



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

Esmail Hesari¹ | Ali Mohammad Akhoond-Ali² | Mohammad Amin Maddah³

1. Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: e-hesari@stu.scu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: aliakh@scu.ac.ir
3. Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: ma.maddah@scu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 14 October 2023

Received in revised form

23 October 2023

Accepted 11 November 2023

Published online 5 September 2024

Keywords:

LID

Rainfall-runoff

Sensitivity analysis

Urban catchment

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.

Cite this article: Hesari, E., Akhoond-Ali, A. M., & Maddah, M. A. (2024). Simulating urban surface runoff and prioritizing low-impact development methods using the SWMM model (Case study: Neyshabur). *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (2), 263-275. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.366666.1111>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.366666.1111>

Publisher: The University of Tehran Press.



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. گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: e-hesari@stu.scu.ac.ir
 ۲. نویسنده مسئول، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: aliakh@scu.ac.ir
 ۳. گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: ma.maddah@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۷/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۸/۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۶/۱۵

کلیدواژه‌ها:

آنالیز حساسیت

بارش-رواناب

حوضه آبریز شهری

LID

به‌تازگی 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 در نتیجه آن جبران کمبود منابع آبی، گامی مؤثر 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 به‌صورت میدانی برداشت و در نقطه خروجی به‌روش جسم شناور دبی متناظر پنج رخداد بارش محاسبه گردید. نتایج آنالیز حساسیت مدل نشان داد که درصد نواحی نفوذناپذیر مؤثرترین پارامتر بر دبی اوج رواناب است. ارزیابی آماره‌ها (نش-سانتکلیف، 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، سنگ‌فرش نفوذپذیر، ترانشه نفوذ، جوی باغچه و تلفیق کلیه سناریوها موجب کاهش رواناب تولیدی به‌ترتیب به میزان ۸/۵۱، ۹/۵۸، ۱۵/۷۹، ۱۰/۲۵ و ۴۵/۴۳ درصد شد. درنهایت، در دوره بازگشت‌های دو، پنج و ۱۰ سال بهینه‌ترین عملکرد به‌ترتیب در سناریوهای تلفیق سناریوها، ترانشه‌نفوذ، جوی‌باغچه، سنگ‌فرش 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 متخصصان و مدیران شهری قرار می‌دهد.

استناد: حصاری، اسماعیل؛ آخوندعلی، علی محمد و مداح، محمدامین (۱۴۰۳). شبیه‌سازی رواناب سطحی شهری و اولویت‌بندی روش‌های توسعه کم‌اثر با استفاده از مدل SWMM (مطالعه موردی: شهر نیشابور). نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۲)، ۲۶۳-۲۷۵.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.366666.1111>



۱. مقدمه

در ارتباط با تشدید خشکسالی‌های متناوب، پراکنش زمانی و مکانی بارش و بحران برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در سطح کشور، یافتن راه‌حلی برای جبران کسری بیلان عرضه و تقاضای آب به‌ویژه 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 به‌دلیل توسعه غیر اصولی شهرها سیر صعودی به خود گرفته است. به‌عبارتی، افزایش سطوح نفوذناپذیر باعث کاهش نفوذ آب، کاهش زمان تمرکز حوضه و افزایش پیک و حجم جریان می‌شود که باعث بروز اثرات منفی سیلاب‌های 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 مهم‌ترین چالش‌های پیشروی متخصصان، تغییر نگرش‌های مدیریت سنتی رواناب شهرها، یعنی از دیدگاه خروج سریع رواناب از شهر به نقطه‌نظر استفاده از رواناب به‌عنوان یک منبع با ارزش و چگونگی انتخاب و ترکیب بهینه اقدامات نوین در مدیریت سیلاب است (Karamouz *et al.*, 2014). به‌طوری‌که 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 روش‌های توسعه کم‌اثر^۱ (LID) گفته می‌شود (Rossman, 2009). مفهوم LID شامل ارائه رویکردی جدید و محیط‌زیستی جهت کاهش هزینه‌های 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 شبکه‌زهدکشی و ۶- ایجاد فرصتی جهت نفوذ می‌باشد (Panahi *et al.*, 2018). ضرورت استمرار پژوهش مرتبط با کارایی و انتخاب روش‌های LID در مدیریت سیلاب‌های شهری به‌تازگی مشهودتر است. Mao *et al.* (2017) در شهر فوشان چین به بررسی مزایای زیست‌محیطی 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 پژوهشی توسط Recanatesi *et al.* (2017) در بخشی از شهر رم در ایتالیا به ارزیابی سناریوهای مختلف به‌منظور مدیریت رواناب پرداختند. نتایج بیانگر کارایی استفاده از روش‌های 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 می‌یابد.

