

اثرات تغییر اقلیم بر کمیت و کیفیت رواناب شهری قسمتی از حوضه آبریز کرج بر اساس سناریوهای RCP

حامد نوری خواجه‌بلاغ و سیدفرهاد موسوی^{۱*}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۱)

چکیده

در تحقیق حاضر، به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر کمیت و کیفیت رواناب شهری قسمتی از حوضه آبریز شهر کرج در استان البرز، با استفاده از مدل CanESM2 و شبیه‌ساز بارش و رواناب SWMM، پرداخته شده است. بر همین اساس، دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۵) و دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) در نظر گرفته شده است. بر اساس سامانه اصلی و فرعی زهکشی رواناب موجود و به منظور بالا بردن دقت، حوضه آبریز در فضای نرم‌افزار ArcGIS به ۳۷ زیرحوضه تقسیم شد. برای شبیه‌سازی بارش و رواناب، منحنی شدت-مدت-فراوانی در سه حالت پایه و سناریوهای اقلیمی RCP2.6 و RCP8.5 بر پایه داده‌های بارش اخذ شده از ایستگاه سینوپتیک هواشناسی کرج، برای تداوم بارش دو ساعته و دوره بازگشت ۱۰ ساله، تهیه شده است. نتایج نشان داد که میزان میانگین بارش ۲۴ ساعته در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 نسبت به مقادیر مشاهداتی در دوره پایه به ترتیب ۲۱ و ۱۱ درصد افزایش داشته و حداکثر بارش ۲۴ ساعته نیز به ترتیب ۱۷ و ۲۳ درصد با کاهش روبه‌رو شده است. همچنین، با بررسی نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی کمی و کیفی رواناب در حوضه مطالعاتی، و با توجه به هیدروگراف سیلاب خروجی در دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5، دبی سیلاب به ترتیب ۵/۸ و ۷/۱۰ درصد و حجم آبگرفتگی در سطح حوضه نیز به ترتیب ۱۳ و ۱۵/۲۸ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد داشت. مقادیر غلظت آلاینده‌ها در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5، شامل کل مواد جامد معلق به ترتیب با افزایش غلظت ۷/۴۸ و ۹/۲۴ درصد، نیتروژن کل به ترتیب با افزایش غلظت ۶/۹۳ و ۸/۴۸ درصد و آلاینده سرب به ترتیب با افزایش غلظت ۷/۳۲ و ۸/۹۱ درصد نسبت به دوره پایه همراه خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، شبیه‌سازی بارش، کیفیت رواناب شهری، غلظت مواد آلاینده.

۱- گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: fmousavi@semnan.ac.ir

مقدمه

تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر چرخه هیدرولوژیک بوده و امروزه به‌عنوان تهدید جدی برای توسعه پایدار مطرح است. اثرات تغییر اقلیم در سیستم‌های مختلف و با شدت‌های متفاوتی بروز می‌کند، که یکی از آنها، سیستم‌های منابع آب است که یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌ها و نگرانی‌ها را به‌خود اختصاص داده است (۳). این پدیده، با تأثیر بر چرخه هیدرولوژیک، موجب تغییر در رژیم بارش و میزان رواناب شده و با توجه به این تغییرات، انتقال و پخش آلاینده‌ها را در محیط تغییر داده و به‌طور کلی موجب تغییر در کمیت و کیفیت منابع آب می‌شود (۶). در حال حاضر، مدل‌های عددی سه‌بعدی جو-اقیانوسی گردش عمومی که شاخصی از فرایندهای فیزیکی در اتمسفر، اقیانوس، یخ‌کره و سطح زمین است و با نام AOGCM (Atmosphere Ocean General Coupled Model) یاد می‌شوند، به‌عنوان پیشرفته‌ترین ابزار برای شبیه‌سازی و تولید سناریوهای اقلیمی به‌شمار می‌روند (۱۵). یکی از مشکلات عمده در استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو، بزرگ بودن مقیاس مکانی سلول‌های محاسباتی آنها، نسبت به منطقه مورد مطالعه است. لذا، برای استفاده از خروجی آنها در مقیاس مناسب و یا حتی در مقیاس ایستگاهی، نیاز به ریزمقیاس‌نمایی است.

با استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی، خروجی‌های GCM به متغیرهای سطحی در حوضه مورد مطالعه تبدیل می‌شود. یکی از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی، روش آماری است که مدل SDSM (Statistical Downscaling Model) را نیز شامل می‌شود. مدل‌های آماری و از جمله مدل SDSM، ارتباطات آماری بین رفتارهای بزرگ‌مقیاس (پیش‌بینی‌کننده‌ها) و محلی (پیش‌بینی‌شونده‌ها) را بر اساس روش رگرسیون خطی چندگانه برقرار می‌کنند (۱۴).

تغییر کاربری اراضی کشاورزی، جنگل‌ها، علفزارها و تالاب‌ها به زمین‌های شهری معمولاً سطوح نفوذناپذیر را افزایش می‌دهد که می‌تواند شرایط هیدرولوژیک را در یک حوضه تغییر دهد و

نتیجه آن افزایش حجم رواناب، دبی اوج رواناب و همچنین آلوده شدن آن است. انتظار بر این است که تغییر اقلیم، با کاهش در مقادیر بارش، باعث افزایش غلظت آلاینده‌ها شود و کیفیت آب را تحت تأثیر قرار دهد (۱۶). از طرفی، با توسعه شهری و تخریب پوشش گیاهی، وسعت زمین‌های شهری افزایش یافته، سطوح نفوذناپذیر جایگزین شده و باعث ایجاد رواناب‌های شهری شدید خواهد شد. همچنین، در بحث کیفیت رواناب شهری، آلاینده‌های نقطه‌ای تبدیل به آلاینده‌های گسترده شده و ورود مقادیر بیشتری از فلزات سنگین، رسوبات، آفت‌کش‌ها و باکتری‌های کلیفرم مدفوعی به آب‌های سطحی رخ خواهد داد (۷). در ادامه، برخی از تحقیقاتی که در زمینه تغییر اقلیم و اثرات آن بر کمیت و کیفیت رواناب انجام شده است، بررسی شده‌اند.

شمشیرساز (۱۱) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر کمیت و کیفیت منابع آب در حوضه متراکم شهری منطقه ۳ تهران، که در محدوده رودخانه زرگنده قرار دارد، پرداخت. در بحث تغییر اقلیم، از مدل ارائه شده در گزارش چهارم IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)، با نام HadCM3، و در ریزمقیاس‌نمایی از مدل LARS-WG استفاده شده است. نتایج تحلیل آماری بارش‌های دوره آتی با استفاده از روابط اصلاح شده در تبدیل بارش‌های روزانه به منحنی شدت-مدت-فروانی و مقایسه آن با دوره دیدبانی حاکی از افزایش شدت بارش در دوره‌های بازگشت ۱۰ و ۲۰ ساله است. درحالی که متوسط بارش سالانه افت ۱۰ درصدی را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی هیدرولیکی در این پژوهش در نرم‌افزار SWMM (Storm Water Management Model) انجام شده است. درنهایت، بعد از تکمیل مدل هیدرولیکی و اعمال اثرات تغییر اقلیم، نتایج بیانگر افزایش دبی اوج رواناب به میزان ۲۰ درصد بود. همچنین، در خصوص پارامترهای کیفی، نتایج کاهش متوسط غلظت آلاینده‌ها را نشان می‌دهد که همچنان بیش از حد استاندارد محیط زیست ایران است.

در تحقیق دولابیان (۴) برای شش منطقه از ایران، از خروجی

حدود ۰/۲، ۰/۱ و ۰/۱ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش نشان می‌دهد.

نوری و همکاران (۱۰)، در حوضه شهری کرج، کمیت و کیفیت رواناب را با استفاده از توسعه کم‌اثر (Low Impact Development, LID) و بهترین اقدام مدیریتی (Best Management Practice, BMP) مورد بررسی قرار دادند. شبیه‌سازی شبکه زهکشی منطقه در محیط نرم‌افزار SWMM انجام شده است. در این پژوهش، برای نیل به دقت لازم، منطقه مطالعاتی بر اساس توپولوژی و شبکه زهکشی به ۶۷ زیرحوضه تقسیم‌بندی شده است و برای بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک چندهدفه به کار گرفته شده است. نتایج نشان داد که مقادیر کمی و کیفی رواناب به ترتیب ۴۱ و ۲۳ درصد کاهش دارد.

زحمتکش و همکاران (۱۵)، تأثیر روش توسعه کم‌اثر را در شرایط تغییرات اقلیمی در رواناب حوضه رودخانه برونکس، واقع در شهر نیویورک مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داد که توسعه‌های کم‌اثر می‌توانند حجم سیلاب حوضه را به طور میانگین ۴۱ درصد و دبی اوج سیلاب را نیز ۸ تا ۱۳ درصد کاهش دهند. همچنین، تأثیر این روش در کاهش حجم سیلاب حوضه در شرایط تغییر اقلیم دو ساله و ۵۰ ساله به ترتیب ۲۸ و ۱۴ درصد عنوان شده است.

جئون و همکاران (۹) تغییرات بار کل فسفر توسط BMPS در شرایط تغییر اقلیم را در حوضه رودخانه Yeongsan در جنوب غربی کشور کره جنوبی مورد بررسی قرار داده‌اند. آمار بارندگی دوره پایه مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی مربوط به دوره ۲۰۴۰ تا ۲۰۵۰ است. در این تحقیق، از سناریوهای تغییر اقلیم RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شده است. نتایج حاکی از افزایش قابل توجه بار آلودگی فسفر در تمام سناریوهای تغییر اقلیم آینده و در تمامی ماه‌های سال، به جز در ماه ژوئیه، است.

