

## بررسی عملکرد و تعیین ابعاد بهینه شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی با استفاده از مدل SWMM

مجید امیدی ارجنکی، حامد رضا ظریف صنایعی\*، هیثم حیدرزاده

گروه مهندسی عمران، گرایش آب و سازه هیدرولیکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۹

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۳۰

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲

### کلمات کلیدی:

رواناب

دوره بازگشت

کفایت شبکه

آب‌گرفتنی

SWMM

**خلاصه:** آب‌گرفتنی معابر در اثر عدم کفایت شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی، همواره در شهرها مشکلات زیادی را به همراه داشته است. لذا، شناخت نقاط مستعد آب‌گرفتنی و کانال‌هایی که دچار بالازدگی شده‌اند، مهم است. در این پژوهش با استفاده از مدل SWMM، کفایت شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی شهر شهرکرد در دوره بازگشت‌های بارندگی ۲، ۵ و ۱۰ ساله بررسی شده است. لازم به ذکر است که تاکنون هیچ مطالعه‌ای پیرامون موضوع رواناب شهری در این منطقه صورت نگرفته است. در این شبیه‌سازی، واسنجی مدل برای شاخص دبی در ۳ و برای واسنجی شاخص عمق در ۲ رویداد بارشی انجام شد. برای مقایسه میزان خطای مدل شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی از ضرایب خطای NSE، RMSE و BIAS% استفاده شده است. با انجام آنالیز حساسیت، شاخص عرض معادل به عنوان حساس‌ترین شاخص مدل انتخاب شد. صحت سنجی بر روی دو پارامتر دبی و عمق رواناب، هر کدام در ۲ رویداد بارشی مجزا، در چند کانال و گره تصادفی انجام شد. مقادیر قابل قبول به دست آمده برای ضرایب خطا، نشان از دقت بالای شبیه‌سازی داشت. پس از مرحله صحت سنجی، مدل برای دوره بازگشت‌های بارندگی ۲، ۵ و ۱۰ ساله اجرا و مشخص شد که به ترتیب در ۱۹/۴، ۲۰/۶۸ و ۲۱/۵۲ درصد کانال‌های شهر، بالازدگی رخ می‌دهد. موقعیت کانال‌های سیلابی نشان می‌دهد قسمت‌های جنوب غربی شهر دچار آب‌گرفتنی خواهند شد. در ادامه نیز ابعاد بهینه کانال‌ها برای جلوگیری از وقوع آب‌گرفتنی، در دوره بازگشت بارندگی ۱۰ ساله تعیین شد و حجم بتن مورد نیاز برای اصلاح ابعاد تک تک کانال‌ها نیز برآورد شد.

### ۱- مقدمه

وقوع آب‌گرفتنی در دوره بازگشت بارندگی ۱۰ ساله است. هم‌چنین در انتهای این پژوهش حجم بتن مورد نیاز برای اصلاح ابعاد شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی شهر شهرکرد تعیین شده است. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در خصوص روش‌های برآورد رواناب سطحی و کفایت شبکه‌های زهکشی شهری و هم‌چنین روش‌های مدیریتی در خصوص کنترل سیلاب‌های شهری انجام گرفته است. هسو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۰)، بارش طرح ۲۴ ساعته را در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله شبیه‌سازی کردند و با استفاده از مدل SWMM در مناطق مرکزی شهری در شمال تایوان، طغیان سیل در مجاری فاضلاب شهری را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد

در دهه‌های اخیر، بحث جمع‌آوری و کاهش رواناب سطحی شهری از اجزاء مهم برنامه ریزی و عمران مناطق شهری قرار گرفته است. از طرفی با توجه به سرعت رشد مناطق شهری، وجود بافت‌های قدیمی در شهرها، عدم کفایت شبکه زهکشی و جمع‌آوری رواناب سطحی و نبود طرح‌های جامع کنترل سیلاب شهری در اغلب شهرهای ایران، لازم است مطالعات جامعی در این خصوص انجام پذیرد. رویکرد پژوهش حاضر، بررسی وضعیت کفایت شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی شهر شهرکرد، تعیین نقاط و کانال‌های سیلابی در دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ ساله و در نهایت تعیین ابعاد بهینه کانال‌ها برای جلوگیری از

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: eagolroo@aut.ac.ir

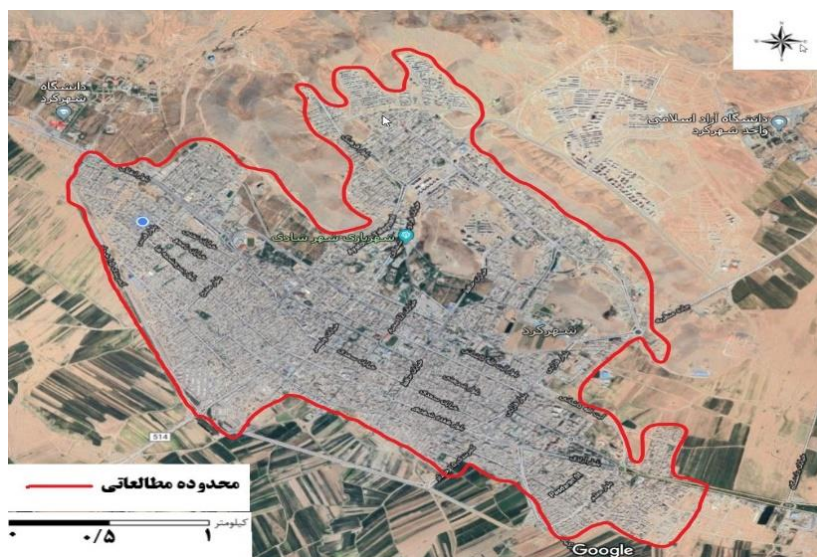
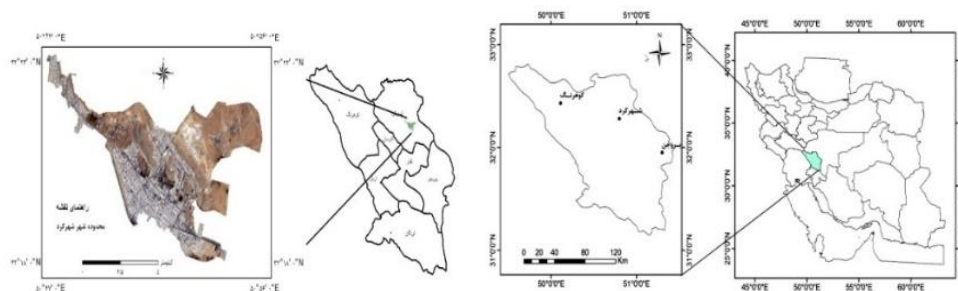


می‌دهد [۶]. کریمی و همکاران (۲۰۱۵)، از مدل EPA-SWMM برای شبیه سازی کمی سیلاب ناشی از بارندگی در بخش‌هایی از حوزه‌ی شهری بابلسر استفاده نمودند. شبیه‌سازی برای رگبارهای دو ساعته با دوره بازگشت ۲،۵ و ۱۰ ساله و به مدت ۱۲ ساعت، انجام شد. نتایج نشان داد مقادیر دبی پیکی که برای ۱۰ نقطه، با فرمول منطقی محاسبه شده بودند با مقادیر نظیر شبیه‌سازی شده در مدل، همبستگی خطی معناداری دارد [۷]. سلیمانی و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از مدل SWMM و با فرض سناریوهای سنتی (افزایش ابعاد کانال) و نوین (جوی‌باغچه) به شبیه‌سازی میزان رواناب ایجاد شده در شهر گلستان استان تهران پرداختند. این پژوهش نشان داد که سیستم جوی‌باغچه کارایی بهتری نسبت به روش سنتی دارد و قادر به کاهش سیلاب به میزان ۵۹ درصد در این منطقه است [۸]. وانگ<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، به ارزیابی و مدل‌سازی ابزارهای کاهش رواناب، با استفاده از مدل SWMM پرداختند. ایشان از سه سناریوی سنگ فرش متخلخل، جمع آوری باران و بام سبز استفاده کردند که سنگ فرش متخلخل بهترین ابزار در کاهش حجم رواناب بود و حدود ۳۰ درصد میزان رواناب را کاهش داد [۹]. بابایی و همکاران (۲۰۱۸)، به ارزیابی سیستم زهکشی منطقه‌ی شهری ارومیه با استفاده از دو روش SWMM و PROMETHEE II پرداختند. آن‌ها پس از تقسیم‌بندی منطقه به ۲۲ زیرحوضه و پس از ارزیابی و کالیبراسیون مدل با استفاده از ۳ واقعه‌ی مشاهداتی و معرفی CN به عنوان حساس‌ترین شاخص در برآورد میزان رواناب سطحی، به این نتیجه رسیدند که در دوره بازگشت ۱۰ ساله برای جلوگیری از جاری شدن سیل در این حوضه باید عمق کانال‌ها حدود ۲۰ درصد افزایش یابد. هم‌چنین نتایج نشان داد هر دو مدل SWMM و PROMETHEE II زیر حوضه‌های یکسانی را به عنوان بحرانی‌ترین نواحی معرفی کردند [۱۰]. رندال<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی تأثیر استفاده از روش‌های توسعه‌ی کم اثر (LID) بر میزان رواناب شهری و نگهداشت آب باران پرداختند. آن‌ها این پژوهش را با هدف ذخیره‌سازی ۸۵-۸۰ درصد آب باران شهر پکن در چین انجام دادند. با اجرای سه سناریوی بام سبز، جوی باغچه و روکش نفوذپذیر در دوره بازگشت ۳۵ ساله‌ی بارندگی، به این نتیجه رسیدند که با اجرای ۳۰ درصد بام سبز، ۱۰ درصد جوی‌باغچه و ۳۵ درصد

مدل SWMM برای تجزیه و تحلیل و سیلاب‌های شبکه فاضلاب مناسب است [۱]. لو<sup>۱</sup> (۲۰۱۰)، مدل SWMM را برای طراحی سیستم فاضلاب بهداشتی زیر سطحی به کار گرفت. وی بیان کرد با توجه به اینکه مدل SWMM منحصراً برای تحلیل سیستم فاضلاب شهری به کار می‌رود، اما می‌توان به خوبی از آن برای تحلیل و طراحی فاضلاب نیز استفاده کرد [۲]. چن<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۹)، با ترکیب مدل یک بعدی SWMM و مدل دو بعدی UIM<sup>۳</sup>، به شبیه‌سازی جریان رو سطحی و زیر سطحی و استخراج نقشه‌ی آب‌گرفتگی حوضه مورد مطالعه پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با توجه تساوی مقادیر بارندگی و ظرفیت کانال، علت آب‌گرفتگی در یک کانال می‌تواند به دلیل تمرکز جریان در یک مدت زمان کوتاه باشد. آن‌ها هم‌چنین بیان کردند که ترکیب یک مدل هیدرولوژیکی با یک مدل هیدرولیکی، می‌تواند نتایج بهتری نسبت به استفاده از یک نوع مدل داشته باشد [۳]. لی<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۰)، به بررسی الگوی هزینه-اثر بخشی استفاده از بهترین روش‌های مدیریتی (BMP)، با استفاده از مدل SWMM پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود، در منطقه‌ی مورد مطالعه، از ۳ روش روکش‌های نفوذناپذیر، حوضچه‌های نگهداشت و بام‌های سبز استفاده کردند که نتایج نشان داد، روکش‌های نفوذناپذیر، مؤثرترین روش برای کاهش رواناب است [۴]. زاقلول<sup>۵</sup> و موتایری<sup>۶</sup> (۲۰۱۰)، در پژوهشی که در مناطق شهری کویت انجام دادند، رواناب حاصل از بارندگی در این مناطق با استفاده از مدل SWMM تخمین زدند. آن‌ها برای صحت سنجی اجرای شبکه نیز از مدل SWMM استفاده کردند و دریافتند که استفاده از این مدل در طراحی شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی، نتایج به مراتب بهتری نسبت به استفاده از روش منطقی دارد [۵]. تادسچینی<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۲)، در پژوهشی در شمال ایتالیا، به بررسی کارایی حوضچه‌های تأخیری آب باران در شبکه‌های زهکشی شهری پرداختند. آن‌ها از مدل SWMM برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب به صورت تک واقعه استفاده کردند. نتایج نشان داد ترکیب حوضچه‌های تأخیری با تنظیم‌کننده‌های جریان، واکنش خوبی را نسبت به آلودگی‌های زیست محیطی نشان

- 1 Lowe
- 2 Chen
- 3 Urban Inundation Model
- 4 Lee
- 5 Zaghoul
- 6 Mutairi
- 7 Todeschini

8 Wang  
9 Randall



شکل ۱. موقعیت و محدوده‌ی جغرافیایی شهر شهرکرد و منطقه‌ی مورد مطالعه [۱۳]  
**Fig. 1. Geographical location of Shahrekord and the case study area**

ابعاد بهینه کانال‌ها در خیابان‌های فرعی نپرداخته و صرفاً به بررسی وضعیت چند کانال سیلاب‌رو اصلی پرداخته‌اند. از این رو، در این پژوهش سعی شده است تا به صورت کاملاً کاربردی، نقاط بحرانی و کانال‌های سیلابی شهر، در بارندگی با دوره بازگشت‌های مختلف مشخص شوند و سپس ابعاد بهینه این کانال‌ها طوری تعیین شود که مشکل بالازدگی رواناب سطحی در آن‌ها به طور کامل برطرف شود. در نهایت نیز حجم بتن مورد نیاز برای اصلاح ابعاد کانال‌ها، برای همه کانال‌های شهر، به صورت مجزا، تعیین شده است.

