

مطالعه رژیم بارش و دبی حداکثر رواناب شهری در شرایط اقلیمی آینده (مطالعه موردی: حوضه سیل‌برگردان غرب)

نگین بینش، محمدحسین نیک سخن*، امین سارنگ

دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۳ خرداد ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۰ تیر ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۸ مرداد ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۱ مرداد ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

بارش حدی
دوره بازگشت
سیل شهری
تغییر اقلیم
بارش

چکیده: از جمله اثرات پدیده تغییر اقلیم، تغییر در رژیم هیدرولوژی و افزایش احتمال مواجهه با رخداد های حداکثر می باشد. مقاله حاضر به بررسی رژیم (شدت و فراوانی) بارش و رواناب حداکثری تحت اثر تغییر اقلیم در حوضه سیل‌برگردان غرب تهران می پردازد و تغییرات رخ داده در دوره بازگشت های بارش و رواناب حدی حوضه را در دوره آینده (۲۰۸۰ تا ۲۰۹۰) با دوره پایه (۱۹۹۹ تا ۲۰۰۰) مقایسه می کند. بدین منظور خروجی مدل اقلیمی MRI-CGCM2.3.2a تحت سناریوی انتشار A1B به صورت نقطه ای (در مقیاس ایستگاهی) برداشت گردید و از روش عامل تغییر نیز جهت ریزمقیاس سازی و تولید سری زمانی بارش روزانه حوضه استفاده شد. سپس با استخراج داده های حداکثر بارش روزانه، مقدار بارش یک ساعته حوضه با دوره بازگشت ۱۰ سال محاسبه و از آنجا منحنی شدت-مدت-فراوانی بارش حوضه برای دوره پایه و نیز دوره آتی مورد بررسی حاصل گردید. در مرحله بعد مقادیر روزانه بارش به مدل بارش-رواناب SWMM وارد و سری زمانی روزانه رواناب خروجی از حوضه تولید شد. در انتها با استخراج توابع چگالی احتمال دبی حداکثر، به تحلیل تغییرات رژیم رواناب حوضه در دوره آتی نسبت به دوره پایه پرداخته شد. نتایج نشان می دهد که شدت بارش های حدی در دوره زمانی آینده نسبت به دوره پایه اندکی کاهش می یابد. به علاوه نتایج نشان از افزایش دبی رواناب حوضه در افق ۲۰۹۰ نسبت به دوره پایه دارد. با حرکت به سمت آینده، با افزایش فراوانی و احتمال رخداد یک مقدار مشخص از دبی رواناب در حوضه مواجه هستیم و برای یک دوره بازگشت مشخص نیز شدت جریان سیل شهری افزایش پیدا می کند. بنابراین به کارگیری اقداماتی جهت تطبیق با اثرات پدیده تغییر اقلیم در این حوضه ضروری به نظر می رسد.

جو (AOGCM)^۲ می باشد [۴ و ۵].

در سال های اخیر تحقیقات بسیاری در رابطه با اثرات پدیده تغییر اقلیم بر رخداد های حدی در حوضه های آبریز در سرتاسر جهان انجام گرفته است. پیلینگ و جونز^۲ [۶] به پیش بینی اثرات تغییر اقلیم آتی بر جریان های حدی در بالادست حوضه وای^۴ اقدام نمودند. نتایج این مطالعه نشان از افزایش قابل توجه در فراوانی جریان های کم^۵ و زیاد^۵ حوضه تا انتهای قرن حاضر داشت. حجازی و موگن^۷ [۷] اثرات اقلیم و تغییر کاربری زمین را بر رواناب در شش حوضه واقع در منطقه "مری لند پیپدمونت" در آمریکا مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که تغییرات بارش نسبت به توسعه شهری تأثیر بیشتری بر جریان های کم دارد، اما برای جریان های زیاد، توسعه شهری عامل مؤثرتری است. حسین پور [۸] اثر تغییر اقلیم را بر هیدرولیک سیلاب شهری با استفاده از مدل اقلیمی HadCM3 و تحت دو سناریوی انتشار

۱- مقدمه

مدارک و شواهد موجود نشان می دهد که در دهه های اخیر، چرخه جهانی هیدرولوژیکی نسبت به گرمایش جهانی- و به تبع آن تغییر در الگوی بارش- واکنش نشان داده است [۱]. همچنین بر اساس گزارش هیأت بین الدول تغییر اقلیم (IPCC)^۱ [۲] تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژی طی چند دهه اخیر در سطح جهان سبب افزایش احتمال وقوع رخداد های حداکثری مانند سیلاب گردیده است. سیلاب از جمله مهم ترین سوانح طبیعی است که می تواند سبب خسارات جانی و مالی قابل ملاحظه ای گردد. تغییر اقلیم با تأثیر بر فراوانی و بزرگای سیلاب در سیستم های هیدرولوژیکی محلی و منطقه ای، اثر قابل ملاحظه ای بر برنامه ریزی متوسط تا بلندمدت در رابطه با پیشگیری از خسارات سیل دارد. از طریق شبیه سازی بارش دوره آتی و تعیین رواناب حاصله از آن، می توان برآوردی از احتمال وقوع سیلاب در منطقه مورد مطالعه داشت [۳]. معتبرترین و رایج ترین روش ها در تولید سناریوهای اقلیمی برای دوره های زمانی آینده، استفاده از مدل های جفت شده اقیانوس-

2 Atmosphere-Ocean General Circulation Models

3 Pilling and Jones

4 Wye

5 low flow

6 high flow

7 Hejazi and Moglen

*نویسنده عهده دار مکاتبات: niksokhan@ut.ac.ir

1 Intergovernmental Panel on Climate Change

بر جریان‌های حدی رودخانه برآورد گردید و اثر فراوانی رخداد وقایع حدی هیدرولوژیکی در هشت حوضه دوقلو^۱ در لهستان و نروژ برای دو دوره زمانی آینده نزدیک و دور مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان از افزایش در میزان بارش و دما در این حوضه‌ها در دوره‌های زمانی مورد بررسی داشت. بر این اساس، محققین مذکور نتیجه گرفتند که رخدادهای حدی هیدرولوژیکی حوضه نیز در آینده دستخوش تغییراتی خواهد شد.

از مرور سابقه تحقیقات صورت گرفته چنین برمی‌آید که تمرکز بیشتر مطالعات پیشین بر ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر جریان‌های حدی در کل حوضه رودخانه یا بخش برون شهری آن بوده و بخش شهری- که مشخصه مهم آن دارا بودن سیستم زهکشی رواناب است- مورد تأکید کمتری بوده است. این در حالی است که درک اثرات تغییر اقلیم بر جریان‌های حدی در مناطق شهری در ساماندهی شبکه زهکشی شهری و تطبیق آن با شرایط تغییر اقلیم آینده اهمیت بسیاری دارد. شبکه زهکشی رواناب در شهرها یک زیرساخت کلیدی در پیشگیری از وقوع سیلاب شهری به شمار می‌رود و با توجه به آثار زیان‌بار رخداد سوانحی چون سیلاب در محیط شهری، انجام پژوهش در زمینه چگونگی عملکرد و کارایی سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. بنابراین در تحقیق حاضر تلاش گردیده تا تأثیر تغییر اقلیم آتی بر شدت و فراوانی بارش و سیلاب حوضه سیل‌برگردان غرب تهران در افق زمانی آینده دور (۲۰۸۰ تا ۲۰۹۰) تحت سناریوی AIB از مجموعه سناریوهای انتشار هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) مورد بررسی قرار گیرد. لازم به ذکر است که مقاله حاضر تنها اثر تغییر اقلیم را در پیش‌بینی رواناب حداکثر حوضه در نظر می‌گیرد و اثر تغییر کاربری زمین و توسعه شهری لحاظ نگردیده است. همچنین در این تحقیق، ریزمقیاس‌سازی به روش عامل تغییر صورت گرفته که این روش، داده‌های آتی بارش را با مقیاس مستقیم نسبت به داده‌های مشاهداتی دوره پایه (در راستای خروجی مدل اقلیمی) برآورد می‌کند و سبب می‌شود که توالی زمانی روزهای خشک و تر و فراوانی وقایع در پیش‌بینی آینده نسبت به دوره پایه ثابت باقی بماند. با این حال، این روش به دلیل سرعت و سادگی کاربرد، در تحقیقات بسیاری در سراسر جهان استفاده می‌شود و با تقریب خوبی برای هدف مورد نظر در این مقاله مناسب بوده و دید قابل قبولی را در پیش‌بینی‌های آتی بارش حوضه به دست می‌دهد. در ادامه پس از معرفی محدوده مطالعاتی، مواد و روش‌های مورد استفاده در این مطالعه شرح داده شده و سپس به بحث در رابطه با یافته‌های تحقیق و نتیجه‌گیری می‌پردازیم.

