

ارزیابی عملکرد شبکه جمع آوری و هدایت آب‌های سطحی با استفاده از مدل هیدرولیکی - هیدرولوژیکی SWMM

یزدان یاراحمدی^۱، حسین یوسفی^{۲*}، محمدحسین جهانگیر^۳، سید جواد ساداتی‌نژاد^۲

۱. کارشناس ارشد اکوهیدرولوژی، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

۲. دانشیار، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

۳. استادیار، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۹/۰۳؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۱/۲۳)

چکیده

مدیریت یکپارچه حوضه‌های آبخیز، تضمین‌کننده استفاده بهینه از منابع آب و خاک در اکوسیستم‌های طبیعی و غیرطبیعی است. برای رسیدن به این هدف، به اطلاعات جامعی از رویکردهای متفاوت مدیریتی و اجرایی و نیز ویژگی‌های فیزیکی، اقتصادی- اجتماعی و اکولوژیک حوضه‌های آبخیز نیاز است. در پژوهش حاضر از مدل EPA - SWMM برای شبیه‌سازی کمی سیلاب ناشی از بارندگی برای منطقه ۶ شهرداری تهران استفاده شد. شبیه‌سازی برای رگبارهای شش‌ساعته با دوره بازگشت‌های دو، پنج و ۱۰ ساله و برای مدت ۱۲ ساعت انجام پذیرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد برخی قسمت‌های شبکه که شامل تعدادی از گره‌ها و مجاری منتهی به مسیرهای بحرانی هستند، به دلیل حجم زیاد جریان، توانایی عبور رواناب را در برخی نواحی منطقه ۶ تهران در شرایط موجود ندارد. علت اصلی این اتفاق را می‌توان آب‌گرفتگی‌ها، کوچک‌بودن سطح مقطع مجاری آبرو و همچنین شیب کم در برخی مجاری دانست. در پژوهش حاضر به منظور اعتبارسنجی مدل از آمار پنج واقعه بارندگی استفاده شده و سرعت رواناب محاسبه شد. شاخص‌های کارایی مدل در پژوهش حاضر شامل ناش - ساتکلیف، ریشه مربع خطا و بایاس است. نتایج به‌دست‌آمده از واسنجی مدل نشان داد انطباق خوبی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی وجود دارد و بیان‌کننده دقت زیاد مدل برای این منطقه است، به طوری که مقدار ضریب ناش (NS) برای بارندگی‌ها به ترتیب ۰/۸۸، ۰/۷۱، ۰/۸۹، ۰/۷۴ و ۰/۷۷ است. در ضمن، مشخص شد علت آب‌گرفتگی در بعضی کانال‌ها و مجاری به دلیل نبود ظرفیت کافی مجاری است. همچنین، گاهی با وجود ظرفیت کافی کانال که مدل نیز آن را تأیید می‌کند، آب‌گرفتگی وجود دارد، دلیل آن هم مربوط به انباشت زباله در این کانال‌هاست. با توجه به نتایج یادشده، می‌توان از این مدل در طراحی‌های مناسب و ارزیابی سیستم‌های شبکه زهکشی شهری استفاده کرد.

کلیدواژه‌گان: رواناب، سیلاب شهری، شبکه زهکشی شهری، منطقه ۶ شهرداری تهران، مدل SWMM.

مقدمه

شهرسازی به جایگزین شدن سطوح نفوذپذیر و دارای پوشش گیاهی با سطوح نفوذناپذیر و ساختمان‌ها منجر می‌شود که این مسئله، افزایش تولید رواناب و حجم رواناب را در پی دارد. در نواحی شهری بخش زیادی از زمین به وسیله مواد نفوذناپذیر پوشیده شده است، که ویژگی‌های این مواد کاهش نفوذپذیری و تشکیل رواناب سطحی است که سبب ایجاد سیل، بدون داشتن ارتباط با دشت‌های سیلابی می‌شود. البته، باید توجه داشت که پیچیدگی محیط‌های شهری و زیرساخت‌های مربوط به زهکشی تأثیر زیادی بر تشکیل رواناب سطحی دارند [۱]. به دلیل آثار مخرب ناشی از سیلاب بر حوضه‌های شهری، محققان و سازمان‌های مربوط به آن از جمله شهرداری‌ها، به چگونگی انتقال، مدیریت و تخلیه رواناب‌های ایجادشده در سطح شهر توجه زیادی کرده‌اند. اگرچه بررسی طرح‌های مهار سیلاب که به صورت محدود و پراکنده در سطح کشور مطالعه و اجرا شده‌اند، نشان می‌دهد راه حل مشخص و مطمئنی برای کلیه مناطق سیل‌گیر وجود ندارد، اما پدیده سیل به‌رغم همه پیچیدگی‌هایش قابل بررسی و مطالعه است و می‌توان برای مهار و کاهش خسارت‌های ناشی از آن و حتی بهره‌برداری اقتصادی از سیل، راه حل‌های مناسبی جست‌وجو کرد. پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارش در مناطق خشک و نیمه‌خشک، علاوه بر ایجاد سیلاب‌های مخرب، موجب هدررفت آب‌های سطحی می‌شود. از این رو، مهار رواناب‌های سطحی و بهره‌برداری مناسب از آنها، می‌تواند راه‌کار مناسبی برای جلوگیری از هدررفت آب و تبدیل تهدید به فرصت باشد [۲]. تعیین عرصه‌های مستعد تولید رواناب و سیل و مناطق در معرض آب‌گرفتگی، یکی از عوامل مهم تعیین‌کننده در موفقیت طرح‌های سیل‌خیزی است [۳]. سیستم‌های جمع‌آوری و دفع آب‌های سطحی از اجزای مهم برنامه‌ریزی و عمران مناطق شهری هستند و هر گونه سهل‌انگاری در طراحی صحیح آنها می‌تواند برای جوامع بشری مشکل‌ساز باشد. سیل‌گرفتگی شهرها و خسارت‌ها و زیان‌های فیزیکی ساختمان‌ها، معابر عمومی، صرف هزینه‌های اضطراری و خسارت وارد بر بهداشت و تندرستی، نمونه‌هایی از این مشکلات اند. رشد سریع جمعیت توسعه شهری و صنعتی شدن جوامع نیز این مشکلات را تشدید می‌کنند، زیرا تأثیرات نامطلوبی بر هیدرولوژی حوضه آبخیز دارند و سبب تشدید سیلاب‌ها و

افزایش آلودگی در قسمت‌های پایاب جریان پایه می‌شوند. کاهش پیامدهای زیان‌بار یادشده با طراحی صحیح و تأمین ظرفیت کافی شبکه‌های جمع‌آوری و دفع آب‌های سطحی قابل تحقق است که معمولاً به شبیه‌سازی و استفاده از مدل‌های ریاضی نیاز خواهد داشت [۴]. علاوه بر این، با تولید رواناب، رسوبات و برخی زباله‌های شهری و مواد آلاینده‌های همچون روغن، گریس، مواد سمی، مواد بیماری‌زا و دیگر آلوده‌کننده‌ها، به درون شبکه زهکشی شهری راه می‌یابند و در محل‌های تجمع، سبب ایجاد معضلات زیست‌محیطی می‌شوند. ضمن اینکه پس از وقوع بارندگی‌ها، انباشت نامحسوس آب در چاله‌های سطح آسفالت و نفوذ آنها به درون درزها و ترک‌های آسفالت، موجب تخریب سطوح نفوذناپذیر، به‌خصوص بر اثر یخبندان، می‌شود و اگر نزولات جوی به صورت برف باشد، با ذوب تدریجی آن در روز و انجماد مجدد در شب، سطوح لغزنده‌ای در معابر به وجود می‌آید که علاوه بر خطر لغزندگی، با گذشت زمان، آلوده می‌شود و تصویر زشتی در کنار معابر به وجود می‌آورد. توجه به رشد سریع شهرسازی و شهرنشینی در ایران، مشکلاتی از جمله آب‌گرفتگی معابر سطح شهر، انتشار آلودگی‌های زیست‌محیطی و خطرهای ناشی از گسترش سیلاب به واسطه نبود سیستم زهکشی مناسب و نابسامانی کانال‌ها و مسیل‌ها از معضلات اساسی بسیاری از حوضه‌های شهری ایران به شمار می‌آیند و به نظر می‌رسد در سال‌های اخیر افزایش ریسک سیلاب در حوضه‌های شهری نسبت به حوضه‌های طبیعی را شاهد باشیم. به منظور رفع مشکلات ناشی از جاری شدن سیلاب در مناطقی از شهر که ریسک سیل زیاد است، باید با دقت کافی، مقدار حجم یا دبی سیلاب‌ها، عمق سیلاب و مدت زمان گسترش سیلاب با استفاده از روش‌ها و مدل‌های متعارف تعیین شود. به‌کارگیری روش‌های صحیح در مدیریت آبخیزهای شهری، امری انکارناپذیر و ضروری است. از این رو، مدیران و برنامه‌ریزان شهری برای اجرای این امر مهم به برآورد میزان رواناب با درجه اطمینان زیادی نیاز دارند [۵]. علت تحولات هیدرولوژیکی ناشی از شهرسازی و چگونگی کاربری اراضی مناطق شهری را می‌توان تغییر در حجم کل رواناب، تغییر در میزان تغذیه ناشی از بارش، تغییر حداکثر آبدهی پیک سیلاب و تغییر در کیفیت آب دانست. تا کنون تحقیقات زیادی درباره سیلاب و مدیریت رواناب شهری با استفاده از مدل SWMM انجام گرفته است، که می‌توان به

