

بررسی کارایی نرم افزار SewerGEMS در شبیه سازی رواناب شهری برای حوضه های کوچک
(مطالعه موردی: شهر میناب)

مجید رنجبری حاجی آبادی، جهانگیر عابدی کوپایی*، محمد مهدی متین زاده
. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

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

چکیده

رواناب شهری به دلیل شهرنشینی و تغییرات آب و هوایی به عنوان یک مسئله جدی حائز اهمیت است و به این دلیل توجه به مدل های شبیه سازی بارش-رواناب برای مدیریت و کاهش پیامدهای ناگوار مهم می باشد. در پژوهش حاضر با استفاده از نرم افزار SewerGEMS حالت های مختلف برای بررسی عملکرد این نرم افزار بر اساس تعداد و مساحت زیرحوضه ها در دو حالت نه و هفده زیرحوضه و مدت بارندگی مختلف ۶ و ۱۲ ساعته، همچنین مقایسه عملکرد سه روش محاسبه زمان تمرکز (کرپیچ، برنس-بای-ویلیامز، کارتر) به منظور شبیه سازی 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 بیش تر است. همچنین مقدار حداکثر دبی اوج رواناب در حالت نه زیرحوضه ۲۰ درصد نسبت به حداکثر دبی اوج رواناب در حالت هفده زیرحوضه بیش تر است. ضمناً برای محاسبه زمان تمرکز از سه روش کرپیچ، برنس-بای-ویلیامز و کارتر استفاده شد که نتایج نشان داد میزان خطای پیوستگی نرم افزار در همه ی حالت ها برای روش برنس-بای-ویلیامز کم تر از دو روش دیگر است و روش کارتر بیش ترین خطای پیوستگی را دارد. از این روی می توان گفت روش برنس-بای-ویلیامز از بین روش های یاد شده مناسب ترین روش برای محاسبه زمان تمرکز در این منطقه است. اما از آن جایی که مقدار زمان تمرکز محاسبه شده از این روش در بعضی از زیرحوضه ها بیش تر از مدت بارندگی ۶ ساعته است و از این جهت نرم افزار برای تجزیه و تحلیل داده ها با محدودیت مواجه می شود، بین داده های دبی اوج حاصل از روش کرپیچ و روش برنس-بای-ویلیامز آزمون t-Test انجام شد و با توجه به این که داده های دو روش در سطح ۹۵ ($p < 0.05$) درصد با یکدیگر اختلاف معناداری نداشته و همچنین با توجه به اینکه روش کرپیچ برای محاسبه زمان تمرکز در حوضه های کوچک کاربرد خوبی دارد برای محاسبه زمان تمرکز در حالت مقایسه بین دو حالت نه و هفده زیرحوضه از روش کرپیچ استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده شد که با ادغام زیرحوضه ها و کاهش تعداد آن ها از هفده به نه زیرحوضه و در نتیجه افزایش مساحت زیرحوضه ها، حجم کل رواناب تولیدی از حدود ۱۲۳۸۳۹ مترمکعب به ۱۲۸۴۴۶ مترمکعب و حداکثر دبی اوج رواناب از حدود ۲/۴۰۰ متر مکعب بر ثانیه به ۲/۸۸۴ مترمکعب بر ثانیه می رسد که نشان دهنده افزایش حجم کل رواناب تولیدی و حداکثر دبی اوج رواناب می باشد. در این پژوهش اعتباری سنجی مدل از طریق تغییر ضریب رواناب تا رسیدن به کم ترین مقدار خطای پیوستگی نرم افزار صورت گرفت.

واژه های کلیدی: مدل های شبیه سازی بارش - رواناب، مدت بارندگی، سیلاب شهری، زمان تمرکز، SewerGEMS، زیرحوضه های شهری، شیب زیرحوضه

سیلاب‌های شهری یکی از بلایای طبیعی گسترده هستند که آسیب‌ها و خسارت‌های حاصل از آن‌ها، افزایش یافته است (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 می‌باشد که در آن فعالیت‌های انسانی در چرخه هیدرولوژیکی طبیعی، همچون تبدیل حوضه‌های طبیعی به سطوح غیرقابل نفوذ، ساخت و ساز در مناطق سیل‌خیز و مسیل‌های طبیعی و حذف پوشش گیاهی فرآیند نفوذ را کند کرده و باعث افزایش حجم رواناب ناشی از بارش می‌شوند (۲۴). (۱۵). امروزه شاهد رشد سریع و روزافزون جمعیت، توسعه شهری و صنعتی شدن جوامع هستیم. براساس شواهد موجود نزدیک به ۶۰ درصد از مردم جهان تا سال ۲۰۳۰ شهرنشین خواهند شد (۲۶). یکی دیگر از عوامل تشدید کننده سیلاب‌های شهری، بارش‌های شدید در اثر تغییرات اقلیمی می‌باشد که نقش مهمی در تشدید و تسریع چرخه هیدرولوژیکی 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 نیمه خشک که بارندگی‌ها با مدت کم و شدت زیاد رخ می‌دهد بیش‌تر نمایان می‌باشد (۴).

براساس برآوردهای انجام شده در مناطق شهری به‌طور میانگین ۹۰ درصد از بارندگی‌ها به رواناب‌های سطحی تبدیل می‌گردد (۲۳) که همه این‌ها دلیل افزایش فرسایش خاک و به‌وجود آمدن سیلاب‌های ویرانگر می‌باشد (۱۰). بنابراین اتخاذ تدابیر مناسب مدیریت رواناب‌های سطحی عامل بسیار مهم برای در امان ماندن سکونتگاه‌های شهری از تهدید وقوع سیل و در نهایت برطرف شدن 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 ایجاد شده 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 بهره بردن هرچه بهتر از رواناب‌ها ایجاد شده باید شبکه‌های هدایت و جمع‌آوری رواناب که در منطقه قرار دارد به‌خوبی ارزیابی گردد و در صورت بروز هرگونه مشکل، آن مشکل برطرف شود (۱۶). در زمان‌های گذشته به‌منظور مدیریت سیلاب‌های شهری، رویکردهایی که اتخاذ می‌شد، براساس جمع‌آوری، هدایت و دفع سیلاب‌ها بود. اما امروزه برای مدیریت سیلاب‌های شهری سعی می‌شود تدابیری اتخاذ گردد که بیش‌ترین هماهنگی را با فرآیندهای 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 فرآیندهای چرخه طبیعی آب‌های سطحی می‌باشد را به اصطلاح رویکردهای "توسعه کم اثر"^۱ می‌گویند. کشورهای توسعه یافته از این رویکرد به عنوان روشی مهم و راهبردی در راستای مدیریت سیلاب‌های شهری استفاده می‌کنند (۲۰). به‌طور کلی با اتخاذ رویکردهای مناسب برای مدیریت سیلاب‌های شهری و در نظر گرفتن همه‌ی جوانب 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 به‌سزایی در فرآیند 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). براساس 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 قابل ملاحظه‌ای صورت گرفته است و منجر به تهیه مدل‌هایی شده است که علاوه بر قابلیت‌های دیگر می‌توانند حجم و

