

شبیه‌سازی رواناب سطحی شهری و اولویت‌بندی روش‌های توسعه کم‌اثر با استفاده از مدل SWMM (مطالعه موردی: شهر نیشابور)

اسماعیل حصاری^۱، علی محمد آخوندعلی^{۲*}، محمدامین مداح^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران (e-hesari@stu.scu.ac.ir)

۲. استاد، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(* - نویسنده مسئول: (aliakh@scu.ac.ir)

۳. استادیار، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(ma.maddah@scu.ac.ir)

چکیده

اخیرا تغییر خصوصیات هیدرولوژیک و پاسخ حوضه شهری نسبت به بارش و سیلاب‌ها از نظر کمی و کیفی در زندگی بشر و منابع مشهودتر شده است. جلوگیری از اتلاف این هرزآب‌ها و به تبع آن جبران کمبود منابع آبی، گامی موثر در این خصوص است. در این مطالعه با شبیه‌سازی بارش-رواناب در SWMM، پاسخ هیدرولوژیکی حوضه آبریز شهری نیشابور به رواناب تولیدی با اعمال روش‌های توسعه کم‌اثر تحت شش سناریوی مختلف بررسی شد. اطلاعات هیدرومتری به صورت میدانی برداشت، و در نقطه خروجی به روش جسم شناور دبی متناظر پنج رخداد بارش محاسبه گردید. نتایج آنالیز حساسیت مدل نشان داد که درصد نواحی نفوذناپذیر موثرترین پارامتر بر دبی اوج رواناب است. ارزیابی آماره‌ها (نش-ساتکلیف، مجذور میانگین مربع خطا، درصد بایاس و ضریب تعیین) در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی گواه بر عملکرد خوب (دبی پیک و زمان دبی پیک) مدل بود. در مجموع ارزیابی پیاده‌سازی سناریوهای: ماند بیولوژیکی، سنگ فرش نفوذپذیر، ترانشه نفوذ، جوی باغچه و تلفیق کلیه سناریوها موجب کاهش رواناب تولیدی به ترتیب به میزان ۸/۵۱، ۹/۵۸، ۱۵/۷۹، ۱۰/۲۵ و ۴۵/۴۳ درصد شد. در نهایت، در دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ سال بهینه‌ترین عملکرد به ترتیب در سناریوهای تلفیق سناریوها، ترانشه نفوذ، جوی باغچه، سنگ فرش نفوذپذیر و ماند بیولوژیکی صورت گرفته است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که پیاده‌سازی راهکارهای توسعه کم‌اثر همراه با شبکه زهکش سنتی شهر در مدل SWMM تخمین خوبی را در جهت بررسی عملکرد و شیوه‌های اجرایی سناریوهای مختلف در اختیار متخصصین و مدیران شهری قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت، بارش-رواناب، حوضه آبریز شهری، LID.

۱. مقدمه

در ارتباط با تشدید خشکسالی های متناوب، پراکنش زمانی و مکانی بارش و بحران برداشت بی رویه آبهای زیرزمینی در سطح کشور، یافتن راه حلی برای جبران کسری بیابان عرضه و تقاضای آب به خصوص در جوامع شهری لازم و ضروری است (Ahmadzadeh *et al.*, 2015). تغییر در خصوصیات هیدرولوژیکی و پاسخ حوضه نسبت به بارش در مناطق شهری غالباً به دلیل توسعه غیر اصولی شهرها سیر صعودی به خود گرفته است. به عبارتی افزایش سطوح نفوذناپذیر باعث کاهش نفوذ آب، کاهش زمان تمرکز حوضه و افزایش پیک و حجم جریان می شود که باعث بروز اثرات منفی سیلاب های شهری از نظر کمی و کیفی و در نتیجه احتمال وقوع خسارات مالی و جانی را در پی دارد (Hassani *et al.*, 2023).

یکی از مهم ترین چالش های پیشروی متخصصین، تغییر نگرش های مدیریت سنتی رواناب شهرها، یعنی از دیدگاه خروج سریع رواناب از شهر به نقطه نظر استفاده از رواناب به عنوان یک منبع با ارزش و چگونگی انتخاب و ترکیب بهینه اقدامات نوین در مدیریت سیلاب است (Karamouz *et al.*, 2014)؛ به طوری که علاوه بر کنترل کمی و کیفی سیلاب با ایجاد رویکردی نوین تغییر چرخه هیدرولوژیک قبل و بعد از توسعه شهری را به حداقل برساند و تلاشی در جهت احیای شرایط طبیعی پیش از توسعه شهری باشد. به مجموعه عملیات مذکور اصطلاحاً روش های توسعه کم اثر^۱ (LID) گفته می شود (Rossman, 2009). مفهوم LID شامل ارائه رویکردی جدید و محیط زیستی جهت کاهش هزینه های مدیریت سیلاب شهری مبتنی بر حفظ رواناب در مبدأ با اهداف: (۱) کاهش پیک و حجم رواناب، (۲) حفظ و خلق مناظر طبیعی، (۳) کاهش سطوح نفوذناپذیر، (۴) افزایش ذخیره آب، (۵) کاهش اختلال در شبکه زهکشی و (۶) ایجاد فرصتی جهت نفوذ می باشد (Panahi *et al.*, 2018). ضرورت استمرار پژوهش مرتبط با کارایی و انتخاب روش های LID در مدیریت سیلاب های شهری اخیراً مشهودتر است. (Mao *et al.*, 2017) در شهر فوشان چین به بررسی مزایای زیست محیطی بهترین راهکارهای مدیریتی در کنترل رواناب پرداختند. ایشان بیان داشتند که با ترکیب این راهکارها در کل منطقه حجم جریان بیش از ۴۰ درصد و تمام بارهای آلاینده بیش از ۶۰ درصد کاهش یافت. در تحقیقی توسط Recanatesi *et al.* (2017) در بخشی از شهر رم در ایتالیا به ارزیابی سناریوهای مختلف به منظور مدیریت رواناب پرداختند. نتایج بیانگر کارایی استفاده از روش های LID بود. در نتیجه مطالعه دیگر، Randall *et al.* (2019) با استفاده از LID در شهر پکن چین در دوره بازگشت بارندگی ۳۵ ساله، نشان دادند که با اجرای ۳۰ درصد بام سبز، ۱۰ درصد جوی باغچه و ۳۰ درصد روکش نفوذپذیر از مساحت کل منطقه، میزان ذخیره آب باران از ۵۹/۹ به ۸۲/۲ درصد افزایش می یابد.

