

شبیه‌سازی آورد رودخانه شیرین (اعظم جره) در وضعیت تغییر اقلیم با استفاده از مدل IHACRES

ریحانه قسمی^۱، رسول میرعباسی نجف‌آبادی^{۲*} و محمدعلی نصر اصفهانی^۳

چکیده

با توجه به آثار محسوس پدیده تغییر اقلیم در قرن حاضر بر پارامترهای هواشناختی و به دنبال آن منابع آب، شبیه‌سازی و پیش‌بینی رواناب در حوضه‌ها بسیار ضروری است؛ از این‌رو در پژوهش حاضر، تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه شیرین (اعظم جره) با تأکید بر عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM، در دوره آتی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ بررسی شد. بدین‌منظور، برای کمی‌سازی عدم قطعیت، خروجی ۲۳ مدل AOGCM با استفاده از روش وزن‌دهی و محاسبه معیارهای عملکردی، مورد ارزیابی قرار گرفت و ۵ مدل GFDL-ESM2G، GISS-E2-R، MPI-ESM-LR، MPI-ESM-MR، MRI-CGCM3 و به‌عنوان مدل‌های برتر انتخاب شدند. خروجی این مدل‌ها تحت سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در این پژوهش استفاده شد که نتایج آن حاکی از افزایش دما و کاهش بارش در منطقه مورد مطالعه بود. در ادامه برای پیش‌بینی رواناب رودخانه شیرین (اعظم جره) از مدل بارش- رواناب IHACRES استفاده شد. مقدار ضریب تعیین (R^2) برای دوره واسنجی و درستی‌سنجی به‌ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۶۹ و همچنین ضریب نش- ساتکلیف به‌ترتیب ۰/۷ و ۰/۵۲ به دست آمد که این نتایج بیانگر عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی بارش- رواناب بود. بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده چشم‌انداز آتی رواناب سالانه رودخانه شیرین (اعظم جره) در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ نسبت به دوره پایه حاکی از کاهش رواناب تحت هر سه سناریو RCP بوده که بیشترین کاهش تحت سناریوی RCP2.6 به میزان ۶۸۰ میلیون مترمکعب بود. همچنین نتایج متوسط رواناب ماهانه طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ نسبت به دوره پایه نشان دهنده کاهش رواناب در اکثر ماه‌ها (به استثنای می، ژوئن، ژولای و اوت) بود.

واژه‌های کلیدی: بارش- رواناب، تغییر اقلیم، رودخانه شیرین، سناریوهای تابشی، مقیاس‌کاهی آماری.

ارجاع: قسمی ر. میرعباسی نجف‌آبادی ر. و نصر اصفهانی م. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی آورد رودخانه شیرین (اعظم جره) در وضعیت تغییر اقلیم با استفاده از مدل IHACRES مجله پژوهش آب ایران. ۳۹: ۸۷-۹۸.

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: mirabbasi@sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۰

مقدمه

بر اساس گزارش IPCC دمای سطح زمین از اواسط قرن ۱۹ تاکنون روندی افزایشی داشته است. این روند افزایشی در دمای کره زمین و همچنین تغییر در خصوصیات فیزیکی جو اشاره به تغییرات آب و هوایی دارد (استوکر و همکاران، ۲۰۱۳). این پدیده که به‌عنوان تغییر اقلیم بیان می‌شود، می‌تواند با احتمال زیاد بر بخش‌های مختلفی که اصلی‌ترین آن بخش منابع آب است، تأثیرگذار باشد. اغلب مدل‌های اقلیمی، تحت سناریوهای انتشار (RCPs)، بر این نکته اتفاق نظر دارند که سطح جهانی دما تا پایان قرن ۲۱، نسبت به دوره ۱۸۵۰-۱۹۰۰ بیش از ۱/۵ درجه سلسیوس و با دید بدبینانه‌تر بیش از ۲ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت (IPCC، ۲۰۱۴). در حال حاضر مطالعه آثار تغییر اقلیم در مقیاس منطقه‌ای به برآورد وضعیت اقلیمی آینده بستگی خواهد داشت. معتبرترین ابزار برای بررسی آثار پدیده تغییر اقلیم بر سیستم‌های مختلف، استفاده از متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های گردش عمومی است (IPCC، ۲۰۱۴). با توجه به آثار زیان‌بار اثر پدیده تغییر اقلیم در دوره‌های آبی و لزوم بهره‌برداری بهینه از نظام‌های منابع آب، پیش‌بینی وضعیت آینده آن برای استفاده نسل‌های آینده از طرف دیگر، باعث شده است که در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های پیش‌بینی منابع آب مورد تأیید قرار گیرد (اعلمی و همکاران، ۱۳۹۳). زمانی که لازم است فقط جریان در خروجی حوضه شبیه‌سازی شود، مدل‌های مفهومی بارش - رواناب (مانند مدل IHACRES) نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ زیرا ضمن ارائه پاسخ خوب، به تلاش محاسباتی و داده‌های ورودی کمتری نیاز دارند (کوپر و همکاران، ۲۰۰۷).

با توجه به این‌که از اصلی‌ترین بخش‌های تحت تأثیر تغییر اقلیم، بخش منابع آب به خصوص تغییر در رواناب رودخانه است؛ لذا در این زمینه پژوهش‌های بسیاری انجام شده است. در این باره می‌توان به پژوهش صفشکن و آخوندعلی (۱۳۹۴) اشاره کرد که به ارزیابی اثر تغییر اقلیم روی جریان ورودی به مخزن سد ملاصدرا در استان فارس پرداختند و از خروجی ۴ مدل گردش عمومی جو تحت سناریوهای انتشار A2 و B1 استفاده کردند و تمامی مدل‌ها را با وزن یکسان در نظر گرفتند. همچنین منصور و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر

رواناب ورودی به مخزن سد کارون ۴ بر اساس گزارش‌های چهارم و پنجم IPCC پرداختند. در پژوهش باب الحکمی و همکاران (۱۳۹۸) بر حوضه نکا، نتایج نشان داد که طی دوره‌های آبی میانگین آورد سالانه رودخانه نکا تحت سناریوهای ۴.۵، ۸.۵ و RCP2.6 بین ۱۵ تا ۴۳ درصد کاهش می‌یابد. مطالعه آقابیگی و همکاران (۱۳۹۸) در برخی حوضه‌های اردبیل که آثار تغییر اقلیم بر رواناب را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی IHACRES بررسی کردند، نشان داد که دبی متوسط کاهش و تعداد وقایع دبی اوج افزایش خواهد یافت. همچنین در پژوهشی ما و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر دبی حوضه چو در آسیای مرکزی پرداختند. آنان برای بررسی اثر تغییر اقلیم از مدل GCM تحت سه سناریو ۴.۵، ۸.۵ و RCP2.6 استفاده کردند. در مطالعه‌ای دایسوک و همکاران (۲۰۱۶) دبی ۲۴ رودخانه در دنیا را با استفاده از ۱۹ مدل گردش عمومی جو بر اساس سناریوهای A1B بررسی کردند. المزروعی و همکاران (۲۰۱۷) نیز به بررسی عدم قطعیت تغییرات دما و بارندگی شبیه‌سازی شده به وسیله مدل‌های گردش عمومی گزارش پنجم تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در عربستان پرداختند.

