

## اثر توسعه شهری بر تولید رواناب با استفاده از مدل SWMM، مطالعه موردی: شهرستان ایذه، استان خوزستان

نسیم آرمان<sup>۱\*</sup>، علی شهبازی<sup>۲</sup>، محمد فرجی<sup>۳</sup> و سمیه دهداری<sup>۴</sup>  
<sup>۱،۳</sup> استادیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان و <sup>۲</sup> دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۲

### چکیده

سامانه‌های جمع‌آوری و کنترل آب‌های سطحی ناشی از بارندگی از اجزاء مهم برنامه‌ریزی و عمران مناطق شهری هستند و هر گونه سهل‌انگاری در طراحی صحیح آن‌ها می‌تواند برای جوامع شهری مشکل‌آفرین باشد. لذا به‌منظور پیش‌بینی عملکرد هیدرولیکی از کل سامانه، نیاز به استفاده از روش‌های محاسباتی پیشرفته و مدل‌سازی‌های جدید و کارآمدتر وجود دارد. کاهش پیامدهای زیان‌بار ناشی از سیلاب‌های شهری معمولاً با برآورد دقیق رواناب شهری و انتخاب روش مناسب کنترل آن محقق می‌شود، به این منظور، لازم است میزان رواناب شهری به درستی برآورد شود. بر این اساس، محققین در سال‌های اخیر به مدل‌سازی روی آورده‌اند. از جمله مدل‌های پر کاربرد در مدیریت رواناب مدل SWMM ابزاری قدرتمند برای محاسبات زهکشی شهری و مدیریت رواناب می‌باشد. هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی کارایی مدل بارش-رواناب SWMM در شبیه‌سازی رواناب سطحی در حوضه شهر ایذه می‌باشد. برای مشخص کردن بارندگی طرح، زمان تمرکز حوضه محاسبه و تداوم رگبار طرح برابر زمان تمرکز حوضه در نظر گرفته شد. همچنین، از سه معیار NAS، BIAS و RMSE برای بررسی صحت واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده شد. در نهایت پس از تأیید مدل، نقاط حساس به آب‌گرفتگی با دوره بازگشت‌های دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله تعیین شد. نتایج نشان داد، علت آب‌گرفتگی در بعضی از نقاط به‌دلیل نبود ظرفیت کافی آبگذرها است، در حالی‌که در سایر نقاط با وجود ظرفیت کافی برای عبور رواناب، آب‌گرفتگی مشاهده می‌شود که دلیل آن مربوط به احداث پل‌های نامناسب در مسیر کانال‌ها که سبب کاهش ابعاد آبگذر و اشغال گرفتگی در محل گره‌ها است. برای واسنجی و ارزیابی مدل‌ها از سه واقعه بارندگی در تاریخ‌های ۱۳۹۵/۱۲/۲۳، ۱۳۹۶/۰۱/۰۸ و ۱۳۹۶/۰۱/۱۷ استفاده شد. نتایج ارزیابی مدل SWMM نشان داد، انطباق خوبی بین دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود دارد. بنابراین، می‌توان از این مدل‌ها برای پیش‌بینی خطر آب‌گرفتگی، طراحی و برآورد مقدار و هزینه زهکشی، مدیریت حوضه‌های شهری و اولویت‌بندی مناطق برای رفع مشکل آب‌گرفتگی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: آب‌گرفتگی، اعتبارسنجی، تحلیل حساسیت، رواناب شهری، واسنجی

### مقدمه

نفوذ، پشت‌بام ساختمان‌ها، سطوح خیابان‌ها و امثال آن‌ها در شهرها همانند مانعی در برابر نفوذ آب باران به داخل خاک عمل می‌کنند و سبب می‌شوند که بخش

توسعه شهری و افزایش ساخت و سازها موجب تغییر پوشش سطحی شهرها شده، سطوح غیر قابل

کمیت رواناب را برای مناطق شهری شبیه‌سازی کند (Gironas و همکاران، ۲۰۱۰).

در دهه‌های اخیر مدل‌های هیدرولوژیکی به‌طور روز افزونی برای انجام کارهای تحقیقاتی مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بیشتر این مدل‌ها پیچیده‌اند و پارامترهای مختلفی را شامل می‌شوند. به‌علت تغییرپذیری بالای این پارامترها و محدودیت زمانی و اقتصادی، مقادیر دقیق بسیاری از این پارامترها به درستی شناخته شده نیست. علاوه بر این، اندازه‌گیری دقیق بسیاری از این پارامترها به‌طور مستقیم امکان‌پذیر نیست (Du، ۲۰۰۷). بنابراین، فرایند واسنجی به‌منظور برآورد مقادیر دقیق هر یک از این پارامترها، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است (Cibin، ۲۰۱۰). نمونه‌برداری از رواناب شهری به‌دلیل غیر قابل پیش‌بینی بودن رگبارها و همچنین، عدم استفاده از دستگاه‌های ثابت، کاری سخت و پرهزینه است.