غالباً مدل‌های شبیه‌ساز جهت دستیابی به الگوی صحیح و کارآمد مدیریت رواناب در شهرها مورد استفاده و واسنجی قرار می‌گیرند تا از نظر نوع محاسبات، آمار و اطلاعات ورودی موردنیاز 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 بهینه‌سازی جستجوی هارمونیک و SWMM^۲ پژوهش را به انجام رساندند. طبق نتایج حاصله، ترکیب مخازن باران با معابر نفوذپذیر، سلول‌های نگهداشت‌زیستی و بام‌سبز، ابزار مفیدی در جهت کاهش دبی پیک سیلاب بوده و مدل SWMM (مدل دینامیکی بارش- رواناب برای رخدادهای بارش تک واقعه و پیوسته در حوضه‌های شهری) انعطاف‌پذیری لازم برای ترکیب با مدل‌های 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 ایذه، Jamshidi *et al.* (2020) در پیش‌بینی 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، پژوهش‌گران با درک توانایی مدل SWMM ضمن در نظر گرفتن روش‌های LID تحت سناریوهای منتخب تدوین شده در سطوح شهری، سعی در تشخیص شاخص‌های تأثیرگذار بر میزان رواناب شهری، شناسایی نقاط و زیرحوضه‌های بحرانی و اتخاذ راه‌کارهای مدیریتی جامع برای آن‌ها دارند. برای نمونه، Mirzaei (2016) با هدف مدیریت جامع زهکشی رواناب شهری با تأکید بر رویکردهای زیست‌محیطی در منطقه کوی مجاهد اهواز توسط مدل SWMM، مناسب‌ترین سناریوهای مدیریتی را به ترتیب اولویت بام سبز، روسازی نفوذپذیر، جوی باغچه و نگهداشت‌زیستی یافت. همچنان ارزیابی تأثیر 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 نیمه‌خشک) غالباً پس از وقوع بارش‌های رگباری به‌ویژه 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 تدوین شده در سطوح شهری است، در پژوهش حاضر سعی شده است پس از برآورد میزان رواناب حاصله از بارش طرح طی دوره بازگشت‌های مختلف، پاسخ هیدرولوژیکی حوضه مطالعاتی شهر نیشابور به اعمال یا عدم اعمال LIDهای تعریف‌شده ارزیابی گردد. از دستاوردهای حاصله از پژوهش حاضر، عموماً در کنترل و مدیریت سیلاب‌های 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.

به‌منظور شبیه‌سازی حوضه مطالعاتی از نسخه ۵/۲ مدل SWMM استفاده شد. در پژوهش حاضر روندیابی هیدرولیکی جریان از روش موج دینامیکی^۳ (حل کامل معادلات سنت‌ونانت) و فرایند نفوذ با توجه به دسترسی نویسنده‌گان 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 به‌صورت میدانی، برداشت و با روش جسم شناور (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.

