

اثر تغییر اقلیم آینده بر پاسخ هیدرولوژیک در حوضه آبخیز سد طرق مشهد

مجتبی سرابی^۱، محمد تقی دستورانی^{۲*}، آذر زرین^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ استادیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۴/۱۹، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۷/۲۳

چکیده

این مطالعه به بررسی اثر تغییر اقلیم بر وضعیت سیلاب حوضه آبخیز سد طرق با استفاده از ترکیب چهار مدل گردش کلی (GCM) از پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 و مدل هیدرولوژیکی و نیمه‌توزیعی HEC-HMS برای چهار دوره آینده ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰، ۲۰۶۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ می‌پردازد. در ابتدا عملکرد مدل‌های گردش کلی در دوره تاریخی ۱۹۹۳-۲۰۱۲ با استفاده از داده‌های ایستگاهی به عنوان داده‌های مشاهداتی درستی‌سنجی گردید. در مرحله بعد به منظور کاهش عدم قطعیت مدل‌ها یک مدل همادی به وسیله یک روش وزن‌دهی ارائه گردید. به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیکی نیز از چهار واقعه سیلاب مستقل در ماه‌های مارس و مه استفاده شد و چند سنجه آماری برای بررسی عملکرد مدل در شبیه‌سازی وقایع سیلاب به کار گرفته شد. نتایج مطالعه ضمن تایید کارایی مدل‌های مورد استفاده در مطالعه، حاکی از افزایش میزان دبی اوج و حجم سیلاب در ماه مارس تحت تمامی سناریوها و در تمامی دوره‌ها به جز سناریوی SSP3-7.0 در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ می‌باشد. در رابطه با ماه مه میزان دبی اوج و حجم سیلاب تحت تمامی سناریوها و در تمامی دوره‌ها به جز سناریوی SSP1-2.6 و سناریوی SSP3-7.0 در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ که یک روند افزایشی داشته است، کاهش پیدا کرده است.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، CMIP6، SSP Scenarios، مدل‌سازی هیدرولوژیکی، حوضه آبخیز

در سطح جهانی پژوهشگران اقلیمی بر این موضوع اتفاق نظر دارند که به علت گرمایش جهانی، تغییر اقلیم رخ داده است و نتایج مطالعات متعدد نشان دهنده تغییرات قابل توجه پارامترهای اقلیمی مختلف مانند دما و بارش در مناطق مختلف دنیا می‌باشد (آذری و همکاران، ۲۰۱۶). تغییرات در الگوهای آب و هوایی که تحت عنوان تغییر اقلیم شناخته می‌شود، یک پدیده مستند و مورد تایید است و به احتمال زیاد در آینده نیز ادامه می‌یابد (د اولیویرا و همکاران، ۲۰۱۹). این تغییرات همان طور که اشاره شد، می‌تواند پارامترهای اقلیمی را به شکل قابل توجهی تحت تاثیر قرار دهد و نهایتاً تغییرات این پارامترها به نوبه خود می‌تواند تاثیرات قابل توجهی بر سایر اجزا یک سیستم مانند منابع آب و خاک داشته باشد (آپ د هیپیت و همکاران، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹). این تاثیرات در قالب تسریع چرخه‌های هیدرولوژیکی، تغییر مقدار و زمان جریان آب و تهدید منابع آب و پایداری زیست محیطی حوضه‌های آبخیز خود را نشان می‌دهد (تیان و همکاران، ۲۰۲۰). از همین رو تغییر اقلیم به عنوان یک عامل عمده تاثیرگذار بر جریان آب و تعادل در مقیاس‌های مکانی و زمانی آن شناخته می‌شود (ونگ و همکاران، ۲۰۱۸). اما تغییرات در جریان آب و هیدرولوژی ناشی شده از تغییر اقلیم بی تاثیر نخواهد بود، این تغییرات ممکن است در دسترس بودن آب برای آبیاری و تولید نیروی برق آبی و به دنبال آن تولید غذا و تولید انرژی را تحت تاثیر قرار دهد (پندی و همکاران، ۲۰۲۰). لذا این موضوع اهمیت بررسی اثر تغییر اقلیم آینده بر پاسخ هیدرولوژیکی را برای آگاهی از شرایط آینده حوضه آبخیز جهت اتخاذ تصمیمات مدیریتی دو چندان می‌کند. مطالعات مختلف در این زمینه برای بررسی تاثیر تغییر اقلیم آینده بر وضعیت هیدرولوژیکی عمدتاً به وسیله برونداد مدل‌های جهانی- اقلیمی تحت سناریوهای مختلف و مدل‌های هیدرولوژیکی جهت شبیه سازی جریان آب صورت می‌گیرد.

سرپا و همکاران (۲۰۱۵)، به منظور بررسی اثرات

اثر تغییر اقلیم آینده بر پاسخ هیدرولوژیک در موزه آبیاز سد طرق مشهد

تغییرات آب و هوایی بر جریان آب، برای یک حوضه مرطوب (Sao Lourenco) و خشک (Guadalupe) مدیترانه‌ای در کشور پرتغال از مدل SWAT استفاده کردند. کاهش جریان برای هر دو حوضه مرطوب (۱۳ درصد) و خشک (۱۴-۱۸ درصد) از نتایج مطالعه آن‌ها می‌باشد. کاهش ۱۳ تا ۹۰ درصدی رواناب توسط موراتو و همکاران (۲۰۱۵)، در بررسی تاثیر سناریوهای مختلف اقلیمی بر منابع آب در هفده حوضه مدیترانه‌ای دو حوضه رودخانه Guadiana و Sado در کشور پرتغال گزارش شده است. آن‌ها از دو مدل جهانی- اقلیمی، سه مدل اقلیمی- منطقه‌ای و مدل هیدرولوژیکی SHETRAN برای این بررسی استفاده کردند. به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب در حوضه رودخانه Sutelj در شمال غربی هیمالیا، سینگ و همکاران (۲۰۱۵) از دو مدل اقلیمی HadCM3 و CGCM3 استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها افزایش متوسط جریان سالانه از ۱/۳ تا ۷/۸ درصد را برای مدل CGCM3 و از ۰/۳ تا ۳/۴ درصد را برای مدل HadCM3 نشان می‌دهد. در تحقیقی در حوضه آبخیز Ilala در شمال اتیوپی شیفر و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از پنج مدل جهانی- اقلیمی و مدل هیدرولوژیکی SWAT به بررسی پاسخ هیدرولوژیکی به سناریوهای تغییر اقلیم برای سه دوره زمانی تا پایان قرن پرداختند. آن‌ها کاهش رواناب سطحی را از ۱/۷۴ درصد در سناریوی RCP4.5 برای دوره زمانی نزدیک تا ۰/۳۶ درصد در سناریوی RCP8.5 برای دوره‌های زمانی پایانی پیش‌بینی کردند. سحرایا و سارما (۲۰۱۸)، در مطالعه‌ای اثرات آینده تغییر اقلیم را بر فرآیندهای هیدرولوژی در دو حوضه Basistha و Bharalu در هندوستان بررسی کردند. نتایج مطالعه افزایش متوسط دبی سالانه را حداکثر تا ۱/۴۳ و ۲/۲۰ متر مکعب بر ثانیه به ترتیب برای سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در حوضه Basistha و کاهش مقدار آن را حداکثر تا ۰/۶۷ و ۰/۴۶ متر مکعب بر ثانیه در حوضه Bharalu نشان می‌دهد. احمدی و همکاران (۲۰۱۹)، در تحقیقی که به بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب سطحی حوضه آبخیز کن، بالادست

حوضه آبخیز شهری تهران با استفاده از داده‌های مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP پرداختند، افزایش و کاهش نرخ رواناب را به ترتیب برای فصل زمستان و بهار در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۰ پیش‌بینی کردند. در پژوهشی دیگر نیلاور و همکاران (۲۰۱۹)، از سه مدل اقلیمی منطقه‌ای تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 برای بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر جریان برای چهار دوره آینده در حوضه رودخانه Purna در هندوستان استفاده کردند. نتایج حاکی از افزایش میانگین جریان ماهانه به اندازه ۲۴/۴۷ تا ۱۱۵/۹۴ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. صافی و ساروکالیگ (۲۰۲۰)، در ارزیابی تاثیرات تغییر اقلیم آینده بر پاسخ هیدرولوژیکی حوضه رودخانه Harvey در استرالیا، از مجموعه‌های هشت مدل گردش کلی و یک مدل مفهومی بارش- رواناب استفاده کردند. نتایج نشان دهنده کاهش ۲۷-۱۷ درصدی جریان در میانه قرن و ۵۲-۲۳ درصدی در پایان قرن می‌باشد.

در یکی از پژوهش‌های مرتبط در زمینه بررسی اثر تغییر اقلیم بر وضعیت هیدرولوژیکی رضایی‌زمان و همکاران (۱۳۹۲)، از مدل SDSM برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای هیدروکلیماتولوژی حوضه سیمینه‌رود تحت سناریوهای A2 و B2 استفاده کردند. کاهش ۲۵ درصدی منابع آب این حوضه از نتایج این مطالعه می‌باشد. بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب در حوضه زربینه رود برای دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۵ با استفاده از خروجی ۱۴ مدل AOGCM پژوهشی دیگر در این زمینه است که توسط منصور و همکاران (۱۳۹۳) انجام شده است. نتایج این تحقیق کاهش ۲۸ درصدی رواناب ورودی به سد زربینه‌رود را نشان می‌دهد. بحری و دستورانی (۱۳۹۶)، جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم آینده بر پاسخ هیدرولوژیکی حوضه آبخیز اسکندری، برونداد مدل HadCM3 را تحت سناریوهای A2 و B1 توسط مدل LARS-WG ریز مقیاس کردند. نتیجه این تحقیق افزایش دبی اوج و حجم سیلاب در ماه‌های مارس، اکتبر و فوریه و کاهش آن در ماه آوریل را نشان می‌دهد. منصور و همکاران (۱۳۹۷)، از مدل گردش کلی HadCM3 از

فاز چهارم و مدل ترکیبی از فاز پنجم برای بررسی تغییرات جریان ورودی به سد کارون ۴ برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ استفاده کردند. بر اساس مطالعه آن‌ها جریان سالانه تحت سناریوهای B1 و RCP2.6، افزایش ۱/۸ و ۱/۵ درصدی و تحت سناریوهای A2 و RCP8.5، کاهش ۱۰/۴ و ۹/۸ درصدی را به ترتیب تجربه خواهد کرد. در پژوهشی دیگر، مرتضوی زاده و گودرزی (۱۳۹۷)، اثرات تغییر اقلیم را بر رواناب سطحی در دشت هشتگرد با استفاده از مدل هیدرولوژیکی IHACRES تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 مورد بررسی قرار دادند. کاهش ۱۵ و ۲۰ درصدی رواناب به ترتیب برای سناریوی اول و دوم از نتایج مطالعه آن‌ها می‌باشد. شهری و همکاران (۱۳۹۸)، در حوضه دشت ورامین با استفاده از مدل ریز مقیاس‌نمایی LARS-WG و مدل هیدرولوژیکی SWAT اثرات تغییر اقلیم را بر رواناب بررسی نمودند. آن‌ها کاهش رواناب در فصل زمستان و پاییز و افزایش آن را در فصل بهار برآورد کردند. کاهش آبدهی رودخانه تراز- هرکس نسبت به دوره پایه در مطالعه شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر رواناب این رودخانه توسط زیدعلی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۸)، گزارش شده است. آن‌ها در مطالعه خود از سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 و مدل بارش- رواناب IHACRES استفاده کردند. در مطالعه‌ای دیگر یونسی‌فرد و همکاران (۱۳۹۹)، به بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه شازند با استفاده از مدل هیدرولوژیک WetSpa و مدل ریز مقیاس‌نمایی SDSM پرداختند. این محققان کاهش میزان رواناب را برای سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب برابر با ۵/۵۳، ۱۳/۸۹ و ۲۵/۱ درصد برآورد نمودند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مطالعات مختلف انجام شده در زمینه بررسی اثر تغییر اقلیم بر وضعیت آب و خاک عمدتاً به وسیله برونداد مدل‌های گردش کلی جو برای بررسی وضعیت آینده اقلیم شامل متغیرهای دما و بارش و مدل‌های هیدرولوژیکی برای بررسی وضعیت آب و خاک تحت سناریوهای مختلف و برای دوره‌های زمانی مختلف انجام می‌گیرد. مدل‌های اقلیمی ممکن است به