غالباً مدل های شبیه ساز جهت دستیابی به الگوی صحیح و کارآمد مدیریت رواناب در شهرها مورد استفاده و واسنجی قرار می گیرند تا از نظر نوع محاسبات، آمار و اطلاعات ورودی مورد نیاز و خصوصیات منطقه مطالعاتی بیشترین تطابق و کارایی را داشته باشند. (De Paola *et al.*, 2018) پژوهشی را با هدف بررسی مدیریت رواناب شهری در Napel بر مبنای یک مدل بهینه سازی جستجوی هارمونیک و SWMM^۲ تحقیق را به انجام رسانیدند. طبق نتایج حاصله، ترکیب مخازن باران با معابر نفوذپذیر، سلول های نگهداشت زیستی و بام سبز، ابزار مفیدی در جهت کاهش دبی پیک سیلاب بوده و مدل SWMM (مدل دینامیکی بارش - رواناب برای رخداد های بارش تک واقعه و پیوسته در حوضه های شهری) انعطاف پذیری لازم برای ترکیب با مدل های دیگر را دارد. همچنین (Johannessen *et al.*, 2019) در برآورد هیدروگراف رواناب شهری در شهرهای با اقلیم متفاوت، (Platz *et al.*, 2020) در برآورد زمان پیک رواناب شهری، (Arman *et al.*, 2019) در برآورد اثر توسعه شهری در تولید و مدیریت رواناب شهر ایده، (Jamshidi *et al.*, 2020) در پیش بینی پارامترهای کمی و کیفی رواناب شهر شوشتر، Rafie *et al.*

(2023) عملکرد در قیاس با مدل‌های دیگر برای شهر لار و Toranjian and Marofi (2023) در شبیه‌سازی رواناب شهری در زیرحوضه خضر همدان قابلیت مدل SWMM را مناسب ارزیابی کردند.

بنابراین، محققین با درک توانایی مدل SWMM ضمن لحاظ روش‌های LID تحت سناریوهای منتخب تدوین‌شده در سطوح شهری، سعی در تشخیص شاخص‌های تاثیرگذار بر میزان رواناب شهری، شناسایی نقاط و زیرحوضه‌های بحرانی، و اتخاذ راهکارهای مدیریتی جامع برای آنها می‌باشند. برای نمونه، Mirzaei (2016) با هدف مدیریت جامع زهکشی رواناب شهری با تاکید بر رویکردهای زیست‌محیطی در منطقه کوی مجاهد اهواز توسط مدل SWMM مناسب‌ترین سناریوهای مدیریتی را به ترتیب اولویت: بام سبز، روسازی نفوذپذیر، جوی باغچه‌ونگهداشت‌زیستی یافت. همچنان ارزیابی تاثیر قابل روش‌های LID در کاهش رواناب حوضه‌های شهری توسط پژوهشگران بسیاری (همچون Silva et al. (2020) و Zhang et al. (2019)) قابل ملاحظه بوده و ضرورت بررسی در دیگر مناطق همچنان وجود دارد.

در شهر نیشابور (اقلیم خشک و نیمه خشک) غالباً پس از وقوع بارش‌های رگباری مخصوصاً در فصول زمستان و بهار، سطوح شهر دچار آبگرفتگی می‌شود (Lagzian et al., 2019). در پی آبگرفتگی‌ها معضلات متعددی از قبیل: اختلال در تردد شهری، بالازدگی فاضلاب شهری، مشکلات بهداشتی و اثرات منفی بر چشم‌اندازهای شهری در نیشابور برای مردم و ارگان‌های ذی‌ربط در پی دارد. با توجه به مطالعات مرور شده در بالا که بیانگر توانایی بالای مدل SWMM در برآورد میزان رواناب سطحی با لحاظ روش‌های LID تحت سناریوهای منتخب تدوین‌شده در سطوح شهری است، در پژوهش حاضر سعی شده است پس از برآورد میزان رواناب حاصله از بارش طرح طی دوره بازگشت‌های مختلف، پاسخ‌هیدرولوژیکی حوضه مطالعاتی شهر نیشابور به اعمال یا عدم اعمال LID های تعریف‌شده ارزیابی گردد. از دستاوردهای حاصله از پژوهش حاضر، عموماً در کنترل و مدیریت سیلاب های شهری در نیشابور می‌توان بهره برد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

شهر نیشابور با مساحتی حدود ۳۴۸۹ هکتار و متوسط شیبی حدود دو درصد بین ۵۸ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۰ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۹ دقیقه عرض جغرافیایی در حاشیه شرقی کویر مرکزی ایران واقع شده است. پست‌ترین نقطه‌ی شهر حوالی کفکدک زیرخط راه‌آهن با ارتفاع ۱۱۵۶ متر و بالاترین رقم ارتفاعی هنرستان کشاورزی در بالای شهرک قدس با ارتفاع ۱۲۶۸ متر می‌باشد. بیشتر تراکم جمعیتی در مناطق مرکزی شهر متمرکز، و مناطق اطراف شهر غالباً دارای کاربری‌های غیر مسکونی، باغ‌ها، فضای سبز طبیعی و اراضی بایر است. میانگین بارندگی سالانه شهر نیشابور ۲۲۷/۳۹ میلی‌متر (براساس آخرین آمار ۳۰ ساله سازمان هواشناسی کشور) است. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی، محدوده حوضه مطالعاتی و مقطع کانال اصلی خروجی حوضه شهر نیشابور را نشان می‌دهد.