۲- معرفی محدوده مورد بررسی

محدوده مورد بررسی در این تحقیق، حوضه سیل‌برگردان غرب است که در جنوب رشته‌کوه‌های البرز واقع شده و شامل حوضه‌های درون‌شهری و کوهستانی می‌باشد و محدوده شهری آن بخش قابل توجهی از شهر تهران را در بر می‌گیرد. این حوضه که خود از سه زیرحوضه درکه، فرحزاد، و

A2 و B2 در بخش شمال شرقی تهران بررسی نمود و نتیجه گرفت که با زیاد شدن روند کلی میزان بارش‌های حدی در افق ۲۰۹۷، حجم سیل در منطقه افزایش خواهد یافت. آشفته و مساح‌بوانی [۹] تأثیر پدیده تغییر اقلیم را بر شدت و فراوانی دبی‌های حداکثر سالانه حوضه آیدوغموش در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ بررسی نموده و از مدل IHACRES برای شبیه‌سازی رواناب حوضه استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که شدت دبی‌ها برای دوره بازگشت‌های تا ۵۰ سال تفاوت چندانی نداشته، اما پس از آن با افزایش دوره بازگشت شدت دبی در دوره آتی افزایش می‌یابد. این محققین همچنین نتیجه گرفتند که احتمال وقوع دبی‌های حداکثر با مقدار معین در دوره آینده نسبت به دوره پایه کمتر می‌باشد. بگوئیس و همکاران^۱ [۱۰] اثرات تغییر اقلیم را بر جریان‌های حدی در دو حوضه در بلژیک بررسی نموده و نتیجه گرفتند که فراوانی جریان‌های کم می‌تواند بسته به سناریوی تغییر اقلیم، کاهش یا افزایش یابد. کوئینتانا و همکاران^۲ [۱۱] مطالعه‌ای در رابطه با پیش‌بینی وضعیت منابع آب حوضه شمال مدیترانه در دوره زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۱۰۰ انجام دادند. نتایج این بررسی در مجموع نشان داد که بارش فصل تابستان در دهه‌های آتی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و به تبع آن کاهش دبی در رودخانه‌های منطقه مورد مطالعه رخ می‌دهد، در حالیکه در فصول زمستان و بهار، با افزایش بارش و به تبع آن افزایش دبی رودخانه‌ها مواجه هستیم. تایه و همکاران^۳ [۱۲] جریان‌های متوسط و حداکثر را در دو زیرحوضه از رود نیل شبیه‌سازی نموده و دریافتند که در یکی از این دو زیرحوضه (حوضه رود نیاندو^۴) دبی اوج با زمان افزایش می‌یابد، در حالیکه جریان‌های کم می‌تواند با افزایش یا کاهش همراه باشد. اما برای زیرحوضه دیگر (حوضه دریاچه تانا^۵) نتیجه گرفتند که روند جریان‌های کم و دبی‌های اوج قابل تشخیص نیست. شمشیرساز [۱۳] به بررسی کمی و کیفی رواناب در حوضه زرگنده که در منطقه ۳ شهرداری تهران و در پایین‌دست رودخانه‌های دربند، درکه و گلابدره واقع است، پرداخت. وی از مدل اقلیمی MIROC3 و سناریوی انتشار AIB برای پیش‌بینی بارش آتی حوضه (دوره ۲۰۸۰ تا ۲۰۹۹) استفاده نمود. نتایج این تحقیق بیانگر افزایش دبی پیک رواناب به میزان ۲۰ درصد در دوره آتی می‌باشد. کارا و یوسل^۶ [۱۴] اثر تغییر اقلیم را بر جریان‌های متوسط و حداکثر در حوضه‌ای واقع در استانبول (ترکیه) تحت شرایط اقلیمی حال و آینده بررسی نمودند. نتایج نشان داد که بزرگای جریان برای دوره‌بازگشت‌های ۱ و ۵ سال در آینده افزایش می‌یابد. آنها همچنین دریافتند که تغییر در جریان‌های حدی از دوره پایه تا دوره‌آتی در زمستان و بهار افزایش یافته و در تابستان و پاییز با کاهش همراه است. در مطالعه انجام شده توسط رومانوویچ و همکاران^۷ [۱۵] تأثیر تغییر اقلیم

1 Baguis et al.

2 Quintana et al.

3 Taye et al.

4 Nyando

5 Lake Tana

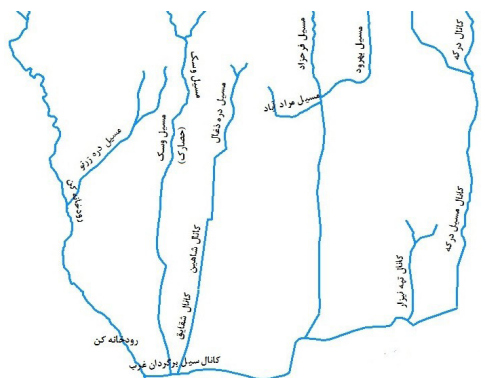
6 Kara and Yucel

7 Romanowicz et al

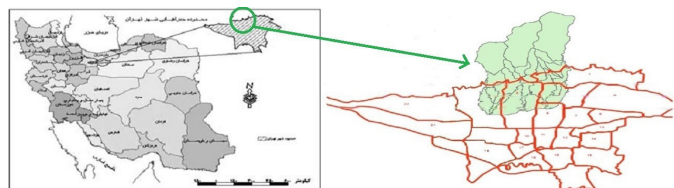
نهایتاً این کانال پس از عبور از ضلع جنوبی پارک ارم به رودخانه کن می‌ریزد. سطح مقطع کانال در طول مسیر از ۲۱ تا ۵۰ مترمربع متغیر می‌باشد [۱۶]. شکل ۱ موقعیت حوزه سیل‌برگردان غرب را در شهر تهران و کشور ایران، و شکل ۲ نمای شماتیکی از کانال‌های حوزه را نشان می‌دهد.

۳- مواد و روش‌ها

مراحل انجام این پژوهش در شکل ۳ ارائه شده است.