اثر تغییر اقلیم آینده بر پاسخ هیدرولوژیک در موزه آبیژ سد طرق مشهد

۱۷° تا ۵۹° ۳۴' واقع شده است (شکل ۱). رودخانه طرق، یکی از شاخه‌های کشف رود و تأمین کننده آب سد طرق مشهد است. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم خشک تا نیمه خشک با میانگین دمای سالانه ۱۱/۵ درجه سلسیوس و میانگین بارش سالانه ۲۹۸/۴۵ میلی‌متر است. متوسط دمای کمینه سالانه ۴/۴۸، متوسط دمای بیشینه سالانه ۱۸/۶۶ درجه سلسیوس می‌باشد. بیشترین بارش متوسط ماهانه حوضه مربوط به ماه اسفند به میزان ۵۴/۵ میلی‌متر است و در ماه‌های فصل تابستان مقدار بارش کمتر از ۹ میلی‌متر است. ارتفاع متوسط حوضه سد طرق ۱۷۰۰/۷ متر، حداقل ارتفاع ۱۲۶۱/۴ متر (در محل خروجی حوضه) و حداکثر ارتفاع هم ۲۲۴۰/۶ متر از سطح دریا در مناطق مرتفع غربی می‌باشد. میانگین آبدهی سالانه حوضه آبخیز ۰/۴۶ مترمکعب بر ثانیه و میانگین آبدهی ماه‌های سیلابی حوضه آبخیز شامل اسفند، فروردین و اردیبهشت به ترتیب برابر با ۱/۵، ۱/۲۴ و ۰/۹۴۸ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. میانگین حجم‌آورد سالانه حوضه آبخیز ۱۴/۴۸ میلیون مترمکعب و میانگین آورد ماه‌های سیلابی حوضه آبخیز شامل اسفند، فروردین و اردیبهشت به ترتیب برابر با ۳/۱۱، ۴/۰۲ و ۲/۵۴ میلیون مترمکعب می‌باشد. حوضه آبخیز سد طرق دارای دو ایستگاه تبخیرسنجی و باران‌سنجی (سد طرق و مغان) و یک ایستگاه هیدرومتری (کرتیان) می‌باشد.

مدل‌های گردش کلی (GCM)^۳ و سناریوها

به منظور بررسی روند تغییرات بارش، از داده‌های بارش روزانه مدل اثرات چند بخشی پروژه مقایسه مدل‌های فاز ششم^۴ تحت سناریوهای SSP، برای این مطالعه استفاده شده است. داده‌های این پروژه هم کوچک مقیاس شده‌اند که تفکیک افقی مدل‌ها ۰/۵ درجه می‌باشد و هم از نظر اریبی تصحیح شده‌اند. به همین دلیل در این مطالعه از این داده‌ها استفاده شده است. سناریوهای به کار گرفته شده در این مطالعه شامل سه سناریوی خوش بینانه (-SSP1-2.6)، بدبینانه (SSP3-7.0) و خیلی بدبینانه (-SSP5-

صورت منفرد و گروهی استفاده شوند و بر حسب نیاز توسط تکنیک‌ها و مدل‌های آماری و دینامیکی برای محدوده خاصی کوچک مقیاس شوند. سناریوهای به کار رفته در این مطالعات نیز بر حسب زمان انجام تحقیق و هدف تحقیق متفاوت می‌باشند و مطالعات انجام شده عمدتاً در مقیاس حوضه آبخیز صورت گرفته است. در حقیقت خروجی مدل‌های اقلیمی به عنوان ورودی مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شوند تا با کمک آن شبیه‌سازی بر روی حوضه آبخیز صورت گیرد. این تکنیک متداول‌ترین روش برای چنین مطالعاتی می‌باشد.

لازم به ذکر است که برونداد مدل‌های فاز ششم تغییر اقلیم (CMIP6) تحت سناریوهای SSP^۱ که به وسیله تلفیق واداشت گازهای گلخانه‌ای^۲ و خط سیرهای اجتماعی-اقتصادی طراحی شده است، به تازگی انتشار یافته و در دسترس قرار گرفته‌اند (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۷). تاکنون مطالعه زیادی در رابطه با تاثیر نتایج برونداد این مدل‌ها بر وضعیت هیدرولوژیکی حوضه آبخیز انجام نشده است.

هدف از این مطالعه بررسی اثر تغییر اقلیم آینده بر پاسخ هیدرولوژیکی در حوضه آبخیز سد طرق با توجه به برونداد مدل‌های CMIP6 می‌باشد. برای نیل به هدف تحقیق مراحل زیر انجام شد. (۱) درستی‌سنجی مدل‌های CMIP6 و مقایسه برونداد مدل‌های منفرد و همادی (۲) بررسی روند تغییرات بارش در دوره پایه و دوره‌های آینده (۳) اجرای مدل هیدرولوژیکی با استفاده از بارش در دوره پایه و دوره‌های آینده (۴) بررسی اثر تغییرات بارش بر پاسخ هیدرولوژیک حوضه آبخیز برای چهار دوره آینده

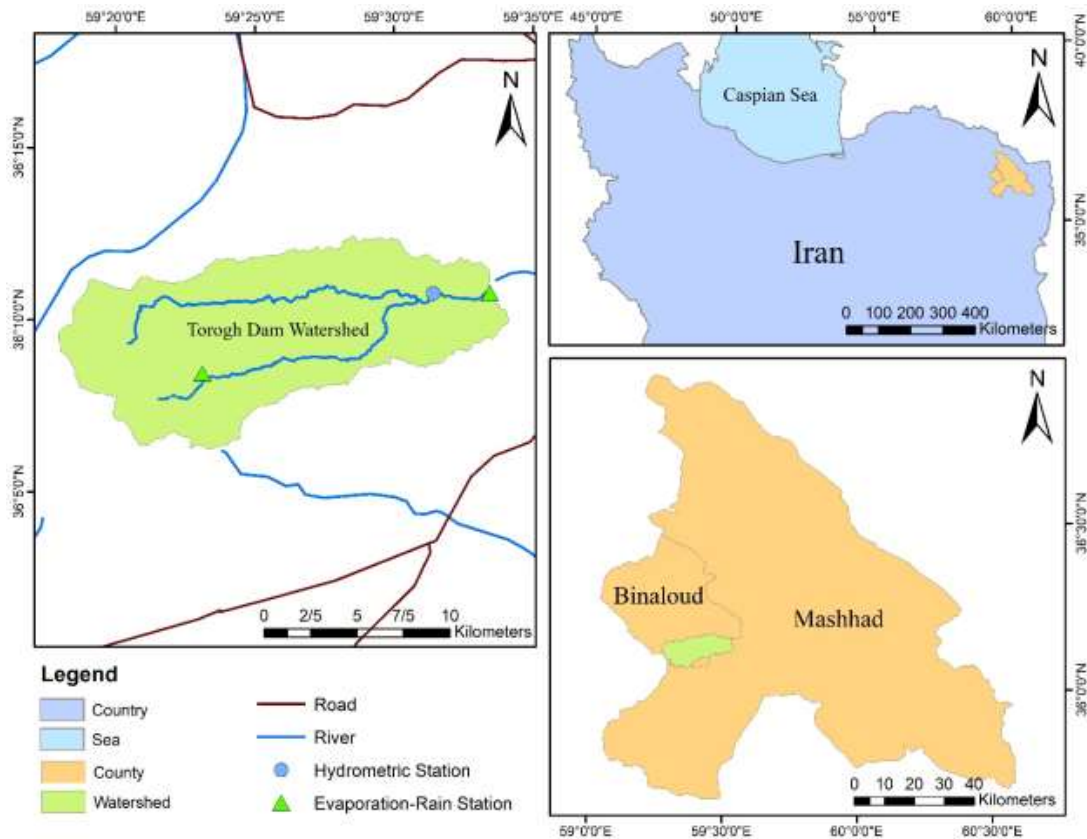
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سد طرق در شمال شرق ایران و جنوب شهرستان مشهد و در دامنه‌های شمال شرقی زون ساختاری بینالود واقع شده است. محدوده مطالعاتی دارای مساحت ۱۶۳/۱۲ کیلومتر مربع و بین عرض جغرافیایی شمالی ۳۶° ۶' تا ۳۶° ۱۲' و طول جغرافیایی شرقی^۱

3 General Circulation Models

4 Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز سد طرق و ایستگاه‌های مطالعاتی

استفاده در مطالعه انتخاب شدند (جدول ۱). در ادامه به منظور بررسی کارایی این مدل‌ها برای منطقه مطالعاتی، در یک بررسی مقایسه‌ای میانگین داده‌های ماهانه تاریخی این مدل‌ها در برابر میانگین داده‌های ماهانه مشاهداتی نماینده حوضه آبخیز (متوسط بارش ایستگاه‌های طرق و مغان که در داخل حوضه ولی در ارتفاعات متفاوت قرار دارند) برای دوره تاریخی ۲۰۱۲-۱۹۹۳ به مدت ۲۰ سال قرار گرفت. انتخاب این بازه زمانی به این دلیل انجام شد که اولاً دوره تاریخی مدل‌های CMIP6 تا سال ۲۰۱۴ می‌باشد و ثانیاً برای دو ایستگاه مطالعاتی حوضه آبخیز در این دوره آمار اندازه‌گیری شده موجود می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است بارش‌هایی که منجر به ایجاد وقایع مورد استفاده در این مطالعه شده است عمدتاً در محدوده بارش‌هایی است که منجر به سیلاب‌های متوسط (یک الی دو بار در سال) در حوضه آبخیز می‌شود و

می‌باشد. سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به ترتیب سناریوهایی با انتشار پایین گازهای گلخانه‌ای، انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای و انتشار بسیار بالای گازهای گلخانه‌ای می‌باشند (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۲۱). این بخش خود شامل دو مرحله می‌باشد که مرحله اول شامل شناسایی مدل‌های موجود در پروژه مربوطه و تهیه داده‌های تاریخی بارش این مدل‌ها به منظور بررسی درستی آن‌ها در منطقه مورد مطالعه می‌باشد و مرحله دوم شامل اجرای روش همادی‌سازی به منظور کاهش خطاها و افزایش درستی است. در مرحله اول، پس از انجام بررسی‌های صورت گرفته چهار مدل گردش کلی از پروژه مربوطه شامل GFDL-ESM4، MRI-ESM2-0، MPI-ESM1-2-HR، IPSL-CM6A-LR که دارای ویژگی‌های مد نظر از جمله دارا بودن داده‌های بارش تاریخی و همچنین سناریوها بودند، جهت

جدول ۱. مشخصات مدل‌های گردش کلی جو مورد استفاده در این مطالعه

| Model | Country | Model Agency | Atmospheric resolution |
|---------------|---------|---|------------------------|
| GFDL-ESM4 | USA | NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA | 50 km × 50 km |
| IPSL-CM6A-LR | France | Institut Pierre-Simon Laplace, France | 50 km × 50 km |
| MPI-ESM1-2-HR | Germany | Max Planck Institute for Meteorology, Germany | 50 km × 50 km |
| MRI-ESM2-0 | Japan | Meteorological Research Institute, Japan | 50 km × 50 km |

جدول ۲. سنجه‌های آماری مورد استفاده در این مطالعه

| سنجه آماری | معادله | محدوده | بهترین مقدار | رابطه |
|---------------------------------------|---|--------|--------------|-------|
| Mean absolute error (MAE) | $MAE = \frac{\sum_{i=1}^n A_i - F_i }{n}$ | 0 - ∞ | 0 | (۱) |
| Root mean squared error (RMSE) | $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - F_i)^2}{n}}$ | 0 - ∞ | 0 | (۲) |
| Mean absolute percentage error (MAPE) | $MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left \frac{A_i - F_i}{A_i} \right }{n} \times 100$ | 0 - ∞ | 0 | (۳) |
| Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) | $NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - F_i)^2}{\sum_{i=1}^n (A_i - A^{mean})^2}$ | -∞ - 1 | 1 | (۴) |
| BAIS | $BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \times 100$ | -∞ - ∞ | 0 | (۵) |

دهنده تعداد کل گام‌های زمانی می‌باشد. هر چه مقدار خطاهای مذکور و اریبی به صفر نزدیک تر باشد نشان دهنده درستی بیشتر مدل‌ها می‌باشد.