در این حالت، تحلیل حساسیت به‌عنوان روشی اساسی در نظر گرفته می‌شود که به‌وسیله آن تأثیر پارامترهای ورودی به‌عنوان متغیر مستقل بر روی خروجی‌های مدل (متغیر وابسته) بررسی می‌شود (Saltelli و همکاران، ۲۰۰۰؛ Cibin و همکاران، ۲۰۱۰). در نتیجه، پارامترها حساس شناخته شده و تمرکز بر روی این پارامترها صورت می‌گیرد و بدین صورت با کاهش عدم قطعیت، دقت نتایج افزایش یافته، باعث صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌شود (Avrand، ۲۰۰۶).

طی مطالعه‌ای که به‌منظور تعیین حساسیت مدل SWMM انجام شده است، درصد مناطق نفوذناپذیر حساس‌ترین و موثرترین پارامتر در ایجاد سیلاب شهری معرفی شد (Shahbazi و همکاران، ۲۰۱۳).

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** منطقه مورد پژوهش با مساحت ۶۹ هکتار در شهرستان ایذه واقع شده است. بیشینه شیب منطقه در حدود هفت درصد و متوسط شیب منطقه در حدود ۲/۷ می‌باشد. کانال‌های موجود در منطقه از سه نوع مستطیلی رو باز، مستطیلی رو بسته و مثلثی است، هر چند غالب کانال‌ها از نوع مستطیلی رو باز است. مقدار متوسط بارندگی سالانه حدود ۶۲۰

بیشتری از بارندگی به رواناب سطحی تبدیل شوند. این امر باعث افزایش رواناب در شهرها شده که خود عاملی بر تشدید سیلاب و آب‌گرفتگی در شهرها می‌باشد. این مسئله در هنگام وقوع بارندگی‌های شدید، باعث سیلاب‌های شهری شده که در نوع خود در بسیاری از موارد می‌تواند مخرب و ویران‌کننده باشند. سیلاب‌های شهری هر ساله به‌خاطر افزایش سطوح غیر قابل نفوذ و ساخت و سازها، خسارات فراوان جانی و مالی برای ساکنان شهرها به ارمغان آورده است (Rashidi، Mehrabadi، ۲۰۱۲).

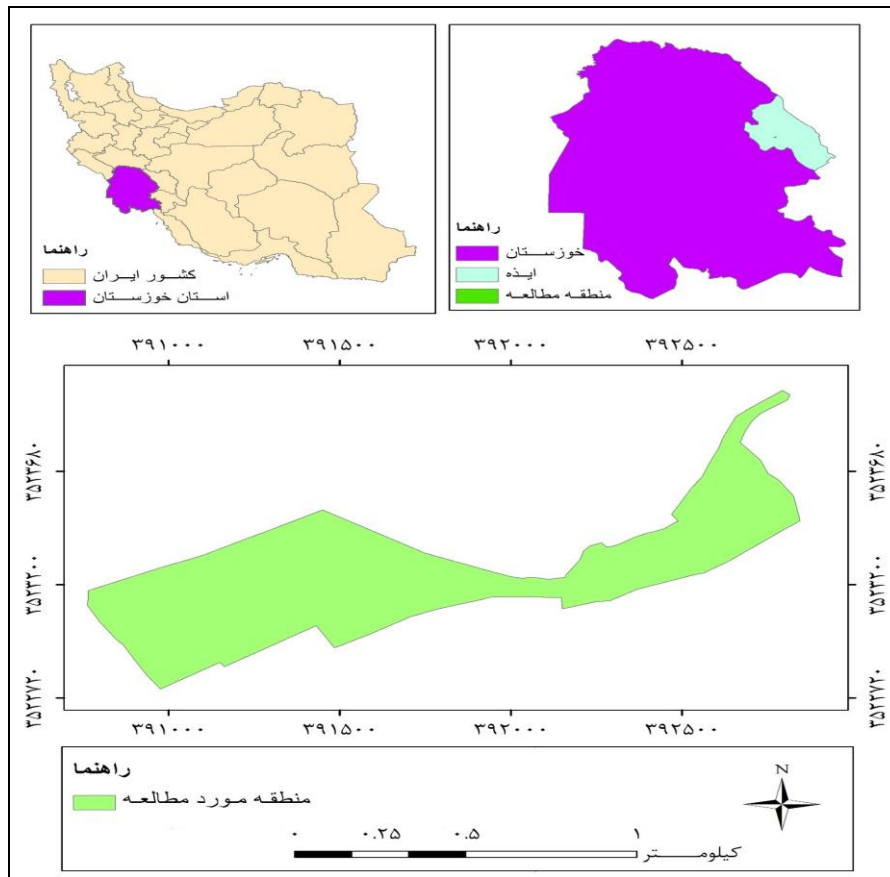
به‌منظور پیش‌بینی عملکرد هیدرولوژیکی از کل سامانه، نیاز به استفاده از روش‌های محاسباتی پیشرفته و مدل‌سازی‌های جدید و کارآمدتر وجود دارد. محققین در طول سال‌های اخیر سعی داشته‌اند که رابطه هر چه دقیق‌تری بین بارش و رواناب ناشی از آن برقرار کنند. در همین راستا، مدل‌های هیدرولوژیکی مختلفی ارائه شده است. مدل SWMM<sup>۱</sup> یکی از مدل‌هایی است که دقت قابل قبولی دارد و طی چند سال اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Badieezadeh، ۲۰۱۵؛ Shahbazi، ۲۰۱۳؛ Einloo، ۲۰۱۴).