¹ Low Impact Development

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 فوق عموماً شکل شبکه برای طراحی از قبل مشخص است و شیب اعضاء شبکه به وسیله طراح در مراحل طراحی مشخص می‌شود. اساسی-ترین هدف در این مدل‌ها مشخص کردن کوچک‌ترین ابعاد اعضاء شبکه است به‌طوری که شبکه بتواند حجم رواناب را با در نظر گرفتن ملاحظات خاص از خود عبور دهد. در سالیان اخیر مدل‌های شبیه ساز متعددی تهیه شده است (۱۷). در رابطه با شبیه‌سازی و برآورد رواناب مدل‌ها و نرم افزارهای گوناگونی موجود می‌باشد. از مدل‌های قدیمی تر مثل BRRL، MIDUSS 98 و WALLRUS گرفته تا مدل‌های جدیدتر مانند HEC-1، HEC-2، HEC-HMS و مدل SWMM که به عنوان یکی از مهم‌ترین و کارآمدترین مدل‌های شبیه‌سازی رواناب به حساب می‌آید همگی یاریگر پژوهشگران این عرصه می‌باشند. در کنار مدل‌های فوق شرکت Bently نیز نرم‌افزارهای جدیدی همچون Civil Storm، StormCAD و SewerGEMS ارائه کرده است که امروزه توسط متخصصین مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پیشینه تحقیق

بدیعی زاده و همکاران (۱۳۹۲)، به منظور مدیریت سیلاب شهری در شهر گرگان از نرم افزار 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 نمود (۵). جباری ملایری و عابدی کوپائی (۱۳۹۵)، در مطالعه‌ای، به برآورد رواناب شهری به منظور استفاده در فضای سبز شهری با استفاده از مدل HEC-HMS در منطقه‌ای ۶ اصفهان پرداختند. در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی فرآیند 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. براساس نتایج به‌دست 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)، تحقیقی را جهت 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 تحقیق 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 موردنیاز 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 حداکثر رواناب از نظر کمی انجام گرفته 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 SWMM، SewerGEMS 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 کم اثر و مدل SWMM برای یک جامعه کوچک مقیاس در شهر تیانشان چین انجام دادند. در این پژوهش آزمایش‌های روش‌های توسعه کم اثر 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 میشر (۲۰۲۳)، به منظور محاسبه رواناب و طراحی شبکه در منطقه گاندیناگر هندوستان از نرم افزار 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 فرآیند شهرنشینی بر اساس مدل SWMM، پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که اولاً با گسترش شهرنشینی، نفوذناپذیری افزایش می‌یابد و با افزایش نفوذپذیری از ۴۵ به ۷۰ درصد، بارندگی ایجاد شده برای هدایت و تخلیه بیش‌تر به شبکه زهکشی وابسته می‌شود. ثانیاً اگرچه شهرنشینی با افزایش مناطق سیل زده شده است، به دلیل افزایش متناظر در ظرفیت سیستم زهکشی، آب راکد می‌تواند در یک دوره نسبتاً کوتاه کاهش پیدا کند و سطح خطر سیل در مقایسه با وضعیت موجود کم‌تر شود (۲۹). ژائو و همکاران (۲۰۲۳)، مطالعه‌ای را تحت عنوان شبیه‌سازی فرآیند 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 برآیند ادغام می‌کند. هدف از این مطالعه ساخت یک مدل کارآمد و سریع است که مکانیسم فیزیکی را در نظر می‌گیرد تا به‌طور مؤثر سیلاب‌های شهری را شبیه‌سازی کند. نتایج نشان داد که ارتباط خوبی بین فرآیند تخلیه شبیه‌سازی شده مدل LSTM-SWMM فرآیند تخلیه مشاهده شده در طول دوره‌های آزمایشی است که منعکس کننده فرآیند رواناب واقعی بارندگی است (۳۰).

از مطالعات ذکر شده 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 حائز اهمیت باشد و استفاده از این مدل‌ها بسیار مفید می‌باشد.

هدف از پژوهش حاضر بررسی نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی بارش-رواناب در برآورد هیدروگراف سیلاب شهری شهر میناب براساس حالت‌های مختلف زیرحوضه‌بندی و تعداد زیرحوضه‌ها با در نظر گرفتن منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی^۲ و بررسی و شبیه‌سازی تأثیر روش‌های مختلف محاسبه زمان تمرکز در هیدروگراف خروجی، با بهره‌گیری از نرم افزار SewerGEMS می‌باشد. 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 عملیات‌های عمرانی مسدود شده و یا در اثر سایر موارد تخریب می‌شود که باعث تجمع زیرحوضه‌های بالا دست در زیرحوضه‌های پایین دست شده و در نهایت باعث افزایش دبی اوج رواناب می‌گردد 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 می‌باشد.

مواد و روش‌ها

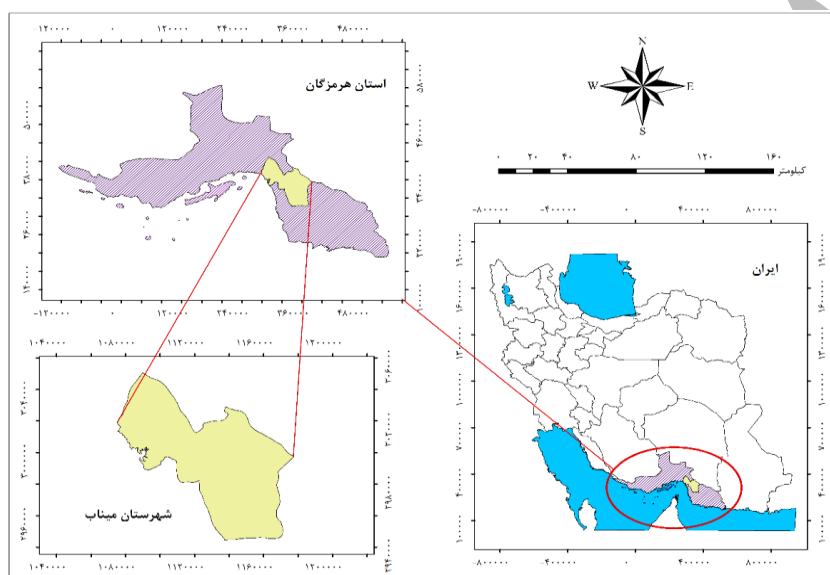
منطقه مورد مطالعه

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 $27^{\circ} 08'$ شرقی و عرض جغرافیایی $57^{\circ} 4'$ شمالی در ساحل شمالی تنگه هرمز واقع شده است. ارتفاع متوسط این شهر از سطح دریا ۵۰ متر می‌باشد. 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

