

مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۶۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۱۳

ص ۴۸۷-۴۹۸

واسنجی و ارزیابی مدل SWMM به منظور شبیه‌سازی رواناب شهری (مطالعه موردی: شهرک امام علی^(ع) شهر مشهد)

- ❖ شهرام خلیقی سیگارودی*؛ استادیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج
- ❖ محمد رستمی خلج؛ دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج
- ❖ محمد مهدوی؛ استاد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج
- ❖ علی سلاجقه؛ استاد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

چکیده

از مشخصه‌های مناطق شهری سطوح نفوذناپذیر وسیع و وجود آبراه‌های ساخته دست بشر است. افزایش شهرنشینی در دهه‌های اخیر و رشد سریع شهرها به سمت حوضه‌های آبخیز بالادست، فرایندهای بارش- رواناب را در حوضه‌های شهری به شدت تحت تأثیر قرار داده است. به همین دلیل، برای نشان‌دادن این فرایندها، در طراحی‌های مناسب یا ارزیابی سیستم‌های شبکه زه‌کشی شهری موجود به مدل‌های رایانه‌ای توجه خاصی شده است. هدف از این مطالعه ارزیابی کارایی مدل SWMM در شبیه‌سازی حجم رواناب در حوضه‌های کوچک شهری است. پارامترهای مورد نیاز مدل با استفاده از نقشه کاربری اراضی، DEM منطقه و بازدیدهای میدانی محاسبه شد. برای واسنجی و ارزیابی مدل رواناب متناظر با سه واقعه بارندگی در خروجی حوضه اندازه‌گیری شد و با رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل مقایسه شد. نتایج نشان داد که سازگاری خوبی بین دبی و عمق رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود دارد. فقط در سرعت رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای اختلاف کمی وجود دارد، اما این اختلاف بیشتر از حد قابل قبول آن (ضریب ناش < 0.5) است؛ به طوری که مقدار ضریب ناش (NS) برای واقعه اول، دوم و سوم به ترتیب ۰.۶۹، ۰.۸۵ و ۰.۵۲ است. این موضوع نشان‌دهنده کارایی مدل SWMM در منطقه مورد مطالعه است و می‌توان از این مدل در طراحی‌های مناسب و ارزیابی سیستم‌های شبکه زه‌کشی شهری استفاده کرد.

واژگان کلیدی: ارزیابی، رواناب شهری، شبکه زه‌کشی شهری، مدل SWMM، واسنجی.

۱. مقدمه

شهرسازی عموماً با افزایش سطوح نفوذناپذیر مثل جاده‌ها و پشت‌بام‌ها، ساخت سیستم‌های هیدرولیکی زه‌کشی رواناب‌های ناشی از رگبارها، کوبیدگی خاک و تغییر شکل در پوشش گیاهی منطقه همراه است. همچنین، به آلودگی منابع آب ناشی از رسوبات معلق، فلزات سنگین، هیدروکربن‌ها، مواد غذایی و مواد بیماری‌زا منجر می‌شود [۳، ۹]. پیچیدگی‌های محیط‌های شهری و زیرساخت‌های زه‌کشی حوضه‌های شهری تأثیری بالقوه در رواناب طبیعی دارد [۴]. آب‌گرفتگی در مناطق شهری، در نتیجه ایجاد نقص یا هر نوع ناکارآمدی در سیستم‌های زه‌کشی شهری، موجب وارد آمدن خسارات زیادی به ساختمان‌ها و دیگر زیرساخت‌های عمومی و خصوصی می‌شود. گذشته از این، آب‌گرفتگی خیابان‌ها می‌تواند موجب گندشدن یا توقف کامل سیستم‌های ترافیکی شود؛ همچنین پیامدهای غیرمستقیم به همراه خواهد داشت، از جمله قطع روابط و فرصت‌های تجاری [۲۰].

از این رو، محققان در طول سال‌های اخیر سعی کرده‌اند بین بارش و رواناب ناشی از آن رابطه دقیق‌تری برقرار نمایند. مدل‌های هیدرولوژیکی مختلف در این راه کمک‌های شایان توجهی کرده‌اند و مدل SWMM یکی از مدل‌هایی است که در این زمینه دقت قابل قبولی دارد [۱۸، ۲۷]. آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا مدل SWMM را برای شبیه‌سازی کمی و کیفی پدیده‌های مرتبط با سیلاب‌روهای مختلط و پیچیده طی سال‌های ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۱ تهیه کرد. این مدل تا کنون چندین بار بازنویسی و بهنگام شده است.

