‌های اقلیمی با استفاده از روش میانگین مشاهداتی بارش وزن‌دهی شوند. استفاده از چند مدل اقلیمی برای کاهش عدم قطعیت در مطالعات نکوموزپی و چانگ (۲۰۱۴) تأیید شده است. نتایج وزن‌دهی مدل‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳، مدل HadCM3 تحت هر دو سناریوی انتشار در بیش‌تر ماه‌های سال وزن بیش‌تری را در پیش‌بینی متغیر بارش به خود اختصاص

با توجه به شکل ۲ و مقادیر جدول ۳ مشخص است که محدوده تغییرات بارش شبیه‌سازی شده توسط هر دو مدل تحت سناریوی A2 نسبت به سناریوی B2 بیش‌تر است. مهدی‌زاده و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیق خود با بررسی اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه ایستگاه تمر استان گلستان به این نتیجه رسیدند که تغییرات جریان تحت سناریوی A2 نسبت به سناریوی B2 شدیدتر است. شاید این تغییرات شدید بارش تحت سناریوی A2 به دلیل انتشار زیاد گازهای گلخانه‌ای و پیش‌بینی بدترین وضعیت آینده در این سناریو باشد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است هر دو مدل اقلیمی تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 در ماه‌های مختلف، پیش‌بینی‌های متفاوتی از بارش آبی نسبت به

شبیه‌سازی مقادیر بارش ماهانه توسط ۱۵ مدل اقلیمی با رویکرد بررسی عدم قطعیت به این نتیجه رسیدند که مدل HadCM3 بهترین عملکرد و کمترین خطا را نسبت به سایر مدل‌ها دارد.

داده است. هرچه وزن مدل بیش‌تر باشد، نشان‌دهنده کاهش خطای مدل در شبیه‌سازی پارامتر اقلیمی مورد نظر است. خطای ناشی از عدم قطعیت در مدل HadCM3 نسبت به مدل CCSR-NIES تحت هر دو سناریوی انتشار کمتر است. هاشمی‌عنا و همکاران (۲۰۱۷) نیز با



شکل ۳- مقادیر وزندهی به هریک از مدل‌های اقلیمی تحت سناریوهای (الف) A2 و (ب) B2.

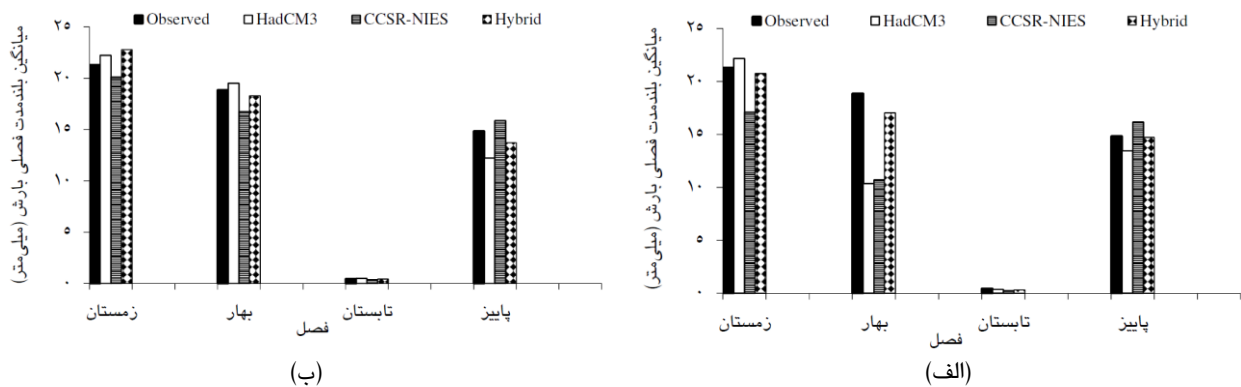
توسط مدل HadCM3 تحت سناریوی A2، نسبت به دوره پایه افزایش جزئی خواهد داشت، در حالی که سایر مدل‌ها در این فصل کاهش بارش را نشان می‌دهد. روند تغییرات فصلی بارش برای فصل بهار و تابستان برای تمام مدل‌ها تحت سناریوی A2، روند منفی و کاهش‌ی دارد که این کاهش در فصل تابستان کم‌تر بوده و در فصل بهار به‌طور تقریبی محسوس خواهد بود و بیش‌ترین کاهش بارش در این سناریو، مربوط به مدل HadCM3 در فصل بهار به‌میزان ۴۵/۱۴- درصد نسبت به دوره مشاهداتی می‌باشد. در فصل پاییز هم مدل HadCM3 و مدل توسعه‌یافته هیبرید به‌ترتیب به‌طور

