

## The Effect of Modifying the Existing Green Spaces Compared to Other Methods of Urban Flood Management in Reducing the Volume of Runoff (Case Study: Chahar-Cheshme River Basin, Mashhad)

Chahar-Cheshme River Basin, Mashhad)

A. M. Danesh<sup>1\*</sup>, A. Mosaedi<sup>2\*</sup>, A. R. Faridhosseini<sup>3</sup>,  
A. Ghiami Bajgirani<sup>4</sup>

1,2,3- M.Sc. Student in Water Resources, Professor and Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Agriculture Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. 4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Eqbal Lahoori Institute of Higher Education, Mashhad, Iran.

\* (Corresponding Author Email: [mosaedi@um.ac.ir](mailto:mosaedi@um.ac.ir))

Received: 22-06-2024

Revised: 06-10-2024

Accepted: 18-10-2024

Available Online: 19-02-2025

### Abstract

Flood is one of the natural events that in recent decades, due to the expansion of urbanization and land use changes, causes many financial and human losses in different regions of the world, annually. Therefore, flood management in cities by low-impact development methods has become crucial. The current research compares the performance of the approaches of rain gardens, storage units, and bio-retention cells to directing surface runoff to green spaces using the SWMM model for the Chahar-Cheshme River basin of Mashhad city. Due to the lack of a hydrometric station in the city, precipitation and peak flow in the channel were measured for 20 rainfall events from April 2023 to May 2024. The evaluation index including RMSE, NS, and KGE shows the appropriate performance of the model for peak flow estimation. The sensitivity analysis of the model showed that impervious area, width, and impervious area's roughness coefficient are the most effective parameters to the peak flood discharge, respectively. In terms of reducing the peak discharge and volume of the flood, bio-retention cells, runoff directing to green space, and rain gardens had the best performance, respectively. However, the bio-retention cells had the best performance, but considering operational and maintenance costs, and other conditions, modifying green spaces to direct surface runoff to these spaces is a better and more logical choice for flood management in the study area.

**Keywords:** Urban Flooding, Low-Impact Development, Runoff Modeling, SWMM.

## تاثیر اصلاح فضاهای سبز موجود در مقایسه با سایر روش‌های مدیریت سیلاب شهری در کاهش حجم رواناب (مطالعه موردی: حوضه چهارچشمه، مشهد)

امیر محمد دانش<sup>۱</sup>، ابوالفضل ماسعدی<sup>۲\*</sup>، علیرضا فریدحسینی<sup>۳</sup>،  
علی قیامی باجگیرانی<sup>۴</sup>

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، استاد و دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. ۴- استادیار، گروه عمران، آموزشگاه عالی اقبال لاهوری، مشهد، ایران.

\* (رایانامه نویسنده مسئول، [mosaedi@um.ac.ir](mailto:mosaedi@um.ac.ir))

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱

### چکیده

سیل یکی از وقایع طبیعی است که در دهه‌های اخیر با توسعه شهرنشینی و تغییر کاربری اراضی، سالانه خسارت‌های مالی و جانی بسیاری در مناطق مختلف جهان به همراه دارد. از این رو، مدیریت و کنترل سیلاب در شهرها با استفاده از روش‌های توسعه کم‌اثر، اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. در پژوهش حاضر، به مقایسه عملکرد سه رویکرد استفاده از باغچه باران، مخزن ذخیره و یا حوضچه نگهداشت زیستی با هدایت جریان‌های سطحی به فضاهای سبز موجود بر اساس مدل SWMM در حوضه مسیل چهارچشمه، شهر مشهد پرداخته شده است. به علت عدم وجود ایستگاه هیدرومتری در سطح شهر، برای ۲۰ رخداد بارش از فروردین ۱۴۰۲ تا اردیبهشت ۱۴۰۳، بارش در سطح حوضه اندازه‌گیری و دبی اوج رواناب در کانال اندازه‌گیری شد. معیارهای ارزیابی شامل NS، RMSE و KGE عملکرد مناسب مدل در برآورد دبی اوج را نشان می‌دهد. آنالیز حساسیت مدل نشان داد به ترتیب درصد سطوح نفوذناپذیر، عرض معادل و ضریب زبری سطوح نفوذناپذیر موثرترین پارامترها بر دبی اوج سیلاب هستند. از نظر کاهش دبی اوج و حجم سیلاب به ترتیب حوضچه نگهداشت زیستی، هدایت رواناب به فضای سبز و باغچه باران بهترین عملکرد را داشتند. در عین حال، با در نظر گرفتن هزینه‌های تملک، اجرایی، نگهداری و سایر شرایط، اصلاح فضاهای سبز به منظور هدایت رواناب‌های سطحی به این فضاها، انتخاب مناسب‌تری برای مدیریت سیلاب در محدوده مورد مطالعه می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** سیلاب شهری، توسعه کم‌اثر، مدل‌سازی بارش رواناب، SWMM.

رواناب، سازه‌های جانبی مانند پمپ و مدل‌سازی هیدرولیک جریان در کانال‌ها، این مدل عموماً در حوضه‌های شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل توسط Rossman در سال ۲۰۰۴ انتشار یافته است. از مهمترین مزیت‌های این مدل نسبت به سایر مدل‌ها، توانایی طراحی و تحلیل روش‌های توسعه کم‌اثر (LID) و تاثیر آن‌ها بر حجم رواناب به منظور برنامه‌ریزی شهری می‌باشد (سید کابلی و همکاران، ۱۳۸۸؛ Rossman، ۲۰۱۰).

تقی‌زاده و رجایی (۱۳۹۸) با استفاده از الگوریتم MOPSO و مدل SWMM یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه به منظور شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی منطقه ۲۲ تهران را ارائه نمودند. نتایج ایشان نشان داد با به‌کارگیری چهار سناریو ترانشه نفوذ، مخازن نگهداشت زیستی، روسازی نفوذپذیر (در ۲، ۴ و ۶ درصد از زیرحوضه‌های مطالعاتی) و روش ترکیبی برای دوره‌های بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ سال، می‌توان دبی اوج سیلاب را کاهش داد. ایشان به این نتیجه رسیدند که به‌کارگیری ترکیب بهینه هر سه رویکرد، منجر به کاهش ۵۱ تا ۵۴ درصد دبی اوج می‌شود. قشقایی‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) نشان دادند رویکرد بام سبز نسبت به جوی باغچه و سیستم ماند بیولوژیکی عملکرد بهتری در کاهش میزان حجم سیلاب و کنترل بار آلودگی در بخشی از شهر بندرعباس دارد. ایزانلو و شیخ (۱۳۹۷) با مقایسه ۶ راهکار مدیریتی شامل سیستم نگهداشت بیولوژیکی، بام سبز، ترانشه نفوذ، آسفالت نفوذپذیر، پیاده‌رو نفوذپذیر و بشکه باران در شهر بجنورد، در نظر گرفتن جنبه‌های هیدرولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی و با استفاده از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره TOPSIS و وزن‌دهی به روش آن‌روپی شانون به این نتیجه دست یافتند که در صورت تأکید بر معیار اجتماعی، ترانشه نفوذ و در صورت تأکید بر معیار اقتصادی راهکار بشکه باران و در صورت تأکید بر معیار هیدرولوژیکی راهکار بام سبز بهترین انتخاب‌ها می‌باشند. عقیلی‌مهابادی و همکاران (۱۴۰۰) نیز در تحقیقاتی مشابه با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره TOPSIS به مقایسه ۶ روش سیستم نگهداشت بیولوژیکی، ترانشه نفوذ، روسازی نفوذپذیر، بشکه باران و روش‌های ترکیبی روسازی نفوذپذیر-ترانشه نفوذ و سیستم نگهداشت بیولوژیکی-بشکه باران در سپاهان شهر استان اصفهان پرداختند. در حالت‌های وزن‌دهی یکسان و تأکید بر معیارهای هیدرولوژیکی و اقتصادی، روش ترکیبی سیستم نگهداشت بیولوژیکی-بشکه باران و در حالت وزن‌دهی آن‌روپی شانون، بشکه باران به‌عنوان بهترین روش انتخاب شدند. صلواتی و همکاران (۱۳۹۶) با انجام پژوهشی در شهر تبریز نتیجه گرفتند با طراحی مخازن جمع‌آوری آب‌های سطحی می‌توانند حدود ۴۸ درصد از نیاز آبی فضای سبز شهر را تأمین کنند. ناهید و همکاران (۱۴۰۱) با بررسی عملکرد جداگانه و ترکیبی دو مورد رویکردهای BMP در منطقه ۴ تهران با استفاده از مدل SWMM نتیجه گرفتند سناریو ترکیب طرح‌های جوی باغچه و بام سبز بیشترین تاثیر را در کاهش عمق و دبی جریان در کل شبکه زهکشی خواهد داشت.