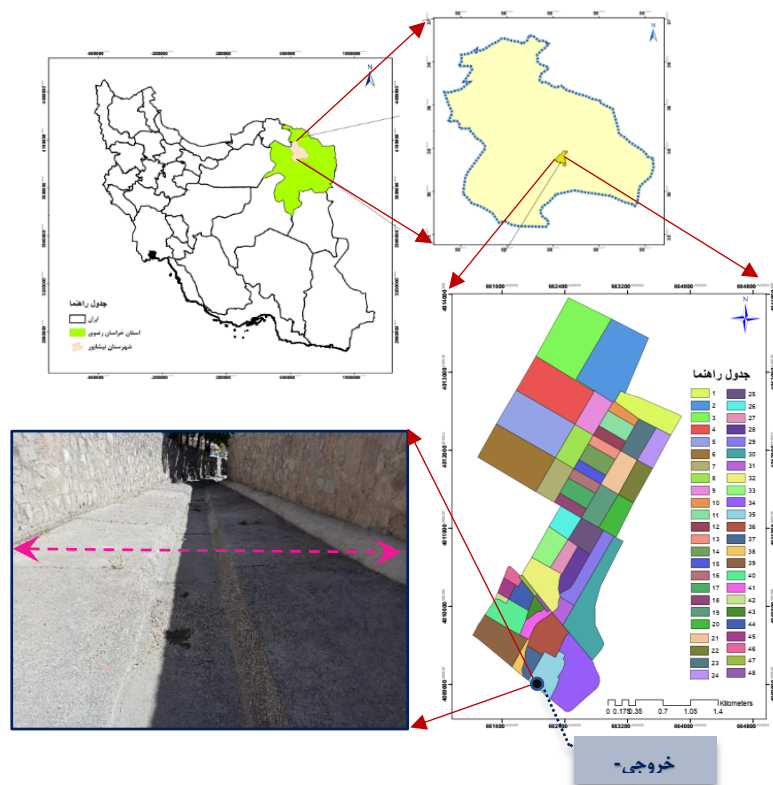


Figure 1. Geographical location, area of Neyshabur and cross-section of the main outlet channel of the study basin (taken by the first author)

۲.۲. شاخص‌های ارزیابی نتایج شبیه‌سازی

به‌منظور 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 پیش‌بینی‌شده 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 مشاهده‌ای است.

۳.۲. روش‌شناسی تحقیق

در این پژوهش، شبیه‌سازی کمی رواناب مطابق شکل (۲-ا) در حوضه‌ای به مساحت ۷/۱۳۹ کیلومترمربع، 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 (به‌غیر از گره خروجی) و ۷۵ کانال زهکشی است که در شکل (۲-ب) به‌صورت 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 برداشت‌شده 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 آیین نامه USDCM^۶ 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 خیابان ها) براساس میانگین وزنی ناحیه ها محاسبه و تدقیق گردید.

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

$r^2 = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2}} \right)^2$	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
Unsatisfactory if $NSE \leq 0.5$	Satisfactory if $0.5 < NSE \leq 0.75$
	Good if $0.65 < NSE \leq 0.75$
	Very good if $0.75 < NSE \leq 1.00$

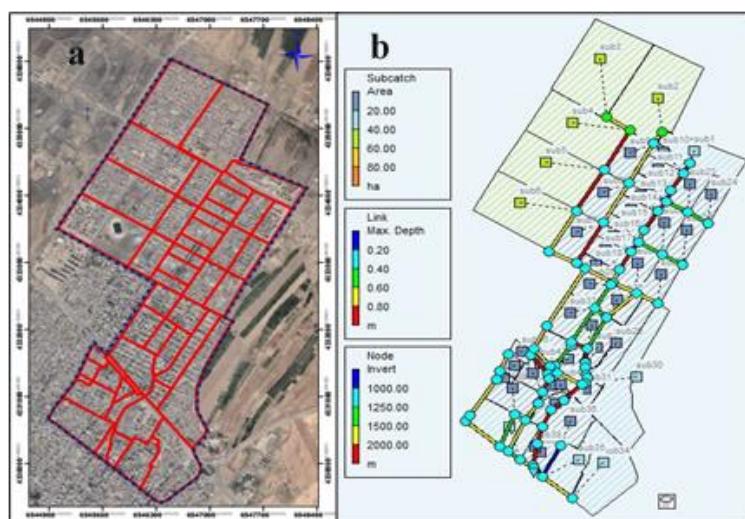


Figure 2. Schematic of the basin and sub-basins including nodes, channels and drainage channels modeled in SWMM

مقدار پارامتر زمان تمرکز حوضه شهر نیشابور با استفاده از سه روش کالیفرنیا، کریچ (اصلاح شده) و سازمان هوانوردی آمریکا به ترتیب ۷۶/۸، ۳۰/۵۶ و ۷۶/۳ برحسب دقیقه محاسبه شد. در این پژوهش، در نهایت 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 دو، پنج، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال براساس رابطه قهرمان (Arvand *et al.*, 2020) تعیین شد (شکل ۳- راست). در نهایت با محاسبه زمان تمرکز حوضه و براساس منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی، هیتوگراف باران طراحی با تداوم ۹۰ دقیقه برای دوره بازگشت دو، پنج 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 بازبندی‌های 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 مدیریتی (ترانسه نفوذ^۷، سیستم‌نگهداشت زیستی (مانند بیولوژیکی)^۸، سنگ‌فرش نفوذپذیر^۹، جوی باغچه^{۱۰}) به عنوان اقدامات اجرایی مؤثر در شهر نیشابور انتخاب و در مجموع با ایجاد شش سناریوی مدیریتی (شبیه‌سازی کمی بدون به کارگیری LID، لحاظ ماندبیولوژیکی، سنگ‌فرش نفوذپذیر، ترانسه نفوذ، جوی باغچه و تلفیق کلیه سناریوهای مدیریتی در شبیه‌سازی) که به ترتیب با سناریوهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ نامگذاری شدند، ارزیابی‌ها برای دوره بازگشت‌های دو، پنج و ۱۰ ساله انجام پذیرفتند.