با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر سیستم‌های مختلف در دوره‌های آبی، می‌توان پی برد با وجود این‌که منابع متعددی از عدم قطعیت بر نتایج نهایی تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین منابع عدم قطعیت در محاسبات نادیده گرفته شده است که این مهم، می‌تواند از میزان کاربردی بودن نتایج بکاهد. از سوی دیگر در برخی تحقیقات علی‌رغم این‌که سعی شده است عدم قطعیت مدل‌های AOGCM^۱ در محاسبات لحاظ شود؛ اما تمامی مدل‌های AOGCM به کار رفته با وزن یکسان اعمال شده‌اند. همچنین در اکثر مطالعات صورت گرفته در زمینه تغییر اقلیم، تعداد بسیار محدودی (کمتر از ۱۰ مدل) از مدل‌های اقلیمی به کار گرفته شده است. از این رو در مطالعه حاضر، تلاش شده است تا ضمن بهره‌گیری از ۲۳ مدل اقلیمی برای پیش‌بینی شرایط اقلیمی آبی، برای کاهش عدم قطعیت این مدل‌ها، از روش وزن‌دهی برای انتخاب مدل برتر استفاده شود. سپس با استفاده از مدل IHACRES، آثار تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه در دوره آبی بررسی قرار شده است.

1- Atmospheric-Oceanic General Climate Mode

مواد و روش‌ها

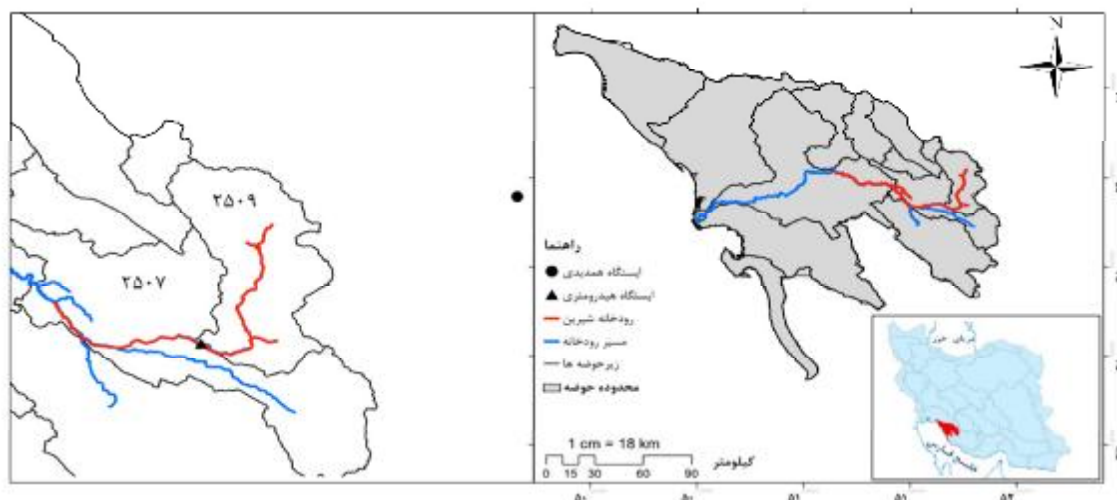
منطقه مورد مطالعه

(اعظم جره) در حوضه حله نشان داده شده است. در این مطالعه از دو نوع داده هیدرولوژیکی و هواشناسی استفاده شده است. داده‌های هیدرولوژیکی از ایستگاه هیدرومتری شیب تنگ- نرگسی که در حوضه و واقع در بالادست رودخانه شیرین به دست آمده است و برای واسنجی و درستی‌سنجی از مدل بارش رواناب استفاده شده است. داده‌های هواشناسی شامل دو متغیر دما و بارش در مقیاس ماهانه برای واسنجی مدل بارش- رواناب، و در مقیاس روزانه برای ریزمقیاس کردن خروجی مدل‌های اقلیمی به کار گرفته شده است. با توجه به عدم وجود ایستگاه همدیدی با دوره آماری مناسب (۳۰ سال) در حوضه منطقه مورد نظر از آمار روزانه دما و بارش ایستگاه همدیدی شیراز در خارج از حوضه به‌عنوان داده هواشناسی استفاده شد. مشخصات ایستگاه‌های مورد نظر در جدول ۱ آورده شده است.

حوضه رودخانه شیرین (اعظم جره) با مساحت ۷۴۰ کیلومترمربع و ارتفاع متوسط حوضه ۱۹۳۶ متر در محدوده‌ای بین عرض‌های جغرافیایی ۱۲' ۲۹° تا ۳۷' ۲۹° و طول‌های جغرافیایی ۵۲° ۰۰' تا ۱۸' ۵۲° واقع شده است. این حوضه از نظر تقسیمات کشوری در استان فارس و در جنوب غربی شهرستان شیراز قرار گرفته است. رودخانه شیرین (اعظم جره) از سرشاخه‌های اصلی رودخانه دالکی است که به طول حدود ۷۰ کیلومتر از دامنه‌های جنوبی کوه دشت ارژن سرچشمه می‌گیرد و دو سرشاخه اصلی آن شامل سرخون و تنگ گچی است. متوسط آبدهی درازمدت رودخانه شیرین (اعظم جره) ۱۱/۳ مترمکعب بر ثانیه و متوسط بارش سالانه ۷۶۱ میلی‌متر است (مطالعات جامع به‌هنگام‌سازی حوضه‌های آبریز کشور، ۱۳۹۱). در شکل ۱ موقعیت رودخانه شیرین

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری و سینوپتیک مورد استفاده در پژوهش حاضر

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	دوره آماری	ارتفاع	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
شیراز	همدیدی	۱۳۳۴-۱۳۹۷	۱۴۸۴	۲۹° ۳۲' ۴۱"	۵۲° ۳۶' ۰۹"
شیب تنگ- نرگسی	هیدرومتری	۱۳۷۵-۱۳۹۵	۹۸۸	۲۹° ۱۵' ۲۴"	۵۲° ۰۳' ۰۸"



شکل ۱- موقعیت رودخانه شیرین (اعظم جره) در حوضه حله

پردازش داده‌های اقلیمی برای دوره آتی

خروجی مدل‌های گردش عمومی جو

در این پژوهش خروجی ۲۳ مدل AOGCM آزموده شد و با روش‌های ذکر شده در ادامه، ۵ مدل به‌عنوان مدل برتر از میان ۲۳ مدل جهت انجام ریزمقیاس نمایی و بررسی

اقلیم آینده انتخاب شد. بر اساس توصیه IPCC دوره تاریخی ۱۹۷۵ تا ۲۰۰۵ برای واسنجی مدل‌های GCM استفاده شد.