سیل یکی از چند مخاطره طبیعی است که خطر وقوع و خسارات آن در طی زمان افزایش یافته است. دلیل این افزایش را می‌توان تغییرات آب و هوایی، گرمایش جهانی و همچنین فعالیت‌های مخرب بشری از جمله تغییر در شرایط طبیعی حوضه، قطع درختان، گسترش شهرسازی در حوضه‌های آبریز و حتی در داخل بستر و حاشیه رودخانه‌ها و آبراهه‌ها عنوان کرد (Fernandez و همکاران، ۲۰۱۶؛ Wang و همکاران، ۲۰۱۱؛ Nilawar و Waikar، ۲۰۱۹؛ Khan و همکاران، ۲۰۱۰). به دلیل این تغییرات، دبی پیک سیلاب بیشتر و در مدت زمان کمتری نسبت به حالت طبیعی به وقوع می‌پیوندد و دلیل آن افزایش سرعت جریان، افزایش ضریب رواناب، کاهش زمان تمرکز حوضه و افزایش سرعت تجمع جریان می‌باشد (بهیسانی، ۱۳۸۸). مطالعات نشان می‌دهد که در اثر افزایش ۳۱/۵ برابری مساحت شهر مشهد از سال ۱۳۲۰ تا سال ۱۳۹۵، دبی پیک سیلاب ۳۰۷ درصد افزایش داشته و زمان تمرکز نیز حدود ۹۰ دقیقه کاهش یافته است (خدانشناس و عزیزی، ۱۳۹۸). استفاده از بهترین روش‌های مدیریتی (BMP)<sup>۱</sup> و توسعه کم‌اثر (LID)<sup>۲</sup> راهکارهایی به منظور کاهش حجم، سرعت و آلودگی رواناب‌های شهری از طریق افزایش سطوح نفوذپذیر و ذخیره آب باران می‌باشند (قنواتی و همکاران، ۱۳۹۶؛ پورصاحبی و همکاران، ۱۳۹۵؛ پناهی و اسماعیلی، ۱۳۹۷). رویکردهای توسعه کم‌اثر به‌عنوان یک رویکرد جایگزین برای تقلید بهتر رژیم طبیعی جریان (بازگشت به شرایط قبل از توسعه) در حوضه آبخیز به‌منظور کنترل رواناب ناشی از رگبار ارائه شده است که شامل رویکردهای آسفالت نفوذپذیر، حوضچه نگهداشت زیستی، باغچه باران، بام سبز، مخزن ذخیره موقت، بشکه باران، برکه نفوذ، توسعه فضای سبز و امثال این‌ها می‌باشد (Damodaram و همکاران، ۲۰۱۰).

مطالعات سیلاب در حوضه‌های شهری به منظور برنامه‌ریزی و کنترل کمیت سیلاب و کاهش خسارات ناشی از آن با توجه به شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه به انجام می‌رسند (لطفی، ۱۳۹۷). مدل‌سازی رواناب در حوضه‌های شهری به دلیل پیچیدگی‌های فراوان و عدم وجود اطلاعات دقیق با دشواری‌ها و عدم قطعیت‌های زیادی روبه‌رو است. از جمله این پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌ها، می‌توان به تغییرات ضریب نفوذپذیری و یا ضریب مانینگ در سطح حوضه، عدم تعیین دقیق مساحت اراضی نفوذناپذیر و یا تغییرات زمانی و مکانی شدت بارندگی در سطح حوضه و در طول مدت بارندگی اشاره نمود. مدل دینامیک SWMM<sup>۳</sup> به‌عنوان ابزاری قدرتمند به منظور مدل‌سازی و مدیریت بارش-رواناب می‌باشد و می‌تواند برای یک واقعه سیلاب یا چند واقعه به‌صورت پیوسته (دبی روزانه، ماهانه و سالانه) کیفیت و کمیت رواناب را شبیه‌سازی نماید. با توجه به قابلیت‌های این مدل مانند طراحی کانال‌های جمع‌آوری رواناب سطحی، مشخصات کیفی

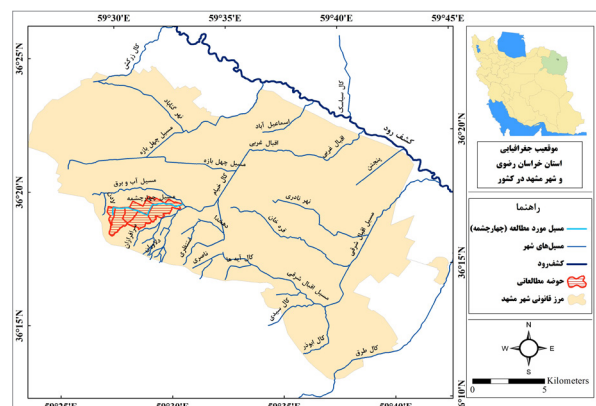
Maniquiz-Redillas و Frias (۲۰۲۱) در پژوهشی در کشور فیلیپین ۸ رویکرد شامل سلول نگهداشت زیستی، ترانسه نفوذ، روسازی نفوذپذیر، بشکه باران، باغچه باران، جوی باغچه، قطع ارتباط بام-ناودان و بام سبز را با استفاده از مدل SWMM (که برای چند سیل تاریخی واسنجی و صحت سنجی شده بود)، ارزیابی کردند. نتایج ایشان نشان داد سلول نگهداشت زیستی و ترانسه نفوذ بیشترین تأثیر را در کاهش حجم رواناب از میان سایر روش‌ها دارند. Li و همکاران (۲۰۱۷) با مقایسه روش‌های توسعه کم‌اثر (LID) با استفاده از SWMM در شهر Xi'an چین به این نتیجه رسیدند که حوضچه‌های نگهداشت زیستی، جوی باغچه‌ها و بام سبز به ترتیب بیشترین تأثیر را در کاهش دبی پیک و حجم رواناب دارند. پناهی و اسماعیلی (۱۳۹۷) با تفکیک روش‌های مدیریت سیلاب در سه سطح کاربرد؛ فضای سبز و مناظر، ساختمان‌ها و معابر (خیابان و کوچه)، بهترین روش در هر سطح را برای مناطق مختلف کشور بر اساس اقلیم آن منطقه پیشنهاد نمودند. Yang و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی با هدف ارزیابی عملکرد روش‌های LID در آلمان، هفت روش را با استفاده از مدل SWMM بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد این روش‌ها به طور قابل توجهی به کاهش رواناب سطحی در منطقه مورد مطالعه کمک می‌کنند و بشکه باران به‌عنوان اقتصادی‌ترین روش و ترکیبی از سناریوهای ترانسه نفوذ، روسازی نفوذپذیر و بشکه باران بهترین عملکرد را در کاهش و کنترل رواناب دارد. Joo و Kim (۲۰۱۸) در پژوهشی به ارزیابی عملکرد روش‌های توسعه کم‌اثر با استفاده از مدل EPA SWMM در یک دوره تک واقعه و بلندمدت ۱۱ ساله در کره جنوبی پرداختند. در این پژوهش، ۷ مورد از تجهیزات LID اجرا و مقایسه شدند که مشخص شد به طور میانگین تا ۷۶/۶ درصد دبی اوج را کاهش می‌دهد. van de Ven و Sui (۲۰۲۳) با بررسی تأثیر اجرای LID بر رواناب شهر سن آنتونیو، تگزاس با استفاده از یک چارچوب مدل مفهومی SUPERFLEX نشان دادند که رویکردهای روسازی‌های نفوذپذیر، سلول‌های حفظ زیستی و باغچه‌های گیاهی، دبی اوج رواناب را به میزان قابل توجهی کاهش و وقوع آن را به تعویق می‌اندازند. مطالعات صمیم و همکاران (۱۴۰۰) نشان داد به‌کارگیری هم‌زمان روش‌های احداث مخازن تأخیری، سیستم نگهداشت زیستی و بشکه باران بزرگ، موجب کاهش ۸۰ درصدی محل‌های آبگرفتگی و کاهش ۷۵ درصدی حجم سیلاب‌های موجود در ناحیه هشتم شهر هرات می‌شود.