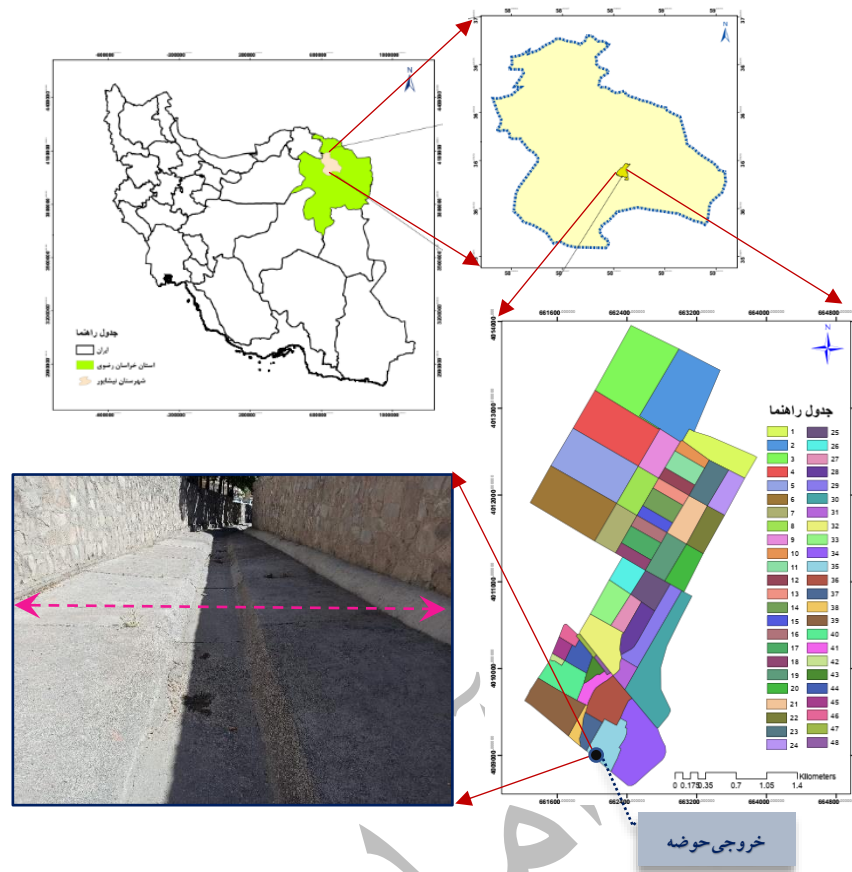


Figure 1. Geographical location, area of Neyshabur and cross-section of the main outlet channel of the study basin (taken by the first author)

به منظور شبیه‌سازی حوضه مطالعاتی از نسخه ۵/۲ مدل SWMM استفاده شد. در تحقیق حاضر روندیابی هیدرولیکی جریان از روش موج دینامیکی^۳ (حل کامل معادلات سنت‌ونانت) و فرایند نفوذ با توجه به دسترسی نویسندگان به اطلاعات شماره منحنی زیرحوضه‌ها از روش SCS^۴ استفاده گردید. داده‌های روزانه بارش در دوره پایه (دوره ۳۰ ساله ۱۴۰۰-۱۳۷۱) از سازمان هواشناسی کشور، اطلاعات هیدرومتری به صورت میدانی، برداشت و با روش جسم‌شناور (در مقاطع معین در شکل ۱) محاسبه گردید. خصوصیات فیزیکی زیرحوضه‌ها از بانک اطلاعاتی شهرداری نیشابور، اداره منابع آب نیشابور، بازدیدهای میدانی نویسنده اول و جداول مرجع اخذ گردید. پیکربندی سیستم (شبکه زهکشی) شامل مجاری و گره‌ها توسط بازدیدهای میدانی نویسنده اول برداشت و تدقیق گردید.

۲-۲. شاخص‌های ارزیابی نتایج شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی مدل SWMM از آماره‌های NSE، RMSE، PBIAS و R^2 ، مطابق جدول (۱)، که بیشترین کاربرد را در مطالعات هیدرولوژی شهری دارند استفاده شد. براساس نظر *Yarahmadi et al. (2019)* در شرایط مناسب و مطلوب کالیبراسون، میزان RMSE باید کوچکتر و نزدیک به صفر (بیانگر اختلاف کم بین نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی)، میزان R^2 نزدیک به یک (بیانگر برابری تقریبی واریانس داده‌های پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهده‌ای متناظر با آن) و میزان NSE نزدیک به یک باشد *Del Giudice and Padulano (2016)*. همچنین مقادیر مثبت و منفی PBIAS بیانگر تخمین (بالا یا پایین) متوسط جریان محاسباتی (مدل‌شده) نسبت به جریان مشاهداتی است.

Table 1. Statistics used for evaluation of model results; Q_{sim} : predicted runoff, Q_{obs} : observed runoff, Q_{mean} : average observed runoff and n : number of data.

$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2}} \right)^2$	Coefficient of Determination
$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2}$	Root Mean Square Error
$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \times 100$	Percent BIAS
$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{mean})^2}$	Nash-Sutcliffe coefficient of Efficiency
<p>Unsatisfactory if $NSE \leq 0.5$</p> <p>Satisfactory if $0.5 < NSE \leq 0.65$</p> <p>Good if $0.65 < NSE \leq 0.75$</p> <p>Very good if $0.75 < NSE \leq 1.00$</p>	

۳-۲. روش شناسی تحقیق

در این پژوهش، شبیه‌سازی کمیت رواناب مطابق شکل (۲a) در حوضه‌ای به مساحت ۷/۱۳۹ کیلومتر مربع، شامل ۴۸ زیرحوضه و شبکه‌ای مشتمل بر کانال‌های روباز و بسته با اشکال مستطیلی و مثلثی (عرض ۰/۵ تا دو متر و ارتفاع ۰/۴ تا سه متر) صورت گرفت. پیکربندی سیستم (شبکه زهکشی) در مدل SWMM شامل ۶۹ گره (به غیر از گره خروجی) و ۷۵ کانال زهکشی است که در شکل (۲b) به صورت شماتیک نشان داده شده است. مساحت، محیط و شیب متوسط زیرحوضه‌ها (میانگین وزنی شیب ناحیه‌ها) در محیط ARC GIS محاسبه و سپس با نرم‌افزار Google Earth pro، بازدیدهای میدانی (با یکسان‌سازی موقعیت برداشت شده مطابق نقشه‌ها) و لحاظ ملاحظات مهندسی، تدقیق شیب زیرحوضه‌ها صورت گرفت. برای محاسبه عرض معادل، از روش عرض مستطیل معادل^۵ استفاده گردید. ضریب زبری جریان با استفاده از جداول راهنمای مدل SWMM در نظر گرفته شد (Beheshti et al., 2022). درصد مساحت مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر با استفاده از آیین‌نامه^۶ USDCM تعیین و سپس با استفاده از لایه کاربری اراضی تدقیق شده در ARC GIS در چهار حالت (مسکونی و تجاری، زراعی و پارک، بایر و خیابان‌ها) براساس میانگین وزنی ناحیه‌ها محاسبه، و تدقیق گردید.