شهری شهر کنسو در ویتنام را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد افزایش رواناب ناشی از توسعه مناطق نفوذناپذیر شهری به طور درخور توجهی خطر سیل را افزایش می‌دهد [۱۷]. شهبازی و همکارانش در مقاله‌ای با عنوان «تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی مدل مدیریت رواناب شهری SWMM (مطالعه موردی: شهر ماهدشت)» به تعیین پارامترهای مهم ورودی مدل SWMM و اطمینان از عملکرد مدل در شهر ماهدشت پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد تأثیرگذارترین پارامتر مربوط به درصد اراضی نفوذناپذیر و بی‌تأثیرترین پارامتر مربوط به ارتفاع ذخیره مناطق نفوذپذیر است. برای فرایند واسنجی و اعتبارسنجی مدل، رواناب متناظر با سه واقعه بارندگی در خروجی حوضه اندازه‌گیری شده و با رواناب شبیه‌سازی شده به وسیله مدل مقایسه شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد انطباق خوبی بین آب‌دهی و عمق رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود دارد [۵]. مظفری با انجام تحقیقی، مدیریت کمی و کیفی سیلاب شهری را با مدل SWMM (مطالعه موردی: منطقه ۲۲ تهران) بررسی کرد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد راه‌کار مدیریتی بام سبز با متوسط کاهش ۱۸/۲ درصد نسبت به جوی باغچه با متوسط کاهش ۹/۷ درصد از عملکرد بهتری در کاهش پیک رواناب اوج خروجی از حوضه پرداخته است [۱۸]. مرادی طی پژوهشی با عنوان «رویکردی برای ارزیابی خطر آب‌گرفتگی در سیستم‌های شهری با مدل مدیریت سیلاب SWMM» به ارزیابی کمی و کیفی خطر آب‌گرفتگی در سیستم‌های زهکشی شهری در بخشی از شهر کرمان پرداخته است. نتایج پژوهش ایشان نشان داد مدل SWMM می‌تواند عوامل محرکه اصلی مدت زمان سیلاب، بزرگ‌ترین جریان آب و میزان سیلاب کلی در منطقه بررسی شده را شناسایی کند [۱۹]. همچنین، در مقاله‌ای با عنوان «بررسی اثر توسعه شهری شدن بر تغییرات حجم رواناب با استفاده از مدل بارش - رواناب SWMM (مطالعه موردی: زنجان)» میزان حجم رواناب با استفاده از مدل SWMM ارزیابی شده است. در پژوهش یادشده با استفاده از سنجنده TM ماهواره لندست، نقشه کاربری اراضی برای سال‌های ۱۳۳۴، ۱۳۷۹ و ۱۳۹۱ تهیه شده و نیز، حجم رواناب برای سال‌های یادشده با توجه به توسعه شهری شدن محاسبه شده است. نتایج پژوهش یادشده نشان داد حجم رواناب در سال ۱۳۹۱ نسبت به سال ۱۳۳۴ به مقدار ۶۹۸/۵۸ درصد و نسبت به سال

برخی از آنها اشاره کرد [۱۰]. بابایی و همکارانش طی پژوهشی به شبیه‌سازی سیلاب شهری و زیرحوضه‌های بحرانی در ۲۲ زیرحوضه شهر ارومیه با استفاده از مدل‌های SWMM و PROMETHEE پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد براساس شبیه‌سازی مدل SWMM به ترتیب زیرحوضه‌های S1, S7, S11, S16, S18 بحرانی هستند، حال آنکه در مدل PROMETHEE به ترتیب زیرحوضه‌های S1, S11, S14, S16, S18 نقاط بحرانی‌اند [۱۱]. بک و همکارانش در تحقیقی به برآورد رواناب حاصل از رگبارهای تندی در شش زیرحوضه شهری واقع در حوضه دریاچه تاهو در ایالت کالیفرنیا پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد رواناب برآوردی برای پنج زیرحوضه با واقعیت منطبق است. در ضمن، آنها روش BMP را برای کاهش میزان رواناب در این مناطق پیشنهاد کردند [۱۲]. همچنین، طی پژوهشی به مدل‌سازی هیدرولوژیکی گسترده بام سبز با استفاده از نرم‌افزار SWMM در بولونیای ایتالیا پرداخته شد. نتایج پژوهش یادشده مقایسه بین بام سبز آزمایشی و شبیه‌سازی مدل SWMM، هیدروگراف رواناب خروجی از بام سبز را طی سال نشان داد. در نتیجه، مدل SWMM برای شبیه‌سازی طولانی‌مدت هیدرولوژیکی بام سبز تأیید شد [۱۳]. جیانگ و همکارانش در تحقیقی به شبیه‌سازی سیلاب شهری با استفاده از مدل SWMM در شهر دونگوان در جنوب چین پرداختند. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان داد برای بارندگی با دوره بازگشت یک‌ساله سیلابی اتفاق نخواهد افتاد، در حالی که برای دوره بازگشت‌های دو، پنج، ۱۰ و ۲۰ ساله، سیلاب رخ خواهد داد [۱۴]. سان و همکارانش چگونگی تأثیر پارامترها و خروجی عدم قطعیت مدل SWMM برای حوضه‌های گسسته را بررسی کردند. آنها دو طرح حوضه آبریز برای یک حوضه با تراکم شهرنشینی زیاد را در سیراکوزای نیویورک، توسعه دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد سطح حوضه آبخیز تأثیر زیادی بر پارامترها و نتایج شبیه‌سازی دارد و بیشتر پارامترها به مقیاس‌های مدل‌سازی حساس‌اند [۱۵]. همچنین، طی پژوهشی رواناب سطحی در محیط شهری با استفاده از مدل GIS و Rremote Sensing در شهر Thanjavur در هند تخمین زده شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد منطقه مطالعه شده می‌تواند حجم رواناب بیشتری نسبت به میانگین فصلی بارش تولید کند [۱۶]. هانگ و همکارانش در پژوهشی اثر شهری شدن بر آینده سیلاب‌های

مشاهده می‌شود. شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعه‌شده را در شهر تهران نشان می‌دهد.

مدل SWMM

مقدار رواناب سطحی جاری به‌وجودآمده از بارش‌های جوئی در یک حوضه آبریز به عواملی مانند شدت - مدت بارندگی، ویژگی‌های فیزیکی حوضه همچون شیب، جنس بستر، درصد سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر و پهنای حوضه بستگی دارد. روابط اساسی قابل استفاده در تحلیل‌های هیدرولیکی، روابط پیوستگی، انرژی و مومنتم هستند که شرح کامل آنها در منابع هیدرولیک موجود است. مدل SWMM یک حادثه رگبار را براساس هایتوگراف بارندگی، داده‌های ورودی هوشناسی، سیستم حوضه و شبکه زهکشی به منظور تولید هیدروگراف خروجی، شبیه‌سازی می‌کند. مدل یادشده یکی از مدل‌های پیشرفته برای تحلیل مربوط به برآورد سیلاب و آبدهی کانال‌های مستقل و مختلط سطحی و زیرزمینی محسوب می‌شود که در آن قابلیت‌هایی مانند محاسبه هیدروگراف زیرحوضه‌های شهری، انتقال آب‌های سطحی و همچنین قابلیت انتقال آب به صورت تحت فشار، موجودند. هیدروگراف ناشی از بارندگی، میزان فشار بر سطح زیرحوضه‌ها را تعیین کرده و آن را به صورت مخزن غیرخطی، در زیرحوضه‌های کوچک و کانال‌ها، روندیابی می‌کند. در این حالت مخزن غیرخطی توسط دو معادله پیوستگی و مانینگ به دست می‌آید [۲۲]. جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی، مسئله‌ای مهم در اداره کلان‌شهرها از جمله تهران است. برای پیشبرد تحقیق حاضر، شناخت کلی از منطقه ۶ تهران ضروری است. به این منظور، باید بازدیدهای میدانی برای شناخت مشخصات فیزیکی و تهیه گزارش کانال‌های درجه ۱-۴ انجام شود. این گزارش‌ها شامل اطلاعاتی مانند شماره و آدرس معبر، موقعیت کانال نسبت به معبر، تیپ، نوع، شکل مقطع، پوشش دیواره و کف کانال و محل تخلیه کانال هستند و بر اساس مشاهدات عینی تکمیل می‌شوند. به منظور شبیه‌سازی بارش - رواناب از مدل SWMM استفاده شد. در پژوهش حاضر منطقه ۶ شهرداری تهران به چهار واحد هیدرولوژیکی تقسیم شده است. تعیین مرز حوضه و زیرحوضه‌ها با استفاده از نقشه توپوگرافی ۱:۲۰۰۰ نقشه‌های شهری، بازدیدهای میدانی و نیز با توجه به شیب و چگونگی حرکت آب و خروجی مربوط به هر زیرحوضه انجام شده

۱۳۷۹ به میزان ۶۴/۴۵ درصد افزایش یافته است [۲۰]. بدیع‌زاده و همکارانش در مقاله‌ای با عنوان «توسعه مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی با استفاده از بهترین راه‌کارهای مدیریتی در کنترل رواناب شهری (مطالعه موردی: منطقه ۱۰ شهرداری تهران)» به ارزیابی کمی و کیفی وضعیت نهر فیروزآبادی با استفاده از مدل SWMM و همچنین یافتن بهترین راه‌کارهای مدیریتی با استفاده از مدل MOPSO به منظور کاهش دبی رواناب پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد این راه‌کارها توانایی کاهش ۸ تا ۱۵ درصدی دبی پیک خروجی از حوضه برای بارش با دوره بازگشت پنج‌ساله را دارند [۲۱]. در تحقیق حاضر با وجود پیچیدگی‌های مختلف در شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی و قابلیت اختصاصی مدل ریاضی از مدل SWMM به عنوان مدل شبیه‌ساز سیلاب منطقه ۶ شهرداری تهران انتخاب شد.