در مرحله دوم، به منظور کاهش خطاهای به دست آمده و افزایش درستی مدل‌های مورد استفاده اقدام به ایجاد مدل همادی با استفاده از روش میانگین‌گیری وزنی MOTP^۵ شد. برای این منظور پس از تعیین وزن هر مدل با توجه به میزان درستی آن، اقدام به میانگین‌گیری وزنی از داده‌های مدل‌ها می‌شود. در این روش مدل‌های انتخاب شده بر اساس مقدار انحراف میانگین بارش شبیه‌سازی شده در دوره پایه از میانگین داده‌های مشاهداتی وزن‌دهی می‌شوند:

$$W_i = \frac{(1/\Delta T_i)}{\sum_{i=1}^N (1/\Delta T_i)} \quad (۶)$$

5 Mean Observed Temperature Precipitation

هدف بررسی سیلاب‌های متوسط ایجاد شده از همین بارش‌ها بوده است. لذا باید گفت اعتبارسنجی داده‌های ماهانه نیز می‌توانند برای وقایع این چنینی استفاده شوند و تغییرات در میانگین‌های ماهانه تا حد زیادی منعکس‌کننده تغییرات چنین بارش‌هایی هستند. از چند سنجه آماری شامل میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، جذر میانگین مربع خطا (RMSE)، درصد میانگین مطلق خطا (MAPE)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) و ضریب همبستگی (r) برای این بررسی مقایسه‌ای استفاده شد. آماره‌های مورد استفاده در این مطالعه در جدول (۲) ارائه شده است.

در این روابط At نشان دهنده مقدار داده مشاهداتی (ایستگاه)، Ft نشان دهنده مقدار داده پیش‌بینی شده (مدل)، اندیس t نشان دهنده هر گام زمانی و n نشان

در این رابطه W_i وزن هر مدل در ماه مورد نظر، ΔTi انحراف میانگین طولانی مدت بارش شبیه‌سازی شده توسط هر یک از مدل‌های مطالعه در دوره پایه در ماه مورد نظر از میانگین داده‌های مشاهداتی و N نیز تعداد مدل‌های مورد استفاده در مطالعه می‌باشد (مساح بوانی، ۱۳۸۵).

لازم به ذکر است مدل‌های استفاده شده در این مطالعه که در دوره تاریخی درستی‌سنجی شده‌اند، مدل‌های تغییر اقلیم هستند که بر اساس فرضیات سناریوها تغییرات مربوطه را ایجاد کرده و برای آینده اجرا شده‌اند. لذا مسئله تغییر اقلیم را در نظر گرفته و با فرض تغییر اقلیم اجرا شده‌اند. از طرفی مدلی که بهترین عملکرد و سازگاری را در دوره تاریخی داشته باشد طبیعی است که وزن بیشتری به خود اختصاص می‌دهد زیرا قطعاً مدلی که با داده‌های موجود بهترین نتیجه را دارد هر چند ممکن است برای آینده عدم قطعیت‌هایی وجود داشته باشد نسبت به مدل‌های دیگر مناسب‌تر است و وزن بیشتری می‌گیرد.

مدل‌سازی هیدرولوژیکی

به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر وضعیت سیلاب در دهه‌های آتی برای حوضه مورد مطالعه از مدل هیدرولوژیکی و نیمه توزیعی HEC-HMS که به صورت تک واقعه و پیوسته کاربرد دارد، استفاده شده است. این بخش خود شامل دو مرحله می‌باشد. مرحله اول شامل آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل جهت تنظیم مدل با توجه به شرایط حوضه مورد مطالعه و بررسی کارایی مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب با توجه به این شرایط می‌باشد و مرحله دوم شامل اعمال تغییرات بارش در دهه‌های آتی در داخل مدل و بررسی تغییرات ایجاد شده در ویژگی‌های سیلاب می‌باشد. در مرحله اول پس از بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که وقایع سیلاب عمدتاً در ماه‌های مارس، آوریل و مه در این حوضه رخ می‌دهد، با این

حال به دلیل نبود اطلاعات معتبر برای ماه آوریل تنها دو ماه سیلابی مارس و مه مورد بررسی قرار گرفت. در همین راستا به منظور پوشش بازه زمانی وقایع سیلاب در حوضه مورد مطالعه، جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل از چهار رخداد سیل مستقل در ماه‌های مارس و مه استفاده شد. وقایع استفاده شده در بخش واسنجی شامل رویدادهای ۱۳ مارس ۱۹۹۴ و ۸ مه ۲۰۰۵ و در بخش اعتبارسنجی شامل رویدادهای ۵ مه ۲۰۰۲ و ۱۵ مارس ۲۰۰۵ می‌باشد. همچنین به منظور آنالیز حساسیت مدل هیدرولوژیکی از سه پارامتر شماره منحنی، زمان تاخیر و تلفات اولیه در این مطالعه استفاده شده است. شماره منحنی پارامتری بی بعد است که مقدار آن بین صفر تا صد متغیر می‌باشد. جهت تعیین شماره منحنی نیاز به اطلاعات کاربری اراضی، وضعیت هیدرولوژیکی و همچنین گروه‌های هیدرولوژیکی خاک می‌باشد. به علت عدم وجود اطلاعات خاک حوضه مورد مطالعه، اقدام به بازدید میدانی به منظور نمونه‌برداری خاک از واحدهای منابع اراضی و همچنین کنترل نقشه کاربری اراضی شده است. بافت خاک در این مطالعه با استفاده از روش هیدرومتری جهت تعیین گروه‌های هیدرولوژیکی خاک و ماده آلی خاک با استفاده از روش والکلی بلاک جهت تعیین وضعیت هیدرولوژیکی اراضی محاسبه شده‌اند. در نهایت با استفاده از اطلاعات نقشه کاربری اراضی که دارای دقت مناسب می‌باشد و همچنین وضعیت هیدرولوژیکی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک مقدار شماره منحنی واحدهای منابع اراضی به دست آمده است. به منظور محاسبه مقدار شماره منحنی زیرحوضه‌های موجود اقدام به میانگین‌گیری وزنی از شماره منحنی واحدهای منابع اراضی موجود در هر زیرحوضه بر اساس مقدار مساحت هر واحد اراضی در آن زیرحوضه صورت گرفته است. زمان تاخیر، فاصله زمانی بین مرکز ثقل بارش مازاد و مرکز ثقل هیدروگراف بوده و غالباً به جای آن، زمان تاخیر تا اوج (Lag to peak) در نظر گرفته می‌شود که فاصله زمانی بین مرکز ثقل بارش مازاد و نقطه اوج است. در این مطالعه جهت محاسبه پارامتر زمان تاخیر از روش‌های

بارش استفاده شده است.

اسکلت اصلی مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS از سه مولفه اصلی مدل حوضه، مدل هواشناسی و مشخصات کنترل تشکیل شده است که به منظور انجام عملیات شبیه‌سازی در داخل مدل قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است در این مطالعه از روش‌های شماره منحنی SCS، هیدروگراف واحد SCS، زمان تاخیر و هایتوگراف ویژه به ترتیب جهت محاسبات تلفات، تبدیل بارش به رواناب، روندیابی و بارندگی استفاده شده است. جهت محاسبات جریان پایه نیز از روش بدون جریان پایه در این بخش استفاده شده است. در حقیقت میزان جریان پایه در خارج از مدل محاسبه و از دبی مشاهداتی کسر شده است و برای تمامی وقایع مدل در همه زیر حوضه‌ها بدون جریان پایه در نظر گرفته شده است.

نتایج و بحث

درستی‌سنجی مدل‌های CMIP6

درستی‌سنجی عملکرد مدل‌های GFDL-ESM4، MPI-ESM1-2-HR، IPSL-CM6A-LR و MRI-ESM2-0 در شبیه‌سازی بارش در حوضه مورد مطالعه، به وسیله مقایسه دوره تاریخی این مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی در دوره پایه به صورت ماهانه برای نماینده حوضه آبخیز (متوسط بارش ایستگاه‌های طرق و مغان) صورت گرفته است. از پنج سنجه آماری شامل MAE، RMSE، MAPE، NSE و همچنین ضریب همبستگی برای این بررسی مقایسه‌ای استفاده شده است. نتایج به دست آمده از عملکرد مدل‌ها در حوضه مورد مطالعه در جدول (۳) ارائه شده است.

نتایج به دست آمده از سنجه‌های آماری در بخش درستی‌سنجی عملکرد مدل‌های CMIP6 در رابطه با شبیه‌سازی متغیر بارش، حاکی از کارایی نسبتاً مناسب مدل‌ها در حوضه مورد مطالعه می‌باشد. مقادیر آماره‌های به دست آمده برای مدل همادی در تمامی موارد نسبت به مدل‌های منفرد حاکی از عملکرد مناسب‌تر مدل همادی بود. در رابطه با سنجه‌های آماری MAE، RMSE و

زمان تمرکز برانسیبی ویلیامز و چاو استفاده شده است. در همین راستا ابتدا جهت محاسبه زمان تاخیر به وسیله هر کدام از روش‌ها، ۰/۶ مقادیر آن‌ها محاسبه شده سپس میانگین زمان تاخیر به دست آمده از هر دو روش به عنوان زمان تاخیر مبنا در نظر گرفته شده است. روابط (۷) و (۸) به ترتیب معادلات مربوط به روش برانسیبی ویلیامز و چاو می‌باشد. همچنین جهت تعیین مقدار پارامتر تلفات اولیه نیز از رابطه (۹) استفاده شده است.

$$T_c = \frac{L}{1.5D} \times \left(\frac{A^2}{I} \right)^{0.2} \quad (7)$$

$$T_c = 0.00032 \times \frac{I^{1.15}}{h^{0.385}} \quad (8)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (9)$$

در این روابط T_c نشان دهنده زمان تمرکز (ساعت)، L نشان دهنده طول مسیر آبراهه اصلی (کیلومتر)، D نشان دهنده قطر دایره هم سطح حوضه (کیلومتر)، A مساحت حوضه (کیلومتر مربع)، I شیب متوسط حوضه (درصد)، l طول آبراهه اصلی (متر)، h اختلاف ارتفاع آبراهه اصلی (متر)، S توان تلفات حوضه (میلیمتر) و CN نشان دهنده شماره منحنی می‌باشد.

در مرحله دوم جهت شبیه‌سازی هیدروگراف‌های سیل در دوره‌های آینده، هایتوگراف بارش مرتبط با وقایع اعتبارسنجی در دوره پایه متناسب با درصد تغییرات بارش در دوره‌های آینده در ماه مورد نظر که وقایع سیل در آن رخ داده است، تغییر داده شده و هیدروگراف‌های سیل ناشی از هایتوگراف‌های جدید برای چهار دوره زمانی تا پایان قرن شامل ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ شبیه‌سازی شده است. لازم به ذکر است که الگوی بارش برای آینده ثابت در نظر گرفته شده و فقط فرض بر تغییر مقدار بارش می‌باشد، همچنین در دوره پایه برای تمامی وقایع سیل از اطلاعات بارش ما بین هر دو ایستگاه طرق و مغان برای هایتوگراف‌های

جدول ۳. مقادیر سنجه‌های آماری در دوره پایه برای متغیر بارش در حوضه آبخیز

| مدل | MAE | RMSE | MAPE | NSE | r |
|---------------|-------|-------|--------|----------|----------|
| GFDL-ESM4 | ۳/۱۶۳ | ۴/۲۱۷ | ۱۸/۰۰۵ | ۰/۹۴۹۳۸۴ | ۰/۹۷۹۵۴۷ |
| IPSL-CM6A-LR | ۲/۹۳۴ | ۴/۳۷۲ | ۱۲/۲۶۷ | ۰/۹۴۵۵۹۵ | ۰/۹۷۸۰۳۲ |
| MPI-ESM1-2-HR | ۳/۲۴۸ | ۴/۳۷ | ۱۹/۸۵ | ۰/۹۴۵۶۵۸ | ۰/۹۷۶۷۷۳ |
| MRI-ESM2-0 | ۳/۴۵۷ | ۴/۶۶۱ | ۱۸/۳۸ | ۰/۹۳۸۱۶۱ | ۰/۹۷۳۸۳۳ |
| Ensemble | ۲/۳۸۳ | ۳/۶۹ | ۱۱/۹۵۵ | ۰/۹۶۱۲۵۲ | ۰/۹۸۴۳۸۴ |