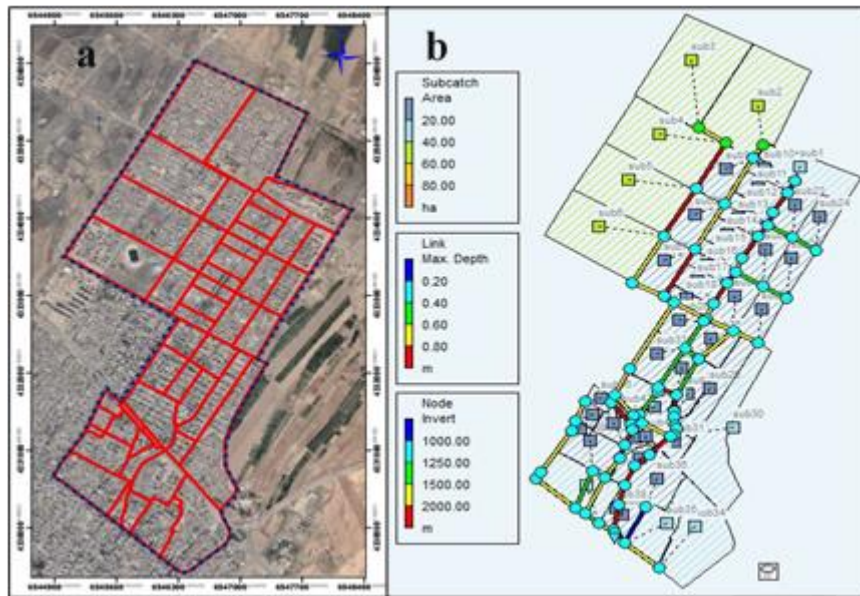


Figure 2. Schematic of the basin and sub-basins including nodes, channels and drainage channels modeled in SWMM

مقدار پارامتر زمان تمرکز حوضه شهر نیشابور با استفاده از سه روش کالیفرنیا، کریپچ (اصلاح شده) و سازمان هوانوردی آمریکا به ترتیب $۷۶/۸$ ، $۳۰/۵۶$ و $۷۶/۳$ برحسب دقیقه محاسبه شد. در این پژوهش، نهایتاً از لحاظ فنی به منظور اطمینان از مشارکت کل حوضه در تولید رواناب، زمان تمرکز ۹۰ دقیقه مبنای کار جهت برآورد بارش طرح قرار گرفت. به دلیل عدم وجود منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی در ایستگاه هواشناسی نیشابور، با استفاده از وقایع بارش حداکثر روزانه حوضه نیشابور برای دوره ۳۰ ساله ($۱۳۷۱-۱۴۰۰$) دوره بازگشت‌های ۲ ، ۵ ، ۱۰ ، ۲۵ ، ۵۰ و ۱۰۰ سال براساس رابطه قهرمان (Arvand *et al.*, 2020) تعیین شد (شکل ۳ راست). نهایتاً با محاسبه زمان تمرکز حوضه و براساس منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی، هیتوگراف باران طراحی با تداوم ۹۰ دقیقه برای دوره بازگشت ۲ ، ۵ و ۱۰ سال در بازه‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای به روش بلوک‌تناوبی (Arvand *et al.*, 2020) محاسبه گردید (شکل ۳ چپ).

در این مطالعه به کمک بازدیدهای میدانی صورت گرفته و بررسی شرایط منطقه مطالعاتی از لحاظ محدودیت‌ها (قابلیت اجرایی و تطابق با محدوده به لحاظ فضا و کاربری موجود)، چهار گزینه منتخب مدیریتی (ترانشه نفوذ^۷، سیستم نگهداشت زیستی (مانند بیولوژیکی)^۸، سنگ فرش نفوذپذیر^۹، جوی باغچه^{۱۰}) به عنوان اقدامات اجرایی موثر در شهر نیشابور انتخاب و در مجموع با ایجاد شش سناریوی مدیریتی (شبیه سازی کمی بدون بکارگیری LID، لحاظ ماندبیولوژیکی، سنگ فرش نفوذپذیر، ترانشه نفوذ، جوی باغچه و تلفیق کلیه سناریوهای مدیریتی در شبیه سازی) که به ترتیب با سناریوهای ۱ ، ۲ ، ۳ ، ۴ ، ۵ و ۶ نامگذاری شدند، ارزیابی‌ها برای دوره بازگشت‌های ۲ ، ۵ و ۱۰ ساله انجام پذیرفتند.

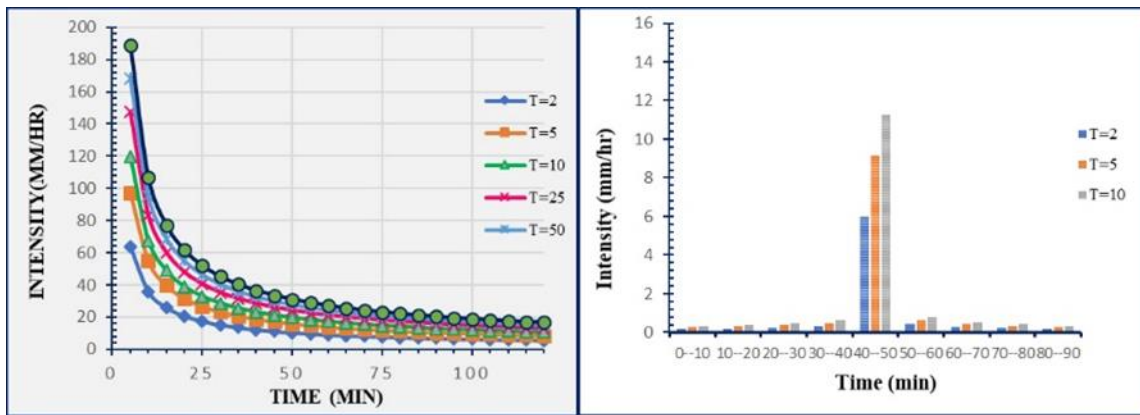


Figure 3. Intensity-duration-frequency curves with return periods of 2, 5, 10, 25, 50 and 100 (left side) and design barrage hyetograph with a duration of 90 minutes for the return period of 2, 5 and 10 years (right side) at the Neyshabur meteorological station

۳. نتایج و بحث

آنالیز حساسیت مدل (۵۲ مرتبه شبیه‌سازی) با تغییر هفت پارامتر ورودی در محدوده مجاز خود مطابق جدول (۲)، نشان داد که پارامترهای درصد نواحی نفوذناپذیر، ذخیره چالابی مناطق نفوذناپذیر، عرض معادل، ضریب زبری مناطق نفوذناپذیر و شیب به صورت صعودی بیشترین حساسیت را در تغییرات دبی اوج رواناب دارند. نتایج حاصله در تطابق با یافته‌های Farokhzadeh *et al.*, (2021) نشان دهنده، درصد سطوح نفوذناپذیر به عنوان حساس‌ترین پارامتر تاثیرگذار بر پیک و حجم- رواناب است.