مواد و روش‌ها

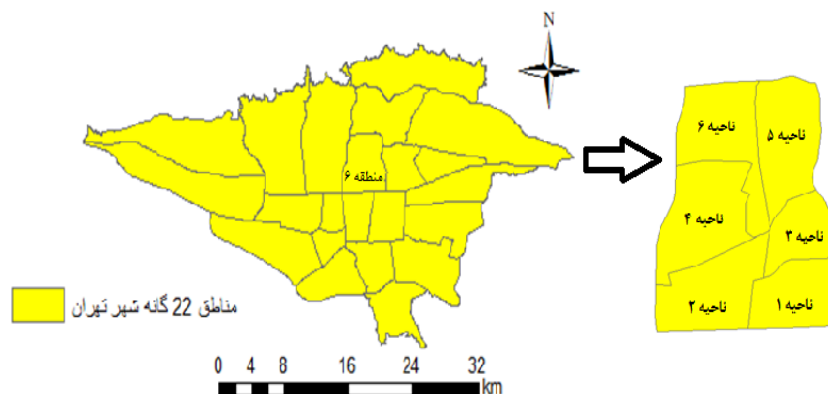
شهر تهران به عنوان بزرگ‌ترین شهر ایران با مساحتی حدود ۷۰۰ کیلومتر مربع و جمعیت حداقل ۱۰ میلیون نفر یکی از شهرهای بزرگ جهان است. محدوده انجام پژوهش حاضر، منطقه ۶ شهرداری تهران است. این منطقه با مساحتی معادل ۲۱/۵ کیلومتر مربع حدود ۳/۶۱ درصد از سطح شهر را شامل می‌شود. منطقه ۶ به عنوان یکی از مناطق قدیمی شهر تهران، در قسمت شمالی حوزه مرکزی شهر قرار گرفته است. منطقه یادشده به لحاظ موقعیت جغرافیایی در شمال حوزه مرکزی شهر تهران واقع شده که از سمت شمال به منطقه ۳، از شرق به منطقه ۷، از جنوب به مناطق ۱۰-۱۲ و از غرب به منطقه ۲ محدود می‌شود. این منطقه از سه سمت غرب، شرق و شمال با سه بزرگراه اصلی تهران یعنی چمران، مدرس و همت و از سمت جنوب به بزرگ‌ترین محور شرقی - غربی شهر، یعنی خیابان انقلاب، محدود می‌شود. منطقه ۶ شهرداری تهران شش ناحیه و ۱۴ محله دارد که نواحی ۳ و ۴ به ترتیب کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین نواحی هستند. در تقسیم‌بندی محله‌ای کوچک‌ترین، محله نظامی گنجوی و بزرگ‌ترین آنها امیرآباد و ساعی هستند. در مرزبندی نواحی محلات موجود شهری منطقه، عدم انطباق با شبکه‌های شهری، گسست کالبدی محلات توسط شبکه راه‌های فرامنطقه‌ای، نبود انسجام و یکپارچگی اجتماعی - کالبدی - فرهنگی و عدم انطباق مرز محلات یک ناحیه با ناحیه دیگر

طرح، لازم است ابتدا زمان تمرکز مشخص شود. پس از محاسبه زمان تمرکز با استفاده از منحنی شدت - مدت - فراوانی، مقدار بارش تجمعی محاسبه شد. در نهایت، این اطلاعات به عنوان ورودی به صورت دستی وارد مدل شد.

کانال‌های اصلی منطقه ۶ شهرداری تهران

منطقه ۶ شهرداری تهران از شرق با منطقه ۷، از شمال با منطقه ۳، از غرب با منطقه ۲ و از جنوب با مناطق ۱۱ و ۱۲ مجاور است. برای شناسایی نقاط ورودی و خروجی رواناب با منطقه، از مرزهای منطقه بازدید کاملی به عمل آمد. جدول ۱ مشخصات کانال‌های اصلی منطقه ۶ شهرداری تهران را نشان می‌دهد. براساس بازدیدهای انجام‌شده، منطقه ۶ بیشتر با مناطق ۳ و ۷ تبادل آبی از نوع ورودی دارد. این تبادل‌ها در مناطق ۲، ۱۱ و ۱۲ بیشتر از نوع خروجی است.

است. برای محاسبه عرض معادل، از روش عرض مستطیل معادل استفاده شده است. برای تعیین ضریب زبری جریان روی سطوح نفوذپذیر، نفوذناپذیر و آبگذرها و همچنین تعیین ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر و نفوذپذیر از راهنمای مدل استفاده شده است. به منظور تعیین میزان نفوذ، روش حفاظت خاک آمریکا (SCS) به کار برده شده است. اطلاعات مربوط به آبگذرها (شکل، بیشینه عمق و طول آبگذر)، اطلاعات اتصالات (رقوم کف آبگذر در محل اتصال، بیشینه عمق اتصال)، اطلاعات چاه‌ها (ارتفاع، شکل و پهنا دهانه ورودی) و در نهایت اطلاعات مربوط به خروجی‌هایی که شامل رقوم کف گره خروجی می‌شود، از طریق بازدیدهای میدانی انجام شده است. همچنین، اطلاعات مربوط به مساحت، محیط، شیب و طبقات ارتفاعی منطقه مطالعه‌شده که در بخش‌های مختلفی از مدل استفاده شده به وسیله ARC GIS استخراج شده است. برای مشخص کردن بارندگی



شکل ۱. منطقه مطالعه‌شده (شهرداری منطقه ۶ تهران)

جدول ۱. کانال‌های اصلی منطقه ۶ شهرداری تهران

نام کانال اصلی	نوع کانال	آدرس	عرض (m)	ارتفاع (m)	جنس دیواره	جنس کف
تونل نواب	تونل با مقطع تخم‌مرغی	بزرگراه کردستان تا بزرگراه نواب	۰	۱/۶	بتن مسلح	بتن مسلح
سرشاخه ولیعصر	تونل با مقطع تخم‌مرغی	بزرگراه گمنام تا خیابان انقلاب	۰	۲/۲۵	بتن مسلح	بتن مسلح
سرشاخه مدرس	تونل با مقطع تخم‌مرغی	خیابان ولیعصر	۱/۶	۱/۸	بتن مسلح	بتن مسلح
سرشاخه بلوار کشاورز	تونل با مقطع تخم‌مرغی	بزرگراه مدرس	۰	۱/۶	بتن مسلح	بتن مسلح
سرشاخه کامکار	تونل با مقطع تخم‌مرغی	خیابان مطهری تا خیابان حافظ	۰	۲/۸	بتن مسلح	بتن مسلح
سرشاخه فردوسی	تونل با مقطع تخم‌مرغی	بلوار کشاورز، برادران مظفر، خیابان طالقانی	۱/۶	۱/۸	بتن مسلح	بتن مسلح
سرشاخه جویبار	تونل با مقطع تخم‌مرغی	خیابان کامکار، خیابان سنایی	۱/۶	۱/۸	بتن مسلح	بتن مسلح
تونل خیام	تونل با مقطع تخم‌مرغی	خیابان انقلاب از خیابان مفتوح تا میدان فردوسی	-	-	پلی اتلین	پلی اتلین
	تونل با مقطع تخم‌مرغی	بزرگراه گمنام، خیابان فاطمی، خیابان جویبار، خیابان زرتشت	۱/۶	۱/۸	بتن مسلح	بتن مسلح
	تونل با مقطع تخم‌مرغی	خیابان حافظ	۰	۲/۸	بتن مسلح	بتن مسلح

جدول ۲. مقادیر ضریب رابطه شدت بارش $C_{Alt,RP}$ در ترازهای ارتفاعی مختلف

ارتفاع (متر)	دوره بازگشت (سال)						
	۱۰۰	۵۰	۲۵	۲۰	۱۰	۵	۲
۹۰۰	۲۱۸	۱۹۷	۱۷۶	۱۶۹	۱۴۸	۱۲۷	۹۹
۱۰۰۰	۲۳۶	۲۱۴	۱۹۱	۱۸۴	۱۶۱	۱۳۸	۱۰۸
۱۱۰۰	۲۵۵	۲۳۱	۲۰۶	۱۹۸	۱۷۴	۱۴۹	۱۱۷
۱۲۰۰	۲۷۴	۲۴۸	۲۲۱	۲۱۳	۱۸۷	۱۶۰	۱۲۵
۱۳۰۰	۲۹۳	۲۶۵	۲۳۷	۲۲۸	۱۹۹	۱۷۱	۱۳۴
۱۴۰۰	۳۱۲	۲۸۲	۲۵۲	۲۴۲	۲۱۲	۱۸۲	۱۴۳
۱۵۰۰	۳۳۱	۲۹۹	۲۶۷	۲۵۷	۲۲۵	۱۹۳	۱۵۱
۱۶۰۰	۳۵۰	۳۱۶	۲۸۳	۲۷۲	۲۳۸	۲۰۴	۱۶۰
۱۷۰۰	۳۶۹	۳۳۳	۲۹۸	۲۸۶	۲۵۱	۲۱۵	۱۶۸
۱۸۰۰	۳۸۸	۳۵۰	۳۱۳	۳۰۱	۲۶۴	۲۲۶	۱۷۷
۱۹۰۰	۴۰۷	۳۶۸	۳۲۸	۳۱۶	۲۷۷	۲۳۸	۱۸۶
۲۰۰۰	۴۲۶	۳۸۵	۳۴۴	۳۳۰	۲۹۰	۲۴۹	۱۹۴
۲۱۰۰	۴۴۵	۴۰۲	۳۵۹	۳۴۵	۳۰۲	۲۰۶	۲۰۳
۲۲۰۰	۴۶۳	۴۱۹	۳۷۴	۳۶۰	۳۱۵	۲۷۱	۲۱۲
۲۳۰۰	۴۸۲	۴۳۶	۳۸۹	۳۷۵	۳۲۸	۲۸۲	۲۲۰
۲۴۰۰	۵۰۱	۴۵۳	۴۰۵	۳۸۹	۳۴۱	۲۹۳	۲۲۹
۲۵۰۰	۵۲۰	۴۷۰	۴۲۰	۴۰۴	۳۵۴	۳۰۴	۲۳۸

با توجه به محدوده ارتفاعی منطقه ۶ شهرداری تهران، فقط بخشی از جدول که ارتفاع‌های بین ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ متر از سطح دریا را نشان می‌دهد، به کار گرفته می‌شود. جدول ۳ مقادیر شدت بارش را برای این تراز ارتفاعی در تداوم‌ها و دوره بازگشت‌های مختلف نشان می‌دهد. با این وجود، به دلیل محدودیت‌های استفاده‌شده در تعداد منحنی‌های شدت - مدت - دوره بازگشت از منحنی مربوط به ارتفاع ۱۳۰۰ متر برای کل منطقه استفاده می‌شود. شکل ۲ منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی بارش در تراز ارتفاعی ۱۳۰۰ متر را نشان می‌دهد.