ژو و همکاران (۱۶) اثر تغییر اقلیم و توسعه شهری را بر میزان حجم سیلاب شهری تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در

۲۵ مدل گردش عمومی جو از سری مدل‌های CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project- Version 5) به منظور بررسی عملکرد و صحت‌سنجی آنها در پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی دما و بارش در دوره تاریخی (۲۰۰۰-۱۹۸۱) استفاده شده است. سپس، انتخاب مدل‌های برتر به صورت فصلی و با استفاده از معیارهای عملکردی ضریب تشخیص، خطای جذر میانگین مربعات و ضریب نش- ساتکلیف صورت گرفته است. درنهایت، سناریوهای انتشار آینده (Representative Concentration Pathway) (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) برای دوره آتی (۲۰۴۶-۲۰۶۵) با استفاده از روش تناسبی ریزمقیاس شده‌اند. نتایج حاکی از سیر صعودی دما در تمامی مناطق مورد مطالعه است. افزایش دما تحت سناریوی RCP2.6 کمترین درصد و تحت سناریوی RCP8.5 بیشترین درصد را در تمامی مناطق نشان می‌دهد. بر خلاف دما، رژیم بارش در مناطق و سناریوهای مختلف، متفاوت است. به طور کلی، میانگین مجموع بارش سالانه در دوره آتی نسبت به دوره تاریخی در مناطق مختلف، افزایش را نشان می‌دهد.

یوسفی و همکاران (۱۴)، پیش‌بینی و بررسی تغییر اقلیم را در منطقه کرج با استفاده از ۳۰ سال (۱۹۹۰-۱۹۶۱) داده‌های ایستگاه سینوپتیک هواشناسی کرج تحت مدل HadCM3 و سناریوهای A2 و B2 انجام داده‌اند. برای ریزمقیاس‌نمایی از مدل SDSM استفاده شده است. نتایج معیارهای آماری ارزیابی کارایی مدل رگرسیون چندمتغیره خطی نشان داد که توانایی این مدل در شبیه‌سازی بارندگی و دمای ایستگاه کرج به نسبت قابل قبول بوده و با داده‌های مشاهداتی مطابقت دارد. شبیه‌سازی، به طور متوسط، در سناریوی A2، در دوره های اول (۲۰۲۰-۱۹۹۹)، دوم (۲۰۵۰-۲۰۲۱) و سوم (۲۰۸۰-۲۰۵۱) درباره بارندگی به ترتیب حدود ۰/۱، ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌متر نسبت به دوره پایه کاهش و در مورد دما به ترتیب حدود ۰/۱، ۰/۴ و ۰/۲ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش نشان می‌دهد. در سناریوی B2، درباره بارندگی به ترتیب حدود صفر، ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌متر نسبت به دوره پایه کاهش و در مورد دما به ترتیب

شده است. این مدل دارای قدرت تفکیک مکانی بالاتر و سناریوهای به‌روزتر نسبت به مدل‌های پیشین است. برای استفاده از داده‌های حاصل از مدل‌های بزرگ‌مقیاس در منطقه مطالعاتی، روش ریزمقیاس‌نمایی SDSM به‌کار رفته است. در زمینه مدل‌سازی هیدرولوژیک و هیدرولیکی منطقه مورد مطالعه، شبیه‌ساز SWMM به‌کار گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این منطقه، واقع در شرق شهر کرج (منطقه ۱ شهری) در استان البرز است (شکل ۱). طول جغرافیایی منطقه بین ۵۰ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۵۱ درجه شرقی و عرض جغرافیایی منطقه بین ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۹ دقیقه شمالی است. مساحت حوضه آبریز حدود ۱۴۵ هکتار است. متوسط بارش سالانه در حوضه مطالعاتی ۲۵۱ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۴ درجه سلسیوس بوده و دارای اقلیم نیمه‌خشک است. همچنین، جمع تبخیر سالانه از تشت تبخیر کلاس A بالغ بر ۲۱۸۴ میلی‌متر است. دی‌ماه با متوسط ۲۶ میلی‌متر و تیر ماه با ۳۷۵ میلی‌متر به‌ترتیب کمترین و بیشترین مقدار تبخیر را دارند.

حداکثر و حداقل تراز ارتفاعی نسبت به سطح دریای آزاد به ترتیب برابر با ۱۴۰۸ و ۱۳۴۶ متر است. اغلب بافت این منطقه مسکونی، تجاری، کارگاهی و صنعتی بوده و جزء بافت‌های توسعه‌یافته شهر به حساب می‌آید. نواحی شمالی حوضه دارای بافت با تراکم کمتر نسبت به نواحی جنوبی حوضه است (۸).

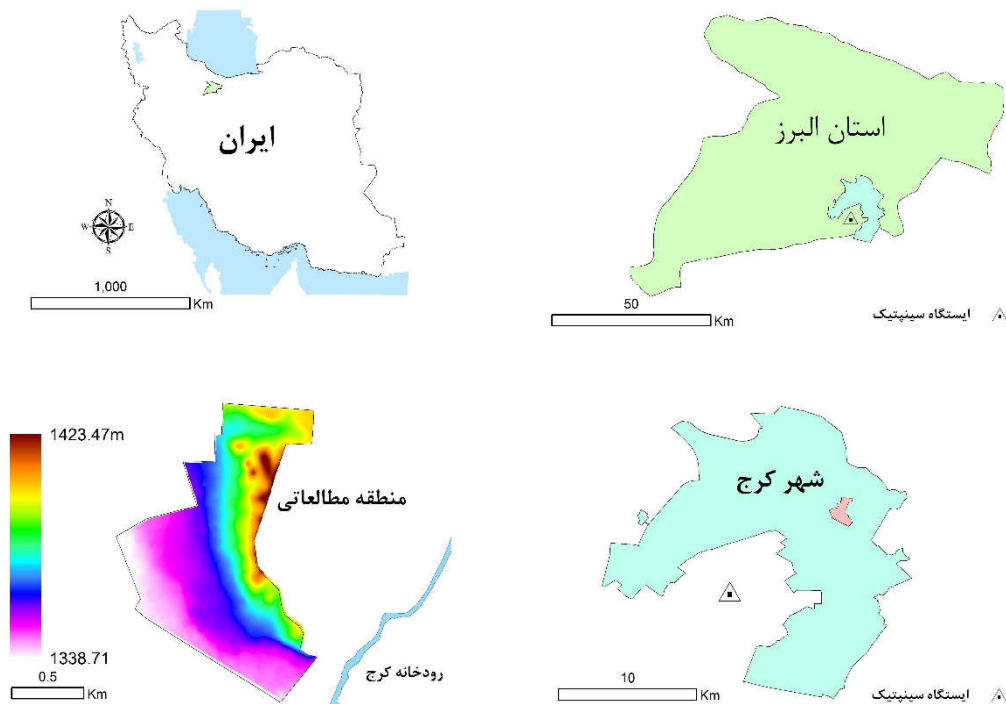
در این پژوهش، پس از تهیه داده‌های مورد نیاز، در ابتدا داده‌های بارش مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت و سپس تغییرات اقلیمی در دوره آتی بر اساس مدل CanESM2 و سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 بررسی شده است. در قسمت بارش، منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی (IDF) بر پایه بارش روزانه در دوره پایه و دوره آتی تهیه شده است. برای

چین مورد بررسی قرار دادند. مدل‌سازی سیلاب در فضای SWMM انجام شد. نتایج نشان داد که توسعه شهری منجر به افزایش میزان رواناب سالانه ۲۰۸ به ۴۱۳ درصدی است؛ اما این تغییرات بسته به عملکرد سیستم زهکشی در طول توسعه می‌تواند تا حد زیادی متفاوت باشد. همین مقدار افزایش سیلاب بسیار بیشتر از اثرات ناشی از تغییرات آب و هوا تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به‌میزان ۶۴ تا ۲۰۰ درصد است.

وو و همکاران (۱۳)، به بررسی تغییر عملکرد سیلاب با استفاده از مدل SWMM تحت تأثیر تغییرات آب و هوا در شهر Quynhon در کشور ویتنام پرداخته‌اند. در این پژوهش، از سناریوهای اقلیمی RCP برای پیش‌بینی در دوره ۲۰۵۰-۲۱۰۰ استفاده شده است.

علمداری و همکاران (۱)، اثرات تغییرات اقلیم طی دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۸ را بر مقادیر کمی و کیفی سیلاب، با استفاده از یک مدل واسنجی شده رواناب، در حوضه آبریز شهری فایرفاکس در ایالت ویرجینا در کشور آمریکا مورد بررسی قرار دادند. مدل رواناب شهری توسط شبیه‌ساز SWMM تهیه و مورد واسنجی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حجم سیلاب سالانه در اثر تغییرات اقلیمی طی دوره آتی با کاهش ۶/۵ درصد و آلاینده‌های TSS، TN و TP به‌ترتیب با افزایش غلظت ۷/۶، ۷/۱ و ۸/۱ درصد روبه‌رو شده است.

با توجه به تحقیقات صورت گرفته، تمرکز بیشتر مطالعات پیشین بر ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر کمیت جریان‌های حادی در کل حوضه رودخانه یا بخش برون‌شهری آن بوده و مطالعه و پژوهش اثرات تغییر اقلیم بر کمیت و کیفیت سیلاب در بخش شهری که مشخصه مهم آن دارا بودن سیستم زهکشی رواناب است مورد تأکید کمتری بوده است. لذا، در پژوهش حاضر، اثر فرایند تغییر اقلیم بر کمیت و کیفیت رواناب در قسمتی از شهر کرج مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی از مدل CanESM2 منتج شده از آخرین تحقیقات IPCC که در گزارش پنجم ارائه شده، استفاده



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه (رنگی در نسخه الکترونیکی)

بارندگی‌ها دارند. به همین منظور، برای اعمال داده‌های بارش به مدل، منحنی‌های IDF ناشی از این داده‌ها (پایه و آتی) با تداوم‌های بارش ۱۵ تا ۳۶۰ دقیقه و دوره بازگشت ۱ تا ۱۰۰ سال تهیه شده است.