شود. ضمناً هر مدلی که وزن آن بیشتر باشد، توانایی مدل‌سازی متغیر مورد نظر (در اینجا بارش) را بیشتر داشته است؛ به گونه‌ای که انتظار می‌رود در شبیه‌سازی آینده نیز خطای کمتری در برآورد داده‌ها داشته باشد. برای بررسی عملکرد مدل‌ها از آماره‌های مختلفی شامل میانگین قدرمطلق خطای نسبی ($MARE$)، شاخص اربیب ($BIAS$)، ضریب تعیین (R^2) و ضریب نش- ساتکلیف (NS) استفاده شد که این ضرایب در زیر آورده شده‌اند:

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

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{O_i} \quad (4)$$

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sigma_s - \sigma_o} \right]^2 \quad (5)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

در معادلات بالا، O_i داده‌های مشاهده‌ای، P_i داده‌های برآورد شده، \bar{O} و \bar{P} میانگین داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده، σ واریانس و n تعداد سال‌های آماری است.

سناریوهای انتشار

از آن‌جا که مهم‌ترین ورودی مدل‌های گردش عمومی اقلیم میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی است و از طرفی تعیین میزان انتشار این گازهای در دوره‌های آتی به‌طور قطعی امکان‌پذیر نیست؛ لذا سناریوهای مختلفی که در برگیرندهٔ چگونگی تغییرات این گازها در آینده است، ارائه شده که سناریوهای انتشار Emission Scenario نامیده می‌شود. در این مطالعه از سناریوهای RCP2.6 با عنوان کم شدت‌ترین سناریو (خوش‌بینانه)، سناریوی RCP4.5 به‌عنوان سناریو متوسط و سناریو RCP8.5 با عنوان بحرانی‌ترین سناریو استفاده شد.

تولید داده‌های تغییر اقلیم

برای حذف اغتشاشات در شبیه‌سازی نوسانات اقلیمی ناشی از بزرگ بودن سلول‌های محاسباتی در مدل‌های AOGCM، معمولاً به جای استفادهٔ مستقیم از داده‌های AOGCM در محاسبات تغییر اقلیم، از میانگین دوره‌ای این داده‌ها استفاده می‌شود. بدین‌منظور در این پژوهش برای تصحیح خروجی مدل‌های AOGCM در هر مدل از

بررسی عدم قطعیت در مدل‌های AOGCM

در مطالعات تغییر اقلیم، منابع مختلف عدم قطعیت بر نتایج نهایی تأثیر می‌گذارد که این منابع، شامل عدم قطعیت مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی، عدم قطعیت روش‌های ریزمقیاس نمایی، عدم قطعیت مربوط به سناریوهای انتشار و عدم قطعیت در روش شبیه‌سازی بارش- رواناب است. در پژوهش حاضر تأثیر عدم قطعیت مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی بر رواناب رودخانه شیرین (اعظم جره) مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور برای تعدیل عدم قطعیت موجود در تخمین تغییرات متغیرهای اقلیمی، تحت تأثیر تغییر اقلیم، به روش میانگین مشاهداتی دما و بارش¹ MOTP که توسط مساح بوانی (۲۰۰۶) معرفی شده، وزن‌دهی شد و سپس اقدام به محاسبه معیارهای عملکردی شد. در روش وزن‌دهی MOTP، مدل‌های AOGCM بر اساس انحراف میانگین دما یا بارندگی شبیه‌سازی شده در دوره پایه از میانگین داده‌های مشاهداتی وزن‌دهی می‌شوند. در این پژوهش برای بررسی عدم قطعیت از کمیت بارش استفاده شد که دلیل آن اهمیت پارامتر بارش و تأثیر آن در رواناب که هدف پژوهش حاضر است، می‌باشد. بدین منظور ابتدا برای تعیین دقت هر کدام از مدل‌های GCM در پیش‌بینی بارندگی در هر ایستگاه، از معادلهٔ (۱) استفاده شد:

$$PE_G = |P_{BG} - P_{BO}| \quad (1)$$

در این معادله، PE_G مقدار خطای مطلق هر کدام از مدل‌های GCM در پیش‌بینی بارندگی، P_{BG} مقدار خروجی بارندگی هر یک از مدل‌های GCM در دوره پایه (۱۹۷۵-۲۰۰۵) و P_{BO} مقدار متوسط ۳۰ ساله بارندگی هستند.

وزن مدل‌های GCM بر اساس مقایسه خطاهای به دست آمده بر اساس معادلهٔ (۲) محاسبه می‌گردند:

$$WP_G = \frac{1/PE_G}{\sum_{G=1}^{19} 1/PE_G} \quad (2)$$

در این معادله WP_G وزن هر یک از مدل‌های GCM مورد استفاده برای پیش‌بینی مقدار بارندگی است. وزن‌های محاسبه شده از معادله بالا برای هر ماه به‌صورت جداگانه محاسبه می‌شوند تا دقت پیش‌بینی‌ها افزایش پیدا کند (تاو و ژانگ، ۲۰۱۰). گفتنی است که جمع وزن‌ها باید یک

1- Mean Observed Temperature Precipitation

زمانی داده‌های مشاهداتی دما و بارش ایستگاه شیراز به همراه خروجی مدل‌های اقلیمی در هر ماه هستند که به کمک این مولد سری زمانی ۳۰ ساله داده‌های دما و بارش این ایستگاه ایجاد شد. پس از این مرحله، امکان استفاده از خروجی مدل‌های تغییر اقلیم برای پیش‌بینی رواناب حوضه رودخانه شیرین (اعظم جره) فراهم شد.

شبیه‌سازی بارش - رواناب مدل IHACRES

برای شبیه‌سازی جریان ماهانه در دوره آتی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ و بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب، مدل مفهومی بارش-رواناب IHACRES با استفاده از سناریوهای اقلیمی مدنظر قرار گرفت. این مدل یک مدل پیوسته مفهومی-دینامیکی برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در مقیاس حوضه است که توسط جکمن و هورنبرگر (۱۹۹۳) توسعه یافت.

اساس مدل IHACRES از دو مدول غیرخطی کاهش و مدول خطی هیدروگراف تشکیل می‌شود. بدین منظور که ابتدا بارندگی r_k و دما t_k در هر گام زمانی k توسط مدول غیرخطی، به بارندگی مؤثر u_k تبدیل، سپس به وسیله مدول خطی هیدروگراف به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود. ابتدا برای واسنجی مدل IHACRES برای حوضه رودخانه شیرین (اعظم جره)، از داده دمای ماهانه ایستگاه شیراز و بارش و دبی ماهانه ایستگاه شیب تنگ-نرگسی در دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۶) استفاده شد. پس از واسنجی مدل، رواناب ماهانه این رودخانه در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ با معرفی داده‌های دما و بارش ریزمقیاس شده تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای حوضه، مورد شبیه‌سازی شد.

