

## بررسی کارایی نرم‌افزار SewerGEMS در شبیه‌سازی رواناب شهری برای حوضه‌های کوچک (مطالعه موردی: شهر میناب)

مجید رنجبری حاجی‌آبادی، جهانگیر عابدی کوپایی\* و محمد مهدی متین‌زاده<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۳)

### چکیده

رواناب شهری به دلیل شهرنشینی و تغییرات آب‌وهوایی به‌عنوان یک مسئله جدی دارای اهمیت است و به این دلیل توجه به مدل‌های شبیه‌سازی بارش - رواناب برای مدیریت و کاهش پیامدهای ناگوار مهم است. در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار SewerGEMS، حالت‌های مختلف برای بررسی عملکرد این نرم‌افزار بر اساس تعداد و مساحت زیرحوضه‌ها در دو حالت نه و هفده زیرحوضه و مدت بارندگی مختلف ۶ و ۱۲ ساعته و همچنین مقایسه عملکرد سه روش محاسبه زمان تمرکز (کریپیج، برنس‌بای - ویلیامز، کارتر) به منظور شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب در شهر میناب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان حجم کل رواناب تولیدی در حالت نه زیرحوضه، ۴ درصد نسبت به حجم کل رواناب تولیدی در حالت هفده زیرحوضه بیشتر است. همچنین مقدار بیشینه دبی اوج رواناب در حالت نه زیرحوضه، ۲۰ درصد نسبت به بیشینه دبی اوج رواناب در حالت هفده زیرحوضه بیشتر است. همچنین برای محاسبه زمان تمرکز از سه روش کریپیج، برنس‌بای - ویلیامز و کارتر استفاده شد که نتایج نشان داد، میزان خطای پیوستگی نرم‌افزار در همه حالت‌ها برای روش برنس‌بای - ویلیامز کمتر از دو روش دیگر است و روش کارتر بیشترین خطای پیوستگی را دارد. اما از آنجایی که مقدار زمان تمرکز محاسبه شده از این روش در بعضی از زیرحوضه‌ها بیشتر از مدت بارندگی ۶ ساعته است، بین داده‌های دبی اوج حاصل از روش کریپیج و روش برنس‌بای - ویلیامز، آزمون t-Test انجام شد و با توجه به اینکه داده‌های دو روش در سطح ۹۵٪ ( $p < 0.05$ ) درصد با یکدیگر اختلاف معناداری نداشته و همچنین روش کریپیج برای محاسبه زمان تمرکز در حوضه‌های کوچک کاربرد خوبی دارد، برای محاسبه زمان تمرکز در حالت مقایسه بین دو حالت نه و هفده زیرحوضه از روش کریپیج استفاده شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشاهده شد که با ادغام زیرحوضه‌ها و کاهش تعداد آن‌ها از هفده به نه زیرحوضه و در نتیجه افزایش مساحت زیرحوضه‌ها، حجم کل رواناب تولیدی از حدود ۱۲۳۸۳۹ مترمکعب به ۱۲۸۴۴۶ مترمکعب و بیشینه دبی اوج رواناب از حدود ۲/۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه به ۲/۸۸۴ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد که نشان‌دهنده افزایش حجم کل رواناب تولیدی و بیشینه دبی اوج رواناب است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های شبیه‌سازی بارش - رواناب، مدت بارندگی، سیلاب شهری، زمان تمرکز، SewerGEMS، زیرحوضه‌های شهری، شیب زیرحوضه

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

\* مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: koupai@iut.ac.ir

## مقدمه

سیلاب‌های شهری یکی از بلایای طبیعی گسترده هستند که آسیب‌ها و خسارت‌های حاصل از آن‌ها افزایش یافته‌است (۷). سیلاب‌های شهری زمانی رخ می‌دهند که ظرفیت شبکه جمع‌آوری رواناب کمتر از مقدار بارندگی باشد (۲۵). از جمله عوامل اصلی تشدید آسیب‌های ناشی از سیلاب‌های شهری، رشد جمعیت و گسترش شهرنشینی است که در آن فعالیت‌های انسانی در چرخه هیدرولوژیک طبیعی همچون تبدیل حوضه‌های طبیعی به سطوح غیرقابل نفوذ، ساخت‌وساز در مناطق سیل‌خیز و مسیل‌های طبیعی و حذف پوشش گیاهی فرایند نفوذ را کند کرده و باعث افزایش حجم رواناب ناشی از بارش می‌شوند (۱۵ و ۲۴). امروزه شاهد رشد سریع و روزافزون جمعیت، توسعه شهری و صنعتی شدن جوامع هستیم. بر اساس شواهد موجود نزدیک به ۶۰ درصد از مردم جهان تا سال ۲۰۳۰ شهرنشین خواهند شد (۲۶). یکی دیگر از عوامل تشدیدکننده سیلاب‌های شهری، بارش‌های شدید در اثر تغییرات اقلیمی است که نقش مهمی در تشدید و تسریع چرخه هیدرولوژیک ایفا می‌کند و باعث تغییر در میزان و فراوانی بارندگی می‌شود (۸). این عامل بر احتمال وقوع سیلاب، حجم رواناب و دبی اوج تأثیر می‌گذارد و در مناطق خشک و نیمه‌خشک که بارندگی‌ها با مدت کم و شدت زیاد رخ می‌دهد، بیشتر نمایان است (۴).

بر اساس برآوردهای انجام‌شده در مناطق شهری، به‌طور میانگین ۹۰ درصد از بارندگی‌ها به رواناب‌های سطحی تبدیل می‌شود (۲۳) که همه آن‌ها دلیل افزایش فرسایش خاک و به‌وجود آمدن سیلاب‌های ویرانگر است (۱۰)؛ بنابراین اتخاذ تدابیر مناسب مدیریت رواناب‌های سطحی عامل بسیار مهم برای در امان ماندن سکونتگاه‌های شهری از تهدید وقوع سیل و درنهایت برطرف‌شدن آسیب‌های احتمالی در این نواحی به‌شمار می‌رود (۱۶). برای کمتر کردن رواناب‌های سطحی حاصل از بارندگی باید سیستم‌های زهکشی شهری دقیقی در هر منطقه طرح‌ریزی شود (۱۳) که این امر با کسب اطلاعات کامل و مفید از شرایط جوی و

وضعیت بارندگی در هر منطقه و همچنین تخمین درست مقدار رواناب ایجادشده از نزولات جوی امکان‌پذیر است. همچنین می‌توان با بهره‌گیری مؤثر از رواناب‌ها نیز از جاری شدن بیش از حد آن‌ها در سطح کوچه و خیابان جلوگیری کرد. برای بهره‌بردن هرچه بهتر از رواناب‌های ایجادشده باید شبکه‌های هدایت و جمع‌آوری رواناب که در منطقه قرار دارد، به‌خوبی ارزیابی شود و در صورت بروز هرگونه مشکل، آن مشکل برطرف شود (۱۶). در زمان‌های گذشته به‌منظور مدیریت سیلاب‌های شهری، رویکردهایی که اتخاذ می‌شد، بر اساس جمع‌آوری، هدایت و دفع سیلاب‌ها بود. اما امروزه برای مدیریت سیلاب‌های شهری سعی می‌شود تدابیری اتخاذ شود که بیشترین هماهنگی را با فرایندهای چرخه طبیعی آب‌های سطحی داشته باشد. هدف از رویکردهای جدید و مدرن در مدیریت سیلاب‌های شهری، کنترل و کاهش سیلاب و انتقال آلودگی حاصل از آن است. این‌گونه رویکردها که در آن‌ها تأکید بر بیشترین هماهنگی با فرایندهای چرخه طبیعی آب‌های سطحی است، به اصطلاح رویکردهای "توسعه کم اثر" (Low Impact Development) می‌گویند. کشورهای توسعه‌یافته از این رویکرد به‌عنوان روشی مهم و راهبردی در راستای مدیریت سیلاب‌های شهری استفاده می‌کنند (۲۰). به‌طور کلی با اتخاذ رویکردهای مناسب برای مدیریت سیلاب‌های شهری و درنظرگرفتن همه‌جوانب و شناسایی و برطرف کردن عوامل آسیب‌زا نه تنها می‌توان خطرات احتمالی را کاهش داد؛ بلکه این امکان را فراهم آورد که از این رواناب به بهترین نحو در راستای توسعه شهری استفاده شود.

مدل‌های حوضه‌های آبخیز، تأثیر بسزایی در فرایند تصمیم‌گیری برای تحلیل محدوده وسیعی از موضوعات کمی و کیفی آب دارند. این مدل‌ها نقش اصلی را در اجرای موفق برنامه‌های مدیریت حوضه، به‌وسیله بیان راهکارهایی برای ارزیابی مشارکت نسبی منابع مختلف در تخریب ایفا می‌کنند (۳). بر اساس نظرات مهندسی، مسائل مربوط به زهکشی شهری

به دو زمینه عمده پیش‌بینی حجم سیلاب و طراحی شبکه تقسیم می‌شوند. طی دهه‌های اخیر در زمینه مدل‌های پیش‌بینی حجم سیلاب، تلاش‌های چشمگیری صورت گرفته است و منجر به تهیه مدل‌هایی شده است که علاوه بر قابلیت‌های دیگر می‌توانند حجم و شدت سیلاب را نیز برآورد کنند. مدل‌های طراحی نیز به دو دسته مدل‌های شبیه‌سازی رفتاری و مدل‌های بهینه‌سازی رفتاری تقسیم می‌شوند و فقط با در نظر گرفتن ملاحظات هیدرولیکی کار طراحی شبکه‌ها را انجام می‌دهند. در مدل‌های یادشده عموماً شکل شبکه برای طراحی از قبل مشخص است و شیب اعضاء شبکه به وسیله طراح در مراحل طراحی مشخص می‌شود. اساسی‌ترین هدف در این مدل‌ها، مشخص کردن کوچک‌ترین ابعاد اعضاء شبکه است؛ به طوری که شبکه بتواند حجم رواناب را با در نظر گرفتن ملاحظات خاص از خود عبور دهد. در سالیان اخیر مدل‌های شبیه‌ساز متعددی تهیه شده است (۱۷). در رابطه با شبیه‌سازی و برآورد رواناب، مدل‌ها و نرم‌افزارهای گوناگونی موجود است. از مدل‌های قدیمی‌تر مانند BRRL، MIDUSS 98 و WALLRUS گرفته تا مدل‌های جدیدتر مانند HEC-HMS، HEC1، HEC2 و SWMM که به عنوان یکی از مهم‌ترین و کارآمدترین مدل‌های شبیه‌سازی رواناب به حساب می‌آید، همگی یاریگر پژوهشگران این عرصه هستند. در کنار مدل‌های یادشده، شرکت Bently نیز نرم‌افزارهای جدیدی همچون StormCAD، Civil Storm و SewerGEMS را ارائه کرده است که امروزه توسط متخصصان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

#### پیشینه تحقیق

بدیعی‌زاده و همکاران (۱۳۹۲)، به منظور مدیریت سیلاب شهری در شهر گرگان از نرم‌افزار SWMM بهره بردند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل SWMM دقت مورد نیاز را برای شبیه‌سازی رواناب شهری دارد و از این مدل می‌توان برای طرح‌های مدیریت رواناب شهری و طراحی شبکه جمع‌آوری و

دفع آب‌های سطحی استفاده کرد (۵). جباری ملایری و عابدی کوپایی (۱۳۹۵)، در مطالعه‌ای به برآورد رواناب شهری به منظور استفاده در فضای سبز شهری با استفاده از مدل HEC-HMS در منطقه ۶ اصفهان پرداختند. در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب، نرم‌افزار HEC-HMS مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از این مدل مقدار رواناب تولیدی و حجم سیلاب اندازه‌گیری شد. همچنین برای مشخص کردن ویژگی‌های فیزیکی حوضه از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده، دبی استحصال آب باران و تولید رواناب‌های سطحی ۲۹ مترمکعب بر ثانیه است که با ذخیره‌سازی در مخازن می‌توان در آبیاری فضای سبز از آن بهره برد (۱۰). زبردست و روشنی (۱۳۹۷)، پژوهشی را برای تعیین ظرفیت استفاده از بارش در سطح مناطق شهری به منظور استفاده در توسعه فضای سبز شهری در بخش جنوب شهر مشهد انجام دادند. در این پژوهش به منظور محاسبه حجم رواناب و هیدروگراف سیلاب از نرم‌افزار CivilStorm استفاده شد. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی حوضه به منظور بررسی جریان رواناب سطحی و امکان طراحی شبکه جمع‌آوری رواناب و تأسیسات مورد نیاز با نرم‌افزار CivilStorm امکان‌پذیر است (۲۸). ناهید و همکاران (۱۴۰۰)، در مطالعه‌ای با استفاده از مدل SWMM، سیلاب حاصل از بارش برای منطقه چهار تهران در دوره بازگشت‌های دو، پنج و ده سال را شبیه‌سازی کردند. پس از آن دو طرح از بهترین راهکارهای مدیریتی (BMP) تحت سناریو جوی باغچه و بام سبز و ترکیب هر دو سناریو برای کنترل بیشینه رواناب از نظر کمی انجام شده است و در نهایت مقدار کارایی آن‌ها در کاهش حجم رواناب خروجی از حوضه مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج، استفاده از (BMP) در کاهش حجم رواناب خروجی مؤثر است (۱۹). رفیعی و همکاران (۱۴۰۱)، برای بررسی سیلاب شهری در شهر لار، عملکرد سه مدل SewerGEMS، SWMM و ASSA را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل SWMM به منظور شبیه‌سازی سیلاب در این منطقه از دقت بیشتری برای مدیریت رواناب حوضه‌های

شهری نسبت به دو مدل دیگر برخوردار است (۲۱).