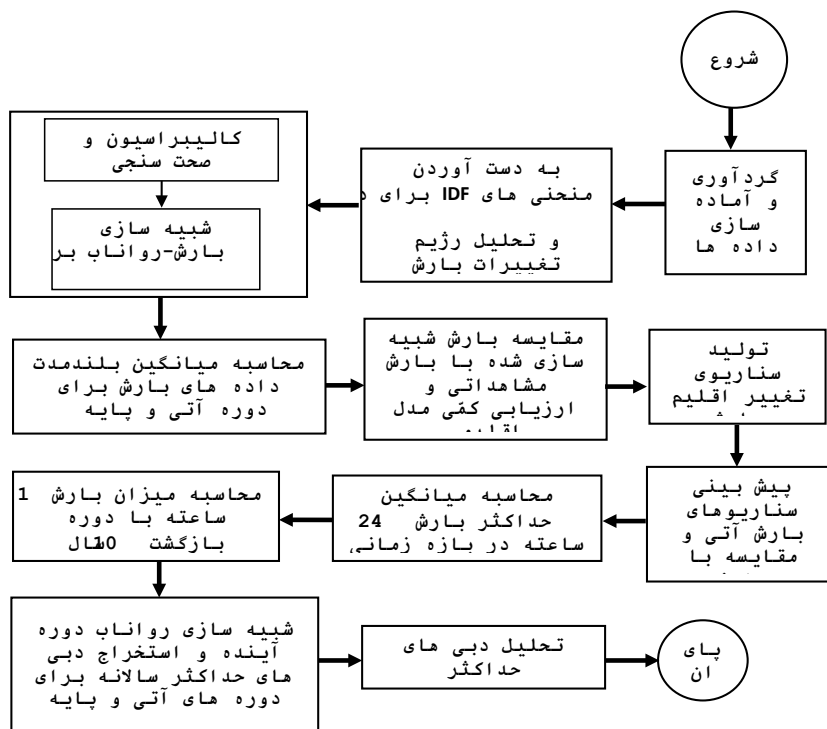
شکل ۲: رودها و کانال‌های موجود در حوزه که نهایتاً وارد کانال سیل‌برگردان غرب شده و به رود کن می‌ریزد [۱۹]



شکل ۱: موقعیت شبکه جمع‌آوری رواناب سیل‌برگردان غرب را در شهر تهران و کشور ایران [۱۷ و ۱۸]

Fig. 1. The situation of WFD urban drainage network in Tehran and Iran [17, 18]

Fig. 2. The catchment's rivers and channels which finally enter WFD main channel and discharge to Kan river [19]



شکل ۳: مراحل مختلف تحقیق

Fig. 3. Various steps to accomplish current research

۳-۱- گردآوری و آماده سازی داده‌ها

از جمله روش‌های مرسوم جهت بررسی میزان دقت و ارزیابی کمی مدل‌های اقلیمی، استفاده از معیارهای عملکرد و شاخص‌های خطا می‌باشد. در این مطالعه به منظور ارزیابی عملکرد مدل اقلیمی مورد استفاده و نیز مدل بارش-رواناب، از سه معیار ارزیابی عملکرد: مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)^۱، میانگین خطای مطلق (MAE)^۲، و ضریب نش-ساتکلیف (NSE)^۳ استفاده می‌گردد. دو معیار نخست میزان دقت مدل را بر اساس تفاضل مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی مورد ارزیابی قرا می‌دهند که هر چه به صفر نزدیک‌تر باشند، دقت بیشتر مدل را در شبیه‌سازی متغیر مورد نظر نشان می‌دهد. معیار عملکرد نش-ساتکلیف نیز در صورتی که برابر با ۱ باشد، نشانگر تناسب کامل میان داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است. اگر مقدار NSE بزرگتر از ۰/۷۵ باشد، نتایج شبیه‌سازی خوب توصیف می‌شوند. و در صورتی که این معیار بین ۰/۳۶ و ۰/۷۵ باشد، عملکرد مدل رضایت‌بخش محسوب می‌گردد [۲۳ و ۲۴].

۳-۳- شبیه سازی اقلیمی در دوره آتی

همانگونه که در بخش‌های پیش اشاره گردید، معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوی اقلیمی در دوره زمانی آینده، مدل‌های جفت شده اقیانوس-اتمسفر گردش عمومی جو (AOGCM) می‌باشد [۵ و ۲۵-۲۷]. از آنجا که مهم‌ترین ورودی این مدل‌ها میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی بوده [۲۸] و تعیین میزان انتشار این گازها در دوره‌های آتی نیز به طور قطعی امکان‌پذیر نمی‌باشد، سناریوهای مختلفی که دربرگیرنده چگونگی تغییرات این گازها در دوره‌های زمانی آینده می‌باشد، ارائه شده که آنها را سناریوهای انتشار می‌نامند [۹]. شبیه‌سازی‌های اقلیمی در مطالعه حاضر تحت سناریوی AIB، از مجموعه سناریوهای انتشار ارائه شده توسط IPCC، صورت گرفت. دلیل انتخاب این سناریو، شباهت بیشتر آن با شرایط شهر تهران می‌باشد. این سناریوی از مجموعه سناریوهای خانواده A1 بوده که بر رشد سریع اقتصادی و استفاده متعادل از انواع منابع انرژی تأکید دارد. رشد جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ و گسترش سریع فناوری‌های جدید و کارآمد از دیگر ویژگی‌های سناریوهای خانواده A1 می‌باشد [۲۹].

در مرحله نخست، داده‌های بارش برای دوره‌های زمانی مورد بررسی در این تحقیق از وبگاه شبکه تغییر اقلیم کانادا استخراج گردید و میانگین بلندمدت آنها برای هر ماه از سال محاسبه شد. با توجه به اینکه تنها ایستگاه موجود در داخل حوضه سیل‌برگردان غرب، ایستگاه هفت‌حوض-درکه می‌باشد، داده‌های روزانه بارش مشاهداتی برای ایستگاه مذکور از شرکت منابع آب ایران دریافت گردید. لازم به ذکر است که ایستگاه هفت‌حوض یک ایستگاه هیدرومتری بوده که داده‌های ثبت شده بارندگی را نیز برای سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۱ دارا می‌باشد. با توجه به توصیه IPCC مبنی بر انتخاب فاصله سال‌های ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ (و یا ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۰) به عنوان دوره پایه مطالعاتی اقلیمی [۲۰] و با در نظر گرفتن موجودیت داده‌های بارش ایستگاه هفت‌حوض، نهایتاً دوره ۱۱ ساله ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰ به عنوان دوره پایه انتخاب گردید و بررسی تغییرات بارش آتی نیز در دوره ۱۱ ساله ۲۰۸۰ تا ۲۰۹۰ صورت گرفت. در رابطه با داده‌های مورد نیاز رواناب در خروجی حوضه مورد بررسی از اطلاعات مربوط به دو رگبار که در دی‌ماه ۱۳۹۰ توسط معافی‌رابری [۱۶] برداشت شده‌اند، استفاده شد. سایر اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی بارش-رواناب حوضه بر پایه کتابچه راهنمای مدل، گزارشات موجود، تحقیقات پیشین، و مطالعات صورت گرفته در منطقه توسط سازمان‌های مرتبط و شرکت‌های مهندسی مشاور استخراج گردید.

۳-۲- ارزیابی عملکرد مدل اقلیمی

در مقایسه صورت گرفته میان مدل‌های مختلف اقلیمی، دو مدل MRI-CGCM2.3.2a و IPSLCM4 به ترتیب بیشترین دقت را به لحاظ توانمندی در شبیه‌سازی بارش محدوده سیل‌برگردان غرب در دوره پایه نشان دادند (مشخصات این دو مدل در جدول ۱ آمده است). بر این اساس مدل گردش عمومی مورد استفاده در مطالعه حاضر، مدل MRI-CGCM2.3.2a از مجموعه مدل‌های گزارش ارزیابی چهارم IPCC می‌باشد که در ادامه به منظور توصیف بهتری از بارش پیش‌بینی شده دوره آتی، مقایسه‌ای نیز میان نتایج حاصل از این مدل با بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل IPSLCM4 صورت می‌گیرد.