طی مطالعه‌ای نتایج استفاده از مدل SWMM نشان داد، انطباق خوبی میان دبی، عمق و سرعت رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود دارد. بنابراین، می‌توان از مدل SWMM برای پیش‌بینی خطر آب‌گرفتگی، طراحی و برآورد مقدار و هزینه شبکه جمع‌آوری رواناب، مدیریت حوضه‌های شهری و اولویت‌بندی مناطق برای رفع مشکل آب‌گرفتگی استفاده کرد (Shahbazi، ۲۰۱۲). همچنین، نتایج پژوهشی دیگر حاکی از این بود، مدل SWMM قابلیت خوبی در تهیه و تولید نقشه‌های مربوط به رواناب خروجی از زیرحوضه‌های شهری را دارا می‌باشد (Veisi، Panah، ۲۰۱۳).

مدل SWMM یا مدل مدیریت رواناب سطحی یک مدل دینامیک شبیه‌سازی بارش-رواناب بوده، می‌تواند برای یک واقعه و یا به‌صورت مداوم کیفیت و

<sup>۱</sup> Storm Water Management Model

میلی‌متر می‌باشد. همچنین، کمترین و بیشترین طبقات ارتفاعی به ترتیب برابر ۸۲۲ و ۸۴۰ متر است.



شکل ۱- مشخصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

اطلاعات چاه‌ها (ارتفاع، شکل و پهنای دهانه ورودی) و در نهایت اطلاعات مربوط به خروجی‌هایی که شامل رقوم کف گرهِ خروجی می‌باشد، از طریق بازدیدهای میدانی انجام شده است. همچنین، اطلاعات مربوط به مساحت، محیط، شیب و طبقات ارتفاعی منطقه مورد مطالعه که در بخش‌های مختلفی از مدل استفاده شده، به وسیله نرم‌افزار GIS استخراج شده است.

برای مشخص کردن بارندگی طرح لازم است، در ابتدا زمان تمرکز مشخص شود، چرا که شدیدترین سیلاب از بارانی ناشی می‌شود که تداوم آن برابر زمان تمرکز حوضه باشد. به منظور محاسبه زمان تمرکز حوضه، از فرمول هیدروگراف استدلالی استفاده شد. Shahbazi و همکاران (۲۰۱۳) طی تحقیقی تحت عنوان "انتخاب بهترین فرمول تجربی برای برآورد زمان تمرکز در حوزه‌های آبخیز شهری" بیان داشتند، روش هیدروگراف استدلالی کمترین خطا را به منظور محاسبه زمان تمرکز دارد. شهر ماهدشت در شهرستان

روش تحقیق: به منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب از مدل SWMM استفاده شد. تعیین مرز حوضه و زیرحوضه‌ها با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۰۰۰، نقشه‌های شهری (شامل خیابان‌ها، بلوارها، فضای سبز و ...)، بازدیدهای میدانی و نیز با توجه به شیب و نحوه حرکت آب و خروجی مربوط به هر زیرحوضه انجام شده است. برای محاسبه عرض معادل از روش عرض مستطیل معادل استفاده شد. برای تعیین ضریب زبری جریان روی سطوح نفوذپذیر، نفوذناپذیر و آبگذرها و همچنین، تعیین ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر و نفوذپذیر، از راهنمای مدل و جداول کمکی استفاده شده است. به منظور تعیین میزان نفوذ، روش حفاظت خاک آمریکا<sup>۱</sup> (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)،

<sup>۱</sup> The US Soil Conservation Service (SCS)

بازگشت مختلف در زمان تمرکز محاسبه به‌عنوان ورودی به مدل تهیه شد.

در این مطالعه برای انجام تحلیل حساسیت متغیر-های ورودی مدل SWMM، از روش تحلیل حساسیت جزئی (مطلق) استفاده شد (Rostami Khalaj, ۲۰۱۱). از بین پارامترهای موجود طبق مطالعه پژوهشگران هشت پارامتر از قبیل، درصد مناطق نفوذناپذیر، شیب، عرض معادل، ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذناپذیر و نفوذناپذیر، ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر، ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر و درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی انتخاب شد. از بین نتایج مختلف این نرم‌افزار، دبی اوج سیلاب که مؤثرترین پارامتر برآورد سیلاب است، به‌عنوان متغیر وابسته برای بررسی میزان حساسیت انتخاب شد.

برای انجام تحلیل حساسیت، از بارش طراحی در دوره بازگشت ۲۵ سال استفاده شد (Rostami Khalaj, ۲۰۱۱؛ Ahmadian, ۲۰۱۲؛ Shahbazi, ۲۰۱۲). هر کدام از هشت پارامتر مطرح شده در تمام زیرحوضه‌ها به مقدار  $\pm 5$ ،  $\pm 10$  و  $\pm 15$  درصد از مقادیر اولیه کاهش و افزایش داده خواهد شد و با تغییر مقدار هر پارامتر، مدل اجرا و تأثیر آن‌ها بر دبی اوج سیلاب در محل اندازه‌گیری بررسی می‌شود.