نتایج و بحث

بررسی عملکرد مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی بارش حوضه رودخانه شیرین (اعظم جره) در دوره پایه (۱۹۷۵-۲۰۰۵)

ابتدا اقدام به تهیه فایل داده‌های ماهانه دما و بارش مدل‌های AOGCM از سایت IPCC در دوره ۱۹۷۵-۲۰۰۵ شد. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS، پس از وارد کردن مختصات مکانی موردنظر و طول دوره آماری مورد نیاز، سری زمانی متغیر اقلیمی مربوط به سلولی که منطقه مورد مطالعه در آن واقع شده، استخراج شد. سپس همان‌گونه که ذکر شد، برای کاهش عدم

روش اختلاف برای دما (معادله (۶)) و روش نسبت‌ها برای بارش (معادله (۷)) استفاده شده است. به این صورت که مقادیر اختلاف دما و نسبت بارش از مقایسه خروجی مدل در گذشته در دوره تاریخی (۱۹۷۵-۲۰۰۵) و داده‌های مشاهداتی به دست می‌آید. با فرض این‌که این تفاوت‌ها در آینده نیز ثابت بمانند، همین مقادیر برای تصحیح متوسط درازمدت هر ماه در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) نیز به کار می‌رود (جونز و هولم، ۱۹۹۶):

$$\Delta P_i = \left(\frac{\bar{P}_{GCM,fut,i}}{\bar{P}_{GCM,bace,i}} \right) \quad (7)$$

$$\Delta T_i = (\bar{T}_{GCM,fut,i} - \bar{T}_{GCM,bace,i}) \quad (8)$$

در معادلات بالا ΔP_i و ΔT_i به ترتیب بیانگر اختلاف دما و نسبت بارش برای میانگین درازمدت ۳۱ ساله در دوره تاریخی برای هر ماه، $\bar{P}_{GCM,fut,i}$ و $\bar{T}_{GCM,fut,i}$ میانگین ۳۱ ساله دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های گردش عمومی جو در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۵۰) برای هر ماه، $\bar{P}_{GCM,bace,i}$ و $\bar{T}_{GCM,bace,i}$ میانگین ۳۱ ساله دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های گردش عمومی جو در دوره مشابه با دوره مشاهداتی (۱۹۷۵-۲۰۰۵) برای هر ماه می‌باشند.

ریزمقیاس نمایی با مدل LARS-WG

همان‌گونه که بیان شد، عمده‌ترین مشکلات در استفاده از خروجی مدل‌های AOGCM در مطالعات ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم در سطوح منطقه‌ای، بزرگ بودن مقیاس مکانی سلول محاسباتی آن‌ها نسبت به منطقه مورد مطالعه است. در روش‌های ریزمقیاس گردانی خروجی مدل‌های AOGCM با داده‌های مشاهداتی تطبیق داده می‌شوند (مساح بوانی، ۲۰۰۶). به دلیل این‌که خروجی مدل‌های AOGCM به صورت ماهانه است؛ لذا برای به کارگیری و استفاده از داده‌های مدل‌ها از مولدهای هواشناسی استفاده می‌شود که تصادفی و مبتنی بر احتمال و خروجی آن‌ها داده‌های هواشناسی در مقیاس روزانه است. از مشهورترین مولدهای هواشناسی LARS-WG است که برای تولید مقادیر بارش، تشعشع، دماهای بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه، در وضعیت تغییر اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود (راسکو و همکاران، ۱۹۹۱؛ سیمنو و باروو، ۲۰۰۲). این مدل برای تولید داده‌های هواشناسی، نیاز به خروجی مدل‌های اقلیمی دارد. در این پژوهش ورودی‌های مدل LARS-WG، سری

بارش ماه مشابه می‌توان نتیجه‌گیری کرد استفاده از چندین مدل مختلف سبب نمایش عدم قطعیت و افزایش چشمگیر دقت پیش‌بینی‌های اقلیمی شود. در نهایت ۵ مدل بزرگ مقیاس GFDL-ESM2G و GISS-E2-R و MPI-ESM-LR و MPI-ESM-MR و MRI-CGCM3 که دارای بهترین عملکرد و بالاترین وزن در پیش‌بینی بارش منطقه مورد نظر در دوره تاریخی (۱۹۷۵-۲۰۰۵) بودند، برای منطقه مورد مطالعه جهت اقدامات مدنظر انتخاب شد.

قطعیت در مدل‌های AOGCM، اقدام به محاسبه وزن جهت مشاهده دقت مدل‌ها در تخمین پارامتر بارش و محاسبه معیارهای عملکردی برای بررسی عملکرد مدل‌ها، شد. نتایج نشان داد که مدل‌های مختلف GCM، دقت متفاوتی در پیش‌بینی بارش داشتند (جدول ۲). مدل MPI-ESM-MR با وزن ۰/۱۶۶ بیشترین و مدل‌های MIROC-ESM-CHEM با وزن ۰/۰۱۰ کمترین دقت را در تخمین بارش دارا بودند. از نتایج و ارزیابی معیارهای عملکردی هر یک از مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی مقادیر

جدول ۲- نتایج وزن‌دهی و معیارهای عملکردی ۲۳ مدل AOGCM در دوره پایه (۱۹۷۵-۲۰۰۵)