Table 2. Range of changes of parameters subject to sensitivity analysis and calibration of SWMM model

Selected parameters	Calibration range allowed
Width(m)	[-30 +30]
Slope (%)	[-30 +30]
Impermeable area (%)	[-10 +10]
Manning's roughness coefficient-Impermeable area	[+0.010 +0.015]
Manning's roughness coefficient-permeable area	[+0.02 +0.45]
Surface storage-Impermeable area (mm)	[+0.3 +2.5]
Surface storage-permeable area (mm)	[+2.5 +5.1]

همچنین مشخص شد که پارامترهای درصد مناطق نفوذناپذیر، عرض معادل و شیب زیرحوضه رابطه مستقیم با دبی اوج رواناب، ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر و نفوذناپذیر و ضریب زبری مناطق نفوذناپذیر و نفوذپذیر رابطه معکوس با دبی اوج رواناب دارند و همچنین شیب و ضریب مانینگ بر زمان پیک جریان تاثیرگذار هستند لذا بهینه‌سازی برخی از پارامترها به منظور کاهش خطای بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی رواناب سطحی شهر نیشابور در دامنه تغییرات مجاز صورت گرفت (جدول ۳).

Table 3. The initial and optimized values of the effective parameters for SWMM model calibration

Selected parameters	Initial value taken	Parameter Adjustment (%)	Optimal value
Width(m)	*1	+5%	*
Slope (%)	*	-5%	*
Impermeable area (%)	*	-10%	*
Manning's roughness coefficient-Impermeable area	0.018	-7%	0.0093
Manning's roughness coefficient-permeable area	0.18	+7%	0.1926
Surface storage-Impermeable area (mm)	1.91	-7%	1.8063
Surface storage-permeable area (mm)	4	+7%	4.28

قیاس ظاهری (شکل ۴) هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای (دبی متناظر بارش‌های رخ داده در خروجی حوضه برداشت شده توسط نویسنده اول) هر بارش در هر دو مرحله (واسنجی و اعتبارسنجی) بیانگر تطابق خوب دبی اوج شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای و در توافق با یافته‌های (Fathian *et al.*, (2020) نشان دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیک حوضه نسبت به بارش‌های رخ داده است.

با استفاده از پارامترهای بهینه‌شده (میانگین مقادیر پارامترهای واسنجی شده) و داده‌های دیده‌بانی پنج واقعه بارشی (سه واقعه برای واسنجی و دو واقعه در اعتبارسنجی) در سال‌های ۱۴۰۱-۱۴۰۲ اعتبار نتایج واسنجی و صحت‌سنجی محاسبه گردید. ارزیابی‌های آماری در جدول (۴) با نشان دادن میزان خطا برای دبی اوج در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی در محدوده کمتر از ۲۵ درصد، بیانگر کارایی قابل قبول مدل است (Temprano., 2006). همچنین تغییرات NSC در مرحله واسنجی در محدوده ۰/۵-۰/۸ و در مرحله اعتبارسنجی در محدوده ۰/۸-۰/۹ و در توافق با نتایج (Omid Arjenaki *et al.*, (2020) RMSE در مرحله واسنجی در محدوده ۰/۳-۰/۵ و در مرحله اعتبارسنجی ۰-۰/۲ (کوچکتر و نزدیک به صفر) بیانگر نتایج قابل قبول پیش‌بینی مدل و در توافق با نتایج (Ebrahimzadeh *et al.*, (2021) مقادیر R^2 در تطابق با نتایج (Khaloei *et al.* (2023) در دامنه مناسب و مقادیر اندک شاخص PBIAS (مقادیر مطلق PBIAS به طور متوسط بیشتر از ۲۰ درصد نیست) حاکی از کالیبراسیون خوب مدل (برآورد خوب مدل در تعیین مولفه‌های جریان) در پیش‌بینی حجم کل جریان بوده است. لذا با تحلیل نتایج حاصله در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی و حدود قابل قبول و بهینه ضرایب برازندگی، دقت و کارآمدی مدل شبیه‌سازی شده برای تعریف سناریوهای تبیین شده در حوضه شهر نیشابور تایید شد.

¹ Each Sub-Basin has different Values

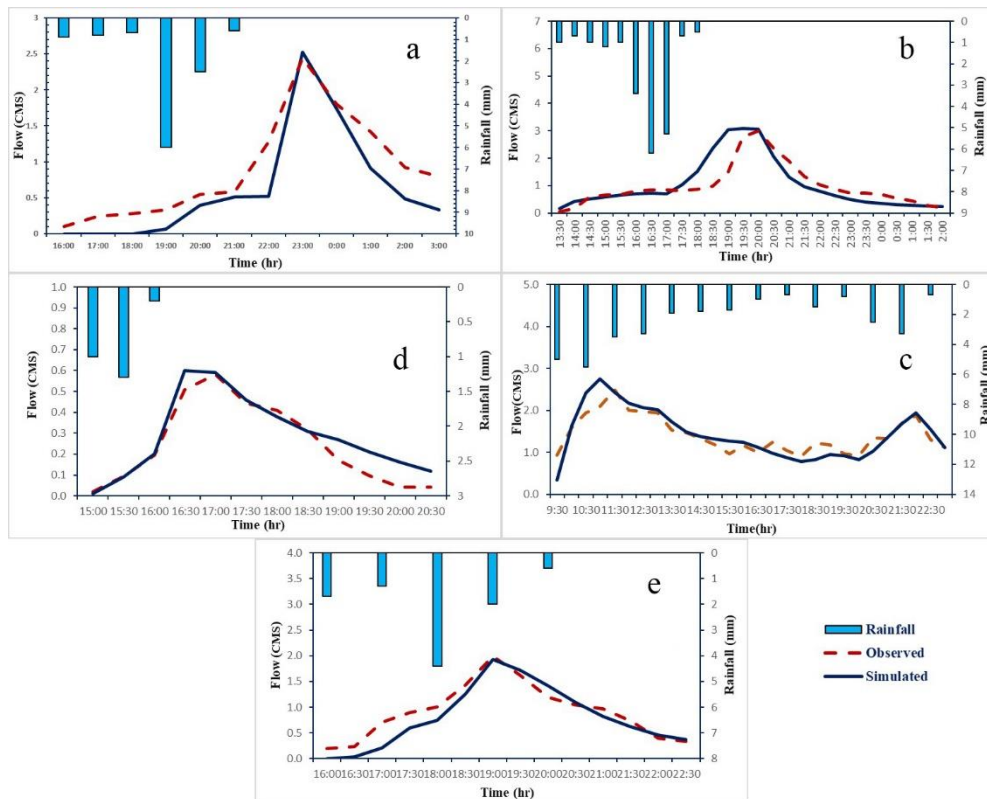


Figure 4. Observed and simulated rainfall hyetograph and hydrograph in the calibration stage for a: 25/11/1401, b: 29/11/1401, c: 04/01/1402 showers and in the validation stage for d: 24/12/1401, e: 13/01/1402 showers

Table 4. The results of calibration and validation of SWMM model

Events	Peak flow(m3)			Statistic				
	Simulated	Observed	Error (%)	NSC	RMSE	R ²	BIAS (%)	
Calibration	1401/11/25	2.52	2.44	3	0.73	0.35	0.91	13.8
	1401/11/29	2.75	2.48	10	0.65	0.25	0.85	4.38
	1402/01/04	3.7	3.003	19	0.57	0.48	0.72	23.75
Validation	1401/12/24	0.59	0.58	2	0.88	0.066	0.92	1.81
	1402/01/13	1.93	1.99	3	0.83	0.21	0.91	4.93

مطابق شکل (۵) در شرایط فعلی و عدم استفاده از LID ها در محدوده مطالعاتی با افزایش دوره بازگشت میزان پیک سیلاب در بازه زمانی ۸ ساعته افزایش یافته است.

