

تحلیل فراوانی و شدت وقوع سیل تحت سناریوهای تغییر اقلیم در حوزه معرف امامه

حسن علی پور^۱، علی سلاجقه*^۲، علیرضا مقدم نیا^۳، شهرام خلیقی سیگارودی^۴، مجتبی نساچی زواره^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۱۱

چکیده

یکی از مهم ترین پیامدهای تغییر اقلیم افزایش فراوانی و شدت رویدادهای حدی نظیر سیلاب های مخرب و خشکسالی های گسترده است. بنابراین بررسی رویدادهای حدی بارش و فراوانی آن طی دوره های گذشته و تأثیر تغییر اقلیم بر روند آن طی دوره های آتی ضروری است. در این مطالعه اثر تغییرات اقلیمی آینده بر سیلاب منطقه طرح با مدل CANESM2 بررسی شد. پیش بینی تغییرات اقلیمی تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی SDSM 4.2.9 انجام شد. به منظور تحلیل فراوانی و شدت سیلاب با استفاده از مدل SMADA مناسب ترین توزیع بر اساس آزمون های RMSE و MSE انتخاب شد. پس از شبیه سازی سیلاب ها با استفاده از مدل HEC-HMS در شرایط تغییر اقلیم فراوانی و شدت سیلاب ها بررسی شد. نتایج نشان داد که دمای حداکثر در طول دوره های (۲۰۱۱-۲۰۵۵) و (۲۰۵۶-۲۱۰۰) تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۲۲، ۰/۸۷، ۱/۱ و ۲/۸۲ درجه سانتی گراد افزایش می یابند. بر اساس نتایج حاصل از بارش برای منطقه مورد مطالعه در دوره های آتی روند مشخصی نشان نداد. نتایج نشان داد که توزیع پیرسون نوع سوم دارای کمترین خطا می باشد. فراوانی و شدت سیلاب ها در دوره های آتی افزایشی می باشد به طوری که بیشترین افزایش آن ها در دوره دوم تحت سناریوی RCP8.5 به ترتیب مقدار ۱۲/۶۸ و ۲۵/۷۶ درصد بوده و از دوره بازگشت ۲ ساله به ۲۰۰ ساله بر تعداد دوره هایی که سیلاب های برآورد شده در آن ها نسبت به دوره مشاهداتی بیشتر است، اضافه شده است.

کلیدواژه ها: مدل سازی بارش - رواناب، SDSM، تحلیل فراوانی سیل، حوزه معرف امامه، HEC-HMS.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
 ۲. استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، نویسنده مسئول، salajegh@ut.ac.ir
 ۳. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
 ۴. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
 ۵. استادیار موسسه آموزش و ترویج کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران
- * این مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تهران است.

مقدمه

یکی از چالش‌هایی که امروزه بشر با آن روبه‌روست، پدیده تغییر اقلیم و مشکلات ناشی از آن می‌باشد. تغییر اقلیم پدیده‌ای انکارناپذیر است و تغییر برگشت‌پذیر در متوسط وضع آب‌وهوا یا تغییرپذیری در آن است که در یک دوره طولانی مدت ادامه دارد. این تغییر می‌تواند در متوسط دما، بارندگی، رطوبت، الگوهای آب‌وهوایی، باد، تابش و... رخ دهد (منصوری و همکاران، ۲۰۰۵). اقلیم می‌تواند گرم‌تر یا سردتر شود و مقادیر متوسط هر عامل در طول زمان افزایش یا کاهش یابد. تغییر اقلیم و افزایش گرمایش جهانی باعث روند افزایش خشکسالی‌ها و سیلاب‌ها شده است. تغییر در آستانه‌های آب‌وهوایی و بالا آمدن سطح آب دریاها از پیامدهای تغییر اقلیم است. به‌طور کلی در بیشتر نقاط دنیا تغییر اقلیم باعث افزایش دما، کاهش بارندگی، افزایش رویدادهای حدی و آنتروپی می‌شود (جونیس، ۲۰۰۱).

کشور ایران به‌دلیل قرارگیری در موقعیت خاص جغرافیایی علاوه بر کمبود ریزش‌های جوئی با توزیع و پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارش‌ها نیز روبه‌رو می‌باشد و از آنجا که پدیده گرمایش جهانی در حال وقوع و اقلیم در حال تغییر است، تغییر اقلیم و گرمایش جهانی باعث ایجاد چالش‌های جدیدی برای منابع آب خواهد شد. امروزه اثرات تغییر اقلیم از مبانی مهم در مدیریت منابع آب است. مهم‌ترین پیامد تغییر در چرخه هیدرولوژیکی، تمایل آن به سمت مقادیر حدی نظیر بارش‌های سیل‌آسا، خشکسالی‌های گسترده و در برخی موارد ترسالی‌های منطقه‌ای اس (آذری و همکاران، ۲۰۱۳). فراوانی و شدت سیل از جمله بلاهای طبیعی وحشتناک یا مرگ‌بار ناشی از تغییرات اقلیمی است.

ارزیابی تغییرات احتمالی وقایع حدی در دوره‌های آتی، به یکی از مهم‌ترین مسائل عملی در تجزیه و تحلیل ریسک هیدرولوژیکی و مهندسی طراحی تبدیل شده است (آذری و همکاران، ۲۰۱۳). فرض بر این است که هر متغیر

هیدرولوژیکی دارای نوع توزیع خاص است (آکسوی، ۲۰۰۰؛ خودری و سادیا، ۲۰۱۳). انتخاب مناسب‌ترین توزیع همیشه نقش مهمی در مطالعات هیدرولوژی دارد، اما انتخاب یک توزیع مناسب یکی از مشکلات اساسی در عملیات مهندسی است (هو و یوسف، ۲۰۱۳).

حجازی‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر هیدروگراف سیلاب در دوره‌های آتی در حوزه آبخیز بختیاری پرداختند. نتایج حاصل از استخراج بارش‌های حدی در دوره آتی، نشان از کاهش بارش و افزایش شدت بارش‌های حدی و در پی آن افزایش وقوع سیلاب در دوره آتی داشته است. ثانی‌خانی و همکاران (۲۰۱۳) اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوزه آبخیز آجی‌چای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از افزایش دما و کاهش قابل توجه میزان بارش و رواناب در حوضه بود. مالمیر و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه قره‌سو پرداختند. نتایج مدل اقلیمی در این تحقیق نشان‌دهنده افزایش دما و کاهش بارندگی در دوره مورد نظر نسبت به دوره پایه و کاهش میزان رواناب بوده است. پورمحمدی و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه و ارائه راهکارهای سازگاری با اثرات آن در حوزه آبخیز تویسرکان همدان پرداختند. نتایج نشان داد که در اثر کاهش بارش ناشی از تغییرات اقلیمی حجم رواناب خروجی هریک از زیرحوضه‌های کاهش خواهد یافت؛ به‌طوری که از ۵/۴۰ میلیون مترمکعب در دوره پایه به ۹/۳۴ و ۸/۳۵ میلیون مترمکعب در دوره آتی تحت سناریوهای A1B و B1 خواهد رسید. میرزایی و همکاران (۲۰۲۰) پهنه سیل در شرایط تغییر اقلیم بر اساس سناریوهای مدل CanESM2 با استفاده از سناریوهای تغییر اقلیم را ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد بارش حداکثر روزانه در حوضه تالار افزایش یافته، به‌طوری که مقدار افزایش حداکثر بارش روزانه در اقلیم مرطوب