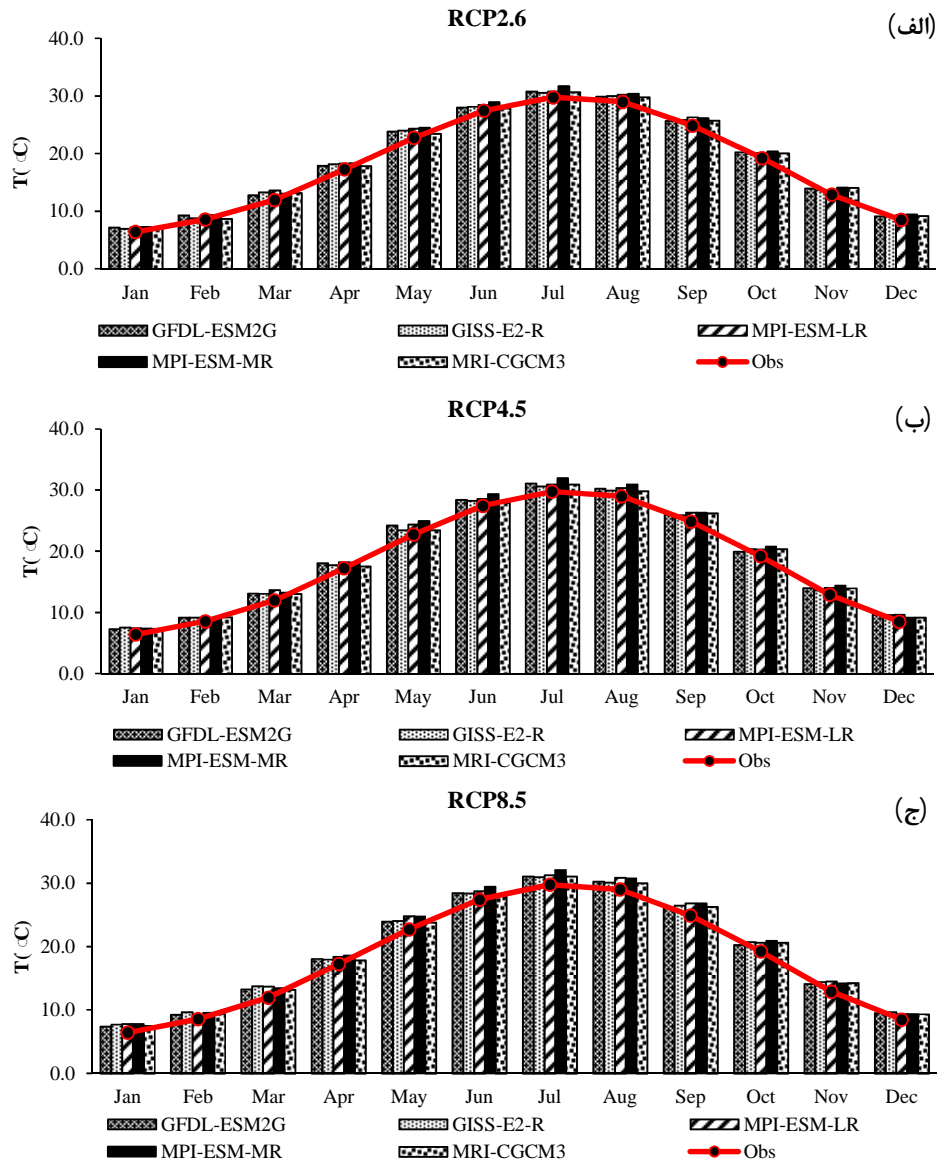
NS	R ²	BIAS	MARE	WP _g	مدل
0/65	0/89	0/49	0/47	0/052	BCC-CSM1.1
0/41	0/80	0/70	0/70	0/028	BNU-ESM
0/28	0/77	0/81	0/80	0/063	Can-ESM2
0/74	0/86	0/22	0/45	0/017	CCSM4
0/64	0/81	0/25	0/50	0/076	CESM1(CAM5)
0/75	0/92	0/40	0/45	0/027	CESM1(WACCM)
0/44	0/81	0/67	0/65	0/061	CNRM-CM5
0/2	0/80	0/88	0/87	0/036	CSIRO-MK3.6.0
0/54	0/85	0/60	0/60	0/016	FIO-ESM
0/30	0/74	0/79	0/77	0/044	GFDL-CM3
0/72	0/89	0/39	0/39	0/029	GFDL-ESM2G
0/43	0/85	0/70	0/67	0/053	GISS-E2-H
0/71	0/87	-0/01	0/43	0/034	GISS-E2-R
0/65	0/87	0/48	0/52	0/041	HadGEM2-AO
0/28	0/78	0/81	0/79	0/028	IPSL-CM5A-LR
0/02	0/55	0/97	0/97	0/024	IPSL-CM5A-MR
0/63	0/96	-0/48	0/59	0/033	MIROC5
0/90	0/96	0/16	0/23	0/011	MIROC-ESM
0/90	0/96	0/20	0/30	0/010	MIROC-ESM-CHEM
0/69	0/84	0/30	0/43	0/051	MPI-ESM-LR
0/80	0/90	0/15	0/38	0/166	MPI-ESM-MR
0/84	0/92	0/01	0/34	0/028	MRI-CGCM3
0/44	0/81	0/67	0/64	0/070	NorESM1

مورد مطالعه در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ برای سناریو RCP2.6 بین ۰/۸ تا ۱/۳ درجه سلسیوس و برای سناریو RCP4.5 بین ۰/۹ تا ۱/۴ درجه سلسیوس و برای سناریو RCP8.5 بین ۱/۱ تا ۱/۶ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش یابد (جدول ۳). بیشترین افزایش دما در فصل‌های تابستان، پاییز و زمستان تحت سناریو RCP8.5 در حدود ۱/۳ درجه سلسیوس است و کمترین افزایش دما در فصل

ارزیابی سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارش حوضه در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۵۰) نتایج تغییرات ماهانه دما تحت ۵ مدل AOGCM برای هر سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در شکل ۲ نشان می‌دهد تمامی مدل‌ها تحت هر سه سناریوی انتشار دمای بیشتری را برای دوره آتی نسبت به دوره پایه تخمین می‌زنند؛ به‌گونه‌ای که انتظار می‌رود دمای منطقه

افزایش را برای دمای آبی نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. به‌طور کلی میانگین افزایش دما توسط ۵ مدل اقلیمی برای سه سناریو انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۹، ۱/۱ و ۱/۳ درجه سلسیوس در دوره آبی ۲۰۲۰-۲۰۵۰ نسبت به دوره پایه پیش‌بینی شده است.

زمستان تحت سناریو RCP2.6 در حدود ۰/۸ درجه سلسیوس است. در مقایسه با سایر مدل‌ها، مدل MPI-ESM-MR در اکثر ماه‌ها، دمای آبی بیشتری را نسبت به دوره پایه در هر سه سناریو نشان می‌دهد. همچنین مدل‌های GISS-E2-R و MRI-CGCM3 برای سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5، در اغلب ماه‌ها کمترین



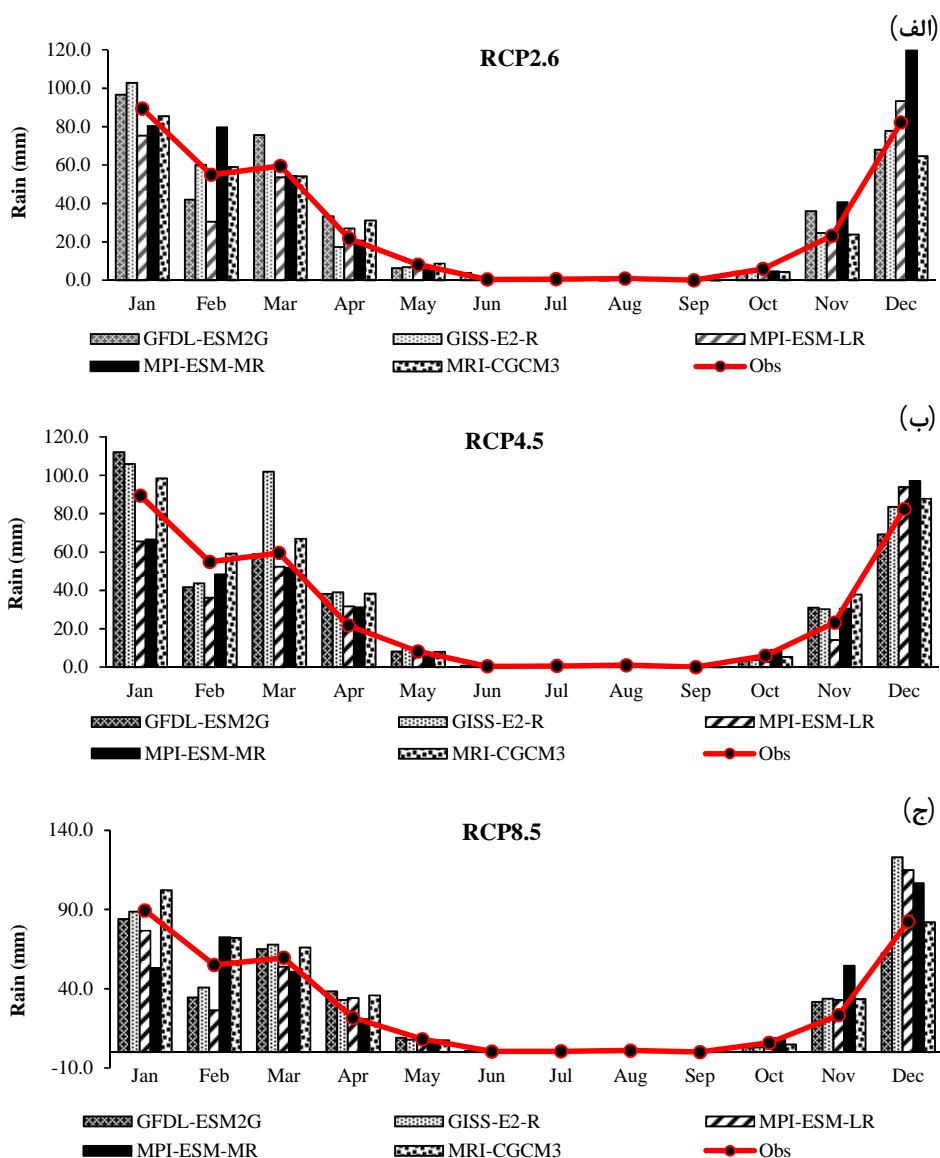
شکل ۲- تغییرات ماهانه متوسط دما برای ۵ مدل برتر انتخاب شده تحت سناریو انتشار RCP در دوره آبی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه: (الف) RCP2.6، (ب) RCP4.5 و (ج) RCP8.5