جدول ۱: مشخصات مدل اقلیمی MRI-CGCM2.3.2a و IPSLCM4 (از مدل‌های گزارش ارزیابی چهارم IPCC)

Table 1. the main characteristics of two IPCC's 4th Assessment Report climate models (MRI-CGCM2.3.2a and IPSLCM4)

نام مدل	گروه مؤسس	قدرت تفکیک	سناریوی انتشار	مرجع
MRI-CGCM2.3.2a	مؤسسه تحقیقات هواشناسی ژاپن (MRI)	□ ۲/۸ * □ ۲/۸	A2, B1, A1B	[۲۱]
IPSLCM4	مؤسسه پییر سیمون لاپلاس فرانسه (IPSL)	□ ۳/۷۵ * □ ۲/۵	A2, B1, A1B	[۲۲]

1 Root Mean Square Error

2 Mean Absolute Error

3 Nash-Sutcliffe

۳-۵- شبیه‌سازی بارش-رواناب

شبیه‌سازی بارش-رواناب با استفاده از مدل مدیریت رواناب شهری (SWMM)^۴ انجام شد. این نرم‌افزار یک مدل پویای شبیه‌ساز بارش-رواناب می‌باشد که جهت مدل‌سازی کمی و کیفی رواناب در شبکه زهکشی محدوده شهری برای وقایع تک رخداد و پیوسته استفاده می‌شود. امکان اجرای این مدل برای دوره شبیه‌سازی از چند دقیقه تا چند سال وجود دارد [۳۸]. در تحقیق حاضر از روش شماره منحنی در شبیه‌سازی فرایند نفوذ زیرحوضه‌ها استفاده گردید. همچنین روندیابی به روش موج دینامیکی صورت گرفت. در این روش روندیابی، بالازدگی و برگشت جریان، ارتباطات حلقوی و فشار جریان نیز در محاسبات لحاظ می‌گردد [۳۹ و ۴۰].

۳-۶- تحلیل دبی‌های حداکثر

پس از شبیه‌سازی رواناب در دوره آتی توسط مدل اقلیمی مورد نظر و تولید سری زمانی جریان روزانه خروجی از حوضه، با استفاده از روش سری حداکثر سالانه (AM)^۵ مقادیر رواناب حداکثر سالانه حوضه مشخص گردیده، و پس از مرتب کردن داده‌ها به ترتیب نزولی، با استفاده از فرمول ویبول تجربی مقدار احتمال وقوع (و به تبع آن دوره بازگشت) هر یک از دبی‌های حداکثر رواناب سالانه به دست می‌آید و تابع توزیع احتمالاتی (PDF) آن تعیین می‌گردد. لازم است همین مراحل برای داده‌های مشاهداتی در دوره پایه نیز انجام شود. اما با توجه به عدم وجود داده‌های اندازه‌گیری شده بلند مدت در مقیاس روزانه در خروجی حوضه سیل‌برگردان غرب، در این تحقیق از داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل بارش-رواناب در دوره پایه استفاده گردید. یک مزیت استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده می‌تواند کامل‌تر بودن سری زمانی آن نسبت به داده‌های مشاهداتی باشد. هر چند در صورت وجود سری زمانی داده‌های اندازه‌گیری شده رواناب روزانه در خروجی حوضه، دقت کار می‌تواند افزایش یابد. در انتها با مقایسه PDF های رواناب حداکثر سالانه دوره آتی با دبی‌های حداکثر دوره پایه، چگونگی تغییرات احتمالی رژیم رواناب حداکثر حوضه سیل‌برگردان غرب در افق زمانی ۲۰۹۰ نسبت به دوره پایه تعیین می‌گردد.

۴- یافته‌ها

۴-۱- بررسی عملکرد مدل اقلیمی در شبیه‌سازی بارش حوضه

بررسی نمودارهای حاصله از شبیه‌سازی صورت گرفته توسط دو مدل IPSLCM4 و MRI-CGCM2.3.2a با داده‌های بارش مشاهداتی گویای آن است که این مدل‌های اقلیمی در تمام ماه‌های سال، مقدار بارندگی را کمتر از مقدار واقعی آن برآورد می‌نماید، اما روند کلی کاهش و افزایش میزان بارش ماهانه را به درستی پیش‌بینی می‌نماید. البته لازم به ذکر است که روش دلتا (عامل تغییر) که جهت ریزمقیاس‌سازی نتایج این

داده‌های بارش مدل اقلیمی به صورت نقطه‌ای (ایستگاهی) از وبگاه شبکه تغییر اقلیم کانادا برداشت شد. به منظور ریزمقیاس‌سازی زمانی بارش دوره آتی و بهبود خروجی مدل مورد استفاده، از روش دلتا (عامل تغییر)^۱ استفاده گردید. در این روش سناریوهای تغییر اقلیم بارش پس از تولید توسط رابطه ۱ در مقادیر مشاهداتی مربوط به دوره پایه ضرب می‌شود [۵ و ۲۰ و ۳۲-۳۰].

$$\Delta P_i = \left(\frac{\overline{PGCM, fut, i}}{\overline{PGCM, base, i}} \right) \quad (1)$$

در رابطه فوق ΔP_i بیانگر سناریوی تغییر اقلیم مربوط به بارندگی برای میانگین دوره‌ای برای هر ماه، و i شماره ماه مورد نظر می‌باشد. $\overline{PGCM, fut, i}$ و $\overline{PGCM, base, i}$ به ترتیب نشان‌دهنده میانگین دوره‌ای بارش شبیه‌سازی شده دوره‌های آتی و پایه توسط مدل‌های AOGCM است. در مرحله بعد به منظور تولید سری زمانی بارش در دوره آتی، سناریوهای تغییر اقلیم در مقادیر بارش مشاهداتی دوره پایه (با مقیاس زمانی مورد نظر) ضرب می‌شود (رابطه ۲):

$$P = P_{obs} \times \Delta P \quad (2)$$

در رابطه ۲، P_{obs} بیانگر سری زمانی بارش مشاهداتی در دوره پایه، P سری زمانی بارش حاصل از پدیده تغییر اقلیم در دوره آتی، و ΔP سناریوی تغییر اقلیم بارش می‌باشد.

۳-۴- تولید منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی بارش

در این مطالعه جهت برآورد منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی بارش در حوضه مورد بررسی، از رابطه ۳ که توسط قهرمان [۳۳] برای تخمین بارندگی به مدت ۱۵ دقیقه تا ۲۰ ساعت و دوره بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال ارائه بر اساس رابطه بل [۳۴] و متناسب با شرایط ایران پیشنهاد شده است [۳۵] استفاده گردید:

$$P_t^1 = (0.4524 + 0.2471 \ln(T - 0.6000))(0.3710 + 0.6184t^{0.4484})P_{10}^{60} \quad (3)$$

در این رابطه، t زمان (دقیقه)، T دوره بازگشت (سال)، و P_{10}^{60} مقدار بارش ۱ ساعته با دوره بازگشت ۱۰ سال می‌باشد که از رابطه ۴ قابل برآورد است [۳۶ و ۳۷]:

$$P_{10}^{60} = e^{0.291} \times (P_{24h})^{0.694} \quad (4)$$

که در آن P_{24h} میانگین حداکثر بارش روزانه بر حسب میلیمتر می‌باشد.