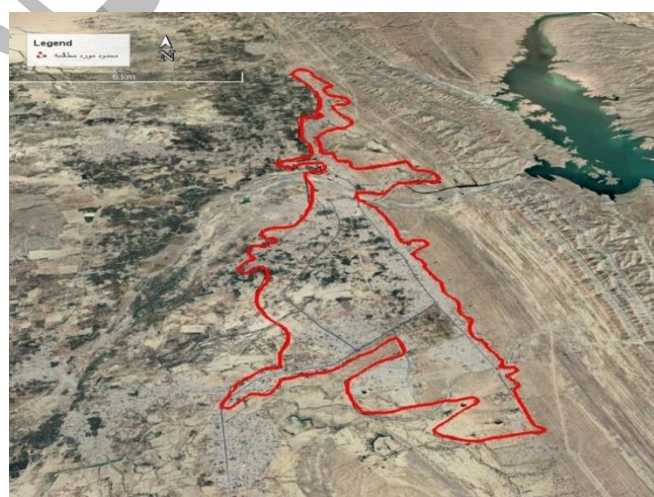
² Intensity - Duration - Frequency Curves

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.

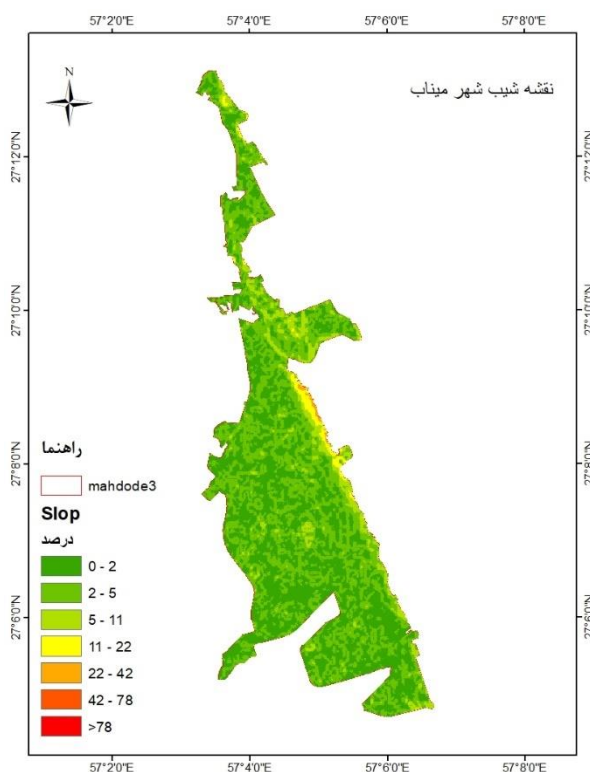
به منظور بررسی آمار و اطلاعات هواشناسی از آمار و اطلاعات ایستگاه هواشناسی میناب استفاده خواهد شد. ایستگاه هواشناسی میناب که از نوع ایستگاه‌های سینوپتیک محسوب می‌شود که در طول جغرافیایی $۵۷^{\circ}۰۶'$ شرقی و عرض جغرافیایی $۲۷^{\circ}۰۵'$ شمالی قرار دارد و با ۳۰ متر ارتفاع از سطح دریا نزدیک‌ترین ایستگاه 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 اقتباس شده است.



شکل ۱. موقعیت شهرستان میناب بر روی نقشه ایران



شکل ۲. موقعیت منطقه مورد مطالعه در (GoogleEarthPro)



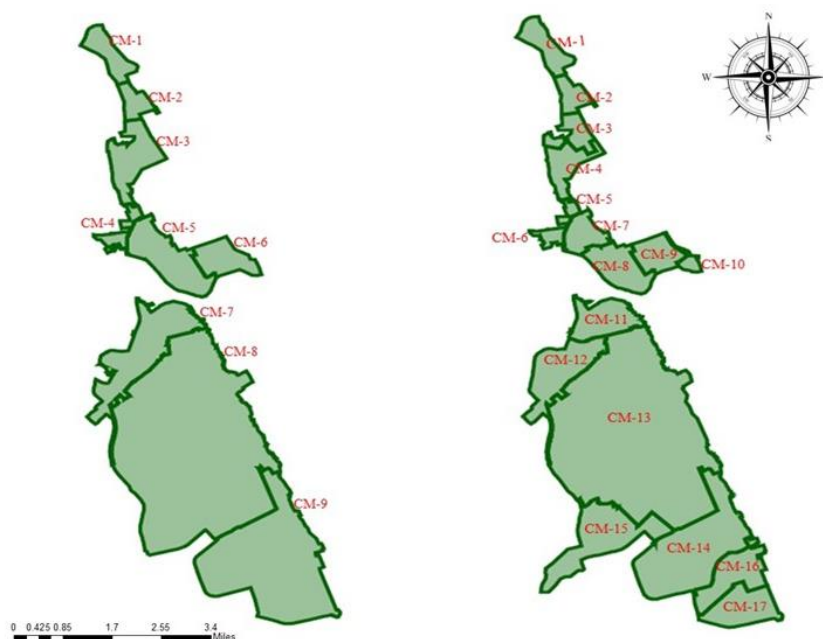
شکل ۳. نقشه شیب شهر میناب

تعیین زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه

به‌طور کلی مشخص نمودن حد زیرحوضه‌های شهری به دلیل اینکه حوضه‌های شهری دارای خط الرأس و خط القعر 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 نرم افزارهای ArcGIS، AutoCAD، Global Mapper و GoogleEarth Pro زیرحوضه‌های شهری تعیین گردید که در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد.

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.



شکل ۴. تقسیم‌بندی حوضه مورد مطالعه به دو حالت ۹ و ۱۷ زیرحوضه

نرم افزار SewerGEMS

SewerGEMS یکی از پرکاربردترین نرم افزارهای شرکت بنتلی و از نرم افزارهای قوی در مدل‌سازی فاضلاب و آب‌های سطحی می‌باشد. یکی از ویژگی‌های مهم این نرم افزار آسان بودن کار با آن و در عین حال قدرتمند بودن آن است. این نرم افزار به مهندسان آب و فاضلاب کمک می‌کند تا بتوانند در مدت زمان کوتاهی سیستم‌های دقیق و هوشمندی طراحی کرده و در عین 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 نرم افزار SewerGEMS قابلیت همکاری با دو نرم افزار برجسته و شناخته شده ArcGIS و AutoCAD را فراهم می‌کند و محیط کاربری آسانی در اختیار کاربر قرار می‌دهد. در این نرم افزار امکان بهره‌گیری از الگوریتم استفاده شده در مدل SWMM و حل ضمنی معادلات کامل سنت-ونانت وجود دارد. نرم افزار 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 بنتلی طبق مدل FLDWAV که از طرف سرویس آب و هوای آمریکا^۳ توسعه داده شده است، حل می‌کند. معادلات سنت-ونانت از دو معادله پیوستگی و معادله مونتوم تشکیل شده است. معادلات ۱ و ۲ به ترتیب معادله پیوستگی و مونتوم را بیان می‌کنند (۶). در این پژوهش به‌منظور برآورد دبی اوج و حجم رواناب و همچنین بررسی کارایی مدل SewerGEMS در شبیه‌سازی بارش-رواناب در شهر میناب، به عنوان یک حوضه کوچک، از این مدل استفاده شد.