مدل‌ها بارش دوره آبی را نسبت به دوره پایه بیشتر و برخی کمتر برآورد کرده‌اند. بیشترین افزایش بارش در فصل پاییز و تحت سناریو RCP8.5 بود. همچنین مدل‌های منتخب در منطقه مورد مطالعه تحت هر سه

نتایج ارائه شده از اختلاف بارش در دوره تاریخی و دوره آبی حاصل از خروجی ۵ مدل با سه سناریو در شکل ۳ حاکی از آن است که مدل‌های مختلف در تخمین میزان بارش دوره آبی نسبت به پایه هماهنگ نبوده و برخی از

آن‌جا که هدف مطالعه حاضر بررسی تغییرات رواناب رودخانه شیرین (اعظم جره) در دوره آبی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ است؛ لذا نتایج روند بارش برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ در شکل ۴ بررسی شد. نتایج بررسی روند تغییرات بارش با توجه به روابط رگرسیونی نمودارهای شکل ۴ در دوره آبی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ حاکی از روند کاهشی برای هر سه سناریوی RCP است.

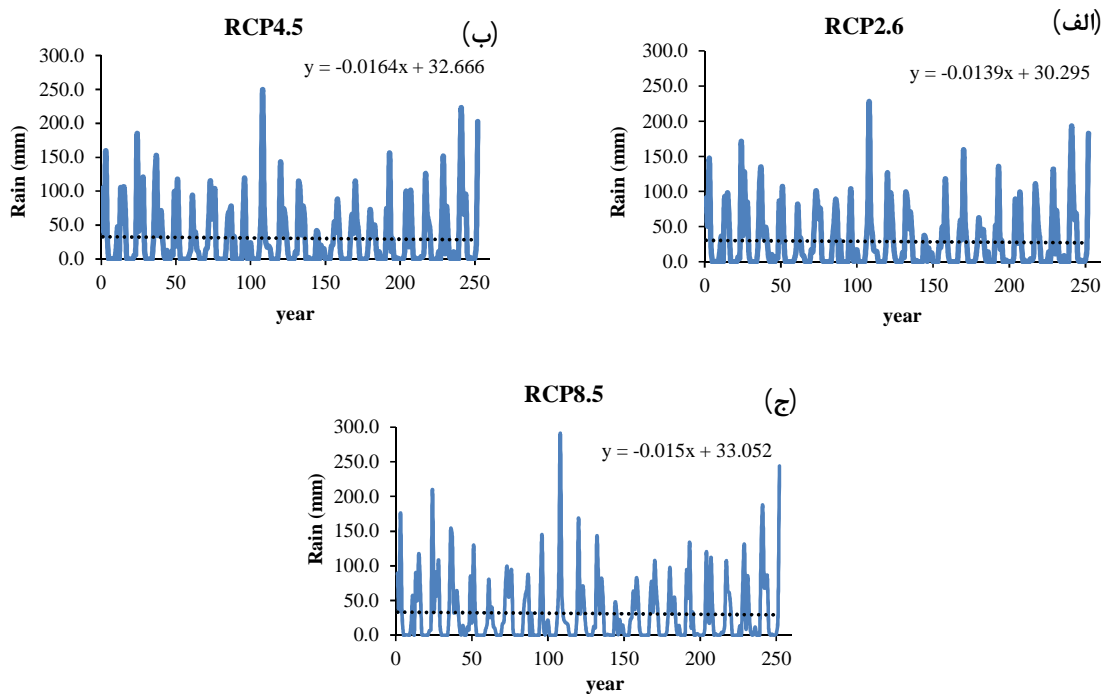
سناریو در فصل بهار افزایش بارش و در فصل زمستان کاهش بارش را در دوره آبی (۲۰۲۰-۲۰۵۰) نسبت به دوره پایه برآورد کرده‌اند. بیشترین مقدار افزایش بارش در مدل‌های GISS-E2-R و MRI-CGCM3 تحت هر سه سناریو RCP دیده می‌شود. با این حال می‌توان نتیجه گرفت منطقه مورد مطالعه در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ با چشم‌انداز افزایش بارش تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 و کاهش بارش تحت سناریو RCP2.5 است. از



شکل ۳- تغییرات ماهانه بارش برای ۵ مدل برتر انتخاب شده تحت هر سه سناریو انتشار RCP در دوره آبی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه: (الف) RCP2.6، (ب) RCP4.5 و (ج) RCP8.5

جدول ۳- میزان تغییرات ماهانه متوسط دما و بارش میانه مدل‌های AOGCM برای هر کدام از سناریو انتشار RCP در دوره آتی ۲۰۲۰-2050 نسبت به دوره پایه

سناریو	ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	جون	ژوئای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
RCP2.6	دما	۰/۸	۰/۴	۱/۲	۰/۹	۱/۳	۰/۷	۱/۱	۱/۱	۰/۹	۱/۱	۱/۱	۰/۷
	بارش	-۳/۸	۴/۲	-۵	۵/۴	-۱	۰/۶	-۰/۳	-۰/۳	۰	-۱/۳	۱/۶	-۴/۴
RCP4.5	دما	۱	۰/۶	۱/۲	۰/۹	۱/۵	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۴	۱/۱	۱/۱	۱/۱
	بارش	۹/۱	-۱۱/۱	-۰/۵	۱۶/۶	۰	-۰/۳	-۰/۲	-۰/۱	۰	-۲/۱	۷/۲	۵/۵
RCP8.5	دما	۱/۳	۰/۹	۱/۵	۰/۸	۱/۳	۱/۱	۱/۳	۱/۳	۱/۶	۱/۴	۱/۴	۰/۹
	بارش	-۵/۲	-۱۴/۱	۵/۶	۱۲/۶	-۱	۰/۶	-۰/۴	۰	۰	-۱/۴	۱۰/۴	۲۴/۳



شکل ۴- روند تغییرات بارش در دوره آتی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ تحت سناریوهای (الف) RCP2.6، (ب) RCP4.5 و (ج) RCP8.5