1 Delta Change
2 Change Factor
3 Bell

4 Storm Water Management Model
5 Annual Maximum

جدول ۳: تغییرات میانگین بلند مدت (۱۱ ساله) بارش در دوره آتی نسبت به دوره پایه

Table 3. The changes in long-term average of rainfall in future time compared to the baseline

آینده دور (۲۰۹۰-۲۰۸۰)	دوره پایه مشاهداتی (۲۰۰۰-۱۹۹۰)	دوره زمانی مورد بررسی
		پارامتر و مدل مورد بررسی
۳۸۰/۶۲	۴۱۸/۲۶	مجموع بارش بلند مدت / مدل MRI-CGCM2.3.2a
۴۶۲/۶۶	۴۱۸/۲۶	مجموع بارش بلند مدت / مدل IPSLCM4

مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد، خاصیت تصحیح خطای شبیه‌سازی و بهبود خروجی مدل‌های اقلیمی را نیز داراست.

جدول ۲ شاخص‌های عملکرد محاسبه شده برای دو مدل MRI-CGCM2.3.2a و IPSLCM4 را در شبیه‌سازی بارش دوره پایه نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، سه معیار عملکرد مورد بررسی از مقادیر قابل قبولی برخوردار بوده و عملکرد هر دو مدل اقلیمی در شبیه‌سازی بارندگی حوضه سیل‌برگردان غرب رضایت‌بخش توصیف می‌شود.

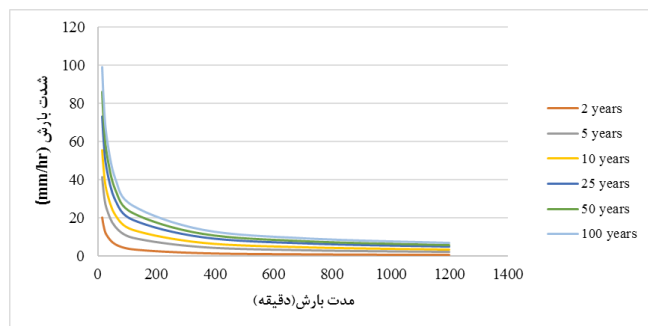
جدول ۲: شاخص‌های عملکرد محاسبه شده برای دو مدل MRI-CGCM2.3.2a و IPSLCM4 در شبیه‌سازی بارش حوضه

Table 2. Calculated performance indicators for the two models: MRI-CGCM2.3.2a and IPSLCM4 in rainfall simulation

مدل	NSE	MAE	RMSE
MRI-CGCM2.3.2a	۰/۶۵	۱۲/۷۴	۱۶/۰۱
IPSLCM4	۰/۴۲	۱۴/۹۴	۲۰/۶۱

۴-۳- تعیین منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی حوضه برای دوره آتی و پایه

به منظور محاسبه منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی برای دوره آتی، پس از شبیه‌سازی بارش در دوره زمانی مورد نظر در آینده، میانگین مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته حوضه در دوره ۱۱ ساله مربوطه به دست آمد و از طریق رابطه ۴ مقدار بارش ۱ ساعته با دوره بازگشت ۱۰ سال محاسبه شد. سپس مقادیر بارش برای دوره بازگشت‌های مورد نظر و مدت‌های مختلف بارندگی از رابطه ۳ به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که شدت بارندگی حوضه در دوره آینده (افق زمانی ۲۰۹۰) نسبت به دوره پایه اندکی کاهش می‌یابد و این تغییر رژیم بارش برای بارش‌های با دوره بازگشت بالا بیشتر مشهود است (شکل‌های ۴ و ۵). لازم به ذکر است که با وجود کاهش شدت بارش برای یک دوره بازگشت مشخص در آینده، به دلیل افزایش دوره بازگشت بارندگی در دوره‌های آتی و رابطه مستقیم دوره بازگشت و شدت بارش، در مجموع با افزایش شدت بارندگی مواجه خواهیم بود.



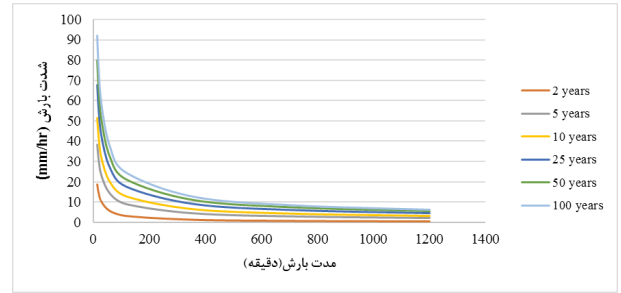
شکل ۴: منحنی شدت-مدت-فراوانی حوضه سیل‌برگردان غرب برای دوره پایه (۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰)

Fig. 4. IDF curve for WFD catchment during the baseline (1990-2000)

۴-۲- پیش‌بینی بارش آتی حوضه
در بررسی صورت گرفته توسط بینش و همکاران [۴۱] در رابطه با تغییر میزان بارش در دوره زمانی آینده دور (۲۰۸۰ تا ۲۰۹۰) با استفاده از مدل MRI-CGCM2.3.2a و بر اساس داده‌های ایستگاه هفت‌حوض-درکه، این نتیجه حاصل گردید که بیشترین میزان کاهش در مقدار بارش نسبت به دوره مشاهداتی مربوط به ماه می می‌باشد که مقدار این کاهش برای افق ۲۰۹۰ معادل ۱۹ میلی‌متر است. جدول ۳ تغییرات میانگین بلند مدت بارش را در دوره مورد بررسی در آینده و دوره پایه بر اساس نتایج دو مدل MRI-CGCM2.3.2a و IPSLCM4 نشان می‌دهد. بر اساس مدل MRI-CGCM2.3.2a، میزان بارش در دوره آینده نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. اما مدل IPSLCM4 میزان بارش آتی را بیشتر از دوره پایه برآورد می‌نماید که با توجه به خطای بالاتر آن نسبت به مدل MRI-CGCM2.3.2a، نتایج آن چندان قابل اطمینان نمی‌باشد. بر همین اساس سایر محاسبات در بخش‌های آتی مقاله نیز بر اساس خروجی مدل MRI-CGCM2.3.2a صورت می‌پذیرد.

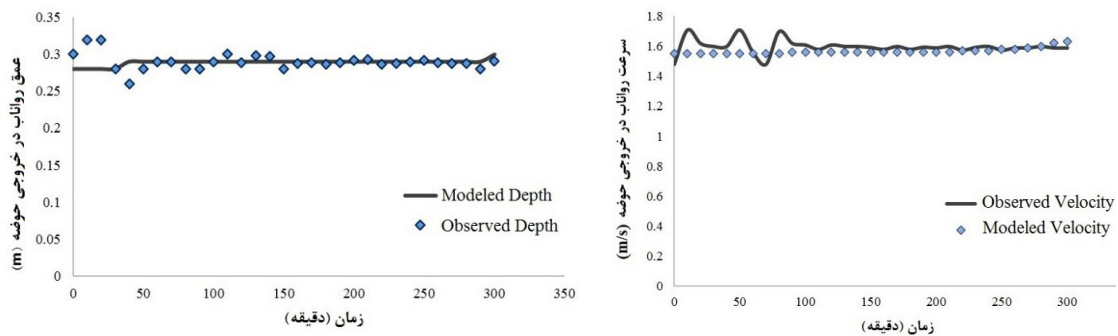
۴-۴- مدل سازی بارش-رواناب حوضه

حوضه سیل برگردان غرب در نرم افزار EPA SWMM (نسخه ۵) شبیه سازی شد. به منظور شبیه سازی رواناب روزانه حوضه سیل برگردان غرب در افق زمانی ۲۰۹۰، ابتدا مدل بارش-رواناب SWMM برای رگبار رخ داده در تاریخ ۶ دی ماه ۱۳۹۰ با ارتفاع ۱۷ میلی متر مورد واسنجی و برای بارش رخ داده در تاریخ ۱۱ دی ماه ۱۳۹۰ با ارتفاع ۱۲/۵ میلی متر مورد صحت سنجی قرار گرفت. کالیبراسیون بر اساس دو پارامتر عمق و سرعت جریان در خروجی از حوضه انجام شد. لازم به ذکر است که تنها داده های اندازه گیری شده موجود در خروجی حوضه، با فاصله چند ساعت از شروع بارش توسط معافی رابری [۱۶] به مدت ۶ ساعت برداشت گردیده است و بنابراین کالیبراسیون و صحت سنجی مدل با استفاده از همین میزان داده برداشت شده صورت گرفت و عملکرد مدل به لحاظ کمی محاسبه گردید. نتایج در شکل های ۶ و ۷ و جدول ۴ ارائه شده است.