معادله پیوستگی:

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

³ National Weather Service

معادله مومنوم:

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

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 می‌باشند (۶).

خطای پیوستگی^۴ مدل

خطای پیوستگی نشان دهنده همی 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^۵ به‌عنوان ساده‌ترین و رایج‌ترین روش برای محاسبه سیلاب شهری و ایجاد 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 بر روی حوضه مدنظر باشیم و مساحت حوضه برابر A باشد و شدت بارندگی ثابت و مدت زمان بارندگی برابر با زمان تمرکز حوضه یا بیشتر از آن در نظر گرفته شود و فرض شود که بارندگی همه سطح مورد نظر را پوشش داده باشد، حداکثر دبی رواناب براساس ضریب C برابر است با:

$$Q = \frac{1}{36} C i A \quad (4)$$

⁴ Continuity Error

⁵ Rational Method

که در این معادله i شدت بارندگی (سانتی متر بر ساعت)، A سطح حوضه (هکتار)، C ضریب رواناب و Q حداکثر دبی رواناب (مترمکعب بر ثانیه) می باشند. در صورتی که شدت بارندگی و مساحت حوضه به ترتیب بر حسب میلی متر در ساعت و کیلومتر مربع باشند، دبی خروجی به صورت زیر خواهد بود:

$$Q = 0.278 C i A \quad (5)$$

روش های محاسبه زمان تمرکز

در این پژوهش به منظور مقایسه تأثیر روش های مختلف محاسبه زمان تمرکز بر روی هیدروگراف سیلاب و مقدار دبی اوج و حجم رواناب تولیدی از سه روش کریپیچ، برنس بای-ویلیامز و کارتر استفاده شد. معادله های ۵، ۶ و ۷ به ترتیب بیانگر روش های کریپیچ، برنس بای-ویلیامز و کارتر می باشد. مقادیر به دست آمده زمان تمرکز که در جداول ۲، ۳، ۴ و ۵ برای این سه روش ارائه شده است توسط نرم افزار محاسبه شده است (۱).

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

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) می باشد.

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

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

$$t_c = 1.7 L_m^{0.6} S_m^{-0.3} \quad (7)$$

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

آزمون t-Test

برای انتخاب روش مناسب محاسبه زمان تمرکز از بین روش کریپیچ و برنس بای ویلیامز، بین داده های به دست آمده هیدروگراف خروجی از خروجی ۱ (OutFall-1)، خروجی ۲ (OutFall-2)، خروجی ۳ (OutFall-3) در سه زیرحوضه ۱، ۲ و ۳ هنگام استفاده از زمان تمرکز محاسبه شده از روش های کریپیچ و برنس بای 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 می دارد اگر $t_{critical}$ بزرگ تر از $t_{experimental}$ باشد در این صورت بین داده های دو گروه تفاوت معناداری وجود ندارد و اگر $t_{critical}$ کوچک تر از $t_{experimental}$ باشد بین داده های دو گروه تفاوت معناداری وجود دارد، ارزیابی صورت پذیرفت.

محدودیت های تحقیق

از جمله محدودیت های این تحقیق می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- عدم وجود شبکه جمع آوری 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

اعتبارسنجی مدل

با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه فاقد شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی به‌صورت مناسب و کامل می‌باشد و لذا به این دلیل اندازه‌گیری رواناب حاصل از بارندگی در هر زیرحوضه و مقایسه آن با نتایج حاصل از مدل امکان‌پذیر نیست و از آنجایی که در این پژوهش برای محاسبه رواناب از فرمول استدلالی استفاده شده است و در این فرمول 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 زیر حوضه‌ها بر روی دبی اوج و حجم رواناب با استفاده از زمان تمرکز محاسبه شده از روش کریپیج و مدت زمان بارندگی شش ساعته با دوره بازگشت دو ساله توسط نرم افزار SewerGEMS بررسی قرار گرفت. برای انتخاب روش محاسبه زمان تمرکز، از آنجایی که خطای پیوستگی نرم افزار در هنگام استفاده از زمان تمرکز محاسبه شده توسط دو روش کریپیج و برنس‌بای-ویلیامز به ترتیب $0/6$ و $0/1$ درصد بود و خطای پیوستگی این دو روش کم‌تر از روش کارتر بود، برای انتخاب روش مناسب محاسبه زمان تمرکز از بین روش کریپیج و برنس‌بای-ویلیامز، بین داده‌های به‌دست آمده دبی خروجی از خروجی ۱ (OutFall-1)، خروجی ۲ (OutFall-2)، خروجی ۳ (OutFall-3) در سه زیرحوضه ۱، ۲ و ۳ هنگام استفاده از زمان تمرکز محاسبه شده از روش‌های کریپیج و برنس‌بای-ویلیامز آزمون t-Test با سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p < 0/05$) و با استفاده از Excel 2013 انجام گرفت.

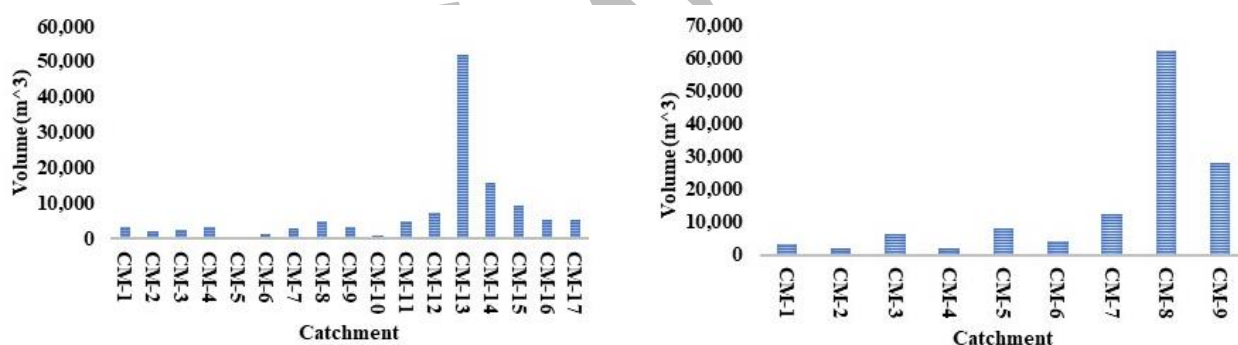
با توجه به فرضیات آزمون t-Test و نتایج ارائه شده در جدول ۱ مشاهده شد که داده‌های دبی خروجی به‌دست آمده در سه زیرحوضه هنگام استفاده از دو روش کریپیج و برنس‌بای-ویلیامز در سطح ۹۵ درصد اختلاف معناداری با یکدیگر ندارند، از طرفی با توجه به اینکه زمان تمرکز محاسبه شده با روش برنس‌بای-ویلیامز در بعضی از زیرحوضه‌ها بیش‌تر از مدت بارندگی انتخابی یعنی ۶ ساعت بود و از این نظر نرم افزار برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و ارائه نتایج با محدودیت مواجه بود و از آنجایی که روش کریپیج به عنوان یک روش کارآمد در محاسبه زمان تمرکز برای حوضه‌های کوچک به‌شمار می‌رود، برای محاسبه زمان تمرکز روش کریپیج انتخاب شد (۲۲).