۱ Aksoy

۲ Khudri and Sadia

۳ Ho and Yusof

۴ Jones

آینده کاهش خواهد یافت. زوو و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی اثرات تغییر اقلیم آتی در حجم سیلاب شهر هوهوت در شمال چین پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که حجم سیلاب شهری در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۴۰ نسبت به حجم آن در سال‌های ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۰ تحت سناریوی RCP8.5، ۵۲٪ افزایش می‌یابد؛ به طوری که مقادیر حجم سیلاب شهری با تغییرات شدت بارندگی به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. به طور متوسط حجم سیلاب پیش‌بینی شده در RCP2.6 به میزان ۱۳٪ کمتر از آنچه در RCP8.5 نشان داده شده است افزایش می‌یابد. فدایی مقصود و همکاران (۲۰۱۹) اثرات تغییر اقلیم را بر روی فراوانی و منشأ سیل در شمال ایران را تحت سناریوهای تغییر اقلیم مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییرات آب‌وهوایی پیش‌بینی شده احتمالاً منجر به کاهش متوسط تخلیه در ژانویه، فوریه و مارس برای هر دو RCP و افزایش در سپتامبر و اکتبر برای RCP8.5 خواهد شد. حداکثر و کمترین دما احتمالاً در آینده نزدیک برای همه ماه‌ها افزایش می‌یابد. میزان بارش سالانه در آینده نزدیک بیش از ۲۰٪ افزایش می‌یابد. چن و همکاران (۲۰۲۲) به ارزیابی نقشه خطر سیل تحت سناریوی RCP8.5 تغییر اقلیم در تایوان پرداختند. این مطالعه نشان داد که مناطق با خطر بالاتر عمدتاً در بخش‌های شمالی و جنوبی تایوان توزیع شده‌اند و شاخص‌های خطر به طور قابل توجهی در مناطق شمالی، شمال شرقی و جنوبی تحت سناریوی RCP8.5 افزایش می‌یابند. هدف اصلی این مطالعه تعیین بهترین توزیع احتمال دبی‌های سیلابی در حوزه آبخیز امامه و شبیه‌سازی سیلاب‌ها با استفاده از مدل HEC-HMS در شرایط تغییر اقلیم فراوانی و شدت سیلاب‌ها طی دوره‌های مشاهداتی و آتی است. ضمن اینکه برای مدیریت و برنامه‌ریزی در برابر تغییرات اقلیم و در نهایت ارزیابی روند فراوانی و شدت وقوع سیلاب‌ها در ایران جدایی‌ناپذیر است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

(شمال) نسبت به اقلیم خشک (جنوب) بیشتر است. نتایج شبیه‌سازی با توجه به هیدروگراف سیلاب بیانگر آن است که سیل در تمامی دوره‌ها افزایش می‌یابد. نقشه پهنه‌بندی سیلاب نشان داد پهنه سیل‌گیر دوره پایه در محدوده رودخانه است، ولی تغییر اقلیم سبب افزایش پهنه سیلاب در این منطقه می‌شود. میوزیک^۱ (۲۰۰۲) برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر روی فراوانی وقوع سیلاب در آلبرتا کانادا از مدل‌های هیدرولوژیکی بارش-رواناب تحت تجزیه و تحلیل مرتبه اول استفاده کرد. نتایج تحقیق ایشان نشان‌دهنده افزایش بارش‌های حدی در نتیجه پیش‌بینی‌های مدل‌های اقلیمی بوده است. بون^۲ (۲۰۰۸) اثرات تغییر اقلیم را بر روی زمان‌بندی جریان رودخانه مکنزی مورد بررسی قرار داد. نتایج تحقیق او نشان داد که در سیلاب‌های بهاره روند خوبی وجود داشته که دلالت بر شروع رواناب زودرس بهاره دارد و در سرچشمه‌های حوضه، این روند قابل توجه بوده است. توفیق و گوون^۳ (۲۰۱۴) دبی سیل طرح را با استفاده از مدل گردش عمومی جو ارزیابی کردند. نتایج نشان دادند که اثرات گرمایش جهانی و تغییر اقلیم بر تخمین جریان تخلیه موثر بوده و به وسیله سناریوهای مختلف مدل گردش عمومی ارزیابی می‌شوند. شریستا و لوهپایسانکریت^۴ (۲۰۱۶) به ارزیابی خطر سیل تحت سناریوهای تغییر اقلیم در حوضه رودخانه یانگ تایلند پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که شدت سیل سالانه تحت هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 افزایش می‌یابد؛ به طوری که در مقایسه با دوره پایه، در حوضه مورد مطالعه با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله ۶۰ کیلومتر مربع از حوضه سیلابی می‌شود. الماسی و سلطانی (۲۰۱۷) اثرات تغییر اقلیم در فراوانی سیل در حوضه بازفت ایران را تحلیل کردند. نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها نشان داد که پیرسون نوع سوم بهترین توزیع شده برای داده‌های جریان اوج لحظه‌ای (Instantaneous Peak Flow) است. همچنین نشان دادند که میزان سیلاب در تمام دوره‌های بازگشت در

^۱ Muzik

^۲ Burn

^۳ Tofiq and Guven

^۴ Lohpaysankrit and Shrestha

تعدادی رودخانه‌های فصلی دیگر مشروب می‌شود. در این پژوهش در مجموع از اطلاعات ۴ ایستگاه سینوپتیک، ۲ ایستگاه باران‌سنجی و یک ایستگاه آب‌سنجی به صورت روزانه و ماهانه در استان تهران و حوزه آبخیز امامه استفاده شده است. بعد از تعیین طول دوره آماری ایستگاه‌های مورد نظر، با استفاده از روش همبستگی بین ایستگاه‌ها اقدام به بازسازی نواقص آماری شد. نام و مختصات ایستگاه‌های مورد نظر و نوع آمار به کارگرفته آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین، در شکل (۱) موقعیت مکانی ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است.

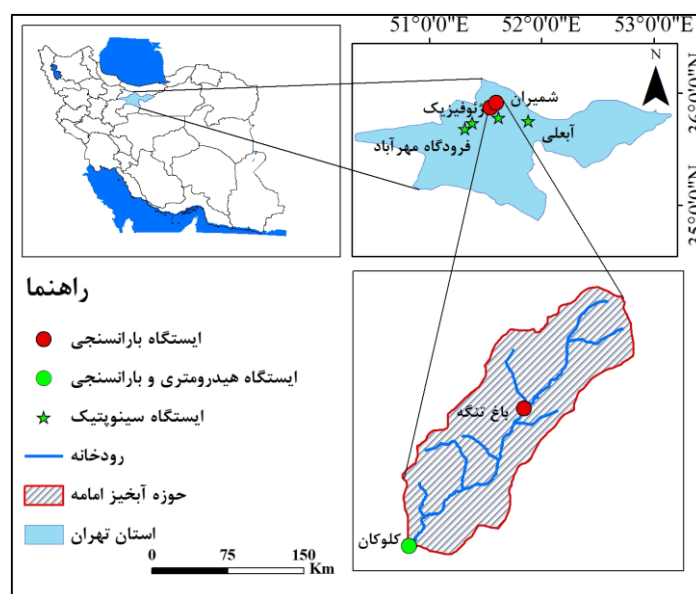
استان تهران با وسعتی حدود ۱۸۹۰۹ کیلومتر مربع، معادل ۲٪/۱ مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده است. موقعیت جغرافیایی این استان بین ۳۴ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی است. این استان از نظر آب‌وهوایی، غیر از نواحی کوهستانی شمالی که اندکی مرطوب و معتدل است، در کل گرم و خشک است. حداکثر دمای ثبت شده در استان تهران ۳۹/۴ درجه سانتی‌گراد و حداقل آن ۷/۴- درجه سانتی‌گراد است. متوسط میزان بارندگی در سطح استان ۳۳۳ میلی‌متر در طول سال اندازه‌گیری شده است (حجازی‌زاده و پروین، ۲۰۰۹). استان تهران به وسیله دو رودخانه اصلی کرج و جاجرود و نیز

جدول (۱): اطلاعات ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان تهران و حوزه آبخیز امامه

Table (1): Information of the studied stations in Tehran province and Emameh watershed

ردیف	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	طول دوره آماری	آمار بارش	آمار دبی
۱	آبعلی	۵۱-۵۲	۳۵-۴۵	۲۰۱۷-۱۹۸۶	✓	
۲	ژئوفیزیک	۵۱-۲۲	۳۵-۴۴	۲۰۱۷-۱۹۹۱	✓	
۳	شمیران	۵۱-۲۸	۳۵-۴۷	۲۰۱۷-۱۹۹۱	✓	
۴	فرودگاه مهرآباد	۵۱-۱۷	۳۵-۴۱	۲۰۱۷-۱۹۶۱	✓	
۵	کمرخانی (کلوکان)	۵۱-۳۲	۵۲-۳۵	۲۰۱۷-۱۹۹۹	✓	✓
۶	امامه (باغ تنگه)	۵۱-۳۴	۵۴-۳۵	۲۰۱۷-۱۹۹۱	✓	

✓ نشان‌دهنده نوع آمار استفاده شده از ایستگاه مورد نظر است.