## ۲- محدوده مطالعاتی

در این پژوهش، ناحیه‌ی شهری شهرکرد از ابتدای کوی شهرداری تا میدان معلم به ۱۱۴ زیر حوضه تقسیم بندی شده است که به عنوان محدوده‌ی مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. مشخصات کامل منطقه در شکل ۱ نمایش داده شده است.

روکش نفوذپذیر، از مساحت کل منطقه، میزان ذخیره آب باران از ۵۹/۹ درصد به ۸۲/۲ درصد افزایش می‌یابد [۱۱]. ژو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، به مطالعه‌ی اثربخشی روش‌های توسعه‌ی کم اثر (LID)، بر روی رواناب سطحی منطقه‌ای در چین پرداختند. آن‌ها برای کالیبره کردن مدل از ۱۲ بارش در مناطق مسکونی استفاده کردند. آن‌ها برای دستیابی به شاخص‌های بهینه‌ی روش‌های LID از روش PEST استفاده کردند که نتایج نشان داد این روش می‌تواند استراتژی‌های مدیریت رواناب را بهینه‌سازی کند [۱۲].

جمع‌بندی مطالعات نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقات زیادی بر روی رواناب سطحی شهری در داخل و خارج از کشور انجام شده است اما بیشتر آن‌ها به توانایی مدل SWMM در برآورد میزان رواناب و هم‌چنین، تأثیر روش‌های LID بر کاهش میزان رواناب پرداختند و در مناطق مطالعاتی خویش، به طور دقیق و جزئی به بررسی و تعیین

1 Zho

### ۳- مواد و روش‌ها

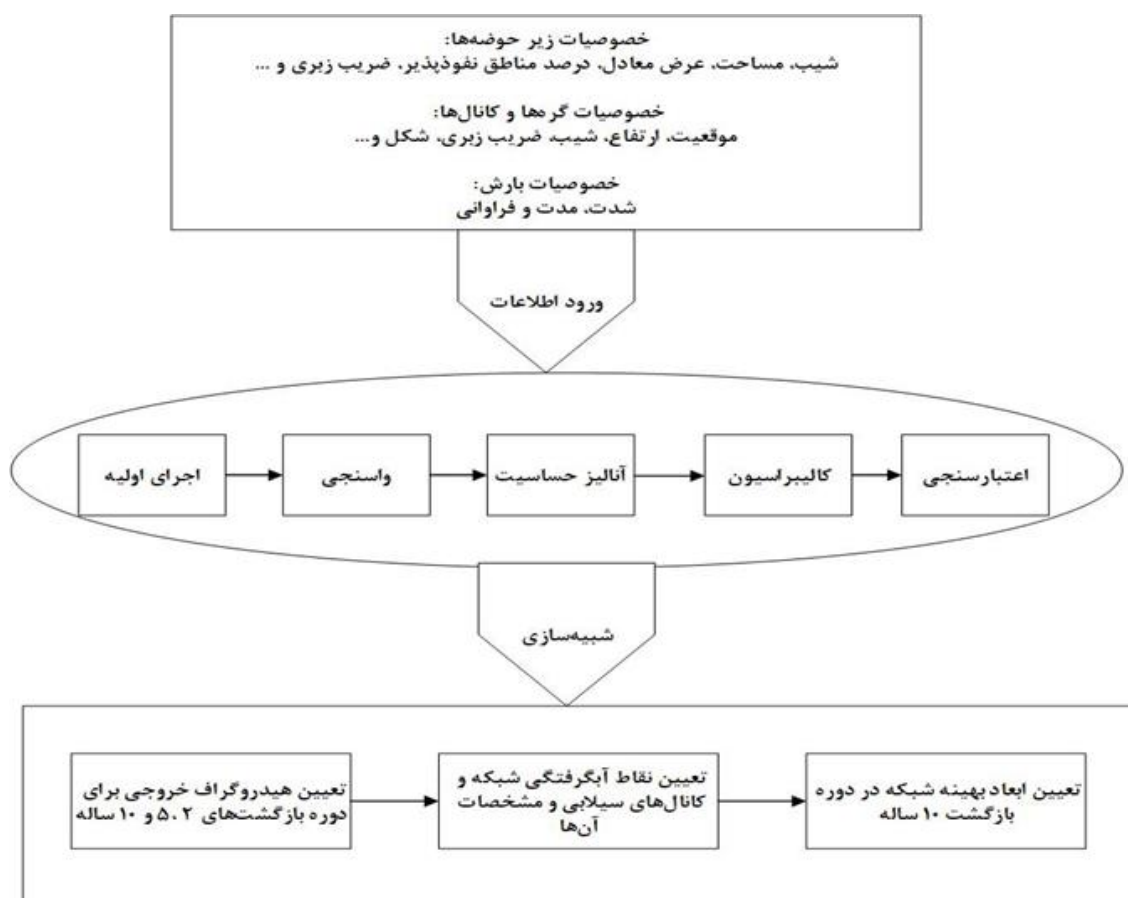
#### ۳-۱- روش‌شناسی

این پژوهش از دو بخش، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی تشکیل شده است. در بخش هیدرولوژیکی روابط و منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی بارش‌ها استخراج شده و مقادیر بارش‌های طرح بر اساس دوره بازگشت مربوطه، تهیه شده‌اند. در بخش هیدرولیکی نیز اطلاعات مربوط به زیر حوضه‌ها شامل: مساحت، محیط، عرض معادل، شیب متوسط، درصد مناطق نفوذناپذیر و ... از روی نقشه‌های کاربری اراضی و به کمک نرم‌افزار 3D Civil تهیه شد. همچنین اطلاعات مربوط به ابعاد و جنس و شکل مقطع کانال‌ها نیز توسط بازدیدهای میدانی و به صورت دستی برداشت شد.

پس از این مرحله شبیه‌سازی توسط نرم افزار SWMM انجام شد. به منظور واسنجی مدل برای دو شاخص دبی و عمق، به ترتیب از ۳ و ۲ واقعه‌ی رگباری استفاده شد و نتایج مشاهداتی با مقادیر

شبیه‌سازی شده مقایسه گردید. پس از انجام آنالیز حساسیت مدل برای ۶ شاخص مؤثر در میزان رواناب، کالیبراسیون مدل انجام شد و در نهایت مجدداً به منظور اعتبار سنجی مدل برای دو شاخص دبی و عمق با استفاده از مقادیر کالیبره شده، از ۲ واقعه‌ی رگباری برای هرکدام استفاده شد. سپس برای نشان دادن میزان خطای مدل با مقادیر مشاهداتی از شاخص‌های آماری RMSE، NSE و %BIAS استفاده شد.

بعد از این مرحله شبیه‌سازی برای دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ ساله انجام شد و پس از هیدروگراف‌های خروجی حوضه، نقاط و کانال‌های سیلابی شهر و مشخصات آن‌ها تهیه و سرانجام ابعاد بهینه کانال‌ها برای دوره بازگشت ۱۰ ساله طراحی و حجم بتن موردنیاز برای اصلاح این ابعاد برآورد شد. در شکل ۲ نمایی کلی از مراحل انجام پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۲. مراحل کلی پژوهش

Fig. 2. General stages of the research

جدول ۱. مقادیر شدت - مدت - فراوانی بارش‌ها در شهرکرد (میلی‌متر بر ساعت)

Table 1. Intensity - Duration - Frequency values of the rainfall in Shahrekord (mm / h)

دوره بازگشت تداوم (hr)	۲ ساله	۵ ساله	۱۰ ساله	۲۰ ساله	۵۰ ساله	۱۰۰ ساله
۱	۸/۹۲	۱۲	۱۴/۳۳	۱۶/۶۵	۱۹/۷۳	۲۲/۰۶
۲	۶/۵۰	۸/۷۵	۱۰/۴۴	۱۲/۱۴	۱۴/۳۸	۱۶/۰۸
۳	۵/۳۹	۷/۲۵	۸/۶۶	۱۰/۰۶	۱۱/۹۲	۱۳/۳۳
۴	۴/۷۲	۶/۳۴	۷/۵۷	۸/۸۰	۱۰/۴۳	۱۱/۶۶
۵	۴/۲۵	۵/۷۲	۶/۸۲	۷/۹۳	۹/۴۰	۱۰/۵۱
۶	۳/۹۰	۵/۲۵	۶/۲۷	۷/۲۸	۸/۶۳	۹/۶۵

### ۱-۱-۳- معرفی مدل SWMM

این مدل در بین سال‌های ۱۹۶۹ و ۱۹۷۱، توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا طراحی شده است [۱۴]. این مدل یک شبیه‌ساز دینامیکی بارش - رواناب (تک واقعه و پیوسته) با قابلیت احتساب پدیده‌های تبخیر، ذوب برف، ذخیره چلابی، نفوذ عمقی و جریانات زیر سطحی است. در این مدل برآورد موج سیلاب با روش سینماتیک و ترکیب المان‌های جریانات رو زمینی و کانالیزه شده صورت می‌گیرد. بنابراین دارای مبنای فیزیکی، نگاه توزیعی، امکان بررسی جداگانه نواحی نفوذپذیر و نفوذناپذیر و همچنین قابلیت شبیه‌سازی پاسخ غیرخطی حوضه به بارندگی اضافی است. از آنجا که مدل، جریان رواناب را در قالب شبکه‌ی زهکشی زیرحوضه‌ها و کلیه مجاری عبور آب شبیه‌سازی کرده و در طول مجاری و در محل اتصال کانال‌ها، پروفیل سطح آب را ارائه می‌دهد، می‌توان از این مدل در مدیریت رواناب شهری و طراحی شبکه‌ی زهکشی استفاده کرد [۱۴]. از مهم‌ترین مزایای این مدل می‌توان به توانایی بالا در شبیه‌سازی کمی و کیفی رواناب‌های سطحی و زیر سطحی و همچنین استفاده از ابزارهای قدرتمند LID جهت کنترل و کاهش رواناب و آلودگی‌های ناشی از آن اشاره کرد. به منظور تعیین میزان نفوذ و برآورد میزان رواناب از روش 'SCS' استفاده شده است [۱۵]. سازمان حفاظت خاک آمریکا در سال ۱۹۷۲ روشی را برای تخمین رواناب از اطلاعات بارندگی برای مناطقی که ایستگاه هیدرومتری ندارند، پیشنهاد نمود

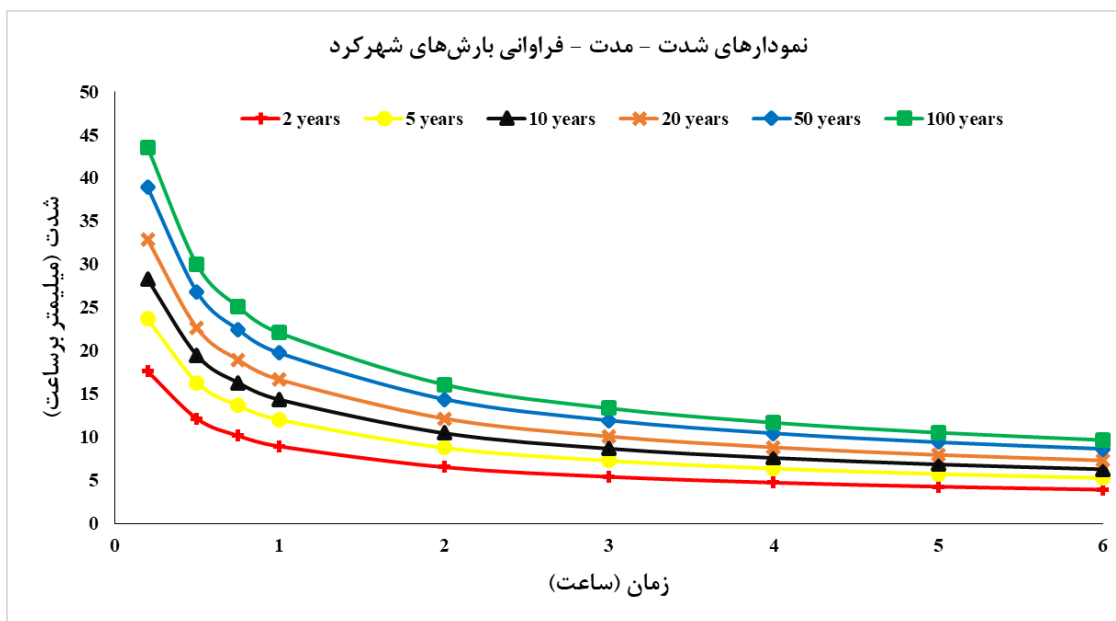
که در حال حاضر به طور گسترده‌ای در دنیا برای برآورد سیل از حوضه‌های کوچک و متوسط استفاده می‌شود. این سازمان برای به دست آوردن دبی سیل، روش‌های ساده SCS را پیشنهاد نموده است که در پروژه‌های هیدرولوژی و زهکشی و جمع‌آوری آب‌های سطحی بسیار کاربرد دارد [۱۵].