جدول ۴. وزن‌های چهار مدل جهانی- اقلیمی در ماه‌های مختلف

| | ژانویه | فوریه | مارس | آوریل | مه | ژوئن | ژوئیه | اوت | سپتامبر | اکتبر | نوامبر | دسامبر |
|------|--------|-------|------|-------|------|------|-------|------|---------|-------|--------|--------|
| GFDL | ۰/۲۴ | ۰/۲۵ | ۰/۳۰ | ۰/۲۹ | ۰/۲۹ | ۰/۲۰ | ۰/۲۱ | ۰/۲۸ | ۰/۲۵ | ۰/۲۸ | ۰/۲۱ | ۰/۲۸ |
| IPSL | ۰/۲۵ | ۰/۲۲ | ۰/۲۴ | ۰/۲۰ | ۰/۲۸ | ۰/۲۷ | ۰/۲۴ | ۰/۲۲ | ۰/۲۴ | ۰/۲۸ | ۰/۲۳ | ۰/۲۵ |
| MPI | ۰/۲۵ | ۰/۲۱ | ۰/۱۸ | ۰/۲۰ | ۰/۲۲ | ۰/۱۱ | ۰/۳۸ | ۰/۳۰ | ۰/۳۰ | ۰/۲۳ | ۰/۲۰ | ۰/۲۳ |
| MRI | ۰/۲۶ | ۰/۳۲ | ۰/۲۸ | ۰/۳۱ | ۰/۲۱ | ۰/۴۲ | ۰/۱۷ | ۰/۲۰ | ۰/۲۱ | ۰/۲۱ | ۰/۳۶ | ۰/۲۴ |

سه متغیر مستقل زمان تاخیر (Lag Time)، شماره منحنی (CN) و تلفات اولیه (Initial Abstraction) در دامنه ۲۰- تا ۲۰+ درصد انجام و تاثیر آن بر متغیر وابسته دبی اوج سیلاب مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲). لازم به ذکر است به علت تغییرات شدید متغیر دبی اوج نسبت به تغییرات پارامترهای شماره منحنی و تلفات اولیه، تاثیر تغییرات این پارامترها به ترتیب تنها در دامنه ۱۰- تا ۱۰+ و ۱۵- تا ۱۵+ درصد انجام شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، مدل HEC-HMS بیشترین حساسیت را نسبت به پارامتر شماره منحنی و بعد از آن تلفات اولیه و زمان تاخیر دارد. در رابطه با پارامتر شماره منحنی، مدل در دامنه ۰ تا ۲۰+ و در رابطه با تلفات اولیه و زمان تاخیر در دامنه ۰ تا ۲۰- میزان حساسیت بیشتر نشان داده است. با توجه به شرایط هیدروگراف شبیه سازی شده اولیه توسط مدل از پارامترهای شماره منحنی و زمان تاخیر متناسب با میزان حساسیت آن‌ها برای واسنجی مدل استفاده شد.

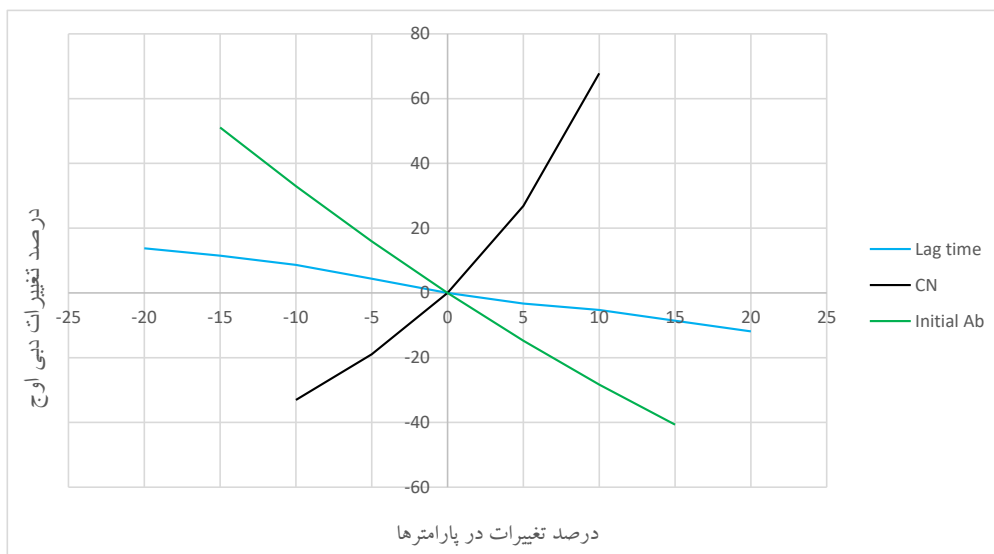
واسنجی مدل هیدرولوژیکی

همان طور که اشاره شد از دو واقعه رگبار و سیلاب متناظر در ماه‌های مارس و مه جهت واسنجی مدل استفاده شده است. این دو رویداد شامل ۱۳ مارس ۱۹۹۴ و ۸ مه ۲۰۰۵ می‌باشد. پس از اجرای مدل به وسیله

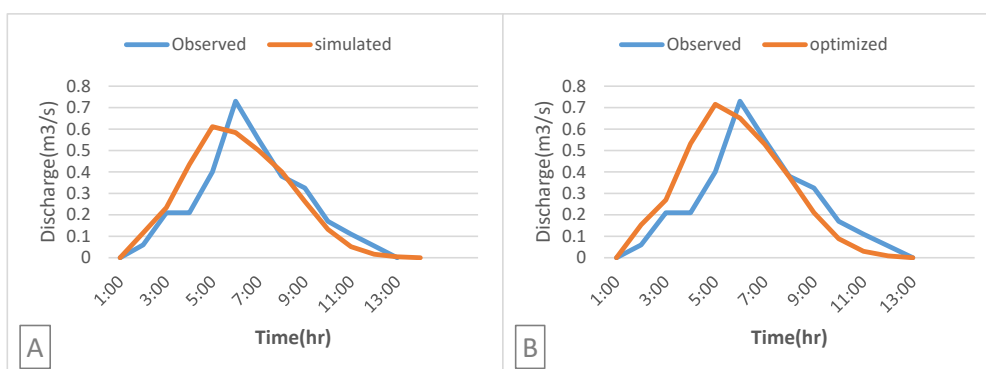
MAPE میزان خطای مدل همادی به ترتیب ۲۵/۵۴، ۱۶/۲۳ و ۳۰/۱۹ درصد نسبت به میانگین خطای چهار مدل منفرد کاهش پیدا کرده است. میزان آماره‌های ضریب کارایی نش- ساتکلیف و همبستگی نیز برای مدل همادی نسبت به مدل‌های منفرد بهبود داشته است. لذا با توجه به نتایج به دست آمده در این بخش هر چهار مدل برای مشارکت در مطالعه به منظور بررسی روند تغییرات بارش تحت سه سناریو شامل خوش بینانه (SSP1-2.6)، بدبینانه (SSP3-7.0) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) برای چهار دوره آینده ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۶۰-۲۰۶۱، ۲۰۸۰-۲۰۸۱ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ همادی گردید. وزن‌های به دست آمده برای چهار مدل CMIP6 در ماه‌های مختلف در جدول (۴) ارائه شده است.

آنالیز حساسیت مدل هیدرولوژیکی

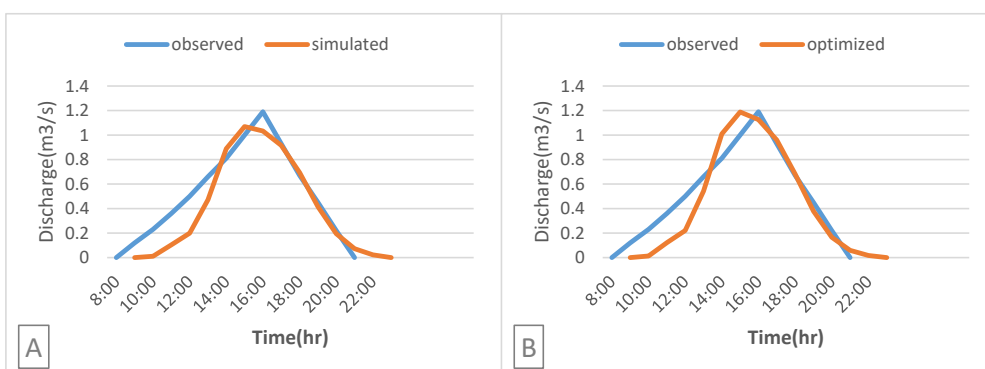
در مدل سازی هیدرولوژیکی، تحلیل حساسیت روشی است که در آن چگونگی منجر شدن تاثیر عدم قطعیت‌های یک یا چند متغیر ورودی به عدم قطعیت‌ها در متغیر خروجی اندازه‌گیری می‌شود. در حقیقت کمی کردن اهمیت هر یک از پارامترهای مدل بر رفتار سیستم توسط آنالیز حساسیت انجام می‌شود که پیش‌بینی مدل را بهبود می‌بخشد. لذا در این مطالعه به منظور تعیین پارامترهای تعیین کننده جهت واسنجی مدل، آنالیز حساسیت برای



شکل ۲. درصد تغییرات پارامترهای مدل هیدرولوژیکی و دبی اوج سیلاب در آنالیز حساسیت



شکل ۳. هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای (A) قبل و (B) بعد از واسنجی، رویداد ۱۳ مارس ۱۹۹۴



شکل ۴. هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای (A) قبل و (B) بعد از واسنجی، رویداد ۸ مه ۲۰۰۵

به واقعیت از پارامترهای شماره منحنی و زمان تاخیر جهت واسنجی مدل استفاده گردید، همچنین به دلیل وجود جابه‌جایی زمانی بین هیدروگراف مشاهده‌ای و

اطلاعات این دو واقعه، هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده با یک دیگر مورد مقایسه قرار گرفت (اشکال ۳ و ۴). لازم به ذکر است جهت ایجاد نتایج نزدیک‌تر

جدول ۵. نتایج واسنجی مدل HEC-HMS برای رویدادهای منتخب

| وقایع | پارامتر | مشاهده شده | درصد اختلاف | | | |
|--------------|-----------------------------|------------|---------------|--------|---------------|---------------|
| | | | شبیه‌سازی شده | | بعد از واسنجی | قبل از واسنجی |
| ۱۳ مارس ۱۹۹۴ | دبی اوج (متر مکعب بر ثانیه) | ۰/۷۳ | ۰/۶۱۱۳ | ۰/۷۱۵۶ | -۱۶/۲۶ | -۱/۹۷ |
| | حجم سیلاب (هزار مترمکعب) | ۱۱/۵ | ۱۲/۱ | ۱۲/۸ | ۵/۲۲ | ۱۱/۳ |
| ۸ مه ۲۰۰۵ | دبی اوج (متر مکعب بر ثانیه) | ۱/۱۹ | ۱/۰۶۹۲ | ۱/۱۸۸۱ | -۱۰/۱۵ | -۰/۱۶ |
| | حجم سیلاب (هزار مترمکعب) | ۲۵/۷ | ۲۲ | ۲۲/۴ | -۱۴/۴۰ | -۸/۹۵ |

HEC-HMS بعد از فرآیند واسنجی کاهش پیدا کرده است. به طور کلی در هر دو رویداد مقدار اختلاف دبی اوج شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای بعد از فرآیند واسنجی به مقدار قابل توجه‌ای کاهش پیدا کرده است. با توجه به نتایج به دست آمده از هر دو رویداد می‌توان گفت مدل در برآورد دبی اوج عملکرد بهتری نسبت به حجم سیلاب دارد. نتایج شاخص‌های درستی‌سنجی عملکرد مدل در مرحله واسنجی در جداول (۶ و ۷) ارائه شده است.

اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیکی

به منظور بررسی اعتبارسنجی مدل همان طور که اشاره شد از دو واقعه رگبار و سیلاب متناظر در ماه‌های مارس و مه مستقل از رویدادهای به کار گرفته شده در بخش واسنجی، استفاده شده است. این دو رویداد شامل ۵ مه ۲۰۰۲ و ۱۵ مارس ۲۰۰۵ می‌باشد. پس از اجرای مدل به وسیله اطلاعات این دو واقعه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای با یک دیگر مورد مقایسه قرار گرفت (اشکال ۵ و ۶). به منظور بررسی عملکرد مدل در شبیه‌سازی رویدادهای حوضه مورد مطالعه، از چند سنجه آماری برای هر واقعه و همچنین پارامترهای دبی اوج و حجم سیلاب استفاده شده است. نتایج به دست آمده در این بخش در جداول (۸ و ۹) ارائه شده است.