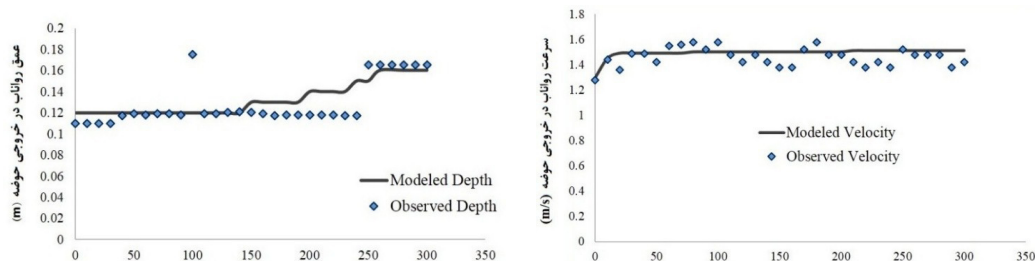
شکل ۵: منحنی شدت-مدت-فراوانی حوضه سیل برگردان غرب برای دوره ۲۰۸۰ تا ۲۰۹۰

Fig. 5. IDF curve for WFD catchment during 2080-2090



شکل ۶: مقایسه عمق و سرعت جریان رواناب در خروجی حوضه با داده های مشاهداتی در واقعه بارش ۶ دی ماه ۱۳۹۰

Fig. 6. Comparison of flow depth and velocity with the observed data at the basin outlet for the rainfall occurred on 27th December 2011



شکل ۷: مقایسه عمق و سرعت جریان رواناب در خروجی حوضه با داده های مشاهداتی در واقعه بارش ۱۱ دی ماه ۱۳۹۰

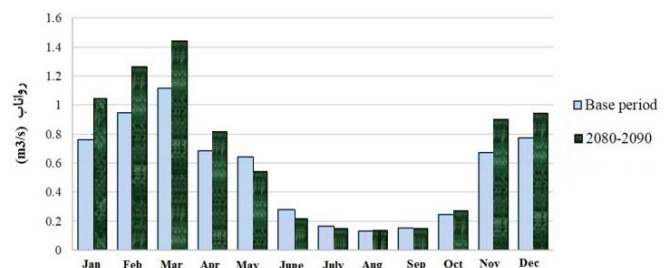
Fig. 7. Comparison of flow depth and velocity with the observed data at the basin outlet for the rainfall occurred on 1st January 2012

جدول ۴: شاخص‌های عملکرد محاسبه شده برای مدل SWMM در شبیه‌سازی رواناب حوضه

Table 4. Calculated performance indicators for SWMM in rainfall-runoff simulation

MAE	RMSE	متغیر مورد نظر در خروجی حوضه	مرحله مورد نظر
۰/۰۰۸۱	۰/۰۱۳۰	عمق	واسنجی
۰/۰۴۵۵	۰/۰۶۱۴	سرعت	
۰/۰۱۰۶	۰/۰۱۵۶	عمق	صحت‌سنجی
۰/۰۶۰۶	۰/۰۷۴۴	سرعت	

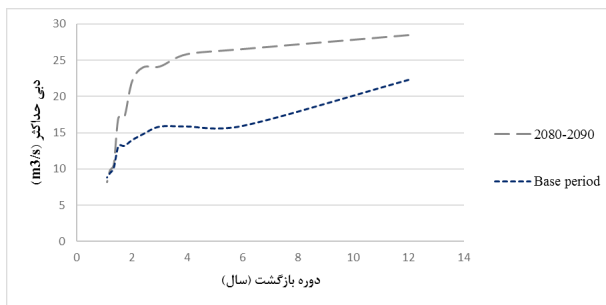
نتایج حاصل از شکل‌های ۶ و ۷ و جدول ۴ نشان از عملکرد خوب مدل بارش-رواناب در شبیه‌سازی رواناب حوضه مورد مطالعه دارد. پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWMM، به منظور تحلیل دوره بازگشت و شدت دبی‌های حداکثر، مقدار رواناب خروجی از حوضه در دوره زمانی آینده برآورد گردید. شکل ۸ میانگین بلند مدت ماهانه رواناب خروجی از حوضه سیل‌برگردان غرب را در افق زمانی ۲۰۹۰ با دوره پایه مقایسه می‌کند. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که در اغلب اوقات سال، به ویژه از اواخر پاییز تا اوایل بهار با افزایش در میزان رواناب در دوره زمانی آینده (۲۰۸۰ تا ۲۰۹۰) نسبت به دوره پایه مواجه هستیم. چنین نتیجه‌ای با نتایج حاصل از برخی دیگر از مطالعات- به ویژه در حوضه‌های مجاور منطقه مورد مطالعه- همخوانی داشته [۹ و ۱۳ و ۴۴-۴۲] و دور از انتظار نبود، چرا که پدیده تغییر اقلیم بیش از آنکه بر مقدار بارندگی تأثیرگذار باشد، بر رژیم بارش (شدت و فراوانی آن) اثرگذار است و پیامدهای حاصله از این پدیده نیز عمدتاً به دلیل تأثیری است که تغییرات اقلیمی بر رژیم بارندگی و نحوه توزیع آن (به لحاظ زمانی و مکانی) بر جای می‌گذارد.



شکل ۸: مقایسه میانگین بلند مدت ماهانه دبی خروجی از حوضه در دوره آبی با دوره پایه

Fig. 8. Comparison of long-term monthly average of discharge from the basin in baseline and future time-periods

۴-۵- بررسی رژیم رواناب حداکثر سالانه حوضه در دوره آبی داده‌های ریزمقیاس شده در مقیاس روزانه به عنوان ورودی مدل بارش-رواناب SWMM مورد استفاده قرار گرفت تا اثر تغییرات اقلیمی بارش بر شدت جریان رواناب حوضه سیل‌برگردان غرب در دوره آبی مورد بررسی قرار گیرد. پس از آنکه خروجی مدل SWMM به صورت رواناب روزانه حوضه در دوره آبی حاصل گردید، سری زمانی مقادیر حداکثر سالانه رواناب حوضه برای دوره مورد نظر در آینده به دست آمد و تابع توزیع تجمعی (CDF) آنها تعیین گردید. همین مراحل برای تعیین CDF رواناب حداکثر سالانه دوره پایه نیز انجام شد. سپس توزیع‌های احتمالاتی مختلف به توابع توزیع تجمعی حاصله برازش داده شد. نتایج نشان داد که توزیع لوگ نرمال کمترین انحراف و بهترین برازش را با داده‌های رواناب حداکثر سالانه حوضه سیل‌برگردان غرب- هم در دوره مشاهداتی و هم در دوره آبی- نشان می‌دهد. به منظور مطالعه تغییرات رژیم رواناب حوضه در دوره آبی، شدت جریان سیلاب در کنار دوره بازگشت و احتمال وقوع آن مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۹ تغییرات حداکثر شدت جریان‌های خروجی از حوضه سیل‌برگردان غرب را نسبت به دوره بازگشت‌های دبی‌های حداکثر رواناب در دوره آینده و دوره پایه نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، برای یک دبی ثابت رواناب، دوره بازگشت سیل شهری در افق زمانی ۲۰۹۰ نسبت به دوره پایه کاهش یافته و برای یک دوره بازگشت ثابت، شدت جریان سیل شهری در دوره آینده به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به دوره پایه افزایش نشان می‌دهد.