### ۲-۳- روابط شدت-مدت-فراوانی

مقادیر بارش‌های ۲۴ ساعته ایستگاه هواشناسی به مدت ۲۶ سال استخراج شدند و سرانجام با استفاده از روابط شدت - مدت - فراوانی بارش‌ها در شهرکرد است که توسط صمدی بروجنی و همکاران (۱۳۹۰) ارائه شده‌اند [۱۶]. مقادیر شدت بارش‌ها بر حسب میلی‌متر بر ساعت در دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله و نیز بر حسب مدت تداوم آن‌ها به دست آمد که در جدول ۱ و نمودارهای شکل ۳ آورده شده‌اند.

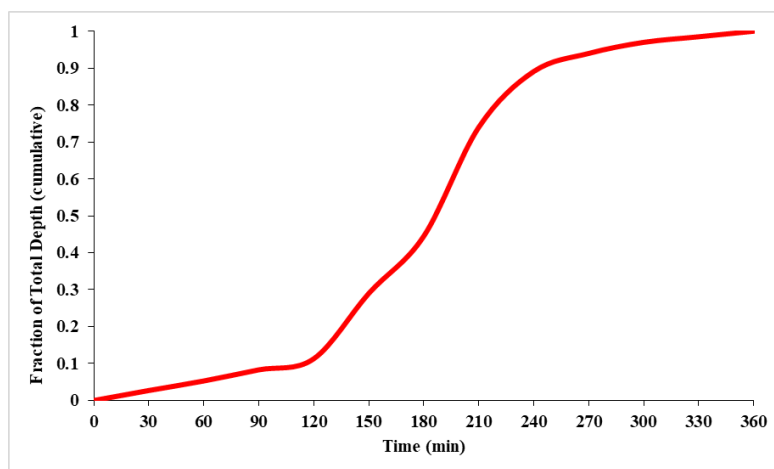
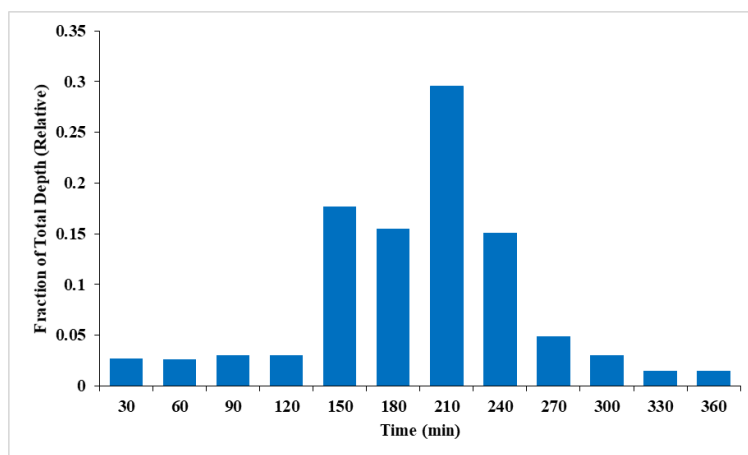
همچنین با استفاده از داده‌های آماری تهیه شده از اداره هواشناسی شهرستان شهرکرد و با اعمال بهترین توزیع آماری (نرمال) بر روی داده‌های بارش، هایتوگراف‌های بارش ۶ ساعته به صورت نسبی و تجمعی به دست آمده‌اند که در شکل ۴ قابل مشاهده هستند. بر اساس شکل ۴ مشاهده می‌شود که بیشترین میزان بارش در بازه ۱۸۰ تا ۲۱۰ دقیقه قرار دارد. همچنین با مشاهده هایتوگراف تجمعی بارش ۶ ساعته مشخص می‌شود که از بازه زمانی ۱۲۰ تا ۲۴۰ دقیقه، شدت و به طبع آن، ارتفاع بارش افزایش یافته به طوری که





شکل ۳. منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی بارش‌های ایستگاه شهرکرد

Fig. 3. Intensity-Duration-Frequency curves of the rainfall in the Shahrekord station



شکل ۴. هایتوگراف بارش‌های ۶ ساعته در شهرکرد الف) فراوانی نسبی عمق بارش ب) فراوانی تجمعی عمق بارش

Fig. 4. Hyetograph of 6-hour rainfall in Shahrekord a) relative frequency of the rainfall depth b) cumulative frequency of the rainfall depth

کانال‌ها، از ۶ واقعه رگباری، به عنوان مقادیر مشاهداتی استفاده شده است. برای واسنجی دبی اوج هیدروگراف خروجی از ۳ واقعه رگباری در تاریخ‌های ۱۳۹۷/۱۲/۲۷، ۱۳۹۸/۱/۶ و ۱۳۹۸/۱/۱۳ در کانال خروجی و برای شاخص عمق رواناب از ۲ واقعه رگباری در تاریخ‌های ۱۳۹۸/۷/۱۲ و ۱۳۹۸/۸/۱۰ در گره‌های ۱۷۴ و ۳۶۲ که به طور تصادفی انتخاب شده‌اند، استفاده شده است که نمودارهای آن‌ها در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. نحوه انجام واسنجی برای پارامتر عمق رواناب، به وسیله قرائت ارتفاع رواناب درون کانال‌های منتهی به گره ۱۷۴ و ۳۶۲ در فواصل ۳۰ دقیقه‌ای در این با کمک خط کش فلزی مدرج مستحکم در زمان بارندگی‌های مذکور، انجام شد. برای پارامتر دبی نیز به دلیل دشواری و در دسترس نبودن امکانات لازم جهت اندازه‌گیری سرعت رواناب در این کانال‌ها، سرعت متوسط جسم شناور و سبک وزن (فوم)، بین دو نقطه مشخص، در یک مسیر مستقیم به فاصله ۳۵ متر و در فواصل ۳۰ دقیقه‌ای اندازه‌گیری شد [۱۷]. لازم به ذکر است در این عملیات سرعت متوسط جریان برابر ۰/۸ سرعت سطحی جریان در کانال در نظر گرفته شد [۱۷].

همانطور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است، بر روی محور افقی بالایی نمودار میزان بارش و بر روی محور افقی پایینی، هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده قرار گرفته‌اند. همان‌گونه که در نمودارها نیز مشخص است، پس از پایان زمان بارندگی، جریان درون کانال‌ها ادامه داشته و چندین ساعت پس از اتمام بارش، در نقطه‌ی خروجی حوضه و گره‌های ۱۷۴ و ۳۶۲ هم‌چنان رواناب وجود دارد (این نقاط در شکل ۷ نشان داده شده‌اند). همانطور که می‌دانیم اگر زمان بارندگی کمتر از زمان تمرکز حوضه باشد، نمی‌توان از روی هیدروگراف زمان تمرکز را به دست آورد اما بر اساس تجربه مشخص شده است که فاصله زمانی بین انتهای بارندگی مؤثر تا نقطه‌ای که هیدروگراف در قسمت نزولی خود تغییر شیب می‌دهد، برابر زمان تمرکز حوضه خواهد بود [۱۷]. در اکثر هیدروگراف‌های بالا مشاهده می‌شود که این زمان تقریباً برابر ۲ ساعت است. از سویی دیگر زمان تأخیر (Time lag) بارش‌ها را می‌توان بر اساس اختلاف زمان وقوع اوج هیدروگراف نسبت به مرکز بارندگی به دست آورد. بر اساس هیدروگراف‌های بالا مشاهده می‌شود که زمان تأخیر در اکثر نمودارهای بالا کمتر از ۱ ساعت است. در ادامه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی اوج رواناب در کانال خروجی و عمق بیشینه رواناب در گره‌های مذکور در

بیشترین میزان بارش در این بازه اتفاق می‌افتد. در سایر زمان‌ها از جمله ساعات ابتدایی و انتهایی آغاز بارندگی، بارش‌ها از شدت کمی برخوردارند.

### ۳-۳- واسنجی مدل

به منظور بررسی انطباق و مقایسه‌ی هیدروگراف‌های مشاهداتی با هیدروگراف‌های شبیه‌سازی کالیبره شده، لازم است تا از چند تابع آمار و احتمالاتی استفاده شود. برخی از رایج‌ترین این توابع که در مطالعات هیدرولوژی شهری استفاده می‌شوند، عبارتند از: ضریب ناش - سانتکلیف<sup>۱</sup>، ریشه‌ی مربعات خطا<sup>۲</sup> (RMSE) و بایاس<sup>۳</sup> که به ترتیب در روابط ۱-۳ نمایش داده شده‌اند.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (1)$$