شکل (۱): موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان تهران و حوزه آبخیز امامه

Figure (1): Location of the studied stations in Tehran province and Emameh watershed

ریزمقیاس نمایی خروجی‌های مدل‌های GCM

روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی وجود دارد که یکی از معتبرترین آن‌ها، استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو یا GCM است. تاکنون مدل‌های گردش عمومی زیادی توسط مراکز مختلف تحقیقات ارائه شده است. مدل CanESM2 دارای شبکه‌بندی با ابعاد 128×64 درجه طول و عرض جغرافیایی، سه سناریوی انتشار RCP در سال‌های ۲۰۰۶-۲۱۰۰ و داده‌های NCEP در سال‌های ۱۹۶۱-۲۰۰۵ را در بر می‌گیرد (پرویز و هنبری، ۲۰۱۴). در این مطالعه برای ریزمقیاس نمایی متغیرهای بارش، دمای حداقل و حداکثر از مدل گردش عمومی CanESM2 تحت سناریوهای تغییر اقلیم RCP2.6 و RCP8.5 از مدل رگرسیون چندگانه خطی SDSM4.2.9 که خود یک روش آماری بوده، استفاده شده است. داده‌های تاریخی ایستگاه‌های مورد مطالعه و داده‌های مدل جهانی آب‌وهوا از CanESM2 تحت RCPهای RCP2.6 و RCP8.5 برای دوره‌های نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۵۵) و دور (۲۰۵۶-۲۱۰۰) مورد استفاده قرار گرفت. پس از واسنجی و ارزیابی مدل SDSM، پارامترهای اقلیمی مورد مطالعه طی دوره‌های آتی به‌طور جداگانه برای هر دو سناریو RCPs پیش‌بینی شد.

- تبدیل بارش‌های روزانه به ساعتی

پس از ریزمقیاس‌نمایی متغیر بارش و تولید داده روزانه برای دوره‌های آتی، برای پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌های بارندگی و شبیه‌سازی سیلاب (تفکیک بارندگی به داده‌های که محصول ارتش ایالات NetSTORM ساعتی) از نرم‌افزار متوجه است استفاده شد (پارک و همکاران، ۲۰۱۳). شایان توجه است که داده‌های ورودی این مدل بارش روزانه می‌باشد و خروجی آن هم داده‌های بارش ساعتی است.

مدل‌سازی بارش - رواناب (HEC-HMS)

مدل ریاضی بارش - رواناب HEC-HMS یک مدل مفهومی

شبیه‌ساز سیلاب و رواناب در سطح حوضه است که مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش ایالات متحده آمریکا آن را توسعه داده است. در این مدل به منظور شبیه‌سازی سیلاب ابتدا شماتیک توپولوژی زیرحوضه‌ها و شبکه آبراهه‌ها، برای هر حوضه طراحی شد. همچنین عوامل شبیه‌سازی حوضه‌ها، زیرحوضه‌ها و رودخانه‌ها که شامل مساحت، مؤلفه‌های نوع تابع بارش به رواناب و دبی پایه رودخانه و روش روندیابی است در این بخش تعریف شدند.

مدل HEC-HMS در این مطالعه بر اساس روش SCS برای محاسبه نفوذ، روش هیدروگراف واحد کلارک در تبدیل بارش به رواناب و روش ماسکینگام برای روندیابی در رودخانه مورد واسنجی و ارزیابی قرار گرفت. در این روش دبی پایه به‌منظور سادگی و دقت بیشتر به‌صورت یک مقدار ثابت از هیدروگراف سیل کسر شد و سپس به مدل HEC-HMS معرفی شد. همان طوری که اشاره شد برای واسنجی از متغیر شماره منحنی که حساسیت بیشتری داشت استفاده شد. همچنین برای واسنجی کردن مدل روش آزمون و خطا (روش دستی) انتخاب شد. در این روش واسنجی کاربر با تغییر متغیری را که به‌عنوان تخمین اولیه وارد نموده است با روش آزمون و خطا سعی می‌کند تطابق مشاهده و شبیه‌سازی را به حداکثر برساند. برای ارزیابی و واسنجی مدل از شاخص‌های آماری ریشه دوم میانگین مربع خطا و ضریب کارایی ناش-ساتکلیف (NSE) استفاده می‌شود.

تحلیل روند شدت و فراوانی وقوع سیل

تحلیل فراوانی سیلاب از روش‌هایی است که با هدف اولیه ارتباط دادن بزرگی حوادث حدی به فراوانی وقوع آن‌ها از طریق استفاده از توزیع‌های آماری می‌باشد (مدرس، ۲۰۰۶؛ کامیل و سیدلی، ۱۹۸۴). در تحلیل فراوانی سیل یک توزیع احتمال به داده‌های مشاهده‌شده مربوط به یک سیستم رودخانه برای برآورد بزرگی سیل با دوره بازگشت‌هایی که معمولاً خیلی بالاتر از طول دوره ثبت می‌باشند، برآزش داده

در این روابط، X_i و Y_i به ترتیب i امین داده واقعی (مشاهده شده) و برآورد شده، \bar{X} و \bar{Y} میانگین کل داده‌های X_i و Y_i در کل جامعه آماری و n تعداد کل نمونه‌های ارزیابی شده است.

نتایج

ارزیابی کارایی مدل SDSM و ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای

اقلیمی

در مطالعه حاضر برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش از پارامترهای بزرگ مقیاس NCEP و مدل SDSM4.2.9 استفاده شد. بدین منظور، از بین ۲۶ پارامتر بزرگ مقیاس NCEP پارامترهای نهایی بزرگ مقیاس، که بیشترین همبستگی را با متغیرهای اقلیمی داشتند، انتخاب شد. به منظور ارزیابی مدل SDSM از دو معیار ضریب همبستگی و ریشه دوم میانگین مربعات خطا استفاده شد که نتایج آن‌ها برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول (۲) نمایش داده شده است. ارزیابی متغیرهای اقلیمی برای مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، کمترین ضریب همبستگی را پارامتر بارش نشان داد که دلیل آن را می‌توان به شرطی بودن (تأثیرپذیری از سایر متغیرها نظیر دما، جهت باد غالب، اختلاف ارتفاع و...) متغیر بارش دانست. با توجه به جدول مذکور می‌توان بیان داشت که نتایج حاصل نشانگر عملکرد بالای مدل است. همچنین به علت کیفیت و طول دوره آماری مناسب ایستگاه سینوپتیک فرودگاه مهرآباد نسبت به ایستگاه‌های دیگر، همبستگی بین متغیرهای اقلیمی و ۲۶ پارامتر بزرگ مقیاس در این ایستگاه بیشتر بوده است. بنابراین بدیهی است هرچقدر همبستگی بین این متغیرها بیشتر باشد، دقت ریزمقیاس‌نمایی بیشتر می‌شود. شایان ذکر است با توجه به اینکه بارش مهم‌ترین متغیر در محاسبات سیلاب می‌باشد و مقدار بارش در ایستگاه امامه که نزدیک به خروجی کمرخانی است، برای شبیه‌سازی دبی در دوره آبی مهم است برای تمامی ایستگاه‌های موجود در جدول مذکور ارزیابی و واسنجی صورت گرفت و نتایج ایستگاه امامه برای شبیه‌سازی مناسب بود.