یانگ و همکاران (۲۰۲۳) پژوهشی را به منظور بررسی عملکرد روش‌های توسعه کم‌اثر و مدل SWMM برای یک جامعه کوچک مقیاس در شهر تیانجین در شمال چین انجام دادند. در این پژوهش آزمایش‌های روش‌های توسعه کم‌اثر برای واسنجی مدل SWMM انجام شد و یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه، با جفت کردن SWMM و الگوریتم ژنتیک ایجاد شد. نتایج نشان داد این مدل بهینه‌سازی می‌تواند به بهینه‌سازی تمام اهداف دست یابد (۲۷). جادوا و میسرا (۲۰۲۳)، به منظور محاسبه رواناب و طراحی شبکه در منطقه گاندیناگر هندوستان از نرم‌افزار CivilStorm و روش استدلالی استفاده کردند. آن‌ها اظهار داشتند که حوضه آبریز، ضریب رواناب و شدت بارندگی از عوامل کلیدی در طراحی شبکه محسوب می‌شوند (۱۱). ژانگ و همکاران (۲۰۲۳)، در مطالعه‌ای به تحلیل سیلاب منطقه‌ای در فرایند شهرنشینی بر اساس مدل SWMM پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که ابتدا با گسترش شهرنشینی، نفوذناپذیری افزایش می‌یابد و با افزایش نفوذپذیری از ۴۵ به ۷۰ درصد، بارندگی ایجادشده برای هدایت و تخلیه بیشتر به شبکه زهکشی وابسته می‌شود (۲۹). ژائو و همکاران (۲۰۲۳)، مطالعه‌ای را تحت عنوان شبیه‌سازی فرایند سیلاب شهری بر اساس مدل ترکیبی LSTM-SWMM انجام دادند. این مطالعه یک مدل ترکیبی جدید را پیشنهاد می‌کند که مزایای مدل SWMM و شبکه عصبی LSTM را برای اولین بار ادغام می‌کند. هدف از این مطالعه ساخت یک مدل کارآمد و سریع است که مکانیسم فیزیکی را در نظر می‌گیرد تا به طور مؤثر سیلاب‌های شهری را شبیه‌سازی کند. نتایج نشان داد که ارتباط خوبی بین فرایند تخلیه شبیه‌سازی شده مدل LSTM-SWMM فرایند تخلیه مشاهده‌شده در طول دوره‌های آزمایشی است که منعکس‌کننده فرایند رواناب واقعی بارندگی است (۳۰).

از مطالعات یادشده می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی بارش - رواناب می‌تواند از جنبه‌های مختلف مانند پیش‌بینی و مدیریت سیلاب، برنامه‌ریزی و

تجزیه و تحلیل و طراحی شبکه‌های زهکش شهری و کاهش خطرات ناشی از سیلاب دارای اهمیت باشد و استفاده از این مدل‌ها بسیار مفید است.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی بارش - رواناب در برآورد هیدروگراف سیلاب شهری شهر میناب بر اساس حالت‌های مختلف زیرحوضه‌بندی و تعداد زیرحوضه‌ها با در نظر گرفتن منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی (Intensity - Duration - Frequency Curves) و بررسی و شبیه‌سازی تأثیر روش‌های مختلف محاسبه زمان تمرکز در هیدروگراف خروجی، با بهره‌گیری از نرم‌افزار SewerGEMS است. جنبه جدید بودن این طرح بررسی همزمان حوضه‌بندی و تعداد زیرحوضه‌ها و تأثیر روش‌های مختلف محاسبه زمان تمرکز بر شبیه‌سازی هیدروگراف شهری شهر میناب با بهره‌گیری از نرم‌افزار SewerGEMS است. در حوضه‌های شهری عموماً نقاط خروجی زیرحوضه‌ها در اثر عملیات عمرانی مسدود شده و یا در اثر سایر موارد تخریب می‌شود که باعث تجمع زیرحوضه‌های بالادست در زیرحوضه‌های پایین دست شده و در نهایت باعث افزایش دبی اوج رواناب می‌شود که در این پژوهش تأثیر تجمع زیرحوضه‌های کوچک به زیرحوضه‌های بزرگ‌تر بر مقدار دبی اوج و حجم رواناب بررسی شده است که در پژوهش‌های قبلی این مورد در نظر گرفته نشده است. از طرفی دقت کارایی روش‌های مختلف تخمین زمان تمرکز و تأثیر آن بر روی مقدار دبی اوج رواناب و حجم رواناب در زیرحوضه‌های کوچک شهری بررسی نشده که از دیگر نوآوری‌های این پژوهش است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

شهر میناب، یکی از شهرهای استان هرمزگان در جنوب کشور ایران و مرکز شهرستان میناب است. این شهر سرزمینی جلگه‌ای است و با طول جغرافیایی  $4^{\circ} 57'$  شرقی و عرض جغرافیایی  $08^{\circ} 27'$  شمالی در ساحل شمالی تنگه

### تعیین ضریب رواناب

بر اساس بازدیدهای میدانی متعدد از منطقه مورد مطالعه و از آنجایی که بخش عمده منطقه مورد مطالعه به صورت خاکی است و درصد کمتری را آسفالت پوشش می‌دهد و با استفاده از جداول مربوطه و نظرات کارشناسی در این پژوهش، مقدار ضریب رواناب برابر ۰/۱۵ در نظر گرفته شد.

### نرم‌افزار SewerGEMS

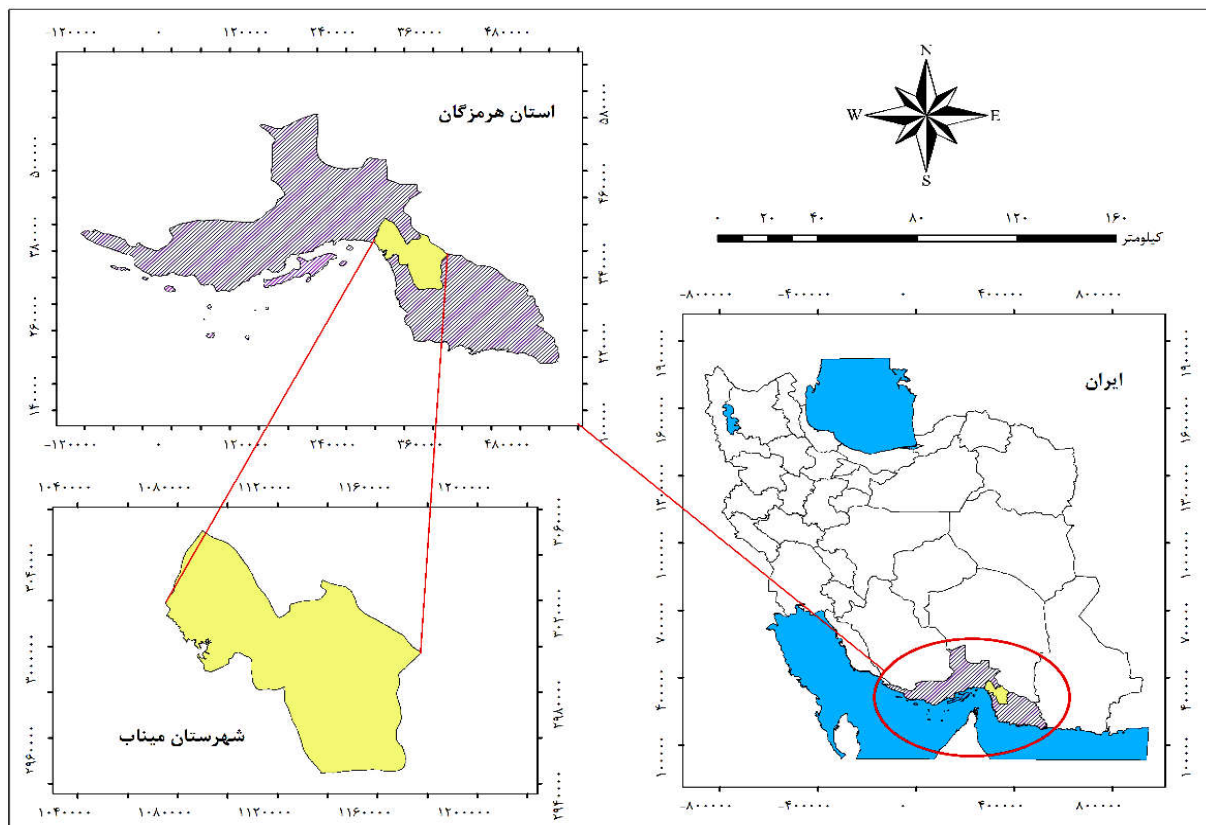
SewerGEMS یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای شرکت بتتلی و از نرم‌افزارهای قوی در مدل‌سازی فاضلاب و آب‌های سطحی است. یکی از ویژگی‌های مهم این نرم‌افزار، آسان بودن کار با آن و درعین حال قدرتمند بودن آن است. این نرم‌افزار به مهندسان آب و فاضلاب کمک می‌کند تا بتوانند در مدت زمان کوتاهی سیستم‌های دقیق و هوشمندی طراحی کرده و درعین حال هزینه‌ها را تا حد امکان کاهش دهند. این مدل با پیشنهادهای راهبردی خود در طرح‌های مختلف، کار مهندسان را بسیار آسان کرده و در وقت و انرژی آن‌ها صرفه‌جویی می‌کند (۱۸). همچنین نرم‌افزار SewerGEMS قابلیت همکاری با دو نرم‌افزار برجسته و شناخته شده ArcGIS و AutoCAD را فراهم می‌کند و محیط کاربری آسانی در اختیار کاربر قرار می‌دهد. در این نرم‌افزار امکان بهره‌گیری از الگوریتم استفاده شده در مدل SWMM و حل ضمنی معادلات کامل سنت - ونانت وجود دارد. نرم‌افزار SewerGEMS از حل‌کننده عددی (Implicit (SewerGEMS Dynamic Wave) استفاده می‌کند که بر اساس آن، معادلات سنت - ونانت را با بهره‌گیری از روی عددی ضمنی ارائه شده توسط شرکت بتتلی طبق مدل FLDWAV که از طرف سرویس آب‌وهوای آمریکا (National Weather Service) توسعه داده شده است، حل می‌کند. معادلات سنت - ونانت از دو معادله پیوستگی و معادله ممتوم تشکیل شده است. معادلات (۱) و (۲) به ترتیب معادله پیوستگی و مومتوم را بیان می‌کنند (۶). در این پژوهش به منظور

هرمز واقع شده است. ارتفاع متوسط این شهر از سطح دریا ۵۰ متر است. نقشه‌های مربوط به شهر میناب در شکل ۱ و ۲ ارائه شده است. شیب عمومی زمین در گستره شهر میناب از وضعیت پستی و بلندی‌های زمین تبعیت می‌کند. قسمت‌های شرقی شهر که چسبیده به ارتفاعات است، بسیار پرشیب بوده که به سمت غرب و جنوب غربی از ارتفاعات آن کاسته شده و به کمتر از یک درصد می‌رسد و تا سواحل تنگه هرمز امتداد می‌یابد. جهت عمومی شیب در نیمه شمالی به سمت غرب است؛ ولی در نیمه جنوبی شهر به سمت جنوب امتداد یافته است. شکل ۳ وضعیت شیب منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

به منظور بررسی آمار و اطلاعات هواشناسی از آمار و اطلاعات ایستگاه هواشناسی میناب استفاده خواهد شد. ایستگاه هواشناسی میناب که از نوع ایستگاه‌های سینوپتیک محسوب می‌شود، در طول جغرافیایی ۰۶° ۵۷ شرقی و عرض جغرافیایی ۰۵° ۲۷ شمالی قرار دارد و با ۳۰ متر ارتفاع از سطح دریا نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به منطقه مورد مطالعه محسوب می‌شود. همچنین اطلاعات مربوط به منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی از گزارش شرکت مهندسی مشاور شهرداری میناب که کار مطالعه و طراحی شبکه‌های آب‌های سطحی شهر میناب را انجام داده است، اقتباس شده است.