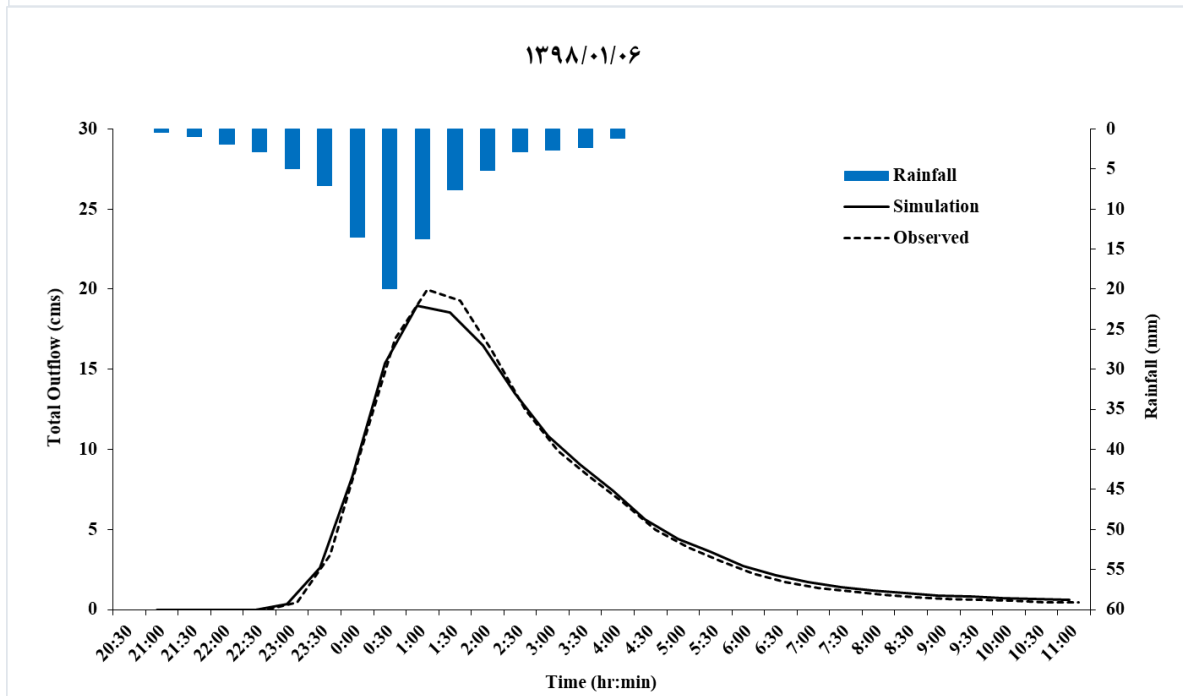
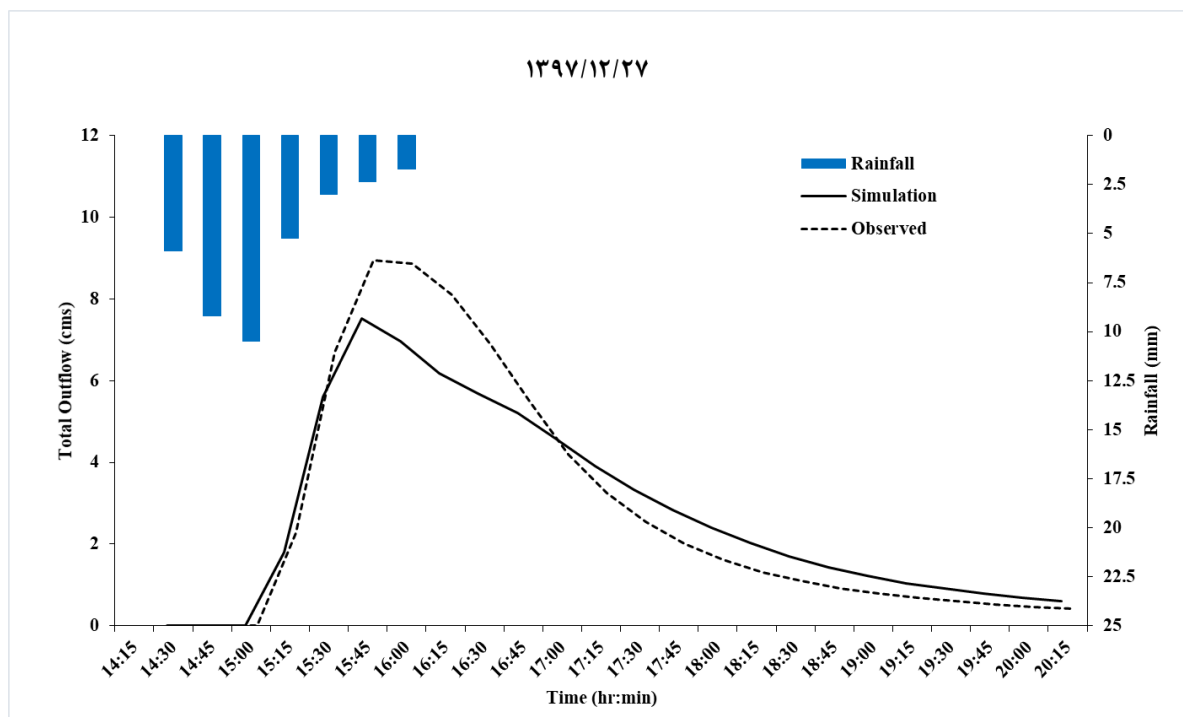
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$BIAS\% = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i)^2} \times 100 \quad (3)$$

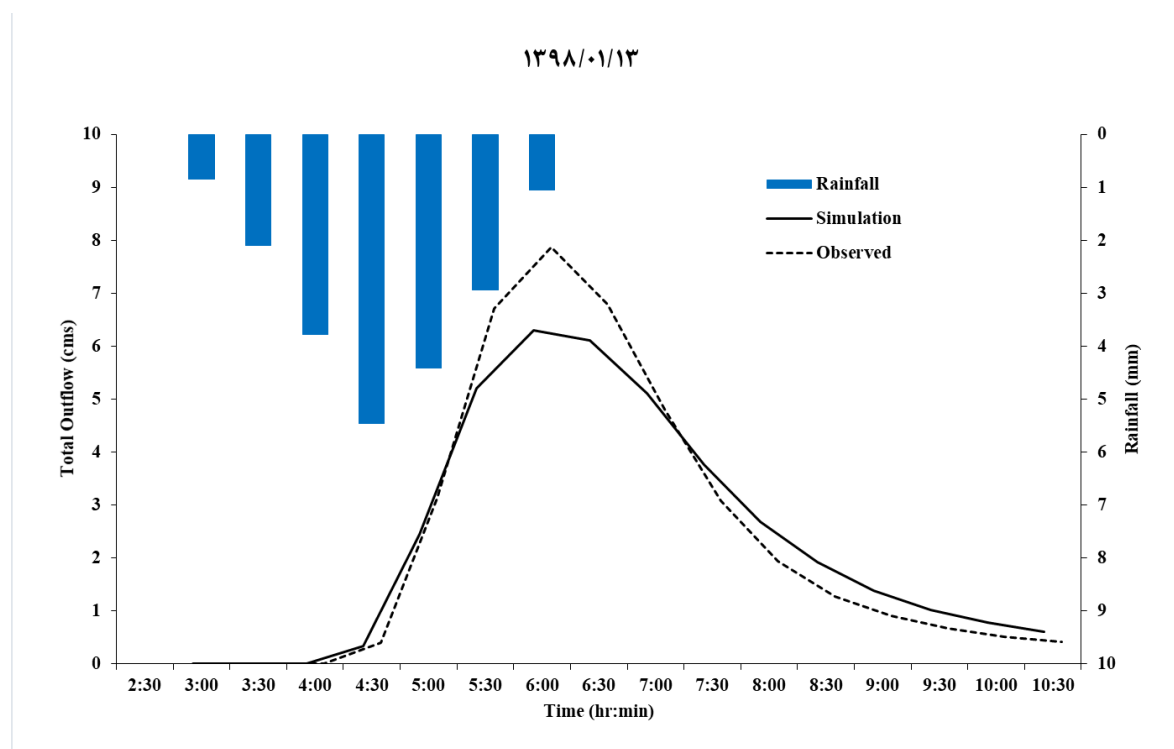
که در این معادلات  $P_i$  مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده،  $O_i$  مقادیر رواناب مشاهداتی،  $\bar{O}_i$  میانگین مقادیر رواناب مشاهداتی و  $n$  تعداد کل داده‌ها می‌باشد.

BIAS%: خطای کل در حجم جریان بوده و مقادیر به دست آمده برای این ضریب، نشانه‌ی تفاوت متوسط حجم جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل، نسبت به جریان مشاهداتی است. به منظور انجام واسنجی مدل، برای شاخص‌های دبی و ارتفاع رواناب

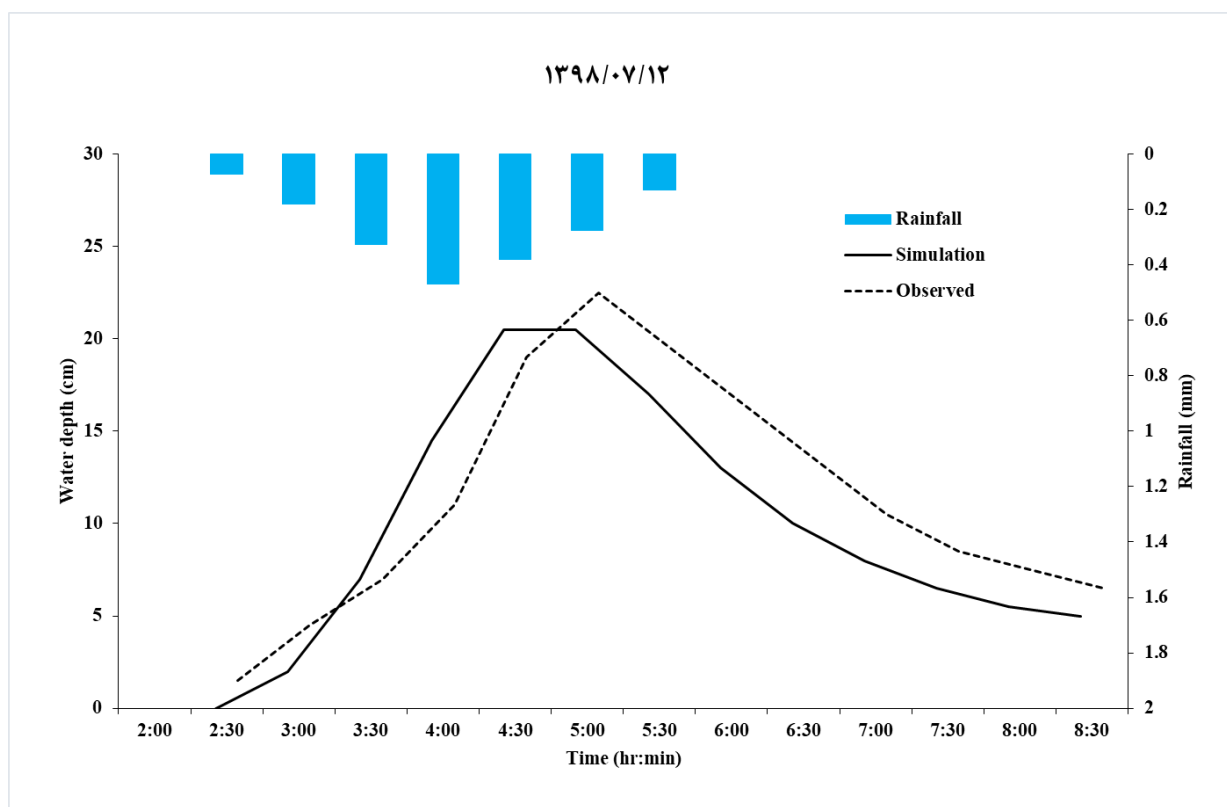
1 Nash-Sutcliffe coefficient  
2 Root Mean Squares error  
3 BIAS%

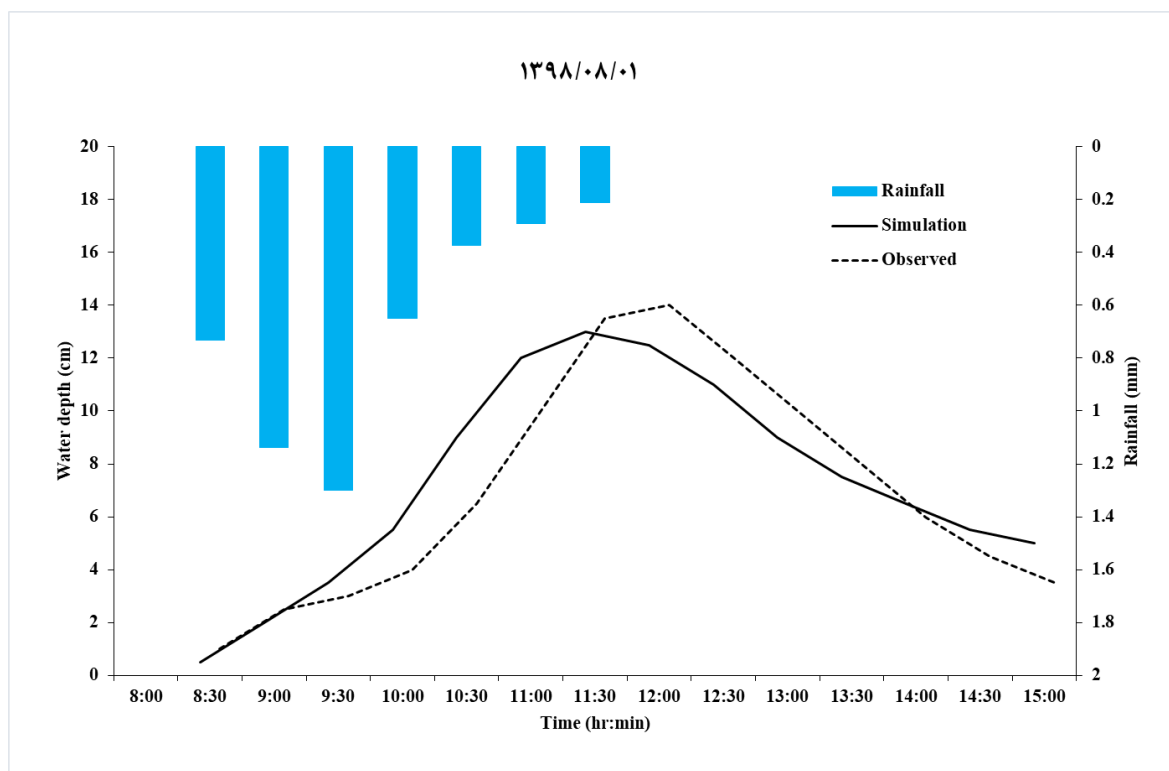






شکل ۵. هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده کانال خروجی در تاریخ‌های ۱۳۹۷/۱۲/۲۷، ۱۳۹۸/۱/۱۶ و ۱۳۹۸/۱/۱۳  
 Fig. 5. Observed and simulated hydrograph of the outfall on 2019-3-18, 2019-3-26 and 2019-4-2