شکل ۹: مقایسه تغییرات حداکثر شدت جریان خروجی از حوضه نسبت به دوره بازگشت رواناب در دوره آبی و پایه

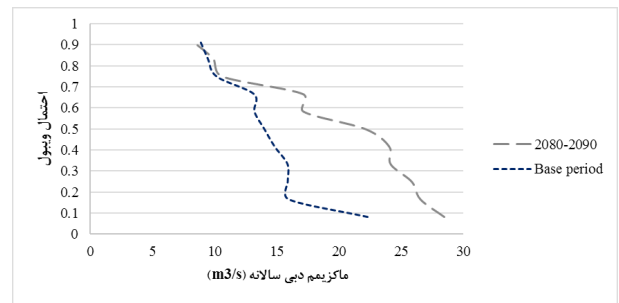
Fig. 9. Maximum change in discharge from the catchment vs. runoff return period during baseline and future times

همچنین در شکل ۱۰ مقادیر احتمال ویبول بر حسب حداکثر دبی تجمعی خروجی از حوضه ترسیم گردیده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت که احتمال رخداد یک دبی مشخص از سیلاب شهری در حوضه مورد بررسی در دوره زمانی آینده بیشتر از دوره پایه است، که این افزایش احتمال رخداد سیل‌های آبی برای شدت‌جریان‌های بالاتر از ۱۳ متر مکعب در ثانیه به طور قابل توجهی خود را نشان می‌دهد.

برای حوضه مجاور حوضه سیل برگردان غرب و در بازه زمانی تقریباً منطبق با دوره زمانی مورد بررسی (دهه ۲۰۸۰) صورت گرفته است، مطابقت دارد. با این حال به منظور افزایش دقت در پیش بینی‌های صورت گرفته پیشنهاد می‌شود که از روش‌هایی چون نظریه آشوب نیز در کنار نتایج حاصل از مدل‌های اقلیمی استفاده گردد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که بر پایه یافته‌های این تحقیق در افق زمانی ۲۰۹۰ افزایش تعداد و شدت سیل و آبگرفتگی در حوضه مورد بررسی را شاهد هستیم. بر این اساس به‌کارگیری تمهیداتی جهت تطبیق با پدیده تغییر اقلیم در حوضه سیل برگردان غرب تهران اهمیت دارد. در این راستا برنامه‌ریزی جهت مدیریت پایدار زهکشی رواناب شهری و لحاظ نمودن ابعاد مختلف اجتماعی، اقتصادی، و زیست‌محیطی در کنار جنبه‌های فنی و هیدرولیکی به منظور حصول دیدی جامع و یکپارچه جهت سازگاری با پدیده تغییر اقلیم و اثرات هیدرولوژیکی ناشی از آن ضروری به نظر می‌رسد.

مراجع

- [1] B. Bates, Z.W. Kundzewicz, S. Wu, J. Palutikof, eds., Climate Change and Water (IPCC Technical Paper VI). Geneva, Switzerland: IPCC Secretariat, (2008) Accessed July 10, 2013. <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-change-water-en.pdf>.
- [2] IPCC., Climate Change 2007:1-8. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, et al., The Physical science basis, Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK, 2 (2007) 1-976.
- [3] M. Karamouz, A. Hosseinpour, S. Nazif, Improvement of urban drainage system performance under climate change impact, Journal of Hydrologic engineering, ASCE, 16(5) (2011) 395-412.
- [4] A.P. Sokolov, C.E. Forest, P.H. Stone, Comparing oceanic heat uptake in AOGCM transient climate change experiments, Journal of Climate, 16(10) (2003) 1573-1582.
- [5] R.L. Wilby, I. Harris, A framework for assessing uncertainties nclimate change impacts (low flow scenarios for the River Thames, UK). Journal of Water resources research, 42 (2006) 10 pp.
- [6] C.G. Pilling, J.A.A. Jones, The impact of future climate change on seasonal discharge, hydrological processes and extreme flows in the Upper Wye experimental catchment, Mid-Wales. Journal of Hydrological process, 16 (2002) 1201-1213.
- [7] M.I. Hejazi, G.E. Moglen, The effect of climate and land use change on flow duration in the Maryland Piedmont region. Journal of Hydrological process, 22 (2008) 4710-4722.



شکل ۱۰: مقایسه تغییرات احتمال وقوع حداکثر دبی سالانه رواناب حوضه در دوره آبی و پایه

Fig. 10. Comparison of the probability of annual discharge from the basin during baseline and future times

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی رژیم بارش و رواناب در دوره زمانی آینده (افق زمانی ۲۰۹۰) و مقایسه آن با دوره پایه (دهه ۱۹۹۰) پرداخت. بدین منظور با استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی برای متغیر بارش، شبیه‌سازی‌هایی برای رواناب حوضه در دوره آبی صورت گرفت و تغییرات دوره بازگشت و شدت جریان رواناب در دوره زمانی آینده و دوره پایه مقایسه شد. بر اساس مدل MRI-CGCM2.3.2a که بیشترین دقت را در میان سایر مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی بارش حوضه داراست، این نتیجه حاصل گردید که در مجموع، مقدار و نیز شدت بارندگی (برای یک دوره بازگشت مشخص بارش) در دوره زمانی مورد بررسی در آینده با کاهش همراه است، هر چند در اوایل فصل بهار با افزایش در مقدار بارندگی مواجه هستیم. البته همانگونه که در متن مقاله اشاره شد، با افزایش دوره بازگشت بارش‌ها در آینده شدت بارندگی‌ها نیز با افزایش همراه خواهد بود. همچنین ملاحظه شد که نتایج حاصله از دو مدل اقلیمی مورد بررسی تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر داشته که نشان از عدم قطعیت بالای این مدل‌ها در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی می‌باشند. بنابراین لازم است در مطالعات آبی، این گونه عدم قطعیت‌ها نیز در برآورد نتایج مد نظر قرار گیرد. با این حال در مطالعه حاضر به دلیل خطای بسیار کمتر مدل MRI-CGCM2.3.2a نسبت به دیگر مدل‌های گزارش ارزیابی چهارم IPCC، مدل‌سازی رواناب حوضه بر اساس خروجی این مدل اقلیمی صورت گرفت. همچنین با توجه به وجود خروجی مدل‌های اقلیمی بر اساس گزارش ارزیابی پنجم، پیشنهاد می‌شود که برآورد بارش آینده حوضه با استفاده از این نسخه جدیدتر نیز صورت گرفته و با نتایج حاصل از گزارش چهارم مقایسه شود.