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

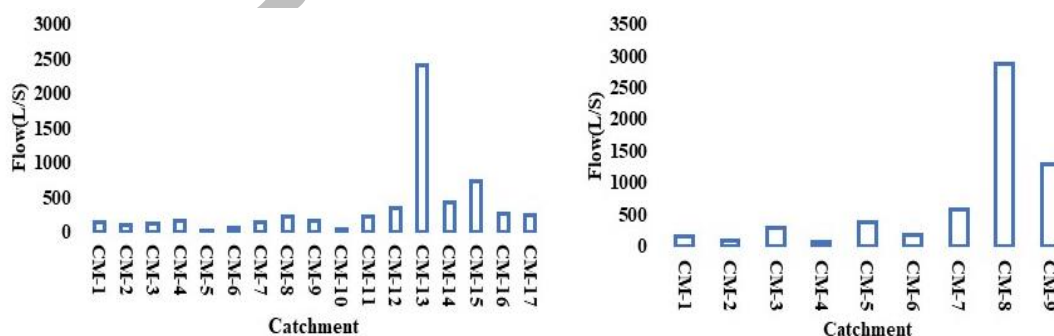
نتیجه	t critical	t experimental	سطح اطمینان	روش محاسبه زمان تمرکز
تفاوت معنادار وجود ندارد	۲/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۵	خروجی ۱ کریپیج برنس‌بای-ویلیامز
تفاوت معنادار وجود ندارد	۲/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۵	خروجی ۲ کریپیج برنس‌بای-ویلیامز
تفاوت معنادار وجود ندارد	۲/۰۱	۰/۱۱	۰/۰۵	خروجی ۳ کریپیج برنس‌بای-ویلیامز

به دلیل اینکه بارندگی متداول در منطقه مورد مطالعه بارندگی شش ساعته 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 گردد در پژوهش حاضر بارندگی نرمال با دوره بازگشت دو ساله در نظر گرفته شده است. 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 دو ساله می‌تواند گزینه مناسبی باشد و همچنین طراحی مخازن بر اساس بارندگی با دوره بازگشت دو ساله از نظر اقتصادی با توجه به هدف مورد نظر به صرفه می‌باشد.

قابل پیش‌بینی است که با بسته شدن خروجی زیرحوضه‌های کوچک‌تر و بهم پیوستن زیرحوضه‌ها و در نتیجه افزایش مساحت آن‌ها دبی اوج افزایش می‌یابد و مهار سیلاب دشوارتر می‌شود. به‌عنوان مثال 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 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 گردید. در این مقایسه مطابق شکل ۵ و ۶ و جدول ۲ و ۳ نتایج نشان داد با افزایش مساحت زیر حوضه‌ها دبی اوج رواناب و همچنین حجم رواناب تولیدی افزایش خواهد یافت. براساس نتایج ارائه شده در جدول ۲ حجم کل رواناب تولیدی در حالت هفده زیرحوضه حدود ۱۲۳۹۳۸ مترمکعب و حداکثر 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 شده است حدود ۱۲۸۸۴۶ مترمکعب و حداکثر دبی اوج رواناب حدود ۲۸۸۴ لیتر بر ثانیه می‌باشد. بنابراین طبق نتایج جداول ۲ و ۳ حجم کل رواناب با افزایش مساحت زیر حوضه‌ها و کاهش تعداد آن‌ها به ۹ زیر حوضه حدود ۴ درصد افزایش یافته است و در همین شرایط حداکثر دبی اوج رواناب افزایش ۲۰ درصدی داشته است.



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 (m ³)
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

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

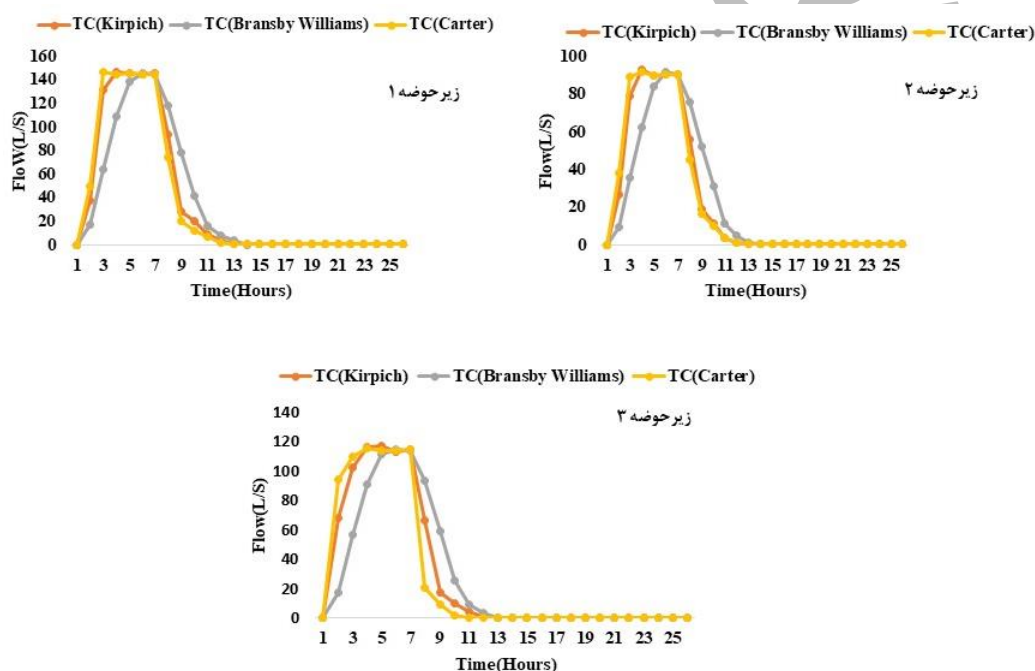
زیرحوضه	مساحت (ha)	ضریب رواناب (روش استدلالی)	شیب (m/m)	زمان تمرکز (h)	حداکثر دبی اوج (L/S)	حجم کل رواناب (m ³)
زیرحوضه ۱۰	۱۹/۰۸	۰/۱۵	۰/۰۰۹	۰/۷۵	۳۹/۰۸	۷۹۰
زیرحوضه ۱۱	۱۱۶/۷۷	۰/۱۵	۰/۰۰۴	۳/۱۷	۲۲۴/۹۳	۴۸۳۴/۲
زیرحوضه ۱۲	۱۷۵/۶۲	۰/۱۵	۰/۰۰۴	۳/۵۲	۳۳۸/۴۹	۷۲۷۰/۹
زیرحوضه ۱۳	۱۲۵۷/۲۴	۰/۱۵	۰/۰۰۵	۵/۰۸	۲۳۹۹/۸۴	۵۲۰۴۹/۸
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 کریچ