نتایج بارندگی در دوره آتی

پس از وزندهی به مدل‌های اقلیمی GCM و ساخت مدل توسعه‌یافته هیبرید، به‌منظور مقایسه بارندگی پیش‌بینی‌شده در دوره آتی با دوره مشاهداتی، متغیر اقلیمی بارش آینده توسط مدل‌های GCM و مدل توسعه‌یافته Hybrid تحت سناریوهای A2 و B2 شبیه‌سازی می‌شود. در ادامه مقایسه میانگین بلندمدت فصلی بارندگی آینده با تغییرات فصلی بارندگی مشاهداتی، در شکل ۴ نشان داده شده و مقادیر آنها در جداول ۴ و ۵ آورده شده است. با توجه به شکل ۴ و جدول ۴ بارش شبیه‌سازی‌شده در فصل زمستان

بارش آینده را در این فصول به مقدار جزئی بیش تر از بارش مشاهداتی پیش بینی کرده است. بیشترین کاهش بارندگی تحت سناریوی B2 مربوط به مدل CCSR-NIES در فصل تابستان به مقدار ۲۲/۶۱- درصد نسبت به دوره مشاهداتی است. به طور کلی مدل های اقلیمی تحت سناریوی A2 بارش آبی را به مقدار بیشتری نسبت به سناریوی B2 کاهش داده اند. همچنین مطالعه هاشمی عنا و همکاران (۲۰۱۷) بر شبیه سازی مقادیر بارش ماهانه در دوره آبی کاهش بیش تر بارش تحت سناریوی A2 را تایید می کند. دلیل این امر فرضیاتی از قبیل بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه ای و رشد سریع جمعیت و غیره در سناریوی انتشار A2 می باشد.

میانگین به میزان ۹/۴۱- درصد و ۰/۸۵- درصد نسبت به دوره مشاهداتی کاهش بارندگی را نشان می دهند. کاهش شدید بارش در فصل بهار برای تمام مدل ها و در فصل پاییز برای بیش تر مدل ها می تواند نشان دهنده تغییر در الگوی زمانی بارش در دوره های آبی باشد. کاهش متوسط ماهانه بارندگی فصل بهار و تغییر در الگوی زمانی بارش در تحقیق منصوری و همکاران (۲۰۱۵) نیز تأیید شده است. همچنین در شکل ۴ و جدول ۵ مشاهده می شود تحت سناریوی B2 روند تغییرات بارش در فصل زمستان برای بیش تر مدل ها به صورت جزئی مثبت خواهد بود و در فصل بهار و تابستان این روند کاهش یافته و فقط مدل HadCM3



شکل ۴- میانگین بلندمدت فصلی بارش آینده نسبت به بارش پایه تحت سناریوی انتشار (الف) A2 و (ب) B2

جدول ۴- درصد تغییرات فصلی بارش در دوره آبی نسبت به دوره مشاهداتی تحت سناریوی A2.

مدل های اقلیمی	زمستان	بهار	تابستان	پاییز
HadCM3	۴/۰۶	-۴۵/۱۴	-۱۷/۳۸	-۹/۴۱
CCSR-NIES	-۱۹/۷۴	-۴۳/۲۹	-۴۱/۶۳	۸/۹۶
Hybrid	-۲/۵۷	-۹/۷۲	-۲۹/۷۴	-۰/۸۵

جدول ۵- درصد تغییرات فصلی بارش در دوره آبی نسبت به دوره مشاهداتی تحت سناریوی B2.

مدل های اقلیمی	زمستان	بهار	تابستان	پاییز
HadCM3	۴/۳۰	۳/۳۶	۹/۲۸	-۱۷/۷۰
CCSR-NIES	-۵/۵۵	-۱۱/۲۷	-۲۲/۶۱	۶/۹۶
Hybrid	۶/۹۳	-۳/۱۳	-۵/۳۷	-۷/۵۹