می‌شوند. مزیت تطابق توزیع فراوانی داده‌های موجود با یکی از توزیع‌های آماری، این است که آمار محدود موجود را می‌توان توسعه داد و به روند وقایعی پی برد که در آینده اتفاق خواهد افتاد (مهدوی، ۲۰۰۵). در این تحقیق انتخاب وقایع طغیانی و فراگیر بر اساس داده‌های دبی‌های سیلابی روزانه و داده‌های حداکثر بارش‌های روزانه طی دوره مشاهداتی انجام شد. همچنین بعد از تولید و شبیه‌سازی داده‌های روزانه با استفاده از مدل SDSM، بارش در ایستگاه کلکان در همه دوره‌های مورد مطالعه به صورت نزولی مرتب شد. سپس با توجه به میزان میانگین بارش روزانه برای هر دوره، ۵ واقعه که بیشترین بزرگی را نسبت به واقعه‌های دیگر داشتند، انتخاب شدند. سپس تابع توزیع احتمالاتی با استفاده از نرم‌افزار SMADA توزیع‌های آماری مختلف (نرمال، لوگ نرمال ۲ و ۳ متغیری، پیرسون تیپ ۳، لوگ پیرسون تیپ ۳ و گامبل) برای داده‌های دوره پایه و سناریوهای انتشار طی دوره‌های آبی برآزش داده شد. برای انتخاب بهترین توزیع آماری از دو آزمون نکویی برآزش خطای میانگین مربعات (MSE) و جذر خطای میانگین مربعات (RMSE) استفاده شده است.

به منظور ارزیابی دقت برآورد و میزان قابل اعتماد بودن اطلاعات شبیه‌سازی شده توسط مدل SDSM از سه معیار ارزیابی خطا شامل ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب همبستگی و ناش ساتکلیف استفاده شد (ویلیامز، ۲۰۰۹؛ ناش و ساتکلیف، ۱۹۷۰).

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

۱ Willems

۲ Nash and Sutcliffe

جدول (۲): نتایج واسنجی و ارزیابی مدل گردش عمومی CanESM2 در مدل SDSM

Table (2): Results of calibration and evaluation of CanESM2 general circulation model in SDSM

واسنجی		ارزیابی		متغیر	ایستگاه
RMSE	r	دوره	دوره		
۶/۴۲	۰/۲۶	۶/۴۴	۰/۱۷	بارش	آبعلی
۴/۷۵	۰/۹۲	۵/۲۷	۰/۹۳	دمای حداکثر	
۴/۴۸	۰/۹۱	۴/۶۷	۰/۹۴	دمای حداقل	
۴/۸	۰/۲۳	۴/۰۹	۰/۱۳	بارش	ژئوفیزیک
۷/۴	۰/۸۱	۶/۹۴	۰/۸۲	دمای حداکثر	
۶/۳۷	۰/۸۲	۶/۳۴	۰/۸۲	دمای حداقل	
۶/۳۸	۰/۳	۶/۰	۰/۱	بارش	شمیران
۴/۸۵	۰/۹۲	۵/۲۶	۰/۹۲	دمای حداکثر	
۴/۰۵	۰/۹۲	۴/۲۵	۰/۹۶	دمای حداقل	
۳/۶۱	۰/۴۳	۳/۷۱	۰/۳۹	بارش	فرودگاه مهرآباد
۳/۹۹	۰/۹۵	۴/۰۲	۰/۹۶	دمای حداکثر	
۲/۷۹	۰/۹۷	۲/۹۰	۰/۹۹	دمای حداقل	
۳/۶۷	۰/۳۸	۳/۹۳	۰/۳۱	بارش	امامه

جدول (۳): تغییرات دمای حداکثر و دمای حداقل طی دوره‌های آتی

نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای انتشار

Table (3): Changes in maximum and minimum temperatures during future periods relative to the base period under emission scenarios

دوره مورد مطالعه	پارامتر	RCP2.6	RCP8.5
۲۰۵۵-۲۰۱۱	دمای حداکثر	۳/۰۲	۳/۲۷
	دمای حداقل	۰/۶۲	۰/۸۷
۲۱۰۰-۲۰۵۶	دمای حداکثر	۳/۲	۵/۴۷
	دمای حداقل	۱/۱	۲/۸۲

جدول (۴): تغییرات بارش طی دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه

تحت سناریوهای انتشار

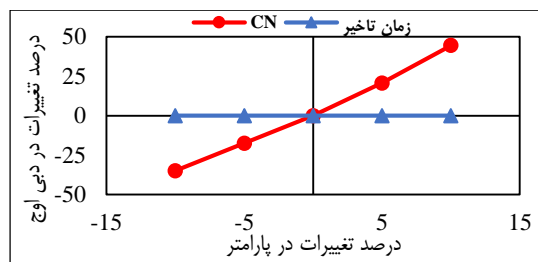
Table (3): Changes precipitation during future periods relative to the base period under emission scenarios

دوره مورد مطالعه	ایستگاه	RCP2.6	RCP8.5
۲۰۱۱-۲۰۵۵	ژئوفیزیک	۱/۱	-۳/۷
	آبعلی	-۸/۵	-۱۲/۷
	شمیران	۲	۰/۲
۲۰۵۶-۲۱۰۰	ف. مهرآباد	۳/۴	۰/۹
	ژئوفیزیک	-۳/۹	-۵/۵
	آبعلی	-۱۳/۲	-۲۴/۶
	شمیران	۰/۴	-۱/۶
ف. مهرآباد	۱/۳	-۲	

بعد از اطمینان از عملکرد بالای مدل اقدام به پیش‌بینی پارامترهای دما و بارش طی دوره‌های آتی (۲۰۵۵-۲۰۱۱) و (۲۱۰۰-۲۰۵۶) در استان تهران شد. نتایج حاصل برای پارامتر دما در جدول (۳) نشان می‌دهد که دمای حداکثر در طول دوره‌های (۲۰۵۵-۲۰۱۱) و (۲۱۰۰-۲۰۵۶) تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۳/۰۲، ۳/۲۷ و ۳/۲، ۵/۴۷ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. دمای حداقل در طول دوره‌ها و سناریوهای مذکور به ترتیب ۰/۶۲، ۰/۸۷ و ۱/۱، ۲/۸۲ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. به طوری که میزان افزایش در سناریوی RCP8.5 نسبت به RCP2.6 بیشتر است. همچنین با توجه به جدول فوق می‌توان بیان کرد که میزان افزایش دما در دوره آتی دور (۲۱۰۰-۲۰۵۶) نسبت به دوره آتی نزدیک (۲۰۵۵-۲۰۱۱) بیشتر است. اما نتایج پیش‌بینی بارش ماهانه برای دوره‌های آتی نیز نشان داد که بارش روند مشخصی نداشته و در بعضی ماه‌ها بارش افزایش و در بعضی از ماه‌ها کاهش خواهد یافت. در بیشتر موارد نتایج بارش نشان داد که در طی دوره‌های آتی بارش کاهش خواهد یافت (جدول ۴).

می‌دهد، مدل حساسیت بیشتری را نسبت به تغییرات CN نمایان ساخته و لذا واسنجی بر اساس این متغیر انجام می‌شود.