رابطه شدت - مدت - فراوانی

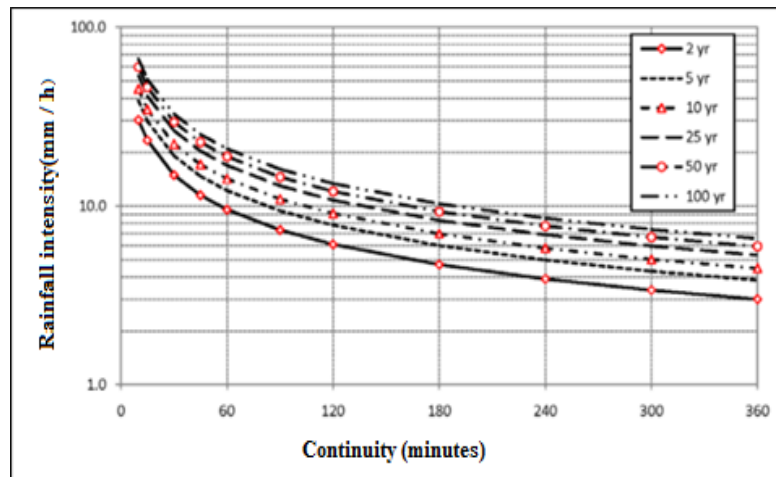
برای محاسبه دبی رواناب در حوضه‌های آبریز، روش‌های مختلفی وجود دارد. رایج‌ترین روش استفاده‌شده در حوضه‌های شهری، روش استدلالی است. در روش یادشده برای برآورد دبی رواناب از شدت بارش استفاده می‌شود. برای تخمین شدت بارش با تداوم‌ها و دوره بازگشت‌های مختلف، لازم است منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی تهیه شوند. برای تهیه منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی وزارت نیرو و سازمان هواشناسی کشوری استفاده شده است. به این منظور، از داده‌های ایستگاه‌های دارای باران‌سنج ثابت استفاده شده است. از میان ایستگاه‌های وزارت نیرو، ایستگاه‌های آبان شمالی، سد کرج، یوسف‌آباد، کن، سد لتیان و کلکچال و از میان ایستگاه‌های سازمان هواشناسی، ایستگاه‌های مهرآباد تهران، آبعلی و دوشان تپه استفاده شده‌اند. علاوه بر این، برای به‌دست‌آوردن رابطه شدت-مدت-فراوانی در هر تراز ارتفاعی، مقایسه‌ای بین روابط مختلف ارائه‌شده انجام گرفته است. به این منظور، روابط ارائه‌شده توسط مشاور الکساندر گیب، دکتر فریبرز وزیری، مشاور عمران محیط زیست، سازمان هواشناسی کشوری و دکتر بیژن قهرمان مقایسه شده‌اند. از مقایسه بین منحنی‌های ارائه‌شده و داده‌های موجود ایستگاه‌های هواشناسی، رابطه عمومی شدت بارش‌ها در شهر تهران به شکل زیر به دست آمده است (رابطه ۱):

$$i = C_{Alt,RP} D^{-0.645} \quad (1)$$

که در آن (i) شدت بارندگی (میلی‌متر در ساعت)، (D) تداوم بارندگی (دقیقه) و $C_{Alt,RP}$ ضریب رابطه که برحسب ارتفاع و دوره بازگشت از جدول ۲ استخراج می‌شود.

جدول ۳. مقادیر شدت بارش (میلی‌متر در ساعت) در تراز ارتفاعی ۱۳۰۰ متر

تداوم (دقیقه)	دوره بازگشت (سال)						
	۱۰۰	۵۰	۲۵	۲۰	۱۰	۵	۲
۱۰	۶۶/۳۵	۶۱/۰۱	۵۳/۶۷	۵۱/۶۳	۴۵/۰۷	۳۸/۷۳	۳۰/۳۵
۲۰	۴۲/۴	۳۸/۳۸	۳۴/۳۲	۳۳/۰۲	۲۸/۸۲	۲۴/۷۶	۱۹/۴۱
۳۰	۳۲/۶۷	۲۹/۵۵	۲۶/۴۲	۲۵/۴۲	۲۲/۱۹	۱۹/۰۷	۱۴/۹۴
۴۰	۲۷/۱۴	۲۴/۵۴	۲۱/۹۵	۲۱/۱۲	۱۸/۴۳	۱۵/۸۴	۱۲/۴۱
۵۰	۲۳/۵۰	۲۱/۲۵	۱۹/۰۱	۱۸/۳۹	۱۵/۹۶	۱۳/۷۱	۱۰/۷۵
۶۰	۲۰/۸۹	۱۸/۸۹	۱۶/۹۰	۱۶/۲۶	۱۴/۱۹	۱۲/۱۹	۹/۵۵
۹۰	۱۶/۰۸	۱۴/۵۵	۱۳/۰۱	۱۰/۵۲	۱۰/۹۲	۹/۳۹	۷/۳۶
۱۲۰	۱۳/۳۶	۱۲/۰۸	۱۰/۸۱	۱۰/۴۰	۹/۰۷	۷/۸۰	۶/۱۱
۱۸۰	۱۰/۲۹	۹/۳۰	۸/۳۲	۸	۶/۹۹	۶	۴/۷۰
۳۶۰	۶/۵۸	۵/۹۵	۵/۳۲	۵/۱۲	۴/۴۷	۳/۸۴	۳/۰۱



شکل ۲. منحنی شدت - مدت - فراوانی بارش در تراز ارتفاعی ۱۳۰۰ متر

باشد، نتایج شبیه‌سازی خوب توصیف می‌شوند، اما زمانی که مقادیر NS بین ۰/۳۶ و ۰/۷۵ باشد، نتایج مدل رضایت‌بخش است. کمترین مقدار قابل قبول NS ۰/۵ است. میانگین مربع خطا معمولاً برای محاسبه تفاوت بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهداتی استفاده می‌شود. ارزیابی عملکرد مدل بر مبنای مقایسه رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در نظر گرفته شد که هرچه این ضریب کوچک‌تر باشد، تفاوت داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده کمتر و دقت پیش‌بینی مدل بیشتر خواهد بود. BIA خطای کل در حجم جریان بوده و مقدار مثبت و منفی ضریب نشان‌دهنده بیشتر یا کمتر بودن متوسط حجم جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل نسبت به جریان مشاهداتی است. جدول ۴ شاخص‌های واسنجی مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده دبی برای مدل SWMM را نشان می‌دهد.

جدول ۴. شاخص‌های واسنجی مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده دبی برای مدل SWMM

Rainfall	BIAS%	RMSE	NS
۹۶/۹/۱۰	۶/۴	۰/۰۲	۰/۸۸
۹۶/۱۰/۳	۵/۵	۰/۰۰۹	۰/۷۱
۹۶/۱۰/۱۸	۴/۹۹	۰/۰۱	۰/۸۹
۹۶/۱۱/۱۵	۸/۹	۰/۰۲	۰/۷۴
۹۶/۱۲/۱۶	۷/۵۶	۰/۰۱	۰/۷۷

بحث و نتایج

میزان پرشدگی و ظرفیت کانال‌های منطقه ۶ شهرداری تهران برای دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ ساله در شکل‌های

کالیبراسیون مدل

به منظور واسنجی مدل، از پنج واقعه بارندگی در سال ۱۳۹۶-۱۳۹۷ استفاده شد. سپس، مدل برای دوره بازگشت‌های مختلف اجرا شده و میزان رواناب متناظر با آن برآورد شد. از آنجا که واسنجی مدل با توجه به پارامترهای متعدد و تعداد زیرحوضه‌ها کاری سخت و زمان‌بر است، برای یک واسنجی دقیق و مناسب باید پارامترها را به کمترین حد رساند. میزان صحت و فرایند واسنجی با استفاده از سه آماره ضریب ناش-ساتکلیف (NS)، ریشه مربع خطا و بایاس محاسبه شد که به ترتیب روابط ۲-۴ آورده شده‌اند.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{av})^2} \quad (2)$$