شکل ۶. نمودار عمق رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در گره‌های ۱۷۴ و ۳۶۲ در تاریخ‌های ۱۳۹۸/۷/۱۲ و ۱۳۹۸/۸/۱

Fig. 6. Diagram of the observed and simulated runoff depth at the nodes 174 and 362 on 2019-10-4 and 2019-10-23

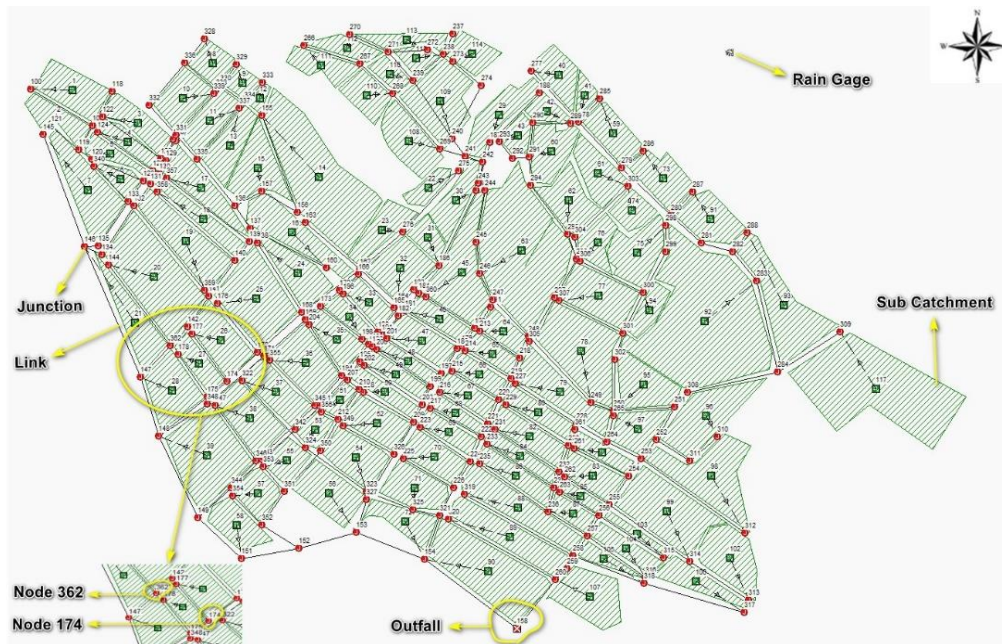
عرض معادل (W) و عدد منحنی رواناب (CN) دارای نسبت مستقیم با میزان رواناب دارند. به طوری که با افزایش این دو شاخص، میزان حجم رواناب نیز افزایش پیدا می‌کند. در مقابل سایر شاخص‌ها با میزان رواناب رابطه‌ی معکوس داشته و با افزایش آن‌ها، حجم رواناب کاهش می‌یابد. همچنین در میان شاخص‌های ذکر شده، عرض معادل دارای بالاترین میزان حساسیت بوده به طوری که با افزایش ۲۰ درصدی آن در تمام زیر حوضه‌ها، حجم رواناب کل حوضه ۱/۶۳۶ درصد افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که پارامتر ضریب زبری مناطق نفوذناپذیر با اختلاف اندکی نسبت به پارامتر عرض معادل در رتبه دوم حساس‌ترین پارامترهای این شبیه‌سازی قرار گرفته است که مقادیر تغییرات این پارامترها در شکل ۶ آورده شده است. همچنین بر طبق مطالعات انجام شده توسط هاشمی و مهجوری مجد (۱۳۹۷) نیز این ضریب به عنوان پارامتر تاثیرگذار بر میزان حجم رواناب خروجی معرفی شده است [۱۸].

جدول ۲ و ۳ آورده شده است. همچنین درصد خطا در این جداول نشان داده شده است، که از تفاضل مقدار مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و سپس تقسیم بر مقدار مشاهداتی به دست آمده و در نهایت به صورت درصد بیان شده است.

### ۳-۴- آنالیز حساسیت

شاخص‌های N-impervious (ضریب زبری مناطق نفوذناپذیر)، N-pervious (ضریب زبری مناطق نفوذپذیر)، Ds tore impervious (ارتفاع ذخیره‌ی مناطق نفوذناپذیر)، Ds tore pervious (ارتفاع ذخیره‌ی مناطق نفوذپذیر)، Width (عرض معادل) و CN (عدد منحنی رواناب)، مورد بررسی و تحلیل آنالیز حساسیت قرار گرفتند که نمودار آن در شکل ۸ نشان داده شده است.

بر اساس نمودار شکل ۸ که محور افقی آن، تغییرات پارامترها بر حسب درصد و محور عمودی آن، درصد تغییرات حجم رواناب خروجی کل حوضه را نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که دو شاخص



شکل ۷. نمایش محل قرارگیری نقطه خروجی حوضه و گره‌های ۱۷۴ و ۳۶۲

Fig. 7. The location of the outlet of the catchment and 362 and 174 nodes

جدول ۲. مقادیر دبی اوج هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله‌ی واسنجی

Table 2. Peak discharge values of the observed and simulated hydrographs during the calibration stage

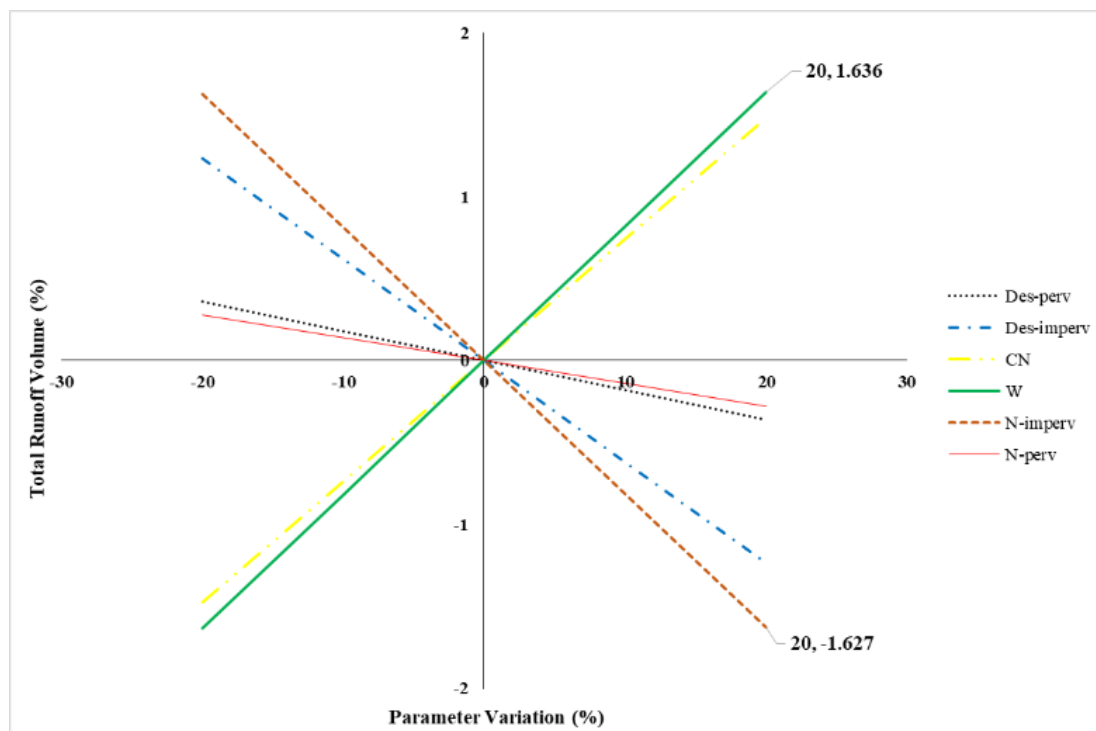
شاخص واقعه‌ی رگباری	دبی اوج هیدروگراف مشاهداتی ( $m^3/s$ )	دبی اوج هیدروگراف شبیه‌سازی شده ( $m^3/s$ )	درصد خطا
۱۳۹۷/۱۲/۲۷	۹/۰۵	۷/۶۱	۱۵/۹۱
۱۳۹۸/۱/۶	۲۰/۴۸	۱۹/۰۹	۶/۷۹
۱۳۹۸/۱/۱۳	۷/۹۸	۶/۳۹	۱۹/۹۲

### ۳-۵- کالیبراسیون

پس از انجام واسنجی بر اساس دو شاخص دبی و عمق رواناب، در ۵ رویداد بارشی و هم‌چنین انجام آنالیز حساسیت بر روی شاخص‌های ضریب زبری و ارتفاع ذخیره‌ی مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر، عرض معادل و عدد منحنی رواناب، لازم است تا شاخص‌های نام برده شده، کالیبره شوند. از سویی دیگر با توجه به بیشتر بودن مقادیر مشاهداتی در اغلب واسنجی‌ها، لازم است تا با توجه به رابطه مستقیم یا معکوس شاخص‌ها با میزان رواناب و براساس محدوده توصیه شده توسط دیگر محققان [۱۹-۲۱]، مقادیر بهینه شاخص‌های تأثیرگذار بر میزان رواناب، تعیین شوند. در جدول ۴ این مقادیر نشان داده شده است.

### ۳-۶- صحت سنجی

پس از انجام مرحله‌ی واسنجی و انجام عملیات کالیبراسیون بر روی شاخص‌های حساس مدل، شبیه‌سازی در ۲ رویداد ۱۳۹۸/۱/۱۵ و ۱۳۹۸/۱/۱۹ برای شاخص دبی و رویدادهای ۱۳۹۸/۸/۴ و ۱۳۹۸/۸/۷ برای شاخص عمق، با استفاده از مقادیر بهینه حساس مدل SWMM انجام گرفت. در نهایت به منظور برآورد میزان شاخص‌های کارایی مدل SWMM در شبیه‌سازی رواناب سطحی این پژوهش در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی از روابط ۱ تا ۳ استفاده شده است و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که مقادیر شاخص NSE



شکل ۸. نمودار آنالیز حساسیت شاخص‌های مؤثر بر میزان حجم رواناب حوضه

Fig. 8. Sensitivity analysis of indices affecting catchment runoff volume

جدول ۳. مقادیر عمق بیشینه‌ی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله‌ی واسنجی

Table 3. Observed and simulated values of the maximum depth in the calibration stage

شاخص واقع‌ی رگباری	عمق بیشینه‌ی مشاهداتی (cm)	عمق بیشینه‌ی شبیه‌سازی شده (cm)	درصد خطا
۱۳۹۸/۷/۱۲	۲۴	۲۲	۸/۳۳
۱۳۹۸/۸/۱	۱۵	۱۳	۱۳/۳۳

جدول ۴. مقادیر توصیه شده، اولیه و بهینه‌ی شاخص‌های تأثیر گذار مدل SWMM بر میزان رواناب با استفاده از نتایج مرحله واسنجی