در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای بارش و رواناب حداکثری حوضه، مشاهده شد که در افق زمانی آینده، مقدار رواناب و شدت جریان‌های حداکثر افزایش یافته و احتمال رخداد سیل نیز با افزایش قابل ملاحظه‌ای همراه است. این نتایج با نتایج به دست آمده از تحقیقات مشابه چون حسین‌پور [۸] که برای حوضه‌های شمال شرقی تهران انجام شده و شمشیرساز [۱۳] که

- [19] Yekom consulting engineers, A project on (quantitative and qualitative) rehabilitation of surface waters in southern Tehran, 3 (2009) (in Persian).
- [20] IPCC-TGCI.A., Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Carter, T.R., M. Hulme and M. Lal (Eds.), Version 1, 69pp. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, 1 (1999) 1-69.
- [21] K-1 Model Developers, K-1 coupled model (MIROC) description. K-1 Technical Report 1 [Hasumi, H. and S. Emori (eds.)], Center for Climate System Research, University of Tokyo, Tokyo, Japan, (2004) 34pp.
- [22] F. Hourdin, I. Musat, S. Bony, P. Braconnot, F. Codron, J.L. Dufresne, et al., The LMDZ4 general circulation model: climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection. *Climate Dynamics*, 27(7-8) (2006) 787-813.
- [23] Y.G. Motovilov, L. Gottschalk, K. Engeland, A. Rohde, Validation of a distributed hydrological model against spatial observations, *Agriculture and Forest Meteorology*, 98-99 (1999) 257- 277.
- [24] M. Rasouli, A. Haghizadeh, H. Zeynivand, A. Ildermi, Evaluating the effect of land-use changes on outflow simulation using Artificial Neural Network (MLP) Case study: Yalfan watershed, *Journal of Water and sustainable development*, 1(2) (2014) 65-74 (in Persian).
- [25] M.E. Lane, P.H. Krishen, R.M. Vogel, Indicators of impact of global climate change on U.S. water resources, *ASCE, Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(4) (1999)194-204.
- [26] M. Mirza, Global warming and changes in the probability of occurrence of floods in Bangladesh and implications, *Global Environmental Change*, 12 (2001) 137-138.
- [27] T.D. Mitchell, Pattern Scaling: An examination of accuracy of the technique for describing future climates, *Climate change*, 60 (2003) 217-242.
- [28] P.S. Ashofteh, A.R. Massah Bavani, The effect of climate change uncertainty on flood regime (Case study: Aydoghmoush watershed), *Journal of Iranian Water Resources Research*, 5(2) (2009) 27-39 (in Persian).
- [29] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Emission scenarios, Summery for policy makers, A special report of IPCC working group III. UNDP and WMO, (2000) 27 pages, Available online at: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>, accessed by: 11-11-2016.
- [8] A. Hosseinpour, Developing an algorithm for investigating the environmental and climatic impacts on urban flood hydraulics, Msc. Thesis, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran (2008) (in Persian).
- [9] P.S. Ashofteh, A.R. Massah Bavani, The impact of climate change on extreme runoff discharges (Case study: Aydoghmoush watershed), *Agriculture and Natural resources science and technology (Soil and Water science)*, 14(53) (2010) 25-39 (in Persian).
- [10] P. Baguis, E. Roulin, P. Willems, V. Ntegeka, Climate change scenarios for precipitation and potential evapotranspiration over central Belgium, *Theoretica and Applied Climatology*, 99 (2010) 273-286.
- [11] S.P. Quintana, A. Ribes, E. Martin, F. Habets, J. Boe, Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins, *Journal of Hydrology*, 383 (2010) 111-124.
- [12] M.T. Taye, V. Ntegeka, N.P. Ogiramo, P. Willems, Assessment of climate change impact on hydrological extremes in two source regions of the Nile River Basin, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1) (2011) 209-222.
- [13] Sh. Abdollah Shamshirsaz, Investigating the climate change impact on runoff quantity and quality in urban catchment (Case study: Zargandeh channel), Msc. Thesis, faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran (2008) (in Persian).
- [14] F. Kara, I. Yucel. Climate change effects on extreme flows of water supply area in Istanbul: utility of regional climate models and downscaling method, *Environmental Monitoring and Assessment*, Springer International Publishing Switzerland, 187(9) (2015) 1-18.
- [15] J. Romanowicz, E. Bogdanowicz, E. Debele, K. Doroszkiewicz, H. Hisdal, D. Lawrence, et al., *Climate Change Impact on Hydrological Extremes (Preliminary Results from the Polish-Norwegian Project)*, *Acta Geophysica*, 64(2) (2016) 477-509.
- [16] A. Mo'afi Rabori, Optimum design of dimensions of flood-diversion channel based on upland characteristics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, MSc thesis, University of Tehran, Iran (2012) (in Persian).
- [17] A. Moghimi, A. Saffari, Geomorphologic assessment of urban development in realm of surface drainage catchments (Case study: City of Tehran), *Journal of Human Science Teacher*, 14(1) (2008) 1-35 (in Persian).
- [18] V. Parsa, H. Moti'ee, modelling urban floods using Storm-Cad, The 5th Conference on Iran Water Resources Management, Tehran, Iran (2013) (in Persian).

- [38] A. Fallah Tafti, M.B. Sharifi, Simulating surface runoff drainage network by coupling MIKE SWMM and GIS, 7th International Seminar on River Engineering, University of Shahid Chamran, Ahvaz, Iran (2006) (in Persian).
- [39] D.L. Fread, Handbook of Hydrology, Chapter 10, Ed. R. Maidment, McGraw-Hill Book Company, New York (1992).
- [40] W. James, L.E. Rossman, W.R.C. James, Water system models: User's Guide to SWMM 5.0, 13th Edition, CHI Press Publication R242, (2010) 205 pp.
- [41] N. Binesh, M.H. Niksokhan, A. Sarang, A study of the effect of rainfall variability on Darakeh river flow rate during 1989-2012, Journal of Echo-hydrology, 3(3) (2016) 465-476 (in Persian).
- [42] P. Almasi, Investigating the impact of climate change on flood frequency in Bazoft watershed, MSc. Thesis, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Isfahan university of technology, Isfahan, Iran (2014) (in Persian).
- [43] L.K. Alison, G.J. Richard, S.R. Nicholas. RCM rainfall for UK flood frequency estimation. II. Climate change results. Journal of Hydrology, 318 (2006) 163-172.
- [44] S.M.M. Malaekpour, A model for investigating the impact of climate change on integrated management of urban flooding, MSc. Thesis, faculty of Civil Engineering, KN. Toosi University, Tehran, Iran (2012) (in Persian).
- [30] A.R. Massah Bavani, S. Morid, Climate change impacts on Zayandeh Roud river flow in Isfahan. Agriculture and natural resources science and technology, 9(4) (2005) 17-27 (in Persian).
- [31] P.D. Jones, M. Hulme, Calculating regional climatic times series for temperature and precipitation (methods and illustrations). International journal of Climatology, 16 (1996) 361-377.
- [32] C.H. Prudhomme, D. Jakob, C. Svensson, Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. Journal of Hydrology, 277 (2001) 1-23.
- [33] B. Ghahreman, Updated IDF equation for rainfall in Iran using 1-hour, 10-year rainfall. Journal of Agricultural science, 6 (1996) 13-30 (in Persian).
- [34] F.C. Bell, Generalized Rainfall-Duration-Frequency Relationship, Journal of the Hydraulic Division. ASCE 95(6357) (1969) 311-327.
- [35] A. Alizadeh, Principles of Applied Hydrology, 31th edition, University of Imam Reza (Peace be upon him), Mah'had, Iran (2010) 735 pp. (in Persian).
- [36] B. Ghahreman, A. Sepaskhah, Estimating IDF equation for rainfall in Iran using 1-hour, 10-year rainfall. 3rd International congress on road and structural engineering, Faculty of Engineering, University of Shiraz, Iran (1980) (in Persian).
- [37] B. Bakhtiari, Sh. Pour Mousavi, N. Sayyari, Investigating the effect of climate change on IDF curves for rainfalls in Babolsar station during 2011-2030, Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 4(8) (2014) 694-704 (in Persian).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

N. Binesh, M. H. Niksokhan, A. Sarang, A Study of Rainfall and Urban Runoff Flow Regime under Future Climate Condition (Case study: West Flood-Diversion Catchment in Tehran), *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(5) (2018) 815-826.
DOI: 10.22060/ceej.2017.12927.5292