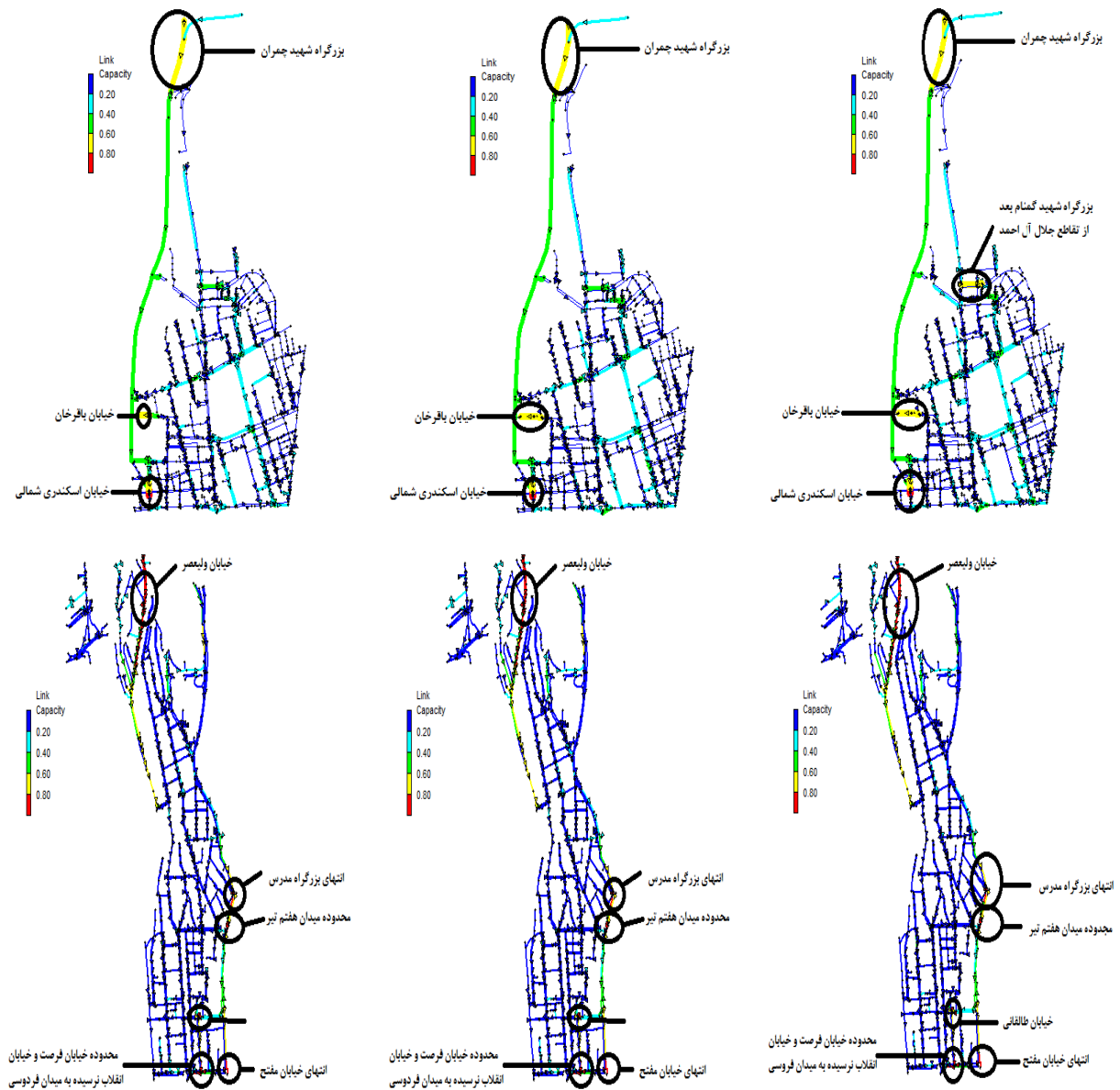
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})^2} \quad (3)$$

$$BIAS\% = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})}{\sum_{i=1}^n Q_{oi}} \quad (4)$$

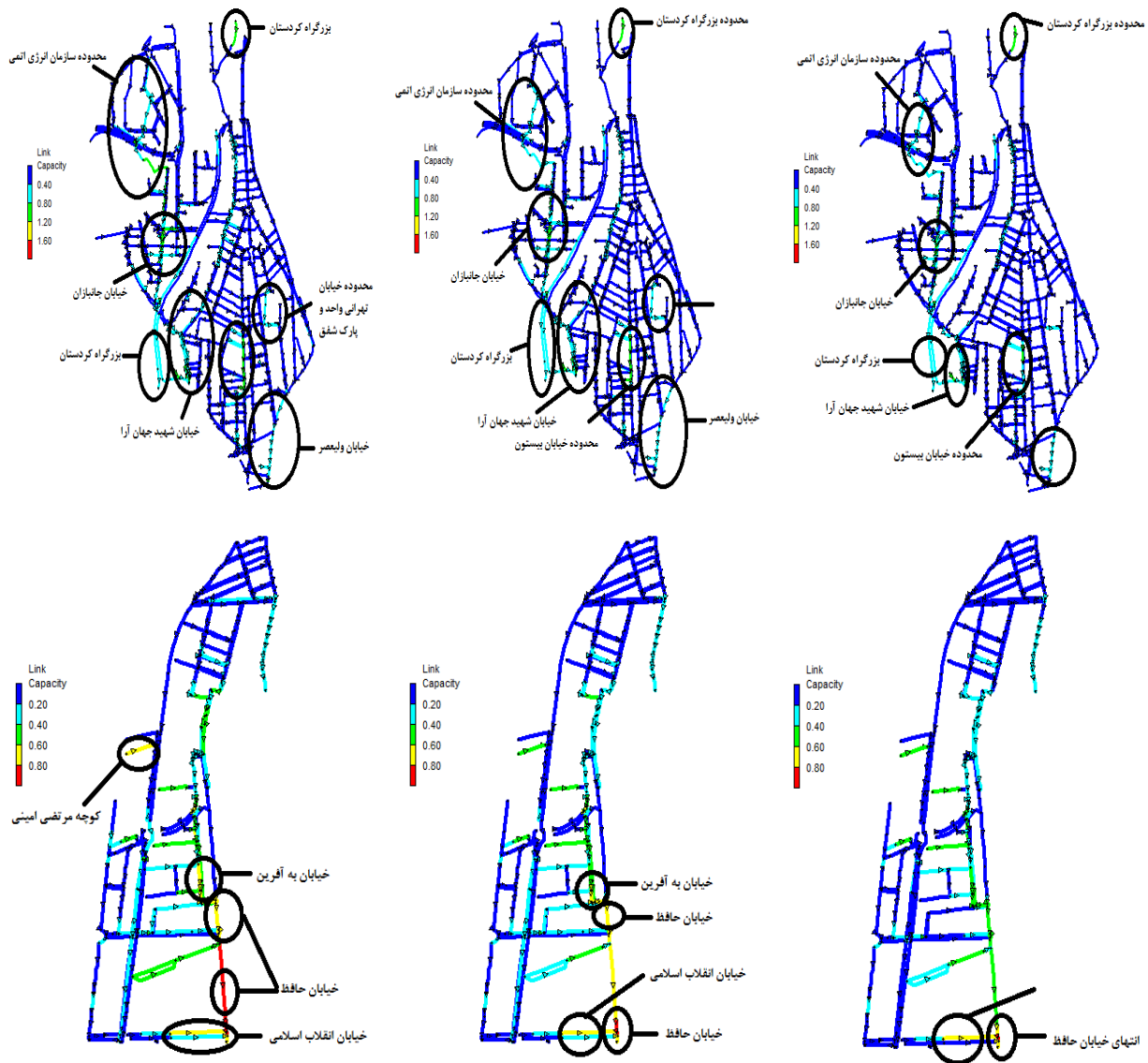
که در معادله‌های یادشده، Q_{oi} داده مشاهداتی، Q_{si} داده شبیه‌سازی شده، Q_{av} میانگین داده مشاهداتی و N داده است. مقدار NS می‌تواند مثبت یا منفی باشد. بهترین حالت این است که مقدار آن برابر یک باشد. اگر مقدار NS برابر یک باشد، تناسب کاملی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. مقدار NS صفر نشان می‌دهد مدل، نسبت به استفاده از مقادیر میانگین داده‌های مشاهداتی بهتر یا بدتر پیشگویی نمی‌کند. اگر NS بزرگ‌تر از ۰/۷۵

آبی دارند در دوره بازگشت‌های مختلف عملکرد خوبی دارند، اما قسمت‌هایی از شبکه که در محدوده زرد و قرمز قرار دارند، از نظر ظرفیت کانال در محدوده بحرانی‌اند. به طور کلی، با توجه به شکل‌های یادشده می‌توان نتیجه گرفت که کانال‌های موجود در منطقه مطالعه شده توان عبور رواناب برای دوره بازگشت دوساله را دارند، اما برای دوره بازگشت‌های ۵ و ۱۰ ساله با مشکل مواجه‌اند و سبب طغیان و خسارت احتمالی می‌شوند. بنابراین، کانال‌ها برای دوره بازگشت ۵ و ۱۰ ساله باید هم از نظر ابعادی و هم شیب کانال بررسی شوند و ابعاد بهینه برای آنها طراحی شود.

۳ و ۴ آورده شده است. پرشدگی مجاز با توجه به نسبت عمق جریان به حداکثر ارتفاع کانال (لوله) را ۰/۸۴ و کمی کمتر باید در نظر گرفته شود و نباید از این مقدار فراتر رود. قسمت‌هایی از کانال‌های منطقه ۶ که پرشدگی آنها از ۰/۸ بیشتر است، در معرض آب‌گرفتگی هستند. همان طور که در شکل‌های یادشده دیده می‌شود، کانال‌هایی که از نظر آب‌گرفتگی در منطقه مطالعه شده دچار مشکل هستند، محدوده آنها مشخص شده است. در واقع، سعی شده است بیشتر مناطقی که از نظر آب‌گرفتگی در محدوده بحرانی قرار گرفته‌اند، نمایان شود و قسمت‌هایی از شبکه که رنگ



شکل ۳. میزان پرشدگی کانال‌ها در دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ ساله (از راست به چپ) برای واحد هیدرولوژیکی غرب و شرق منطقه ۶ شهرداری تهران



شکل ۴. میزان پرشدگی کانال‌ها در دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ ساله (از راست به چپ) برای واحد هیدرولوژیکی مرکزی منطقه ۶ شهرداری تهران

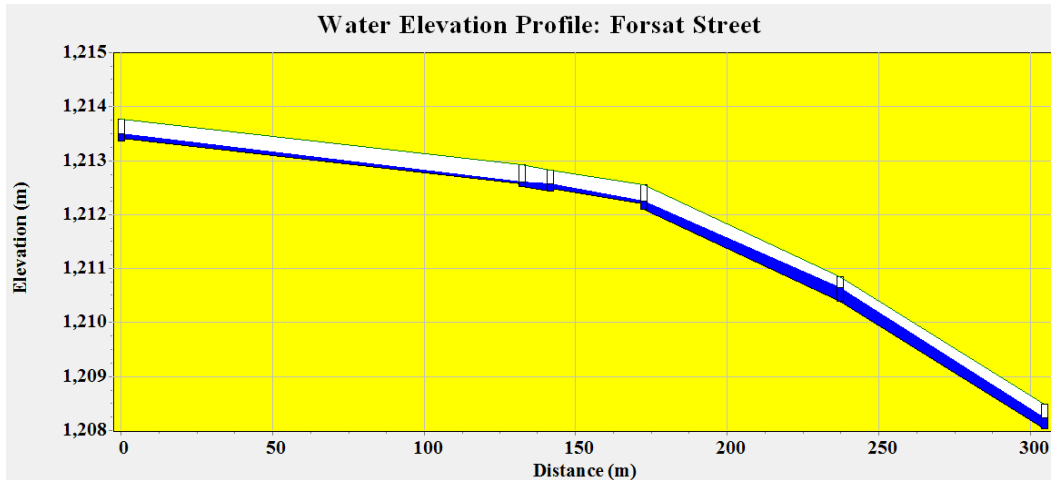
سرشاخه خیابان فرصت

روانابی به میزان ۰/۶۲ مترمکعب بر ثانیه در ضلع غربی خیابان کارگر و ۰/۴۹ مترمکعب بر ثانیه در ضلع شرقی آن و نزدیک میدان انقلاب سرازیر می‌شود که آب‌گرفتگی این محدوده را در پی دارد. نتایج به‌دست‌آمده از اجرای مدل برای مجرای بحرانی سرشاخه خیابان فرصت در دوره بازگشت‌های دو، پنج و ۱۰ ساله نشان می‌دهد در ارتباطی که در جدول ۵ آورده شده، دچار سیل‌زدگی است. همچنین، میزان سیل‌زدگی در اتصالات یادشده و دبی حداکثر عبوری از آنها و ارتفاع آب در آنها نسبت به سایر اتصالات افزایش مشهودی داشته است. شکل ۵ پروفیل