مدل SWMM یک مدل دینامیک شبیه‌سازی بارش رواناب است و می‌تواند برای یک واقعه یا به صورت مداوم کیفیت و کمیّت رواناب را برای مناطق شهری شبیه‌سازی کند. همچنین، این مدل این قابلیت را دارد تا با سایر مدل‌ها ترکیب شود و در حوضه‌های کوچک نتایج قابل قبولی ارائه دهد [۸]. طی چند سال اخیر، محققان در مناطق مطالعاتی گوناگون از توانایی‌های آن بهره گرفته‌اند. در مطالعه‌ای از مدل SWMM برای طراحی سیستم زه‌کشی زیرزمینی شهری (منهول) استفاده شد. با اینکه گمان می‌رود SWMM معمولاً ابزاری برای تحلیل سیستم زه‌کشی سطحی است، می‌توان از آن برای تحلیل و طراحی سیستم زه‌کشی زیرزمینی نیز استفاده کرد. همچنین، نشان داد که پارامترهای مدل SWMM چگونه می‌تواند برای به‌کار بستن نفوذ و جریان‌های درونی به‌خوبی جریان‌های پایه سیستم زه‌کشی زیرزمینی تنظیم شود [۲۱].

در تحقیقی برای بالابردن سطح خدمات شهری در شهر هالیپاجا در کشور لتونی یک مدل ریاضی طرح‌ریزی و اجرا شد. در این مدل برای تعیین مدل مناسب به دو عامل توجه شد: ۱. مدلی که بتواند در زمان کوتاه (زمان تعیین شده در طرح) امکان طراحی و اجرا داشته باشد؛ ۲. فراهم کردن ابزاری برای طراحی و اجرا به منظور استفاده‌های بعدی. برای رسیدن به این هدف از نرم‌افزار InfoWork CS برای مدل‌سازی و ارزیابی استفاده شد. همچنین، این نرم‌افزار با مدل SWMM مقایسه شد. در نهایت، با مقایسه نتایج پیش‌بینی شده دو مدل، مدل SWMM تأیید شد [۱۴]. همچنین، از مدل SWMM برای مدیریت رواناب شهری در قبل و بعد از توسعه شهر

پیچیدگی در محیط شهری و کمبود داده‌های توپوگرافی و هیدرولوژیکی دقیق مورد نیاز باعث شده امکان اندازه‌گیری همه کمیت‌های مورد نیاز برای بررسی واکنش حوضه میسر نباشد. بنابراین، کاربرد مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار و با استفاده از حداقل اطلاعات ورودی مورد نیاز رواناب متناظر با بارندگی را شبیه‌سازی کند امری ضروری است. بنابراین، هدف از این مطالعه واسنجی و ارزیابی کارایی مدل SWMM برای شبیه‌سازی حجم رواناب در شهرک امام علی(ع) شهر مشهد است.

روش‌شناسی تحقیق

منطقه مورد مطالعه

شهر مشهد در شمال شرق ایران با مساحت ۲۰۴ کیلومتر مربع و در حوضه آبریز کشف‌رود بین رشته‌کوه‌های بینالود و هزارمسجد واقع شده است. ارتفاع شهر مشهد از سطح دریا ۹۸۵ متر است. میزان نزولات جوئی در سطح دشت مشهد متوسط ۲۵۰ میلی‌متر در سال گزارش شده است. حداکثر درجه حرارت در تابستان ۳۵ درجه سانتی‌گراد بالای صفر و کمترین آن در زمستان ۱۵ درجه سانتی‌گراد زیر صفر است. شهرک امام علی(ع) در منطقه دو ناحیه شش شهرداری مشهد، با وسعت ۸۲٫۳ هکتار، بین مختصات جغرافیایی $36^{\circ}22'20''$ تا $36^{\circ}23'12''$ درجه عرض شمالی و $48^{\circ}26'38''$ تا $48^{\circ}27'21''$ درجه طول شرقی و در شمال شرق شهر مشهد واقع شده است (شکل ۱).