### تعیین زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه

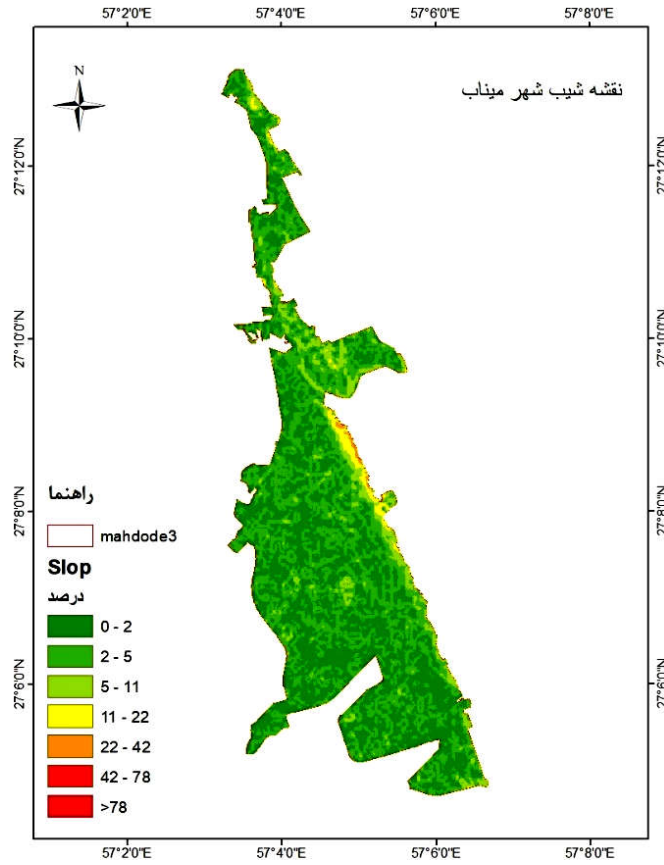
به طور کلی مشخص کردن حد زیرحوضه‌های شهری به دلیل اینکه حوضه‌های شهری دارای خط‌الرأس و خط‌القعر مشخصی برای تعیین مرز نیستند، سخت است (۲۱). در این پژوهش با بازدیدهای میدانی متعدد از منطقه مورد مطالعه و آشنایی با تخلیه‌گاه‌های منطقه و همچنین با بهره‌گیری از نظرات کارشناسی متخصصان و کمک گرفتن از نرم‌افزارهای ArcGIS، Global Mapper، AutoCAD و GoogleEarth Pro زیرحوضه‌های شهری تعیین شد که در شکل ۴ قابل مشاهده است.



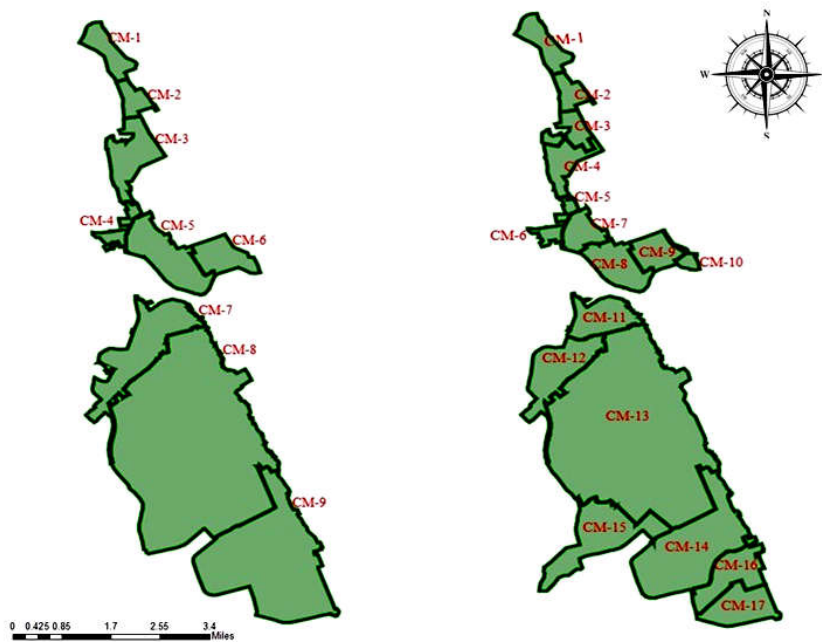
شکل ۱. موقعیت شهرستان میناب بر روی نقشه ایران



شکل ۲. موقعیت منطقه مورد مطالعه در (GoogleEarthPro)



شکل ۳. نقشه شیب شهر میناب



سیستم‌های جمع‌آوری و دفع رواناب‌های حاصل از بارندگی شناخته می‌شود. این روش یکی از روش‌های محاسباتی استاندارد در سطح جهانی به‌شمار می‌رود (۱۱). در صورتی که شاهد بارندگی با شدت  $i$  روی حوضه مد نظر باشیم و مساحت حوضه برابر  $A$  باشد و شدت بارندگی ثابت و مدت‌زمان بارندگی برابر با زمان تمرکز حوضه یا بیشتر از آن در نظر گرفته شود و فرض شود که بارندگی همه سطح مد نظر را پوشش داده باشد، بیشینه دبی رواناب بر اساس ضریب  $C$  برابر است با:

$$Q = \frac{1}{36} CiA \quad (4)$$

که در این معادله،  $i$  شدت بارندگی (سانتی‌متر بر ساعت)،  $A$  سطح حوضه (هکتار)،  $C$  ضریب رواناب و  $Q$  بیشینه دبی رواناب (مترمکعب بر ثانیه) هستند. در صورتی که شدت بارندگی و مساحت حوضه به ترتیب بر حسب میلی‌متر در ساعت و کیلومتر مربع باشند، دبی خروجی به صورت معادله (۵) خواهد بود:

$$Q = 0.278 CiA \quad (5)$$

#### روش‌های محاسبه زمان تمرکز

در این پژوهش به منظور مقایسه تأثیر روش‌های مختلف محاسبه زمان تمرکز روی هیدروگراف سیلاب و مقدار دبی اوج و حجم رواناب تولیدی از سه روش کریچ، برنس‌بای - ویلیامز و کارتر استفاده شد. معادله‌های (۵)، (۶) و (۷) به ترتیب بیانگر روش‌های کریچ، برنس‌بای - ویلیامز و کارتر است. مقادیر به دست آمده زمان تمرکز که در جداول ۲، ۳، ۴ و ۵ برای این سه روش ارائه شده است، توسط نرم‌افزار محاسبه شده است (۱).

$$t_c = 0.0195L^{0.77}S^{-0.385} \quad (5)$$

که در آن  $t_c$  زمان تمرکز (min)،  $L$  دورترین فاصله سطح مورد زهکشی تا محل خروجی (m)،  $S$  شیب سطح زهکشی شده در جهت حرکت آب (اعشار) است.

$$t_c = \frac{0.96L^{1.2}}{H^{0.2}A^{0.1}} \quad (6)$$

برآورد دبی اوج و حجم رواناب و همچنین بررسی کارایی مدل SewerGEMS در شبیه‌سازی بارش - رواناب در شهر میناب، به‌عنوان یک حوضه کوچک، از این مدل استفاده شد.

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAi - 0 \quad (2)$$

که در این معادلات  $A$  سطح مقطع عرضی جریان،  $Q$  بار جریان،  $t$  زمان،  $x$  محور طولی جریان،  $g$  شتاب گرانش،  $h$  عمق جریان و  $i$  شیب انرژی هستند (۶).

#### خطای پیوستگی (Continuity Error) مدل

خطای پیوستگی نشان‌دهنده همه خطاهای محاسباتی سیستم است که کل ورودی‌های سیستم، جریان‌های خروجی، تلفات جریان ناشی از سرریزها و تغییرات حجم را شامل می‌شود. به‌طور کلی در صورتی که خطای پیوستگی بیشتر از ۵ درصد باشد، در این صورت بیانگر این است که سیستم از نظر هیدرولیکی با چالش مواجه است و امکان دارد موتور هیدرولیک برای دستیابی به نتایج پایدار با مشکل مواجه شده باشد. معادله (۳) نحوه محاسبه خطای پیوستگی را نشان می‌دهد (۶).

$$\text{Continuity Error} = |(T_i - T_o - T_f - T_d)| / T_i \quad (3)$$

که در این معادله:

$T_i$ : حجم کل ورودی

$T_o$ : حجم کل خروجی

$T_f$ : حجم کل سرریز

$T_d$ : حجم کل تغییرات

#### برآورد حجم رواناب و دبی اوج

معادله استدلالی (Rational Method) به‌عنوان ساده‌ترین و رایج‌ترین روش برای محاسبه سیلاب شهری و ایجاد



مقایسه آن با نتایج حاصل از مدل امکان‌پذیر نیست و از آنجایی که در این پژوهش برای محاسبه رواناب از معادله استدلالی استفاده شده است و در این معادله تنها امکان تغییر ضریب رواناب امکان‌پذیر است، دقت مدل صرفاً با تغییر پارامتر ضریب رواناب تا رسیدن به کمترین خطای پیوستگی مدل سنجیده شده است.

### نتایج و بحث

در پژوهش حاضر ابتدا تأثیر تعداد و مساحت زیرحوضه‌ها روی دبی اوج و حجم رواناب با استفاده از زمان تمرکز محاسبه شده از روش کریپیچ و مدت‌زمان بارندگی شش‌ساعته با دوره بازگشت دوساله توسط نرم‌افزار SewerGEMS مورد بررسی قرار گرفت. برای انتخاب روش محاسبه زمان تمرکز، از آنجایی که خطای پیوستگی نرم‌افزار در هنگام استفاده از زمان تمرکز محاسبه شده توسط دو روش کریپیچ و برنس‌بای - ویلیامز به ترتیب ۰/۶ و ۰/۱ درصد بود و خطای پیوستگی این دو روش کمتر از روش کارتر بود، برای انتخاب روش مناسب محاسبه زمان تمرکز از بین روش کریپیچ و برنس‌بای - ویلیامز، بین داده‌های به دست آمده دبی خروجی از خروجی ۱ (OutFall-1)، خروجی ۲ (OutFall-2) و خروجی ۳ (OutFall-3) در سه زیرحوضه ۱، ۲ و ۳ هنگام استفاده از زمان تمرکز محاسبه شده از روش‌های کریپیچ و برنس‌بای - ویلیامز، آزمون t-Test با سطح اطمینان ۹۵ درصد ( $p < 0.05$ ) و با استفاده از Excel 2013 انجام گرفت.

باتوجه به فرضیات آزمون t-Test و نتایج ارائه شده در جدول ۱ مشاهده شد که داده‌های دبی خروجی به دست آمده در سه زیرحوضه هنگام استفاده از دو روش کریپیچ و برنس‌بای-ویلیامز در سطح ۹۵ درصد اختلاف معناداری با یکدیگر ندارند. از طرفی باتوجه به اینکه زمان تمرکز محاسبه شده با روش برنس‌بای-ویلیامز در بعضی از زیرحوضه‌ها بیشتر از مدت بارندگی انتخابی یعنی ۶ ساعت بود و از این نظر نرم‌افزار برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و ارائه نتایج با محدودیت

در این معادله  $t_c$  زمان تمرکز (h)، A مساحت حوضه ( $Km^2$ )، L طول مسیر آبراهه (Km) و H اختلاف ارتفاع در دو طرف آبراهه است.

$$t_c = 1.7L_m^{0.6} S_m^{-0.3} \quad (V)$$

که در آن  $t_c$  زمان تمرکز (h)،  $L_m$  طول مسیر جریان (mi) و  $S_m$  شیب (ft/mi) است.