مجرای آب بحرانی، چگونگی سیل‌زدگی و بالا آمدن ارتفاع آب را در اتصالات یادشده نشان می‌دهد که افزایش سطح آب کاملاً قابل مشاهده است. با توجه به اهمیت این میدان از نظر عبور و مرور افراد و همچنین نبود سرشاخه‌ای که در جنوب میدان انقلاب بتواند این رواناب را دریافت کند، توصیه ایجاد یک سرشاخه در خیابان فرصت حد فاصل خیابان کارگر شمالی تا خیابان جمالزاده و اتصال آن به تونل نواب شده است. سایر رواناب‌های جاری در خیابان ولیعصر، دکتر قریب و اسکندری نیز باید در محل تلاقی با تونل نواب به آن اتصال یابد تا در خیابان آزادی، که از مهم‌ترین خیابان‌های تهران است، مشکل آب‌گرفتگی وجود

تأسیسات شهری مانع اجرای کار در سطح می‌شوند، به صورت عمقی و تونلی توصیه می‌شود.

نداشته باشد. با توجه به شیب معکوس از خیابان کارگر تا خیابان جمالزاده، اجرای این سرشاخه با توجه به اینکه



شکل ۵. پروفیل سرشاخه خیابان فرصت

جدول ۵. مقادیر سیل‌زدگی اتصالات بحرانی سرشاخه خیابان فرصت

دوره بازگشت دوساله			دوره بازگشت پنج‌ساله			دوره بازگشت ده‌ساله		
اتصالات	حد اکثر دبی (m ³ /s)	حد اکثر عمق (m)	اتصالات	حد اکثر دبی (m ³ /s)	حد اکثر عمق (m)	اتصالات	حد اکثر دبی (m ³ /s)	حد اکثر عمق (m)
N۲۲ - ۹۷	۰/۰۴۲	۰/۱۴	N۲۲ - ۹۷	۰/۰۵۸	۰/۱۶	N۲۲ - ۹۷	۰/۰۷۲	۰/۱۸
N۲۲ - ۹۸	۰/۰۴۲	۰/۰۹	N۲۲ - ۹۸	۰/۰۵۸	۰/۱۲	N۲۲ - ۹۸	۰/۰۷۳	۰/۱۵
N۲۲ - ۹۹	۰/۰۴۳	۰/۱۴	N۲۲ - ۹۹	۰/۰۵۸	۰/۱۶	N۲۲ - ۹۹	۰/۰۷۳	۰/۱۷
N۲۳ - ۳۳	۰/۲۴۳	۰/۱۵	N۲۳ - ۳۳	۰/۳۲۹	۰/۱۹	N۲۳ - ۳۳	۰/۰۴۰	۰/۲۲
N۲۳ - ۳۴	۰/۴۷۸	۰/۲۵	N۲۳ - ۳۴	۰/۶۵۱	۰/۱۹	N۲۳ - ۳۴	۰/۷۹۱	۰/۳۶

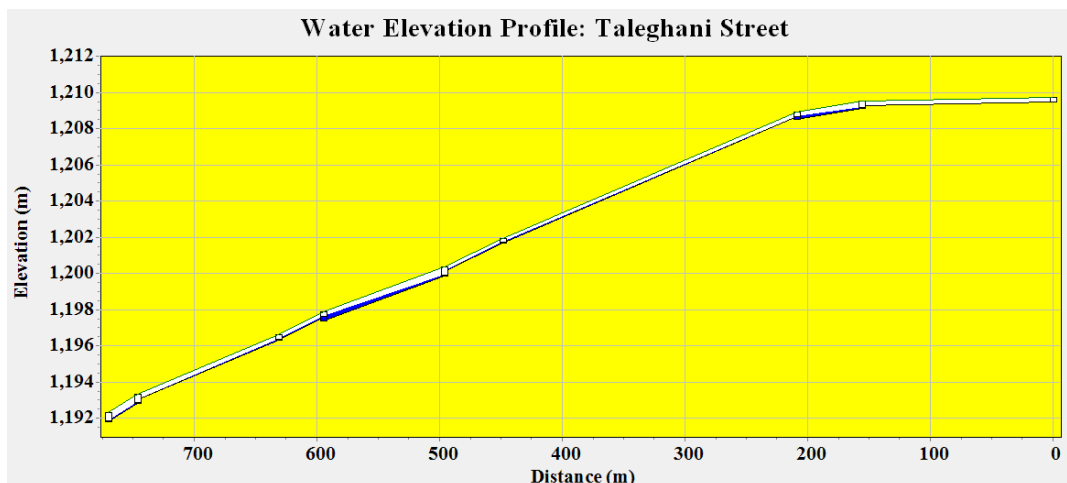
مشکلات زیادی برای منطقه ۱۲ نیز در پی دارد. نتایج به‌دست‌آمده از اجرای مدل برای مجرای بحرانی سرشاخه خیابان طالقانی در دوره بازگشت‌های دو، پنج و ۱۰ ساله نشان می‌دهد در اتصالاتی که در جدول ۶ آورده شده است دچار سیل‌زدگی است. همچنین، میزان سیل‌زدگی در اتصالات یادشده و دبی حداکثر عبوری از آنها و ارتفاع آب در آنها نسبت به سایر اتصالات افزایش مشهودی داشته است. شکل ۶ پروفیل مجرای آب بحرانی، چگونگی سیل‌زدگی و بالا آمدن ارتفاع آب را در اتصالات یادشده نشان می‌دهد که افزایش سطح آب کاملاً قابل مشاهده است. برای مهار و کنترل رواناب این منطقه سه سناریوی مختلف به‌ترتیب: ۱. احداث سرشاخه سمیه از میدان هفت تیر و امتداد آن در بلوار کریمخان زند و خیابان خردمند جنوبی و پس از گذر از پارک

سرشاخه طالقانی

در میدان هفت تیر، مقادیر زیادی رواناب از منطقه ۷ و خیابان مدرس به صورت ورودی وجود دارد که تا ابتدای کانال ضلع شرقی خیابان طالقانی به حدود ۱/۲۳ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. این حجم رواناب در پایین دست افزایش یافته و در خیابان مفتوح در حال حاضر در تقاطع خیابان انقلاب و محل زیرگذر مشکلاتی ایجاد می‌کند. به علاوه، در محدوده پارک هنرمندان به علت ورود رواناب خیابان خردمند شمالی و سایر خیابان‌های اطراف، جوی‌های موجود قدرت تخلیه این رواناب که حدود ۲/۲۵ مترمکعب بر ثانیه است را ندارند (سرجمع حدود ۳/۵ مترمکعب بر ثانیه). به علاوه، ورود کلیه رواناب‌های یادشده به منطقه ۱۲ از طریق خیابان‌های مختلف و به علت نبود سرشاخه اصلی در نزدیکی مرز خیابان انقلاب،

خیابان مفتوح، کریمخان زند و خردمند جنوبی به همراه پخش آب در فضایی به وسعت شش هزار مترمربع و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در پارک هنرمندان و احداث سرشاخه طالقانی که مازاد رواناب به تونل خیام تخلیه شود، پیشنهاد می‌شود.

هنرمندان در خیابان طالقانی به سرشاخه‌های احداثی در این خیابان متصل شده که در نهایت به تونل خیام تخلیه شود؛ ۲. افزایش ابعاد کانال‌های خیابان مفتوح، کریمخان زند و خردمند جنوبی به همراه احداث سرشاخه کوتاه در خیابان طالقانی با همین عنوان و تخلیه به تونل خیام؛ ۳. افزایش ابعاد کانال‌های



شکل ۶. پروفیل سرشاخه خیابان طالقانی

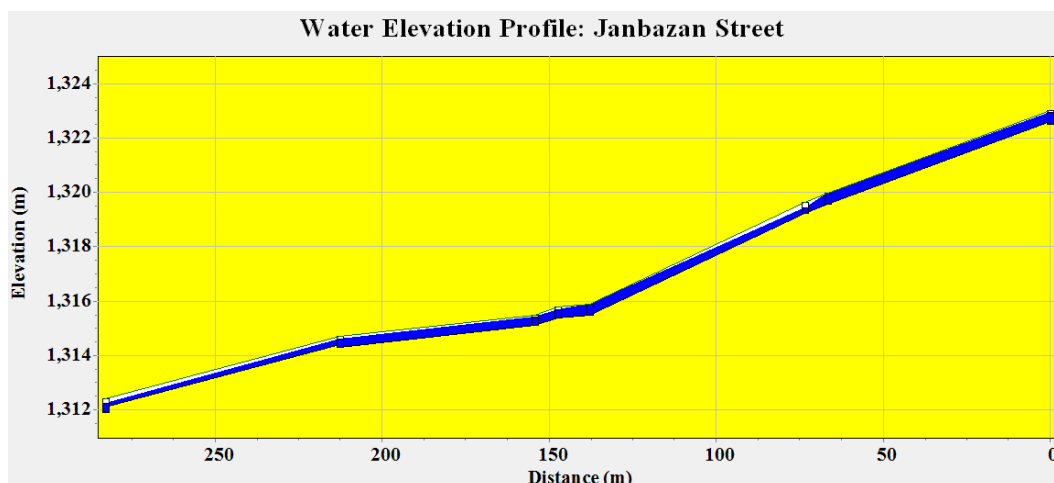
جدول ۶. مقادیر سیل‌زدگی اتصالات بحرانی سرشاخه خیابان طالقانی