Suresh و همکاران (۲۰۲۳) اثر اقدامات LID با طراحی مجدد سیستم زهکشی موجود در شمال شرقی هند با استفاده از مدل SWMM را مقایسه کردند و مشخص شد طراحی مجدد سیستم زهکشی تنها منجر به کاهش ۲/۵ تا ۳/۶ درصدی در عمق رواناب می‌شود، در حالی که رویکرد بام سبز به طور میانگین حدود ۴۹ درصد عمق جریان را کاهش می‌دهد. مهری و همکاران (۱۴۰۲) عملکرد سلول نگهداشت زیستی در یک منطقه متراکم در شرق تهران را

بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد این رویکرد برای دوره‌های بازگشت ۲ تا ۵۰ سال به ترتیب باعث افزایش نفوذ ۱۵/۲ تا ۲۷/۵ درصد بارندگی، کاهش حجم کل سیلاب ۷۶/۲ (در دوره بازگشت ۲ سال) تا ۷۰/۲ درصد (در دوره بازگشت ۵ سال) و کاهش دبی اوج ۶۵/۹ (در دوره بازگشت ۲ سال) تا ۳۶/۴ درصد (در دوره بازگشت ۵ سال) می‌شود. محمدحسن‌نژاد و همکاران (۱۴۰۳) با بررسی شبکه جمع‌آوری رواناب شهر باغین در استان کرمان برای دوره‌های بازگشت ۲۵ تا ۱۰۰ سال با استفاده از مدل SWMM به این نتیجه دست یافتند که به کمک رویکرد بام سبز می‌توان میزان خروجی جریان شبکه را تا ۳۰ درصد کاهش داد. Gündel و Önaç (۲۰۲۴) در منطقه‌ای حاشیه نشین در غرب ترکیه که دارای زیرساخت‌های مناسبی نمی‌باشد، کارایی روش‌های توسعه کم‌اثر با استفاده از مدل SWMM را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد در شرایط عادی ۷۰ درصد از بارش در این منطقه به رواناب سطحی تبدیل می‌شود و می‌توان با استفاده از رویکردهای آسفالت نفوذپذیر تا ۱۳ درصد، ترانسه نفوذ تا ۳۰ درصد، سلول نگهداشت زیستی تا ۲۹ درصد، بام سبز تا ۱۹ درصد، کانال سبز تا ۳۳ درصد، باغچه باران تا ۳۰ درصد و بشکه باران تا ۱۹ درصد از حجم رواناب را کاهش داد. امروزه شهرک‌های اسفنجی که زیرساخت آن‌ها بر مبنای تاسیسات توسعه کم‌اثر (LID) ساخته می‌شوند، در افزایش تاب‌آوری و پایداری مناطق شهری برای مدیریت رواناب ناشی از رگبارهای تحت تأثیر تغییرات اقلیم کاربرد دارند. در همین راستا Fei و همکاران (۲۰۲۳)، با استفاده از مدل SWMM عملکرد تاسیسات LID در یک نمونه آموزشی از شهرک‌های اسفنجی را در دوره‌های بازگشت ۵، ۱۰ و ۲۰ ساله ارزیابی کردند. نتایج ایشان نشان داد علاوه بر کاهش میزان قابل توجهی از دبی اوج و حجم کل رواناب، این تاسیسات به حذف ۷۵ درصد کل مواد جامد معلق (TSS) و حفظ ۱۷۵۲۴ کیلووات ساعت برق سالانه کمک می‌کند. در حالی که این شهرک (پردیس) آموزشی تنها ۹/۲ درصد از مساحت منطقه و ۱۵/۱ درصد از سهم کل ذخیره آب ورودی به منطقه را شامل می‌شود. همانطور که نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد، یک روش ثابت به‌عنوان بهترین راهکار برای مدیریت سیلاب وجود ندارد و در هر محدوده مطالعاتی نتیجه عملکرد روش‌های مدیریت سیلاب، متفاوت است. در شهر مشهد فضاهای سبز متنوعی شامل درختکاری‌ها، پارک‌های خطی و آیلندها موجود می‌باشد، اما معمولاً به علت جدول‌گذاری‌ها و قرارگیری سطح این فضاها در بالاتر از تراز آسفالت پیاده‌رو و ماشین‌رو، امکان استفاده از ظرفیت آنها به منظور دریافت رواناب و کاهش حجم سیلاب وجود ندارد. بنابراین، در پژوهش حاضر، علاوه بر بررسی سه مورد از روش‌های متداول مدیریت سیلاب، به شبیه‌سازی هدایت جریان رواناب‌های ناشی از بارش به فضاهای سبز موجود با استفاده از مدل SWMM و مقایسه نتایج آن‌ها و تعیین مناسب‌ترین روش در بین روش‌های مورد بررسی در مدیریت سیلاب حوضه چهار چشمه مشهد پرداخته شده است.

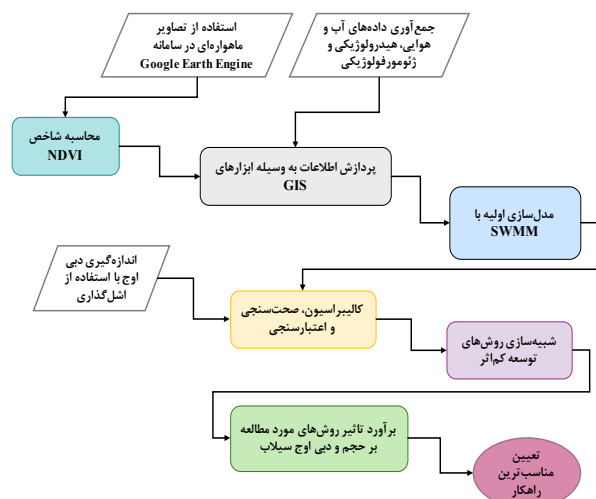
• محدوده مطالعاتی

شهر مشهد با مساحت ۳۲۸ کیلومتر مربع، دومین شهر پهناور ایران پس از تهران است. همچنین براساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵، مشهد با ۳۰۰۱۱۸۴ تن جمعیت، دومین شهر پرجمعیت ایران پس از تهران به‌شمار می‌رود. شهر مشهد در استان خراسان رضوی در حوضه رودخانه کشف‌رود قرار گرفته است. موقعیت شهر مشهد در کشور و مسیل‌های موجود در شهر در شکل (۱) مشخص شده است. مسیل مورد مطالعه از ارتفاعات جنوبی موجود و از محدوده پارک خورشید شهر مشهد سرچشمه گرفته که به مسیل چهارچشمه شناخته شده و با طول ۶۰۵۹ متر که اکثراً سرپوشیده است، تا پردیس دانشگاه فردوسی مشهد امتداد دارد و پس از پیوستن به مسیل آب و برق به سمت مسیل خیام جریان پیدا می‌کند. وسعت حوضه آبریز این مسیل ۶/۴ کیلومتر مربع می‌باشد. در شکل (۲) نیز ساختار کلی مراحل انجام این پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهر مشهد، مسیل‌های موجود و حوضه