شبیه‌سازی بارش - رواناب

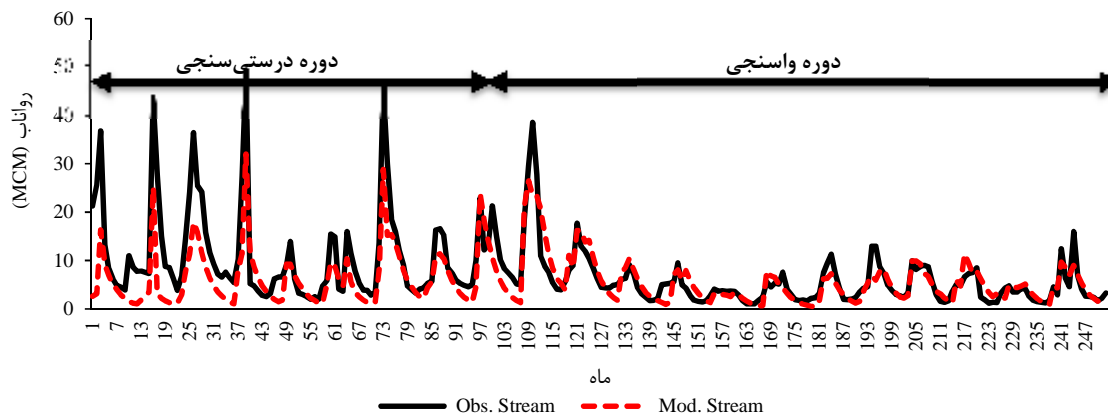
بهترین عملکرد را داشته است. پس از واسنجی مدل، دوره ۱۹۹۶-۲۰۰۴ برای درستی‌سنجی مدل استفاده شد. با توجه به نتایج به دست آمده باید توجه داشت که مدل واسنجی شده برای حوضه به‌طور کلی جریان‌های کم حوضه را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. در شبیه‌سازی جریان‌های حداکثر، در بعضی از سال‌ها ناتوان بوده و مقادیر کمتری را شبیه‌سازی کرده است (شکل ۵). به‌طور کلی نتایج نشان از عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رواناب دارد. نتایج به دست آمده از عملکرد مدل IHACRES در مطالعه حاضر با نتایج پژوهش‌های صورت گرفته در ایران مطابقت دارد. از جمله پژوهش موحملو و همکاران (۱۳۹۸) که دقت مدل را برای حوضه تجن با

برای واسنجی و درستی‌سنجی مدل IHACRES از آمار ماهانه دمای متوسط ایستگاه شیراز و بارش و دبی ایستگاه شیب تنگ- نرگسی در دوره ۱۹۹۶-۲۰۱۶ استفاده شد. برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه رودخانه شیرین (اعظم جره) در دوره آتی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ ابتدا مدل IHACRES برای دوره ۲۰۰۴-۲۰۱۶ واسنجی و سپس برای دوره ۱۹۹۶-۲۰۰۴ مورد درستی‌سنجی قرار گرفت. نتایج عملکرد مدل در دوره واسنجی و دوره درستی‌سنجی در جدول ۴ و شکل ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مدل در دوره واسنجی با ضریب تعیین ۰/۷۴ و معیار خطای (MARE) ۰/۳۸ و ضریب نش- ساتکلیف ۰/۷

شاخص NSE بررسی و همچنین پژوهش دودانگه و همکاران (۱۳۹۷) که عملکرد مدل را در حوضه آبریز طالقان با ضریب NSE (۰/۷۵)، ضریب همبستگی (۰/۸۷)، شاخص RMSE (۷/۲) و شاخص تطابق (۰/۹۳) بررسی و عملکرد مدل را مطلوب اعلام کردند.

جدول ۴- مقادیر معیارهای عملکرد در مراحل واسنجی و درستی‌سنجی مدل IHACRES

دوره درستی‌سنجی				دوره واسنجی				دوره
RMSE	NS	MARE	R ²	RMSE	NS	MARE	R ²	آماره مقدار
۴/۸	۰/۵۲	۰/۴۸	۰/۶۹	۲/۳	۰/۷	۰/۳۸	۰/۷۴	



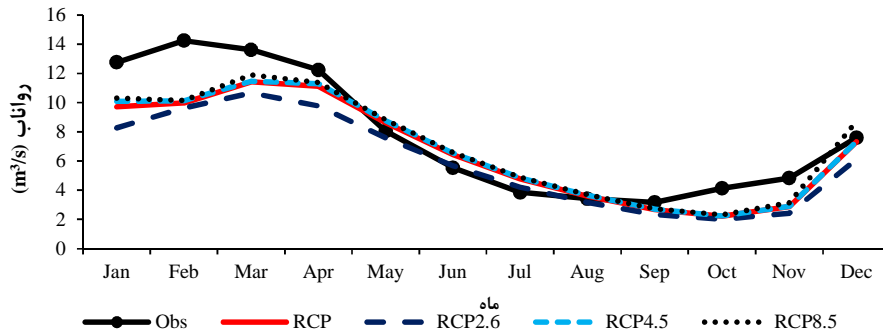
شکل ۵- مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره‌های واسنجی و درستی‌سنجی مدل IHACRES

۲۰۴۰ میزان متوسط رواناب ماهانه نسبت به دوره مشاهداتی تقریباً در تمام ماه‌های سال (به استثنای می، ژوئن، ژولای و اوت) کاهش می‌یابد.

در ادامه برای کاهش عدم قطعیت و ارائه برآوردی منطقی از متوسط رواناب بلند مدت طی دوره آتی، مقدار متوسط گیری شده میانه جریان ماهانه تحت هر کدام از سناریوها محاسبه و مبنای متوسط ماهانه رواناب رودخانه شیرین (اعظم جره) در دوره آتی با عنوان منحنی RCP در شکل ۶ بررسی شد. با توجه به نتایج مقایسه منحنی RCP و Obs می‌توان پیش‌بینی کرد متوسط حجم رواناب سالانه تولیدی رودخانه شیرین (اعظم جره) که در دوره مشاهداتی حدود ۳۰۰۰ میلیون مترمکعب بوده است، طی دوره آتی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ نسبت به دوره پایه به میزان ۴۰۱ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد. همچنین بیشترین کاهش در متوسط حجم رواناب سالانه به میزان ۶۸۲ میلیون مترمکعب در سناریوی RCP2.6 پیش‌بینی می‌شود. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که تغییر اقلیم منجر به کاهش حجم رواناب رودخانه شیرین (اعظم جره) طی دوره آتی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ خواهد شد.