زیرحوضه	مساحت (ha)	ضریب رواناب (روش استدلالی)	شیب (m/m)	زمان تمرکز (h)	حداکثر دبی اوج (L/S)	حجم کل رواناب (m ³)
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

بررسی تأثیر روش‌های مختلف محاسبه زمان تمرکز بر روی هیدروگراف خروجی سیلاب و دبی اوج و حجم رواناب

در بررسی بعدی سعی بر آن بود که تأثیر روش‌های مختلف محاسبه زمان تمرکز (کریچ، برنس‌بای-ویلیامز، کارتر) بر روی هیدروگراف خروجی سیلاب و دبی اوج و حجم رواناب تولیدی با مدت بارندگی شش ساعته و دوره بازگشت دو ساله مورد ارزیابی قرار گیرد. اما از آنجایی که زمان تمرکز محاسبه شده توسط روش برنس‌بای-ویلیامز و کارتر بیش‌تر از مدت بارندگی شش ساعت بود، نرم افزار 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 بر روی هیدروگراف خروجی سیلاب و دبی اوج و حجم رواناب مورد ارزیابی قرار گرفتند. طبق این بررسی و با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴ میزان خطای پیوستگی هنگام استفاده از روش‌های کریچ، برنس‌بای-ویلیامز و کارتر به ترتیب ۰/۰۶، ۰/۱ و ۱/۹ درصد بود. همچنین پس از محاسبه زمان تمرکز به سه روش فوق مشخص شد که روش برنس‌بای-ویلیامز نسبت به روش کریچ 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 بر اساس نتایج جدول ۴ گرچه در هر زیرحوضه به صورت مجزا مقدار حداکثر دبی اوج محاسبه شده با استفاده از سه روش تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند اما در هر سه زیرحوضه حداکثر دبی اوج در هنگام استفاده از روش کارتر بیش‌ترین و هنگام استفاده از روش برنس‌بای-ویلیامز کم‌ترین مقدار را نشان می‌دهد.



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	خطای پیوستگی (%)	شیب (m/m)	مساحت (ha)	ضریب رواناب	حداکثر دبی اوج (L/s)	حجم کل رواناب (m ³)
زیرحوضه ۱	کریچ	۰/۰۶	۰/۰۰۴	۷۵/۵۸	۰/۱۵	۱۴۶/۲۳	۳۱/۲۹
	برنس‌بای-ویلیامز	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	
زیرحوضه ۲	کریچ	۱/۶	۰/۶	۰/۰۰۸	۴۷/۱۷	۰/۱۵	۹۲/۹۶	۱۹۵۲/۸
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	
زیرحوضه ۳	کریچ	۱/۶۸	۰/۶	۰/۰۰۵	۱۴۱/۶۵	۰/۱۵	۱۱۷/۱۱	۲۴۶/۲
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	

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 بر 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 دو ساله و مدت بارندگی دوازده ساعت که زمان تمرکز با روش‌های کریچ، برنس‌بای-ویلیامز و کارتر محاسبه شد، مقدار خطای پیوستگی به ترتیب ۰/۱، ۰ و ۰/۴ درصد به دست آمد. برای حالت نه نیز با همان شرایط، هنگام استفاده از روش‌های کریچ، 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 با توجه به میزان خطای پیوستگی روش برنس‌بای-ویلیامز نسبت به سایر روش‌ها از دقت بیش‌تری در همه‌ی 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 کریچ و کمترین تخمین مربوط به استفاده از زمان تمرکز به دست آمده از روش برنس‌بای-ویلیامز است. همچنین خطای پیوستگی نیز در روش کارتر بیش‌تر از دو روش دیگر است.

با توجه 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 حداکثر دبی اوج رواناب در حالت هفده زیرحوضه با دوره بازگشت دو ساله و مدت بارندگی شش ساعته و زمان تمرکز محاسبه شده توسط روش کریچ، حدود ۱۲۳۹۳۸ مترمکعب و ۲۴۰۰ لیتر بر ثانیه بوده در حالی که در همین شرایط و با تغییر مدت زمان بارندگی به دوازده ساعت حجم رواناب تولیدی حدود ۱۶۷۰۴۷ متر مکعب و حداکثر دبی اوج رواناب حدود ۱۶۳۵ لیتر بر ثانیه می‌باشد که نشان دهنده افزایش ۳۵ درصدی حجم کل رواناب تولیدی و کاهش ۴۷ درصدی حداکثر دبی اوج رواناب است. در حالت نه زیرحوضه نیز حجم رواناب تولیدی و حداکثر دبی اوج رواناب با دوره بازگشت دو ساله و مدت بارندگی شش ساعته و زمان تمرکز محاسبه شده توسط روش کریچ، حدود ۱۲۰۷۹۳ مترمکعب و ۲۷۰۴ لیتر بر ثانیه می‌باشد که با تغییر مدت زمان بارندگی به دوازده ساعت حجم رواناب و حداکثر 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 حداکثر دبی اوج می‌باشد. همچنین حداکثر 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 می‌باشد که نشان می‌دهد روش برنس‌بای-ویلیامز و کارتر هر کدام حدود ۰/۵ درصد نسبت به روش کریپیج دبی اوج رواناب را کمتر محاسبه می‌کنند. 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 کریپیج و کمترین تخمین مربوط به استفاده از زمان تمرکز حاصل از روش برنس‌بای-ویلیامز می‌باشد. 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 جهت محاسبه زمان تمرکز در این منطقه می‌باشد. لازم به ذکر است مقدار دبی اوج بدست آمده هنگام استفاده از روش‌های مختلف محاسبه زمان تمرکز تفاوت کمی با یکدیگر دارند و مقادیر به‌دست آمده نزدیک به هم می‌باشند.

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 نشان دهنده آن بود که روش کریپیج به همراه معادله کالیفرنیا و معادله آریزونا بهترین عملکرد را داشتند. در پژوهش حاضر نیز براساس میزان خطای پیوستگی روش کریپیج روشی مناسب برای برآورد زمان تمرکز می‌باشد (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 آلفا بر دبی اوج را بررسی کردند. در پژوهش حاضر نیز تأثیر تعداد و مساحت زیرحوضه‌ها و همچنین زمان تمرکز بر روی دبی اوج و حجم رواناب بررسی شد که نشان دهنده 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 بیش‌تر است (۲).