کرج واقع است، شیب متوسط منطقه حدود ۳/۳ درصد و کانال‌های غالب منطقه به شکل مستطیلی روباز هستند.

$$T_C = M \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.66} \quad (1)$$

که در آن،  $T_C$  زمان تمرکز (دقیقه)،  $L$  طول آبراهه (متر یا فوت)،  $S$  شیب حوضه (متر بر متر یا فوت بر فوت) و  $M$  مقدار ثابت برابر ۰/۰۵۷ برای سامانه متریک و ۰/۰۲۶ برای سامانه انگلیسی است.

پس از محاسبه زمان تمرکز به‌منظور استخراج شدت بارش طرح در زمان و تداوم‌های مختلف از روش قهرمان استفاده شد.

$$P_T^f = (0.4055 + 0.2636 \ln(T - 0.4400)) (-0.2420 + 1.2452t^{0.2674}) p_{10}^{60} \quad (2)$$

$$p_{10}^{60} = 2.2598 X_1^{1.1374} X_2^{-0.3072} \quad (3)$$

که در آن‌ها،  $t$  دوام بارندگی (ساعت)،  $T$  دوره بازگشت (سال)،  $X_1$  متوسط بارندگی بیشینه روزانه (میلی‌متر) و  $X_2$  متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر) است.

در نهایت پس از تهیه منحنی شدت-مدت-فراوانی، مقدار بارش تجمعی محاسبه و با استفاده از روش بلوک متناوب هایتوگراف‌های رگبار در دوره

جدول ۱- مقادیر اولیه و دامنه تغییرات قابل قبول متغیرهای مدل SWMM

منبع	دامنه تغییرات مجاز	مقادیر اولیه	متغیر
Temprano و همکاران (۲۰۰۶)	$\pm 30$	-	درصد مناطق نفوذناپذیر
Temprano و همکاران (۲۰۰۶)	$\pm 30$	-	شیب (درصد)
Temprano و همکاران (۲۰۰۶)	$\pm 30$	-	عرض معادل (متر)
Huber و Dickinson (۱۹۹۲)	۰/۰۱۱-۰/۰۳۳	۰/۰۱۳	N- نفوذناپذیر
Huber و Dickinson (۱۹۹۲)	۰/۰۲-۰/۰۸	۰/۰۵	N- نفوذپذیر
Huber و Dickinson (۱۹۹۲)	۰/۳-۲/۵	۱/۷۷۸	ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر (mm)
Hamid و Tsihrintzis (۱۹۹۸)	۲/۵-۵/۱	۳/۸۱	ارتفاع ذخیره مناطق نفوذپذیر (mm)
Huber و Dickinson (۱۹۹۲)	۵-۲۰	۱۶	درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی

آن‌ها استفاده می‌شود، عوامل ضریب ناش ساتکیف (NS) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) می‌باشد (Nash, ۱۹۷۰؛ Dongquan و همکاران، ۲۰۰۹). در این مطالعه نیز از این سه معیار برای

در این مطالعه، تنها از سه واقعه نمونه‌برداری صورت گرفت که دو مورد برای واسنجی و یک مورد برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. از رایج‌ترین روابط ریاضی که در بیشتر مطالعات هیدرولوژی شهری از

طراحی صحیح و تامین ظرفیت کافی شبکه‌های جمع‌آوری و دفع آب‌های سطحی یک امر ضروری می‌باشد که این کار نیازمند شبیه‌سازی با استفاده از یک مدل مناسب می‌باشد. در میان روش‌های مختلف برآورد رواناب سطحی، مناسب‌ترین و متداول‌ترین روشی که در سیلاب شهری در بیشتر مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است، مدل SWMM است.

به‌منظور تعیین پارامترهای مدل SWMM مانند مساحت، محیط و تعیین مرز واحدهای هیدرولوژیک و شیب و ... از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. لازم به ذکر است، گسترش استفاده از GIS و اطلاعاتی چون نقشه کاربری اراضی، نقشه مناطق نفوذناپذیر، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، عکس‌های هوایی دیجیتالی، نقشه خطوط ارتفاعی و نقشه شبکه زهکشی سبب شده پارامترهای ورودی مورد نیاز مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی ساده‌تر و با دقت بیشتری فراهم شود (Seth و همکاران، ۲۰۰۶). پس از فراهم کردن اطلاعات مورد نیاز مدل SWMM برای اجرای مدل اطلاعات بارندگی نیاز خواهد بود. از آنجایی که شدیدترین سیلاب از بارانی ناشی می‌شود، که تداوم آن برابر زمان تمرکز حوضه آبخیز باشد، زمان تمرکز حوضه با استفاده از فرمول هیدروگراف استدلالی برابر ۳۵ دقیقه محاسبه و هایتوگراف بارندگی با تداوم ۳۵ دقیقه‌ای استخراج شد. در نهایت مدل با استفاده از هایتوگراف‌های تهیه شده برای دوره بازگشت‌های دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله اجرا شد. در ادامه برای تعیین روابط بین متغیرهای مدل با یکدیگر و همچنین، تعیین اولویت تأثیر پارامترها بر خروجی مدل، تحلیل حساسیت انجام شد. مطمئناً با آگاهی از روابط داخلی پارامترهای هر مدل، بهتر می‌توان ارتباط پارامترها را با یکدیگر درک کرد و حساسیت مدل را در نقاط مختلف مشخص و بدین ترتیب کاربرد مناسب‌تری از مدل به‌منظور کارایی هر چه بیشتر آن ارائه کرد (Kosari و همکاران، ۲۰۱۰).