در بخش اعتبارسنجی، مدل در هر دو رویداد دبی اوج را کمتر و حجم سیلاب را بیشتر از مقدار مشاهده‌ای برآورد کرده است. مشابه بخش واسنجی، نتایج بخش اعتبارسنجی نیز نشان دهنده عملکرد بهتر مدل در شبیه‌سازی دبی اوج نسبت به حجم سیلاب می‌باشد. بهترین عملکرد مدل در برآورد دبی اوج و حجم سیلاب

شبیه‌سازی شده بر اساس هایتوگراف‌های مشاهده‌ای به منظور مقایسه بهتر هیدروگراف‌ها، هایتوگراف بارش در بخش واسنجی و اعتبارسنجی دارای جابه جایی زمانی می‌باشد. نتایج به دست آمده در این بخش در جدول (۵) ارائه شده است.

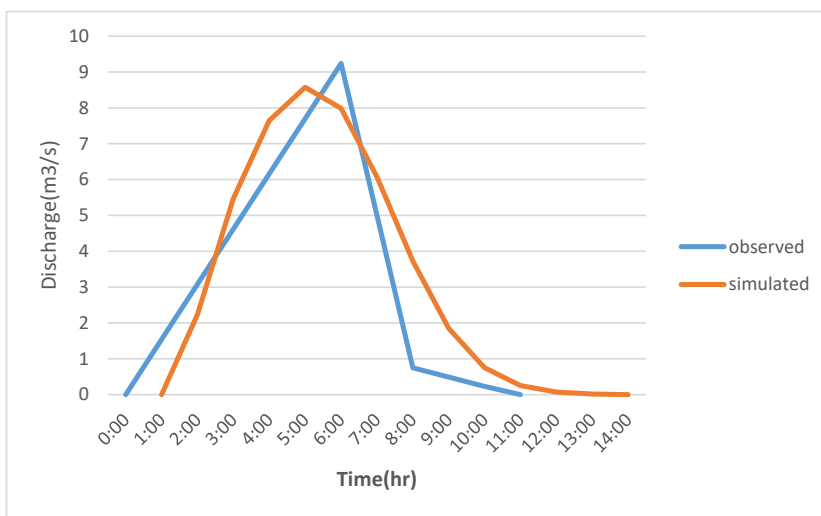
در بخش واسنجی، مدل HEC-HMS در رویداد ۸ مه ۲۰۰۵ حجم و دبی اوج سیلاب را کمتر از مقدار مشاهده شده شبیه‌سازی کرده است. این موضوع در رابطه با رویداد ۱۳ مارس ۱۹۹۴ در رابطه با دبی اوج نیز صدق می‌کند. در رابطه با رویداد ۱۳ مارس ۱۹۹۴ مدل توانایی متفاوتی را در شبیه‌سازی دبی اوج و حجم سیلاب از خود نشان داده است به طوری که دبی اوج را کمتر از مقدار مشاهده‌ای برآورد کرده است. دبی اوج قبل از واسنجی دارای اختلاف ۱۶/۲۶ درصدی و بعد از واسنجی دارای اختلاف ۱/۹۷ درصدی می‌باشد در حالی که حجم سیلاب قبل از واسنجی دارای اختلاف ۵/۲۲ درصدی و بعد از واسنجی دارای اختلاف ۱۱/۳ درصدی می‌باشد. در رابطه با این رویداد به دلیل عملکرد متفاوت مدل در برآورد مقدار دبی اوج و حجم سیلاب به ترتیب کمتر و بیشتر از مقدار مشاهده‌ای، تغییراتی که به منظور کاهش اختلاف دبی اوج انجام می‌شود سبب تغییرات متفاوتی در حجم سیلاب خواهد شد. لذا لازم شد علاوه بر رعایت محدوده منطقی پارامترهای حوضه تعادلی بین اختلاف دبی اوج و حجم سیلاب با مقدار مشاهده‌ای بر قرار شود که نتیجه آن کاهش قابل توجه اختلاف دبی اوج و افزایش اختلاف حجم سیلاب می‌باشد. در رابطه با رویداد ۸ مه ۲۰۰۵ اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای توسط مدل

جدول ۶. مقادیر سنجه‌های آماری در مرحله واسنجی برای وقایع مورد مطالعه

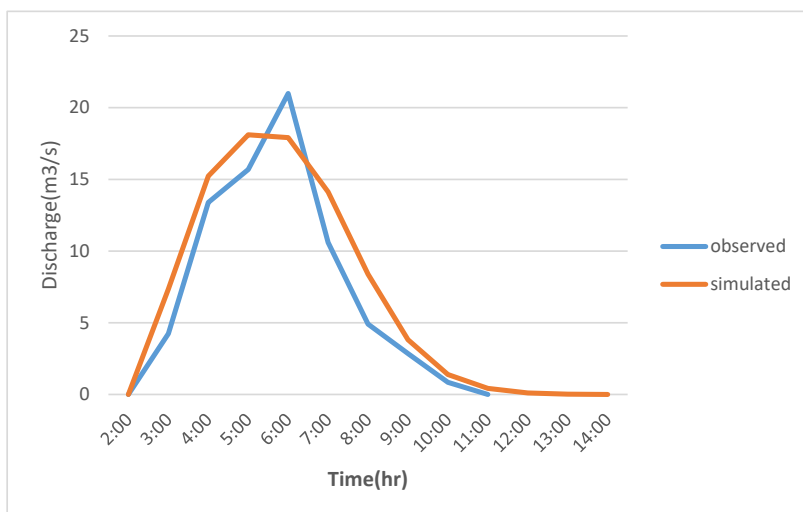
| واقعه | Nash-Sutcliffe | RMSE Std Dev | Percent Bias |
|--------------|----------------|--------------|--------------|
| ۱۳ مارس ۱۹۹۴ | ۰/۵۷۷ | ۰/۶۵۰۲ | ۱۱/۴۷ |
| ۸ مه ۲۰۰۵ | ۰/۸۳۹ | ۰/۴۰۰۷ | -۹/۴۵ |

جدول ۷. شاخص‌های درستی‌سنجی عملکرد مدل HEC-HMS در مرحله واسنجی

| پارامتر | Nash-Sutcliffe | Bias |
|-----------|----------------|---------|
| دبی اوج | ۰/۹۹ | -۰/۰۰۸۵ |
| حجم سیلاب | ۰/۹۳ | -۰/۰۲۶۹ |



شکل ۵. هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای، رویداد ۵ مه ۲۰۰۲



شکل ۶. هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای، رویداد ۱۵ مارس ۲۰۰۵

جدول ۸. نتایج اعتبارسنجی مدل HEC-HMS برای رویدادهای منتخب

| وقایع | پارامتر | مشاهده شده | شبیه‌سازی شده | Nash-Sutcliffe | RMSE Std Dev | Percent Bias |
|--------------|--|------------|------------------|----------------|--------------|--------------|
| ۵ مه ۲۰۰۲ | دبی اوج (متر مکعب بر ثانیه) حجم سیلاب (هزار متر مکعب) | ۹/۲۴ | ۸/۵۷ (-۷/۲۵) | ۰/۸۲۳ | ۰/۴۲۰۶ | ۱۴/۸۴ |
| ۱۵ مارس ۲۰۰۵ | دبی اوج (متر مکعب بر ثانیه) حجم سیلاب (هزار متر مکعب) | ۲۰/۹۹ | ۱۸/۱۱ (-۷/۱۳/۷۲) | ۰/۸۸۹ | ۰/۳۳۳۳ | ۱۷/۹۹ |

جدول ۹. شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل HEC-HMS در مرحله اعتبارسنجی

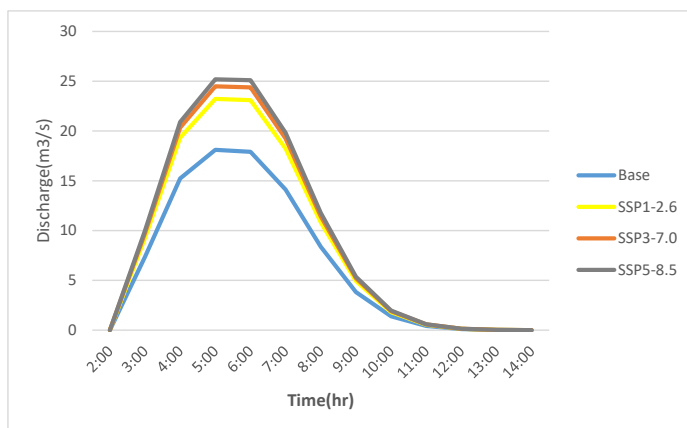
| پارامتر | Nash-Sutcliffe | Bias |
|-----------|----------------|----------|
| دبی اوج | ۰/۸۷ | -۰/۱۱۲۲۹ |
| حجم سیلاب | ۰/۶۵ | +۰/۱۷۰۸۷ |

خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) برای چهار دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ شبیه‌سازی و بررسی گردید (اشکال ۷ تا ۱۴). نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها در دهه‌های آتی در جداول (۱۰ تا ۱۳) ارائه شده است.

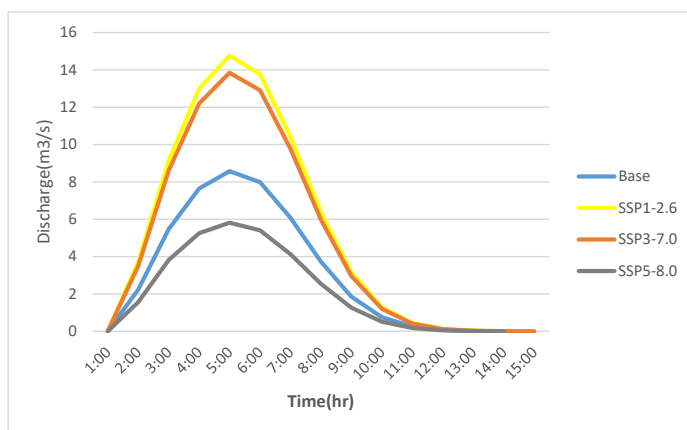
در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱، مقدار بارش تحت تمامی سناریوها در ماه مارس افزایش پیدا کرده است که این افزایش برای سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به ترتیب برابر با ۷/۵۸، ۹/۳۵ و ۱۰/۳۰ درصد می‌باشد. این موضوع برای ماه مه شامل افزایش مقدار بارش تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP3-7.0 به ترتیب برابر با ۱۳/۷۲ و ۱۱/۸۶ درصد و کاهش تحت سناریوی SSP5-8.5 برابر با ۷/۵۶ درصد می‌باشد (سرابی و همکاران، ۱۳۹۹). در نتیجه تغییرات بارش، تحت تمامی سناریوها مقدار دبی اوج و حجم سیلاب در ماه مارس افزایش پیدا کرده است که بیشترین مقدار آن مربوط به سناریوی SSP5-8.5 (۳۹/۱۱) درصد دبی اوج و ۳۹/۱۷ درصد حجم سیلاب) و کمترین مقدار آن مربوط به سناریوی SSP1-2.6 (۲۸/۲۳) درصد دبی اوج و ۲۸/۳۰ درصد حجم سیلاب) می‌باشد. در ماه مه مقدار دبی اوج و حجم سیلاب تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP3-7.0 افزایش پیدا کرده است که این موضوع تحت سناریوی SSP1-2.6 شدیدتر می‌باشد. در حالی که تحت سناریوی SSP5-8.5 (۳۲/۱۷) درصد دبی اوج و ۳۱/۶۵

مربوط به رویداد ۵ مه ۲۰۰۲ به ترتیب با اختلاف ۷/۲۵ درصد و ۱۵/۱۰ درصد می‌باشد. مشابه بخش واسنجی بیشترین اختلاف دبی اوج و حجم سیلاب شبیه‌سازی شده با مقدار مشاهده‌ای مربوط به رویداد ماه مارس می‌باشد. در مجموع نتایج به دست آمده از سنج‌های آماری در رابطه با شبیه‌سازی هر رویداد و شبیه‌سازی پارامترهای دبی اوج و حجم سیلاب نشان دهنده عملکرد مناسب مدل هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی رویدادهای حوضه مورد مطالعه پس از فرآیند واسنجی می‌باشد و می‌توان از آن برای شبیه‌سازی تاثیر تغییر اقلیم بر وضعیت سیلاب در دهه‌های آتی در حوضه مورد مطالعه استفاده کرد.