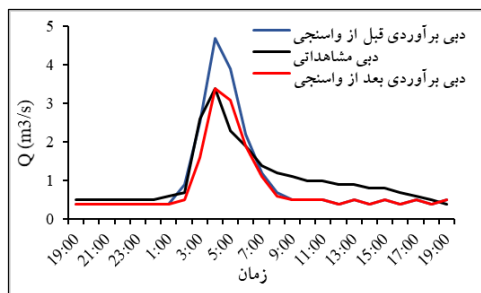
پس از تحلیل حساسیت مدل، برای حصول نتیجه بهتر، واسنجی صورت گرفت. برای بهینه‌سازی مدل متغیر CN که طبق تحلیل حساسیت دارای تأثیر زیادتری نسبت به متغیر زمان تأخیر داشت، استفاده شد. بدین صورت که ابتدا مدل برای مقادیر پیش‌گزیده متغیرها اجرا گردید و سپس با توجه به هیدروگراف مشاهداتی هرکدام از واقعه‌ها در ایستگاه مربوطه، بهینه‌سازی صورت گرفت. جدول (۵) نتایج مربوط به معیارهای ارزیابی خطا در قبل و بعد از واسنجی را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ذکر شده معیارهای ارزیابی خطا بعد از واسنجی مدل نتایج بهتری را نمایش دادند. به‌طور خلاصه می‌توان بیان کرد که میزان خطاها در هریک از رویدادهای مورد بررسی بعد از واسنجی مدل کاهش یافته است. نتایج مربوط به رویداد (۲۰۱۰/۰۲/۰۶-۲۰۱۰/۰۲/۰۴) در قبل و بعد از واسنجی در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل (۲): منحنی تغییرات نتایج مدل به‌ازای تغییر زمان تأخیر و CN
Figure (2): Model results change curve for lag time and CN change

واسنجی مدل HEC-HMS و تحلیل مقادیر جریان در دوره پایه

به‌منظور انتخاب وقایع طغیانی و فراگیر از داده‌های دبی‌های سیلابی روزانه و داده‌های حداکثر بارش‌های روزانه طی دوره آماری (۱۹۹۹-۲۰۱۳) در حوزه آبخیز امامه استفاده شد. انتخاب اولیه بر پایه میانگین حسابی بارش در ایستگاه کمرخانی (کلوکان) صورت گرفت. بارش‌های حداکثری مختلف که مربوط به تاریخ‌های متفاوت بودند به‌ترتیب نزولی مرتب شد. سپس از بارش‌هایی که از میانگین حسابی بیشتر شده بودند صدک ۸۵/ گرفته شد. در نهایت با تطابق رویدادهای سیل تعداد ۸ واقعه انتخاب شد. در ادامه از این وقایع برای اعتبارسنجی مدل HEC-HMS استفاده شد. برای تعیین متغیرهای مناسب برای واسنجی مدل، تحلیل حساسیت صورت گرفت. با توجه به اینکه در این مطالعه از روش شماره منحنی SCS برای برآورد تلفات استفاده شده است، برای تعیین میزان حساسیت از متغیرهای شماره منحنی (CN) و زمان تأخیر استفاده شد. با توجه به شکل (۲) که منحنی تغییرات نتایج مدل به‌ازای تغییرات در دو متغیر شماره منحنی و زمان تأخیر را نشان



شکل (۳): خروجی نتایج مدل HEC-HMS قبل و بعد از واسنجی برای واقعه (۲۰۱۰/۰۲/۰۶-۲۰۱۰/۰۲/۰۴)
Figure (3): Output of HEC-HMS model results before and after calibration for the event (02/04/2010-02/06/2010)

جدول (۵): نتایج ارزیابی کارایی مدل HEC-HMS برای رویدادهای سیل مورد مطالعه

Table (4): Results evaluate the performance of HEC-HMS model for flood events studied

میانگین قدر مطلق خطا		ضریب ناش - ساتکلیف		RMSE		تابع هدف مدل
دبی اوج (m³/s)		دبی اوج (m³/s)		دبی اوج (m³/s)		
مشاهده‌ای	شبیه‌سازی	مشاهده‌ای	شبیه‌سازی	مشاهده‌ای	شبیه‌سازی	
۰/۵	۰/۶	-۰/۷۱۴	-۱/۵	۰/۸	۰/۹	۲۰۱۰/۰۲/۰۴-۲۰۱۰/۰۲/۰۶
۰/۵	۰/۶	۰/۱۷۲	-۰/۳۶۹	۰/۸	۱	۲۰۱۰/۰۴/۲۹-۲۰۱۰/۰۴/۳۰
۰/۵	۰/۶	-۰/۱۳۷	-۰/۸۸	۰/۶	۰/۸	۲۰۱۱/۰۴/۲۰-۲۰۱۱/۰۵/۱۷
۰/۸	۰/۹	-۱/۲۷	-۲/۰۲	۱/۲	۱/۴	۲۰۱۱/۰۸/۲۰-۲۰۱۱/۰۸/۲۹
۰/۴	۰/۴	۰/۱۷۷	۰/۰۹	۰/۴	۰/۵	۲۰۱۲/۰۴/۲۰-۲۰۱۲/۰۴/۱۵
۰/۴	۰/۶	۰/۵۹۴	۰/۳۱	۰/۶	۰/۷	۲۰۱۳/۰۸/۲۰-۲۰۱۳/۰۸/۱۱

تحلیل مقادیر جریان در دوره‌های آتی

شبیه‌سازی شد.

تجزیه و تحلیل شدت و فراوانی مقادیر جریان در دوره‌های آتی

بعد از انتخاب وقایع طغیانی که بیشترین بزرگی را نسبت به واقعه‌های دیگر داشتند، توسط مدل NETSTORM به بارش یک‌ساعته و کمتر تجزیه می‌شوند. سپس مقادیر دبی‌های سیلابی طی دوره‌های پایه و آتی محاسبه شد و تابع توزیع احتمالاتی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار SMADA به دست آمد.

بعد از اطمینان از کارایی مدل، در مرحله بعدی به منظور شبیه‌سازی سیلاب حوضه معرف امامیه در دوره‌های آتی از سری‌های زمانی بارش در ایستگاه کلوکان امامیه استفاده شد. داده‌های پیش‌بینی شده تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و در ۵ دوره مجزا مورد بررسی قرار گرفت. سپس با توجه به میزان میانگین بارش روزانه برای هر دوره، ۵ واقعه که بیشترین بزرگی را نسبت به واقعه‌های دیگر داشتند، انتخاب شد. در نهایت همه این وقایع به مدل HEC-HMS معرفی و

جدول (۶): نتایج برازش مناسب‌ترین تابع توزیع برای داده‌های دبی روزانه دوره پایه و آتی در ایستگاه کمرخانی

Table (5): The results of fitting the most appropriate distribution function for the daily and future daily flow data at Kamarkhani station