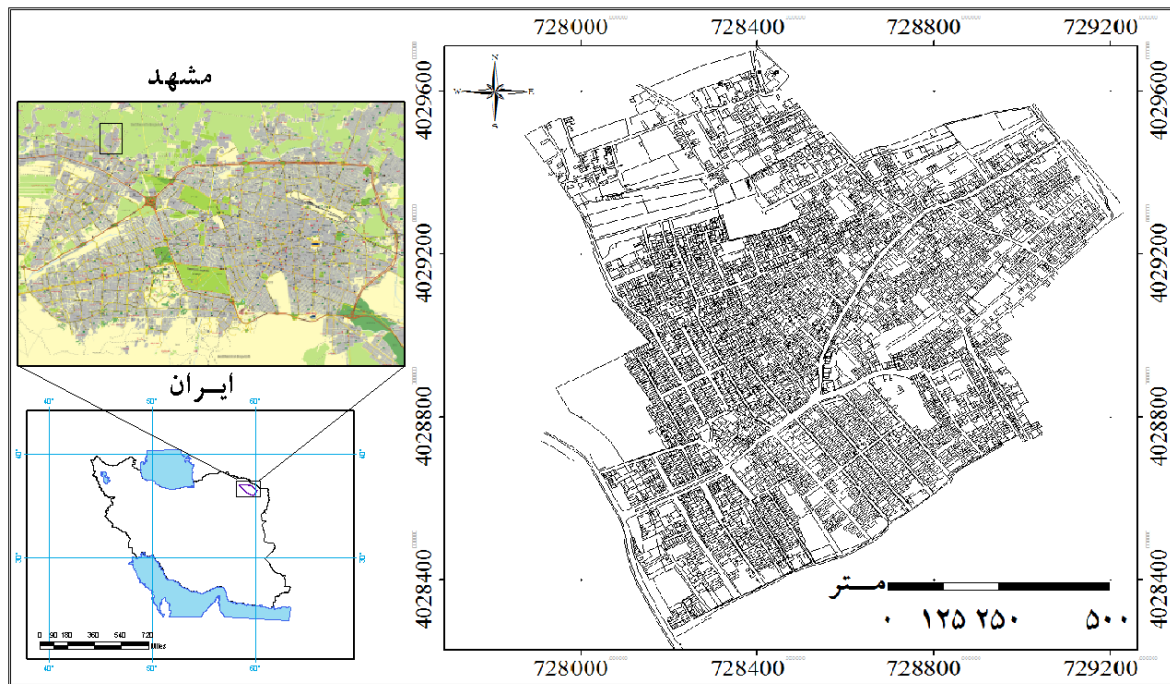
برای بستن مرز حوضه از نقشه کاربری اراضی منطقه- که آن را سازمان نقشه‌برداری با مقیاس ۱:۲۰۰۰ در سال ۱۳۸۵ تهیه کرد- استفاده شد. در نهایت، منطقه مورد مطالعه به ۶۱ زیرحوضه کوچک‌تر تقسیم شد.

می‌توان استفاده کرد. نتایج مطالعه‌ای در چهار منطقه در کره نشان داد که این مدل می‌تواند خطاهایی از قبیل دبی اوج کوچک‌تر و زمان تا اوج طولانی‌تر برای شرایط بعد از توسعه را برطرف کند و آثار هیدرولوژیکی توسعه شهری را به‌خوبی ارزیابی کند [۱۳].

در مطالعه‌ای در مرکز شهر تاریخی شیراز در جنوب غرب ایران به تحلیل عدم قطعیت عمق آب در منهول‌های مهم خطوط لوله‌های سیستم‌های زه‌کشی پرداخته شد و از مدل SWMM برای شبیه‌سازی فرایند بارش رواناب و روندیابی جریان در مجاری آب استفاده شد. همچنین، شبیه‌ساز Monte-Carlo و روش L.H.S برای آنالیز عدم قطعیت به‌کار گرفته شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ضریب عمق آب در منهول‌های متعددی از ۱۲ درصد تا ۶۶ درصد متغیر است. همچنین، پارامترهای مربوط به زیرحوضه‌ها و بارندگی بیشترین تأثیر را در دبی پیک سیل و عدم قطعیت آن دارد [۲۲].

برای شبیه‌سازی بارش و رواناب در حوضه شهری Macau در کشور کره از مدل SWMM و GIS استفاده شد [۶]. نتایج نشان داد که استفاده از GIS در به‌دست‌آوردن برخی از پارامترهای مهم مدل SWMM بسیار مفید است و مدل SWMM وقتی که پارامترهای کافی در دسترس باشد انعطاف‌پذیری درخور ملاحظه‌ای دارد.

از مدل SWMM برای مدیریت رواناب شهری به منظور کاهش خطرات آب‌گرفتگی در شهر ماهدشت استفاده شد و، پس از آنالیز حساسیت، مدل واسنجی و ارزیابی شد [۲۳]. همچنین، در این مطالعه میزان زمان تمرکز منطقه با استفاده از روش‌های تجربی مختلف برآورد شد. نتایج نشان‌دهنده کارایی مدل SWMM در منطقه مورد مطالعه بود.



شکل ۱. محدوده منطقه مورد مطالعه

نفوذناپذیر و نفوذپذیر در هر زیرحوضه از مقادیر توصیه شده توسط راهنمای نرم افزار برای کاربری های مختلف استفاده شد. برای مناطق نفوذپذیر، SWMM یکی از مدل های نفوذ پیشنهادی هورتن، گرین-آمیت اصلاح شده و روش حفاظت خاک آمریکا را به کار می برد.