### آزمون t-Test

برای انتخاب روش مناسب محاسبه زمان تمرکز از بین روش کریپیچ و برنس‌بای - ویلیامز، بین داده‌های به دست آمده هیدروگراف خروجی از خروجی ۱ (OutFall-1)، خروجی ۲ (OutFall-2) و خروجی ۳ (OutFall-3) در سه زیرحوضه ۱، ۲ و ۳ هنگام استفاده از زمان تمرکز محاسبه شده از روش‌های کریپیچ و برنس‌بای - ویلیامز، آزمون t-Test با سطح اطمینان ۰/۰۵ (۹۵ درصد) و با استفاده از Excel 2013 انجام گرفت و بر اساس فرضیات آزمون t-Test که بیان می‌دارد اگر  $t_{critical}$  بزرگ‌تر از  $t_{experimental}$  باشد، در این صورت بین داده‌های دو گروه تفاوت معناداری وجود ندارد و اگر  $t_{critical}$  کوچک‌تر از  $t_{experimental}$  باشد، بین داده‌های دو گروه تفاوت معناداری وجود دارد، ارزیابی صورت پذیرفت.

### محدودیت‌های پژوهش

از جمله محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- عدم وجود شبکه جمع‌آوری رواناب به شکل مناسب و کامل در سطح شهر میناب و فراهم نبودن شرایط برای برآورد رواناب در هر زیرحوضه و مقایسه آن با نتایج حاصل از مدل
- در دسترس نبودن اطلاعات و نقشه‌های فیزیوگرافی منطقه

### اعتبارسنجی مدل

باتوجه به اینکه منطقه مورد مطالعه فاقد شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی به صورت مناسب و کامل است و به این دلیل اندازه‌گیری رواناب حاصل از بارندگی در هر زیرحوضه و

جدول ۱. نتایج حاصل از انجام آزمون t-Test بین داده‌های حاصل از روش کریپیج و برنس‌بای-ویلیامز

نتیجه	t critical	t experimental	سطح اطمینان	روش محاسبه زمان تمرکز	خروجی
تفاوت معنادار وجود ندارد	۲/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۵	کریپیج برنس‌بای-ویلیامز	۱ خروجی
تفاوت معنادار وجود ندارد	۲/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۵	کریپیج برنس‌بای-ویلیامز	۲ خروجی
تفاوت معنادار وجود ندارد	۲/۰۱	۰/۱۱	۰/۰۵	کریپیج برنس‌بای-ویلیامز	۳ خروجی

مساحت زیر حوضه‌ها، منطقه مورد مطالعه به دو حالت هفده زیر حوضه و نه زیرحوضه مطابق شکل ۴ تقسیم و شبیه‌سازی انجام شد و مقدار دبی اوج رواناب و حجم رواناب محاسبه شد. در این مقایسه مطابق شکل ۵ و ۶ و جدول ۲ و ۳ نتایج نشان داد با افزایش مساحت زیرحوضه‌ها دبی اوج رواناب و همچنین حجم رواناب تولیدی افزایش خواهد یافت. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۲، حجم کل رواناب تولیدی در حالت هفده زیرحوضه حدود ۱۲۳۹۳۸ مترمکعب و بیشینه دبی اوج رواناب حدود ۲۴۰۰ لیتر بر ثانیه و حجم کل رواناب تولیدی در حالت نه زیرحوضه نیز که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده‌است، حدود ۱۲۸۸۴۶ مترمکعب و بیشینه دبی اوج رواناب حدود ۲۸۸۴ لیتر بر ثانیه است؛ بنابراین طبق نتایج جداول ۲ و ۳، حجم کل رواناب با افزایش مساحت زیرحوضه‌ها و کاهش تعداد آن‌ها به ۹ زیر حوضه حدود ۴ درصد افزایش یافته‌است و در همین شرایط بیشینه دبی اوج رواناب افزایش ۲۰ درصدی داشته است.

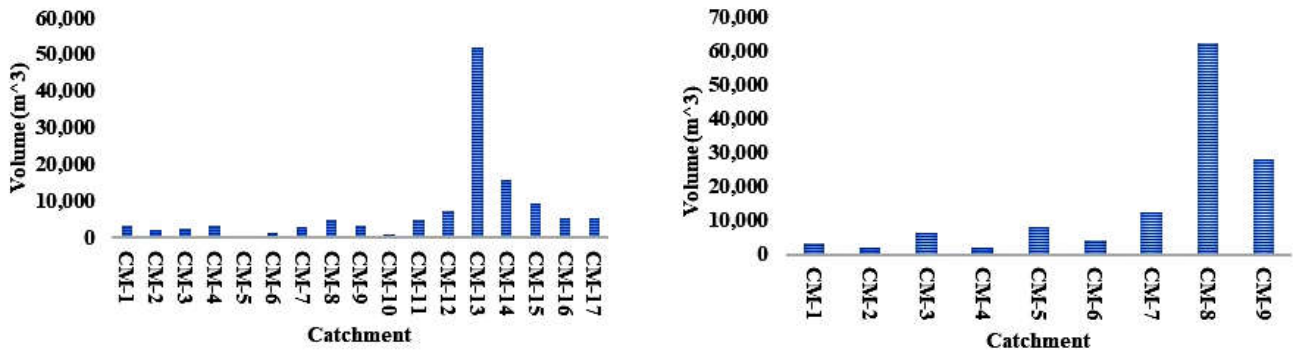
#### بررسی تأثیر روش‌های مختلف محاسبه زمان تمرکز روی

##### هیدروگراف خروجی سیلاب، دبی اوج و حجم رواناب

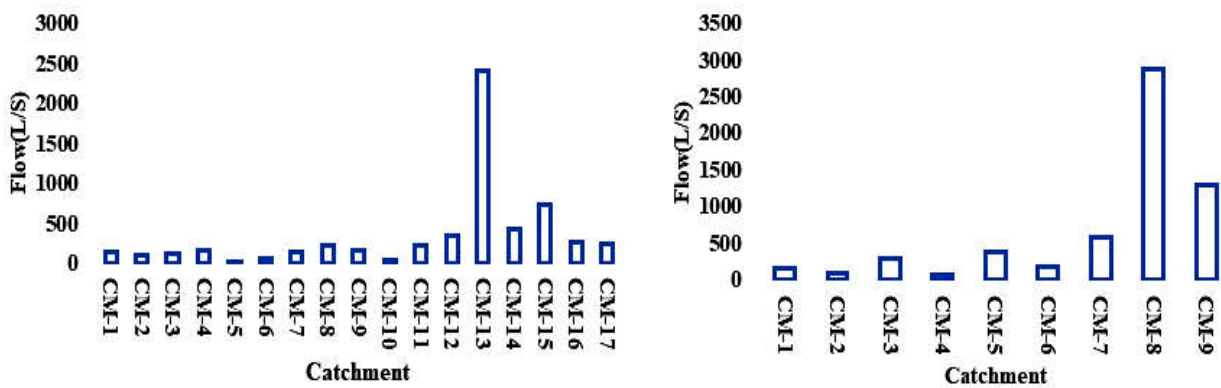
در بررسی بعدی سعی بر آن بود که تأثیر روش‌های مختلف محاسبه زمان تمرکز (کریپیج، برنس‌بای - ویلیامز و کارتر) روی هیدروگراف خروجی سیلاب، دبی اوج و حجم رواناب تولیدی با مدت بارندگی شش‌ساعته و دوره بازگشت دوساله مورد ارزیابی قرار گیرد. اما از آنجایی که زمان تمرکز محاسبه شده توسط روش برنس‌بای - ویلیامز و کارتر بیشتر از مدت بارندگی

مواجه بود و از آنجایی که روش کریپیج به‌عنوان یک روش کارآمد در محاسبه زمان تمرکز برای حوضه‌های کوچک به‌شمار می‌رود، برای محاسبه زمان تمرکز روش کریپیج انتخاب شد (۲۲). به‌دلیل اینکه بارندگی متداول در منطقه مورد مطالعه بارندگی شش‌ساعته است، در این پژوهش از این مدت بارندگی استفاده شد. همچنین چون در نظر است که مخازنی را برای ذخیره رواناب و استفاده از آن در محل (برای آبیاری فضای سبز) طراحی شود، در پژوهش حاضر بارندگی نرمال با دوره بازگشت دوساله در نظر گرفته شده‌است. در واقع قصد بر این است که از رواناب ذخیره شده طی مدت کوتاهی استفاده شود و بخشی از نیاز آبی فضای سبز در آن محدوده را تأمین کند. به همین دلیل بارندگی نرمال با دوره بازگشت دوساله می‌تواند گزینه مناسبی باشد و همچنین طراحی مخازن بر اساس بارندگی با دوره بازگشت دوساله از نظر اقتصادی باتوجه به هدف مد نظر به‌صرفه است.

قابل پیش‌بینی است که با بسته‌شدن خروجی زیرحوضه‌های کوچک‌تر و به‌هم پیوستن زیرحوضه‌ها و در نتیجه افزایش مساحت آن‌ها دبی اوج افزایش می‌یابد و مهار سیلاب دشوارتر می‌شود. برای نمونه در سیل‌هایی که سال ۱۳۹۸ در شهر شیراز اتفاق افتاد، این بحث مطرح بود که خروجی زیرحوضه‌های کوچک‌تر بسته شده و همه به یک زیرحوضه واحد تبدیل شده بودند؛ به همین دلیل دبی اوج و حجم سیلاب به یکباره افزایش یافته و خسارات فراوانی به‌جای گذاشت (۹). از این روی برای بررسی تأثیر تعداد و



شکل ۵. مقایسه حجم کل رواناب در دو حالت ۱۷ زیرحوضه و ۹ زیرحوضه



شکل ۶. مقایسه حداکثر دبی اوج رواناب در دو حالت ۱۷ و ۹ زیرحوضه

جدول ۲. نتایج حالت ۱۷ زیرحوضه با دوره بازگشت ۲ ساله، مدت بارندگی ۶ ساعته و زمان تمرکز محاسبه شده با روش کریچ

زیرحوضه	مساحت (ha)	ضریب رواناب (روش استدلالی)	شیب (m/m)	زمان تمرکز (h)	حداکثر دبی اوج (L/S)	حجم کل رواناب (m³)
زیرحوضه ۱	۷۵/۵۸	۰/۱۵	۰/۰۰۴	۱/۸۵	۱۴۷/۲۸	۳۱۲۹
زیرحوضه ۲	۴۷/۱۷	۰/۱۵	۰/۰۰۸	۱/۶	۹۲/۳۴	۱۹۵۲/۸
زیرحوضه ۳	۵۹/۵۷	۰/۱۵	۰/۰۰۵	۱/۶۸	۱۱۶/۰۳	۲۴۶۶/۲
زیرحوضه ۴	۸۲/۵۷	۰/۱۵	۰/۰۰۴	۳	۱۵۸/۸۷	۳۴۱۸/۴
زیرحوضه ۵	۱۱/۵۵	۰/۱۵	۰/۰۱	۰/۷۳	۲۳/۰۵	۴۷۸/۲
زیرحوضه ۶	۲۹/۶۵	۰/۱۵	۰/۰۰۵	۱/۶۵	۵۷/۲۸	۱۲۲۷/۴
زیرحوضه ۷	۶۸/۸۲	۰/۱۵	۰/۰۰۶	۱/۷۵	۱۳۳/۹۹	۲۸۴۹/۳
زیرحوضه ۸	۱۱۶/۰۳	۰/۱۵	۰/۰۰۶	۲/۳	۲۲۲/۵۱	۴۸۰۳/۵
زیرحوضه ۹	۷۶/۹۲	۰/۱۵	۰/۰۰۶	۰/۷۷	۱۶۴/۹۶	۳۱۸۴/۵

جدول ۲. نتایج حالت ۱۷ زیرحوضه با دوره بازگشت ۲ ساله، مدت بارندگی ۶ ساعته و زمان تمرکز محاسبه شده با روش کریپچ (ادامه)