دوره بازگشت دوساله			دوره بازگشت پنج‌ساله			دوره بازگشت ده‌ساله		
اتصالات	دبی حداکثر (m ³ /s)	حداکثر عمق (m)	اتصالات	دبی حداکثر (m ³ /s)	حداکثر عمق (m)	اتصالات	دبی حداکثر (m ³ /s)	حداکثر عمق (m)
N15-31	۰/۰۰۲	۰/۰۲	N15-31	۰/۰۰۳	۰/۰۲	N15-31	۰/۰۰۳	۰/۰۳
N76-81	۰/۰۲۲	۰/۰۴	N76-81	۰/۰۳۱	۰/۰۵	N76-81	۰/۰۳۷	۰/۰۶
N15-32	۰/۰۵۴	۰/۱۹	N15-32	۰/۰۷۳	۰/۲۰	N15-32	۰/۰۸۷	۰/۲۱
N15-37	۰/۰۵۷	۰/۰۳	N15-37	۰/۰۷۷	۰/۰۳	N15-37	۰/۰۹۲	۰/۰۴
N15-38	۰/۰۶۸	۰/۰۸	N15-38	۰/۰۹۱	۰/۰۹	N15-38	۰/۱۱۰	۰/۱۱
N15-41	۰/۰۶۹	۰/۲۳	N15-41	۰/۰۹۳	۰/۲۴	N15-41	۰/۱۱۲	۰/۲۴
N15-42	۰/۰۷۰	۰/۰۳	N15-42	۰/۰۹۴	۰/۰۴	N15-42	۰/۱۱۳	۰/۰۵
N15-45	۰/۰۰۷	۰/۰۸	N15-45	۰/۰۱۴	۰/۰۹	N15-45	۰/۰۲۰	۰/۱۰

که در جدول ۷ آمده، دچار سیل‌زدگی است. همچنین، میزان سیل‌زدگی در اتصالات یادشده و دبی حداکثر عبوری از آنها و ارتفاع آب در آنها نسبت به سایر اتصالات افزایش مشهودی داشته است. شکل ۷ پروفیل مجرای آب بحرانی، چگونگی سیل‌زدگی و بالا آمدن ارتفاع آب را در اتصالات یادشده نشان می‌دهد که افزایش سطح آب کاملاً قابل مشاهده است.

سرشاخه خیابان جانبازان

رواناب خیابان جانبازان که در عمیق‌ترین محدوده غربی بزرگراه کردستان و شرق خیابان کارگر واقع شده است. دبی ۱۰ ساله رواناب در این خیابان معادل ۲/۸۵ مترمکعب بر ثانیه شده است. نتایج به دست آمده از اجرای مدل برای مجرای بحرانی سرشاخه خیابان جانبازان در دوره بازگشت‌های دو، پنج و ۱۰ ساله نشان می‌دهد در اتصالاتی



شکل ۷. پروفیل سرشاخه خیابان جانبازان

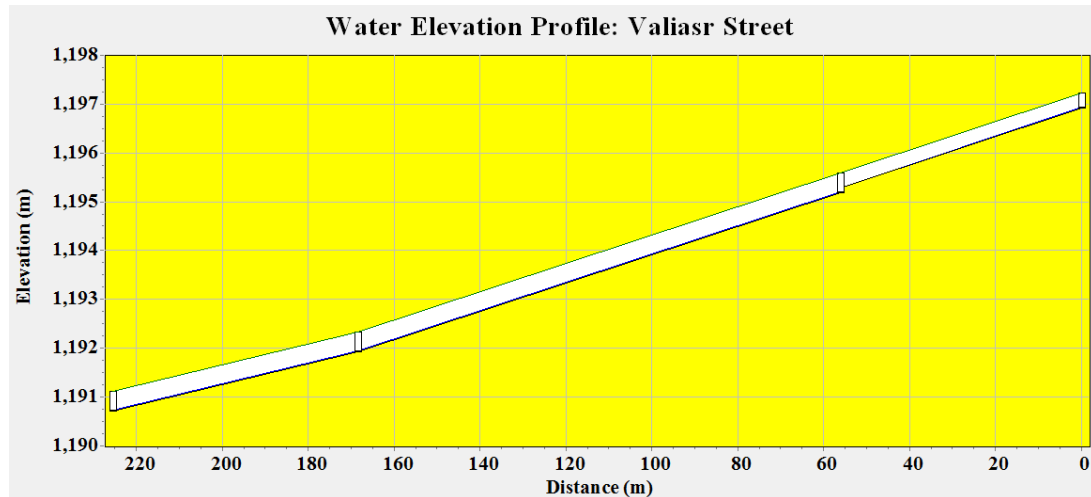
جدول ۷. مقادیر سیل زدگی اتصالات بحرانی سرشاخه خیابان جانبازان

دوره بازگشت دوساله			دوره بازگشت پنج ساله			دوره بازگشت ده ساله		
اتصالات	حداکثر دبی (m^3/s)	حداکثر عمق (m)	اتصالات	حداکثر دبی (m^3/s)	حداکثر عمق (m)	اتصالات	حداکثر دبی (m^3/s)	حداکثر عمق (m)
N ۴۹ - ۱۱	۱/۰۹۰	۰/۴۴	N ۴۹ - ۱۱	۱/۲۶۱	۰/۴۹	N ۴۹ - ۱۱	۱/۲۸۸	۰/۵۰
N ۴۹ - ۱۲	۰/۶۹۲	۰/۴۰	N ۴۹ - ۱۲	۰/۶۹۲	۰/۴۰	N ۴۹ - ۱۲	۰/۶۹۳	۰/۴۰
N ۴۹ - ۱۳	۰/۷۰۶	۰/۲۱	N ۴۹ - ۱۳	۰/۷۱۰	۰/۲۱	N ۴۹ - ۱۳	۰/۷۱۳	۰/۲۱
N ۴۹ - ۱۴	۰/۴۵۹	۰/۴۰	N ۴۹ - ۱۴	۰/۴۵۹	۰/۴۰	N ۴۹ - ۱۴	۰/۴۵۹	۰/۴۰
N ۴۹ - ۱۵	۰/۴۵۹	۰/۳۰	N ۴۹ - ۱۵	۰/۴۵۹	۰/۳۰	N ۴۹ - ۱۵	۰/۴۵۹	۰/۳۰
N ۴۹ - ۱۶	۰/۵۰۶	۰/۳۲	N ۴۹ - ۱۶	۰/۵۱۹	۰/۳۲	N ۴۹ - ۱۶	۰/۵۲۸	۰/۳۳
N ۴۹ - ۱۷	۰/۵۰۶	۰/۳۰	N ۴۹ - ۱۷	۰/۵۲۱	۰/۳۱	N ۴۹ - ۱۷	۰/۵۳۱	۰/۳۱
N ۴۹ - ۰۸	۰/۵۰۶	۰/۳۶	N ۴۹ - ۰۸	۰/۵۲۲	۰/۳۷	N ۴۹ - ۰۸	۰/۵۳۱	۰/۳۸

سرشاخه ولیعصر

در خیابان ولیعصر، تبادل آبی با منطقه ۳ شهرداری تهران سبب شده است که میزان ورودی رواناب در سیلاب ده ساله در جوی های دو طرف خیابان ولیعصر به حدود ۱/۱۷ مترمکعب بر ثانیه در جوی غربی برسد. نتایج اجرای مدل برای مجرای بحرانی خیابان ولیعصر در دوره بازگشت های دو، پنج و ۱۰ ساله نشان می دهد در اتصالاتی که در جدول ۸ آورده شده است، دچار سیل زدگی است. همچنین، میزان سیل زدگی در اتصالات یادشده و دبی حداکثر عبوری از آنها و ارتفاع آب در آنها نسبت به سایر اتصالات افزایش مشهودی داشته است. شکل ۸ پروفیل مجرای آب بحرانی، چگونگی سیل زدگی و

بالا آمدن ارتفاع آب را در اتصالات یادشده نشان می دهد که افزایش سطح آب کاملاً قابل مشاهده است. در مرحله نخست به نظر می رسد که ابعاد جوی های عریض موجود، جواب گوی این رواناب باشد، ولی با دقت در وضعیت جوی های یادشده دیده می شود که وجود درختان متعدد درون این جوی ها به اضافه وجود کف خاکی و یا سنگ چینی انجام شده برای زیباسازی منطقه، همچنین وجود پل های عرضی و در مواقعی وجود بریدگی جدول ها برای ورود رواناب جاری داخل خیابان ولیعصر به داخل جوی ها، ظرفیت این جوی ها را به شدت کاهش داده است. بنابراین، برای جمع آوری کل آب های سطحی مازاد بر ظرفیت دو جوی موجود، لازم است یک کانال جمع آوری جدید احداث شود.