روند تغییرات بارش و سیلاب در دوره‌های آینده با توجه به نتایج به دست آمده در بخش‌های درستی‌سنجی عملکرد مدل‌های CMIP6 و اعتبارسنجی مدل HEC-HMS و اطمینان از کارایی این مدل در شبیه‌سازی وقایع سیلاب حوضه آبخیز مورد مطالعه، خروجی مدل همدادی که از میانگین وزنی چهار مدل MPI-IPSL-CM6A-LR، GFDL-ESM4، MRI-ESM2-0 و ESM1-2-HR ایجاد شده است به عنوان داده ورودی به مدل هیدرولوژیکی معرفی و اثر تغییر اقلیم بر سیلاب آینده تحت سه سناریو شامل خوش بینانه (SSP1-2.6)، بدبینانه (SSP3-7.0) و



شکل ۷. تغییرات سیلاب ماه مارس در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریوهای مختلف



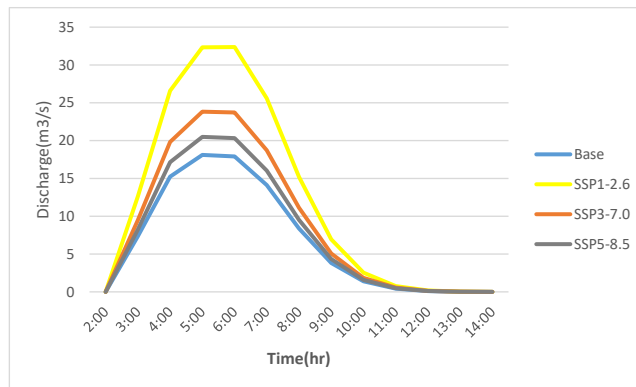
شکل ۸. نتایج تغییرات سیلاب ماه مه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریوهای مختلف

جدول ۱۰. نتایج تغییرات سیلاب ماه‌های مورد مطالعه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریوهای مختلف

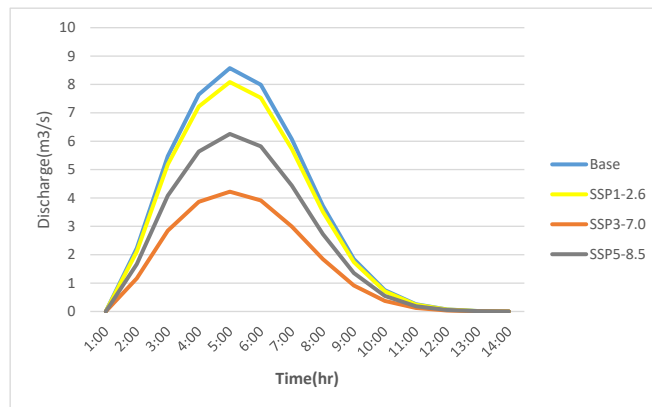
| پارامتر | دوره پایه | SSP1-2.6 | SSP3-7.0 | SSP5-8.5 |
|----------------------------------|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| ۳ دبی اوج (متر مکعب بر ثانیه) | ۱۸/۱۰۹۸ | ۲۳/۲۲۳ (+/۲۸/۲۳) | ۲۴/۴۸۵۸ (+/۳۵/۲۱) | ۲۵/۱۹۱۹ (+/۳۹/۱۱) |
| حجم سیلاب (هزار متر مکعب) | ۳۱۲/۷ | ۴۰۱/۲ (+/۲۸/۳۰) | ۴۲۳ (+/۳۵/۲۷) | ۴۳۵/۲ (+/۳۹/۱۷) |
| ۴ دبی اوج (متر مکعب بر ثانیه) | ۸/۵۷۴۶ | ۱۴/۷۶۵۷ (+/۷۲/۲۰) | ۱۳/۸۴۵۲ (+/۶۱/۴۷) | ۵/۸۱۵۷ (-/۲۲/۱۷) |
| حجم سیلاب (هزار متر مکعب) | ۱۶۰/۸ | ۲۷۴/۳ (+/۷۰/۵۸) | ۲۵۷/۵ (+/۶۰/۱۴) | ۱۰۹/۹ (-/۳۱/۶۵) |

افزایش برای سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به ترتیب برابر با ۱۹/۵۳، ۸/۳۹ و ۳/۶۴ درصد می‌باشد. با توجه به اینکه ماه مارس در پایان زمستان و اول بهار قرار دارد این امر را می‌توان به گرم‌تر شدن زمین در دهه‌های آینده و ذوب زودرس برف در این منطقه نسبت داد. این موضوع برای ماه مه شامل کاهش مقدار

درصد حجم سیلاب) مقدار سیلاب کاهش یافته است. همان طور که نتایج نشان می‌دهد نسبت کاهش و یا افزایش دبی اوج و حجم سیلاب در هر یک از سناریوها در هر دو ماه تا حد زیادی با هم تطابق دارد. در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰، مقدار بارش تحت تمامی سناریوها در ماه مارس افزایش پیدا کرده است که این



شکل ۹. تغییرات سیلاب ماه مارس در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریوهای مختلف



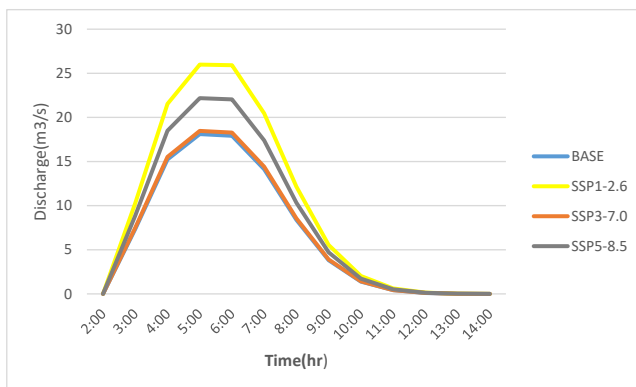
شکل ۱۰. تغییرات سیلاب ماه مه در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریوهای مختلف

جدول ۱۱. نتایج تغییرات سیلاب ماه‌های مورد مطالعه در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریوهای مختلف

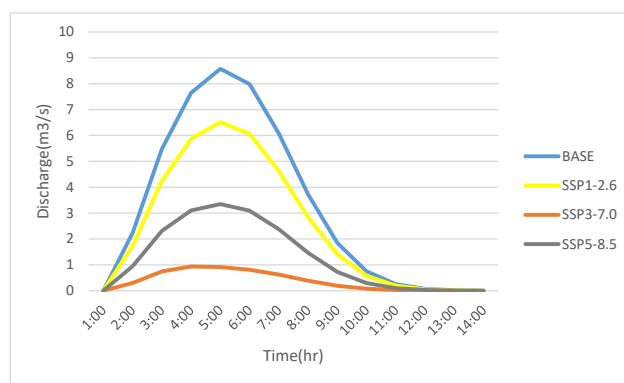
| پارامتر | دوره پایه | SSP1-2.6 | SSP3-7.0 | SSP5-8.5 |
|---|-----------|------------------|------------------|-----------------|
| ۳ دبی اوج (متر مکعب بر ثانیه) حجم سیلاب (هزار متر مکعب) | ۱۸/۱۰۹۸ | ۳۲/۳۷۰۷ (+۷۸/۷۵) | ۲۳/۸۲۵۸ (+۳۱/۵۶) | ۲۰/۴۹۴ (+۱۳/۱۶) |
| | ۳۱۲/۷ | ۵۵۸/۷ (+۷۸/۶۷) | ۴۱۱/۶ (+۳۱/۶۳) | ۳۵۴ (+۱۳/۲۱) |
| ۴ دبی اوج (متر مکعب بر ثانیه) حجم سیلاب (هزار متر مکعب) | ۸/۵۷۴۶ | ۸/۰۸۴۴ (-۵/۷۲) | ۴/۲۲۰۸ (-۵۰/۷۷) | ۶/۲۵۵۸ (-۲۷/۰۴) |
| | ۱۶۰/۸ | ۱۵۱/۸ (-۵/۶۰) | ۸۰/۳ (-۵۰/۰۶) | ۱۱۸ (-۲۶/۶۲) |

مقدار آن مربوط به سناریوی SSP1-2.6 (۷۸/۷۵ درصد دبی اوج و ۷۸/۶۷ درصد حجم سیلاب) و کمترین مقدار آن مربوط به سناریوی SSP5-8.5 (۱۳/۱۶ درصد دبی اوج و ۱۳/۲۱ درصد حجم سیلاب) می‌باشد. مقدار دبی اوج و حجم سیلاب در ماه مه تحت تمامی سناریوها عکس آنچه در ماه مارس اتفاق افتاده است، کاهش یافته است که بیشترین مقدار آن مربوط به سناریوی SSP3-7.0 (۵۰/۷۷ درصد دبی اوج و ۵۰/۰۶ درصد حج سیلاب) و

بارش تحت تمامی سناریوها می‌باشد. که این کاهش برای سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به ترتیب برابر با ۱/۲۴، ۱۲/۷۱ و ۶/۲۶ درصد می‌باشد. در واقع با گرم‌تر شدن زمین، ماه می که دومین ماه از فصل بهار می‌باشد با دماهای بالاتر و کاهش بارش و در نتیجه کاهش حجم سیلاب همراه خواهد بود. در نتیجه تغییرات بارش، تحت تمامی سناریوها مقدار دبی اوج و حجم سیلاب در ماه مارس افزایش پیدا کرده است. که بیشترین



شکل ۱۱. تغییرات سیلاب ماه مارس در دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰ تحت سناریوهای مختلف



شکل ۱۲. تغییرات سیلاب ماه مه در دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰ تحت سناریوهای مختلف

جدول ۱۲. نتایج تغییرات سیلاب ماه‌های مورد مطالعه در دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰ تحت سناریوهای مختلف

| | پارامتر | دوره پایه | SSP1-2.6 | SSP3-7.0 | SSP5-8.5 |
|--------|-----------------------------|-----------|-------------------|------------------|-------------------|
| ۳ ۳ | دبی اوج (متر مکعب بر ثانیه) | ۱۸/۱۰۹۸ | ۲۵/۹۸۴۵ (+/۴۲/۴۸) | ۱۸/۴۷۲۱ (+/۲) | ۲۲/۱۸۳۲ (+/۲۲/۴۹) |
| | حجم سیلاب (هزار متر مکعب) | ۳۱۲/۷ | ۴۴۸/۹ (+/۴۳/۵۶) | ۳۱۹ (+/۲/۰۱) | ۳۸۳/۲ (+/۲۲/۵۵) |
| ۳ ۳ | دبی اوج (متر مکعب بر ثانیه) | ۸/۵۷۴۶ | ۶/۵۱۶۴ (-/۲۴) | ۰/۹۳۶۱ (-/۸۹/۰۸) | ۳/۳۴۷۵ (-/۶۰/۹۶) |
| | حجم سیلاب (هزار متر مکعب) | ۱۶۰/۸ | ۱۲۲/۸ (-/۲۳/۶۳) | ۱۸/۱ (-/۸۸/۷۴) | ۶۴ (-/۶۰/۲۰) |

درصد می‌باشد. تغییرات بارش در ماه مه عکس آنچه که در ماه مارس اتفاق افتاده است می‌باشد، به این صورت که مقدار بارش تحت تمامی سناریوها کاهش پیدا کرده است که این کاهش برای سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به ترتیب برابر با ۵/۵۷، ۲۸/۶۴ و ۱۵/۹۰ درصد می‌باشد. در نتیجه تغییرات بارش، تحت تمامی سناریوها مقدار دبی اوج و حجم سیلاب در ماه مارس افزایش پیدا کرده است که بیشترین مقدار آن مربوط به سناریوی SSP1-2.6 (۴۳/۴۸ درصد دبی

کمترین مقدار آن مربوط به سناریوی SSP1-2.6 (۵/۷۲ درصد دبی اوج و ۵/۶۰ درصد حجم سیلاب) می‌باشد. همان طور که نتایج نشان می‌دهد نسبت کاهش و یا افزایش دبی اوج و حجم سیلاب در هر یک از سناریوها و در هر دو ماه تا حد زیادی با هم تطابق دارد.