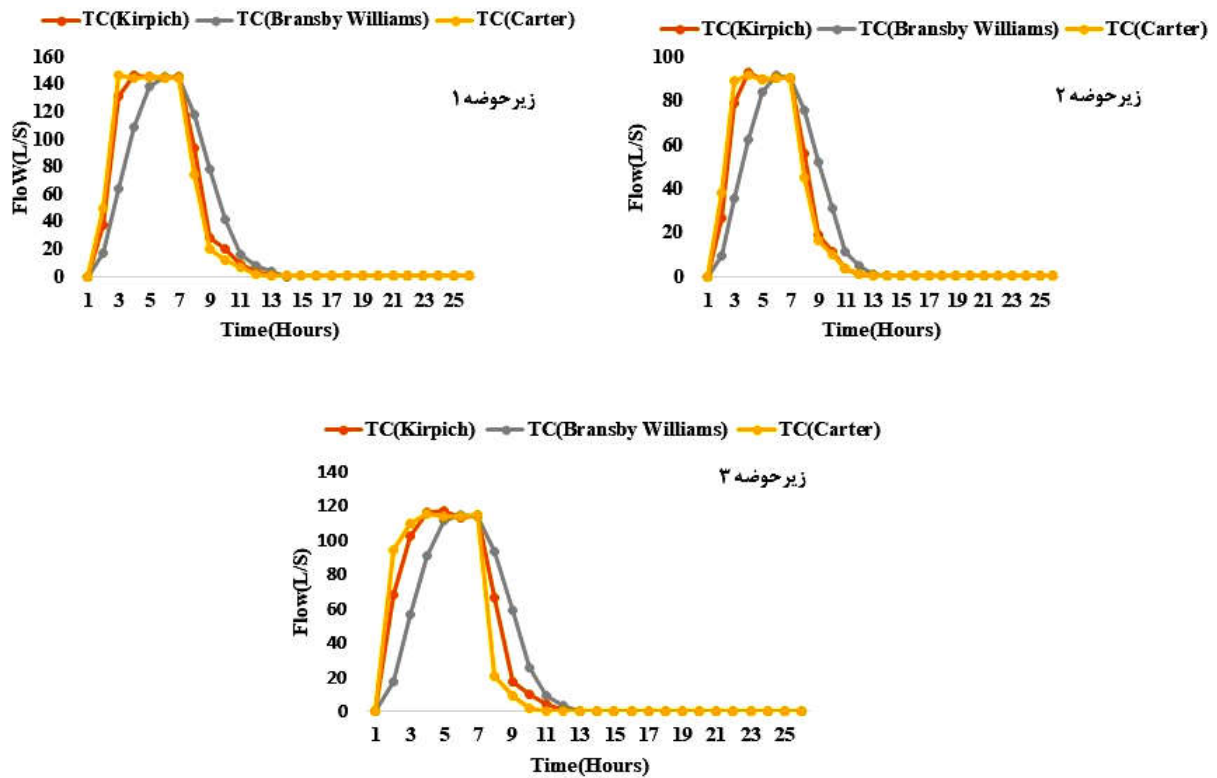
زیرحوضه	مساحت (ha)	ضریب رواناب (روش استدلالی)	شیب (m/m)	زمان تمرکز (h)	حداکثر دبی اوج (L/S)	حجم کل رواناب (m <sup>3</sup> )
زیرحوضه ۱۰	۱۹/۰۸	۰/۱۵	۰/۰۰۹	۰/۷۵	۳۹/۰۸	۷۹۰
زیرحوضه ۱۱	۱۱۶/۷۷	۰/۱۵	۰/۰۰۴	۳/۱۷	۲۲۴/۹۳	۴۸۳۴/۲
زیرحوضه ۱۲	۱۷۵/۶۲	۰/۱۵	۰/۰۰۴	۳/۵۲	۳۳۸/۴۹	۷۲۷۰/۹
زیرحوضه ۱۳	۱۲۵۷/۲۴	۰/۱۵	۰/۰۰۵	۵/۰۸	۲۳۹۹/۸۴	۵۲۰۴۹/۸
زیرحوضه ۱۴	۳۷۷/۴۱	۰/۱۵	۰/۰۰۴	۴/۴۲	۴۲۷/۱۷	۱۵۶۲۴/۸
زیرحوضه ۱۵	۲۲۲/۵۷	۰/۱۵	۰/۰۰۵	۲/۷۲	۷۲۶/۴	۹۲۱۴/۳
زیرحوضه ۱۶	۱۳۲/۸۲	۰/۱۵	۰/۰۰۴	۳/۱۲	۲۵۵/۱۱	۵۴۹۸/۷
زیرحوضه ۱۷	۱۲۴/۳	۰/۱۵	۰/۰۰۵	۲/۷۳	۲۳۸/۹۵	۵۱۴۵/۹

جدول ۳. نتایج حالت ۹ زیرحوضه با دوره بازگشت ۲ ساله، مدت بارندگی ۶ ساعته و زمان تمرکز محاسبه شده با روش کریپچ

زیرحوضه	مساحت (ha)	ضریب رواناب (روش استدلالی)	شیب (m/m)	زمان تمرکز (h)	حداکثر دبی اوج (L/S)	حجم کل رواناب (m <sup>3</sup> )
زیرحوضه ۱	۷۵/۵۸	۰/۱۵	۰/۰۰۴	۱/۸۵	۱۴۵/۰۴	۳۱۲۹
زیرحوضه ۲	۴۷/۱۷	۰/۱۵	۰/۰۰۸	۱/۶	۹۰/۵	۱۹۵۲/۸
زیرحوضه ۳	۱۴۱/۶۵	۰/۱۵	۰/۰۰۳	۳/۴۵	۲۷۲/۹۵	۵۸۶۴/۴
زیرحوضه ۴	۴۰/۴۱	۰/۱۵	۰/۰۱	۱/۷۵	۷۷/۵۶	۱۶۷۳/۱
زیرحوضه ۵	۱۸۴/۷۶	۰/۱۵	۰/۰۰۶	۲/۶۵	۳۵۵/۱۲	۷۶۴۹/۱
زیرحوضه ۶	۹۵/۲۲	۰/۱۵	۰/۰۰۷	۱/۵۸	۱۸۲/۵۵	۳۹۴۲/۱
زیرحوضه ۷	۲۷۹/۴۷	۰/۱۵	۰/۰۱	۳/۷۵	۵۴۰/۱۵	۱۱۵۷۰/۲
زیرحوضه ۸	۱۴۱۶/۵۶	۰/۱۵	۰/۰۰۵	۵/۰۸	۲۷۰۴/۲۷	۵۸۶۴۵/۴
زیرحوضه ۹	۶۳۶/۸۹	۰/۱۵	۰/۰۰۵	۳/۳۸	۱۲۲۳/۰۵	۲۶۳۶۷/۲

هیدروگراف خروجی سیلاب و دبی اوج و حجم رواناب مورد ارزیابی قرار گرفتند. طبق این بررسی و باتوجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، میزان خطای پیوستگی هنگام استفاده از روش‌های کریپچ، برنس‌بای - ویلیامز و کارتر به ترتیب ۰/۶، ۰/۱ و ۱/۹ درصد بود.

شش ساعت بود، نرم‌افزار برای بررسی داده‌ها و شبیه‌سازی و اعلام نتایج با محدودیت مواجه شد. از این روی مطابق شکل ۷ تنها سه زیرحوضه که شرایط انجام مقایسه بین آن‌ها فراهم بود، جدا شده و تأثیر زمان تمرکز محاسبه شده با سه روش اعلامی روی



شکل ۷. مقایسه ۳ زیرحوضه با مدت زمان بارندگی ۶ ساعته و زمان تمرکز کریچ، برنس‌بای-ویلیامز و کارتر

جدول ۴. نتایج مقایسه ۳ زیرحوضه با مدت زمان بارندگی ۶ ساعته و زمان تمرکز کریچ، برنس‌بای-ویلیامز و کارتر

زیرحوضه	روش محاسبه زمان تمرکز	زمان تمرکز (h)	خطای پیوستگی (%)	شیب (m/m)	مساحت (ha)	ضریب رواناب	حداکثر دبی اوج (L/s)	حجم کل رواناب (m <sup>3</sup> )
	کریچ	۱/۸۵	۰/۶	۰/۰۰۴	۷۵/۵۸	۰/۱۵	۱۴۶/۲۳	۳۱/۲۹
زیرحوضه ۱	برنس‌بای-ویلیامز	۳/۶	۰/۱	۰/۰۰۴	۷۵/۵۸	۰/۱۵	۱۴۶/۰۶	۳۱/۲۹
	کارتر	۱/۳	۱/۹	۰/۰۰۴	۷۵/۵۸	۰/۱۵	۱۴۷/۰۲	۳۱/۲۹
	کریچ	۱/۶	۰/۶	۰/۰۰۸	۴۷/۱۷	۰/۱۵	۹۲/۹۶	۱۹۵۲/۸
زیرحوضه ۲	برنس‌بای-ویلیامز	۳/۸۵	۰/۱	۰/۰۰۸	۴۷/۱۷	۰/۱۵	۹۱/۴۱	۱۹۵۲/۸
	کارتر	۱/۱۷	۱/۹	۰/۰۰۸	۴۷/۱۷	۰/۱۵	۹۲/۹۲	۱۹۵۲/۸
	کریچ	۱/۶۸	۰/۶	۰/۰۰۵	۱۴۱/۶۵	۰/۱۵	۱۱۷/۱۱	۲۴۶/۲
زیرحوضه ۳	برنس‌بای-ویلیامز	۳/۴۸	۰/۱	۰/۰۰۵	۱۴۱/۶۵	۰/۱۵	۱۱۴/۸۵	۲۴۶/۲
	کارتر	۱/۲۲	۱/۹	۰/۰۰۵	۱۴۱/۶۵	۰/۱۵	۱۱۵/۲۵	۲۴۶/۲

آمده از روش برنس‌بای - ویلیامز است. همچنین خطای پیوستگی نیز در روش کارتر بیشتر از دو روش دیگر است. باتوجه به نتایج جداول ۵ و ۶، با تغییر مدت زمان بارندگی از شش ساعت به دوازده ساعت، حجم رواناب تولیدی افزایش و دبی اوج رواناب کاهش پیدا می‌کند که یکی از دلایل آن این است که با افزایش مدت بارندگی، شدت بارندگی کاهش و در نتیجه دبی اوج رواناب کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش مدت بارندگی به دلیل افزایش عمق بارندگی (مقدار)، حجم کل رواناب تولیدی افزایش می‌یابد. به طوری که حجم رواناب تولیدی و بیشینه دبی اوج رواناب در حالت هفده زیرحوضه با دوره بازگشت دوساله و مدت بارندگی شش ساعته و زمان تمرکز محاسبه شده توسط روش کریپچ، حدود ۱۲۳۹۳۸ مترمکعب و ۲۴۰۰ لیتر بر ثانیه بوده؛ درحالی که در همین شرایط و با تغییر مدت زمان بارندگی به دوازده ساعت، حجم رواناب تولیدی حدود ۱۶۷۰۴۷ مترمکعب و بیشینه دبی اوج رواناب حدود ۱۶۳۵ لیتر بر ثانیه است که نشان‌دهنده افزایش ۳۵ درصدی حجم کل رواناب تولیدی و کاهش ۴۷ درصدی بیشینه دبی اوج رواناب است. در حالت نه زیرحوضه نیز حجم رواناب تولیدی و بیشینه دبی اوج رواناب با دوره بازگشت دوساله و مدت بارندگی شش ساعته و زمان تمرکز محاسبه شده توسط روش کریپچ، حدود ۱۲۰۷۹۳ مترمکعب و ۲۷۰۴ لیتر بر ثانیه است که با تغییر زمان بارندگی به دوازده ساعت، حجم رواناب و بیشینه دبی اوج رواناب به حدود ۱۶۲۸۰۹ مترمکعب و ۱۸۳۸ لیتر بر ثانیه تغییر می‌یابد و بیانگر افزایش ۳۵ درصدی حجم کل رواناب و کاهش ۴۷ درصدی بیشینه دبی اوج است. همچنین بیشینه دبی اوج محاسبه شده برای حالت ۱۷ زیرحوضه هنگام استفاده از زمان تمرکز به روش‌های برنس‌بای - ویلیامز و کارتر به ترتیب حدود ۱۶۲۴ لیتر بر ثانیه و ۱۶۲۷ لیتر بر ثانیه است که نشان می‌دهد، روش برنس‌بای - ویلیامز و کارتر هر کدام حدود ۵/۰ درصد نسبت به روش کریپچ دبی اوج رواناب را کمتر محاسبه می‌کنند.