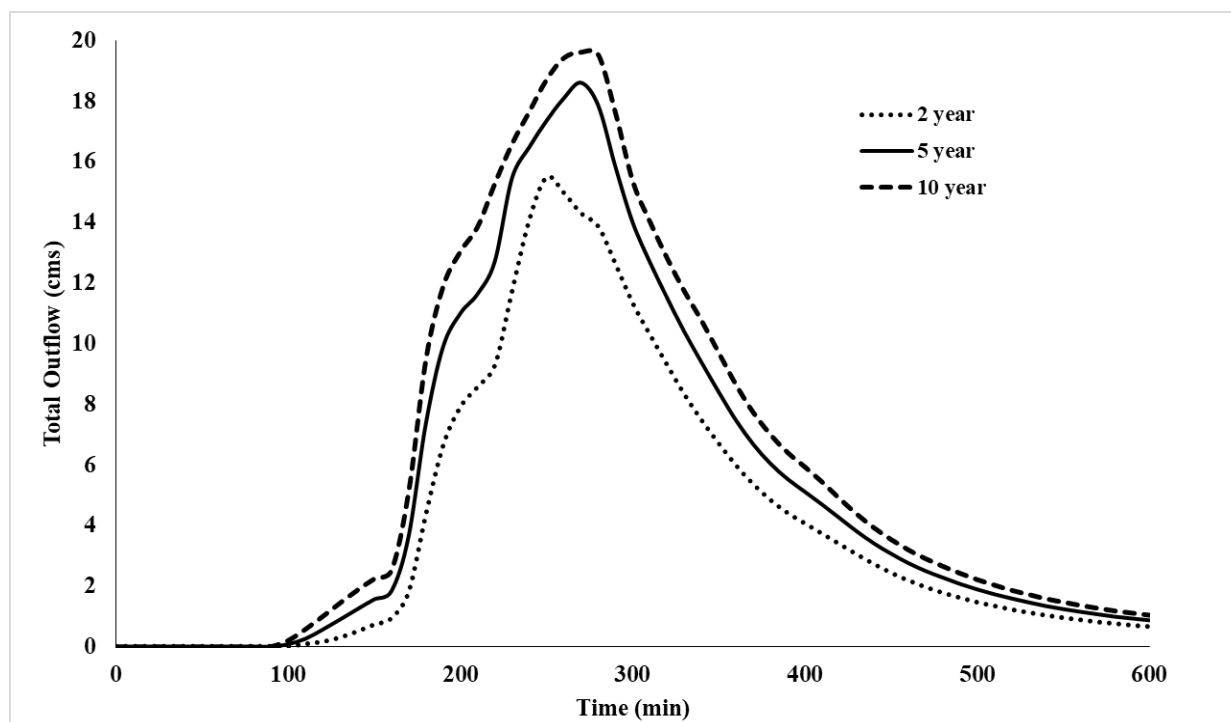
Table 4. Recommended, initial and optimized values of the indicators of the SWMM model affecting the runoff rate using calibration stage results

شاخص کالیبراسیون	محدوده‌ی توصیه شده	مقادیر اولیه	مقادیر بهینه	درصد تغییرات
W	±۳۰	-	-	٪۱۰+
CN	±۳۰	-	-	٪۳/۳۷+
N-impervious	۰/۰۱۱-۰/۰۳۳	۰/۰۲	۰/۰۱۱	٪۵۵-
N-pervious	۰/۰۲-۰/۱۸	۰/۵	۰/۰۵	٪۹۰-
Ds-impervious	۰/۳-۲/۵	۱/۲۷	۰/۵	٪۶۰-
Ds-pervious	۲/۵-۷	۵	۵	٪۰

جدول ۵. مقادیر شاخص‌های کارایی مدل SWMM برای شاخص‌های دبی و عمق

Table 5. Values of the SWMM performance indicators for the discharge and depth indices

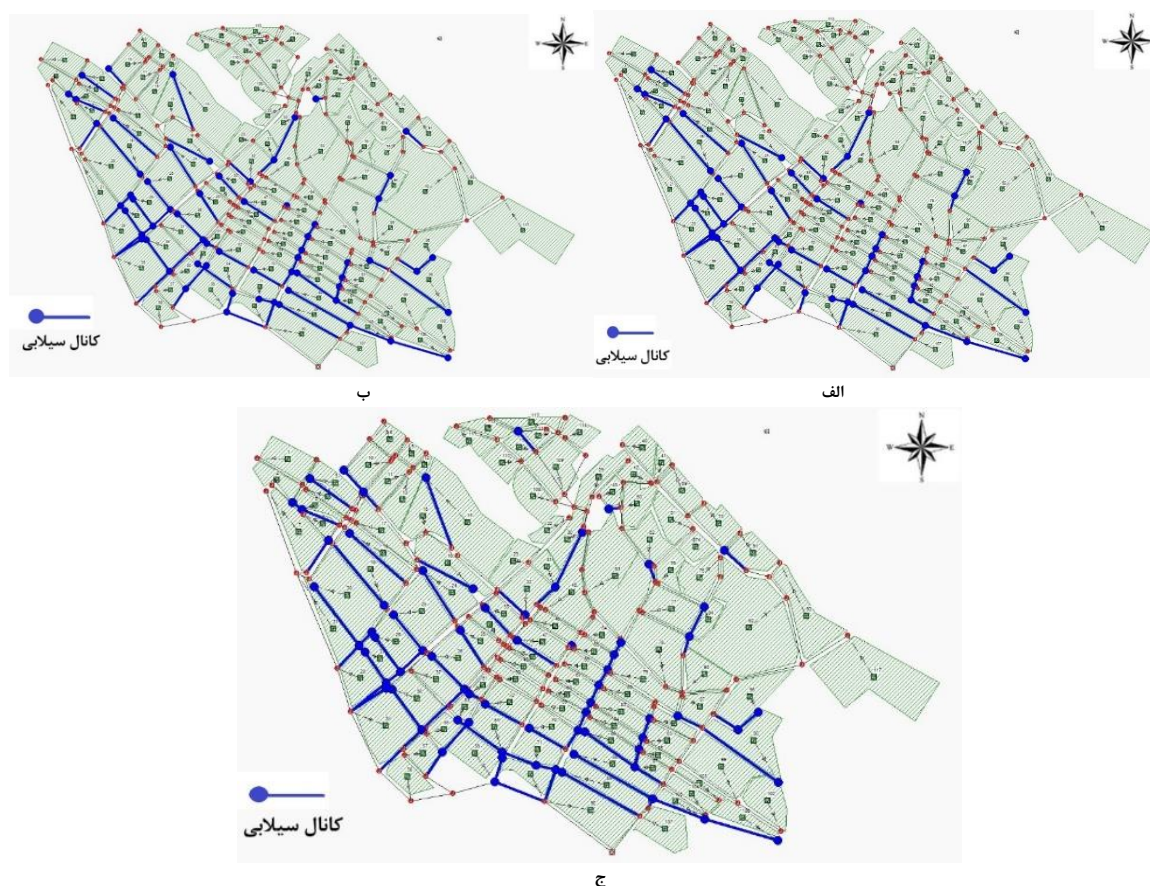
BIAS (%)	RMSE	NSE	شاخص	مرحله	واقعه‌ی رگباری
۴/۲۲۲	۰/۸۳۳	۰/۹۲۳	دبی	واسنجی	۱۳۹۷/۱۲/۲۷
۰/۸۱۲	۰/۵۱۵	۰/۹۸۷	دبی	واسنجی	۱۳۹۸/۱/۶
۴/۰۸۶	۰/۷۱۵	۰/۹۳۰	دبی	واسنجی	۱۳۹۸/۱/۱۳
۴/۱۰۸	۲/۶۳۲	۰/۸۴۳	عمق	واسنجی	۱۳۹۸/۷/۱۲
۳/۰۵۳	۱/۳۹۰	۰/۸۹۸	عمق	واسنجی	۱۳۹۸/۸/۱
۰/۹۹۵	۰/۲۳۳	۰/۹۸۳	دبی	صحت‌سنجی	۱۳۹۸/۱/۱۵
۰/۸۸۲	۰/۲۳۱	۰/۹۸۶	دبی	صحت‌سنجی	۱۳۹۸/۱/۱۹
۱/۴۵۶	۱/۱۵۵	۰/۹۳۷	عمق	صحت‌سنجی	۱۳۹۸/۸/۴
۲/۷۰۴	۱/۶۷۳	۰/۹۷۳	عمق	صحت‌سنجی	۱۳۹۸/۸/۷



شکل ۹. هیدروگراف خروجی حوضه در دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ ساله

Fig. 9. Catchment outfall hydrograph during 2, 5 and 10-year return periods





شکل ۱۰. وضعیت شبکه، کانال‌های سیلابی و نقاط آب‌گرفتگی شهر شهکرد در دوره بازگشت الف) ۲ ساله، ب) ۵ ساله و ج) ۱۰ ساله  
**Fig. 10. Network status, flooded canals and flooded points in Shahrekord, during the return period (a) 2-year, b) 5-year, and c) 10-year**

و ۱۰ ساله، اقدام به تهیه هیدروگراف خروجی زیر حوضه در نقطه خروجی شد. این نمودار در شکل ۹ نشان داده شده است. نمودار شکل ۹ با استفاده از بارش طرح ۶ ساعته در دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ ساله، برای مدت ۱۰ ساعت شبیه‌سازی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود پس از پایان زمان بارندگی، جریان رواناب در کانال خروجی وجود داشته و رفته رفته از مقدار آن کاسته می‌شود. تهیه این هیدروگراف می‌تواند کمک زیادی در جهت برآورد زمان، میزان حجم و دبی اوج سیلاب‌های شهری در اختیار طراحان قرار دهد.

**۴-۲- بررسی کفایت شبکه در دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ ساله**  
 در این مرحله با استفاده از بارندگی طرح ۶ ساعته با دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ ساله که از نتایج بخش هیدرولوژیکی و بر اساس نتایج و نمودارهای شدت - مدت - فراوانی بارش‌ها، حاصل

در مرحله واسنجی همگی بالاتر از  $0/8$  و در مرحله اعتبارسنجی همگی بیشتر از  $0/9$  بوده که نشان از بالا بودن دقت شبیه‌سازی در مرحله اعتبارسنجی می‌باشد. زیرا هر چه مقدار NSE به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، دقت شبیه‌سازی بیشتر است. از سویی دیگر مقادیر مطلق شاخص BIAS نیز در هر دو مرحله کمتر از ۵ درصد است که نشان‌دهنده‌ی نزدیک بودن میزان حجم رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است. در نهایت و با توجه به نتایج شاخص‌های کارایی مدل در دو مرحله‌ی واسنجی و اعتبارسنجی می‌توان گفت که شبیه‌سازی از دقت بسیار خوبی برخوردار بوده است [۲۲ و ۱].

**۴- نتایج و بحث**  
**۴-۱- استخراج هیدروگراف خروجی حوضه در دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ ساله**  
 با استفاده از بارندگی طرح ۶ ساعته با دوره بازگشت‌های ۲، ۵



جدول ۶. مشخصات کانال‌های سیلابی و ابعاد بهینه آن‌ها در دوره بازگشت ۱۰ ساله

Table 6. Characteristics of the flooded canal and their optimal dimensions in the 10-year return period