روش حفاظت خاک آمریکا برای تعیین افت در مناطقی که ایستگاه هیدرومتری ندارد پیشنهاد می شود [۲]؛ از این روش در این مطالعه برای تعیین مقادیر نفوذ استفاده شد.

مشخصات اتصالات و محل ورود رواناب هر زیرحوضه به سیستم زه کشی رواناب از طریق بازدید میدانی تعیین شد و مشخصات فیزیوگرافی اتصالات با استفاده از نرم افزار Arc Map محاسبه شد؛ این مشخصات عبارت اند از: رقوم کف، طول و عرض جغرافیایی و حداکثر عمق اتصال. خصوصیات

محاسبه پارامترهای مورد نیاز مدل SWMM

برای محاسبه پارامترهای مورد نیاز مدل از نقشه کاربری اراضی نقاط ارتفاعی با دقت پنج متر استخراج شد و با استفاده از نرم افزار ArcMap، DEM منطقه تهیه شد و مساحت، شیب و طبقات ارتفاعی محاسبه شد. با توجه به راهنمای مدل، برای محاسبه عرض معادل (Width) از عرض مستطیل معادل استفاده شد. ضریب زبری مانینگ کلیه عوامل مؤثر در مقاومت بستر و کانال را در مقابل جریان خود مستتر دارد. استفاده از جدول های کمکی عملی ترین روش برآورد مقدار n است [۱۰]. نمونه ای از این جدول ها همراه با توضیحات لازم در راهنمای مدل موجود است. برای برآورد ضریب زبری جریان روی سطوح نفوذپذیر، نفوذناپذیر و کانال ها استفاده شد. برای تعیین مقادیر ارتفاع ذخیره در مناطق

مدل استفاده کردند و در مطالعه‌ای [۱۲] مدل را برای دوره بازگشت‌های مختلف اجرا کردند و فقط با یک واقعه مدل را ارزیابی کردند. در مطالعه حاضر فقط از سه واقعه نمونه برداری شد که از دو مورد برای واسنجی و یک مورد برای ارزیابی مدل استفاده شد.

برای واسنجی مدل هشت پارامتر مهم انتخاب شد (جدول ۱). در بین این عوامل شیب، عرض معادل و درصد مناطق نفوذناپذیر با استفاده از GIS محاسبه می‌شود. از آنجا که واسنجی مدل با توجه به پارامترهای متعدد و تعداد زیاد زیرحوضه‌ها کاری سخت و زمان‌بر است، برای یک واسنجی دقیق و مناسب باید پارامترها را به حداقل رساند [۷]. در این مطالعه پارامترهای مهم انتخاب و در واسنجی از آن‌ها استفاده شد و با توجه به همگن بودن منطقه مورد مطالعه، برای به‌حداقل رساندن زمان واسنجی و بالا بردن دقت مقادیر سایر پارامترها برای همه زیرحوضه‌ها به مقدار یکسان در نظر گرفته شد و به مقدار اولیه به میزان ثابت افزوده یا کاسته شد. از این روش به طور گسترده برای واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود [۲۵]. میزان صحت فرایند واسنجی با استفاده از ضریب ناش ساتکیف (NS) محاسبه شد. ضریب ناش ساتکیف از طریق رابطه ۱ به دست می‌آید:

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

در اینجا Q_{sim} و Q_{obs} دبی شبیه‌سازی شده و دبی مشاهداتی در زمان t_i ، Q_{av} برابر میانگین دبی مشاهداتی، و n تعداد داده‌هاست.

مجاری- از قبیل طول آبرو، ضریب زبری، شکل مقطع، عرض کف و سطح مقطع- از طریق بازدید میدانی برداشت شد. در برخی مناطق شهری برای کنترل رواناب سطحی به حفر چاه اقدام می‌شود تا از این طریق بخشی از رواناب سطحی از چرخه سیستم زه‌کشی خارج و به داخل چاه هدایت شود. در منطقه مورد مطالعه ۵۲ حلقه چاه حفر شد و موقعیت آن‌ها مشخص است. ورودی چاه‌ها به شکل دایره با قطر ۲۰ سانتی‌متر است که برای وارد کردن مشخصات آن‌ها در مدل از ابزار روزنه استفاده شد.

اطلاعات بارش و رواناب اندازه‌گیری شده

از آنجا که برآورد رواناب در مدل SWMM و سایر مدل‌های جمع‌آوری رواناب شهری بر اساس مقادیر بارش است، این اطلاعات از مهم‌ترین و اساسی‌ترین اطلاعات مورد استفاده مدل‌اند. در این مطالعه از سه واقعه بارندگی برای ارزیابی و واسنجی مدل در تاریخ‌های ۱۳۸۹/۱۱/۱۹، ۱۳۹۰/۱/۶ و ۱۳۹۰/۱/۲۳ استفاده شد و رواناب متناظر با این رگبارها در کانال خروجی حوضه هر نیم ساعت یک بار با اندازه‌گیری ارتفاع رواناب و سرعت رواناب به صورت میدانی اندازه‌گیری شد. مقدار بارندگی این سه واقعه از کاغذهای باران‌نگار ایستگاه هواشناسی مشهد استخراج شد.