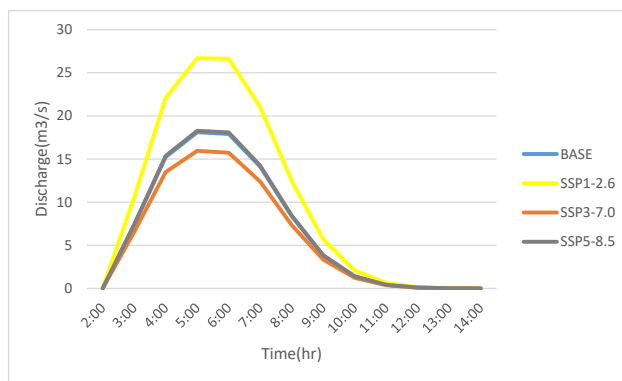
در دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰، مقدار بارش تحت تمامی سناریوها در ماه مارس افزایش پیدا کرده است که این افزایش برای سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به ترتیب برابر با ۱۱/۳۴، ۰/۵۶ و ۶/۰۷

اوج و ۴۳/۵۶ درصد حجم سیلاب) و کمترین مقدار آن مربوط به سناریوی SSP3-7.0 (۲ درصد دبی اوج و ۲/۰۱ درصد حجم سیلاب) می‌باشد. تغییرات دبی اوج و حجم سیلاب در ماه مه عکس آنچه که در ماه مارس اتفاق افتاده است می‌باشد، به این صورت که تحت تمامی سناریوها مقدار سیلاب کاهش کرده است که بیشترین مقدار آن مربوط به سناریوی SSP3-7.0 (۸۹/۰۸ درصد دبی اوج و ۸۸/۷۴ درصد حجم سیلاب) و کمترین مقدار آن مربوط به سناریوی SSP1-2.6 (۲۴ درصد دبی اوج و ۲۳/۶۳ درصد حجم سیلاب) می‌باشد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، نسبت کاهش و یا افزایش دبی اوج و حجم سیلاب در هر یک از سناریوها و در هر دو ماه تا حد زیادی با هم تطابق دارد.

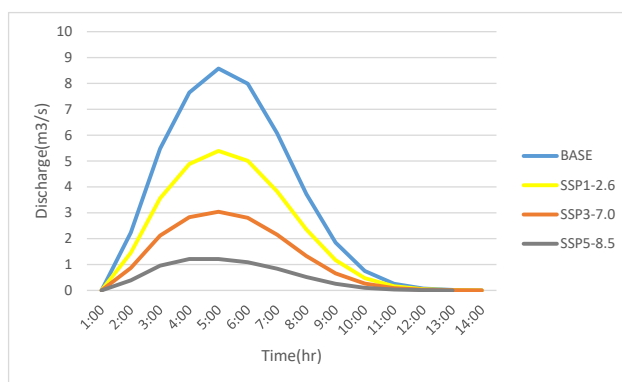
در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰، مقدار بارش در ماه مارس تحت دو سناریوی SSP1-2.6 (۱۲/۵۱٪+) و SSP5-8.5 (۲۲٪+) افزایش و تحت سناریوی SSP3-7.0 (۳/۴۵٪-) کاهش یافته است. تغییرات مقدار بارش در ماه مه به این صورت می‌باشد که مقدار بارش تحت تمامی سناریوها کاهش پیدا کرده است که این کاهش برای سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به ترتیب برابر با ۸/۸۳، ۱۷/۱۴ و ۲۶/۳۶ درصد می‌باشد. در نتیجه تغییرات بارش، مقدار دبی اوج و حجم سیلاب در ماه مارس تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 افزایش پیدا کرده است که این موضوع تحت سناریوی SSP5-8.5 قابل توجه نمی‌باشد، این در حالی است که تحت سناریوی SSP3-7.0 مقدار دبی اوج و حجم سیلاب کاهش پیدا کرده است. تغییرات سیلاب در ماه مه به این صورت می‌باشد که دبی اوج و حجم سیلاب تحت تمامی سناریوها کاهش پیدا کرده است که بیشترین مقدار آن مربوط به سناریوی SSP5-8.5 (۸۵/۸۶ درصد دبی اوج و ۸۵/۲۰ درصد حجم سیلاب) و کمترین مقدار آن مربوط به سناریوی SSP1-2.6 (۳۷/۱۳ درصد دبی اوج و ۳۶/۵۷ درصد حجم سیلاب) می‌باشد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، نسبت کاهش و یا افزایش دبی اوج و حجم سیلاب در هر یک از سناریوها و در هر دو ماه تا حد

زیادی با هم تطابق دارد.

به طور کلی در رابطه با نتایج این مطالعه می‌توان بیان کرد که میزان بارش در ماه مارس تحت تمامی سناریوها و در تمامی دوره‌ها به جز سناریوی SSP3-7.0 در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ افزایش پیدا می‌کند. افزایش دمای زمین در دوره‌های آینده و ذوب برف ناشی از آن در ماه مارس که در پایان زمستان و اوایل بهار قرار دارد، سبب ایجاد یک منبع رطوبتی خواهد شد که با توجه به کوهستانی بودن حوضه آبخیز سد طرق طبیعی است که این افزایش رطوبت سبب افزایش بارش در این ماه تحت تمامی سناریوها و در تمامی دوره‌ها به جز یک سناریو در یک دوره گردد. در رابطه با ماه آوریل، مقدار بارش تحت تمامی سناریوها و در تمامی دوره‌ها به جز سناریوی SSP1-2.6 در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و سناریوی SSP5-8.5 در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ که دارای یک روند افزایشی بوده است، کاهش پیدا کرده است. مقدار بارش در ماه مه نیز تحت تمامی سناریوها و در تمامی دوره‌ها به جز سناریوی SSP1-2.6 و سناریوی SSP3-7.0 در دوره اول که یک روند افزایشی را تجربه کرده است، کاهش پیدا کرده است. در نتیجه تغییرات بارش، مقدار دبی اوج و حجم سیلاب در ماه مارس تحت تمامی سناریوها و در تمامی دوره‌ها به جز سناریوی SSP3-7.0 در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ افزایش پیدا می‌کند، که بیشترین و کمترین مقدار این افزایش به ترتیب مربوط به سناریوهای SSP1-2.6 در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و SSP5-8.5 در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ می‌باشد. در رابطه با ماه مه مقدار دبی اوج و حجم سیلاب تحت تمامی سناریوها و در تمامی دوره‌ها به جز سناریوی SSP1-2.6 و سناریوی SSP3-7.0 در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ که یک روند افزایشی داشته است، کاهش پیدا کرده است که بیشترین و کمترین مقدار این کاهش به ترتیب مربوط به سناریوی SSP3-7.0 در دوره ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و سناریوی SSP1-2.6 در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ می‌باشد. فهیمی نژاد و همکاران (۱۳۹۸)، در مطالعه خود در حوضه آبخیز شاندیز که مانند حوضه طرق یکی از زیرحوضه های کشف رود محسوب می‌شود، تغییرات متغیرهای



شکل ۱۳. تغییرات سیلاب ماه مارس در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ تحت سناریوهای مختلف



شکل ۱۴. تغییرات سیلاب ماه مه در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ تحت سناریوهای مختلف

جدول ۱۳. نتایج تغییرات سیلاب ماه‌های مورد مطالعه در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ تحت سناریوهای مختلف

| | پارامتر | دوره پایه | SSP1-2.6 | SSP3-7.0 | SSP5-8.5 |
|---|-----------------------------|-----------|-------------------|-------------------|------------------|
| ۳ | دبی اوج (متر مکعب بر ثانیه) | ۱۸/۱۰۹۸ | ۲۶/۶۹۴۲ (+/۴۷/۴۰) | ۱۵/۹۵۶۹ (-/۱۱/۸۹) | ۱۸/۲۷۹۲ (+/۰/۹۴) |
| | حجم سیلاب (هزار متر مکعب) | ۳۱۲/۷ | ۴۶۱/۲ (+/۴۷/۴۹) | ۲۷۵/۵ (-/۱۱/۹۰) | ۳۱۵/۷ (+/۰/۹۶) |
| ۴ | دبی اوج (متر مکعب بر ثانیه) | ۸/۵۷۴۶ | ۵/۳۹۰۶ (-/۳۷/۱۳) | ۳/۰۳۹۸ (-/۶۴/۵۵) | ۱/۲۱۲۶ (-/۸۵/۸۶) |
| | حجم سیلاب (هزار متر مکعب) | ۱۶۰/۸ | ۱۰۲ (-/۳۶/۵۷) | ۵۸/۳ (-/۶۳/۷۴) | ۲۳/۸ (-/۸۵/۲۰) |

که در حوضه کشف‌رود واقع شده است، از مدل جهانی- اقلیمی MIROC-ESM تحت سناریوهای RCP و مدل هیدرولوژیکی SWAT برای سه دوره زمانی تا پایان قرن استفاده کردند. نتایج حاکی از تغییرات کاهشی معنی‌دار بارش تحت تمامی سناریوها و تغییرات کاهشی معنی‌دار رواناب تحت سناریوی RCP4.5 در دوره‌های آینده میانی و دور و تحت سناریوی RCP8.5 در دوره آینده دور می‌باشد. حیدری و همکاران (۱۳۹۹)، با استفاده از مدل گردش کلی HadGEM2 و مدل

هیدرواقلمی را با استفاده از سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و مدل هیدرولوژیکی SWAT مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها افزایش ۳۷ تا ۵۴ درصدی بارش سالانه را در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و افزایش ۵۲ تا ۶۶ درصدی را در دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ نشان می‌دهد. آن‌ها در رابطه با رواناب، افزایش ۲ تا ۱۰۴ درصدی دبی را در دهه‌های آتی پیش‌بینی کردند. حسن‌زاده و آقاخانی افشار (۱۳۹۸)، در بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر شرایط هیدرو- اقلیمی حوضه آبخیز زشک- ابرده

ریز مقیاس‌نمایی LARS-WG تحت سناریوهای RCP تاثیر تغییر اقلیم را بر رواناب برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ در حوضه آبخیز دهبار که در حوضه کشف‌رود قرار دارد، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها کاهش مقدار رواناب را تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب برابر با ۱۷/۳۴-، ۱۷/۹۳- و ۲۲/۱۶- درصد پیش بینی کردند. تغییرات کاهش بارش در افق ۲۰۵۰ از دیگر نتایج مطالعه آن‌ها می‌باشد. نتایج مطالعات نزدیک تغییرات هیدرولوژیکی را گاه افزایشی و گاه کاهش پیش‌بینی کرده است که عمدتاً می‌تواند ناشی از نوع مدل‌های جهانی- اقلیمی مختلف مورد استفاده باشد. در هر صورت چنین تغییراتی به مانند نتایج مطالعه حاضر در رابطه با پاسخ هیدرولوژیکی در حوضه آبخیز امری طبیعی محسوب می‌شود چرا که تغییرات هیدرولوژیکی مانند تغییرات سیل و رواناب وابستگی شدیدی به پارامتر بارش که دارای تغییرپذیری بالایی می‌باشد، دارد.