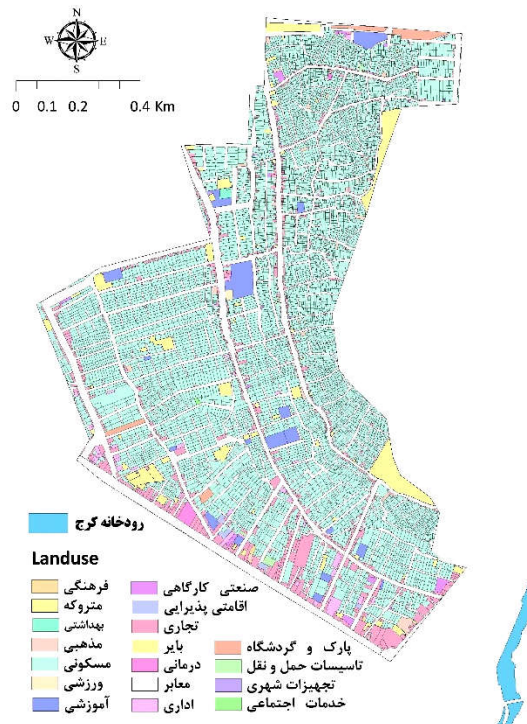
داده‌های تهیه شده مربوط به مشخصات حوضه شهری شامل داده‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیک است. در بحث مربوط به مشخصات توپوگرافی حوضه، شیب منطقه با توجه به مدل رقومی ارتفاع (Digital Elevation Model, DEM) منطقه تهیه شده است. همچنین، کاربری اراضی حوضه از نقشه‌های سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری کرج (۸) با دقت تهیه شده است (شکل ۲). داده‌های هیدرولیکی که شامل شبکه‌های فرعی و اصلی کانال‌ها با ابعاد آنها است، توسط بازدیدهای میدانی اندازه‌گیری شده و با جزئیات دقیق به صورت پایگاه داده‌ای در نرم‌افزار ArcGIS ثبت شده است. داده‌های

مدل‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیک از نرم‌افزار SWMM استفاده شده است.

جمع‌آوری داده‌ها

برای بررسی پارامترهای اقلیمی دما و بارندگی، از داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک هواشناسی کرج طی دوره آماری ۲۰ ساله (۱۹۸۵-۲۰۰۵) استفاده شد. این ایستگاه در موقعیت طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۶ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۰۰ متر قرار دارد (شکل ۱).

داده‌های بارش اخذ شده از سازمان هواشناسی در دوره پایه و داده‌های پیش‌بینی شده برای آینده (توسط مدل‌های تغییر اقلیم)، برای استفاده در برآورد سیلاب‌های شهری، نیاز به به‌کارگیری روش‌های آماری و روابط تجربی برای تهیه تحلیل فراوانی شدت



شکل ۲. نقشه کاربری اراضی حوضه مطالعاتی (رنگی در نسخه الکترونیکی)

عوامل اصلی تغییرات اقلیمی را ردیابی و در مدل های اقلیمی اعمال کرد، معرفی شدند. مدل های اقلیمی از نتایج این سناریوها برای نشان دادن غلظت و انتشار گازهای گلخانه‌ای، میزان آلودگی‌ها و تغییرات کاربری اراضی استفاده می‌کنند. سناریوهای خانواده RCP شامل چهار سناریوی مختلف است که عبارتند از: RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 که بر اساس مشخصات متفاوت سطح تکنولوژی، وضعیت اجتماعی و اقتصادی و خط‌مشی‌ها در آینده است که در هر شرایطی می‌تواند منجر به سطح انتشار متفاوت گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی شود. RCPهای ۴/۵، ۶/۰ و ۸/۵ تقریباً با سناریوهای B1، A1B و A2 گزارش چهارم IPCC مطابقت دارند (۴).

بر همین اساس، در منطقه مطالعاتی، مدل CanESM2 از سری مدل‌های گزارش CMIP5، تحت سناریوهای RCP2.6 (حالت خوش بینانه) و RCP8.5 (حالت بدبینانه)،

هیدرولوژیک منحنی شدت-مدت-فراوانی بارش نیز با توجه به داده‌های بارش طی دوره‌های آماری موجود، در دوره پایه و دوره آبی تهیه و در شبیه‌سازی استفاده شده است.

تغییرات اقلیمی

داده‌های بارش روزانه تهیه شده از ایستگاه سینوپتیک هواشناسی کرج برای بررسی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی استفاده شده است. اکثر مطالعات در کشور ایران در حوزه مدل‌سازی تغییر اقلیم، بر اساس داده‌های سری CMIP3 و CMIP4 انجام شده است. قدرت تفکیک مکانی داده‌های سری CMIP5 نسبت به دو سری قبلی افزایش یافته و از حدود ۲/۵×۲/۵ درجه جغرافیایی به حدود ۰/۵×۰/۵ درجه جغرافیایی ارتقا یافته است. سناریوهای جدید این گزارش، موسوم به RCPs، در سال ۲۰۱۰ با هدف مهیا کردن مجموعه‌ای از اطلاعات که از نتایج آنها بتوان

است که زمان تمرکز در حوضه‌های شهری، در قیاس با حوضه‌های برون‌شهری، غالباً بسیار کوتاه و معمولاً کمتر از ۲ ساعت است. از این‌رو، تحلیل فراوانی شدت رگبارها عموماً دامنه‌ای از رگبارهای کوتاه‌مدت از ۵ تا ۱۲۰ دقیقه را شامل می‌شود (۱۲). با توجه به مطالب عنوان شده، در این پژوهش، برای مدل‌سازی هیدرولوژیک، بر اساس توصیه مرجع ۱۲ و همچنین ثبت داده‌های دبی خروجی و تهیه هیدروگراف سیلاب بر اساس داده‌های مشاهده‌ای، از شدت بارش با تداوم دو برابر زمان تمرکز حوضه استفاده شده است. زمان تمرکز از روش‌های SCS و کریچ در حوضه مطالعاتی بین ۴۶ تا ۶۸ دقیقه محاسبه شد. لذا، شدت بارش بر اساس دو برابر زمان تمرکز، یعنی برابر با ۲ ساعت، در نظر گرفته شده است. بررسی تجربیات بین‌المللی حاکی از آن است که دوره بازگشت بارندگی طراحی شبکه‌های فرعی در کشورهای مختلف بین ۲ تا ۱۰ سال انتخاب می‌شود. علت اصلی عدم انتخاب سیلاب‌ها یا رگبارهای بزرگ‌تر از سیل یا رگبار ده‌ساله این بوده که اختلال در عملکرد شبکه زهکش فرعی در مقابل شبکه زهکش اصلی اغلب شدید و تحمل‌ناپذیر نیست (۱۲). بر همین اساس، با توجه به دوره طراحی ۱۰ ساله کانپوها و شبکه فرعی جمع‌آوری آب‌های سطحی، دوره بازگشت مطابق با دوره طراحی این سازه‌ها انتخاب شده است (۱۰ و ۱۲).

نتایج و بحث

واسنجی و اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی

برای اطمینان از صحت عملکرد مدل، لازم است تا مدل ایجاد شده واسنجی و اعتبارسنجی شود. در حوضه‌های شهری، روی کانال‌های اصلی جمع‌آوری آب‌های سطحی، ایستگاه ثبت سیلاب وجود ندارد. با وجود کمبودهای ذکر شده، در این پروژه، برای تهیه مدل کمی و کیفی سیلاب، دو رخداد بارندگی در تاریخ‌های ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ و ۱۷ فروردین ۱۳۹۸، مورد اندازه‌گیری و نمونه برداری قرار گرفت. طریقه انجام عملیات اندازه‌گیری و نمونه برداری به صورتی بود که در هر ۲۰ دقیقه، اندازه‌گیری عمق

با دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۵، برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۶۰) مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور ارزیابی مدل CanESM2، داده‌های تولید شده از مدل توسط روش SDSM ریزمقیاس‌نمایی شده و با داده‌های مشاهده‌ای به صورت ماهانه مقایسه شده‌اند.

مدل سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیک

برای مدل‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیک حوضه آبریز مورد مطالعه از شبیه‌ساز مدیریت، تحلیل و طراحی مرتبط با رواناب‌های سطحی در حوضه‌های شهری به نام SWMM (محصول آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا) استفاده شده است. در این مدل، آبگذرها، کانال یا لوله‌هایی هستند که آب را از یک گره به گره دیگر منتقل می‌کنند. هر شکل سطح مقطع با تدابیری که در مدل دیده شده قابل تعریف است. مقاطع تعریف شده به صورت تغییرات ارتفاع مقطع در برابر فاصله است. مدل SWMM از معادله مانینگ برای بیان رابطه بین نرخ تغییرات دبی، سطح مقطع، شعاع هیدرولیکی و شیب در تمام آبگذرها استفاده می‌کند. همچنین، معادلات حاکم بر جریان‌های متغیر تدریجی و غیردائمی در آبگذرها در این مدل، همان معادلات بقای جرم و مومنتوم (معادلات سنت-ونانت) است.

در ادامه، پس از جمع‌آوری داده‌های حاصل از پیمایش در حوضه، ثبت و رقومی کردن این داده‌ها توسط فناوری GIS و همچنین تهیه داده‌های توپوگرافی و کاربری اراضی، داده‌ها برای مدل‌سازی وارد شبیه‌ساز SWMM شده و بر اساس توپوگرافی و شبکه زهکشی حوضه، زیرحوضه‌بندی انجام شده است. برای هر یک از زیرحوضه‌ها نیز مشخصات فیزیوگرافی، نفوذپذیری، کاربری زمین، شبکه زهکشی، وضعیت بارش و خروجی حوضه معرفی شده است.

به منظور اثرگذاری رواناب کل حوضه در شکل‌گیری هیدروگراف سیلاب خروجی، زمان تداوم بارش باید به نحوی در نظر گرفته شود که رواناب دورترین نقطه حوضه بتواند در هیدروگراف سیلاب خروجی مشارکت داشته باشد. قابل ذکر

شبیه‌سازی شده و n تعداد داده‌ها است. معیار R^2 ، ارتباط بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد و هر چه این مقدار به عدد یک نزدیک‌تر باشد ارتباط قوی‌تر و نتایج شبیه‌سازی قابل قبول‌تر است. شاخص RMSE معرف دقت در بسیاری از روش‌های آماری است و هر چه این مقدار کمتر و به صفر نزدیک‌تر باشد، خطا در برآورد مدل کمتر است. همچنین، NSE معیاری برای ارزیابی هیدرولوژیک مدل بوده و دامنه‌ای بین یک و منفی بی‌نهایت دارد. بهترین حالت زمانی است که برابر یک باشد. مقادیر معیارهای ارزیابی برای قسمت واسنجی در جدول ۲ نشان داده شده است.