به‌طور کلی نتایج و جمع‌بندی کمی و کیفی که از این مطالعه به‌دست آمده بدین صورت است که برای محاسبه تغییرات فصلی بارندگی در محدوده مطالعاتی برای دوره‌های آبی از مدل‌های مختلف اقلیمی (HadCM3، CCSR-NIES، CSIRO-MK2 و CGCM2 و GFDL R30) استفاده شد. پیش‌بینی این تغییرات فصلی بارندگی در دوره‌های آینده با عدم قطعیت همراه خواهد بود. بدین معنی که هر یک از مدل‌های اقلیمی با توجه به مش‌بندی سلول محاسباتی مربوطه، دقت مکانی و زمانی متفاوتی از هم خواهند داشت. به‌عنوان مثال، تنها مقایسه عمل‌کرد این مدل‌های ذکرشده در شبیه‌سازی متغیر بارش با بارش مشاهداتی نشان داد که ضریب $RMSE$ به‌ترتیب برای مدل‌های اقلیمی ذکرشده به میزان $۹/۸$ ، $۹/۴$ ، $۱۶/۹$ ، $۳۴/۳$ ، $۱۴/۴$ میلی‌متر (برای سناریوی انتشار A2) و $۷/۱$ ، $۱۰/۱$ ، $۱۵/۵$ ، $۳۱/۵$ ، $۱۲/۱$ میلی‌متر (برای سناریوی انتشار B2) تغییر خواهد کرد که نشان از خروجی‌های متفاوت مدل‌ها است. بنابراین در تحقیق حاضر از نتایج شبیه‌سازی همه مدل‌های مختلف اقلیمی در دوره‌های آبی استفاده شده است تا عدم قطعیت‌ها بهتر لحاظ شوند. به‌عنوان مثال محدوده تغییرات سناریوهای تغییر اقلیم بارندگی تنها برای دو مدل HadCM3 و CCSR-NIES (که بهترین $RMSE$ را داشتند) برای سناریوی A2 به‌ترتیب $۶۳- تا ۸۲$ و $۷۴- تا ۴۰$ درصد و برای سناریوی B2 به‌ترتیب $۲۷- تا ۳۱$ و $۳۸- تا ۱۴$ درصد را نشان داد. یعنی محدوده تغییرات بارش شبیه‌سازی‌شده توسط هر دو مدل تحت سناریوی A2 نسبت به سناریوی B2 بیشتر است. شاید این تغییرات شدید بارش تحت سناریوی A2 به‌دلیل انتشار زیاد گازهای گلخانه‌ای باشد که حاکی از خروجی‌های متفاوت برای دوره آبی دارد و این امر نشان‌دهنده عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی و سناریوهای انتشار است. از سویی دیگر، برای شبیه‌سازی سامانه‌هایی که به‌طور مستقیم در کنش با اقلیم هستند، مانند منابع آب سطحی یا زیرزمینی، اگر بتوان مدل اقلیمی قابل اطمینانی برای حوضه یا دشت مورد نظر پیدا نمود

و تنها از آن استفاده نمود (به‌جای کل مدل‌ها)، صرفه‌جویی مهمی در وقت و هزینه در مراحل بعدی محاسبات می‌تواند صورت گرفت. برای این منظور از مدل توسعه‌یافته هیبرید استفاده شد که در حقیقت شبیه‌سازی همه مدل‌ها را در نظر می‌گیرد. در واقع هر مدل اقلیمی در پیش‌بینی یک ماه (از کل ماه‌ها) نسبت به سایر مدل‌ها موفق‌تر است که از طریق وزن‌دهی مدل‌های اقلیمی به‌دست می‌آید. به‌عنوان مثال، مدل HadCM3 تحت هر دو سناریوی انتشار در بیش‌تر ماه‌های سال وزن بیش‌تری را در پیش‌بینی متغیر بارش به خود اختصاص داده است. بنابراین خطای ناشی از عدم قطعیت در مدل HadCM3 نسبت به سایر مدل‌ها تحت هر دو سناریوی انتشار کم‌تر است. در واقع، مدل توسعه‌یافته هیبرید مجموعه‌ای از این مدل‌های اقلیمی موفق برای هر ماه می‌باشد که با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و نمونه‌گیری تصادفی از تابع توزیع احتمالاتی مربوطه به‌دست می‌آید. علاوه‌بر عدم قطعیت‌های مربوط به مدل‌های مختلف اقلیمی، عدم قطعیت‌های مربوط به سناریوهای انتشار نیز در تحقیق حاضر به‌کار رفت. درصد تغییرات فصلی بارش در دوره آبی نسبت به دوره مشاهداتی برای مدل هیبرید در فصل زمستان تا پاییز به‌ترتیب برابر با $۲/۶-$ ، $۹/۷-$ ، $۲۹/۷-$ ، $۰/۸۵-$ (برای سناریوی A2) و برابر با $۶/۹$ ، $۳/۱-$ ، $۵/۴-$ ، $۷/۶-$ (برای سناریوی B2) خواهد بود که حاکی از عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی و سناریوهای انتشار است.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، برای ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های مختلف اقلیمی از پنج مدل اقلیمی HadCM3، CCSR-NIES، CSIRO-MK2، CGCM2، GFDL R30 تحت دو سناریوی انتشار A2 و B2 استفاده شده است. برای لحاظ کردن عدم قطعیت از رویکرد بیزی استفاده شد. بدین منظور ابتدا تابع توزیع احتمالاتی سناریوهای تغییر اقلیم بارش محاسبه گردید. بر این اساس تمام مدل‌ها با استفاده از روش میانگین مشاهداتی بارش، وزن‌دهی