جمع‌بندی

آنچه که در رابطه با نتایج این مطالعه مهم و قابل ذکر است، تجمع بارش و جریان در یک محدوده زمانی خاص یعنی ماه مارس و کاهش این موارد به سمت ماه‌های آوریل و مه می‌باشد. به عبارتی نتایج حاکی از کوتاه‌تر شدن دوره بارش و افزایش دوره خشکی در حوضه آبخیز سد طرق می‌باشد. این موضوع بسیار حائز اهمیت است زیرا کاهش دوره دسترسی به بارش و تولید آب مشکل تامین آب را برای یک دوره طولانی مدت بدون بارش به وجود خواهد آورد. این موضوع سبب کاهش قدرت تصمیم‌گیری و انعطاف‌پذیری و تحمیل یک شرایط سخت خواهد شد. جنبه‌های مختلفی مانند کشاورزی، اجتماعی و اقتصادی تحت تاثیر قرار خواهند گرفت که لازمه آن یک برنامه ریزی دقیق توسط مدیران حوضه آبخیز برای مواجهه با کم‌آبی و توزیع نامناسب آن می‌باشد. لازم است برنامه‌هایی جهت حفاظت و بهره‌برداری بهینه از آب در دسترس از جمله کاهش تبخیر از آب پشت سد، نفوذ سریع آب در خاک، تخصیص بهینه منابع آب

شامل زمان‌بندی و میزان آزادسازی آب از سد، تغییرات در شیوه کشاورزی شامل جابه‌جایی فصل کشت در صورت لزوم، استفاده از روش‌های آبیاری با راندمان بالا و محصولاتی با نیاز آبی کم، جایگزینی کشت گلخانه‌ای و کم‌نیاز آبی به جای کشت روباز در دستور کار قرار گیرد. لازم به ذکر است مطالعه حاضر تنها تاثیر تغییرات بارش را بر پاسخ هیدرولوژیکی حوضه آبخیز مورد بررسی قرار داده است. اما وضعیت هیدرولوژیکی یک حوضه آبخیز تنها تحت تاثیر اقلیم نمی‌باشد بلکه عوامل دیگری چون کاربری اراضی، پوشش گیاهی و تغییرات ایجاد شده ناشی از نوسانات دمایی مانند مهاجرت و جابه‌جایی مکانی انواع گیاهان موثر منطقه در کنترل شرایط نقش مهمی ایفا می‌کنند که لازم است تاثیر تغییرات آن‌ها در آینده نیز مورد بررسی قرار گیرد. بررسی تاثیر تغییر تنها یک عامل و ثابت فرض کردن عوامل موثر دیگر سبب ایجاد عدم قطعیت‌هایی در نتایج مطالعه می‌شود. این مورد در کنار عدم قطعیت‌های ذاتی مدل‌های اقلیمی در پیش‌بینی متغیرهای آب و هوایی باید در بررسی میزان نزدیکی نتایج این گونه مطالعات به واقعیت مد نظر قرار گیرد.

در هر صورت این مطالعه می‌تواند چشم‌اندازی از آینده و اطلاعات مفیدی از وضعیت آن را برای تصمیم‌گیرندگان در طراحی اقدامات مناسب جهت سازگاری با تغییر اقلیم و راهبردهای موثر مدیریتی در حوضه مورد مطالعه فراهم کند. همچنین پژوهشگران می‌توانند علاقه‌مند به این اطلاعات به عنوان مبنایی برای ارزیابی تاثیرات آینده تغییر اقلیم بر وضعیت هیدرولوژیکی حوضه آبخیز باشند. تغییرات پارامترهای هیدرو- اقلیمی در آینده مانند کاهش و افزایش جریان و یا جا به جایی زمانی بارش می‌تواند تاثیرات قابل توجهی بر بخش‌های مختلف مانند منابع آب و خاک، کشاورزی و اجتماعی- اقتصادی داشته باشد. لذا لازم است سناریوهای تغییر اقلیم به طور خاص در برنامه ریزی و طراحی پروژه‌های آبخیزداری و آبیاری و به طور کلی در تمام پروژه‌های حوضه آبخیز سد طرق گنجانده شود.

مراجع

15. Ahmadi, M., Motamedvaziri, B., Ahmadi, H., Moeini, A. and Zehtabiyani, G. R., 2019, Assessment of climate change impact on surface runoff, statistical downscaling and hydrological modeling, *Physics and Chemistry of the Earth*, 114, 102800.
16. Al-Safi, H. I. J. and Sarukkalige, P. R., 2020, The application of conceptual modelling to assess the impacts of future climate change on the hydrological response of the Harvey River catchment, *Hydro-environment Research*, 28, 22–33.
17. de Oliveira, V. A., de Mello, C. R., Beskow, S., Viola, M. R. and Srinivasan, R., 2019, Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome, *Ecological Engineering*, 133, 20–31.
18. IPCC, 2021, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
19. Mourato, S., Moreira, M. and Corte-Real, J., 2015, Water Resources Impact Assessment Under Climate Change Scenarios in Mediterranean Watersheds, *Water Resources Management*, 29(7), 2377–2391.
20. Nilawar, A. P. and Waikar, M. L., 2019, Impacts of climate change on streamflow and sediment concentration under RCP 4.5 and 8.5: A case study in Purna river basin, India, *Science of Total Environment*, 650, 2685–2696.
21. Op de Hipt, F., Diekkruiger, B., Steup, G., Yira, Y., Hoffmann, T. and Rode, M., 2018, Modeling the impact of climate change on water resources and soil erosion in a tropical catchment in Burkina Faso, West Africa, *CATENA*, 163, 63–77.
22. Op de Hipt, F., Diekkruiger, B., Steup, G., Yira, Y., Hoffmann, T., Rode, M. and Naschen, K., 2019, Modeling the effect of land use and climate change on water resources and soil erosion in a tropical West African catchment (Dano, Burkina Faso) using SHETRAN, *Science of Total Environment*, 653, 431–445.
23. Pandey, V. P., Dhaubanjari, S., Bharati, L. and Thapa, B. R., 2020, Spatio-temporal distribution of water availability in Karnali-Mohana Basin, Western Nepal: Climate change impact assessment (Part-B), *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 29, 100691.
24. Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., et al., 2017, The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Global Environmental Change*, 42, 153–168.
25. Singh, D., Gupta, R. D. and Jain, S. K., 2015, بحری، م. و دستورانی، م.، ۱۳۹۶، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر پاسخ هیدرولوژیک حوزه آبخیز اسکندری، نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۲۶(۲)، ۳۷–۵۷.
۲. حسن‌زاده، ی. و آقاخان افشار، ا. ح.، ۱۳۹۸، استفاده از مدل MIROC-ESM در بررسی شرایط هیدرو-اقلیمی حوزه آبخیز کوچک مقیاس تحت اثر تغییر اقلیم، نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست، ۴۹(۱)، ۴۷–۵۹.
۳. حیدری، ج.، موسوی‌بایگی، م.، اسماعیلی، ک. و گلکاریان، ع.، ۱۳۹۹، اثر تغییر اقلیم بر رواناب و رسوب حوزه با استفاده از مدل‌های SWAT و WEPP (مطالعه موردی: حوزه دهبار)، نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۴)، ۱۰۴۰–۱۰۲۷.
۴. رضایی زمان، م.، مرید، س. و دلاور، م.، ۱۳۹۲، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای هیدروکلیماتولوژی حوزه سیمینه رود، نشریه آب و خاک، ۳۷(۶)، ۱۲۵۹–۱۲۴۷.
۵. زیدعلی‌نژاد، ن.، ناصری، ر.، شکیبیا، ع. و علیجانی، ف.، ۱۳۹۸، شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه تراز-هرکش، استان خوزستان، با استفاده از مجموعه داده NEX-GDDP و مدل بارش-رواناب IHACRES، نشریه هواشناسی و علوم جو، ۲(۲)، ۱۶۲–۱۷۸.
۶. سرایی، م.، دستورانی، م. ت. و زرین، آ.، ۱۳۹۹، بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی آینده بر وضعیت دما و بارش (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سد طرق مشهد)، نشریه هواشناسی و علوم جو، ۳(۱)، ۸۳–۶۳.
۷. شهری، ن.، خلیلیان، ص.، موسوی، س. ح. ا. و مرتضوی، س. ا.، ۱۳۹۸، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوزه دشت ورامین با استفاده از مدل SWAT، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳(۲)، ۳۶۶–۳۵۴.
۸. فهیمی‌نژاد، ا.، باعقیده، م.، باباییان، ا. و انتظاری، ع.، ۱۳۹۸، شبیه‌سازی اثر گرمایش جهانی بر میانگین و رخدادهای حدی برخی متغیرهای هیدرواقلیمی در حوزه آبریز شاندریز، مطالعه موردی: مدل گردش کلی CanESM2، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۳(۳)، ۴۸–۲۷.
۹. مساح بوانی، ع.، ۱۳۸۵، ارزیابی ریسک تغییر اقلیم و تأثیر آن بر منابع آب، مطالعه موردی حوزه زاینده رود اصفهان، گزارش نهایی رساله دکتری، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
۱۰. منصوری، ب.، احمدزاده، ح.، مساح بوانی، ع.، مرید، س.، دلاور، م. و لطفی، س.، ۱۳۹۳، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوزه زربینه رود با استفاده از مدل SWAT، نشریه آب و خاک، ۲۸(۶)، ۱۱۹۱–۱۲۰۳.
۱۱. 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، ۲۲(۲)، ۳۵۹–۳۴۵.
۱۲. مرتضوی‌زاده، ف. و گودرزی، م.، ۱۳۹۷، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر روی رواناب سطحی و آب زیرزمینی با استفاده از مدل اقلیمی HadGEM2 (مطالعه موردی هشتگرد)، نشریه آب و خاک، ۳۲(۲)، ۴۴۶–۴۳۳.
۱۳. یونسی‌فرد، م.، پایمزد، ش. و رحیمی، م.، ۱۳۹۹، شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوزه شازند با استفاده از مدل توزیعی WetSpa، نشریه تحقیقات منابع آب ایران، ۱۶(۲)، ۲۴۲–۲۳۰.
14. Azari, M., Moradi, H. R., Saghafian, B. and Faramarzi, M., 2016, Climate change impacts on streamflow and sediment yield in the North of Iran, *Hydrological Sciences*, 61(1), 123–133.

- Zenebe, A., 2018, Modelling hydrological response under climate change scenarios using SWAT model: the case of Ilala watershed, Northern Ethiopia, *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(1) , 437–449.
29. Tian, P., Lu, H., Feng, W., Guan, Y. and Xue, Y., 2020, Large decrease in streamflow and sediment load of Qinghai–Tibetan Plateau driven by future climate change: A case study in Lhasa River Basin, *CATENA*, 187, 104340.
30. Wang, H., Tetzlaff, D. and Soulsby, C., 2018, Modelling the effects of land cover and climate change on soil water partitioning in a boreal headwater catchment, *Hydrology*, 558, 520–531.
- Assessment of impact of climate change on water resources in a hilly river basin, *Arabian Journal of Geosciences*, 8(12), 10625–10646.
26. Serpa, D., Nunes, J.P., Santos, J., Sampaio, E., Jacinto, R., Veiga, S., Lima, J.C., Moreira, M., Corte-Real, J., Keizer, J.J. and Abrantes, N., 2015, Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments, *Science of Total Environment*, 538, 64–77.
27. Saharia, A. M. and Sarma, A. K., 2018, Future climate change impact evaluation on hydrologic processes in the Bharalu and Basistha basins using SWAT model, *Natural Hazards*, 92(3), 1463–1488.
28. Shiferaw, H., Gebremedhin, A., Gebretsadkan, T. and

The Impact of Future Climate Change on Hydrological Response in Torogh Dam Watershed, Mashhad

Mojtaba Sarabi¹, Mohammad Taghi Dastorani^{2,*}, Azar Zarrin³

¹ MSc Student of Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad

² Professor of Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad*

³ Assistant professor of Geography Department, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad

*Corresponding Author Email: dastorani@um.ac.ir

Received: 09 July 2020 , accepted: 14 October 2020

ABSTRACT

This study investigates the impacts of climate change on flood situation in Torogh Dam watershed using a combination of four general circulation models (GCM) of the sixth Phase of Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) under three scenarios: SSP1-2.6, SSP3-7.0, and SSP5-8.5 and semi-distributed hydrological model HEC-HMS over the four future periods of 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 and 2081-2100. Initially, the performance of general circulation models in the historical period (1993-2012) was evaluated using station data as observational data. In the next step, in order to reduce the uncertainty of the models, an ensemble model was presented using the weighting method MOTP. Furthermore, in order to optimize and validate the hydrological model, four independent flood events in March and May were used and statistical measures of Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), RMSE, and Bias were calculated to evaluate the performance of the model in simulating flood events in the study watershed. The study results, while confirming the efficiency of the models used in the study, show an increase in flood peak and volume in March under all scenarios and in all periods except SSP3-7.0 in the period of 2081-2100. For May, this includes a decrease in flood peak and volume under all scenarios and in all periods except SSP1-2.6 and SSP3-7.0 in the period of 2021-2040.

Keywords: Climate Change, SSP Scenarios, CMIP6, Hydrological Modeling, Watershed

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Sarabi, M.; Dastorani, M.T.; Zarrin, A. (2021). The Impact of Future Climate Change on Hydrological Response in Torogh Dam Watershed, Mashhad. *J. Meteorol. Atmos. Sci.*, 3(4): 310-330

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