همچنین پس از محاسبه زمان تمرکز به سه روش یادشده مشخص شد که روش برنس‌بای - ویلیامز نسبت به روش کریپچ و کارتر مقدار زمان تمرکز را بیشتر محاسبه می‌کند و مقدار زمان تمرکز محاسبه شده توسط روش کارتر کمتر از دو روش دیگر است. علاوه بر آن براساس نتایج جدول ۴، گرچه در هر زیرحوضه به صورت مجزا مقدار بیشینه دبی اوج محاسبه شده با استفاده از سه روش تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند؛ اما در هر سه زیر حوضه بیشینه دبی اوج در هنگام استفاده از روش کارتر بیشترین و هنگام استفاده از روش برنس‌بای - ویلیامز کمترین مقدار را نشان می‌دهد.

### تغییر مدت بارندگی از ۶ ساعت به ۱۲ ساعت

در مرحله بعدی به منظور مقایسه تمام زیرحوضه‌ها از نظر تأثیر روش‌های مختلف محاسبه زمان تمرکز روی هیدروگراف خروجی سیلاب و همچنین دبی اوج و حجم رواناب تولیدی در دو حالت هفده زیرحوضه و نه زیرحوضه، مدت بارندگی از شش ساعت به دوازده ساعت تغییر یافت و برای حالت‌های مختلف شبیه‌سازی صورت پذیرفت و دبی و حجم رواناب محاسبه شد. در این بررسی که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است، برای حالت هفده زیرحوضه با دوره بازگشت دوساله و مدت بارندگی دوازده ساعت که زمان تمرکز با روش‌های کریپچ، برنس‌بای - ویلیامز و کارتر محاسبه شد، مقدار خطای پیوستگی به ترتیب ۰/۱، ۰ و ۰/۴ درصد به دست آمد. برای حالت نه زیرحوضه نیز با همان شرایط، هنگام استفاده از روش‌های کریپچ، برنس‌بای - ویلیامز و کارتر خطای پیوستگی مطابق جدول ۶ به ترتیب برابر ۰/۲، ۰ و ۰/۹ درصد به دست آمد.

نتایج ارائه شده در جدول ۵ و ۶ نشان می‌دهد باتوجه به میزان خطای پیوستگی، روش برنس‌بای - ویلیامز نسبت به سایر روش‌ها از دقت بیشتری در همه حالت‌ها برخوردار است. در مقایسه سه زیرحوضه با مدت بارندگی شش ساعته، بیشترین تخمین دبی اوج رواناب مربوط به استفاده از زمان تمرکز به دست آمده از روش کریپچ و کمترین تخمین مربوط به استفاده از زمان تمرکز به دست

جدول ۵. نتایج مقایسه حالت ۱۷ زیرحوضه با مدت زمان بارندگی ۱۲ ساعته و زمان تمرکز کریچ، برنس‌بای-ویلیامز و کارتر

زیرحوضه	روش محاسبه زمان تمرکز	زمان تمرکز (h)	خطای پیوستگی (%)	شیب (m/m)	مساحت (ha)	ضریب رواناب	حداکثر دبی اوج (L/s)	حجم کل رواناب (m <sup>3</sup> )
	کریچ	۱/۸۵	۰/۱	۰/۰۰۴	۷۵/۵۸	۰/۱۵	۹۸/۴۴	۴۲۱۷/۳
زیرحوضه ۱	برنس‌بای-ویلیامز	۳/۶	۰	۰/۰۰۴	۷۵/۵۸	۰/۱۵	۹۷/۹	۴۲۱۷/۳
	کارتر	۱/۳	۰/۴	۰/۰۰۴	۷۵/۵۸	۰/۱۵	۹۸/۰۱	۴۲۱۷/۳
	کریچ	۱/۶	۰/۱	۰/۰۰۸	۴۷/۱۷	۰/۱۵	۶۱/۳۵	۲۶۳۲
زیرحوضه ۲	برنس‌بای-ویلیامز	۳/۸۵	۰	۰/۰۰۸	۴۷/۱۷	۰/۱۵	۶۱/۵	۲۶۳۲
	کارتر	۱/۷۷	۰/۴	۰/۰۰۸	۴۷/۱۷	۰/۱۵	۶۱/۰۴	۲۶۳۲
	کریچ	۱/۶۸	۰/۱	۰/۰۰۵	۵۹/۵۷	۰/۱۵	۷۷/۲۲	۳۳۲۴
زیرحوضه ۳	برنس‌بای-ویلیامز	۳/۴۸	۰	۰/۰۰۵	۵۹/۵۷	۰/۱۵	۷۶/۹۹	۳۳۲۴
	کارتر	۱/۲۲	۰/۴	۰/۰۰۵	۵۹/۵۷	۰/۱۵	۷۷/۷۸	۳۳۲۴
	کریچ	۳	۰/۱	۰/۰۰۴	۸۲/۵۷	۰/۱۵	۱۰۷/۴۷	۴۶۰۷/۴
زیرحوضه ۴	برنس‌بای-ویلیامز	۶/۶۷	۰	۰/۰۰۴	۸۲/۵۷	۰/۱۵	۱۰۷/۰۲	۴۶۰۷/۴
	کارتر	۱/۹	۰/۴	۰/۰۰۴	۸۲/۵۷	۰/۱۵	۱۰۶/۷۵	۴۶۰۷/۴
	کریچ	۰/۷۳	۰/۱	۰/۰۱	۱۱/۵۵	۰/۱۵	۱۵/۵۶	۶۴۴/۵
زیرحوضه ۵	برنس‌بای-ویلیامز	۱/۷۳	۰	۰/۰۱	۱۱/۵۵	۰/۱۵	۱۵/۱۸	۶۴۴/۵
	کارتر	۰/۶۳	۰/۴	۰/۰۱	۱۱/۵۵	۰/۱۵	۱۵/۴۸	۶۴۴/۵
	کریچ	۱/۶۵	۰/۱	۰/۰۰۵	۲۹/۶۵	۰/۱۵	۳۸/۴۴	۱۶۵۴/۳
زیرحوضه ۶	برنس‌بای-ویلیامز	۳/۶۵	۰	۰/۰۰۵	۲۹/۶۵	۰/۱۵	۳۸/۵۷	۱۶۵۴/۳
	کارتر	۱/۲	۰/۴	۰/۰۰۵	۲۹/۶۵	۰/۱۵	۳۸/۸۲	۱۶۵۴/۳
	کریچ	۱/۷۵	۰/۱	۰/۰۰۶	۶۸/۸۲	۰/۱۵	۸۹/۲۳	۳۸۴۰/۴
زیرحوضه ۷	برنس‌بای-ویلیامز	۳/۸	۰	۰/۰۰۶	۶۸/۸۲	۰/۱۵	۸۹/۷۳	۳۸۴۰/۴
	کارتر	۱/۲۵	۰/۴	۰/۰۰۶	۶۸/۸۲	۰/۱۵	۸۹/۶	۳۸۴۰/۴

جدول ۵. نتایج مقایسه حالت ۱۷ زیرحوضه با مدت زمان بارندگی ۱۲ ساعته و زمان تمرکز کریچ، برنس‌بای-ویلیامز و کارتر (ادامه)

زیرحوضه	روش محاسبه زمان تمرکز	زمان تمرکز (h)	خطای پیوستگی (%)	شیب (m/m)	مساحت (ha)	ضریب رواناب	حداکثر دبی اوج (L/s)	حجم کل رواناب (m <sup>3</sup> )
	کریچ	۲/۳	۰/۱	۰/۰۰۶	۱۱۶/۰۳	۰/۱۵	۱۵۱/۷	۶۴۷۴/۳
زیرحوضه ۸	برنس‌بای-ویلیامز	۱۵/۵	۰	۰/۰۰۶	۱۱۶/۰۳	۰/۱۵	۱۵۰/۱	۶۴۷۴/۳
	کارتر	۱/۵۵	۰/۴	۰/۰۰۶	۱۱۶/۰۳	۰/۱۵	۱۵۲/۷۳	۶۴۷۴/۳
	کریچ	۰/۷۷	۰/۱	۰/۰۰۶	۷۶/۹۲	۰/۱۵	۱۰۵/۵۸	۴۲۹۲/۲
زیرحوضه ۹	برنس‌بای-ویلیامز	۱/۲۸	۰	۰/۰۰۶	۷۶/۹۲	۰/۱۵	۹۹/۷۸	۴۲۹۲/۲
	کارتر	۰/۶۵	۰/۴	۰/۰۰۶	۷۶/۹۲	۰/۱۵	۱۰۲/۷	۴۲۹۲/۲
	کریچ	۰/۷۵	۰/۱	۰/۰۰۹	۱۹/۰۸	۰/۱۵	۲۶/۴۲	۱۰۶۴/۹
زیرحوضه ۱۰	برنس‌بای-ویلیامز	۱/۶۵	۰	۰/۰۰۹	۱۹/۰۸	۰/۱۵	۲۵/۳	۱۰۶۴/۹
	کارتر	۰/۶۵	۰/۴	۰/۰۰۹	۱۹/۰۸	۰/۱۵	۲۶/۵۶	۱۰۶۴/۹
	کریچ	۳/۱۷	۰/۱	۰/۰۰۴	۱۱۶/۷۷	۰/۱۵	۱۵۱/۳۲	۶۵۱۵/۷
زیرحوضه ۱۱	برنس‌بای-ویلیامز	۶/۹	۰	۰/۰۰۴	۱۱۶/۷۷	۰/۱۵	۱۵۱/۶۷	۶۵۱۵/۷
	کارتر	۱/۹۸	۰/۴	۰/۰۰۴	۱۱۶/۷۷	۰/۱۵	۱۵۰/۹۲	۶۵۱۵/۷
	کریچ	۳/۵۲	۰/۱	۰/۰۰۴	۱۷۵/۶۲	۰/۱۵	۲۲۸/۲۶	۹۷۹۹/۹
زیرحوضه ۱۲	برنس‌بای-ویلیامز	۷/۵۸	۰	۰/۰۰۴	۱۷۵/۶۲	۰/۱۵	۲۲۷/۶۲	۹۷۹۹/۹
	کارتر	۲/۱۵	۰/۴	۰/۰۰۴	۱۷۵/۶۲	۰/۱۵	۲۲۸/۱۶	۹۷۹۹/۹
	کریچ	۵/۰۸	۰/۱	۰/۰۰۵	۱۲۵۷/۲۴	۰/۱۵	۱۶۳۳/۰۶	۷۰۱۵۴
زیرحوضه ۱۳	برنس‌بای-ویلیامز	۱۰/۷۷	۰	۰/۰۰۵	۱۲۵۷/۲۴	۰/۱۵	۱۶۲۳/۶	۷۰۱۵۴
	کارتر	۲/۸۷	۰/۴	۰/۰۰۵	۱۲۵۷/۲۴	۰/۱۵	۱۶۲۷/۱۷	۷۰۱۵۴
	کریچ	۴/۴۲	۰/۱	۰/۰۰۴	۳۷۷/۴۱	۰/۱۵	۲۹۱/۳۳	۲۱۰۵۹/۶
زیرحوضه ۱۴	برنس‌بای-ویلیامز	۹/۴۵	۰	۰/۰۰۴	۳۷۷/۴۱	۰/۱۵	۲۸۹/۰۸	۲۱۰۵۹/۶
	کارتر	۲/۵۷	۰/۴	۰/۰۰۴	۳۷۷/۴۱	۰/۱۵	۲۹۴/۰۸	۲۱۰۵۹/۶



جدول ۵. نتایج مقایسه حالت ۱۷ زیرحوضه با مدت زمان بارندگی ۱۲ ساعته و زمان تمرکز کریچ، برنس‌بای-ویلیامز و کارتر (ادامه)