مشخصات حوضه بر اساس واسنجی انجام شده در شکل ۴ نشان داده شده است. تعیین مقادیر عرض هیدرولیکی حوضه بسیار مشکل بوده و معادلاتی برای تعیین این فاکتور، از جمله روابط ۴ تا ۶ ارائه شده است (۱۰):

$$H.W = K\sqrt{A} \quad 0.2 < K < 5 \quad (۴)$$

$$HW = K \times P \quad 0 < K < 1 \quad (۵)$$

$$HW = \frac{A}{L} \quad (۶)$$

که در این روابط، HW عرض هیدرولیکی حوضه، K ضریبی با دامنه معین، P محیط حوضه، A مساحت حوضه و L طول طولانی‌ترین جریان در حوضه است. در این پژوهش، از رابطه ۴ برای عرض هیدرولیکی استفاده شده است و در نهایت در قسمت واسنجی با تغییر مقادیر K ، عرض هیدرولیکی مناسب به دست آمد. همچنین، در واسنجی حوضه، دیگر مشخصات حوضه از جمله درصد مساحت نفوذپذیر و نفوذناپذیر، ضریب مانینگ، عمق چاله‌های ذخیره‌سازی و ضرایب ثابت تجمع و انتشار آلودگی و .. مورد بررسی قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که درصد مساحت نفوذناپذیر نسبت به دیگر مشخصات متغیر حوضه، از حساسیت بیشتری برخوردار بود.

در ادامه، برای اعتبارسنجی مدل، مشخصات مدل شبیه‌سازی شده، نهایی شده و آماده برای اجرای مدل در رخدادهای ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۸ شد. نتایج معیارهای ارزیابی در اعتبارسنجی مدل در جدول ۳ آمده است.

رواناب همراه با اندازه‌گیری سرعت آب انجام شد، و در هر ۴۰ دقیقه نیز نمونه کیفی رواناب برداشت شده است (شکل ۳-الف). به طور متوسط، در هر رخداد بارندگی، ۲۱ مورد اندازه‌گیری عمق جریان و ۱۲ مورد نمونه کیفی آب حاصل شده است. در نهایت، نمونه‌های برداشت شده برای تعیین فاکتورهای کیفیت سیلاب در آزمایشگاه مورد آزمایش قرار گرفت. در این راستا، به منظور واسنجی مدل بارش-رواناب شبیه‌سازی شده، از داده‌های رخداد ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ و برای اعتبارسنجی نیز از داده‌های رخداد ۱۷ فروردین ۱۳۹۸ استفاده شده است. همچنین، در مقایسه و کنترل داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، فاکتورهای حداکثر دبی جریان خروجی، کل مواد جامد معلق (TSS) و نیتروژن کل (TN) به کار گرفته شده است. برای ثبت داده‌های بارش متناسب با رخدهای بارندگی، دو ایستگاه ثبت بارش در نزدیکی و در قسمت‌های بالایی و پایینی حوضه در نظر گرفته شده است (شکل ۳-ب). مشخصات بارش این رخداد در جدول ۱ نشان داده شده است.

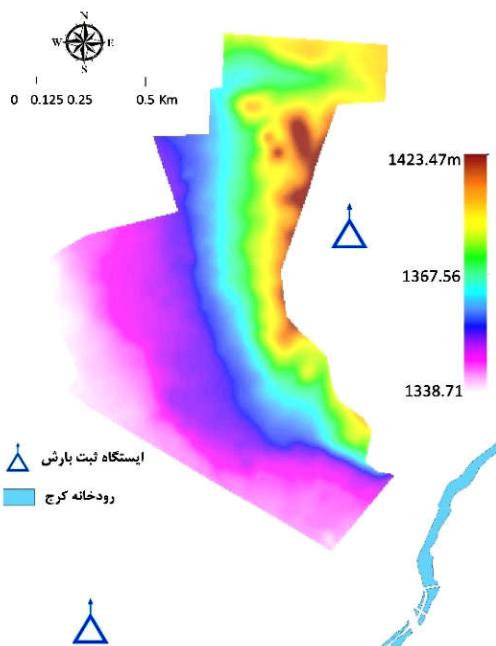
به منظور ارزیابی کارایی مدل شبیه‌سازی در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی از شاخص‌های نش-ساتکلیف، ریشه میانگین مربعات خطا و همچنین ضریب تبیین که به ترتیب در روابط ۱ تا ۳ آورده شده‌اند و از رایج‌ترین معیارها در اغلب مطالعات هیدرولیکی و هیدرولوژی هستند، استفاده شده است:

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ob} - Y_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{ob} - \bar{Y}_{ob})^2} \right) \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{ob} - Y_{sim})^2} \quad (۲)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ob} - \bar{Y}_{ob})(Y_{sim} - \bar{Y}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{ob} - \bar{Y}_{ob})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{sim} - \bar{Y}_{sim})^2}} \right) \quad (۳)$$

در روابط بالا، Y_{ob} داده‌های مشاهداتی، Y_{sim} داده‌های شبیه‌سازی شده، \bar{Y}_{ob} میانگین داده‌های مشاهداتی، \bar{Y}_{sim} میانگین داده‌های



(ب)



(الف)

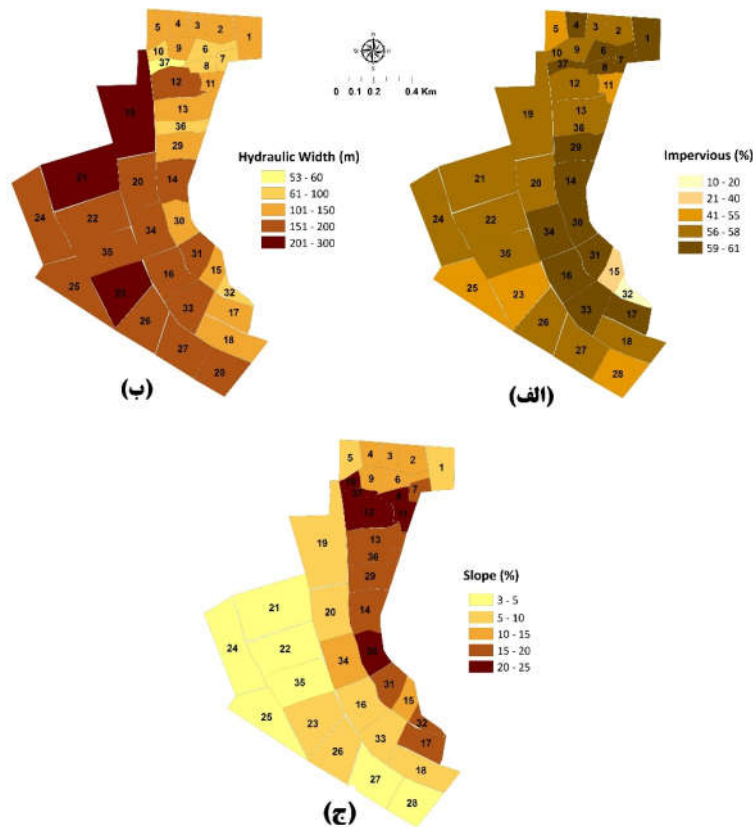
شکل ۳. الف) نمونه برداشت شده حاصل از بارندگی تاریخ ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ و ب) موقعیت ایستگاه‌های ثبت بارش (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۱. مشخصات بارش‌های ثبت شده

رخداد بارش	مقدار بارش (میلی‌متر)	تداوم (ساعت)	متوسط شدت بارش (میلی‌متر بر ساعت)	فاصله از آخرین بارش یا تعداد روزهای خشک (روز)
۱۳۹۷/۱۲/۲۶	۷/۱۵	۳/۱۶	۲/۲۶۲	۲۶
۱۳۹۸/۲/۱۷	۳/۴۱	۲	۱/۷۰۵	۷

جدول ۲. معیارهای آماری ارزیابی کارایی مدل در حالت واسنجی

معیارهای آماری	دبی رواناب خروجی	آلاینده TSS	آلاینده TN
R^2	۰/۷۹۱	۰/۶۱۶	۰/۵۳۱
RMSE	۰/۰۶۲	۰/۱۸۰	۰/۴۴۰
NSE	۰/۶۷۰	۰/۴۸۷	۰/۳۱۲



شکل ۴. مشخصات حوضه مطالعاتی بعد از واسنجی: الف) درصد نفوذ ناپذیری، ب) عرض هیدرولیکی و ج) متوسط شیب (رنگی در نسخه الکترونیکی)

شبیه‌سازی تغییر اقلیم

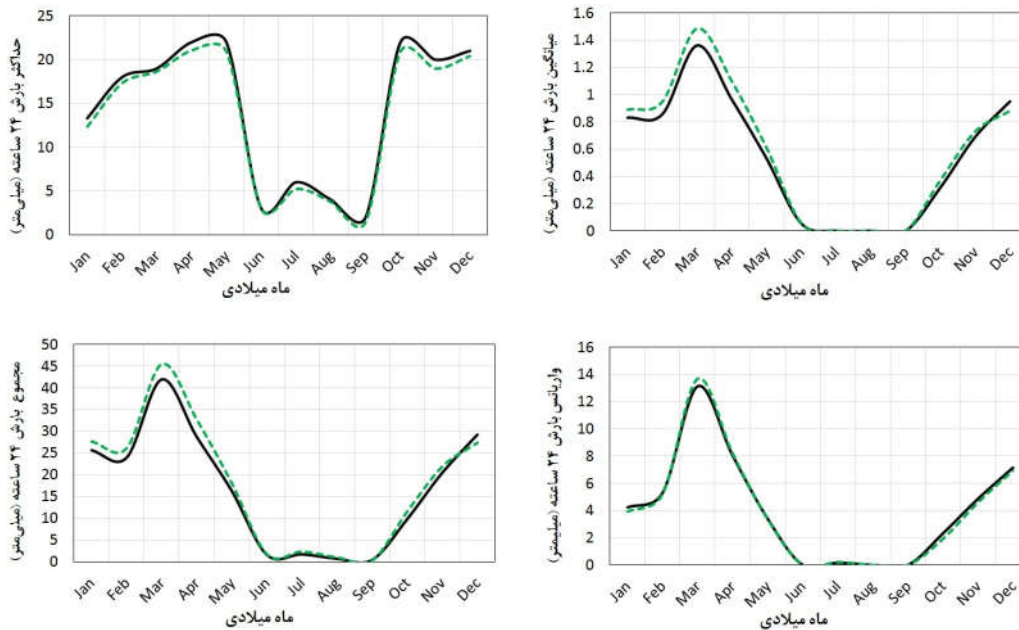
مقایسه بین داده‌های حاصل از خروجی مدل تغییر اقلیم CanESM2 نسبت به داده‌های مشاهداتی پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۵) در شکل ۵ نشان داده شده است. ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی توسط مدل SDSM صورت پذیرفته است. متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بارش با بیشترین همبستگی با داده‌های مشاهداتی در منطقه مطالعاتی توسط مدل SDSM محاسبه شده است. به‌همین منظور، از بین ۲۶ پارامتر بزرگ‌مقیاس و توابع مختلف آنها، چهار پارامتر انتخاب شدند (جدول ۴). بایستی توجه داشت که بارش متغیری است گسسته و تحت تأثیر عوامل مختلفی در حوضه می‌تواند مورد تغییر قرار گیرد. همچنین، حساسیت و تغییرات بیشتری نسبت به متغیر پیوسته‌ای مانند دما نسبت به زمان دارد. برای ارزیابی توانایی مدل CanESM2 در پیش‌بینی مقادیر بارش و مقایسه با