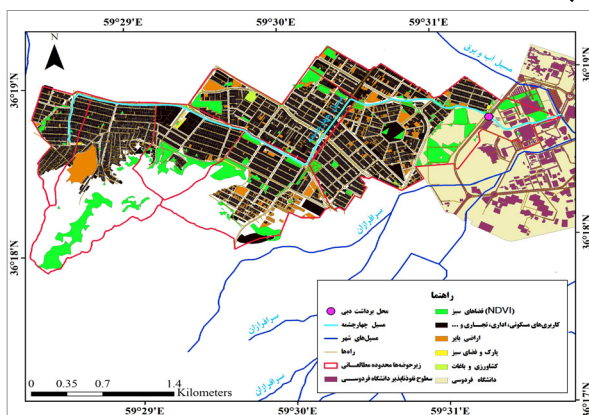
مطالعاتی



شکل ۲- ساختار کلی و مراحل انجام پژوهش

• شبیه‌سازی با استفاده از مدل SWMM

به‌طورکلی پارامترهای ورودی مدل SWMM شامل ۶ نوع اصلی از متغیرهای محیطی می‌باشد: ۱- داده‌های اقلیمی مانند بارش، دما، تبخیر و ...، ۲- مشخصات زمین شامل زیرحوضه‌ها و پارامترهای نفوذ ۳- مشخصات جریان‌های زیرسطحی، ۴- سیستم انتقال شامل لوله‌ها، کانال‌ها، گره‌ها، مخازن ذخیره و...، ۵- پارامترهای مربوط به کیفیت و آلودگی آب و ۶- کنترل‌های توسعه با اثرات کم یا IID. برای هر پروژه‌ای ورود تمامی این اطلاعات به مدل ضروری نمی‌باشد (Niazi و همکاران، ۲۰۱۷) و در برخی از پروژه‌ها مانند این پژوهش فقط داده‌های بارش، سیستم انتقال و مشخصات زمین لازم است. مرز زیرحوضه‌های مورد مطالعه با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۰۰۰، نقشه مسیر کانال‌ها، مسیل‌های زهکشی و نقشه بلوک‌های ساختمانی تعیین شده است. انواع سطوح هر زیرحوضه در این مدل به دو بخش سطوح نفوذپذیر و سطوح نفوذناپذیر تقسیم می‌شود که سطوح نفوذناپذیر خود به دو قسمت سطوح نفوذناپذیر با چلاب و سطوح نفوذناپذیر بدون چلاب تفکیک شده است. سطوح نفوذپذیر شامل پارک‌ها، بوستان‌ها، زمین‌های بایر و سایر فضاهای سبز شهری می‌باشد، سطوح نفوذناپذیر شامل ساختمان‌ها، منازل، معابر و ... می‌باشند که با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی طرح تفصیلی حوضه جنوب غرب شهر مشهد استخراج شد. البته بسیاری از سطوح نفوذپذیر در نقشه‌های کاربری اراضی دیده نشده است که شامل فضای سبز موجود در محوطه هتل‌ها، فضای سبز موجود در حاشیه و وسط بولوارها (آیلند)، فضای سبز و زمین‌های بایر موجود در پردیس دانشگاه فردوسی مشهد و امثال اینها می‌باشد. به همین منظور با استفاده از تصاویر سنجنده Sentinel 2 در سامانه GEE<sup>۴</sup> شاخص پوشش گیاهی (NDVI)<sup>۵</sup> استخراج شد. در نهایت اطلاعات استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای برای تدقیق میزان سطوح نفوذناپذیر زیرحوضه‌ها استفاده شد که نتیجه آن در شکل (۳) قابل مشاهده است.



شکل ۳- تعیین سطوح نفوذپذیر در زیرحوضه‌های مطالعاتی

اردیبهشت ۱۴۰۳) برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد.  

$$Q=1/n AR^{(2/3)} S^{(1/2)} \quad (1)$$
 در این معادله دبی مشاهداتی (Q)، مساحت سطح مقطع (A)، شعاع هیدرولیکی (R)، شیب کانال (S) و n ضریب زبری کانال است. مساحت و شعاع هیدرولیکی با توجه به ارتفاع آب در کانال محاسبه شد. ضریب زبری مانینگ (n) به عواملی مانند جنس زمین، نوع کاربری، نامنظمی سطح مقطع، پوشش گیاهی، شکل مسیر (مستقیم یا مارپیچ) و وجود مانع در جهت جریان بستگی دارد (حسینی و ابریشمی، ۱۳۷۹).

#### • شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل

در این پژوهش برای ارزیابی کمی عملکرد مدل از روابط ریاضی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب ناش-ساتکلیف (NS) و معیار کلینگ-گوپتا (KGE) به منظور بررسی میزان تفاوت مقادیر دبی اوج مشاهداتی و شبیه‌سازی استفاده شد.

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

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{O_i} - Q_{S_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{O_i} - Q_O)^2} \quad (3)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (4)$$

در این روابط دبی اوج مقادیر مشاهداتی  $Q_O$ ، مقادیر شبیه‌سازی  $Q_S$ ، میانگین مقادیر مشاهداتی  $Q_O$  و n تعداد داده‌های مشاهداتی یا شبیه‌سازی می‌باشد. هرچه میزان RMSE، کوچک‌تر باشد، تفاوت میان مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی کمتر بوده و دقت برآورد مدل بیشتر خواهد بود. ضریب ناش-ساتکلیف می‌تواند مثبت یا منفی باشد که بازه تغییرات آن بین  $-\infty$  تا یک است. اگر مقدار این ضریب مثبت باشد، نشان‌دهنده دقت بهتر مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به میانگین مقادیر مشاهداتی است و در صورتی که منفی باشد، به این مفهوم است که خروجی مدل با ماهیت سیستم متناظر نیست. کمترین مقدار قابل قبول آن در شبیه‌سازی ۰/۵ است و هر چه این ضریب به عدد یک نزدیک‌تر باشد، دقت شبیه‌سازی مدل بیشتر خواهد بود (Nash و Sutcliffe، ۱۹۷۰). معیار کلینگ-گوپتا، یکی از جدیدترین معیارها در زمینه ارزیابی مدل‌سازی هیدرولوژیکی است که توسط Gupta و همکاران (۲۰۰۹) معرفی شده است. در فرمول KGE، r ضریب همبستگی بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی،  $\alpha$  نسبت انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی به انحراف معیار مقادیر مشاهداتی و  $\beta$  نسبت میانگین مقادیر شبیه‌سازی به میانگین مقادیر مشاهداتی است. بهترین مقدار برای این معیار عدد یک می‌باشد که نشان از تطابق کامل مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی دارد.