رفیعی و همکاران (۱۴۰۱)، برای بررسی سیلاب شهری در شهر لار، عملکرد سه مدل SWMM، SewerGEMS 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).

جدول ۵. نتایج مقایسه حالت ۱۷ زیرحوضه با مدت زمان بارندگی ۱۲ ساعته و زمان تمرکز کریپیج، 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 ³)
کریپیج		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

نشریه علوم آب و خاک

۴۲۱۷/۳	۹۸/۰۱	۰/۱۵	۷۵/۵۸	۰/۰۰۴	۰/۴	۱/۳	کارتر	
۲۶۳۲	۶۱/۳۵	۰/۱۵	۴۷/۱۷	۰/۰۰۸	۰/۱	۱/۶	کرپیچ	
۲۶۳۲	۶۱/۵	۰/۱۵	۴۷/۱۷	۰/۰۰۸	۰	۳/۸۵	برنس‌بای- ویلیامز	زیرحوضه ۲
۲۶۳۲	۶۱/۰۴	۰/۱۵	۴۷/۱۷	۰/۰۰۸	۰/۴	۱/۷۷	کارتر	
۳۳۲۴	۷۷/۲۲	۰/۱۵	۵۹/۵۷	۰/۰۰۵	۰/۱	۱/۶۸	کرپیچ	
۳۳۲۴	۷۶/۹۹	۰/۱۵	۵۹/۵۷	۰/۰۰۵	۰	۳/۴۸	برنس‌بای- ویلیامز	زیرحوضه ۳
۳۳۲۴	۷۷/۷۸	۰/۱۵	۵۹/۵۷	۰/۰۰۵	۰/۴	۱/۲۲	کارتر	
۴۶۰۷/۴	۱۰۷/۴۷	۰/۱۵	۸۲/۵۷	۰/۰۰۴	۰/۱	۳	کرپیچ	
۴۶۰۷/۴	۱۰۷/۰۲	۰/۱۵	۸۲/۵۷	۰/۰۰۴	۰	۶/۶۷	برنس‌بای- ویلیامز	زیرحوضه ۴
۴۶۰۷/۴	۱۰۶/۷۵	۰/۱۵	۸۲/۵۷	۰/۰۰۴	۰/۴	۱/۹	کارتر	
۶۴۴/۵	۱۵/۵۶	۰/۱۵	۱۱/۵۵	۰/۰۱	۰/۱	۰/۷۳	کرپیچ	
۶۴۴/۵	۱۵/۱۸	۰/۱۵	۱۱/۵۵	۰/۰۱	۰	۱/۷۳	برنس‌بای- ویلیامز	زیرحوضه ۵
۶۴۴/۵	۱۵/۴۸	۰/۱۵	۱۱/۵۵	۰/۰۱	۰/۴	۰/۶۳	کارتر	
۱۶۵۴/۳	۳۸/۴۴	۰/۱۵	۲۹/۶۵	۰/۰۰۵	۰/۱	۱/۶۵	کرپیچ	
۱۶۵۴/۳	۳۸/۵۷	۰/۱۵	۲۹/۶۵	۰/۰۰۵	۰	۳/۶۵	برنس‌بای- ویلیامز	زیرحوضه ۶
۱۶۵۴/۳	۳۸/۸۲	۰/۱۵	۲۹/۶۵	۰/۰۰۵	۰/۴	۱/۲	کارتر	
۳۸۴۰/۴	۸۹/۲۳	۰/۱۵	۶۸/۸۲	۰/۰۰۶	۰/۱	۱/۷۵	کرپیچ	
۳۸۴۰/۴	۸۹/۷۳	۰/۱۵	۶۸/۸۲	۰/۰۰۶	۰	۳/۸	برنس‌بای- ویلیامز	زیرحوضه ۷
۳۸۴۰/۴	۸۹/۶	۰/۱۵	۶۸/۸۲	۰/۰۰۶	۰/۴	۱/۲۵	کارتر	

نشریه علوم آب و خاک

ادامه جدول ۵. نتایج مقایسه حالت ۱۷ زیرحوضه با مدت زمان بارندگی ۱۲ ساعته و زمان تمرکز کریپیج، 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 ³)
زیرحوضه ۸	کریپیج	۲/۳	۰/۱	۰/۰۰۶	۱۱۶/۰۳	۰/۱۵	۱۵۱/۷	۶۴۷۴/۳
	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
زیرحوضه ۹	کریپیج	۰/۷۷	۰/۱	۰/۰۰۶	۷۶/۹۲	۰/۱۵	۱۰۵/۵۸	۴۲۹۲/۲
	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
زیرحوضه ۱۰	کریپیج	۰/۷۵	۰/۱	۰/۰۰۹	۱۹/۰۸	۰/۱۵	۲۶/۴۲	۱۰۶۴/۹
	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
زیرحوضه ۱۱	کریپیج	۳/۱۷	۰/۱	۰/۰۰۴	۱۱۶/۷۷	۰/۱۵	۱۵۱/۳۲	۶۵۱۵/۷
	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
زیرحوضه ۱۲	کریپیج	۳/۵۲	۰/۱	۰/۰۰۴	۱۷۵/۶۲	۰/۱۵	۲۲۸/۲۶	۹۷۹۹/۹
	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
زیرحوضه ۱۳	کریپیج	۵/۰۸	۰/۱	۰/۰۰۵	۱۲۵۷/۲۴	۰/۱۵	۱۶۳۳/۰۶	۷۰۱۵۴
	برنس‌بای-ویلیامز	۱۰/۷۷	۰	۰/۰۰۵	۱۲۵۷/۲۴	۰/۱۵	۱۶۳۳/۶	۷۰۱۵۴
	کارتر	۲/۸۷	۰/۴	۰/۰۰۵	۱۲۵۷/۲۴	۰/۱۵	۱۶۲۷/۱۷	۷۰۱۵۴
زیرحوضه ۱۴	کریپیج	۴/۴۲	۰/۱	۰/۰۰۴	۳۷۷/۴۱	۰/۱۵	۲۹۱/۳۳	۲۱۰۵۹/۶
	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

ادامه 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 ³)
زیرحوضه ۱۵	کریچ	۲/۷۲	۰/۱	۰/۰۰۵	۲۲۲/۵۷	۰/۱۵	۴۸۹/۰۵	۱۲۴۱۹/۳
	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
زیرحوضه ۱۶	کریچ	۳/۱۲	۰/۱	۰/۰۰۴	۱۳۲/۸۲	۰/۱۵	۱۷۳/۱۷	۷۴۱۱/۳
	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
زیرحوضه ۱۷	کریچ	۲/۷۳	۰/۱	۰/۰۰۵	۱۲۴/۳	۰/۱۵	۱۶۲/۴۳	۶۹۳۵/۷
	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 ³)
زیرحوضه ۱	کریچ	۱/۸۵	۰/۲	۰/۰۰۴	۷۵/۵۸	۰/۱۵	۹۹/۴۱	۴۲۱۷/۳
	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
زیرحوضه ۲	کریچ	۱/۶	۰/۲	۰/۰۰۸	۴۷/۱۷	۰/۱۵	۶۱/۸۵	۲۶۳۲
	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