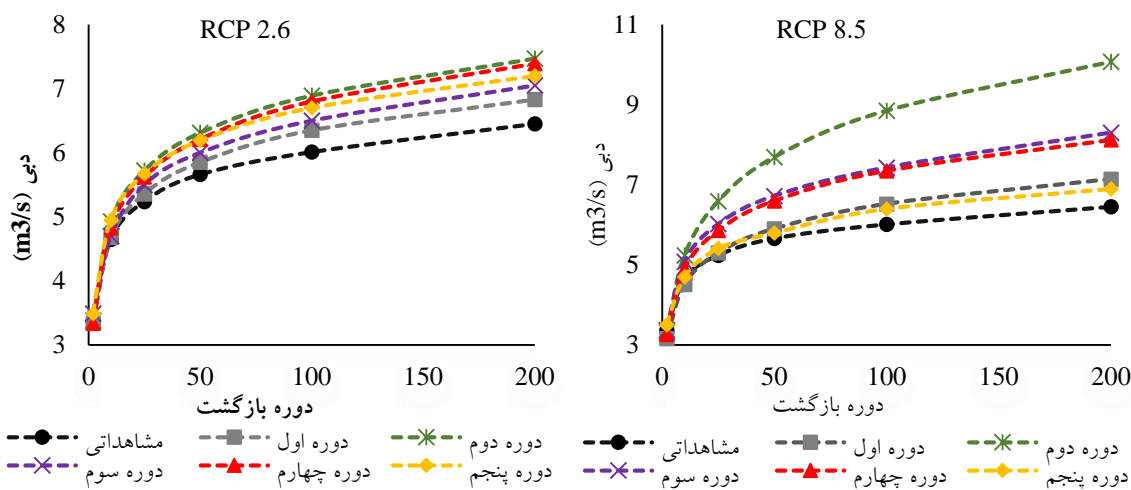
آزمون نکوئی برازش	دوره مورد مطالعه	توزیع‌های احتمالاتی						
		Normal	2 Parametr Log Normal	3 Parametr Log Normal	Pearson Type III	Log Pearson Type III	Gumbel	
MSE Obs	۲۰۱۳-۱۹۹۹	۰/۰۴۱	۰/۰۱۷	۰/۰۱۹	۰/۰۱۵*	۰/۰۱۸	۰/۰۲۴	
	دوره اول	۰/۰۹۲	۰/۰۴۳	۰/۰۳۵	۰/۰۲۱*	۰/۰۳۱	۰/۰۳۷	
	MSE RCP2.6	دوره دوم	۰/۱۴۴	۰/۰۶۵	۰/۰۵۴	۰/۰۳۲*	۰/۰۵۱	۰/۰۶۰
		دوره سوم	۰/۰۲۵	۰/۰۱۸	۰/۰۱۹	۰/۰۱۲*	۰/۰۱۴	۰/۰۲۶
		دوره چهارم	۰/۱۳۱	۰/۰۵۹	۰/۰۴۱	۰/۰۲۸*	۰/۰۴۳	۰/۰۵۴
MSE RCP8.5	دوره پنجم	۰/۰۷۲	۰/۰۲۵	۰/۰۲۱	۰/۰۱۴*	۰/۰۲۳	۰/۰۲۳	
	دوره اول	۰/۱۴۹	۰/۰۸۱	۰/۰۴۵	۰/۰۲۷*	۰/۰۴۸	۰/۰۶۳	
	دوره دوم	۰/۴۶۱	۰/۲۳۹	۰/۱۲۳	۰/۰۹۳*	۰/۱۳۴	۰/۲۲۵	
	دوره سوم	۰/۲۰۲	۰/۰۸۶	۰/۰۶۰	۰/۰۳۶*	۰/۰۶۴	۰/۰۷۹	
	دوره چهارم	۰/۲۲۹	۰/۱۱۴	۰/۰۷۲	۰/۰۴۳*	۰/۰۷۷	۰/۰۹۷	
RMSE Obs	دوره پنجم	۰/۰۵۲	۰/۰۳۵	۰/۰۳۷	۰/۰۳۲*	۰/۰۳۲	۰/۰۳۴	
	۲۰۱۳-۱۹۹۹	۰/۲۰۳	۰/۱۳۲	۰/۱۳۷	۰/۱۲۴*	۰/۱۳۶	۰/۱۵۵	
	دوره اول	۰/۳۰۱	۰/۲۰۵	۰/۱۷۸	۰/۱۴۲*	۰/۱۷۵	۰/۱۹۱	
	RMSE RCP2.6	دوره دوم	۰/۳۷۱	۰/۲۵۷	۰/۲۲۰	۰/۱۹۴*	۰/۲۳۱	۰/۲۵۶
		دوره سوم	۰/۱۶۲	۰/۱۲۳	۰/۱۳۳	۰/۱۲۱*	۰/۱۲۲	۰/۱۶۰
دوره چهارم		۰/۳۶۲	۰/۲۴۴	۰/۲۰۲	۰/۱۶۷*	۰/۲۰۸	۰/۲۳۲	
RMSE RCP8.5	دوره پنجم	۰/۲۶۸	۰/۱۵۸	۰/۱۴۶	۰/۱۱۹*	۰/۱۵۲	۰/۱۵۱	
	دوره اول	۰/۳۸۷	۰/۲۸۵	۰/۲۱۳	۰/۱۶۵*	۰/۲۱۹	۰/۲۵۰	
	دوره دوم	۰/۶۷۹	۰/۴۸۹	۰/۳۵۱	۰/۳۰۴*	۰/۳۶۶	۰/۴۷۴	
	دوره سوم	۰/۴۴۹	۰/۲۹۴	۰/۲۴۵	۰/۱۸۹*	۰/۲۵۳	۰/۲۸۱	
	دوره چهارم	۰/۴۷۹	۰/۳۳۸	۰/۲۶۸	۰/۲۰۸*	۰/۲۷۷	۰/۳۱۲	
دوره پنجم	۰/۲۲۹	۰/۱۸۶	۰/۱۹۱	۰/۱۸۰*	۰/۱۷۹	۰/۱۸۴		

ستاره‌دار و سایه‌دار: بهترین توزیع

برآورد شد (شکل ۴). از سیلاب‌های برآوردشده با دوره بازگشت ۲ ساله تقریباً یک‌سوم دوره‌ها نسبت به دوره پایه با افزایش دبی همراه بوده است، در حالی که در دوره‌های دیگر با این دوره بازگشت دبی‌ها یا کاهش می‌یابند یا اینکه تغییر چندانی نشان نمی‌دهند. سیلاب‌های برآوردشده با دوره‌های بازگشت ۱۰ و ۲۵ ساله هم در دوسوم دوره‌ها افزایش یافته است؛ به طوری که بیشترین افزایش آن‌ها در دوره دوم تحت سناریوی RCP8.5 به ترتیب مقدار ۱۲/۶۸ و ۲۵/۷۶٪ بوده است. دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ ساله هرکدام به ترتیب به جز در چهار و سه دوره در بقیه دوره‌های مورد مطالعه افزایش نشان دادند. در ضمن قابل ذکر است که بیشترین میزان افزایش سیل با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله مربوط به دوره دوم تحت سناریوی RCP8.5 با میزان ۵۶/۱۲٪ و دبی ۱۰/۰۷ مترمکعب می‌باشد. همچنین می‌توان بیان کرد که از دوره بازگشت ۲ ساله به ۲۰۰ ساله بر تعداد دوره‌هایی که سیلاب‌های برآورد شده در آن‌ها نسبت به دوره مشاهداتی بیشتر است، اضافه شده است (شکل ۴).

بهترین توزیع از بین توزیع‌های نرمال، لوگ نرمال ۲ و ۳ متغیری، پیرسون تیپ ۳، لوگ پیرسون تیپ ۳ و گامبل برای هر سری زمانی پایه و آینده با استفاده از سه آزمون نکویی برازش خطای میانگین مربعات (MSE) و جذر خطای میانگین مربعات (RMSE) رتبه‌بندی و انتخاب شد. جدول (۶) نتایج خروجی از نرم‌افزار و بهترین توزیع برای هر سری داده را نشان می‌دهد. با توجه به جدول مذکور توزیع پیرسون نوع سوم در همه سری‌ها به دلیل دارا بودن کمترین مقدار خطا، بهترین توزیع انتخاب شد. همچنین قابل ذکر است در بیشتر موارد توزیع لوگ نرمال سه‌متغیره بعد از توزیع پیرسون نوع سوم از نظر رتبه‌بندی دومین مرتبه را دارد. همچنین میزان RMSE در طول دوره‌های مختلف توسط سناریوی انتشار RCP8.5 نسبت به سناریوی RCP2.6 بیشتر بوده و این امر نشان می‌دهد که RCP2.6 نسبت به سناریوی RCP8.5 در پیش‌بینی‌ها خوش‌بینانه عمل کرده است.

با توجه به نتایج مناسب‌ترین توزیع فراوانی، مقادیر سیل با دوره‌های بازگشت ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله،



شکل (۴): مقایسه تغییرات شدت دبی‌های سیلابی در دوره‌های پایه و آبی در دوره بازگشت‌های ثابت

Figure (3): Comparison of changes in flood discharge intensity in basic and future periods in constant return periods

اقلیمی CanESM2 و ریزمقیاس‌نمایی SDSM تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در دوره‌های آبی پرداخته شد. برای شبیه‌سازی دبی‌های سیلابی طی دوره‌های آبی از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده شد. در نهایت برای بررسی تحلیل فراوانی سیل از مدل SMADA برای به دست

بحث و نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم در صد سال آینده با تغییرات قابل توجهی در الگوی بارش همراه است که به تبع آن خطرات سیل و خشکسالی را در پیش دارد. در پژوهش حاضر به بررسی اثر تغییرات اقلیم بر دماهای حدی و بارش منطقه بر اساس مدل

مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی رواناب سطحی از متغیرهای شماره منحنی و زمان تأخیر در تحلیل حساسیت استفاده کردند. آن‌ها با تابع هدف‌های مختلف نشان دادند که متغیر شماره منحنی برای تعیین میزان حساسیت مناسب است. شبیه‌سازی سیلاب‌های حوضه در دوره‌های آبی و مقایسه مقادیر دبی‌های پیک دوره‌های آبی و دوره مشاهده‌ای حاکی از تغییر رژیم دبی‌های سیلابی رودخانه است. در دوره بازگشت‌های ثابت، دبی حداکثر افزایش یافته و در دبی حداکثر ثابت با افزایش دوره بازگشت مقدار دبی‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. بنابراین نتایج برای سیل‌های با دوره بازگشت مختلف با نتایج دیگر محققان همخوانی دارد (ذهبیون و همکاران، ۲۰۱۰؛ دوستی و همکاران، ۲۰۱۳؛ خوش‌روش و بائوچ رضایی، ۲۰۱۶؛ الماسی و سلطانی، ۲۰۱۷)؛ به‌طوری که بیشترین میزان افزایش سیل با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله مربوط به دوره دوم تحت سناریوی RCP8.5 با میزان ۵۶/۱۲٪ و دبی ۱۰/۰۷ مترمکعب است. نتایج این تحقیق این موضوع را تأیید می‌کند که تغییر اقلیم امری اجتناب‌ناپذیر است لذا مدیران و برنامه‌ریزان بایستی نسبت به تدوین سیاست‌های ملی و منطقه‌ای مقابله و سازگاری با پدیده تغییر اقلیم و رویدادهای حدی سیل و خشکسالی اقدامات لازم را انجام دهند.

آوردن توزیع‌های آماری مناسب و شدت و دوره بازگشت‌های دبی‌های سیلابی استفاده شد. با توجه به نتایج حاصل از مدل رگرسیون خطی چندمتغیره SDSM که کارایی مناسبی در شبیه‌سازی بارش و دما نشان داد، درجه حرارت با این شبیه‌سازی در دوره‌های تحت سناریوهای مورد مطالعه دارای روند افزایشی است و با نتایج حاصل از تحقیقات مساح بوانی و مرید (۲۰۰۵) و زالکارنیان و همکاران (۲۰۱۴) همخوانی دارد. بیشترین افزایش آن مربوط به سناریوی RCP8.5 است. همچنین میزان افزایش دما در دوره آبی دور (۲۰۵۶-۲۱۰۰) نسبت به دوره آبی نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۵۵) بیشتر خواهد بود. نتایج شبیه‌سازی بارش تحت سناریوها در دوره‌های آبی روند مشخصی نداشته و در بعضی ماه‌ها بارش افزایش و در بعضی از ماه‌ها کاهش خواهد یافت. در بیشتر موارد نتایج بارش نشان داد که در طی دوره‌های آبی بارش کاهش خواهد یافت که با نتایج دسترنج و همکاران (۱۳۹۱) همخوانی ندارد. شاخص‌های نکویی برآزش در واسنجی و صحت سنجی مدل HEC-HMS نشان دادند که میزان خطاها در هریک از رویدادهای مورد بررسی بعد از واسنجی کردن کاهش یافته است. نتایج این بخش از تحقیق توسط مطالعه رستمی‌زاد و همکاران (۲۰۱۳) تأیید می‌شود؛ چراکه آن‌ها به‌منظور واسنجی روش‌های مختلف برآورد تلفات بارش در

منابع

- Aksoy, H. 2000. Use of gamma distribution in hydrological analysis. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. 24(6): 419-428.
- Almsi, P. and Soltani, S. 2017. Assessment of the climate change impacts on flood frequency (case study: Bazoft Basin, Iran). Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 31(5): 1171-1182.
- Azari, M., Moradi, H., Saghafian, B. and Faramarzi, M., 2013. Evaluation of hydrological effects of climate change in Gorganrood watershed. Journal of Water and Soil, 27 (3), 547-537. (In Parsian)
- Burn, D. H. 2008. Climatic influences on streamflow timing in the headwaters of the Mackenzie River Basin. Journal of Hydrology. 352(1-2): 225-238.
- Campbell, A. J. and Sidle, R. C. 1984. Prediction of peak flows on small watersheds in Oregon for use in culvert design. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 20(1): 9-14.
- Chen, Y. J., Lin, H. J., Liou, J. J., Cheng, C. T., and Chen, Y. M. 2022. Assessment of Flood Risk Map under Climate Change RCP8. 5 Scenarios in Taiwan. Water, 14(2), 207.
- Dastranj, A. 2012. Prediction of temperature and precipitation using general circulation models of climatic simulation atmosphere (study area of the northern half of the country), Department of Dry and Mountainous Regeneration, Faculty of Natural Resources, M.Sc. thesis, University of Tehran, 150 p. (In Parsian)

8. Dosti, M., Habib Nejadroshan, M., Shahedi, K. And Mir Yaghoubzadeh, M. H., 2013. Investigation of Climatic Indices of Tamar Watershed, Golestan Province in Climate Change Conditions Using LARS-WG Model. *Journal of Earth and Space Physics*, 39 (4), 177-189. (In Parsian)
9. Hejazizadeh, Z. and Parvin, N. 2009. A study of temperature and precipitation changes in Tehran during the last half century. *Geography and regional planning*, 1, 43-56. (In Parsian)
10. Hejazizadeh, Z., Fattahi, A., Massah Bovani, A., and Naserzadeh, M. 2012., Assessing the effects of climate change on flood hydrography in future periods (Case study: Bakhtiari watershed). *Iranian Journal of Geographical Association*, 10 (34), 5-24. (In Parsian)
11. Ho, M. K., and Yusof, F. 2013. Determination of best-fit distribution and rainfall events in Damansara and Kelantan, Malaysia. *MATEMATIKA: Malaysian Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 43-52.
12. Jones. R. N. 2001. Assessing the risk of climate change on the water resources of the Macquarie River Catchment. In *Integrating Models for Natural Resources Management across Disciplines, issues and scales (Part 2)*, Modsim 2001 International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand.
13. Khoshraei, M. and Baoj Rezaei, Z., 2016. The effect of climate change on flood frequency in Kelardasht basin using a combination of K-nn algorithm and HadCM3 model. *Journal of Soil and Water Knowledge*, 26 (1/3), 221-211. (In Parsian)
14. Khudri. M. M. and Sadia. F. 2013. Determination of the best fit probability distribution for annual extreme precipitation in Bangladesh. *European Journal of Scientific Research*. 103(3): 391-404.
15. Maghsood, F. F., Moradi, H., Massah Bavani, A. R., Panahi, M., Berndtsson, R., & Hashemi, H. 2019. Climate change impact on flood frequency and source area in northern Iran under CMIP5 scenarios. *Water*, 11(2), 273.
16. Mahdavi, M., 2005. *Applied Hydrology*. University of Tehran Press, Volume 2, Fourth Edition, Tehran, Iran.
17. Malmir, P., Mohammad Rezapour, A., Sharif Azari, S. and Ghandahari, Gh., 2016. Investigation of the effects of climate change on the runoff of Gharahsoo basin using statistical microscale of HADCM3 model data and dynamic neural network. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23 (3), 317-326. (In Parsian)
18. Mansoori, B., Ahmadzadeh, H., Masahbovani, A., Murid, S., Delavar, M., and Lotfi, S., 2005. Investigation of the effects of climate change on water resources of Zarrinehroud basin using SWAT model, *Journal of Water and Soil*, 28 (6), 1203-1291. (In Parsian)
19. Massah Bovani, A., and Murid, S. 2005. Effects of Climate Change on the Zayandehrood River in Isfahan. *Agricultural Science and Technology and Natural Resources*, 4 (9), 17-27. (In Parsian)
20. Mirzaei, S., Vafakhah, M., Bisvajit, P., and Alavi, J. 2020. Prediction and analysis of flood zone in the context of climate change based on CanESM2 model scenarios. *Echo Hydrology*, 7 (2), 551-562. (In Parsian)
21. Modarres. R. 2006. Regional precipitation climates of Iran. *Journal of Hydrology (New Zealand)*. 13-27.
22. Muzik. I. 2002. A first-order analysis of the climate change effect on flood frequencies in a subalpine watershed by means of a hydrological rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*. 267(1-2): 65-73.
23. Nash. J.E. and Sutcliffe. J. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part 1, A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10: 282-290.
24. Park. D. Song. Y. I. and Roesner. L. A. 2013. Effect of the seasonal rainfall distribution on storm-water quality capture volume estimation. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 139(1): 45-52.
25. Pervez. M.S. and Henebry. G.M. 2014. Projections of the Ganges – Brahmaputra precipitation -downscaled from GCM predictors. *Journal of Hydrology*. 517(1): 120-134. doi:10.1016/j.jhydrol.05.016.
26. Pour Mohammadi, S., Dastarani, M. T., Massah Bovani, A., Goodarzi, M., Jafari, H. and Rahimian, M. H., 2017. Investigating the effects of climate change on river runoff and providing strategies to adapt to its effects; Case study: Tuysarkan watershed of Hamedan. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 11 (37), 12-1. (In Parsian)