شکل ۸. پروفیل سرشاخه خیابان فرصت

جدول ۸. مقادیر سیل‌زدگی اتصالات بحرانی خروجی خیابان ولیعصر

دوره بازگشت دوساله			دوره بازگشت پنج‌ساله			دوره بازگشت ده‌ساله		
اتصالات	حد اکثر دبی (m ³ /s)	حد اکثر عمق (m)	اتصالات	حد اکثر دبی (m ³ /s)	حد اکثر عمق (m)	اتصالات	حد اکثر دبی (m ³ /s)	حد اکثر عمق (m)
N ۷۳ - ۴۱	۰/۰۱۱	۰/۰۱	N ۷۳ - ۴۱	۰/۰۱۶	۰/۰۱	N ۷۳ - ۴۱	۰/۰۲۵	۰/۰۲
N ۷۳ - ۴۲	۰/۰۱۸	۰/۰۲	N ۷۳ - ۴۲	۰/۰۲۵	۰/۰۲	N ۷۳ - ۴۲	۰/۰۳۱	۰/۰۲
N ۷۳ - ۴۴	۰/۰۱۸	۰/۰۲	N ۷۳ - ۴۴	۰/۰۲۳	۰/۰۲	N ۷۳ - ۴۴	۰/۰۳۰	۰/۰۲
N ۷۳ - ۴۵	۰/۰۱۷	۰/۰۲	N ۷۳ - ۴۵	۰/۰۲۴	۰/۰۲	N ۷۳ - ۴۵	۰/۰۳۱	۰/۰۲
N ۷۳ - ۴۶	۰/۰۱۸	۰/۰۲	N ۷۳ - ۴۶	۰/۰۲۵	۰/۰۲	N ۷۳ - ۴۶	۰/۰۳۱	۰/۰۲

نتیجه‌گیری

تحلیل آب‌گرفتگی معابر شهری به کمک مدل‌سازی، گامی مؤثر برای مدیریت بهینه حمل‌ونقل شهری و کاهش خسارت‌های ناشی از تخریب تأسیسات و زیرساخت‌های مرتبط است. با توجه به پیچیدگی داده‌ها و اطلاعات مرتبط با پدیده آب‌گرفتگی معابر مانند توپوگرافی، هیدرولوژی، ساختمان‌ها و نظایر آن، به‌کارگیری مدل‌های استدلالی SWMM تخمینی مطمئن و کارآمد در محیط‌های شهری با حوضه‌های نسبتاً کوچک است. افزایش شهرنشینی در دهه‌های اخیر و رشد سریع شهرها به سمت حوضه‌های آبخیز بالادست، فرایندهای بارش-رواناب را در مناطق شهری به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است. به همین دلیل، برای نشان دادن این فرایندها، در طراحی‌های مناسب یا ارزیابی سیستم‌های شبکه زهکشی شهری موجود به مدل‌های رایانه‌ای توجه خاصی شده است. در پژوهش حاضر از مدل

EPA - SWMM برای شبیه‌سازی کمی سیلاب ناشی از بارندگی برای منطقه ۶ شهرداری تهران استفاده شد. شبیه‌سازی برای رگبارهای شش‌ساعته با دوره بازگشت‌های دو، پنج و ۱۰ ساله و برای مدت ۱۲ ساعت انجام پذیرفت. نتایج شبیه‌سازی بیان می‌کند که برخی قسمت‌های شبکه که شامل تعدادی از گره‌ها و مجاری منتهی به مسیرهای بحرانی است، نشان داد به دلیل حجم زیاد جریان در برخی نواحی منطقه ۶ تهران، توانایی عبور رواناب در شرایط موجود را ندارد، که علت اصلی آب‌گرفتگی‌ها، کوچک‌بودن سطح مقطع مجاری آبرو و نیز شیب کم در برخی از مجاری است. از طرفی، نتایج بررسی‌ها نشان داد گره‌هایی که نزدیک خروجی حوضه واقع شده‌اند، حجم رواناب بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند، بنابراین باید استحکام بیشتری داشته باشند. همچنین، پیوندهایی که در نزدیکی خروجی حوضه قرار گرفته‌اند به دلیل حجم زیاد رواناب در آنها، باید نسبت

- [5]. A. Shahbazi, S. Khalighi Sigarodi, A. Malekian AS. Sensitivity analysis of input parameters of SWMM model to urban runoff management (Case study: Mahdasht town). *Watershed Manag Res.* 2017;30(1):67-75.
- [6]. Li Q, Wang F, Yu Y, Huang Z, Li M, Guan Y. Comprehensive performance evaluation of LID practices for the sponge city construction: A case study in Guangxi, China. *J Environ Manage.* 2019;231:10-20.
- [7]. Xing W, Li P, Cao S, Gan L, Liu F, Zuo J. Layout effects and optimization of runoff storage and filtration facilities based on SWMM simulation in a demonstration area. *Water Sci Eng.* 2016;9(2):115-24.
- [8]. Zhang K, Chui TFM, Yang Y. Simulating the hydrological performance of low impact development in shallow groundwater via a modified SWMM. *J Hydrol.* 2018;566:313-31.
- [9]. Kong F, Ban Y, Yin H, James P, Dronova I. Modeling stormwater management at the city district level in response to changes in land use and low impact development. *Environ Model Softw.* 2017;95:132-42.
- [10]. Wang M, Sun Y, Sweetapple C. Optimization of storage tank locations in an urban stormwater drainage system using a two-stage approach. *J Environ Manage.* 2017;204:31-8.
- [11]. Babaei S, Ghazavi R, Erfanian M. Urban flood simulation and prioritization of critical urban sub-catchments using SWMM model and PROMETHEE II approach. *Phys Chem Earth, Parts A/B/C.* 2018;
- [12]. Beck NG, Conley G, Kanner L, Mathias M. An urban runoff model designed to inform stormwater management decisions. *J Environ Manage.* 2017;193:257-69.
- [13]. Cipolla SS, Maglionico M, Stojkov I. A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM. *Ecol Eng.* 2016;95:876-87.
- [14]. Jiang L, Chen Y, Wang H. Urban flood simulation based on the SWMM model. *Proc Int Assoc Hydrol Sci.* 2015;368:186-91.
- [15]. Sun N, Hall M, Hong B, Zhang L. Impact of SWMM catchment discretization: case study in Syracuse, New York. *J Hydrol Eng.* 2012;19(1):223-34.
- [16]. Bhaskar J, Suribabu CR. Estimation of surface run-off for urban area using integrated remote sensing and GIS approach. *Jordan J Civ Eng.* 2014;8(1):70-80.

قطر و ابعاد طراحی شده متناسب با دبی موجود در آنها باشد تا هنگام بارش و بروز سیلاب، ظرفیت انتقال رواناب به وجود آمده را داشته باشند. خروجی‌های به دست آمده از مدل نشان داد بیشتر زیرحوضه‌هایی که در مسیر زهکش اصلی شهر قرار گرفته‌اند، حجم رواناب زیادی دارند. در پژوهش حاضر به منظور اعتبارسنجی مدل از آمار پنج واقعه بارندگی ۱۳۹۶/۹/۱۰، ۱۳۹۶/۱۰/۳، ۱۳۹۶/۱۰/۱۸، ۱۳۹۶/۱۱/۱۵، ۱۳۹۶/۱۲/۱۶ استفاده شده و سرعت رواناب محاسبه شد. نتایج کالیبراسیون مدل نشان داد شبیه‌سازی دبی در منطقه مطالعه شده انطباق خوبی با مقادیر مؤلفه‌های جریان مشاهداتی دارد، به طوری که مقدار ضریب ناش (NS) برای بارندگی‌ها به ترتیب ۰/۸۸، ۰/۷۱، ۰/۸۹، ۰/۷۴ و ۰/۷۷ است که توانایی زیاد مدل SWMM برای پیش‌بینی را نشان می‌دهد و می‌توان از این مدل برای طرح مدیریت رواناب شهری و طراحی شبکه زهکشی رواناب شهری منطقه مطالعه شده استفاده کرد. در ضمن، مشخص شد علت آب‌گرفتگی در بعضی کانال‌ها و مجاری، نبود ظرفیت کافی مجاری است. همچنین، در بعضی کانال‌ها با وجود ظرفیت کافی کانال که مدل نیز آن را تأیید می‌کند، آب‌گرفتگی وجود دارد، دلیل آن هم مربوط به انباشت زباله در این کانال‌هاست. با توجه به نتایج یاد شده می‌توان از این مدل در طراحی‌های مناسب و ارزیابی سیستم‌های شبکه زهکشی شهری استفاده کرد.

منابع

- [1]. Chen J, Hill AA, Urbano LD. A GIS-based model for urban flood inundation. *J Hydrol.* 2009;373(1-2):184-92.
- [2]. Yao L, Chen L, Wei W, Sun R. Potential reduction in urban runoff by green spaces in Beijing: A scenario analysis. *Urban For Urban Green.* 2015;14(2):300-8.
- [3]. H. Ahmadzadeh, R. Saeidabadi EN. A Study and Zoning of the Areas Prone to Flooding with an Emphasis on Urban Floods (Case Study: City of Maku). *Hydrogeomorphology.* 2018;1(2):1-24.
- [4]. Badieizade, S. A. BaHrehmand AD. Calibration and Evaluation of the Hydrologic Hydraulic Model SWMM to Simulate Runoff (Case Study: Gorgan). *J Watershed Manag Res.* 2016;7(14):155-70.

- [17]. Hong X, Guo S, Zhou Y, Xiong L. Uncertainties in assessing hydrological drought using streamflow drought index for the upper Yangtze River basin. *Stoch Environ Res risk Assess.* 2015;29(4):1235–47.
- [18]. J. Mozaffari MK. Investigation of qualitative and quantitative management at urban flood with EPA SWMM model; Case study District 22 of Tehran. *Iran Soc Irrig Water Eng.* 2017;7(27).
- [19]. M. Moradi SD. Approach for appraising spatial risks in urban drainage systems using stormwater management model. *Watershed Eng Manag.* 2017;9(3):276–91.
- [20]. F. Einloo, A. Salajegheh AM and MA. Evaluation of urbanization effect on runoff volume by using Stormwater Management Model (Case Study: Zanjan City Watershed). *Iran-Watershed Manag Sci Eng.* 2016;10(33):46–37.
- [21]. S. Badiezadeh AB, A.A. Dehghani and NN. Urban flood management by simulation of surface runoff using SWMM model in Gorgan city, Golestan Province Iran. *J Water Soil Conserv.* 2015;22(4):1–10.
- [22]. Sin J, Jun C, Zhu JH, Yoo C. Evaluation of flood runoff reduction effect of LID (Low Impact Development) based on the decrease in CN: case studies from Gimcheon Pyeonghwa district, Korea. *Procedia Eng.* 2014;70:1531–8.