مقادیر مشاهداتی، از معیارهای آماری R^2 ، RMSE و NSE استفاده شده است (جدول ۵). معیار R^2 برای میانگین و حداکثر بارش به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۰/۹۵ محاسبه شده است. مقادیر RMSE برای میانگین بارش برابر با ۰/۱۷ و برای حداکثر بارش برابر با ۲/۷۴ هستند. همچنین، مقادیر شاخص NSE برای میانگین و حداکثر بارش به ترتیب برابر با ۰/۹۷ و ۰/۸۹ است. با توجه به مقادیر معیارهای ارزیابی، مدل تغییر اقلیم CanESM2، عملکرد قابل قبولی را در پیش‌بینی مقادیر بارش از خود نشان داده است.

در گام بعدی، شبیه‌سازی بارش، بر اساس مدل واسنجی شده، در دوره آبی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) انجام گرفت. لازم به ذکر است که در این پژوهش، هدف، بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب

جدول ۳. معیارهای آماری ارزیابی کارایی مدل در حالت اعتبارسنجی

معیارهای آماری	دبی رواناب خروجی	TSS	TN
R ²	۰/۸۳۷	۰/۶۳۹	۰/۶۳۳
RMSE	۰/۰۳۷	۰/۱۶۰	۰/۳۸۰
NSE	۰/۷۷۷	۰/۵۶۲	۰/۳۶۹



شکل ۵. مقایسه داده‌های مشاهداتی و خروجی مدل تغییر اقلیم CanESM2 در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۵) (خط ممتد نشان‌دهنده مقادیر مشاهداتی در دوره پایه و خط چین نشان‌دهنده مقادیر مدل CanESM2 در دوره پایه است).

جدول ۴. پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب در مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی بارش

همبستگی جزئی	پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب
۰/۰۳۳	سرعت نصف‌النهاری سطحی
۰/۰۴۵	سرعت مداری سطحی
۰/۵۲۳	ارتفاع ژئوپتانسیل در ۵۰۰ هکتوپاسکال
۰/۲۲۴	میانگین دما در ارتفاع ۲ متری

جدول ۵. نتایج معیارهای آماری ارزیابی کارایی مدل پیش‌بینی تغییر اقلیم CanESM2 برای بارش (دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۸۵)

مقدار (میانگین بارش)	مقدار (حداکثر بارش)	معیارهای آماری
۰/۹۹	۰/۹۵	R ²
۰/۱۷	۲/۷۴	RMSE
۰/۹۷	۰/۸۹	NSE

الگوی بارش دو ساعته منطقه تهیه شد. به منظور تهیه منحنی شدت-مدت- فراوانی در دوره پایه و آتی، پس از شبیه سازی بارش در دوره زمانی آینده، مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته در هر دو دوره پایه و آتی و برای هر دو سناریو در دوره آتی استخراج شده و مقادیر منحنی شدت-مدت- فراوانی (IDF) طبق روش قهرمان و آبخضر (۵) در تداوم ۶ تا ۳۶۰ دقیقه و دوره های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال تهیه شده است. در شکل ۹-الف، منحنی IDF در دوره پایه و همچنین در شکل ۹-ب، توزیع بارش با استفاده از روش مثلی نشان داده شده است.

بر اساس منحنی IDF تهیه شده مربوط به سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۰)، شدت بارندگی حوضه نسبت به دوره پایه به طور متوسط در تداوم و دوره های بازگشت مختلف به ترتیب ۸ و ۱۰ درصد کاهش داشته است (شکل ۱۰).

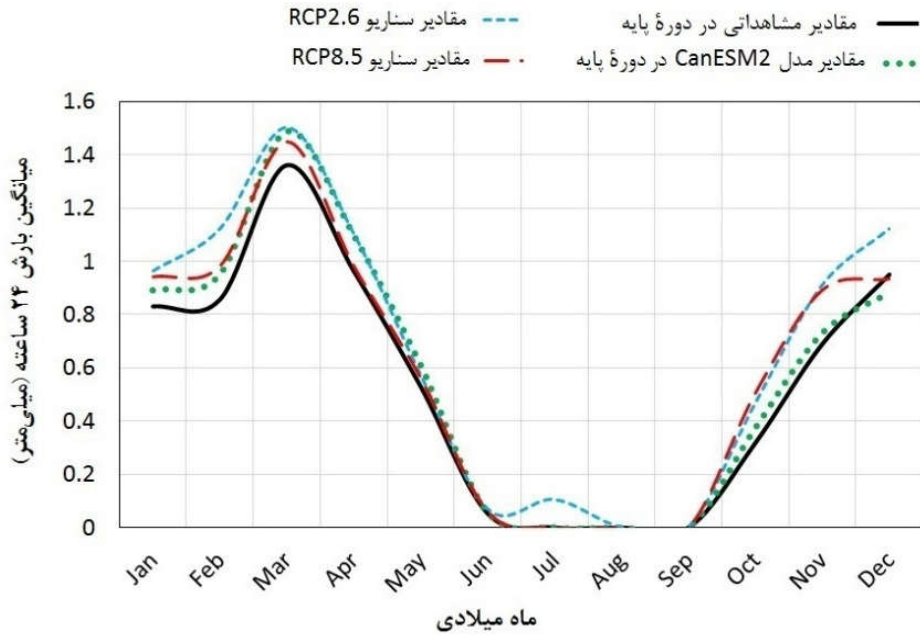
در شکل ۱۱، حوضه مطالعاتی به همراه زیرحوضه ها و شبکه زهکشی اصلی و فرعی نشان داده شده است. حوضه مورد مطالعه بر اساس توپوگرافی منطقه و شبکه زهکشی فرعی و اصلی به ۳۷ زیرحوضه تقسیم شده است. بعد از ورود اطلاعات هیدرولیکی و هیدرولوژیک حوضه، مدل ب استفاده از شبیه ساز بارش و رواناب SWMM مورد تحلیل کمی و کیفی قرار گرفت. همان طور که عنوان شد، نتایج حاصل از تحلیل مدل شامل مقادیر کمی و کیفی است. عمق رواناب و هیدروگراف رواناب خروجی جزء مقادیر کمی و مقدار کل مواد جامد معلق (TSS)، سرب (Pb) و نیتروژن کل (TN) جزء مقادیر کیفی در نظر گرفته شده است. در ادامه، برای مقایسه در دوره پایه و دوره آتی (سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5) از این فاکتورها استفاده شده است. با توجه به شکل ۱۲-الف و پیش بینی کاهش حداکثر بارش ۲۴ ساعته در دوره آتی (شکل ۷)، میانگین دبی رواناب در دوره آتی و در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5، نسبت به دوره پایه به ترتیب با افت ۵/۵ و ۷/۵ درصد همراه بوده است.

حوضه شهری بوده و لذا برای برآورد سیلاب، از حداکثر بارش ۲۴ ساعته استفاده شده است. در این راستا، برای شبیه سازی متغیر بارش حوضه مورد مطالعه در دوره آتی، از سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 استفاده شده است. دلیل انتخاب این دو سناریو، لحاظ شرایط خوش بینانه و بدبینانه در ویژگی آنها است.

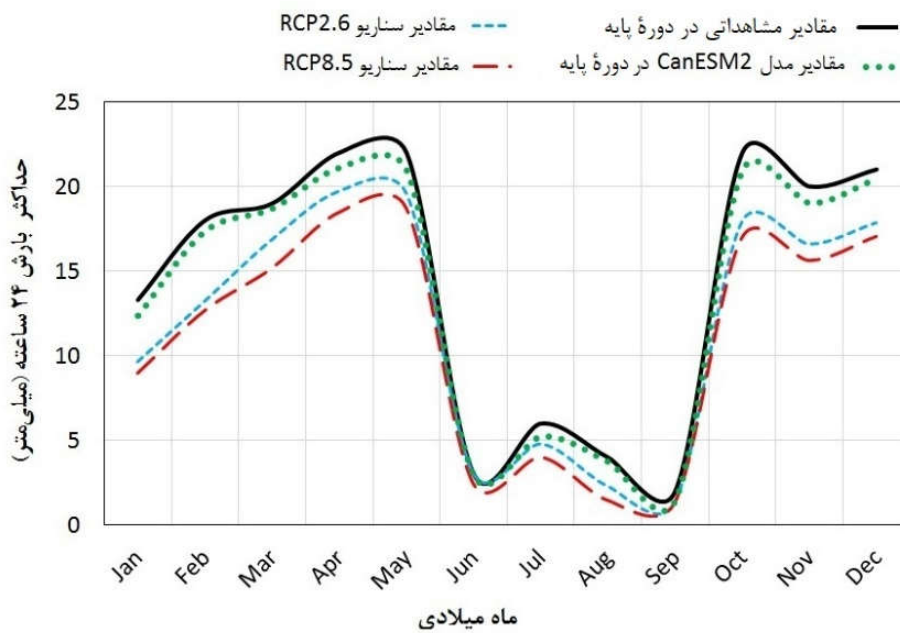
شکل های ۶ و ۷، مقایسه بین مقادیر میانگین و حداکثر بارش روزانه در دوره پایه و سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 را نشان می دهند. همان طور که در شکل ۶ مشخص است، میانگین بارش ها در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) در دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 نه تنها کاهش نداشته، بلکه به ترتیب ۲۱ و ۱۱ درصد افزایش داشته است. همچنین، طبق شکل های ۷ و ۸ از میزان حداکثر بارش ۲۴ ساعته در دو سناریوی مذکور در آینده به ترتیب ۱۷ و ۲۳ درصد کاسته شده و بر همین اساس احتمال کاهش حجم سیلاب در بارش های حدی در حوضه مطالعاتی نیز دور از انتظار نیست.