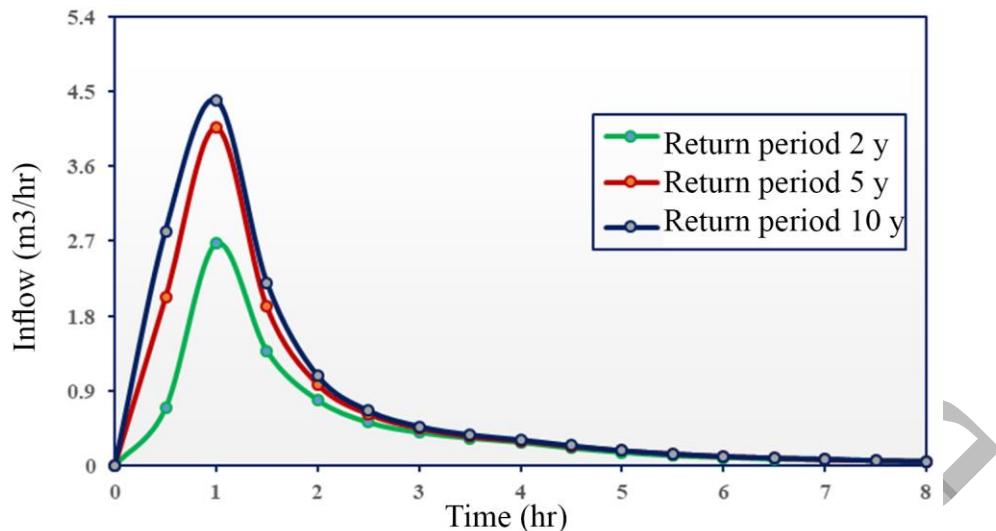


Figure 5. Hydrograph of the outlet point of the basin in the condition of not using LID for the design return period (2, 5 and 10 years)

با اعمال بارش طرح در دوره بازگشت های ۲، ۵ و ۱۰ ساله در حوضه آبریز مطالعاتی و اجرای مدل براساس سناریوهای تدوین شده مطابق شکل (۵) و جدول (۵):

۱- اولویت بندی برتری سناریوها براساس متوسط و درصد کاهش حجم رواناب به ترتیب عبارتست از: تلفیق سناریوها، ترانشه نفوذ، جوی باغچه، سنگفرش نفوذپذیر و ماند بیولوژیکی که بیشترین تا کمترین تاثیر داشته اند می شود (به ترتیب سناریوهای ۶، ۴، ۵، ۳ و ۲). تفاوت تاثیر سناریوهای تدوین شده در کاهش میزان رواناب (پیک و حجم جریان) از چند مسئله ناشی می گردد: الف) میزان نرخ نفوذ و ظرفیت نگهداشت رواناب سطحی ب) مساحت اختصاص یافته به هر روش و ج) جانمایی سناریوها (ممکن است در هر زیرحوضه امکان جانمایی روش های توسعه کم اثر نباشد) (Lagzian *et al.*, 2019).

۲- براساس بیشترین درصد کاهش حجم رواناب به ترتیب متعلق به سناریوهای ۶، ۴، ۵، ۳ و ۲ بوده که این امر ناشی از بیشترین مساحت اطلاق شده (تخصیص براساس خصوصیات LID ها و محدودیت ها، مساحت هر کاربری و فضای مورد نیاز) به هر سناریو می باشد (شکل ۶). البته از بازدهی های میدانی به عمل آمده نیز مشخص است که پیاده روها و معابر در سطح حوضه مطالعاتی (با عرض کم و روسازی نفوذناپذیر) درصد مساحت بالایی را به عنوان یکی از کاربری های مهم، سنتی و محرک تولید رواناب به خود اختصاص داده است. به طور کلی LID ها در مکان ها و برای شرایط خاصی، براساس خصوصیات بالقوه ای که دارند جانمایی می گردند که با تلفیق سناریوها (ترکیب انواع LID) امکان اینکه نقاط ضعف یک LID را با نقاط قوت LID دیگری پوشش داد میسر است. در توافق با یافته های Mozaffari and Kobarfard (2017)، با افزایش دوره بازگشت، عملکرد (درصد کاهش حجم جریان و پیک جریان) سناریوهای شش و یک (ترانشه نفوذ و تلفیق سناریوها) برخلاف سایر سناریوها، کاهش چشمگیری یافته است. براساس جدول (۵) عملکرد جوی باغچه نسبت به ماند بیولوژیکی و روسازی نفوذپذیر مناسب ارزیابی شد. همچنین ترانشه نفوذ عملکردی (درصد کاهش حجم رواناب) بهتر نسبت به سایر سناریوها (به دلیل جاگذاری در زیرحوضه های بحرانی تر) داشته، که در نهایت، گزینه تلفیق سناریوها بهترین عملکرد را نسبت به پاسخ های متناظر از هر سناریوی مورد بررسی نشان داده که هم سو با یافته های Nazari *et al.* (2021) و Nahid *et al.* (2021) می باشد.