با استفاده از نقشه کاربری اراضی و پیمایش میدانی منطقه مورد مطالعه به ۶۱ زیرحوضه تقسیم شد. برای شبیه‌سازی بارش-رواناب نیاز به یکسری اطلاعات (مساحت، عرض زیرحوضه، درصد مناطق نفوذناپذیر، شیب، ضریب زبری مانینگ، ذخیره

بررسی صحت واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده شد.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{av})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2} \quad (5)$$

$$BIAS\% = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \quad (6)$$

که در آن‌ها،  $Q_{sim}$  دبی شبیه‌سازی شده،  $Q_{obs}$  دبی مشاهداتی در زمان  $t_i$ ، میانگین دبی مشاهداتی و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار NS می‌تواند مثبت یا منفی باشد، بهترین حالت زمانی است که مقدار آن برابر یک است. در صورتی که مقدار NS مثبت باشد، نشان‌دهنده این است که داده‌های شبیه‌سازی شده بهتر از میانگین داده‌های مشاهداتی است و در صورتی که منفی باشد، نشان می‌دهد که خروجی مدل با ماهیت سامانه متناظر نیست (Sourisseau و همکاران، ۲۰۰۷). پایین‌ترین مقدار قابل قبول NS، ۰/۵ است و هرچه که مقدار NS نزدیک به یک باشد نشان‌دهنده بالا بودن دقت شبیه‌سازی است (Santhi و همکاران، ۲۰۰۱). همچنین، هر چه مقدار مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) کوچک‌تر باشد، تفاوت داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده کمتر بوده، دقت پیش‌بینی مدل بیشتر خواهد بود. BIAS% خطای کل در حجم جریان بوده، مقادیر مثبت و منفی این ضریب نشان‌دهنده بیشتر یا کمتر بودن متوسط حجم جریان شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل نسبت به جریان مشاهداتی است (Croke و همکاران ۲۰۰۵).

## نتایج و بحث

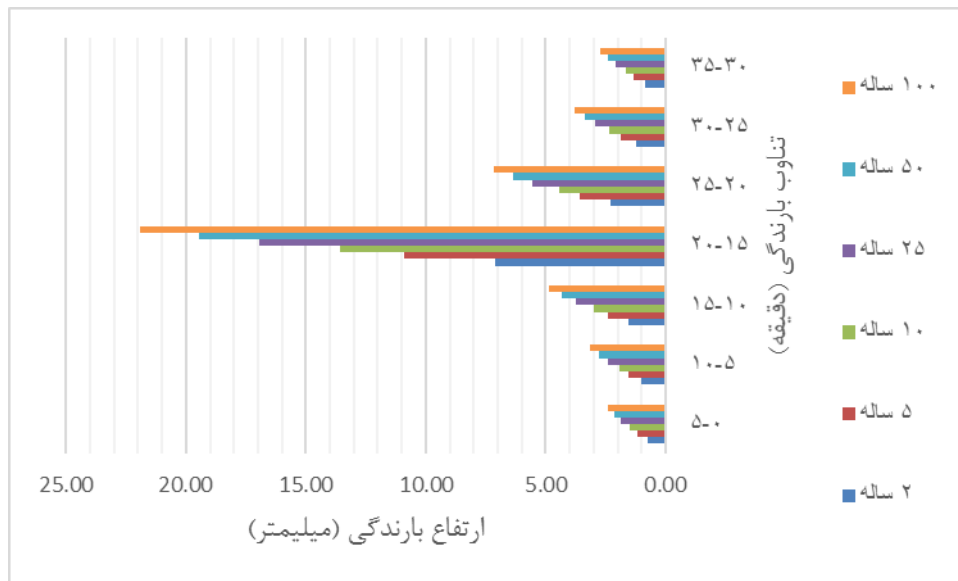
افزایش حجم و آبدی رواناب شهری خطر آب‌گرفتگی و غرقاب شدن معابر و اماکن عمومی و خصوصی را بیشتر می‌کند و جاری شدن باران در سطح اراضی شهری علاوه بر مشکلات تردد و ترافیک، مسئله آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی دریافت‌کننده رواناب شهر را مطرح می‌سازد.

چالایی) می‌باشد، برای تعیین آن‌ها از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شد. در منطقه مورد مطالعه ۹۷ کانال و ۹۸ گره وجود دارد که تمامی اطلاعات مربوط به آن‌ها از طریق بازدید میدانی حاصل شد. پس از تهیه اطلاعات مورد نیاز مدل، لازم بود تداوم بارندگی طرح تعیین شود که برای این کار لازم بود زمان تمرکز محاسبه شود چرا که زمان تداوم بارندگی برابر زمان تمرکز است. همان‌طور که بیان شد، برای محاسبه زمان تمرکز

از فرمول هیدروگراف استدلالی استفاده شد، با جاگذاری پارامترهای مورد نیاز فرمول مقدار زمان تمرکز برای منطقه مورد مطالعه ۳۵ دقیقه محاسبه شد. در ادامه منظور تهیه شدت بارش طرح از روش قهرمان استفاده شد که خروجی آن جدول ۲ می‌باشد. در ادامه به منظور استخراج هایتوگراف بارش طرح از روابط شدت-مدت-فراوانی استخراج شده از روش بلوک متناوب استفاده شد که در نهایت هایتوگراف‌های تهیه شده به صورت شکل ۲ می‌باشد.