شبیه سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیک حوضه

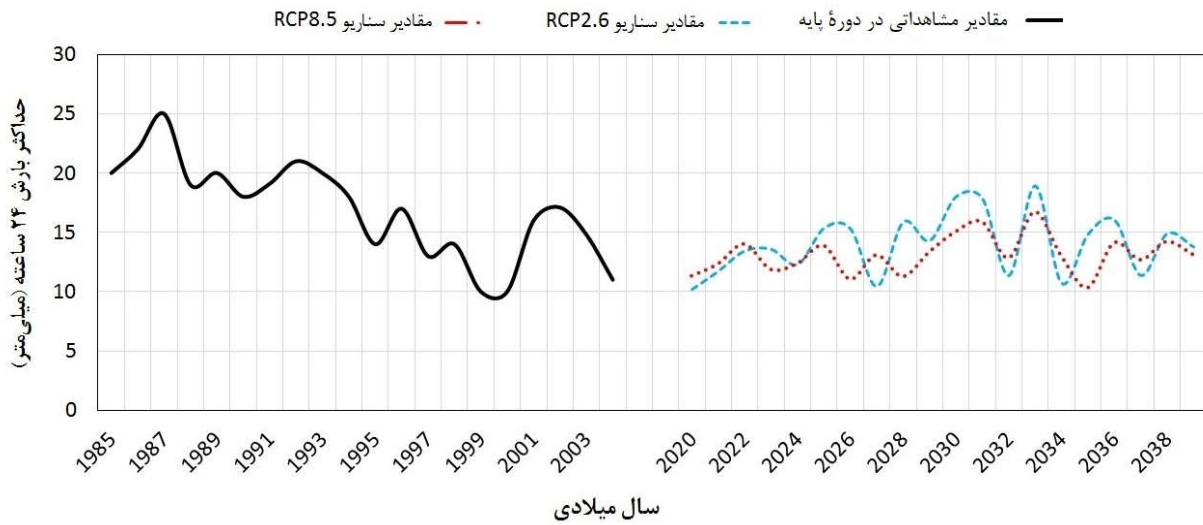
همان طور که در بخش روش تحقیق عنوان شد، برای تعیین ورودی بارش به مدل، از بارش با زمان تداوم دو برابر زمان تمرکز حوضه استفاده شده است. با توجه به زمان تمرکز محاسباتی از روش های SCS و کریچ، این مقدار در حوضه مطالعاتی حاضر بین ۴۶ تا ۶۸ دقیقه محاسبه شد. لذا مشخصات بارش با تداوم ۲ ساعته با دوره بازگشت ۱۰ ساله در نظر گرفته شده است تا دورترین نقطه حوضه نیز بتواند در شکل گیری هیدروگراف سیلاب خروجی از حوضه مشارکت داشته باشد. برای استخراج مقادیر بارندگی با گام زمانی ۵ دقیقه و برای تعیین رگبار طرح، ابتدا مقدار شدت بارش دو ساعته با دوره بازگشت ۱۰ ساله از منحنی شدت-مدت-فراوانی تهیه شده از منطقه در دوره پایه و دوره آتی، قرائت و سپس با استفاده از الگوی توزیع بارش به روش مثلی،



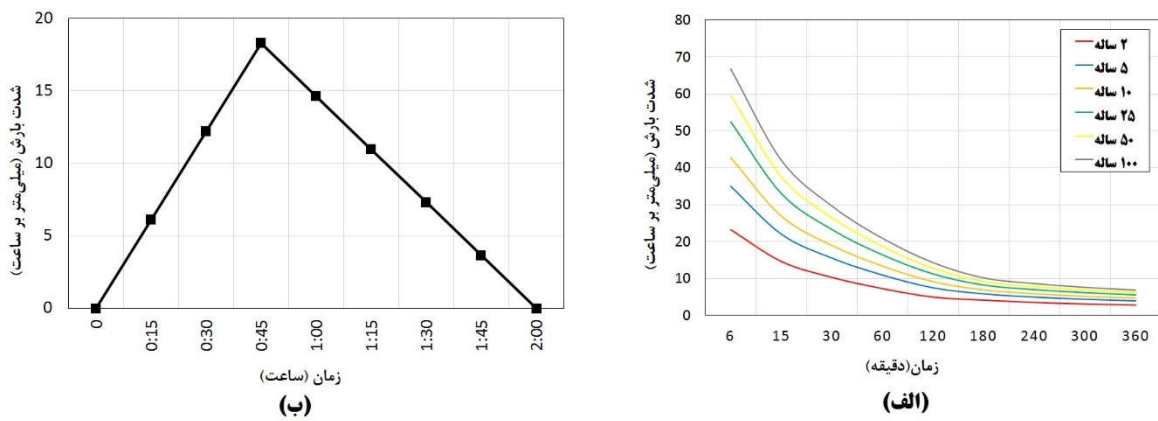
شکل ۶. مقایسه مقادیر میانگین بارش روزانه مشاهداتی و مدل در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۰۵) و سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



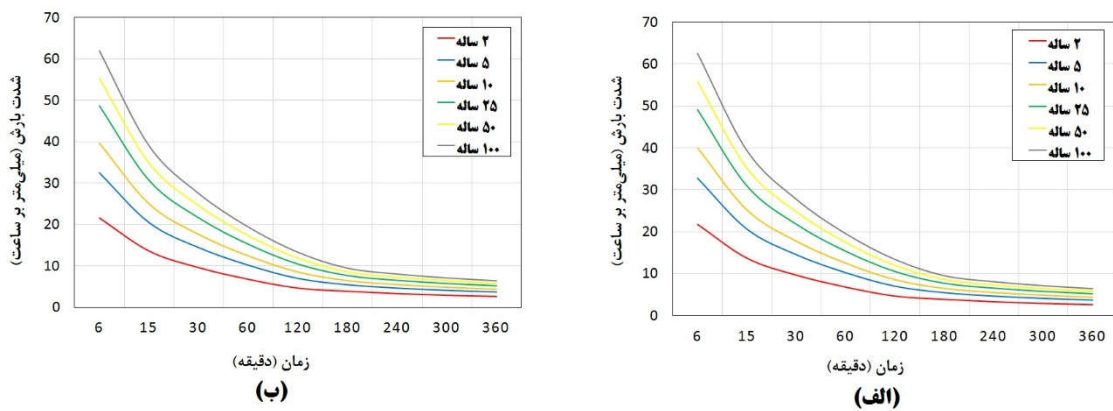
شکل ۷. مقایسه مقادیر حداکثر بارش روزانه مشاهداتی و مدل در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۰۵) و سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



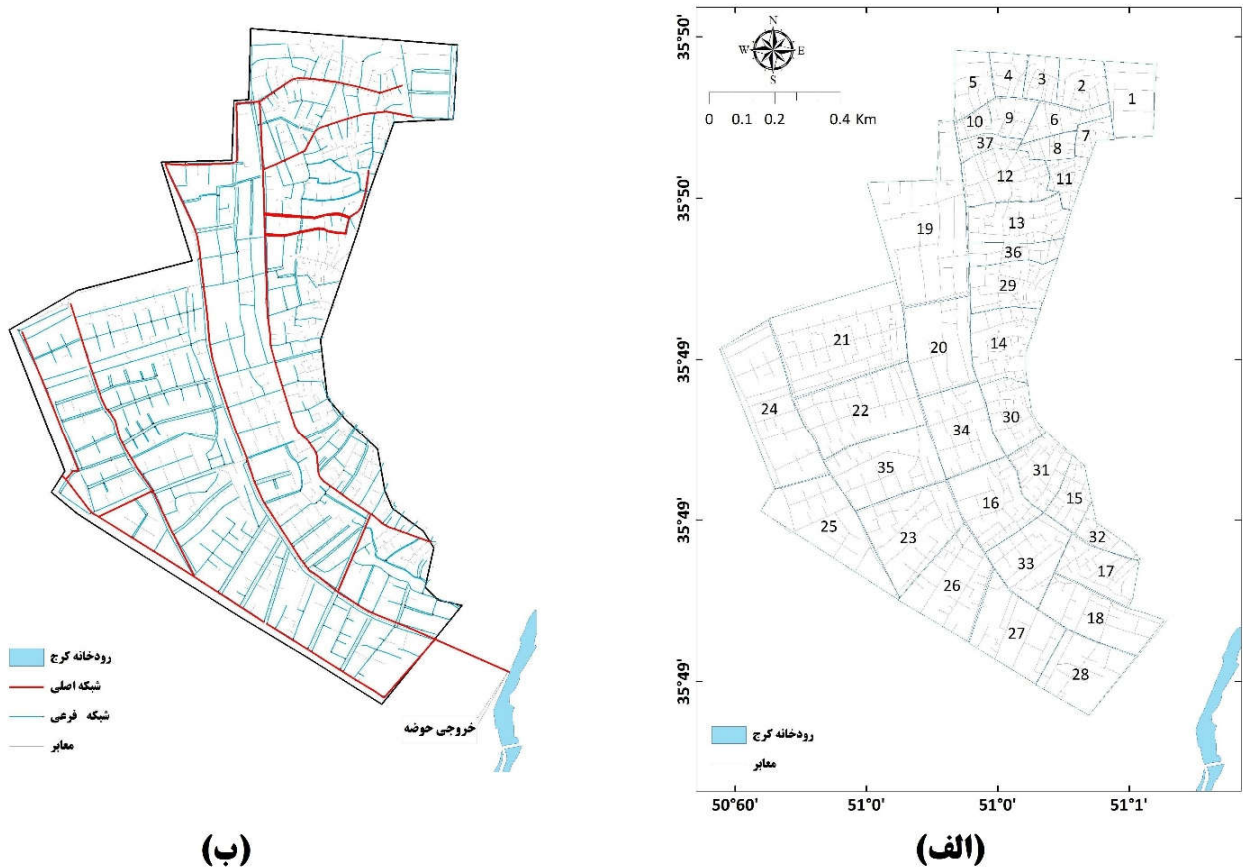
شکل ۸. حداکثر بارش روزانه در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۰۵)، همراه با سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