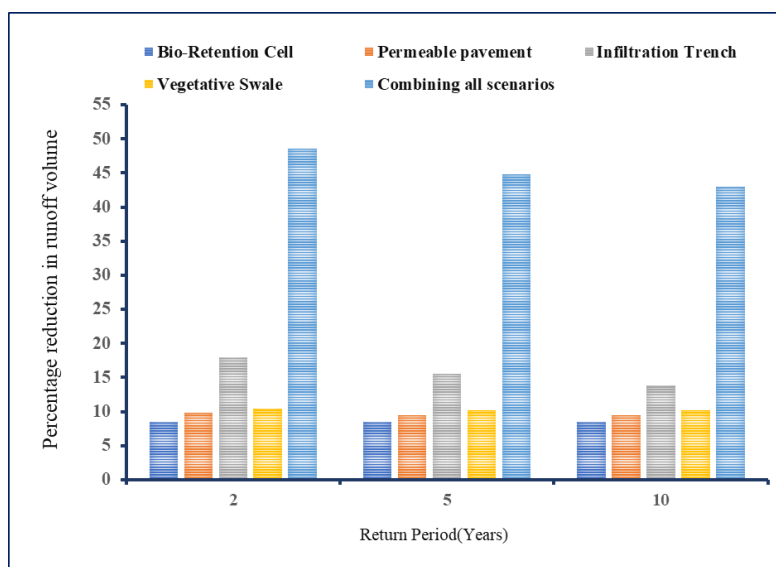


Figure 6. The percentage of reduction in the volume of outgoing runoff according to the selected scenarios (return period of 2, 5 and 10 years)

Table 5. Percent reduction of runoff volume in different scenarios (return period of 2, 5 and 10 years)

Alternatives		Runoff Reduction (percent)			Average runoff reduction (percent)
		2 Years	5 Years	10 Years	
No LID	1	14.61	20.764	23.38	-
	2	8.54	8.52	8.49	-8.51
with LID	3	9.42	9.50	9.83	-9.58
	4	13.79	15.6	18	-15.79
	5	10.16	10.20	10.39	-10.25
	6	42.94	44.83	48.52	-45.43

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش با به کارگیری مدل شبیه ساز SWMM به بررسی تاثیر LID های منتخب در کاهش حجم رواناب شهر نیشابور تحت سناریوهای مختلف، به منظور راه حلی جهت مدیریت و کنترل آب گرفتگی معابر صورت گرفت. محدودیت های موجود در اجرای روش را می توان در ۱- برداشت میدانی خصوصیات حوضه مطالعاتی (عدم دسترسی به داده های شبکه زهکشی اعم از کانال ها و گره ها) ۲- عدم وجود ایستگاه های هیدرومتری جهت واسنجی مدل عنوان نمود. آنالیز حساسیت مدل نشان داد که درصد نواحی نفوذناپذیر موثرترین پارامتر برحجم و پیکرواناب تولیدی بوده است. همچنین نتایج شاخص های ارزیابی (ناش-ساتکلیف، مجذور میانگین مربع خطا، درصد بایاس و ضریب تعیین) در مراحل واسنجی و صحت سنجی گواه عملکرد خوب مدل SWMM بودند. و بدین وسیله امکان بررسی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به رویدادهای بارش با دوره- بازگشت های مختلف وجود داشت ولی براساس نتایج حاصله عدم استفاده از واسنجی (آنالیز حساسیت) سبب بروز خطا در برآورد سیلاب شهری می گردد. نتایج کلی حاصله را می توان اینگونه بیان داشت: الف) عملکرد روش های توسعه کم اثر به عوامل مختلفی نظیر شرایط جغرافیایی و هیدرولوژیکی منطقه، شرایط جغرافیایی و امکانات موجود، شرایط محیطی و کالبدی منطقه و ویژگی های LID هابستگی دارد. ب) تلفیق سناریوها به عنوان جامع ترین راهکار اجرایی برای شهر نیشابور در جهت رسیدن به معیارهای مورد نظر (مدیریت رواناب در محدوده شهری) است.

1. Low Impact Development
2. Storm Water Management Model
3. Dynamic Wave Routing
4. Soil Conservation Service
5. Equivalent rectangular
6. Urban Storm Drainage Criteria Manual
7. Infiltration Trench
8. Bio-Retention Cell
9. Porous Paver Systems
10. Vegetative Swale

۶. تشکر و قدردانی

۷. تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸. منابع

- Ahmadzadeh, H., SaeedAbadi, R., & Nouri, A. (2015). A Study and Zoning of the Areas Prone to Flooding with an Emphasis on Urban Floods (Case Study: City of Maku). *Hydrogeomorphology*, 1(2), 1-24 (In Persian).
- Arman, N., Shahbazi, A., Faraji, M., & Dehdari, S. (2019). Effect of urban development on runoff generation by SWMM, case study: Khuzestan Province, Izeh, *Journal of Watershed Engineering and Management*, 11(3), 750-758 (In Persian).
- Arvand S., Delghandi, M., Ganji, Z., & Alipour, A. (2020). Evaluation of Storm Water Management Model (SWMM5.0) in simulation of urban runoff (case study: urban catchment of Neyshabur). *Irrigation and Water Engineering*, 10(3), 68-81 (In Persian).
- Beheshti, F., Tajbakhsh, M., & Shahidi, A. (2022). Evaluating the effect of water harvesting methods on urban runoff (Case study: Birjand urban watershed). *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 10(1), 1-12 (In Persian).
- De Paola, F., Giugni, M., Pugliese, F. & Romano, P. (2018). Optimal design of lids in urban stormwater systems using a harmony-search decision support system. *Water Resources Management*, 32(15), 4933-4951.
- Del Giudice, G., & Padulano, R. (2016). Sensitivity analysis and calibration of a rainfall-runoff model with the combined use of EPA-SWMM and genetic algorithm. *Acta Geophysica*, 64, 1755-1778.
- Ebrahimzadeh, Z., Malekian, A., Mohseni, M., & Zare Bidaki, R. (2021). Determination of possible waterlogging points of drainage network of Fooladshahr city in urban flood. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 15 (52), 54-62 (In Persian).
- Farokhzadeh, B., Kiani, A., & Bazrafshan, O. (2021). Evaluation of SWMM hydrological-hydraulic model in urban runoff management (Case study: District 12 of Tehran Municipality). *Urban Economics and Planning*. 1(4), 243-251 (In Persian).
- Fathian, H., Akhoond-Ali, AM., & Sharifi, M. (2020). Parameters Uncertainty Analysis in Estimating Probable Maximum Flood in Bakhtiary Dam Basin by Monte Carlo Method. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(4), 855-871 (In Persian).
- Hassani, M., Niksokhan, M., Ardestani, M., & Mousavi, S. (2023). Evaluating the effects of climate change on urban runoff based on CMIP6 models (Case study: district 10 of Tehran municipality). *Water and Soil Management and Modelling*. 3(2), 269-285 (In Persian).
- Jamshidi, B., Tahmasebi Birgani, Y., Jafarpour, M., Alavi Bakhtiarvand, N.A., Babaei, A.A., Haghghi, A., & Goudarzi, Gh. (2020). Determining Quantitative-Qualitative Parameters of Shushtar City Runoff Model Using SWMM Calibration. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. 6(3), 239-249 (In Persian).