واسنجی مدل

نمونه برداری از رواناب شهری به دلیل پیش‌بینی ناپذیر بودن رگبارها و همچنین عدم استفاده از دستگاه‌های ثبات سخت و پرهزینه است؛ به طوری که محققان [۶] از دو واقعه برای ارزیابی و واسنجی

نقطه نام 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 هر چه این ضریب کوچک‌تر باشد، تفاوت داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده کمتر و دقت پیش‌بینی مدل بیشتر خواهد بود.

حجم رواناب

با توجه به اینکه حجم رواناب سطحی معادل سطح زیر منحنی هیدروگراف منهای آب پایه است [۱۷]، در این مطالعه از روش دوزنقه‌ای سطح زیر منحنی هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به دست آمد. از آنجا که منطقه مورد مطالعه کوچک است، در خروجی حوضه، در زمانی که بارندگی رخ نداده، آب پایه مشاهده نشد. به همین دلیل، محاسبات آب پایه حذف شد.

نتایج

برای اجرای اولیه مدل مقادیر برخی از پارامترهای ورودی برآورد می‌شود که پس از واسنجی مدل، با توجه به مقیاس درصد تغییرات، که از منابع موجود استخراج شده است، مقادیر بهینه برای ورودی‌های مدل به دست می‌آید. جدول ۱ مقادیر بهینه شده و مقیاس درصد تغییرات برای هشت متغیر ورودی مؤثر در مدل در فرایند واسنجی را نشان می‌دهد.

مقدار NS می‌تواند مثبت یا منفی باشد. بهترین حالت زمانی است که مقدار آن برابر یک باشد. در صورتی که مقدار NS مثبت باشد، نشان‌دهنده آن است که داده‌های شبیه‌سازی شده بهتر از میانگین داده‌های مشاهداتی است و در صورتی که منفی باشد، نشان می‌دهد که خروجی مدل با ماهیت سیستم متناظر نیست [۱، ۲۴]. پایین‌ترین مقدار قابل قبول NS، ۰/۵ است و هرچه مقدار NS نزدیک به یک باشد نشان‌دهنده بالابودن دقت شبیه‌سازی است [۱۹].

ارزیابی مدل

برای بررسی اینکه بین هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در مدل چه مقدار انطباق وجود دارد از روابط ریاضی استفاده می‌شود. رایج‌ترین روابط ریاضی که در اکثر مطالعات هیدرولوژی شهری از آن‌ها استفاده می‌شود عوامل ضریب ناش ساتکیف و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) است [۶].

ارزیابی مدل بر پایه بررسی کمی میزان خطای برآورد رواناب در یک واقعه مشاهداتی (غیر از وقایع مورد استفاده در مرحله واسنجی) با استفاده از مجذور میانگین مربعات خطا انجام شد.

مجذور میانگین مربعات خطا یا RMSE از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2} \quad (2)$$

که در آن n تعداد نقاط مشاهده‌ای، Q_{sim} مقدار برآوردی بر نقطه نام و Q_{av} مقدار مشاهده‌ای برای

جدول ۱. مقادیر اولیه و پارامترهای مهم برای واسنجی مدل

عوامل	مقادیر اولیه	مقیاس تغییرات	مقادیر ایتیمم
درصد مناطق نفوذناپذیر	-	*±۳۰	-
شیب (%)	-	*±۳۰	-
عرض معادل (متر)	-	*±۳۰	-
N-نفوذناپذیر	۰٫۰۱۳	#۰٫۰۱۱-۰٫۰۳۳	۰٫۰۱۸
N-نفوذپذیر	۰٫۰۵	*#۰٫۰۲-۰٫۰۸	۰٫۲
ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر (mm)	۱٫۷۷۸	#۰٫۳-۲٫۵	۲
ارتفاع ذخیره مناطق نفوذپذیر (mm)	۳٫۸۱	*#۲٫۵-۵٫۱	۴٫۱
درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی	۱۶	#۵-۲۰	۱۸

[11] #; [25]* = منبع [26]

نتایج واسنجی مدل SWMM

در این مطالعه از دو واقعه- که در تاریخ‌های ۱۳۸۹/۱۱/۱۹ (واقعه اول) و ۱۳۹۰/۱/۲۳ (واقعه سوم) اتفاق افتاده- برای واسنجی مدل استفاده شد. برای تجزیه و تحلیل نتایج از عوامل معیار Nash