نام کانال خیابان	اتصالات	سرعت بیشینه (m/s)	مدت بالازدگی (min)	ابعاد بهینه (cm)		درصد افزایش ابعاد		پرشدگی %
				عرض	عمق	عرض	عمق	
نامجو	۱۱۹-۱۲۰	۲/۵۳	۱۰۴	۶۰	۷۰	۲۰	۷۵	۸۶
ناصر خسرو	۳۵۸-۱۴۰	۰/۹۶	۹۸	۶۰	۶۰	۵۰	۵۰	۸۹
سرچشمه‌ها	۱۶۰-۱۳۷	۰/۲۵	۵۲۲	۸۰	۸۰	۴۰۰	۴۰۰	۸۵
قدس	۳۵۹-۱۳۲	۰/۹۱	۱۳۴	۸۰	۶۰	۱۰۰	۵۰	۸۹
	۱۳۳-۱۳۵	۱/۳۶	۱۱۳	۱۲۰	۹۰	۱۰۰	۸۰	۹۵
	۱۷۰-۱۷۶	۲/۰۵	۱۲۵	۷۰	۷۰	۴۰	۱۰۰	۹۱
	۳۵۵-۳۴۵	۱/۷۹	۲۶	۵۰	۷۰	-	۴۰	۸۶
ملت	۳۵۶-۲۱۲	۰/۸۵	۱۴۶	۵۰	۵۰	۶۶/۶۶	۱۵۰	۸۵
	۳۴۹-۳۲۶	۰/۶۷	۲۹۰	۷۰	۹۰	۱۳۳/۳۳	۲۵۰	۹۱
	۲۲۵-۲۲۶	۱/۷۴	۱۵۸	۵۰	۵۰	۶۶/۶۶	۱۵۰	۹۸
	۱۳۸-۱۶۷	۴/۱۵	۰	۸۰	۶۰	-	۱۰۰	۸۳
	۲۰۴-۱۹۴	۰/۸۱	۵۳	۷۰	۵۰	-	۶۶/۶۶	۹۲
سعدی	۲۳۵-۲۳۶	۲/۶۷	۵۵	۱۰۰	۳۰	۲۳۳/۳۳	۵۰	۶۹
	۲۳۶-۲۵۷	۱/۲۴	۱۶۶	۱۲۰	۹۰	۳۰۰	۲۰۰	۹۴
مطهری	۱۷۷-۱۷۴	۰/۵۲	۴۷۱	۷۰	۸۰	۲۵۰	۳۰۰	۸۶
	۱۷۸-۱۷۵	۰/۸۸	۷۰	۶۰	۷۰	-	۷۵	۹۴
امیرکبیر	۳۴۷-۳۴۶	۱/۰۴	۱۲۷	۷۰	۹۰	۴۰	۸۰	۸۵
	۳۶۲-۱۴۴	۳/۱۰	۱۹	۶۰	۵۰	-	۲۰	۸۸
	۱۴۲-۳۶۲	۱/۸۴	۰	۶۰	۷۰	۲۰	۱۳۳/۳۳	۹۶
مفتح	۳۶۲-۱۴۷	۰/۶۸	۲۲۰	۱۷۰	۱۴۰	۴۱/۶۶	۱۳۳/۳۳	۹۵
	۱۷۰-۱۷۴	۱/۷۵	۱۷۲	۱۷۰	۱۵۰	۱۳/۳۳	۲۷۵	۹۳
	۱۷۴-۱۷۵	۱/۷۵	۱۷۳	۱۷۰	۱۶۰	۱۳/۳۳	۳۰۰	۹۵
بوعلی سینا	۱۷۵-۱۴۸	۰/۳۴	۵۰۶	۲۸۰	۲۶۰	۳۰۰	۷۶۶/۶۶	۹۸
	۳۴۸-۱۴۸	۰/۹۴	۵۴	۷۰	۵۰	-	۷۵	۹۱
	۱۶۴-۱۶۱	۲/۰۸	۱۳۵	۶۰	۶۰	۲۰	۲۰۰	۸۵
	۳۱۲-۲۵۳	۰/۹۱	۲۳۲	۳۰	۳۰	۵۰	۵۰	۶۹
کاشانی	۲۶۴-۲۵۳	۲/۵۶	۳۷	۸۰	۷۰	۶۰	۷۵	۹۳
	۱۹۶-۱۹۰	۱/۰۶	۹۷	۶۰	۸۰	۲۰	۶۰	۸۹
باهنر	۲۰۱-۱۹۷	۰/۸۴	۲۹۷	۵۰	۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۹۷
	۳۴۵-۳۴۶	۱/۱۶	۵۲۸	۱۴۰	۸۰	۸۳۳/۳۳	۴۳۳/۳۳	۹۹
فردوسی جنوبی	۳۴۶-۱۴۹	۰/۳۴	۵۲۴	۱۷۰	۱۲۰	۱۰۳۳/۳۳	۷۰۰	۹۰
	۳۲۴-۳۲۳	۰/۸۷	۹۳	۶۰	۸۰	۲۰	۶۰	۹۲
خواجه نصیر	۳۲۵-۳۲۱	۰/۹۳	۱۶۸	۸۰	۱۲۰	۶۰	۱۴۰	۹۶
	۳۲۳-۳۲۵	۲/۴۶	۱۶	۵۰	۷۰	-	۴۰	۹۴
۱۷ شهریور	۳۱۹-۲۵۸	۱/۶۲	۰	۹۰	۶۰	۱۲/۵	۱۰۰	۹۲
	۳۱۸-۲۵۸	۰/۹۹	۲۷۹	۵۰	۴۰	۱۵۰	۱۰۰	۷۲
آزادی	۳۱۷-۳۱۸	۰/۹۶	۲۳۸	۴۰	۳۰	۱۰۰	۵۰	۹۰

۹۴	۱۶/۶۶	۱۲۰	۷۰	۱۱۰	۰	۰/۷۴	۳۲۰-۲۶۰	بهارستان
۹۸	۳۵۰	۲۰۰	۹۰	۶۰	۳۰۳	۰/۲۷	۳۵۰-۳۵۱	ولیعصر جنوبی
۸۷	۳۵۰	۱۵۰	۷۰	۵۰	۲۸۵	۰/۸۰	۳۵۱-۳۵۲	
۸۹	۱۲۵	۴۰	۹۰	۷۰	۹۶	۱/۷۶	۳۲۷-۱۵۳	۱۲ محرم جنوبی
۸۲	۵۰	۲۰	۶۰	۶۰	۰	۳/۸۱	۳۲۶-۳۲۷	
۷۰	۵۰	-	۳۰	۱۰۰	۱۵	۴/۴۳	۳۰۵-۲۱۸	
۷۴	۵۰	-	۳۰	۱۰۰	۲۴	۴/۹۹	۲۱۸-۲۱۹	
۸۴	۵۰	-	۳۰	۱۰۰	۳۵	۴/۷۲	۲۱۹-۲۲۰	
۷۵	۱۰۰	-	۴۰	۱۰۰	۶۹	۴/۲۲	۲۲۰-۲۲۱	حافظ
۷۸	۱۰۰	-	۴۰	۱۰۰	۱۰۲	۴/۴۷	۲۲۱-۲۲۲	
۸۵	۱۰۰	-	۴۰	۱۰۰	۱۰۹	۴/۳۶	۲۲۲-۲۲۴	
۹۴	۱۰۰	-	۴۰	۱۰۰	۱۱۵	۴/۱۸	۲۲۴-۲۲۶	
۹۶	۱۷۵	۳۶/۳۶	۱۱۰	۱۵۰	۱۶۰	۱/۴۹	۳۲۱-۱۵۴	
۸۵	۱۰۰	۱۰۰	۴۰	۴۰	۳۴۹	۲/۲۱	۱۸۵-۱۸۶	طالقانی
۹۳	۳۵۰	۱۵۰	۷۰	۵۰	۲۸۵	۳/۱۴	۱۸۶-۱۸۳	
۸۵	۳۰۰	۳۰۰	۴۰	۴۰	۴۹۸	۱/۶۱	۳۰۰-۳۰۱	۱۳ آبان
۹۷	۱۰۰۰	۷۰۰	۱۰۰	۸۰	۵۴۹	۱/۴۶	۳۰۱-۳۰۲	
۸۶	۱۰۰	۱۰۰	۴۰	۴۰	۲۶۳	۲/۲۱	۳۱۰-۳۱۱	شهدا
۸۲	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۶۰	۳۴۷	۰/۷۹	۳۱۱-۲۵۲	

درصد کانال‌های شهر دارای بالازدگی هستند. لازم به ذکر است که این مقادیر براساس نسبت تعداد کانال‌های سیلابی به تعداد کل کانال‌ها به دست آمده اند.

#### ۴-۳- تعیین ابعاد بهینه کانال‌ها در دوره بازگشت ۱۰ ساله

پس از بررسی کفایت شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی در دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ ساله، اقدام به طراحی ابعاد بهینه برای کانال‌های سیلابی شهر، در دوره بازگشت ۱۰ ساله شد که نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است. در فرآیند طراحی، شکل مقطع تمامی کانال‌ها مستطیلی و جنس آن‌ها نیز بتن صاف در نظر گرفته شده است.

در جدول ۶، مشخصات کانال‌های سیلابی شهر، از جمله خیابان محل قرارگیری، سرعت بیشینه رواناب درون آن‌ها، مدت زمان سیلابی بودن کانال‌ها، ابعاد بهینه، درصد افزایش ابعاد و همچنین میزان پرشدگی آن‌ها براساس ابعاد طراحی جدید آورده شده است. منظور از درصد پرشدگی نسبت عمق رواناب درون کانال به عمق کل کانال می‌باشد. مشاهده نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که در برخی کانال‌ها مدت زمان بالازدگی صفر است اما با این وجود، افزایش ابعاد داده شده

شده است اقدام به شبیه‌سازی وضعیت شبکه‌ی جمع‌آوری رواناب کل حوضه در این دوره شده است. در شکل ۱۰ وضعیت شبکه، کانال‌های سیلابی و نقاط آب‌گرفتگی شهر برای دوره بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ ساله نشان داده شده است.

مطابق شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که اکثر نقاط و کانال‌هایی که دچار آب‌گرفتگی شده‌اند در قسمت جنوب غربی شهر که از ارتفاع کمتری نسبت به قسمت‌های شمالی شرقی برخوردار است، قرار گرفته اند. همچنین اکثر خروجی‌های منتهی به کانال زهکش جنوبی شهر، دارای آب‌گرفتگی هستند. با افزایش دوره بازگشت بارندگی از ۲ به ۵ سال، علاوه بر قسمت‌های جنوب غربی و کانال‌های منتهی به خروجی، در برخی از قسمت‌های شمالی شرقی و شمال غربی شهر نیز، کانال‌های دچار بالازدگی شده‌اند (شکل ب). همچنین با افزایش دوره بازگشت بارندگی از ۵ به ۱۰ سال، تغییر محسوسی در تعداد کانال‌های سیلابی ایجاد نشده است. در این دوره تنها مدت زمان سیلابی بودن کانال‌ها افزایش یافته است و سایر پارامترهای رواناب همچون دبی اوج و سرعت بیشینه، تغییراتی نداشته است.

در نهایت با بررسی تعداد کانال‌های سیلابی، مشخص شد که در دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ ساله به ترتیب ۱۹/۴، ۲۰/۶۸ و ۲۱/۵۲

در این کانال‌ها شده است. در مجموع می‌توان گفت که برای اصلاح ابعاد شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی شهر شهرکرد، تقریباً ۷۹۲۹ مترمکعب بتن لازم است.

#### ۵- نتیجه گیری

پیش بینی وقایعی همچون سیلاب یا آب‌گرفتگی در معابر شهری، یکی از مهم‌ترین اقداماتی است که باید در دستور کار مسئولین عمران و برنامه ریزی شهری قرار گیرد. مدل‌سازی رواناب سطحی شهری می‌تواند کمک زیادی به برنامه ریزان شهری برای مقابله با خطرات و مشکلات احتمالی در هنگام وقوع سیلاب شهری بکند. شبیه‌سازی پدیده آب‌گرفتگی در معابر با توجه به پیچیدگی داده‌ها و اطلاعات مرتبط همچون، توپوگرافی منطقه، کاربری اراضی، اطلاعات هیدرولوژی همچون مشخصات بارش و ...، کاری سخت و دشوار است. به همین دلیل برای ارزیابی و طراحی شبکه زهکشی شهری، به مدل‌های ریاضی و رایانه‌ای توجه خاصی شده است. در این پژوهش با استفاده از مدل SWMM، به شبیه‌سازی رواناب سطحی شهر شهرکرد در ۱۱۴ زیر حوضه، با استفاده از بارش ۶ ساعته در دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ ساله شده است. پس از عملیات‌های واسنجی بر روی ۲ پارامتر دبی و عمق رواناب در ۵ رویداد بارشی، آنالیز حساسیت بر روی برخی از پارامترهای مؤثر بر میزان حجم رواناب انجام شد و در نهایت پارامتر عرض معادل به عنوان حساس‌ترین پارامتر مدل‌سازی انتخاب شد. صحت‌سنجی نیز بر روی دو پارامتر دبی و عمق رواناب در رویدادهای بارشی مجزا صورت گرفت که در مجموع نتایج مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نشان از دقت خوب مدل‌سازی داشت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد در اکثر گره‌ها و کانال‌های جنوب غربی شهر، گرفتگی و بالازدگی رخ داده است به طوری که در دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ ساله به ترتیب، ۱۹/۴، ۲۰/۶۸ و ۲۱/۵۲ درصد کانال‌های شهر، دچار بالازدگی شده‌اند. پس از آن نیز ابعاد بهینه کانال‌ها برای دوره بازگشت ۱۰ ساله تعیین و حجم بتن مورد نیاز برای اصلاح آن‌ها نیز برآورد شد که مقدار آن برای تمامی کانال‌ها حدود ۷۹۲۹ مترمکعب برآورد شد.