همچنین برای CCSR-NIES تحت A2 تغییرات بارش برای زمستان، بهار و تابستان منفی و برای پاییز مثبت می‌باشد. همچنین تحت B2 نتایج نشان داد که روند تغییرات بارش در زمستان به صورت جزئی مثبت بود و تنها CCSR-NIES بارش را در این فصل به مقدار ۵/۵- درصد نسبت به وضعیت مشاهداتی کاهش داده است. در مورد بهار و تابستان نیز روند تغییرات فصلی بارش منفی بوده و فقط HadCM3 بارش را در این فصول کمی افزایش داده است. همچنین تغییرات بارش آبی نسبت به مشاهداتی در پاییز منفی بوده و فقط CCSR-NIES بارش را به میزان ۶/۹۶ درصد نسبت به مشاهداتی افزایش داده است. بیش‌تر مدل‌ها تحت هر دو سناریوی انتشار، بارندگی در بهار و پاییز را به میزان قابل توجهی کاهش داده‌اند و با توجه به این که پاییز، فصل تغذیه آبخوان است، ضروری است در بحث مدیریت منابع آب محدوده مطالعاتی پژوهشگران اقدامات لازم برای پیشگیری از خسارات ناشی از این کاهش بارش را انجام دهند.

شدند. پس از آن تابع توزیع احتمالاتی سناریوهای تغییر اقلیم بارش به مدل Simlab معرفی شد و با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و نمونه‌گیری تصادفی از تابع توزیع احتمالاتی، مدل توسعه‌یافته هیبرید برای تحلیل عدم قطعیت اثر تغییر اقلیم ساخته شد.

با استفاده از معیارهای ارزیابی خطا مشخص شد که از بین مدل‌های مختلف اقلیمی ذکرشده، مدل‌های HadCM3 و CCSR-NIES بهترین کارایی و کم‌ترین خطا و بیش‌ترین همبستگی را با داده‌های مشاهداتی دارند. پس از شبیه‌سازی پارامتر اقلیمی بارش در دوره آبی (۲۰۶۹-۲۰۵۴)، به بررسی تغییرات فصلی بارش آینده با بارش مشاهداتی (۲۰۱۷-۲۰۰۱) پرداخته شد. نتایج نشان دادند که تغییرات فصلی بارش تحت سناریوی A2 برای مدل‌های HadCM3 و مدل توسعه‌یافته هیبرید برای تمام فصول منفی بوده و تنها مدل HadCM3 در فصل زمستان روند تغییرات بارش را به صورت جزئی مثبت پیش‌بینی کرده است. مدل اقلیمی HadCM3، بارش را در فصل بهار به مقدار بیش‌تری نسبت به سایر فصول کاهش داده است.

منابع مورد استفاده

- Anonymous. 2012. Semi-detailed studies of groundwater in Qom, Qom Regional Water Organization. Pp. 1-123. (In Persian with English abstract).
- Anonymous. (2007). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, pp 18.
- Aristeidis K, Giannis T, Loannis D and Daniela J, 2013. Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece. *Journal of Hydrology* 479:146-158.
- Ashofteh PS, Bozorg-Haddad O and Mariño MA, 2015. Risk analysis of water demand for agricultural crops under climate change. *Journal of Hydrologic Engineering* 20 (4).
- Ashofteh PS, 2014. *Climate change and Water: Tools and Approaches*. Javdan Kherad Publications. Tehran, 1-224. (In Persian with English abstract).
- Behlkeh M, Rouhani H., Fathabadi AH and Seyedian SM, 2019. Investigation of climate change impact on hydrological behavior of Arazkose Watershed based on runoff indices. *Water and Soil Science-University of Tabriz* 29 (4): 97-108. (In Persian with English abstract).
- Davoodi P and Ahmadi H, 2017. Investigation of the effects of climate change on climate parameters (Case study: Lar dam basin). Fourth International Conference on New Technologies in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning. 6 October, Salehan University, Tehran. (In Persian with English abstract).
- Dinpashoh Y, 2006. Study of reference crop evapotranspiration in I.R. of Iran. *Agricultural Water Management* 84, 123-129.
- Görgüner M, Ishida K, Kavvas ML, Ohara N and Chen ZQ, 2017. Regional hydrologic impact assessment of