جدول ۲- مقادیر شدت بارندگی (میلی‌متر در ساعت) در تداوم‌های مختلف در دوره‌های بازگشت دو تا ۱۰۰ سال برای ایستگاه ایزده

دوره بازگشت (سال)						زمان تداوم رگبار (دقیقه)
۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۰	۵	۲	
۲۶۳/۱۵	۲۳۳/۲۶	۲۰۳/۱۹	۱۶۲/۷۷	۱۳۱/۰۵	۸۵/۱۰	۵
۱۷۴/۶۳	۱۵۴/۸۰	۱۳۴/۸۴	۱۰۸/۰۱	۸۶/۹۷	۵۶/۴۷	۱۰
۱۳۵/۸۵	۱۲۰/۴۲	۱۰۴/۸۹	۸۴/۰۳	۶۷/۶۶	۴۳/۹۳	۱۵
۱۱۳/۲۳	۱۰۰/۳۷	۸۷/۴۳	۷۰/۰۳	۵۶/۳۹	۳۶/۶۲	۲۰
۹۸/۱۱	۸۶/۹۷	۷۵/۷۶	۶۰/۶۹	۴۸/۸۶	۳۱/۷۳	۲۵
۸۷/۱۸	۷۷/۲۸	۶۷/۳۱	۵۳/۹۲	۴۳/۴۲	۲۸/۱۹	۳۰
۷۸/۸۳	۹۹/۸۷	۶۰/۸۷	۴۸/۷۶	۳۹/۲۶	۲۵/۴۹	۳۵



شکل ۲- هایتوگراف رگبار طراحی با تداوم ۳۵ دقیقه برای دوره بازگشت‌های مختلف

پس از تهیه تمامی اطلاعات مورد نیاز، مدل اجرا شد. نتایج حاصل از انجام تحلیل حساسیت در شکل ۳ نشان داده شده است، لازم به ذکر است، میزان تغییرات دبی برای دو پارامتر ضریب زبری مانینگ در

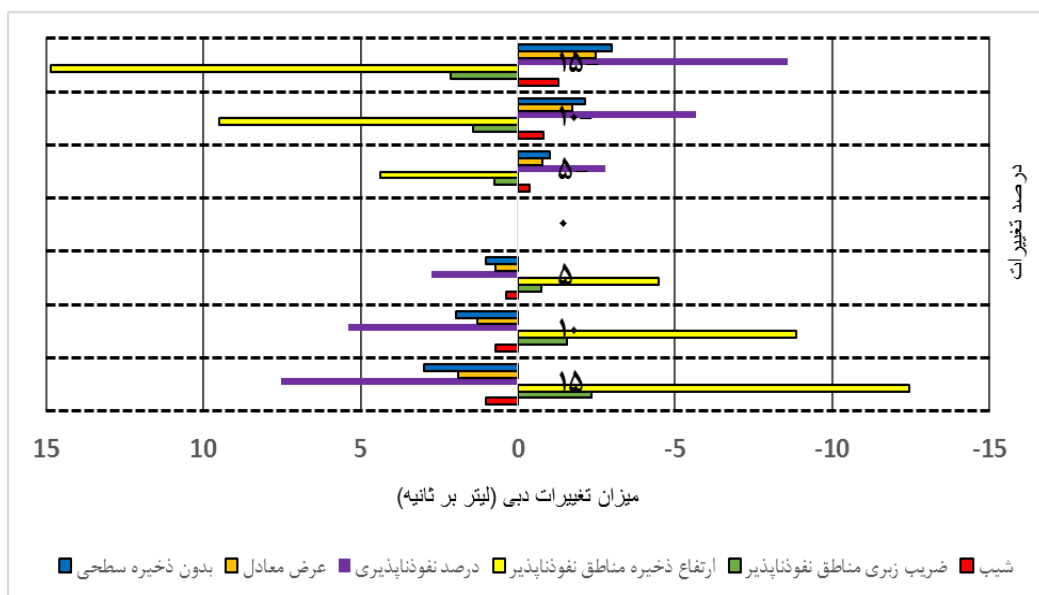
مناطق نفوذپذیر و ارتفاع ذخیره در مناطق نفوذپذیر برابر صفر است.

همان‌طور که از روی شکل‌ها مشخص است، پارامترها از حساس‌ترین تا کم حساس‌ترین به ترتیب شامل ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر، درصد اراضی

قرار گرفت. با توجه به بررسی‌های انجام شده یکی از دلایل آن این است که اکثر زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه به لحاظ پیشرفت و توسعه فیزیکی شهر به حد اشباع خود رسیده بودند و با افزایش میزان درصد اراضی نفوذپذیری به‌منظور بررسی میزان تاثیر آن بر دبی خروجی، تغییرات کمی در آن‌ها رخ می‌داد. به‌عنوان مثال اگر میزان درصد اراضی نفوذپذیر ۹۰ درصد بود، با افزایش پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد میزان آن از ۱۰۰ می‌گذشت، ولی در زمان وارد کردن داده‌ها بیشترین عددی که می‌شود وارد کرد ۱۰۰ است.