استفاده شد. اگر در فرایند واسنجی مقدار معیار Nash بیشتر از ۰٫۵ باشد، نشان‌دهنده آن است که فرایند واسنجی از دقت کافی برخوردار و نتایج در حد معنی‌داری قابل قبول است [۱۵]. جدول ۲ نتایج آماری حاصل از فرایند واسنجی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. نتایج واسنجی مدل SWMM در خروجی حوضه

واقعه	فاکتور	NS	RMSE
واقعه اول	دبی	۰٫۹۴	۰٫۰۰۱۸
	عمق	۰٫۹۰	۰٫۰۱۲
	سرعت	۰٫۶۹	۰٫۱۰۶
واقعه سوم	دبی	۰٫۹۲	۰٫۰۰۰۴۴
	عمق	۰٫۸۶	۰٫۰۰۷۹
	سرعت	۰٫۵۲	۰٫۰۶۴۹

نتایج ارزیابی مدل

از واقعه ۱۳۹۰/۱/۶ (واقعه دوم) برای ارزیابی مدل استفاده شد و برای تجزیه و تحلیل نتایج از ضریب ناش و مجذور میانگین مربعات خطا استفاده شد. جدول ۳ نتایج فرایند ارزیابی را نشان می‌دهد. نتایج محاسبه حجم رواناب نشان داد که حجم

رواناب مشاهده‌ای در هر سه واقعه بیشتر از حجم رواناب شبیه‌سازی شده است، اما مقادیر دبی اوج مشاهده‌ای در وقایع اول و دوم از مقادیر شبیه‌سازی شده کمتر است و در واقعه سوم اختلاف زیادی ندارد؛ جدول ۴ نتایج محاسبه حجم رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳. نتایج ارزیابی مدل SWMM در خروجی حوضه برای واقعه دوم

واقعه	فاکتور	NS	RMSE
واقعه دوم	دبی	۰٫۸۴	۰٫۰۰۲۶
	عمق	۰٫۸۸	۰٫۰۱۴
	سرعت	۰٫۸۵	۰٫۰۸۲

جدول ۴. نتایج محاسبه حجم رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده

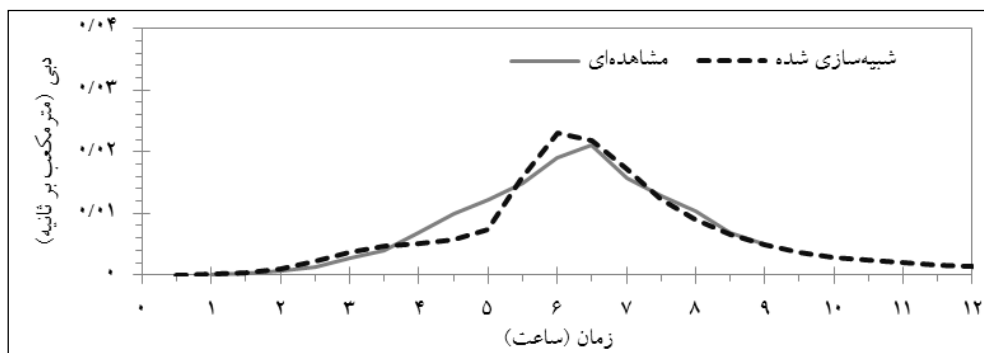
پارامتر	مشاهده‌ای		شبیه‌سازی شده		واقعه سوم
	واقعه اول	واقعه دوم	واقعه اول	واقعه دوم	
حجم رواناب (m^3)	۵۶۳٫۲۵	۲۶۷٫۲۷	۵۳۳٫۰۷	۲۳۶٫۱۵	۴۷٫۰۳
دبی اوج (m^3/s)	۰٫۰۲۲	۰٫۰۲۱۱	۰٫۰۲۴۱	۰٫۰۲۳	۰٫۰۵۳۷
زمان تا اوج (hr)	۶٫۵	۶	۴٫۵	۶	۱٫۵

استفاده شد نشان می‌دهد.