زیرحوضه	روش محاسبه زمان تمرکز	زمان تمرکز (h)	خطای پیوستگی (%)	شیب (m/m)	مساحت (ha)	ضریب رواناب	حداکثر دبی اوج (L/s)	حجم کل رواناب (m <sup>3</sup> )
	کریچ	۲/۷۲	۰/۱	۰/۰۰۵	۲۲۲/۵۷	۰/۱۵	۴۸۹/۰۵	۱۲۴۱۹/۳
زیرحوضه ۱۵	برنس‌بای-ویلیامز	۵/۶۷	۰	۰/۰۰۵	۲۲۲/۵۷	۰/۱۵	۴۸۸/۳۳	۱۲۴۱۹/۳
	کارتر	۱/۷۷	۰/۴	۰/۰۰۵	۲۲۲/۵۷	۰/۱۵	۴۹۲/۸	۱۲۴۱۹/۳
	کریچ	۳/۱۲	۰/۱	۰/۰۰۴	۱۳۲/۸۲	۰/۱۵	۱۷۳/۱۷	۷۴۱۱/۳
زیرحوضه ۱۶	برنس‌بای-ویلیامز	۶/۶۷	۰	۰/۰۰۴	۱۳۲/۸۲	۰/۱۵	۱۷۱/۹۱	۷۴۱۱/۳
	کارتر	۱/۹۷	۰/۴	۰/۰۰۴	۱۳۲/۸۲	۰/۱۵	۱۷۱/۵۹	۷۴۱۱/۳
	کریچ	۲/۷۳	۰/۱	۰/۰۰۵	۱۲۴/۳	۰/۱۵	۱۶۲/۴۳	۶۹۳۵/۷
زیرحوضه ۱۷	برنس‌بای-ویلیامز	۶/۰۵	۰	۰/۰۰۵	۱۲۴/۳	۰/۱۵	۱۶۰/۹۷	۶۹۳۵/۷
	کارتر	۱/۷۷	۰/۴	۰/۰۰۵	۱۲۴/۳	۰/۱۵	۱۶۳/۳۷	۶۹۳۵/۷

جدول ۶. نتایج مقایسه حالت ۹ زیرحوضه با مدت زمان بارندگی ۱۲ ساعته و زمان تمرکز کریچ، برنس‌بای-ویلیامز و کارتر

زیرحوضه	روش محاسبه زمان تمرکز	زمان تمرکز (h)	خطای پیوستگی (%)	شیب (m/m)	مساحت (ha)	ضریب رواناب	حداکثر دبی اوج (L/s)	حجم کل رواناب (m <sup>3</sup> )
	کریچ	۱/۸۵	۰/۲	۰/۰۰۴	۷۵/۵۸	۰/۱۵	۹۹/۴۱	۴۲۱۷/۳
زیرحوضه ۱	برنس‌بای-ویلیامز	۳/۶	۰/۱	۰/۰۰۴	۷۵/۵۸	۰/۱۵	۹۷/۹	۴۲۱۷/۳
	کارتر	۱/۳	۰/۹	۰/۰۰۴	۷۵/۵۸	۰/۱۵	۹۷/۶۵	۴۲۱۷/۳
	کریچ	۱/۶	۰/۲	۰/۰۰۸	۴۷/۱۷	۰/۱۵	۶۱/۸۵	۲۶۳۲
زیرحوضه ۲	برنس‌بای-ویلیامز	۳/۸۵	۰/۱	۰/۰۰۸	۴۷/۱۷	۰/۱۵	۶۱/۵	۲۶۳۲
	کارتر	۱/۱۷	۰/۹	۰/۰۰۸	۴۷/۱۷	۰/۱۵	۶۰/۹۳	۲۶۳۲
	کریچ	۳/۴۵	۰/۲	۰/۰۰۳	۱۴۱/۶۵	۰/۱۵	۱۸۴/۳۸	۷۹۰۴/۲
زیرحوضه ۳	برنس‌بای-ویلیامز	۶/۹۵	۰/۱	۰/۰۰۳	۱۴۱/۶۵	۰/۱۵	۱۸۳/۸۳	۷۹۰۴/۲
	کارتر	۲/۱۲	۰/۹	۰/۰۰۳	۱۴۱/۶۵	۰/۱۵	۱۸۳/۲۱	۷۹۰۴/۲
	کریچ	۱/۷۵	۰/۲	۰/۰۱	۴۰/۴۱	۰/۱۵	۵۳/۱۱	۲۲۵۵/۱
زیرحوضه ۴	برنس‌بای-ویلیامز	۴/۶۸	۰/۱	۰/۰۱	۴۰/۴۱	۰/۱۵	۵۲/۵۵	۲۲۵۵/۱
	کارتر	۱/۲۵	۰/۹	۰/۰۱	۴۰/۴۱	۰/۱۵	۵۲/۲	۲۲۵۵/۱
	کریچ	۲/۶۵	۰/۲	۰/۰۰۶	۱۸۴/۷۶	۰/۱۵	۲۴۲/۰۹	۱۰۳۰۹/۷
زیرحوضه ۵	برنس‌بای-ویلیامز	۵/۸۸	۰/۱	۰/۰۰۶	۱۸۴/۷۶	۰/۱۵	۲۴۰/۱۳	۱۰۳۰۹/۷
	کارتر	۱/۷۲	۰/۹	۰/۰۰۶	۱۸۴/۷۶	۰/۱۵	۲۳۹/۸۳	۱۰۳۰۹/۷

جدول ۶. نتایج مقایسه حالت ۹ زیرحوضه با مدت زمان بارندگی ۱۲ ساعته و زمان تمرکز کریپچ، برنس‌بای-ویلیامز و کارتر

زیرحوضه	روش محاسبه زمان تمرکز	زمان تمرکز (h)	خطای پیوستگی (%)	شیب (m/m)	مساحت (ha)	ضریب رواناب	حداکثر دبی اوج (L/s)	حجم کل رواناب (m <sup>3</sup> )
	کریپچ	۱/۵۸	۰/۲	۰/۰۰۷	۹۵/۲۲	۰/۱۵	۱۲۳/۸۲	۵۳۱۳/۲
زیرحوضه ۶	برنس‌بای-ویلیامز	۳/۴	۰/۱	۰/۰۰۷	۹۵/۲۲	۰/۱۵	۱۲۳/۰۱	۵۳۱۳/۲
	کارتر	۱/۱۷	۰/۹	۰/۰۰۷	۹۵/۲۲	۰/۱۵	۱۲۵/۳۷	۵۳۱۳/۲
	کریپچ	۳/۷۵	۰/۲	۰/۰۱	۲۷۹/۴۷	۰/۱۵	۳۶۳/۹۹	۱۵۵۹۴/۷
زیرحوضه ۷	برنس‌بای-ویلیامز	۱۰/۳۵	۰/۱	۰/۰۱	۲۷۹/۴۷	۰/۱۵	۳۶۱/۶۶	۱۵۵۹۴/۷
	کارتر	۲/۲۷	۰/۹	۰/۰۱	۲۷۹/۴۷	۰/۱۵	۳۶۲/۴۹	۱۵۵۹۴/۷
	کریپچ	۵/۰۸	۰/۲	۰/۰۰۵	۱۴۱۶/۵۶	۰/۱۵	۱۸۳۷/۵۵	۷۹۰۴۳/۹
زیرحوضه ۸	برنس‌بای-ویلیامز	۱۰/۶۵	۰/۱	۰/۰۰۵	۱۴۱۶/۵۶	۰/۱۵	۱۸۳۰/۷۹	۷۹۰۴۳/۹
	کارتر	۲/۸۷	۰/۹	۰/۰۰۵	۱۴۱۶/۵۶	۰/۱۵	۱۸۴۰/۶۹	۷۹۰۴۳/۹
	کریپچ	۳/۳۸	۰/۲	۰/۰۰۵	۶۳۶/۸۹	۰/۱۵	۸۲۶/۳۴	۳۵۵۳۸/۴
زیرحوضه ۹	برنس‌بای-ویلیامز	۶/۸	۰/۱	۰/۰۰۵	۶۳۶/۸۹	۰/۱۵	۸۲۷/۱۷	۳۵۵۳۸/۴
	کارتر	۸/۸۸	۰/۹	۰/۰۰۵	۶۳۶/۸۹	۰/۱۵	۸۲۴/۶۷	۳۵۵۳۸/۴

به‌دست‌آمده هنگام استفاده از روش‌های مختلف محاسبه زمان تمرکز تفاوت کمی با یکدیگر دارند و مقادیر به‌دست آمده نزدیک به هم هستند.

شریفی و حسینی (۲۰۱۱)، پژوهشی را برای شناسایی بهترین معادلات برای تخمین زمان تمرکز در ۷۲ حوضه آبخیز و زیرحوضه در استان خراسان رضوی انجام دادند. نتایج نشان‌دهنده آن بود که روش کریپچ به همراه معادله کالیفرنیا و معادله آریزونا بهترین عملکرد را داشتند. در پژوهش حاضر نیز بر اساس میزان خطای پیوستگی، روش کریپچ روشی مناسب برای برآورد زمان تمرکز است (۲۲).

ملکی نژاد و کوثری (۱۳۸۷)، پژوهشی را تحت عنوان تجزیه و تحلیل حساسیت و بررسی نسبی اهمیت عوامل مؤثر بر دبی اوج در روش شماره منحنی انجام دادند. آن‌ها در این مطالعه اهمیت نسبی پنج عامل شماره منحنی، زمان تمرکز، مساحت حوضه، بارش در دوره بازگشت‌های معین و ضریب

بر اساس نتایج آمده در جدول ۵، در مدت بارندگی دوازده ساعته برای حالت هفده زیرحوضه، بیشترین تخمین دبی اوج رواناب مربوط به استفاده از زمان تمرکز محاسبه شده از روش کریپچ و کمترین تخمین مربوط به استفاده از زمان تمرکز حاصل از روش برنس‌بای - ویلیامز است. همچنین با توجه به جدول ۶، در مدت بارندگی ۱۲ ساعته برای حالت ۹ زیرحوضه، بیشترین تخمین دبی اوج رواناب مربوط به استفاده از زمان تمرکز محاسبه شده توسط روش کارتر و کمترین تخمین مربوط به استفاده از زمان تمرکز حاصل از روش برنس‌بای - ویلیامز است. مطابق نتایج ارائه شده در جداول ۴، ۵ و ۶ خطای پیوستگی برای همه حالت‌ها در روش کارتر بیشتر از دو روش دیگر است و مقدار خطای پیوستگی در همه حالت‌ها برای روش برنس‌بای - ویلیامز کمترین مقدار را دارد. از این روی می‌توان گفت روش برنس‌بای - ویلیامز در بین روش‌های نامبرده مناسب‌ترین روش برای محاسبه زمان تمرکز در این منطقه است. گفتنی است مقدار دبی اوج

روش برنس‌بای - ویلیامز در همهٔ حالت‌ها کمترین مقدار خطای پیوستگی را دارد و روش کارتر بیشترین مقدار خطای پیوستگی را دارا است. از این‌رو می‌توان گفت روش برنس‌بای - ویلیامز مناسب‌ترین روش برای محاسبه زمان تمرکز در این منطقه است. قابل پیش‌بینی است که با بسته‌شدن خروجی زیرحوضه‌های کوچک‌تر و بهم پیوستن زیرحوضه‌ها و در نتیجه افزایش مساحت آن‌ها، دبی اوج افزایش می‌یابد و مهار سیلاب دشوارتر می‌شود. برای نمونه در سیل‌هایی که سال ۱۳۹۸ در شهر شیراز اتفاق افتاد، این بحث مطرح بود که خروجی زیرحوضه‌های کوچک‌تر بسته شده و همه به یک زیرحوضه واحد تبدیل شده بودند؛ به همین دلیل دبی اوج و حجم سیلاب به یکباره افزایش یافته و خسارات فراوانی به‌جای گذاشت. از این‌رو نتایج این پژوهش نشان داد که با ادغام زیرحوضه‌ها و افزایش مساحت آن‌ها دبی اوج رواناب و حجم رواناب تولیدی افزایش پیدا می‌کند؛ به طوری که در حالت ۱۷ زیرحوضه حجم کل رواناب و بیشینه دبی اوج رواناب به ترتیب ۱۲۳۹۳۸ مترمکعب و ۲۴۰۰ لیتر بر ثانیه بود؛ اما با ادغام زیرحوضه‌ها و افزایش مساحت آن‌ها در حالت ۹ زیرحوضه، حجم کل رواناب و بیشینه دبی اوج رواناب به ترتیب به ۱۲۸۸۴۶ مترمکعب و ۲۸۸۴ لیتر بر ثانیه می‌رسد که نشان‌دهنده افزایش ۴ درصدی حجم کل رواناب تولیدی و افزایش ۲۰ درصدی بیشینه دبی اوج رواناب است.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان این‌طور جمع‌بندی کرد که از تجمیع زیرحوضه‌های کوچک‌تر و تبدیل‌شدن آن‌ها به زیرحوضه‌های بزرگ‌تر، دبی اوج و حجم رواناب افزایش یافته که می‌تواند خطرات ناشی از سیلاب را افزایش دهد. همچنین از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی حوضه به‌منظور محاسبه دبی اوج و حجم رواناب سطحی و امکان طراحی شبکه جمع‌آوری رواناب و تأسیسات مورد نیاز با نرم‌افزار SewerGEMS امکان‌پذیر است.