نفوذناپذیر، درصد مناطق بدون ذخیره سطحی، ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذناپذیر، عرض معادل، شیب زیرحوضه و ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذپذیر و ارتفاع ذخیره مناطق نفوذپذیر است که با یافته‌های (Fallah Tafti, ۲۰۰۵)، (Dalir, ۲۰۰۹)، (Ahmadian, ۲۰۱۲)، (Shahbazi, ۲۰۱۲) و (Einloo, ۲۰۱۴) مطابقت دارد.

در بیشتر تحقیقات درصد اراضی نفوذناپذیر حساس‌ترین پارامتر به شمار می‌آید، ولی در تحقیق حاضر این پارامتر به لحاظ حساسیت در جایگاه دوم



شکل ۳- تحلیل حساسیت پارامترهای مهم استفاده شده در مدل SWMM

SWMM برای شبیه‌سازی رواناب شهری است و می‌توان از این مدل برای طرح‌های مدیریت رواناب شهری و طراحی شبکه زهکشی رواناب شهری در منطقه مورد مطالعه استفاده کرد. این امر با یافته‌های Phillips و همکاران (۲۰۰۵)، Zoppou (۲۰۰۱)، Rostami (۲۰۱۱)، (Shahbazi, ۲۰۱۲) و (Einloo, ۲۰۱۴) مطابقت دارد. با توجه به قابلیت‌های مدل SWMM در برآورد رواناب و فراهم کردن خروجی در بخش‌های مختلف هیدرولوژیکی همچون دبی، سرعت، ارتفاع جریان و ... در هر بخش از زیرحوضه‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که مدل SWMM انعطاف‌پذیری قابل قبولی برای ترکیب با مدل‌های دیگر را دارد (Dongquan و همکاران، ۲۰۰۹؛ Shahbazi, ۲۰۱۲؛ Moafi Rabri, ۲۰۱۲) و از هیدروگراف جریان در هر

از آن‌جایی 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 کمینه رساند (Du و همکاران، ۲۰۰۷). به همین دلیل، برای واسنجی مدل از بین هشت پارامتری که برای تحلیل حساسیت مورد استفاده قرار گرفته بودند، به‌ترتیب پارامترهایی را که بیشترین حساسیت را داشتند، برای واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج حاصل از واسنجی مدل نشان داد که شبیه‌سازی دبی در دو واقعه استفاده شده، برای واسنجی مدل انطباق خوبی با مقادیر مشاهده‌ای دارد و مقدار NS (ناش‌ساتکلیف) برای دو واقعه بیشتر از ۰/۷۵ می‌باشد. این نشان‌دهنده دقت مورد نیاز مدل

مقدار BIAS برابر با ۱/۸۵ اندازه گیری شد. نتایج آماری حاصل از فرایند واسنجی مدل SWMM در جدول ۳ و نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل در جدول ۴ ارائه شده است.

بخش به عنوان ورودی برای مدل های دیگر استفاده نمود (Lin و همکاران، ۲۰۰۶). نتایج ارزیابی مدل SWMM، کارایی و دقت مدل را تایید کرد که مقدار NS بالاتر از ۰/۷۵، مقدار RMSE برابر با ۰/۰۲۵ و

جدول ۳- نتایج واسنجی مدل SWMM

وقایع	NS	BIAS	RMSE
واقعه اول (۱۳۹۵/۱۲/۲۳)	۰/۷۵	۱۰/۵	۰/۰۰۷
واقعه دوم (۱۳۹۶/۰۱/۰۸)	۰/۸۹	۰/۰۷۲	۰/۰۰۱۵

جدول ۴- نتایج اعتبارسنجی مدل SWMM

وقایع	NS	BIAS	RMSE
واقعه سوم (۱۳۹۶/۰۱/۱۷)	۰/۸۳	۱/۸۵	۰/۰۰۲۵

تا بررسی های لازم جهت امکان بازگردانی و حفظ جریان و شرایط مشابه قبل از توسعه در حوزه آبخیز شهری برای مدیریت یکپارچه رواناب شهری حاصل شود (Einloo, ۲۰۱۴). از آنجایی که استفاده از سطوح نفوذناپذیر در مناطق شهری غیر قابل اجتناب است، می توان با اقداماتی چون کاهش پارکینگ ها اختصاصی و احداث پارکینگ های گروهی، جلوگیری از احداث پیاده روها و جاده های بسیار عریض و غیر اصولی به خصوص در محدوده مناطق مسکونی، تشویق به استفاده بیشتر از مصالح نفوذپذیر و هدایت رواناب به سمت سطوح قابل نفوذ، مساحت نفوذناپذیری را به حداقل کاهش رساند و در مقابل رواناب کمتر و آب بیشتر و با کیفیت تری را به همراه داشت.