سایر پارامترهای مربوط به مشخصات زمین مانند ضریب زبری سطوح و مقدار ذخیره چالابی سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر بر اساس جداول موجود در راهنمای مدل، برآورد شد. مقدار اولیه عرض زیرحوضه‌ها که به‌عنوان یکی از پارامترهای اصلی کالیبره نمودن مدل SWMM شناخته می‌شود، از تقسیم طول آبراهه بر مساحت زیرحوضه محاسبه شد. باتوجه به اینکه در فرایند شبیه‌سازی، شناخت تاثیر متفاوت پارامترهای ورودی به عنوان متغیرهای مستقل بر نتایج خروجی مدل نقش اساسی و مهمی دارد، به منظور بررسی نحوه تغییرات خروجی مدل در مقابل تغییرات پارامترهای ورودی، آنالیز حساسیت انجام شد. تعیین و آگاهی از پارامترهای تاثیرگذارتر با استفاده از آنالیز حساسیت، فرآیند صحت‌سنجی و واسنجی مدل را کوتاه‌تر و بهینه می‌نماید (Simonovic و Cunderlik، ۲۰۰۴). از بین پارامترهای ورودی، ۸ پارامتر مربوط به مشخصات زمین که شامل درصد شیب متوسط زیرحوضه، درصد سطوح نفوذناپذیر، ضریب زبری مانینگ سطوح نفوذناپذیر و سطوح نفوذپذیر، عرض معادل، چالاب سطوح نفوذناپذیر و سطوح نفوذپذیر و درصد سطوح نفوذناپذیر بدون چالاب انتخاب شدند. با هر مرتبه تغییر در ۸ پارامتر ورودی، مدل اجرا شده و تاثیر آن بر دبی اوج سیلاب ارزیابی شد. نتیجه آنالیز حساسیت به تعدیل یا اصلاح خروجی مدل کمک نمود. واسنجی، صحت‌سنجی و اعتبارسنجی مدل: به دلیل آنکه در سطح شهر ایستگاه هیدرومتری وجود ندارد، در یکی از بخش‌های مسیل اشل نصب شده و بیشترین عمق آب ناشی از باران در کانال قرائت شد (شکل ۴).



شکل ۴- نمونه‌ای از اندازه‌گیری‌های عمق آب در مسیل چهارچشمه (الف) بارش ۱۴۰۳/۲/۲۹ (ب) بارش ۱۴۰۳/۲/۱۹

این کانال در محل اندازه‌گیری دارای پوشش کف بتنی و دیواره سنگی می‌باشد، همچنین دارای یک مقطع مرکب می‌باشد که مقطع مستطیلی کوچک در وسط کانال به ابعاد ۲۵×۴۰ سانتی‌متر و مقطع بزرگ به ابعاد ۲/۱×۴/۳ متر می‌باشد. شیب کانال در محل اندازه‌گیری حدود ۰/۷ درصد می‌باشد. با استفاده از رابطه مانینگ مطابق رابطه (۱)، دبی اوج سیلاب ناشی از ۲۰ رخداد بارش از فروردین ۱۴۰۲ تا اردیبهشت ۱۴۰۳ اندازه‌گیری شد. ۸ رویداد اول برای واسنجی، ۸ رویداد بعدی برای صحت‌سنجی و ۴ رویداد آخر (بارش‌های سیل آسا

## • رویکردهای کنترل سیلاب

به منظور کنترل سیلاب رویکردهای مختلفی وجود دارند که در این پژوهش ۴ رویکرد با تاکید بر فضای سبز شهری مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۵). این ۴ رویکرد به شرح زیر می‌باشند.

### (۱) حوضچه یا مخزن ذخیره موقت (Storage Unit):

حوضچه‌های ذخیره، گودی‌های طبیعی یا مصنوعی هستند. حوضچه‌های نگهداشت می‌توانند موقت یا دائم باشند. حوضچه‌های نگهداشت موقت می‌توانند حجمی از رواناب را به طور موقت نگهدارند (فاصله بین دو بارش متوالی). همچنین نگهداشت رواناب در این حوضچه‌ها باعث ته‌نشینی مواد معلق و رسوبات حمل شده می‌شود. حوضچه‌های موقت تنها وظیفه کنترل و کاهش پیک سیلاب را دارد، اما حوضچه‌های دائم گیاهان و موجودات آبی دارند و کاربرد تفریحی، تغذیه آب زیر زمینی، آتش‌نشانی و ... نیز دارند (شکل ۵-الف).

### (۲) سیستم نگهداشت زیستی (Bio-Retention Cell):

این روش نیز مشابه باغچه‌های باران می‌باشد، با این تفاوت که در روش نگهداشت زیستی، رواناب‌های نفوذ داده شده با عبور از خاک وارد یک لایه سنگدانه شده و به صورت موقت در فضای خالی بین این ذرات ذخیره می‌شود (بدیع‌زادگان، ۱۴۰۰) و غالباً توسط یک لوله زهکشی در داخل این لایه، سیلاب وارد شده به این سیستم پس از پالایش وارد سیستم زه‌کشی پایینی می‌شود (شکل ۵-ب).

### (۳) باغچه باران (Rain Garden):

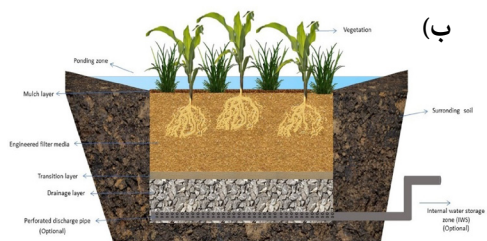
از نظر ظاهری یک سطح خاکی است که توسط گیاهان پوشیده شده است و همانند باغچه‌های معمولی هستند که با هدایت جریان‌های سطحی به داخل این باغچه‌ها، اجازه نفوذ آب به داخل خاک و ته‌نشینی ذرات معلق و رسوبات روی بستر آن‌ها داده می‌شود. ضمناً بخشی از این رواناب صرف افزایش رطوبت خاک و آبیاری فضای سبز موجود در آن می‌شود (شکل ۵-ج).

### (۴) ایجاد ارتباط بین فضای سبز و سطوح نفوذ ناپذیر (هدایت رواناب به فضای سبز شهری):

در سطح شهر مشهد، غالب فضای سبز شهری، از نظر اصول اجرایی؛ در هدایت، کنترل و نگهداشت رواناب‌های سطحی نقشی زیادی نداشته و دلیل آن نحوه جدول‌گذاری، شیب‌بندی نامناسب و غیرهمسطح بودن معابر نسبت به این فضاها می‌باشد (تراز باغچه‌ها و فضاها سبز شهری بالاتر از تراز معابر قرار دارد) که باعث عدم هدایت رواناب‌ها به داخل این فضاها می‌شود. این رویکرد به عنوان یک روش مرسوم در توسعه با اثرات کم شناخته نمی‌شود، اما یکی از قابلیت‌های مدل SWMM، شبیه‌سازی حرکت جریان (روندیابی) از سطوح نفوذناپذیر به سمت سطوح نفوذپذیر می‌باشد تا بتوان نتیجه این رویکرد را بررسی کرد (شکل ۵-د).



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵- روش‌های مدیریت سیلاب مورد مطالعه در پژوهش حاضر (الف) حوضچه ذخیره، (ب) حوضچه نگهداشت زیستی، (ج) باغچه باران، (د) هدایت رواناب به فضای سبز شهری

## نتایج و بحث

### • نتایج مدل‌سازی بارش - رواناب

بر اساس نتایج آنالیز حساسیت؛ در بین هشت پارامتر بررسی شده در این مطالعه، به ترتیب درصد سطوح نفوذناپذیر، عرض معادل زیرحوضه و ضریب زبری سطوح نفوذناپذیر بیشترین تاثیر و ذخیره چالاب سطوح نفوذپذیر و ضریب زبری سطوح نفوذپذیر کمترین تاثیر را بر دبی اوج سیلاب دارند که با نتایج زاهدی خامنه و خدانشاس (۱۴۰۰)، یاراحمدی و همکاران (۱۴۰۱) مطابق دارد. پس از اجرای مدل با پارامترهای ورودی اولیه محاسبه شده برای ۸ واقعه بارش از فروردین ۱۴۰۲ تا بهمن همان سال، مشخص شد که مدل کم‌برآورد است؛ در نتیجه نیازمند تغییر در پارامترهای ذکر شده بود. سپس برای پارامترهایی که مقدار اولیه بر اساس پایه

علمی قوی محاسبه نشده، میزان بیشتری از تغییرات اعمال شد. پس از بررسی و شناخت پارامترها، با تغییرات منطقی در چهار پارامتر، خروجی بهینه از مدل به دست آمد که البته این تغییرات اندک، حاصل محاسبه دقیق اولیه پارامترها می باشد. به عنوان مثال اگر به طور پیش فرض درصد اراضی نفوذناپذیر تمامی زیرحوضه ها، ۵۰ درصد تعیین می شد یا ضریب زبری سطوح نفوذناپذیر و یا عرض معادل یک مقدار ثابت برای تمام زیر حوضه ها در نظر گرفته می شد، مقادیر اولیه پارامترها نیازمند تغییرات بیشتری بود تا نتایج مورد نظر به دست آید.