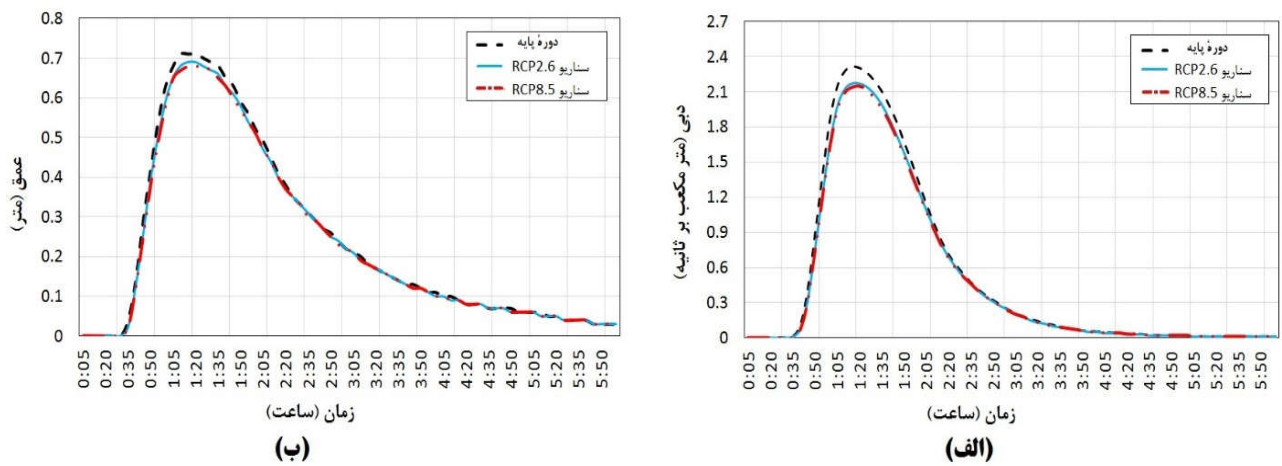
شکل ۹. الف) منحنی شدت-مدت- فراوانی حوضه و ب) توزیع بارش مثلثی در دوره پایه (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۰. الف) منحنی شدت-مدت- فراوانی حوضه در سناریوها: RCP2.6 و ب) RCP8.5 (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۱. الف) حوضه مطالعاتی همراه با زیرحوضه‌ها و ب) شبکه زهکشی اصلی و فرعی و خروجی حوضه (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۲. الف) مدل‌سازی هیدروگراف و ب) عمق رواناب خروجی حوضه در شرایط پایه و سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 (رنگی در نسخه الکترونیکی)

زمان های ابتدایی بارش و قبل از به اوج رسیدن دبی از حوضه خارج شده و همراه با رواناب به رودخانه سرازیر می شوند و در زمان دبی اوج و پس از آن، تغییرات غلظت آلاینده ها تقریباً مقدار و روند ثابتی دارند. لذا، می توان اینگونه بیان کرد که با افزایش مقدار رواناب خروجی، غلظت آلاینده ها در حوضه کاهش پیدا خواهد کرد. با توجه به پولوتوگراف های مربوط به سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5، میانگین غلظت آلاینده ها در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۰) نسبت به مقادیر مشاهداتی در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۵) افزایش داشته است. این افزایش برای آلاینده های TSS، TN و Pb در سناریوی RCP2.6 به ترتیب برابر با ۷/۴۸، ۶/۹۳ و ۷/۳۲ درصد و در سناریوی RCP8.5 به ترتیب برابر با ۹/۲۸، ۸/۴۸ و ۸/۹۱ درصد است.

در مطالعه علمداری و همکاران (۱)، تأثیر تغییر اقلیم بر مقادیر کمی و کیفی سیلاب نشان از کاهش حجم آبگرفتگی سیلاب در حوضه و افزایش غلظت آلاینده های TSS، TN و Pb در حوضه داشته که تأییدی بر نتایج تحقیق حاضر است.

با توجه به نتایج حاصل از پیش بینی متغیر بارش با به کارگیری مدل تغییر اقلیم CanESM2، تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و مقایسه آنها با دوره مشاهداتی پایه، و همچنین مدل سازی بارش و رواناب حوضه، خلاصه تغییرات بارش و همچنین تغییرات کمی و کیفی سیلاب در حوضه مورد مطالعه در جدول ۶ نشان داده شده است. از مقادیر جدول ۶ می توان چنین استنباط کرد که حوضه مورد مطالعه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۰ با کاهش بارش های حدی، افزایش بارش میانگین و همچنین کاهش کمیت سیلاب (عمق و دبی) و افزایش غلظت آلاینده ها در خروجی روبه رو خواهد شد.

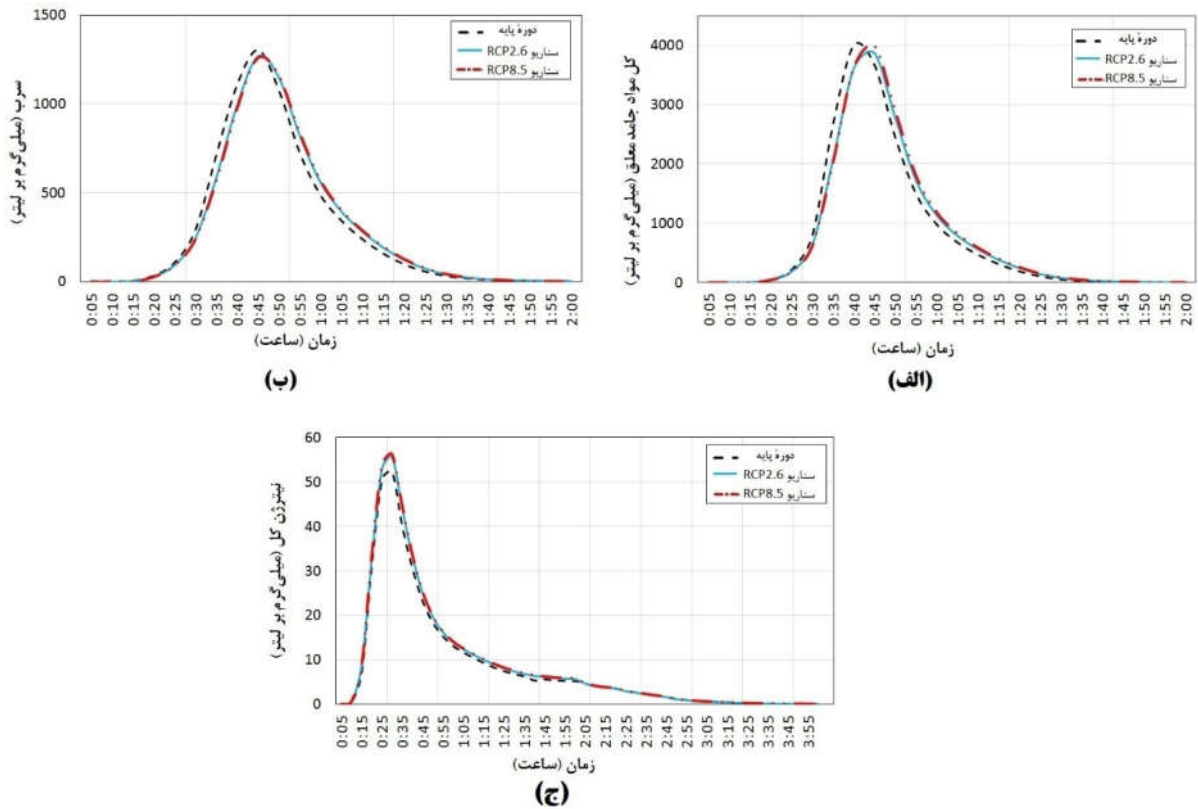
نتایج مطالعه ژو و همکاران (۱۶) در مورد اثرگذاری تغییر اقلیم و توسعه شهری بر میزان رواناب، تحقیق بدیعی زاده و همکاران (۲) در مورد امکان کاربرد مدل SWMM در شبیه سازی رواناب شهری و پژوهش جئون و همکاران (۹) در مورد افزایش غلظت آلاینده ها در اثر تغییر اقلیم در دوره های آتی با نتایج تحقیق حاضر هم خوانی دارد.

لذا با کاهش میزان دبی خروجی در نتیجه کاهش بارش، غلظت آلاینده ها تجمیع شده در سطح حوضه که توسط رواناب حمل می شود، در خروجی حوضه با افزایش روبه رو می شود. با توجه به هیدروگراف سیلاب، نقطه اوج هیدروگراف به طور تقریبی یک ساعت و بیست دقیقه پس از شروع بارش تشکیل شده است. همچنین، بر اساس روند این هیدروگراف و زمان تمرکز حوضه (۴۶ تا ۶۸ دقیقه) انتظار می رود که در ساعت های ابتدایی بارش و قبل از رسیدن به دبی اوج، غلظت آلاینده ها به بیشترین مقدار خود برسد و پس از آن کاهش یابد.

در دوره آتی، با توجه به کاهش حداکثر بارش ۲۴ ساعته، حجم رواناب به نسبت دوره پایه در حوضه کاهش می یابد و از طرفی، سامانه زهکشی با فشار کمتری نسبت به انتقال رواناب روبه رو خواهد شد. با بررسی مدل شبیه سازی شده، میزان حجم آبگرفتگی در سطح حوضه در دوره آتی و در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۱۳ و ۱۵/۳ درصد، و حجم سیلاب خروجی از حوضه ۶/۱۹ و ۷/۴ درصد، نسبت به دوره پایه، کاهش دارد.

شکل های ۱۳- الف، ۱۳- ب و ۱۳- ج، پولوتوگراف های حاصل از شبیه سازی کیفیت خروجی رواناب حوضه شامل سه آلاینده کل مواد جامد معلق (TSS)، سرب (Pb) و نیتروژن کل (TN)، با استفاده از SWMM را نشان می دهند. لازم به ذکر است که آلاینده سرب (Pb)، در بخش واسنجی مدل، به علت عدم امکان اندازه گیری سرب در نمونه ها توسط آزمایشگاه، مورد واسنجی قرار نگرفت. لذا در این تحقیق مقادیر سرب بر اساس خروجی مدل واسنجی شده است.