آلفا بر دبی اوج را بررسی کردند. در پژوهش حاضر نیز تأثیر تعداد و مساحت زیرحوضه‌ها و همچنین زمان تمرکز روی دبی اوج و حجم رواناب بررسی شد که نشان‌دهنده تأثیر این دو عامل بر مقدار دبی اوج بود و مساحت زیرحوضه‌ها تأثیری بیشتری نسبت به زمان تمرکز داشت (۱۴).

عباسی و همکاران (۱۳۹۳)، در پژوهشی به بررسی پتانسیل تولید رواناب در حوضه‌های آبخیز کوچک در حوضه آبخیز سنگانه کلات پرداختند. بر اساس نتایج این پژوهش در زیرحوضه‌هایی که مساحت آن‌ها بیشتر بود، پتانسیل تولید رواناب بیشتر بود و از این لحاظ با پژوهش حاضر مطابقت دارد که در دو پژوهش نشان می‌دهد، هرچه مساحت زیرحوضه‌ها بیشتر باشد، میزان رواناب تولیدی در آن زیرحوضه نیز بیشتر است (۲). رفیعی و همکاران (۱۴۰۱)، برای بررسی سیلاب شهری در شهر لار، عملکرد سه مدل SewerGEMS، SWMM و ASSA را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل SWMM به‌منظور شبیه‌سازی سیلاب در این منطقه از دقت بیشتری برای مدیریت رواناب حوضه‌های شهری نسبت به دو مدل دیگر برخوردار است (۲۱).

### نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش با بهره‌گیری از نرم‌افزار SewerGEMS شبیه‌سازی رواناب ناشی از بارندگی با دوره بازگشت دوساله انجام گرفت. از آنجایی که زمان تمرکز به‌عنوان یک عامل مهم در شبیه‌سازی رواناب محسوب می‌شود، برای محاسبه زمان تمرکز از سه روش کریچ، برنس‌بای - ویلیامز و کارتر استفاده شد و عملکرد هر کدام مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش برنس‌بای - ویلیامز زمان تمرکز را بیشتر از دو روش دیگر محاسبه می‌کند و روش کارتر زمان تمرکز را کمتر از روش کریچ و برنس‌بای - ویلیامز محاسبه می‌کند؛ به طوری که زمان تمرکز محاسبه شده در روش برنس‌بای - ویلیامز حدود ۱۲۵ درصد با روش کریچ و حدود ۱۸۰ درصد با روش کارتر تفاوت دارد. همچنین بر اساس مقدار خطای پیوستگی نرم‌افزار،

## منابع مورد استفاده

1. Alizadeh, A. 2019. Principles of applied hydrology. Publications of Imam Reza University, Mashhad.
2. Abbasi, A.A., J. Porhemmat and A. Khoshbazzm. 2014. Investigating the potential of runoff production in small watersheds (case study: Sanganeh Kalat watershed). *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems* 2(3): 13-22.
3. Ahmadi, M. 2012. A multi criteria decision support system for watershed management under uncertain conditions. Ph.D. thesis, Colorado State University, Colorado, America.
4. Al-zahrani, M., A. Al-Areeq and H. O. Sharif. 2017. Estimating urban flooding potential near the outlet of an arid catchment in Saudi Arabia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 8(2): 672-688.
5. Badieizadeh, S., A. Behramand, A. A. Dehghani and N. Nora. 2013. Urban flood management by simulation of surface runoff using SWMM model in Gorgan city, Golestan Province- Iran. *Journal of Water and Soil Conservation* 22(4):155-170 (in Farsi).
6. Bentley OpenFlow SewerGEMS CONNECT Edition Help. Last Updated: October 26, 2022.
7. Chen, W., G. Hauang and H. Zhang. 2017. Urban stormwater inundation simulation based on SWMM and diffusive overland-flow model. *Water Science and Technology* 76(12): 3392-3403.
8. Dong, X., H. Guo and S. Zeng. 2017. Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure. *Water Research* 124: 280-289.
9. Investigation and analysis of flood events in April 2018. Islamic Council Research Center. Vice President of Infrastructure Research and Production Affairs. October 2018.
10. Jabbari, M and J. Abedi Kopai. 2015. Estimation of urban runoff for use in urban green spaces using HEC-HMS software. (Case study: District 6 of Isfahan). 2<sup>nd</sup> National Congress on Iran's Irrigation & Drainage Congress, Isfahan University of Technology, Esfahan, Iran.
11. Jadav, D and K. Mishra. 2023. Design of urban stormwater drainage at Gandhinagar TP area based on civilstorm software. *International Journal of Progressive Research in Engineering Management and Science* 3:206-212.
12. Mirramzani, M., M. Riahi Samani, S. Islamian, Y. Aghaei Shlamani and M. Rahmati. 2017. The feasibility study of urban green space re-design in the form of dry landscaping with the approach of rainwater harvesting. *Iranian Journal of Rainwater Catchment System* 9(29): 57-68.
13. Mohammadi, Sh and A. Karimian. 2019. Estimation of Urban Runoff to Supply for Irrigation of Green Space (A Case Study: Sarpol-e Zahab). *Journal of Water and Soil Science* 23(4): 345-359.
14. Malki-Nejad, H and M. Kothari. 2009. Sensitivity Analysis and Relative Importance Assessment of the Main Factors on Peak Discharge in Curve Number-SCS Method. *Iran-Watershed Management Science and Engineering* 2(5): 31-40.
15. Movahedinia, M., J. M. V. Samani, F. Barakhasi, S. Taghvaeian and R. Stepanian. 2019. Simulating the effects of low impact development approaches on urban flooding: a case study from Tehran, Iran. *Water Science and Technology* 80(8): 1591-1600.
16. Nasri, M., M. Saati, M. S. Ebrahimi, H. Mousavi and M. R. Salimi. 2015. The need to pay attention to the direction of urban flood and surface runoff (case study: flood transfer Ayatollah Hashemi Rafsanjani, Ardestan city). The second national conference on civil engineering, architecture, urban planning and energy management. Islamic Azad University, Ardestan branch, Esfahan, Iran.
17. Nasri, M., M. Javaheri and M. Ebrahimi. 2013. Modeling training of runoff collection and diversion systems using CivilStorm software. Nowruz publications, Gorgan.
18. Nori, A.R and S. K. Sing. 2020. Modeling of Waste Water Connection network Using ArcGIS and SewerGEMS in Kabul, Afghanistan. *EasyChair preprints* 4098.
19. Nahid, M., M. R. Zandmoghadam and Z. Karkehadi. 2022. Measuring and evaluating the resilience of urban areas against urban flooding (Case study: Tehran zone 4). *Journal of Environmental Science and Technology* 24(5): 125-145.
20. Panahi, Q and K. Esmaili. 2015. Recommendation of new approaches for urban flood management. *Journal of Water and Sustainable Development* 5(1): 93-100 (in Farsi)
21. Rafiee, M.R., D. Rasouli, M. Zolghadr and M. Mahbod. 2022. Evaluation of EPA SWMM, ASSA and Sewer GEMS Models in Analysis of Urban Flood Collected by Surface Drainage Network (Case Study: Lar New City). *Water Resources Engineering* 15(54):107-124.
22. Sharifi, S and S.M. Hosseini. 2011. Methodology for Identifying the Best Equations for Estimating the Time of Concentration of Watersheds in a Particular Region. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 137(11): 1943-4774.
23. Shang, J and J. P. Wilson. 2009. Watershed Urbanization and Changing behavior across the Los Angeles metropolitan region. *Natural Hazard* 48: 41-57.
24. Silva, F. V., N. B. Bonuma and P. K. Uda. 2014. Flood mapping in urban area using HEC-RAS model supported by GIS. In 6<sup>th</sup> International Conference on Flood Management, Sao Paulo. Brazil.

25. Tasca, F. A., L. B. Assuncao and A. R. Finotti. 2018. International experiences in stormwater fee. *Water Science and Technology* 2018(1): 287-299.
26. United States Agency for International Development. 2017. Sustainable Urbanization for Global Progress and Security; USAID: Washington, DC, USA.
27. Yang, B., T. Zhang, J. Li, P. Feng and Y. Miao. 2023. Optimal designs of LID based on LID experiments and SWMM for a Small-Scale Community in Tianjin, north China. *Journal of Environmental Management* 334: 177442.
28. Zebardast, M and A. Roshni. 2017. Investigating the Use of Urban Rain- fall for Green Space Usage using Civil Storm Software (Case Study: Southern Part of Mashhad City). *Journal of Water and Sustainable Development* 6(1): 51-60.
29. Zhang, X., Q. Wenbao, Y. Xiao and Y. Lu. 2023. Analysis of regional Flooding in the urbanization expansion process based on the SWMM model. *Journal of Natural Hazards* 117:1349-1363.
30. Zhao, Ch., C. Lio, W. Li, Y. Tang, F. Yong, Y. Xu, L. Quan and C. Hu. 2023. Simulation of Urban Flood Process Based on a Hybrid LSTM-SWMM Model. *Journal of Water Resource Management* 37: 5171-5187.

## Investigating the Performance of SewerGEMS Software in Simulating Urban Runoff for Small Basins (Case Study: Minab City)

M. Ranjbari Hajiabadi, J. Abedi Koupai\* and M. M. Matinzadeh<sup>1</sup>

(Received: May 20-2024 ; Accepted: June 23-2024)

### Abstract

Urban runoff is a serious issue due to urbanization and climate change. Therefore, paying attention to rainfall-runoff simulation models is important to manage and reduce adverse consequences. In this research, the performance of the SewerGEMS software was examined by studying different modes based on the number and area of sub-basins. Two modes, consisting of nine and seventeen sub-basins, were evaluated with varying durations of rainfall of 6 and 12 hours. Additionally, the performance of three methods for calculating concentration time (Kerpich, Brnsby-Williams, Carter) was compared to simulate flood hydrographs in Minab City. The results showed that the total volume of produced runoff in the nine sub-basins was 4% higher than in the seventeen sub-basins. The maximum runoff peak flow in the nine sub-basins was also 20% higher than in the seventeen sub-basins. Furthermore, the Brnsby-Williams method exhibited the least software continuity error among the three calculation methods for concentration time. On the other hand, the Carter method had the highest continuity error. The concentration time calculated by this method in some sub-basins exceeded the 6-hour duration of rain. A t-test was performed to compare the peak discharge data obtained from the Kerpich and Barnesby-Williams methods. The results indicated a significant difference between the data from the two methods at a 95% confidence level ( $p < 0.05$ ). Considering that the Kerpich method is suitable for calculating concentration time in small basins, it was used to compare the nine and seventeen sub-basins. Based on the findings, it was observed that merging the sub-basins and reducing their number from seventeen to nine resulted in an increase in the total volume of produced runoff from approximately 123,839 cubic meters to 128,446 cubic meters, as well as an increase in the maximum peak flow of runoff from about 2.400 m<sup>3</sup>/s to 2.884 m<sup>3</sup>/s. This demonstrates an increase in both the total volume and maximum peak discharge of the runoff.

**Keywords:** Rainfall-runoff simulation models, Rainfall duration, Urban flooding, Time of Concentration, SewerGEMS, Urban sub-basins, Slope of the sub-basin

---

1. Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

\*: Corresponding author, Email: [koupai@cc.iut.ac.ir](mailto:koupai@cc.iut.ac.ir)