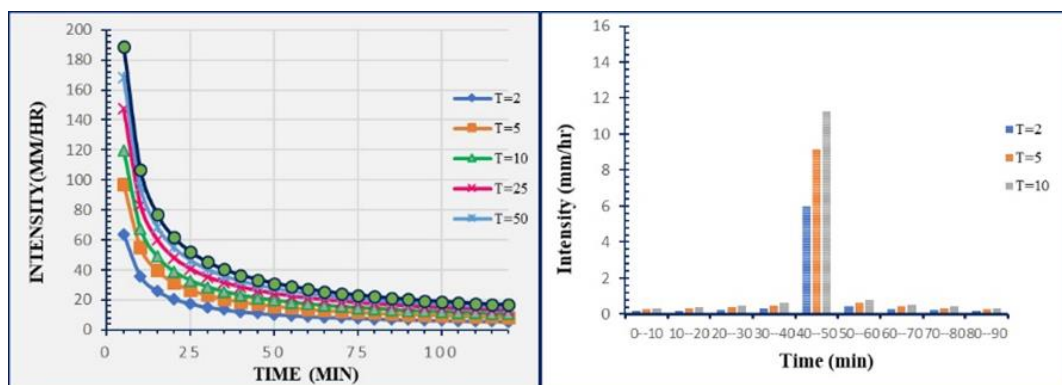


Figure 3. Intensity-duration-frequency curves with return periods of 2, 5, 10, 25, 50 and 100 (left side) and design barrage hyetograph with a duration of 90 minutes for the return period of 2, 5 and 10 years (right side) at the Neyshabur meteorological station

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)، نشان‌دهنده درصد سطوح نفوذناپذیر به عنوان حساس‌ترین پارامتر تأثیرگذار 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 نفوذپذیر 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 تأثیرگذار هستند، لذا بهینه‌سازی برخی از پارامترها به منظور کاهش خطای بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی رواناب سطحی شهر نیشابور در دامنه‌تغییرات 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

1. Each Sub-Basin has different Values

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

با استفاده از پارامترهای بهینه‌شده (میانگین مقادیر پارامترهای واسنجی‌شده) 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 نشان‌دادن میزان خطا برای دبی اوج در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی در محدوده کمتر از ۲۵ درصد، بیانگر کارایی قابل‌قبول 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 Omidi *et al.* (2020) Arjenaki *et al.* RMSE در مرحله واسنجی در محدوده ۰/۳-۰/۵ و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۲-۰/۳ (کوچک‌تر و نزدیک به صفر) بیانگر نتایج قابل‌قبول پیش‌بینی مدل و در توافق با نتایج Ebrahimpzadeh *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 به‌طور متوسط بیش‌تر از ۲۰ درصد نیست) حاکی از کالیبراسیون خوب مدل (برآورد خوب مدل در تعیین مؤلفه‌های جریان) در پیش‌بینی حجم کل جریان بوده است. لذا با تحلیل نتایج حاصله در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی و حدود قابل‌قبول و بهینه ضرایب برازندگی، دقت و کارآمدی مدل شبیه‌سازی‌شده برای تعریف سناریوهای تبیین‌شده در حوضه شهر نیشابور تأیید شد.