بر اساس شکل ۱۳، اغلب تغییرات پولوتوگراف هر سه آلاینده، تا قبل از رسیدن دبی رواناب به زمان دبی اوج هیدروگراف بوده (به طور تقریبی در زمان ۱:۲۰ پس از شروع بارندگی، شکل ۱۲- الف) و پس از این زمان تغییرات چندانی در پولوتوگراف ها مشاهده نشده و این رویه به خصوص در آلاینده TN مشهودتر است. به عبارت دیگر، بیشتر آلودگی های حوضه در همان



شکل ۱۳. نتایج مدل‌سازی کیفیت رواناب خروجی حوضه در شبیه‌ساز SWMM شامل منحنی آلاینده‌های: الف) TSS، ب) Pb و ج) TN (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۶. درصد تغییرات بارش و همچنین تغییرات کمی و کیفی سیلاب

درصد افزایش (مثبت) یا کاهش (منفی) نسبت به مقادیر مشاهداتی دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۵)

متغیر	سناریوی RCP2.6 در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰	سناریوی RCP8.5 در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰
میانگین بارش ۲۴ ساعته	+۲۱	+۱۱
حداکثر بارش ۲۴ ساعته	-۱۷	-۲۳
متوسط مقادیر IDF بارش	-۸	-۱۰
میانگین دبی سیلاب خروجی	-۵/۸۰	-۷/۱۰
حجم آبگرفتگی در حوضه	-۱۳/۰۰	-۱۵/۲۸
حجم کل سیلاب خروجی	-۶/۱۹	-۷/۴۴
میانگین غلظت TSS خروجی	۷/۴۸	۹/۲۴
میانگین غلظت TN خروجی	۶/۹۳	۸/۴۸
میانگین غلظت Pb خروجی	۷/۳۲	۸/۹۱

نتیجه گیری

شبیه‌سازی شده و مشاهداتی مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت و پس از این مرحله و کامل شدن مدل با ورودی‌های واسنجی شده، شبیه‌سازی کمی و کیفی رواناب خروجی برای سه حالت مذکور انجام شد. با توجه به پیش‌بینی کاهش حداکثر بارش ۲۴ ساعته در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5، نتایج کمی به دست آمده از شبیه‌سازی بارش و رواناب نشان از کاهش به ترتیب ۵/۵ و ۷/۵ درصد دبی رواناب نسبت به دوره پایه در خروجی حوضه دارد. حجم آبگرفتگی نیز در این دو سناریو به ترتیب ۱۳ و ۱۵/۲۸ درصد نسبت به دوره پایه کاهش دارد. همچنین، از لحاظ کیفیت رواناب که شامل مقدار کل مواد جامد معلق، مقدار نیتروژن کل و میزان سرب خروجی از حوضه است، با توجه به کاهش حجم رواناب در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5، نتایج حاکی از افزایش غلظت کل مواد جامد معلق به ترتیب به میزان ۶/۹۳ و ۸/۴۸ درصد و افزایش غلظت نیتروژن کل به ترتیب به میزان ۷/۳۲ و ۸/۹۱ درصد نسبت به دوره پایه است.

در تحقیق حاضر، پس از جمع‌آوری داده‌های اقلیمی دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۵)، پیش‌بینی تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 برای دوره آتی (۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰) در یک حوضه آبریز در شهر کرج بررسی و تحلیل شد. نتایج این بخش از پژوهش نشان از کاهش به ترتیب ۱۷ و ۲۳ درصدی حداکثر بارش ۲۴ ساعته (روزانه) و افزایش به ترتیب ۲۱ و ۱۱ درصدی بارش میانگین ۲۴ ساعته در دوره آتی نسبت به دوره پایه دارد. همچنین، تغییرات عنوان شده در دوره آتی در سناریوی RCP8.5 نسبت به سناریوی RCP2.6 محسوس‌تر است. برای شبیه‌سازی بارش و رواناب، منحنی شدت-مدت-فراوانی با تدام بارش دو ساعته و دوره بازگشت ۱۰ ساله، برای سه حالت دوره پایه و سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 (دوره آتی) تهیه شد. برای رسیدن به دقت بیشتر، حوضه مطالعاتی به ۳۷ زیرحوضه تقسیم‌بندی شده و به شبیه‌ساز بارش و رواناب SWMM معرفی شد. سپس، برای عملکرد مناسب مدل بارش-رواناب، مدل بر اساس داده‌های

منابع مورد استفاده

- Alamdari, N., D. J. Sample, P. Steinberg, A. C. Ross and Z. M. Easton. 2017. Assessing the effects of climate change on water quantity and quality in an urban watershed using a calibrated storm-water model. *Journal of Water* 9(7): 463-478. Doi: 10.3390/w9070464.
- Badieizadeh, S., A. Bahreman and A. A. Dehghani. 2016. Urban flood management by simulation of surface runoff using SWMM model in Gorgan city, Golestan province. *Water and Soil Conservation* 22(4): 155-170. (In Farsi).
- Chen, P. Y., C. P. Tung and Y. H. Li. 2017. Low impact development planning and adaptation decision-making under climate change for a community against pluvial flooding. *Water* 9: 756. Doi: 10.3390.9100756.
- Dolabian, Sh. 2017. Evaluation of the effect of climate change on rainfall and temperature in different regions of Iran based on RCP scenarios. Master thesis, University of Shahroud, Shahroud, I. R. Iran.
- Ghahraman, B. and H. Abkhezr. 2004. Improvement in intensity-duration-frequency relationships of rainfall in Iran. *Journal of Water and Soil Science* 8(2): 1-14. (In Farsi).
- Hua, P., W. Yang, X. Qi, S. Jiang, J. Xie, X. Gu, H. Li, J. Zhang and P. Krebs. 2020. Evaluating the effect of urban flooding reduction strategies in response to design rainfall and low impact development. *Journal of Cleaner Production* 242. Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118515.
- Imani Amirabad, S., M. Delavar and M. H. Niksokhan. 2017. Simulation and assessment of management practices for reduction of nutrients discharge to Zaribar Lake using SWAT model. *Iran- Water Resources Research* 13(1): 69-87. (In Farsi).
- ITRO. 2016. Information Technology and Relationships Organization of Karaj Municipality. (In Farsi).
- Jeon, D. J., S. J. Ki, Y. Cha, Y. Park and J. H. Kim. 2018. New methodology of evaluation of best management practices performances for an agricultural watershed according to the climate change scenarios: A hybrid uses of deterministic and decision support models. *Ecological Engineering* 119: 73-83.

10. Noori, H., S. Farzin and H. Karami. 2018. Developing the performance of modern methods using multi-objective optimization in urban runoff control. *Iran- Water Resources Research* 14(3): 45-58. (In Farsi).
11. Shamshirsaz, Sh. A. 2014. Climate change effects on quality of urban runoff, case study: Zargandeh channel. Master Thesis, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Farsi).
12. Taheri Behbahani, M. T. and M. Bozorgzadeh. 1996. Urban Floods. Publication of the Iranian Center for Urban and Architectural Studies and Research, Edition 1, Scientific and Cultural Publisher Inc. (in Farsi).
13. Vo, D. P., M. A. Bhuiyan and N. D. Vo. 2020. Climate change impact on urban flooding in Quynhon City, Vietnam. *Innovation for Sustainable Infrastructure, Lecture Notes in Civil Engineering* 54. Doi:10.1007/978-981-15-0802-8-164.
14. Yousefi, H., L. Amini, L. Ghasemi and N. Amrai. 2018. Evaluation of the efficiency of statistical downscaling model (SDSM) in simulation and forecast of climatic parameters (Case study: Karaj synoptic station). *Iranian Journal of Ecohydrology* 5(3): 957-968. (In Farsi).
15. Zahmatkesh, Z., E. Burian, M. Karamouz, H. Tavakol-Davani and E. Goharian. 2015. Low-impact development practices to mitigate climate change effects on urban stormwater runoff: Case study of New York city. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 141. Doi: 10.1061/ (ASCE) IR.1943-4774.0000770.
16. Zhou, Q., G. Leng, J. Su and Y. Ren. 2019. Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: Importance of urban planning and drainage adaptation. *Science of the Total Environment* 658: 24-33.

Effects of Climate Change on Quantity and Quality of Urban Runoff in a Part of Karaj Watershed Based on RCP Scenarios

H. Noori Khaje Balagh and S. F. Mousavi^{1*}

(Received: March 16-2020; Accepted: December 1-2020)

Abstract

In the present study, CanESM2 climate change model and stormwater management model (SWMM) were employed to investigate the climate change effects on the quantity and quality of urban runoff in a part of Karaj watershed, Alborz Province. The base period (1985-2005) and future period (2020-2040) are considered for this purpose. Based on the existing main and lateral drainage system and to be more accurate, the watershed was divided into 37 sub-watersheds by ArcGIS software. To simulate rainfall-runoff, the intensity-duration-frequency (IDF) curve has been prepared for a 2-hour duration and 10-year return period, for the base period and RCP2.6 and RCP8.5 climate change scenarios based on the obtained precipitation data from Karaj synoptic station. Results showed that mean 24-hour precipitation values in RCP2.6 and RCP8.5 scenarios will increase by 21% and 11%, respectively, and maximum 24-hour precipitation values will decrease by 17% and 23%, respectively, as compared to the observed values in the base period. Also, based on the results of quantitative and qualitative runoff modeling in the study watershed, and according to the outflow hydrograph in the RCP2.6 and RCP8.5 scenarios, the outlet runoff discharge will decrease by 5.8% and 7.1%, respectively. Also, the flooded areas in the watershed will decrease by 13% and 15.28%, respectively. The concentration of pollutants in the RCP2.6 and RCP8.5 scenarios, compared to the base period, including total suspended solids (TSS), will increase by 7.48% and 9.24%, total nitrogen (TN) will increase by 6.93% and 8.48%, and lead (Pb) will increase by 7.32% and 8.91%, respectively.

Keywords: Climate change, Rainfall simulation, Quality of urban runoff, Pollutants' concentration

1- Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

*: Corresponding author, Email: fmousavi@semnan.ac.ir