نتایج آنالیز حساسیت و فرآیند واسنجی مدل، اهمیت پارامترهایی که تاثیر کمتری بر دبی اوج سیلاب دارد را نیز مشخص کرد. در بارش های کم، مانند بارش های روزهای ۱۳/۲/۱۴۰۲ و ۱۷/۱۰/۱۴۰۲ (مقدار بارش حدود ۲/۵ میلی متر) که دبی اوج ناشی از بارش، مقدار کمی می باشد، پارامترهای ذخیره چالاب سطوح نفوذناپذیر و درصد سطوح نفوذناپذیر بدون چالاب نقش اساسی در تنظیم و کالیبره نمودن مقادیر شبیه سازی ایفا می کنند، در حالی که تغییر در این پارامترها در دبی های اوج بیشتر از ۱ مترمکعب بر ثانیه، تاثیر بسیار ناچیزی دارد. در نتیجه ابتدا مقادیر دبی های اوج زیاد با استفاده از تاثیرگذارترین پارامترها، کالیبره شده و پس از آن با استفاده از دو پارامتر ذکر شده برای مقادیر دبی های اوج کم، شبیه سازی بهبود

یافته است. نتایج عملکرد مدل بر اساس شاخص های ذکر شده در مراحل واسنجی، صحت سنجی و اعتبارسنجی مدل در جدول (۱) ارائه شده است. بر این اساس، تمامی شاخص ها نشان از عملکرد بسیار خوب مدل در شبیه سازی دارند.

جدول ۱- نتیجه عملکرد مدل SWMM برای برآورد دبی اوج سیلاب در مراحل مختلف بر اساس شاخص های آماری

شاخص	واسنجی	صحت سنجی	اعتبارسنجی
RMSE ( $m^3/s$ )	۰/۰۵۹	۰/۱۱۶	۳/۵۰۹
NS	۰/۹۴۶	۰/۹۰۲	۰/۸۴۲
KGE	۰/۹۲۹	۰/۸۸۲	۰/۸۲۷

#### • ارزیابی روش های مدیریت سیلاب

نتایج شبیه سازی این رویکردها شامل حوضچه های نگهداشت زیستی (۵ درصد از حوضه مطالعاتی)، سه حوضچه ذخیره موقت، باغچه های باران (۵ درصد از حوضه مطالعاتی) و هدایت جریان به فضاهای سبز موجود و تاثیر آن ها بر دبی اوج و حجم سیلاب در سیلاب های رخ داده در ۱۲ رویداد بارش از فروردین ۱۴۰۲ تا فروردین ۱۴۰۳ بررسی شده است. مقایسه عملکرد رویکردهای مورد مطالعه بر اساس جدول (۲) می باشد.

جدول ۲- مقایسه کلی رویکردهای مدیریت سیلاب مورد بررسی در محدوده مطالعاتی

خصوصیت سیل	بدون LID	هدایت جریان به فضای سبز	حوضچه نگهداشت زیستی	حوضچه ذخیره موقت	باغچه باران
متوسط دبی اوج ( $m^3/s$ )	۱/۳۱۲	۰/۶۴۳	۰/۵۹	۱/۰۶۲	۰/۶۸۵
مجموع حجم سیلاب ( $10^3 m^3$ )	۲۰۰/۳۵۵	۹۹/۹۸۴	۹۵/۲۳۵	۱۴۲/۳۶۴	۱۰۸/۶۵۹
درصد کاهش دبی اوج	-	۵۰/۹	۵۵	۱۹/۱	۴۷/۸
درصد کاهش حجم سیلاب	-	۵۰/۱	۵۲/۵	۲۸/۹	۴۵/۸

در ۱۲ رویداد بارندگی مجموعاً ۷۱/۳ میلی متر بارش اندازه گیری شده که موجب تولید حدود ۲۰۰ هزار مترمکعب رواناب در خروجی حوضه مورد مطالعه شده است. سناریو حوضچه نگهداشت زیستی با بهترین عملکرد بیش از ۵۲ درصد از حجم سیلاب و ۵۵ درصد دبی اوج سیلاب را کاهش داده است. پس از آن، سناریو هدایت رواناب به فضای سبز عملکرد بسیار خوب و مشابهی داشته که حدود ۵۰ درصد از حجم سیلاب و همچنین ۵۱ درصد دبی اوج سیلاب را کاهش داده است. سناریو باغچه باران نیز عملکرد خوبی داشته و در مجموع ۴۷/۸ درصد دبی اوج و ۴۵/۸ درصد حجم سیلاب های رخ داده را کاهش داده است. اما سناریو حوضچه ذخیره موقت عملکردی به خوبی سایر سناریوها نداشته است. حوضچه های ذخیره موقت در بارش های کم عملکرد بسیار خوبی داشته است و تقریباً اکثر رواناب تولیدی را ذخیره می کنند، اما در بارش های زیاد و طولانی مدت، کارایی آن ها کاهش می یابد، به طور کلی این روش

به منظور ذخیره جریان سطحی و استفاده مجدد از آب ذخیره شده کاربرد دارد. برخلاف اینکه سناریو حوضچه نگهداشت زیستی بهترین عملکرد را دارد، اما با در نظر گرفتن ارزش اقتصادی زمین و هزینه های تملک اراضی، اجرایی- عملیاتی و نگهداری و سایر شرایط موجود می توان گفت که سناریو هدایت جریان به سمت فضاهای سبز شهری و آیلندهای موجود که از طریق اصلاح جدول گذاری ها، شیب بندی معابر و ایجاد امکان هدایت رواناب های ناشی از بارش به سمت این فضاها می باشد، می تواند انتخاب منطقی تر و بهتری برای مدیریت سیلاب در حوضه مطالعاتی باشد. البته متأسفانه در رابطه با کیفیت رواناب های شهری اطلاعات بسیار کمی در اختیار است. از این رو، پیشنهاد می شود که نمونه برداری از رواناب های شهر در رابطه با بررسی کیفیت جریان های سطحی از دیدگاه شیمیایی و بیولوژیکی انجام شود تا در صورت هدایت رواناب ها به فضاهای سبز، باعث آسیب به گیاهان و فضای سبز شهری نشود.

مدیریت سیلاب شهر مشهد توسعه داده شود تا با اعمال اثر هر پارامتر و همچنین تاثیر ترکیبی این پارامترها، گزینه بهینه در کنترل و مدیریت سیلاب شهر مشهد، مشخص و تدوین شود.

### تقدیر و تشکر

این مقاله در راستای اجرای طرح پژوهشی به شماره ۳/۶۰۷۱۲ به انجام رسیده است که از حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد تشکر و قدردانی می‌شود. از داوران محترم مقاله که در طی مراحل داوری نظرات ارزشمندی را ارائه نموده و اعمال آنها به کیفیت علمی مقاله حاضر کمک نمود، کمال تشکر و قدردانی را دارد.