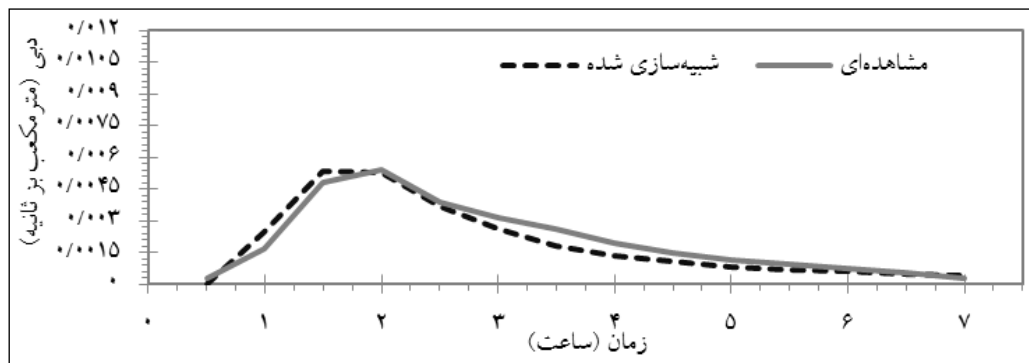
شکل‌های ۲، ۳ و ۴ هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده‌ای را که برای محاسبه حجم رواناب



شکل ۲. هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای واقعه اول



شکل ۳. هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای واقعه دوم



شکل ۴. هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای واقعه سوم

می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی حجم سیل با توجه به سناریوهای گسترش شهر استفاده کرد و از این مدل برای مدیریت بحران قبل از وقوع حادثه در منطقه مورد مطالعه بهره‌برداری و نتایج قابل قبولی به دست آورد. علاوه بر این، می‌توان از نتایج به دست آمده در فرایند واسنجی برای برآورد مقدار بهینه پارامترها استفاده کرد و در مناطق دیگر، که از لحاظ همگنی مشابه به منطقه مورد مطالعه‌اند، استفاده کرد؛ این نتایج با نتایج یک پژوهش [۵] مطابقت دارد. با توجه به قابلیت‌های مدل SWMM در برآورد رواناب و فراهم کردن خروجی در هر بخش از حوضه که نیاز است، می‌توان نتیجه گرفت که مدل SWMM انعطاف‌پذیری قابل قبولی برای ترکیب با مدل‌های دیگر دارد [۶] و از هیدروگراف جریان می‌توان در هر بخش به عنوان ورودی برای مدل‌های دیگر استفاده کرد [۱۶].

با توجه به مطالب ذکر شده، می‌توان از این مدل برای طرح‌های مدیریت رواناب شهری و طراحی شبکه زه‌کشی رواناب شهری در منطقه مورد مطالعه استفاده کرد؛ این نتیجه با یافته‌های برخی مطالعات [۱۸، ۲۷] مطابقت دارد. اما، باید به این نکته توجه کرد که معمولاً در مناطق شهری ایستگاه‌های ثبات،

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از واسنجی مدل نشان داد که شبیه‌سازی دبی و عمق رواناب در سه واقعه بررسی شده انطباق خوبی دارد؛ در حالی که در مورد سرعت رواناب بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای کمی اختلاف وجود دارد. اما، این اختلاف در حد قابل قبولی است و مقدار NS برای واقعه اول و سوم به ترتیب ۰٫۶۹ و ۰٫۵۲ و بیشتر از ۰٫۵ است. علت ضعیف بودن نتایج سرعت می‌تواند ناشی از زباله یا مواد زائدی باشد که در رواناب‌های شهری و داخل کانال‌های شهری وجود دارد؛ این مواد می‌تواند در نتایج اندازه‌گیری سرعت تأثیرگذار باشد. همچنین، نتایج ارزیابی مدل SWMM کارایی و دقت مدل را تأیید کرد و در هر سه متغیر ارزیابی شده (دبی، عمق رواناب و سرعت رواناب) مقدار NS بالاتر از ۰٫۵ اندازه‌گیری شد. همچنین، مقادیر RMSE برای دبی، سرعت و عمق رواناب در فرایند ارزیابی به ترتیب ۰٫۰۰۲۶ متر مکعب بر ثانیه، ۰٫۰۱۴ متر و ۰٫۰۸۲ متر بر ثانیه به دست آمد که نشان‌دهنده نتایج قابل قبول مدل است. نتایج بررسی حجم رواناب در منطقه مورد مطالعه برای سه واقعه بررسی شده نشان داد که حجم رواناب با دقت خوبی برآورد شده است. بنابراین،

دامنه بارندگی که به وقوع پیوست مورد تأیید نگارندگان این مطالعه باشد. بنابراین، از اظهارنظر درباره دقت مدل در شبیه‌سازی رواناب ناشی از بارندگی با شدت و مدت خارج از این محدوده صرف‌نظر می‌شود.