- Johannessen, B.G., Hamouz, V., SeifuGragne, A., & MereteMuthanna, T. (2019), The transferability of SWMM model parameters between green roofs with similar build-up, *Journal of Hydrology*, 569.
- Karamouz, M., Nazif, S., & Zahmatkesh, Z. (2014). Self Organizing Gaussian-Based Downscaling Of Climate Data For Simulation Of Urban Drainage Systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 139(2), 98–112 (In Persian).
- Khaloei, S., Khalighisigaroodi, S., Ahmadauli, K., & Malekian, A. (2023). The effect of climate change on runoff produced in some part of Shiraz. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 15(1), 55-67 (In Persian).
- Lagzian, R., Sadoddin, A., Ownegh, M., & Alipoor, A. (2019). Developing the stormwater management scenarios for Neyshabur City and choosing the best scenarios using a multi-criteria decision making technique. *Watershed Engineering and Management*. 11(2), 408-426 (In Persian).
- Mao, Xuhui, Jia, Haifeng, & Yu, Shaw, (2017). Assessing the ecological benefits of aggregate LID-BMPs through modelling, *Ecological Modelling*, 353, 931-911.
- Mirzaei, H. (2016). Integrated urban runoff drainage management with emphasis on environmental approaches, (case study: Mojahed district, Ahvaz). Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz. M.Sc. Environmental Engineering: 139 (In Persian).
- Mozaffari, J., & Kobarfard, M. (2017). Investigation of qualitative and quantitative management at urban flood with EPA-SWMM model; Case study District 22 of Tehran. *Irrigation and Water Engineering*, 7(3), 47-59 (In Persian).
- Nahid, M., Zandmoghadam, M., & Karkehabadi, Z. (2021). Measuring and Evaluating the Resilience of Urban Areas against Urban Flooding (Case Study: District 4 of Tehran). *Journal of Range and Watershed Management*, 74(1), 189-205 (In Persian).
- Nazari A., Roozbahani A., & Hashemy Shahdany S. (2021). Urban Stormwater Management by Optimizing Low Impact Development Techniques and Integration of SWMM and SUSTAIN Models. *Journal of Water and Wastewater*. 32(4), 136-151 (In Persian).
- Omidi Arjenaki, M., Zarif Sanayei, H., & Heidarzadeh, H. (2020). Urban Surface Runoff Simulation and Prioritization of Critical Sub Catchments Using SWMM Model and TOPSIS Method (Case Study: Shahrekord City). *Journal of Water & Wastewater*, 31(128), 99-113 (In Persian).
- Panahi, G. & Esmaili, K. (2018). Recommendation of new approaches for urban flood management. *Journal of Water and Sustainable Development* 5(1), 93–100 (In Persian).
- Platz, M., Simon, M. & Tryby, M. (2020). Testing of the storm water management model low impact development modules. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 56, 283-296.
- Rafie, M., Rasouli, D., Zolghadr, M., & Mahbod, M. (2023). Evaluation of EPA SWMM, ASSA and Sewer GEMS Models in Analysis of Urban Flood Collected by Surface Drainage Network (Case Study: Lar New City), *Water Engineering*, 15(54), 107-124 (In Persian).
- Randall, M., Fensholt, R., Zhang, Y., & Jensen, M. (2019). *Geographic Object Based Image Analysis of WorldView-3 Imagery for Urban Hydrologic Modelling at the Catchment Scale*. *Water*. 11, 1133.
- Recanatesi, F., Petroselli, A., Ripa, M. N., & Leone, A. (2017). *Assessment of stormwater runoff management practices and BMPs under soil sealing: A study case in a peri-urban watershed of the metropolitan area of Rome (Italy)*. *Journal of environmental management*, 201, 6–18.
- Rossman L.A. (2015). Storm water management model. User's manual. Version 5.2, United States Environmental Protection Agency.
- Silva M. D. Najjar M. K. Hammad A. W. A. Haddad A. & Vazquez E. (2020). Assessing the Retention Capacity of an Experimental Green Roof Prototype. *Water*. 12(1), 90.
- Temprano, J., Arango, Ó., Cagiao, J., Suárez, J., & Tejero, I. (2006). Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain. *Water Sa*, 32(1), 55-63.

Toranjian, A., & Marofi, S. (2023). Simulation of urban surface runoff using SWMM (Case study: Khezr sub-basin of Hamedan). *Irrigation and Water Engineering*, 13(13), 722-437 (In Persian).

Yarahmadi, Y. Yousefi, H., Jahangir, M., & Sadatineghad, S. (2019). Evaluation of the network performance of surface water collection and guidance using the SWMM Hydrological Model (Case Study: District 6 of Tehran Municipality). *IRANIAN JOURNAL OF ECOHYDROLOGY*. 6(2), 415-429 (In Persian).

نسخه آماده انتشار

Simulating urban surface runoff and prioritizing low-impact development methods using the SWMM model (case study: Neyshabur)

Esmail Hesari¹, Ali Mohammad Akhoond-Ali^{2*}, Mohammad Amin Maddah³

1. M.Sc. Student, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2. Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (*- Corresponding Author: aliakh@scu.ac.ir)

3. Assistant Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Abstract

Recently, the change in hydrological characteristics and the response of the urban watershed to rainfall and flooding has become increasingly evident in terms of quantity and quality for human life and resources. Preventing the waste of these effluents and consequently compensating for the lack of water resources is an effective step in this regard. In this study, rainfall-runoff simulations in SWMM were used to investigate the hydrological response of the Neyshabur urban catchment to production runoff using low-impact development methods under six different scenarios. The inflow data corresponding to the hyetograph of five precipitation events at the outlet point were collected in the field using the float method. Statistical evaluations (Nash-Sutcliffe, RMSE, percent bias, and coefficient of determination) during the calibration and validation phases proved the good performance of the model (peak-discharge and its time). The percentage of impervious surfaces was found to be the most effective parameter for peak runoff discharge. Overall, the implementation of the following scenarios was evaluated: Bio-Retention-Cell, Porous-Paver-Systems, Infiltration-Trench, Vegetative-Swale and the Combination-of-the-Scenarios resulted in a reduction in runoff of 8.51, 9.58, 15.79, 10.25 and 43 percent, respectively. Finally, in the return periods of 2, 5 and 10 years, the best performance has been achieved by Combination-of-the-Scenarios, Infiltration-Trench, Vegetative-Swale, Porous-Paver-Systems and Bio-Retention-Cell. The results of the present study have shown that the implementation of low-impact development strategies together with the conventional urban drainage network in the SWMM is a good estimate for testing the performance and implementation methods of different scenarios for experts and managers.

Keywords: LID, Rainfall-runoff, Sensitivity analysis, Urban catchment.