در نهایت باتوجه به یافته‌های این پژوهش می‌توان گفت که افزایش ابعاد کانال‌ها یک راه حل عملیاتی برای رفع مشکل بالازدگی رواناب سطحی است که در اکثر مناطق شهر قابل اجراست. اما در

است. علت این موضوع این است که با افزایش ابعاد کانال پایین دست، مقادیر روانابی که از آن خارج شده و در سطح معابر جاری گشته بود، به درون کانال انتقال پیدا می‌کند و این امر موجب افزایش حجم رواناب درون کانال و انسداد بخش بالادستی کانال می‌شود. لذا لازم است در برخی از کانال‌ها سیلابی، اتصالات بالادستی کانال سیلابی نیز مورد بررسی قرار گیرند و برای آنان نیز ابعاد بهینه طراحی شود. همچنین ابعاد پیشنهادی نشان می‌دهد که درصد افزایش ابعاد در کانال‌هایی نظیر کانال‌های خیابان بوعلی سینا و فردوسی جنوبی، بسیار زیاد بوده و عملاً از نظر اجرایی امکان پذیر نیست. لذا بهتر است تا از سایر روش‌های کنترل رواناب همچون روش‌های LID استفاده کرد تا رواناب ورودی به این خیابان‌ها تا حدودی کنترل شود و کاهش پیدا کند. اما در سایر کانال‌ها درصد افزایش ابعاد منطقی و تا حدودی کاربردی خواهد بود. لازم به ذکر است که این ابعاد پیشنهادی بوده و طبیعتاً برای اجرا می‌بایست ضوابط طراحی و شرایط منطقه نیز در نظر گرفته شود.

#### ۴-۴- تعیین حجم بتن موردنیاز برای اصلاح ابعاد کانال‌ها

پس از تعیین ابعاد بهینه کانال‌های سیلابی که نتایج آن در جدول ۶ آورده شد، میزان حجم بتن ریزی برای این کانال‌ها در جدول ۷ آورده شده است. در تعیین حجم بتن مورد نیاز، ابتدا مساحت کانال تو پر به دست آمده و سپس مساحت قسمت تو خالی (آبرو) کانال از آن کم شده است. در نهایت نیز سطح مقطع به دست آمده در طول کانال ضرب شده است و بدین ترتیب حجم بتن مورد نیاز برای تمامی کانال‌ها به دست آمده است. همچنین در اکثر کانال‌ها ضخامت جداره‌ها و کف ۱۰ سانتی‌متر و در تعداد محدودی از کانال‌ها که دارا ابعاد نسبتاً بزرگی هستند، این ضخامت ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است (این کانال‌ها با علامت \* در کنار حجم بتن‌شان نشان داده شدند).

بر اساس نتایج جدول ۷، میزان حجم بتن موردنیاز برای هر کانال، به تفکیک قطعات بین دو گره آورده شده است. در قطعه انتهایی کانال خیابان مفتح، کانال‌های خیابان بوعلی سینا، فردوسی جنوبی و قطعه انتهایی کانال خیابان حافظ، ابعاد کانال‌ها بزرگ بوده و بنابراین به دلیل ملاحظات سازه‌ای، ضخامت جداره و کف ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است که این امر موجب افزایش حجم بتن مورد نیاز

جدول ۷. حجم بتن مورد نیاز برای اصلاح ابعاد کانال‌ها

Table 7. Concrete volume needed for the modified dimension of the canals

نام کانال خیابان	اتصالات	طول کانال (m)	حجم بتن (m <sup>3</sup> )	نام کانال خیابان	اتصالات	طول کانال (m)	حجم بتن (m <sup>3</sup> )			
نامجو	۱۱۹-۱۲۰	۱۳۰	۲۸/۶	فردوسی جنوبی	۳۴۵-۳۴۶	۵۴۳	*۴۵۶/۱۲			
	۳۵۸-۱۴۰	۸۸۵	۱۷۷		۳۴۶-۱۴۹	۵۲۸	*۶۲۹/۴۶			
ناصر خسرو	۱۶۰-۱۳۷	۶۰۶	۱۵۷/۵۶	خواجه نصیر	۳۲۴-۳۲۳	۶۱۴	۱۴۷/۳۶			
					۳۲۵-۳۲۱	۳۰۱	۱۰۲/۳۴			
سرچشمه‌ها	۳۵۹-۱۳۲	۸۷۱	۱۹۱/۶۲	۱۷ شهریور	۳۲۳-۳۲۵	۱۰۱	۲۱/۲۱			
					۳۱۹-۲۵۸	۹۳۷	۲۱۵/۵۱			
قدس	۱۳۳-۱۳۵	۳۵۰	۱۱۲	آزادی	۳۱۸-۲۵۸	۵۱۰	۷۶/۵			
					۳۱۷-۳۱۸	۷۷۴	۹۲/۸۸			
ملت	۱۷۰-۱۷۶	۵۴۴	۱۵۷/۷۶	بهارستان	۳۲۰-۲۶۰	۹۴۳	۲۵۴/۶۱			
								۳۵۵-۳۴۵	۵۳۷	۱۱۲/۷۷
								۳۵۶-۲۱۲	۱۸۲	۳۰/۹۴
								۳۴۹-۳۲۶	۴۴۷	۱۲۰/۶۹
سعدی	۲۰۴-۱۹۴	۴۹۳	۹۳/۶۷	ولیعصر جنوبی	۳۵۰-۳۵۱	۳۴۹	۹۰/۷۴			
								۲۳۵-۲۳۶	۶۴۶	۱۱۶/۲۸
								۲۳۶-۲۲۶	۴۵۷	۷۷/۶۹
								۲۳۶-۲۵۷	۳۲۷	۱۰۴/۶۴
مطهری	۱۷۷-۱۷۴	۴۹۰	۱۲۲/۵	۱۲ محرم جنوبی	۳۲۷-۱۵۳	۳۱۷	۸۵/۵۹			
								۳۲۶-۳۲۷	۳۱۵	۶۳
								۳۰۵-۲۱۸	۱۳۸	۲۴/۸۴
								۲۱۸-۲۱۹	۱۴۱	۲۵/۳۸
امیرکبیر	۱۷۸-۱۷۵	۴۷۱	۱۰۳/۶۲	حافظ	۲۱۹-۲۲۰	۱۳۷	۲۴/۶۶			
								۲۲۰-۲۲۱	۱۶۵	۳۳
								۲۲۱-۲۲۲	۹۹	۱۹/۸
								۲۲۲-۲۲۴	۱۵۰	۳۰
مفتح	۱۴۲-۳۶۲	۱۴۷	۳۲/۳۴	طالقانی	۱۸۵-۱۸۶	۶۴۹	۹۰/۸۶			
								۳۶۲-۱۴۷	۳۷۰	*۴۷۷/۳
								۱۷۰-۱۷۴	۲۹۱	*۳۹۲/۸۵
								۱۷۴-۱۷۵	۱۳۷	*۱۹۳/۱۷
بوعلی سینا	۱۷۵-۱۴۸	۳۸۴	*۸۹۸/۵۶	۱۳ آبان	۳۰۰-۳۰۱	۳۲۱	۴۴/۹۴			
								۱۴۸-۳۴۸	۴۴۶	۸۴/۷۴
								۱۶۴-۱۶۱	۴۱۳	۸۲/۶
								۳۱۲-۲۵۳	۹۲۴	۱۰۱/۶۴
کاشانی	۲۶۴-۲۵۳	۲۶۵	۶۳/۶	شهدا	۳۱۱-۲۵۲	۲۷۱	۵۴/۲			
								۱۹۶-۱۹۰	۴۲۲	۱۰۱/۲۸
باهنر	۲۰۱-۱۹۷	۵۶۳	۹۵/۷۱							

- Journal of Watershed Management Research, 6 (2015) 162-170.
- [8] M. Soleymani, K. Behzadian, A. Ardeshir, Evaluation of strategies for modifying urban storm water drainage system using risk-based criteria, *Journal of Water & Wastewater*, 26 (2015) 16-29.
- [9] Y. Wang, M. Sun, B. Song, Public perceptions of and willingness to pay for sponge city initiatives in China, *Resources, Conservation and Recycling*, 122 (2017) 11-20.
- [10] S. Babaei, R. Ghazavi, M. Erfanian, Urban flood simulation and prioritization of critical urban sub-catchments using SWMM model and PROMETHEE II approach, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 105 (2018) 3-11.
- [11] M. Randall, F. Sun, Y. Zhang, M.B. Jensen, Evaluating Sponge City volume capture ratio at the catchment scale using SWMM, *Journal of environmental management*, 246 (2019) 745-757.
- [12] Z. Zhu, Z. Chen, X. Chen, G. Yu, An assessment of the hydrologic effectiveness of low impact development (LID) practices for managing runoff with different objectives, *Journal of environmental management*, 231 (2019) 504-514.
- [13] A. Ebrahimi, Assessing the impact of urban expansion and land cover changes on land surface temperature in Shahrekord city, *Journal of RS & GIS for Natural Resources*, 9 (2019) 102-118.
- [14] M.P. Wanielista, Y.A. Yousef, *Stormwater management*, John Wiley & Sons 1992.
- [15] S. Behbahani, *Surface water hydrology*, Tehran Press, 2009.
- [16] H.S. Borujeni, K. Emad, R. Fattahi, Evaluation of Analysis Methods of Short-term rainfall (case study: Shahrekord Synoptic Station), *Journal of Water Science and Engineering*, 1 (2011) 7-21.
- [17] A. Alizadeh, *Principles of applied hydrology*, Astan Quds Razavi. Mashhad. 20th, DOI (2001).
- [18] M. Hashemi, N. Mahjouri, Sensitivity Analysis of Surface Runoff Simulation Parameters in Velenjak sub-basin of the Tehran city: Application of VARS, Sobol and Morris Methods, *Iran-Water Resources Research*, 14 (2018) 71-77.
- برخی از مناطق با مشکلات و محدودیت‌هایی همراه است از جمله این که به دلیل بزرگ‌بودن ابعاد پیشنهادی و محدودیت فضای معابر شهری عملاً از نظر اجرایی، با توجه به نیاز به حجم بالای بتن ریزی، غیرممکن است. لذا به محققان پیشنهاد می‌شود با به کارگیری روش‌های مدیریت رواناب در منشأ، همچون استفاده از روش‌های LID، مقادیر حجم و دبی اوج رواناب را در پایین دست کاهش دهند تا امکان افزایش منطقی ابعاد در این مناطق فراهم شود. همچنین در این پژوهش تنها به جنبه کمی رواناب سطحی شهری پرداخته شد. در صورتی که مسئله کیفیت رواناب سطحی و ارائه راهکارهای نوین برای بهبود کیفیت رواناب و استفاده از آن برای مصارفی همچون کشاورزی در منطقه شهرکرد، می‌تواند در دستور کار محققان آینده قرار گیرد.

## مراجع

- [1] M.-H. Hsu, S.H. Chen, T.-J. Chang, Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system, *Journal of hydrology*, 234 (2000) 21-37.
- [2] S.A. Lowe, Sanitary sewer design using EPA storm water management model (SWMM), *Computer Applications in Engineering Education*, 18 (2010) 203-212.
- [3] J. Chen, A.A. Hill, L.D. Urbano, A GIS-based model for urban flood inundation, *Journal of Hydrology*, 373 (2009) 184-192.
- [4] K. Lee, H. Kim, G. Pak, S. Jang, L. Kim, C. Yoo, Z. Yun, J. Yoon, Cost-effectiveness analysis of stormwater best management practices (BMPs) in urban watersheds, *Desalination and Water Treatment*, 19 (2010) 92-96.
- [5] N. Zaghoul, B. AL MUTAIRI, Water harvesting of urban Runoff in Kuwait, *Journal of Transaction A Civil Engineering, Sharif University of Technology*, 17 (2010) 236-243.
- [6] S. Todeschini, S. Papiri, C. Ciaponi, Performance of stormwater detention tanks for urban drainage systems in northern Italy, *Journal of environmental management*, 101 (2012) 33-45.
- [7] V. Karimi, K. Solaimani, M.H. Roshan, K. Shahedi, Simulation of Flow in Open & Closed Conduits by EPA-SWMM Model (Case Study: Babolsar Urban Watershed),

- Environmental Protection Agency 2010.
- [21] J. Temprano, Ó. Arango, J. Cagiao, J. Suárez, I. Tejero, Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain, *Water Sa*, 32 (2006) 55-63.
- [22] C. Zoppou, Review of urban storm water models, *Environmental Modelling & Software*, 16 (2001) 195-231.
- 79.
- [19] W.C. Huber, R.E. Dickinson, T.O. Barnwell Jr, A. Branch, Storm water management model; version 4, Environmental Protection Agency, United States, DOI (1988).
- [20] L.A. Rossman, Storm water management model user's manual, version 5.0, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Omid Arjenaki, H.R. Zarif Sanayei, H. Heidarzadeh, Investigation of Performance and Determination of Optimal Dimensions of Surface Runoff Collection Network Using SWMM Model. Amirkabir J. Civil Eng., 53(6) (2021) 2561-2580*

DOI: [10.22060/ceej.2020.17452.6565](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17452.6565)