در نهایت می توان چنین بیان داشت که افزایش سطوح نفوذناپذیر در اراضی شهری و به تبع آن کاهش ذخیره و گیرش باران و رواناب امری غیر قابل انکار است. با توسعه شهری پوشش گیاهی جابه جا می شود و گاه از بین می رود و سطوح، سنگفرش و آسفالت و کانال های رودخانه ای تغییر می کنند. سنگفرش کردن عمل نفوذ آب به زمین را متوقف می کند. در نتیجه فرایند توسعه شهری با کاهش سطوح نفوذپذیر، تغییر قابل توجهی در هیدرولوژی حوزه آبخیز ایجاد می کند که نتیجه آن وقوع سیلاب های شدید تا کم است. از این رو، مدیریت صحیح و علمی رواناب شهری، یک اقدام مهم و ضروری در راه رسیدن به توسعه پایدار می باشد. بنابراین، بسیار مهم است که اثرات توسعه شهری حوزه آبخیز بر تولید رواناب، کمی سازی شود

#### منابع مورد استفاده

- Ahmadian, M. 2012. Investigation of urban runoff by SWMM model to flood hazard increase in Hashtgerd. MSc Thesis, Azad University, 150 pages (in Persian).
- Avrand, R., H. Turabipodh and A. Frzayy. 2006. Sensitivity analysis of HEC-1 model input parameters. 7th International Conference on River Engineering, University of Chamran, Ahvaz, 12 pages.
- Badieezadeh, S., A.R. Bahremand, A.D. Dehghani and N. Noura. 2015. Urban flood management by simulation of surface runoff using SWMM model in Gorgan City, Golestan Province. IranWater and Soil Conservation Research Journal, 24(4): 1-16 (in Persian).
- Cibin, R., K.P. Sudheer and I. Chaubey. 2010. Sensitivity and identify ability of stream flow generation parameters of the SWAT model. Journal of Hydrological Processes, 24: 1133-1148.
- Dalir, A. 2009. Simulation of waste water operation by Arc view and MIKE SWMM in Mashhad. MSc Thesis, Ferdowsi University, 195 pages (in Persian).



6. Dongquan, Z., C. Jining, W. Haozheng, T. Qingyuan, C. Shangbing and S. Zheng. 2009. GIS-based urban rainfall-runoff modeling using an automatic catchment-discretization approach, case study in Macau. *Environmental Earth Sciences*, 59: 465–472.
7. Du, J.K., S.P. Xie, Y.P. Xu, C.Y. Xu and V.P. Singh. 2007. Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins. *Journal of Hydrology*, 306: 334–346.
8. Einloo, F. 2014. Effect of land use change and urban development on runoff generation, case study: Zanjan City. MSc Thesis, University of Tehran, 180 pages (in Persian).
9. Fallah Tafti, A. 2005. Simulation of the drainage network of runoff runoffs in Mashhad water and power area using the integrated model of MIKE SWMM and GIS. MSc Thesis, Ferdowsi University (in Persian).
10. Gironas, J., L.A. Roesner, L.A. Rossman and J. Davis. 2010. A new app locations manual for the Storm Water Management Model (SWMM). *Environmental Modelling and Software*, 25: 813-814.
11. Kosari, M.R., S.N. Mohammad Ali, M. Tazeh and M.R. Frozeh. 2010. Sensitivity analysis of four relationships estimation of the concentration time in watersheds. *Quarterly Journal of Scientific Research of Boom*, 1(1): 11-1 (in Persian).
12. Moafi Rabri, A. 2012. Optimal design of flood degradation dimensions based on characteristics of the upper watershed, case study of west flood transformation Tehran. MSc Thesis, Faculty of Natural Resources, University of Tehran (in Persian).
13. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting though conceptual models. Part 1-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282-290, Technical Report, 2005/19.
14. Phillips, B.C., S. Yu, G.R. Thompson and N. Silva. 2005. 1D and 2D modelling of urban drainage systems using XP-SWMM and TUFLOW. 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen, Denmark, 21-26 August, 8 pages.
15. Rashidi Mehrabadi, M.H. 2012. Rainwater harvesting in residential areas. Jahad University Press (in Persian).
16. Rostami, M. 2011. Urban risk deterioration by using hydrological and hydraulic models, case study: District 2 of Mashhad Municipality. MSc Thesis, University of Tehran, 127 pages (in Persian).
17. Rostami Khalaj, M. 2011. Urban flood hazard zoning by hydrological and hydraulic models in Mashhad. MSc Thesis, Tehran University, 134 pages (in Persian).
18. Saltelli A., E.M. Scott, K. Chan and S. Marian. 2000. *Global sensitivity analysis*. John Wiley and Sons, 305 pages.
19. Santhi, C., J.G. Arnold, J.R. Williams, W.A. Dugas, R. Srinivasan and L.M. Hauck. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37: 1169–1188.
20. Shahbazi, A. 2012. Urban storm water management to reduce hazard using SWMM, case study: Mahdasht City. MSc Thesis, University of Tehran, 150 pages (in Persian).
21. Shahbazi, A., Sh. khalighi Sigarodi, A. Malekian and A. Salajegh. 2013. Sensitivity analysis of input parameters of SWMM model to urban runoff management, case study: Mahdasht Town. *Journal of Research and Development*, 3: 1-14.
22. Sourisseau, S.A., S.F. Basser and T. Perie. 2007. Calibration, validation and sensitivity analysis of an ecosystem model applied to artificial streams. *Water Research*, 42(4-5): 1167-1181.
23. Zoppou, C. 2001. Review of urban storm water models. *Environmental Modelling and Software*, 16: 195–231.
24. Veisi Panah, M., M.J. Barati and F. Falahati. 2013. Efficiency of SWMM model in runoff map output of Marivan urban watershed. *Flood Management National Conference*.