- climate change on reservoir inflows under the CMIP5 climate projections. Pp. 565-571. World Environmental and Water Resource Congress. 21-25 May, Sacramento, California.
- Hashemi-Ana SK, Khosravi M, Tavousi T and Nazaripour H, 2017. Validation of AOGCMs capabilities for simulation length of dry spells under the climate change and uncertainty in Iran. *Scientific-Research Quarterly Geographical Data (SEPEHR)* 26 (103): 43-58. (In Persian with English abstract).
- Hsu KCh, Wng ChH, Chen KCh, Chen ChT and Ma KW, 2010. Climate induced hydrological impacts on the groundwater system the Pingtung plain, Taiwan. *Hydrology Journal* 15 (5): 903-913.
- Izadi Z, Nasrollahi AH and Haghghati Borujeni B, 2017. Predicting seasonal changes in rainfall in future periods under different scenarios of climate change (Case study: Shahrekord). The Second National Conference on Hydrology of Iran. July 21-20, Shahrekord University, Shahrekord.
- Jahanbakhsh Asl S, Dinpazhooh Y, Alinezhad MH, Valizadeh Kamran Kh and Parhizghar M, 2016. Simulation of snow-melt runoff in Shahrchay using the SRM model. *Geography and Environmental Planning* 27 (3): 1-14.
- Mansouri B, Ahmadzadeh H, Massah Bavani A, Morid S, Dekavar M and Lotfi S, 2015. Assessment of climate change impacts on water resources in Zarrinehrud Basin using SWAT model. *Journal of Water and Soil* 28 (6): 1191-1203. (In Persian with English abstract).
- Maroofpour S, Fakheri-Fard A and Shiri J, 2018. Modeling the ground water system response to variation of the consumption and surface discharge. *Water and Soil Science- University of Tabriz* 28 (4): 83-196. (In Persian with English abstract).
- Mehdizadeh S, Meftah Helghi M, Mosaedi A and Seyed-Ghasemi S, 2018. Investigation of the effects of climate change on river flow in Tamar Station-Golestan province The Second National Conference on Meteorology of Iran. 9 May. Ferdowsi University of Mashhad. Mashhad. (In Persian with English abstract).
- Modaresi F, Araghinejad Sh, Ebrahimi K and Kholghi M, 2012. Assessment of climate change effects on the annual water yield of rivers: A case study of Gorganroud River, Iran. *Journal of Water and Soil* 25 (6): 1365-1377. (In Persian with English abstract).
- Nkomozepe T and Chung SO, 2014. The effects of climate change on the water resources of the Geumho River Basin, Republic of Korea. *Journal of Hydro-Environment Research* 8 (4): 358-366.
- Rashid Banam A, 1999. Experimental Bayesian estimation for gross data. Master Thesis. Department of Statistics. Tarbiat Modares University. (In Persian with English abstract).
- Sadeqi A, Dinpashoh Y and Zarghami M, 2019. Projection and spatial analysis of agroclimatic indices in Ghezel Ozan River Basin during the growing season. *Journal of Water and Soil Resources Conservation* 9 (1): 139-162. (In Persian with English abstract).
- Steele-Dunne S, Lynch P, McGrath R, Semmler T, Wang Sh, Hanafin J and Nolan P, 2008. The impacts of climate change on hydrology in Ireland. *Journal of Hydrology* 356 (1-32): 28-45.
- Traynham L, Palmer R and Polebitski A, 2011. Impacts of future climate conditions and forecasted population growth on water supply systems in the Puget Sound region. *Journal of Water Resources Planning and Management* 137 (4), 318-326.
- Watts G, Battarbee RW, Bloomfield JP, Crossman J, Daccache A, Durance I, Elliott JA, Garner G, Hannaford J, Hannah DM, Hess T, Jackson, ChR, Kay AL, Kernan M, Knox J, Mackay J, Monteith DT, Ormerod SJ, Rance J, Stuart ME, Wade AJ, Wade SD, Weatherhead PG and Wilby RL, 2015. Climate change and water in the UK-past changes and future prospects. *Progress in Physical Geography* 39 (1): 6-28.
- Yilmaz I and Yüksek AG (2009). Prediction of the strength and elasticity modulus of gypsum using multiple regression, ANN, ANFIS models and their comparison. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46 (4): 803-810.
- Yousefdoost A, Ismaili P and Raisi SM, 2016. Comparison of the performance of GFDL CM2.1, HadCM3 and CGCM3 models in estimating the effects of climate change on temperature and precipitation in Taleghan basin under A2 emission scenario. The Second International Conference on Environment and Natural Resources, 18 February, Kharazmi Higher Institute of Science and Technology. Shiraz. (In Persian with English abstract).