نشریه علوم آب و خاک

ادامه 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 ³)
زیرحوضه ۳	کریچ	۳/۴۵	۰/۲	۰/۰۰۳	۱۴۱/۶۵	۰/۱۵	۱۸۴/۳۸	۷۹۰۴/۲
	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
زیرحوضه ۴	کریچ	۱/۷۵	۰/۲	۰/۰۱	۴۰/۴۱	۰/۱۵	۵۳/۱۱	۲۲۵۵/۱
	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
زیرحوضه ۵	کریچ	۲/۶۵	۰/۲	۰/۰۰۶	۱۸۴/۷۶	۰/۱۵	۲۴۲/۰۹	۱۰۳۰۹/۷
	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
زیرحوضه ۶	کریچ	۱/۵۸	۰/۲	۰/۰۰۷	۹۵/۲۲	۰/۱۵	۱۲۳/۸۲	۵۳۱۳/۲
	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
زیرحوضه ۷	کریچ	۳/۷۵	۰/۲	۰/۰۱	۲۷۹/۴۷	۰/۱۵	۳۶۳/۹۹	۱۵۵۹۴/۷
	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
زیرحوضه ۸	کریچ	۵/۰۸	۰/۲	۰/۰۰۵	۱۴۱۶/۵۶	۰/۱۵	۱۸۳۷/۵۵	۷۹۰۴۳/۹
	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
زیرحوضه ۹	کریچ	۳/۳۸	۰/۲	۰/۰۰۵	۶۳۶/۸۹	۰/۱۵	۸۲۶/۳۴	۳۵۵۳۸/۴
	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

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش با بهره‌گیری از نرم افزار SewerGEMS شبیه‌سازی رواناب ناشی از بارندگی با دوره بازگشت دو ساله انجام گرفت. از آنجایی که زمان تمرکز به عنوان یک عامل مهم در شبیه‌سازی رواناب محسوب می‌شود برای محاسبه زمان تمرکز از سه روش کریپیچ، 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 کریپیچ و برنس‌بای-ویلیامز محاسبه می‌کند. به‌طوری که زمان تمرکز محاسبه شده در روش برنس‌بای-ویلیامز حدود ۱۲۵ درصد با روش کریپیچ و حدود ۱۸۰ درصد با روش کارتر تفاوت دارد. همچنین بر اساس مقدار خطای پیوستگی نرم افزار، روش برنس‌بای-ویلیامز در همه‌ی حالت‌ها کم‌ترین مقدار خطای پیوستگی را دارد و روش کارتر بیش‌ترین مقدار خطای پیوستگی را دارا می‌باشد. از این روی می‌توان گفت روش برنس‌بای-ویلیامز مناسب‌ترین روش برای محاسبه زمان تمرکز در این منطقه است. قابل پیش‌بینی است که با بسته شدن خروجی زیرحوضه‌های کوچک‌تر و بهم پیوستن زیرحوضه‌ها و در نتیجه افزایش مساحت آن‌ها دبی اوج افزایش می‌یابد و مهار سیلاب دشوارتر می‌شود. به‌عنوان مثال 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 این روی نتایج این پژوهش نشان داد که با ادغام زیرحوضه‌ها و افزایش مساحت آن‌ها دبی اوج رواناب و حجم رواناب تولیدی افزایش پیدا می‌کند. به‌طوری که در حالت ۱۷ زیرحوضه حجم کل رواناب و حداکثر 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 حداکثر دبی اوج رواناب به‌ترتیب به ۱۲۸۸۴۶ مترمکعب و ۲۸۸۴ لیتر بر ثانیه می‌رسد. که نشان‌دهنده افزایش ۴ درصدی حجم کل رواناب تولیدی و افزایش ۲۰ درصدی حداکثر دبی اوج رواناب می‌باشد.

بر اساس نتایج به‌دست آمده می‌توان اینطور جمع‌بندی کرد که از تجمیع زیرحوضه‌های کوچک‌تر و تبدیل شدن آن‌ها به زیرحوضه‌های بزرگ‌تر و تبدیل آن‌ها به زیر حوضه‌های 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 نرم افزار SewerGEMS امکان پذیر می‌باشد.

منابع مورد استفاده

1. Alizadeh, A. 2019. Principles of applied hydrology. Publications of Imam Reza University.
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, 184 P.
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). 2nd National Congress on Iran's Irrigation & Drainage Congress. Isfahan University of Technology.
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. 2015. Estimation of Urban Runoff to Supply for Irrigation of Green Space (A Case Study: Sarpol-e Zahab). *Journal of Water and soil magazine (agricultural sciences and techniques and natural resources)*, 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 & Engineering*. second year. 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.
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 are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair. 4098.
19. Nahid, M., M. R. Zandmoghadam and Z. Karkehabadi. 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. (ASCE)IR. 1943-4774. 0000373.
23. Shang, J and J. P. Wilson. 2009. Watershed Urbanization and Changing behavior across the LosAngeles 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 6nd 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. J. 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)

Majid Ranjbari Hajiabadi¹, Jahangir Abedi Koupa^{2*}, Mohammad Mahdi Matinzadeh³

1- MSc. Student, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran, E-mail: majhajiabadi13@gmail.com

2*- Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran, E-mail: koupai@cc.iut.ac.ir (corresponding author)

3- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran, E-mail: matinzadeh@iut.ac.ir

Abstract

Urban runoff is a serious issue due to urbanization and climate change. Therefore, it is important to pay attention to rainfall-runoff simulation models in order 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 along with different rainfall durations of 6 and 12 hours. Additionally, the performance of three methods for calculating concentration time (Kerpich, Brnsby-Williams, Carter) was compared to simulate flood hydrograph 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. Therefore, the Brnsby-Williams method can be considered the most appropriate for calculating the concentration time in this area. However, it should be noted that the concentration time calculated by this method in some sub-basins exceeded the 6-hour duration of rain, which posed limitations for data analysis using the software.

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 for the comparison between 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 m³/s to 2.884 m³/s. This demonstrates an

increase in both the total volume and maximum peak discharge of the runoff. Finally, in this research, the model was validated by adjusting the runoff coefficient until the lowest continuity error of the software was achieved.

Key words: Rainfall-runoff simulation models, Rainfall duration, Urban flooding, Concentration time, SewerGEMS, urban sub-basins, Slope of the sub-basin