27. Rostamizad, Gh., Khaligi Sigaroudi, Sh., and Mahdavi., M. 2013. Calibration of different methods for estimating rainfall losses in HEC-HMS model in order to simulate surface runoff (Case study: Kan Watershed). *Journal of Rangeland and Watershed Management*, 66 (3), 359-371. (In Parsian)
28. Sanikhani, H., Din Pajoo, Y., Puryousef, S., Zamanzad Ghavidel, S., and Solati, B. 2013. Investigation of the effects of climate change on runoff runoff (Case study: Ajichai watershed in East Azarbaijan province). *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries)*, 27 (6). 1234-1225. (In Parsian)
29. Shrestha. S. and Lohpaisankrit. W. 2016. Flood hazard assessment under climate change scenarios in the Yang River Basin, Thailand. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 6(2): 285-298.
30. Tofiq. F. A. and Guven. A. 2014. Prediction of design flood discharge by statistical downscaling and General Circulation Models. *Journal of hydrology*. 517: 1145-1153.
31. Willems. P. 2009. A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environmental Modeling Software*. 24(3): 311-321.
32. Zahebiun, B., Goodarzi, M. R., and Masah Bovani, A. 2010. Application of SWAT model in estimating basin runoff in future periods affected by climate change. *Climatological Research*, 1 (3), 45-60. (In Parsian)
33. Zhou. Q. Leng. G. Huang. M. 2018. Impacts of future climate change on urban flood volumes in Hohhot in northern China: benefits of climate change mitigation and adaptations. *Hydrology and Earth System Sciences*. 22(1): 305.
34. Zulkarnain. H. Shamsudin. S. Harun. S. 2014. Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature. *Theoretical and applied climatology*. 116(1-2): 243-257.

Analyzing the Floods' Frequency and Severity under Climate Change Scenarios: A Case Study of Emameh Watershed

Hassan Alipour^۱, Ali Salajeh^۲, Alireza Moghaddamia^۳, Shahram Khalighi Sigaroudi^۴, Mojtaba

Nassajizavareh^۵

Received: 23/09/2021

Accepted: 01/0

5/2022

Extended Abstract

Introduction: As an undeniable environmental phenomenon, climate change can be defined as a reversible change or variability in the average climate and its relevant variables, including the temperature, precipitation, humidity, climate patterns, wind, radiation, etc., which lasts for a long period of time. Located in a special geographical location that suffers from insufficient precipitation, Iran faces inappropriate distribution of rainfall temporally and spatially. On the other hand, the world seems to be facing new challenges in terms of water resources. Moreover, the most important consequence of the change in the hydrological cycle is the tendency toward extreme events such as torrential rains, widespread droughts, and in some cases, regional wetlands. In this regard, it can be said that the frequency and severity of floods are among the terrible or deadly natural disasters brought about by climate change. Therefore, it is necessary to determine the best probability for the distribution of flood discharges, measure the best probability distribution for management and planning in cases where climate change occurs, and finally assess the frequency and severity of floods in Iran.

Materials and methods: To analyze the floods' frequency and severity under different climate change scenarios, the minimum and maximum values of precipitation and temperature were measured using the CanESM2 general circulation model under RCP2.6 and RCP8.5 climate change scenarios and the SDSM4.2.9 linear multiple regression downscaling model. Then, the collected precipitation data was processed and analyzed and the flood pattern was simulated for future periods via NetSTORM software (separating the rainfall from the hourly data). Moreover, the HEC-HMS model was used to simulate floods in basic and future periods. Accordingly, the SCS method, the Clark unit hydrograph method, and the Muskingum method were calibrated and evaluated to calculate the infiltration, convert the rainfall to runoff, and rout the river, respectively. Finally, to analyze the floods' frequency and severity, the probabilistic distribution function was fitted for the future periods' baseline data and propagation scenarios using the SMADA software for different statistical distributions (normal, two- and three-parameter log-normal, Pearson type III, Log-Pearson Type III and Gumbel), followed by the selection of the best-fit distribution model based on the RMSE and MSE tests.

Results: The results of the climatic model showed that under the RCP2.6 and RCP8.5 scenarios, the maximum temperature rate would increase in 2011-2055-and 2056-2100 by 3.02°C, 3.27°C, and 3.2°C, and 5.47°C, respectively. Furthermore, the minimum temperature rate would increase in the same periods by 0.62, 0.87, and 1.1 and 2.82 degrees Celsius, respectively. However, the monthly precipitation data did not reveal any specific trend throughout the future periods.

1Master student, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran; salajegh@ut.ac.ir

3Associate Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

4Associate Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

5 Assistant professor, Institute of Agricultural Education & Extension, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

DOI: 10.22052/deej.2021.11.34.59

The Emamah watershed's data concerning the flood discharge and maximum daily precipitation rate during the study period (1999-2019) were used to select flood and pervasive events. The predicted data were then analyzed under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios at five separate periods. Finally, the selected events' data were imported to the HEC-HMS model and simulated. After selecting the flood events with the highest magnitude compared to other events, they were decomposed into one-hour or fewer rainfall events using the NETSTORM model. Then the flood discharge values were calculated for the base and future periods and their probabilistic distribution function was obtained through the SMADA software. Finally, the Pearson type III distribution, the best distribution among normal, two-and three-parameter lognormal, Pearson type 3, Log-Pearson Type 3, and Gamble distributions were selected for each base and future time series using the goodness-of-fit test. According to the results of the best frequency distribution, flood values were estimated with return periods of 2, 10, 25, 50, 100, and 200 years. Moreover, one third of the floods with a 2-year return period witnessed an increase in discharge rate compared to the base period. However, the discharge rate decreased or remained unchanged in floods with other return periods. On the other hand, floods estimated with 10 and 25-year return periods were increased in two-thirds of the periods, the highest increase of which occurred in the second period under the RCP8.5 scenarios by 12.68 and 25.76 percent, respectively. It should also be noted that the highest chances of increase in flood occurrence with a return period of 200 years belonged to the second period by 56.12% increase rate and 10.07 m³ discharge rate under the RCP8.5 scenarios.

Discussion and Conclusion: throughout the next hundred years, climate change would experience significant changes in precipitation patterns, leading to the risks of severe floods and droughts. Moreover, the results of the analysis and study of climate change indicated that the temperature increasing trend in the periods under the studied scenarios and that the biggest increase belonged to the RCP8.5 scenarios. It was also found that the temperature rate would increase more in the period 2056-2100 compared to the 2011-2055 period. However, the results of precipitation simulation under the scenarios did not show a definite trend for the future periods, with the precipitation increasing and decreasing in different months of the year. On the other hand, the simulation of basin floods for the future periods and the comparison of peak discharge values within the future and the observation periods indicated a change in the regime of river flood discharges. Accordingly, the maximum discharge rate increased in the constant returns period. Furthermore, the discharge rates significantly increased in the maximum constant flow period with an increase in the return period.

Keywords: Rainfall- Runoff Modeling, SDSM, Flood Frequency Analysis, Emameh Watershed, HEC-HMS.