### پی‌نوشت‌ها

- 1-Best Management Practice
- 2-Low Impact Development
- 3-Storm Water Management Model
- 4-Google Earth Engines
- 5-Normalized Difference Vegetation Index
- 6-Root Mean Square Error
- 7-Nash-Sutcliffe
- 8-Kling-Gupta Efficiency

### منابع

- ایزائلو، راضیه، و شیخ، واحدبدی. (۱۳۹۷). اولویت‌بندی سناریوهای مدیریت رواناب سطحی با استفاده از روش TOPSIS در حالت‌های مختلف وزن‌دهی (مطالعه موردی: شهر بجنورد). مجله آب و فاضلاب، ۲۹(۶)، ۱۵-۲۶. <https://doi.org/10.22093/wjw.2017.81822.2381>
- بدیع زادگان، رضا. (۱۴۰۰). ارزیابی عملکرد سیستم‌های نگهداشت و نفوذ بر کنترل سیلاب شهری (مطالعه موردی: قسمتی از حوضه آبریز شهر تهران). رساله دکتری رشته مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- بهبهانی، سید محمد رضا. (۱۳۸۸). هیدرولوژی آب‌های سطحی، جلد ۱. هیدرولوژی آب‌های سطحی. انتشارات دانشگاه تهران. چاپ دوم. تهران، ایران.
- پناهی، قاسم، و اسماعیلی، کاظم. (۱۳۹۷). توصیه رویکردهای نوین در مدیریت سیلاب شهری. آب و توسعه پایدار، ۵(۱)، ۹۳-۱۰۰. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v5i1.62583>
- پورصاحبی، عطیه، ذاکری نیری، محمود، و معظمی گودرزی، صابر. (۱۳۹۵). ارزیابی کاربردهای توسعه کم اثر LID و بهترین

در این پژوهش به شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه مسیل چهارچشمه شهر مشهد با استفاده از مدل SWMM پرداخته شد و با اندازه‌گیری دبی اوج در ۲۰ واقعه بارش از فروردین ۱۴۰۲ تا اردیبهشت ۱۴۰۳، کالیبراسیون، صحت‌سنجی و اعتبارسنجی مدل انجام شد. در نهایت به مقایسه عملکرد برخی از روش‌های رایج مدیریت سیلاب (توسعه کم‌اثر) از جمله باغچه باران، حوضچه نگهداشت زیستی، مخزن ذخیره موقت و امکان هدایت رواناب‌های سطحی به فضاهای سبز شهری موجود پرداخته شد. بخشی از این پژوهش با این فرض که امکان هدایت ۵۰ درصد از جریان ناشی از بارش به سمت فضاهای سبز موجود وجود داشته باشد، انجام شده است. بنابراین احداث فضای سبز جدید و یا تغییر کاربری اراضی مد نظر نبوده است. نتایج شبیه‌سازی، حاکی از عملکرد مشابه هدایت رواناب‌ها به فضاهای سبز با حوضچه نگهداشت زیستی (بهترین عملکرد) در کاهش دبی اوج و حجم سیلاب خروجی از حوضه است. در مجموع می‌توان با ایجاد امکان هدایت رواناب ناشی از بارش به سمت فضای سبز شهری، در بارش‌های کم (کمتر از حدود ۳ میلی‌متر) تقریباً از ایجاد رواناب در سطح شهر جلوگیری نمود و حتی در بارش‌های با شدت متوسط به بالا و یا مقدار بیشتر از ۵ میلی‌متر باز هم دبی اوج سیل و حجم سیل را تا میزان ۵۰ درصد و یا حتی بیشتر از آن کاهش داد. همچنین اگر اصلاح جدول‌گذاری و شیب‌بندی فضاهای سبز در دستور کار قرار گیرد، این بخش از معابر، پیش‌تر به فضاهای سبز شهری اختصاص داده شده و نیاز به هزینه‌های اضافی نمی‌باشد.

یکی از بزرگترین خطراتی که دشت مشهد را تهدید می‌نماید خشک‌شدن آبخوان دشت مشهد می‌باشد که بخش زیادی از مصارف آب شرب این شهر را تامین می‌نماید. از این‌رو، گزینه‌های مناسب برای کنترل سیلاب در شهر مشهد و در استان خراسان رضوی می‌توانند به گونه‌ای طراحی شود که حتی با هزینه بیشتر، بیشترین تغذیه آبخوان را از طریق نفوذ بیشتر تامین نماید. در این پژوهش یک دیدگاه اصلاحی نسبت به فضاهای سبز شهری و آپلندها ارائه شده است تا امکان هدایت رواناب به داخل این فضاها فراهم شود. به عبارت دیگر، به جای هزینه‌های اضافی برای طراحی، اختصاص فضا و زیرساخت مورد نیاز برای اجرای برخی از روش‌های توسعه کم‌اثر، پیشنهاد می‌شود از فضاهای موجود اختصاص داده شده برای فضاهای سبز شهری و ظرفیت موجود در این محدوده‌ها نه تنها برای گیرش و نگهداشت رواناب استفاده شود، بلکه با نفوذ آب به داخل خاک علاوه بر تامین بخشی از آب مورد نیاز گیاهان، امکان نفوذ عمقی و تغذیه سفره آب زیرزمینی (هرچند به میزان اندک) فراهم می‌شود. پیشنهاد می‌شود باتوجه به پارامترهای مختلف اثرگذار در ایجاد و کنترل سیل، یک مدل دینامیکی و تصمیم‌یار برای



۴۸۹۵-۴۹۱۲. <https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18619.6909>. قشقای زاده، نسیم، مرادی، عباس، ملکیان، آرش، حلی ساز، ارشک، و مهدوی، رسول. (۱۴۰۱). بهبود مدیریت رواناب شهری از لحاظ کمی و کیفی در بندرعباس با کمک رویکرد بهترین گزینه‌های عملیاتی (BMPs). مهندسی اکوسیستم بیابان، ۱۱(۳۷)، ۸۵-۹۹.

<https://doi.org/10.22052/deej.2023.248013.0>

قنواتی، رویت، زارع، مریم، میدان شاهی، پارسا و پوست فروش فرد، یاسر. (۱۳۹۶). ارایه راهکاری نوین جهت کنترل و حفظ رواناب سطحی با استفاده از تکنیک مدرن BMP (روکش نفوذپذیر). دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران. دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

لطفی، مرضیه. (۱۳۹۷). شبیه‌سازی رواناب سطحی در شهر بهارستان با استفاده از مدل کامپیوتری SWMM. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان، ایران.

محمدحسن نژاد، زهرا، قائینی حصاروئی، مهنان، و فدائی کرمانی، احسان. (۱۴۰۳). طراحی سیستم جمع‌آوری رواناب شهری با استفاده از مدل SWMM (مطالعه موردی: شهرک ولی عصر (عج) شهر باغین، کرمان). نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۴(۴)، ۳۳-۵۲. <https://doi.org/10.22125/iwe.2024.420970.1758>

مهری، میلاد، هاشمی شاهدانی، سید مهدی، جوادی، سامان، موحدی نیا، مریم. (۱۴۰۲). عملکرد واحدهای زیست‌ماند در بازیابی چرخه هیدرولوژیک حوضه‌های متراکم شهری. علوم آب و خاک، ۲۷(۳)، ۳۲۳-۳۳۵. <https://doi.org/10.47176/jwss.27.3.39234>

ناهد، مصطفی، زندمقدم، محمدرضا، و کرکه آبادی، زینب. (۱۴۰۰). سنجش و ارزیابی میزان تاب‌آوری در برابر سیلاب‌های شهری (مطالعه موردی: منطقه ۴ تهران). نشریه علمی - پژوهشی مرتع و آبخیزداری، ۱۷۴(۱)، ۱۸۹-۲۰۵. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2021.323575.1589>

یاراحمدی، یزدان، قضاوی، رضا، و قاسمیه، هدی. (۱۴۰۱). ارزیابی عملکرد شبکه‌ی جمع‌آوری رواناب‌های شهری مناطق نیمه خشک تحت تأثیر تغییر اقلیم. اکوهیدرولوژی، ۹(۴)، ۷۸۳-۷۹۵. <https://doi.org/10.22059/ije.2022.345568.1661>

Cunderlik, J., & Simonovic, S. P. (2004). Calibration, verification and sensitivity analysis of the HEC-HMS hydrologic model. Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario. Water Resources Research Report. 11. <https://ir.lib.uwo.ca/wrrrr/11>  
Damodaram, C., Giacomoni, M. H., Prakash Khedun, C., Holmes, H., Ryan, A., Saour, W., & Zechman, E.