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

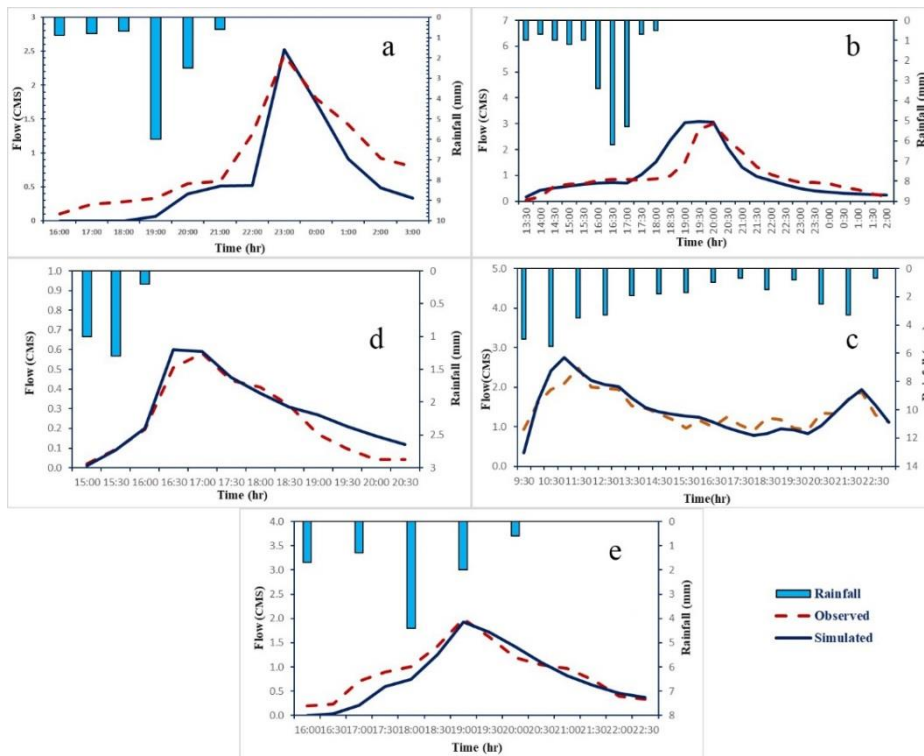


Figure 4. Observed and simulated rainfall hyetograph and hydrograph in the calibration stage for a: 25/11/1401, b: 29/11/1401, c: 04/01/1402 showers and in the validation stage for d: 24/12/1401, e: 13/01/1402 showers

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

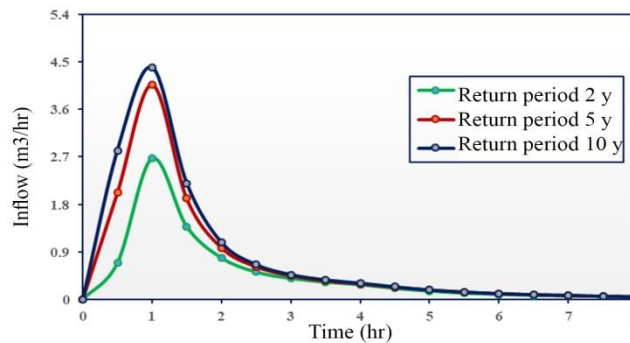


Figure 5. Hydrograph of the outlet point of the basin in the condition of not using LID for the design return period (2, 5 and 10 years)

نتایج به‌دست‌آمده با اعمال بارش طرح در دوره بازگشت‌های دو، پنج و ۱۰ ساله در حوضه آبریز مطالعاتی و اجرای مدل براساس سناریوهای تدوین‌شده مطابق شکل (۵) و جدول (۵) به شرح زیر می‌باشد.

۱- اولویت‌بندی برتری سناریوها براساس متوسط و درصد کاهش حجم رواناب به‌ترتیب عبارت است از تلفیق سناریوها، ترانشه‌نفوذ، جوی‌باغچه، سنگ‌فرش نفوذپذیر و ماندبیولوژیکی که بیش‌ترین تا کم‌ترین تأثیر را داشته‌اند (به‌ترتیب سناریوهای ۶

۴، ۵، ۳ و ۲). تفاوت تأثیر سناریوهای تدوین شده در کاهش میزان رواناب (پیک و حجم جریان) از چند مسئله ناشی می‌گردد 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 روش‌های توسعه کم‌اثر 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 LIDها و محدودیت‌ها، مساحت هر کاربری و فضای موردنیاز) به هر سناریو می‌باشد (شکل ۶). البته از بازدیدهای میدانی به عمل آمده نیز مشخص است که پیاده‌روها و معابر در سطح حوضه مطالعاتی (با عرض کم و روسازی نفوذناپذیر) درصد مساحت بالایی را به‌عنوان یکی از کاربری‌های مهم، سنتی و محرک تولید رواناب به خود اختصاص داده است. به‌طور کلی، LIDها در مکان‌ها و برای شرایط خاصی، براساس خصوصیات بالقوه‌ای که دارند جانمایی می‌گردند که با تلفیق سناریوها (ترکیب انواع LID) امکان این که نقاط ضعف یک LID را با نقاط قوت LID دیگری پوشش داد، میسر است. در توافق با یافته‌های Mozaffari and Kobarfard (2017)، با افزایش دوره بازگشت، عملکرد (درصد کاهش حجم جریان و پیک جریان) سناریوهای شش و یک (ترانسه نفوذ و تلفیق سناریوها) برخلاف سایر سناریوها، کاهش چشم‌گیری یافته است. براساس جدول (۵) عملکرد جوی‌باغچه نسبت به ماندبیولوژیکی و روسازی نفوذپذیر مناسب ارزیابی شد. هم‌چنین ترانسه‌نفوذ عملکردی (درصد کاهش حجم رواناب) بهتر نسبت به سایر سناریوها (به‌دلیل جاگذاری در زیرحوضه‌های بحرانی‌تر) داشته که در نهایت گزینه تلفیق سناریوها بهینه‌ترین عملکرد را نسبت به پاسخ‌های متناظر از هر سناریوی موردبررسی نشان داده که هم‌سو با یافته‌های Nazari et al. (2021) و Nahid et al. (2021) می‌باشد.