بررسی رواناب رودخانه شیرین (اعظم جره) در دوره آتی

پس از واسنجی مدل IHACRES، برای هر یک از سناریوها، میانه متوسط ماهانه دما و بارش تولید شده از ۵ مدل اقلیمی برتر انتخاب شده محاسبه و در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ سری ماهانه رواناب رودخانه شیرین (اعظم جره)، شبیه‌سازی شد. سپس متوسط رواناب ماهانه درازمدت در دوره آتی تحت هر یک از سناریوهای RCP با متوسط رواناب ماهانه دوره مشاهداتی مقایسه و ارزیابی شد که نتایج در شکل ۶ ارائه شد. همان‌گونه که از نتایج ملاحظه می‌شود، متوسط رواناب ماهانه در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ برای هر کدام از سناریوهای RCP نسبت به دوره پایه در ماه‌های پر بارش (زمستان و بهار) کاهش داشته است که بیشترین آن تحت سناریو RCP2.6 به مقدار ۴/۶۱ مترمکعب بر ثانیه در ماه فوریه نسبت به دوره پایه است. به بیان دقیق‌تر چشم‌انداز آینده نشان می‌دهد رودخانه شیرین (اعظم جره) در فصل زمستان و اوایل بهار و نیز اوایل پاییز با کاهش رواناب در دوره آتی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ تحت هر سه سناریوی انتشار RCP مواجه خواهد بود. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت طی دوره آتی ۲۰۲۰-



شکل ۶- مقایسه رواناب ماهانه مشاهداتی با متوسط میانه رواناب شبیه‌سازی سه سناریوهای RCP در دوره آبی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ رودخانه شیرین (اعظم جره)

نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه شیرین (اعظم جره) در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ تحت سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با استفاده از یک روش وزن‌دهی، از بین ۲۳ مدل گردش عمومی گزارش پنجم، ۵ مدل که مطابقت بیشتری با شرایط اقلیمی منطقه در دوره پایه داشتند، انتخاب شدند. نتایج بررسی سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی حاکی از افزایش دمای متوسط و کاهش بارش در منطقه مورد مطالعه تحت هر سه سناریو انتشار RCP در دوره آبی ۲۰۲۰-۲۰۴۰ نسبت به دوره پایه است. نتایج بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه شیرین (اعظم جره) نیز نشان داد متوسط رواناب سالانه درازمدت در دوره آبی به میزان ۶۸۲ میلیون مترمکعب در سناریوی RCP2.6، ۳۶۴ میلیون مترمکعب در سناریوی RCP4.5 و ۲۸۰ میلیون مترمکعب در سناریوی RCP8.5 نسبت به دوره مشاهداتی کاهش نشان می‌دهد. این کاهش رواناب برای سناریو RCP2.6 بیشترین مقدار است که در ماه فوریه اتفاق می‌افتد.

منابع

- اعلمی، م. آقابابایی، ب. احمدی، م. و فرزین، س. ۱۳۹۳. تخصیص بهینه نظام‌های منابع آب با استفاده از سامانه پویا. مجله مهندسی منابع آب. ۲۳(۷): ۹۹-۱۱۰.
- آقایگی، ن. اسمعیلی عوری، ا. مصطفی‌زاده، ر. و گلشن، م. ۱۳۹۸. اثرات تغییر اقلیم بر رواناب با مدل هیدرولوژیکی IHACRES در برخی از حوزه‌های آبخیز استان اردبیل. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۰ (۳۸): ۱۷۶-۱۸۷.
- باب‌الحکمی، ع. غلامی سفید کوهی، م. ع. و عمادی، ع. ۱۳۹۸. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی و پیش‌بینی رواناب حوضه رودخانه نکا طی دوره‌های آبی. مجله اکوهیدرولوژی. ۷(۲): ۲۹۱-۳۰۲.
- دودانگه، ا. شاهدهی، ک. و سلیمانی، ک. ۱۳۹۷. کاربرد تئوری کوپلا جهت ارزیابی عملکرد مدل هیدرولوژیکی IHACRES (مطالعه موردی: حوضه آبریز طالقان). مجله فیزیک زمین و فضا. ۱(۴۴): ۷۱-۸۸.
- صفشکن، ف. و آخوندعلی، ع. م. ۱۳۹۴. ارزیابی اثر تغییر اقلیم روی جریان ورودی به مخزن سد ملاصدرا در استان فارس. کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در علوم کشاورزی و محیط‌زیست. مالزی، کوالالامپور، دسامبر، ۱-۱۴.
- مساح بوانی، ع. ۱۳۸۵. ارزیابی ریسک تغییر اقلیم و تأثیر آن بر منابع آب، مطالعه موردی حوضه زاینده رود اصفهان. گزارش نهایی رساله دکتری. پژوهشکده مهندسی آب دانشگاه تربیت مدرس، تهران. ۱۹۰ ص.
- مطالعات به‌هنگام‌سازی طرح جامع آب کشور در حوضه‌های آبریز کشور. ۱۳۹۱. حوضه آبریز حله. دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا. وزارت نیرو. ۲۳۷ ص.
- منصوری، ا. امین‌نژاد، ب. و احمدی، ح. ۱۳۹۷. بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به مخزن سد کارون ۴ بر اساس گزارشات چهارم و پنجم IPCC. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). ۲(۲۲): ۳۴۵-۳۵۸.
- موجرلو، ف. فضل‌اولی، ر. و عمادی، ع. ر. ۱۳۹۸. بررسی آثار تغییر اقلیم بر تخصیص منابع آب حوضه آبریز تجن. سومین همایش ملی مدیریت منابع آب نواحی ساحلی، ساری. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع

- de la Paix, CP 2300 CH-1211 Geneva 2 (Switzerland).
20. Tao F. and Zhang Z. 2010. Adaptation of maize production to climate change in North China Plain: quantify the relative contributions of adaptation options. *European Journal of Agronomy*. 33: 103-116.
- طبیعی ساری، مهرماه. ۱-۱۱.
10. Almazroui M. Nazrul Islam M. Saeed F. Alkhalaf A. and Dambul R. 2017. Assessing the robustness and uncertainties of projected changes in temperature and precipitation in AR5 Global Climate Models over the Arabian Peninsula. *Atmospheric Research*. 194: 202-213.
11. Cooper V. A. Nguyen V. T. V. and Nichol J. A. 2007. Calibration of conceptual rainfall-runoff models using global optimization methods with hydrologic process-based parameter constraints. *Journal of Hydrology*. 334(3-4): 455-466.
12. IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri R. K. and Meyer L. A (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p.
13. Jakeman A. J. and Hornberger G. M. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall runoff model? *Water Resources Research*. 29(8): 2637-2649.
14. Jones P. D. and Hulme M. 1996. Calculating regional climatic times series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *International journal of climatology*. 16: 361-377.
15. Ma C. Sun L. Liu S. Shao M. A. and Luo Y. 2015. Impact of climate change on the streamflow in the glacierized chu river basin, central asia. *Journal of Arid Land*. 7(4): 501-513.
16. Nohara D. Kitoh A. Hosaka M. and Oki T. 2016. Impact of Climate Change on River Discharge Projected by Multimodel Ensemble. *Journal of Hydrometeorology*. 7: 1076-1088.
17. Racsco P. Szeidl L. and Semenov M. A. 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modeling*. 1(57): 27-41.
18. Semenov M. A. and Barrow E. M. 2002. *LARS-WG: a stochastic weather generator for use in climate impact studies. Version 3.0 User Manual*.
19. Stocker T. F. Qin D. Plattner G. K. Tignor M. Allen S. K. Boschung J. and Vasconcellos de Menezes V. 2013. *The Physical Science Basis. Working Group, I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change-Abstract for decision-makers. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'evolution du climat/Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC, C/O World Meteorological Organization, 7bis Avenue*