که بتوان از آن برای بررسی دقت مدل‌های مختلف در وقایع با شدت‌های مختلف استفاده کرد، موجود نیست. همچنین، باید توجه کرد که اندازه‌گیری دبی برای وقایع مختلف با شدت‌های متفاوت بسیار سخت و هزینه‌بر است. از این رو، باعث شد نتایج

References

- [1] Arabi, M., Govindaraju, R.S. and Hantush, M.M. (2007). A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practice, *Journal of Hydrology*, 333(2), 459-471.
- [2] Behbahani, S.M.R. (2010). *Surface water hydrology*, 2ed Edition, University of Tehran press.
- [3] Burton, J.G.A. and Pitt, R. (2001). *Stormwater Effects Handbook, A Tool Box for Watershed Managers, Scientists and Engineers*, CRC/Lewis Publishers Boca Raton Florida.
- [4] Chen, J., Hill, A.A. and Urbano, L.D. (2009). A GIS-based model for urban flood inundation, *Journal of Hydrology*, 373(1), 184-192.
- [5] Choi, K.S. and Ball, J.E. (2002). Parameter estimation for urban runoff modelling, *Urban Water*, 4(1), 31-41.
- [6] Dongquan, Z., Jining, C., Haozheng, W., Qingyuan, T., Shangbing, C. and Zheng, S. (2009). GIS-based urban rainfall-runoff modeling using an automatic catchment-discretization approach: a case study in Macau, *Environmental Earth Sciences*, 59(2), 465-472.
- [7] Du, J.K., Xie, S.P., Xu, Y.P., Xu, C.Y. and Singh, V.P. (2007). Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins, *Journal of Hydrology*, 336(3), 334-346.
- [8] Elliott, A.H. And Trowsdale, S.A. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage, *Environmental Modelling & Software*, 22(3), 394-405.
- [9] Hall, M.J. (1984). *Urban Hydrology*, Elsevier Applied Science Publications, Northern Ireland.
- [10] Hosseini, S.M. and Abrishami, J. (2001). *Open channels hydraulic*, 19ed Edition, University of Imam Reza press.
- [11] Huber, W.C. and Dickinson, R.E. (1992). Storm water management model user's manual, version 4, *Environmental Protection Agency*, Georgia.
- [12] Hsu, M.H., Chen, S.H. and Chang, T.J. (2000). Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system, *Journal of Hydrology*, 234(1), 21-37.
- [13] Janga, S., Chob, M., Yoonc, J., Yoond, Y., Kime, S., Kimf, G., King, L. and Aksoyh, H. (2007). Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment, *Desalination*, 212(1), 344-356.
- [14] Koudelak, P. and West, S. (2008). Sewerage network modeling in Latvia, use of InfoWork CS and Storm Water Management Model 5 in Liepaja city, *Water and Environment Journal*, 22(2), 81-87.
- [15] Lhomme, J., Bouvier, C. and Perrin, J.L. (2004). Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments, *Journal of Hydrology*, 299(3), 203-216.
- [16] Lin, S.S., Hsieh, S.H., Kuo, J.T., Liao, Y.P. and Chen, Y.C. (2006). Integrating legacy components into a software system for storm sewer simulation, *Environmental Modelling & Software*, 21(8), 1129-1140.
- [17] Mahdavi, M. (2008). *Applied hydrology*, 5ed Edition, Vol 2, University of Tehran press.
- [18] Phillips, B.C., Yu, S., Thompson, G.R. and Silva, N. (2005). 1D and 2D Modelling of urban drainage systems using XP-SWMM and TUFLOW, *10th International Conference on Urban Drainage*, 21-26 August, Copenhagen, Denmark, 8p.
- [19] Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R. and Hauck, L.M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources, *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1169-1188.

- [20] Schmitt, T.S., Thomas, M. and Ettrich, N. (2004). Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems, *Journal of Hydrology*, 299(3), 300-311.
- [21] Scott, A.L. (2010). Sanitary sewer design using EPA Storm Water Management Model (SWMM), *Computer Applications in Engineering Education*, 18(2), 203-212.
- [22] Sharifan, R.A., Roshan, A., Aflatoni, M., Jahedi, A. and Zolghadr, M. (2010). Uncertainty and sensitivity analysis of SWMM model in computation of manhole water depth and subcatchment peak flood, *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 2(6), 7739-7740.
- [23] Shahbazi, A. (2013). Urban runoff management to reduce risks using SWMM model: Case study: Mahdasht town, *MSc thesis*, University of Tehran. 144pp.
- [24] Sourisseau, S., Basser, A., Perie, F., and Caquet, T. (2008). Calibration, validation and sensitivity analysis of an ecosystem model applied to artificial streams, *Water Research*, 42(4), 1167-1181.
- [25] Temprano, J., Arango, O., Cagiao, J., Suarez, J. and Tejero, I. (2007). Storm water quality calibration by SWMM: a case study in Northern Spain, *Water SA*, 32(1), 55-63.
- [26] Tsihrintzis, V. and Hamid, R. (1998). Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM, *Hydrological Processes*, 12(2), 311-329.
- [27] Zoppou, C. (2001). Review of urban storm water models, *Environmental Modelling & Software*, 16(3), 195-231.