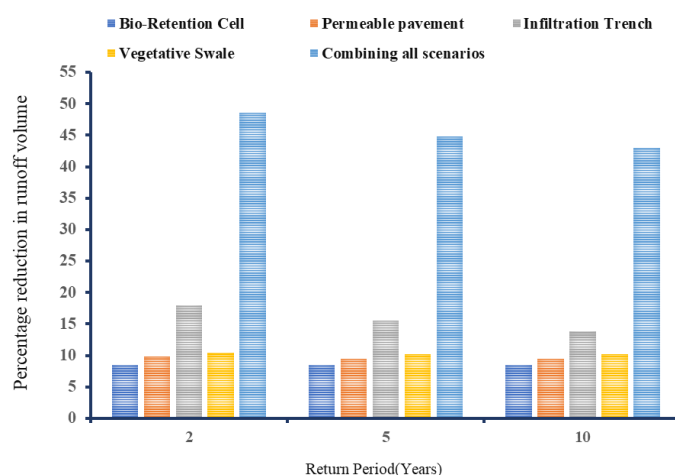


Figure 6. The percentage of reduction in the volume of outgoing runoff according to the selected scenarios (return period of 2, 5 and 10 years)

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	-
with LID	2	8.54	8.52	8.49	-8.51
	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. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با به‌کارگیری مدل شبیه‌ساز SWMM به بررسی تأثیر LIDهای منتخب در کاهش حجم رواناب شهر نیشابور تحت سناریوهای مختلف، به‌منظور راه‌حلی جهت مدیریت و کنترل آب‌گرفتگی معابر صورت گرفت. محدودیت‌های موجود در اجرای روش را می‌توان در ۱- برداشت میدانی خصوصیات حوضه مطالعاتی (عدم دسترسی به داده‌های شبکه زهکشی اعم از کانال‌ها و گره‌ها)، ۲- عدم وجود ایستگاه‌های هیدرومتری جهت واسنجی مدل عنوان نمود. آنالیز حساسیت مدل نشان داد که درصد نواحی نفوذناپذیر مؤثرترین پارامتر بر حجم و پیک رواناب تولیدی بوده است. همچنین نتایج شاخص‌های ارزیابی (ناش-ساتکلیف، مجذور میانگین مربع خطا، درصد بایاس و ضریب تعیین) در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی گواه عملکرد خوب مدل SWMM بودند. و بدین وسیله امکان بررسی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به رویدادهای بارش با دوره بازگشت‌های مختلف وجود داشت، اما براساس نتایج حاصله عدم استفاده از واسنجی (آنالیز حساسیت) سبب بروز خطا در برآورد سیلاب شهری می‌گردد. نتایج کلی حاصله را می‌توان اینگونه بیان داشت؛ الف- عملکرد روش‌های توسعه کم‌اثر به عوامل مختلفی نظیر شرایط جغرافیایی و هیدرولوژیکی منطقه، شرایط جغرافیایی و امکانات موجود، شرایط محیطی و کالبدی منطقه و ویژگی‌های LIDها بستگی دارد، ب- تلفیق سناریوها به‌عنوان جامع‌ترین راه‌کار اجرایی برای شهر نیشابور در جهت رسیدن به معیارهای موردنظر (مدیریت رواناب در محدوده شهری) است.

۵. پی‌نوشت‌ها

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. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. 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, A.M., & 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., Haghighi, 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., Ahmadali, 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, X., Jia, H., & Shaw, L. Y. (2017). Assessing the ecological benefits of aggregate LID-BMPs through modelling. *Ecological Modelling*, 353, 139-149.
- 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).