روش‌های مدیریتی BMP بر کمیت و کیفیت سیلاب شهری مطالعه موردی منطقه ۲۲ تهران. کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران. دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تقی‌زاده، سودابه، و رجایی، طاهر. (۱۳۹۸). بررسی عملکرد و بهینه‌سازی جانمایی روش‌های نوین مدیریتی (LID-BMP) در بهبود کمیت رواناب سطحی شهر تهران- مطالعه موردی منطقه ۲۲. زمین‌شناسی مهندسی، ۱۲(۴)، ۲۱-۱. <https://sid.ir/paper/381460/fa>

حسینی، سید محمد، و ابریشمی، جلیل. (۱۳۷۹). هیدرولیک کانال‌های باز، جلد ۱. هیدرولیک کانال‌های باز. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). چاپ نوزدهم. مشهد، ایران.

خداشناس، سعیدرضا، و عزیز، جواد. (۱۳۹۸). بررسی تأثیر گسترش شهر مشهد بر سیلاب شهری بین سال‌های ۱۳۲۰ تا ۱۳۹۵. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۳(۴۵)، ۱۱۸-۱۲۸. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089554.1398.13.45.14.8>

زاهدی خامنه، حامد، و خداشناس، سعیدرضا. (۱۴۰۰). بررسی عملکرد سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی و تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر آن (مطالعه مناطق ۱۰ و ۱۱ مشهد). مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱۵(۵)، ۱۰۶۷-۱۰۸۰. <https://dor.isc.ac/dor/20.100.1.1.20087942.1400.15.5.7.5>

سیدکابلی، حسام، معاضد، هادی، دل‌قندی، مهدی، و همتی، محمد. (۱۳۸۸). پیش‌بینی کمی و کیفی فاضلاب‌های سطحی در حوضه‌های شهری با استفاده از نرم‌افزار EPA SWMM. پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران (مدیریت پایدار بلایای طبیعی). دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ساری، ایران.

صلواتی، پریسا، فاخری فرد، احمد، اسدی، اسماعیل، و اسدی، سهیل. (۱۳۹۶). تحلیل فرایند بارش- رواناب به منظور طراحی مخازن جمع‌آوری آب‌های سطحی برای توسعه فضای سبز شهری (مطالعه موردی: شهر تبریز). علوم مهندسی و آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، ۴۰(۲)، ۱۰۳-۱۱۷. <https://doi.org/10.22055/jise.2017.14365>

صمیم، صمیم، حاجیان، فرهاد، و معظمی، دانیال. (۱۴۰۰). مدیریت سیلاب ناحیه هشتم شهر هرات افغانستان با استفاده از روش‌های توسعه کم‌اثر و ارزیابی آنها با مدل EPA-SWMM. آب و توسعه پایدار، ۸(۴)، ۱۱۱-۱۱۸. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v8i4.2108.1076>

عقیلی مهابادی، نیلوفر، ظریف صناعی، حامد رضا، و هانفی، سیدمرتضی. (۱۴۰۰). اولویت‌بندی روش‌های توسعه کم‌اثر به منظور مدیریت رواناب سطحی شهری با استفاده از روش TOPSIS و Fuzzy TOPSIS (مطالعه موردی: شهرک سپاهان شهر اصفهان). مهندسی عمران امیرکبیر (امیرکبیر)، ۵۳(۱۱)،

- Li, J., Deng, C., Li, Y. et al. (2017). Comprehensive Benefit Evaluation System for Low-Impact Development of Urban Stormwater Management Measures. *Water Resour Manage* 31, 4745–4758. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1776-5>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Niazi, M., Nietch, C., Maghrebi, M., Jackson, N., Bennett, B. R., Tryby, M., & Massoudieh, A. (2017). Storm water management model: Performance review and gap analysis. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 3(2), 04017002. <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000817>
- Nilawar, A. P., & Waikar, M. L. (2019). Impacts of climate change on streamflow and sediment concentration under RCP 4.5 and 8.5: A case study in Purna river basin, India. *Science of the total environment*, 650, 2685-2696. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.334>
- Rossman, L. A. (2010). Storm water management model user's manual, version 5.0. US Environmental Protection Agency. Washington, DC., USA.
- Sui, X., & van de Ven, F. H. (2023). The influence of Low Impact Development (LID) on basin runoff in a half-urbanized catchment: A case study in San Antonio, Texas. *Journal of Hydrology*, 616, 128793. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128793>
- Suresh, A., Pekkat, S., & Subbiah, S. (2023). Quantifying the efficacy of Low Impact Developments (LIDs) for flood reduction in micro-urban watersheds incorporating climate change. *Sustainable Cities and Society*, 95, 104601. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104601>
- Wang, Y., Li, Z., Tang, Z., & Zeng, G. (2011). A GIS-based spatial multi-criteria approach for flood risk assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water resources management*, 25, 3465-3484. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9866-2>
- Yang, W., Brüggemann, K., Seguya, K. D., Ahmed, E., Kaeseberg, T., Dai, H., Hua P., Zhang J., & Krebs, P. (2020). Measuring performance of low impact development practices for the surface runoff management. *Environmental Science and Ecotechnology*, 1, 100010. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2020.100010>
- M. (2010). Simulation of Combined Best Management Practices and Low Impact Development for Sustainable Stormwater Management. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 46(5), 907–918. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00462.x>
- Fei, Y., Rene, E. R., Shang, Q., & Singh, R. P. (2023). Comprehensive effect evaluation of LID facilities implemented in sponge campuses: A case study. *Ecological Indicators*, 155, 110912. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110912>
- Fernandez, P., Mourato, S., & Moreira, M. (2016). Social vulnerability assessment of flood risk using GIS-based multicriteria decision analysis. A case study of Vila Nova de Gaia (Portugal). *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(4), 1367-1389. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1052021>
- Frias, R. A., & Maniquiz-Redillas, M. (2021). Modelling the applicability of Low Impact Development (LID) technologies in a university campus in the Philippines using Storm Water Management Model (SWMM). In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1153, No. 1, p. 012009), 23rd-25th January 2021. IOP Publishing, Johor, Malaysia. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1153/1/012009>
- Gündel, H., & Kalaycı Önaç, A. (2024). Simulating blue and green infrastructure tools via SWMM in order to prevent flood hazard in an urban area. *Natural Hazards*, 57(2), 1-25. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06868-8>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Khan, S. I., Hong, Y., Wang, J., Yilmaz, K. K., Gourley, J. J., Adler, R. F., Brakenridge, R., Policelli, F., Habib, S., & Irwin, D. (2010). Satellite remote sensing and hydrologic modeling for flood inundation mapping in Lake Victoria basin: Implications for hydrologic prediction in ungauged basins. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1), 85-95. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2057513>
- Kim, J., & Joo, J. (2018). Evaluation of low impact development using EPA SWMM-LID modeling. *EPiC Series Engineering*, 3, 1078-1074. <https://doi.org/10.29007/k8gk>