

# Numerical Modeling of the Performance of Bio-Infiltration Systems in Increasing Urban Infiltration

Mahdi Doosti, Majid Galoie\* and Mahdi Mahdikhani<sup>1</sup>

(Received: October 25-2025 ; Revised: December 24-2025 ; Accepted: December 30-2025)

1. Civil Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

\*Corresponding Author Email: [galavi@eng.ikiu.ac.ir](mailto:galavi@eng.ikiu.ac.ir)

## Abstract

Rapid urbanization and the expansion of impervious surfaces in urban areas can cause a reduction in infiltration rate, which consequently increases the flash floods and surface runoff in cities. In recent years, the use of bio-infiltration systems has been considered as one of the most effective approaches based on low-impact development (LID) for sustainable urban runoff management. In this study, the performance of six types of biological infiltration basins was investigated to reduce the volume of runoff and improve surface water management in the eastern region of Qazvin city. First, 40 years of rainfall data (1983–2023) were collected from the Qazvin meteorological station, and Intensity–Duration–Frequency (IDF) relationships were developed for various return periods. Six design scenarios were modeled: bioretention basins with and without a drainage system; tree boxes with and without a drainage system; infiltration trenches; and permeable pavements. The dimensions of all systems were kept constant to focus solely on hydrological performance without the influence of size or shape. Overall, using HEC-GeoHMS, SWMM, and MIDS models together offered a detailed and accurate framework for analyzing the hydrological behavior of bioretention systems in urban runoff management. Results showed that the runoff coefficients for the sub-basins averaged 0.79, highlighting the dominance of impervious surfaces in the area. These values were used as inputs for the MIDS model to simulate the six different bioretention scenarios. The results indicated that the permeable pavement scenario had the greatest effect on annual runoff reduction (about 728,555 m<sup>3</sup>), while the bioretention cell with a drainage system had the lowest performance. SWMM results, based on DEM-derived sub-catchment data, showed low soil infiltration and high impervious surface coverage. These conditions highlighted the importance of bioretention systems in reducing urban flooding. Overall, the study demonstrates that well-planned bio-retention and other green infrastructure can decrease peak flows, increase time of concentration, and improve urban hydrological and environmental conditions.

**Keywords:** Urban flood management, Bioretention basins, Water resources management, Groundwater, Infiltration management

**How to cite this article:** Doosti, M., Galoie, M. and Mahdikhani, M. 2026. Numerical Modeling of the Performance of Bio-Infiltration Systems in Increasing Urban Infiltration. *J. Water and Soil Sci.* 30(1): 145-159. DOI: [10.47176/jwss.30.1.35642](https://doi.org/10.47176/jwss.30.1.35642)

Copyright © 2026 Doosti et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

## مدل سازی عددی عملکرد حوضچه های نفوذ زیستی در افزایش نفوذ شهری

مهدی دوستی، مجید گلوئی\*  و مهدی مهدیخانی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۹)

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: [galavi@eng.ikiu.ac.ir](mailto:galavi@eng.ikiu.ac.ir)

### چکیده

رشد سریع شهرنشینی و گسترش سطوح نفوذناپذیر در مناطق شهری، سبب افزایش حجم رواناب های سطحی، کاهش نفوذ آب به سفره های زیرزمینی و در نتیجه بروز مشکلاتی همچون سیلاب های ناگهانی و آب گرفتگی معابر شده است. در سال های اخیر، به کارگیری سیستم های نفوذ زیستی به عنوان یکی از مؤثرترین رویکردهای مبتنی بر توسعه کم تأثیر (LID) برای مدیریت پایدار رواناب شهری مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، عملکرد شش نوع از حوضچه های نفوذ زیستی به منظور کاهش حجم رواناب و بهبود مدیریت آب های سطحی در ناحیه شرقی شهر قزوین مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، از داده های بارش ۴۰ ساله (۱۳۶۲ تا ۱۴۰۲) استفاده شد و روابط شدت - مدت - دوره بازگشت (IDF) استخراج شد. سپس با بهره گیری از الحاقیه Hec-GeoHMS، زیر حوضه های منطقه مورد مطالعه تعیین شد. برای برآورد دبی رواناب و ضریب رواناب مؤثر، از مدل SWMM استفاده گردید که میانگین ضریب رواناب منطقه ۰/۷۹ محاسبه شد. در ادامه، برای ارزیابی عملکرد سیستم های نفوذ زیستی، مدل عددی MIDS به کار گرفته شد و شش سناریو شامل حوضچه نفوذ زیستی با و بدون زهکش، جعبه درختی با و بدون زهکش، ترانشه نفوذی و پیاده رو نفوذپذیر، تحت شرایط بارش با دوره بازگشت ۴۰ ساله شبیه سازی شدند. نتایج مدل سازی نشان داد که پیاده رو نفوذپذیر بیشترین کارایی را در کاهش حجم رواناب داشته و توانست بیش از ۷۲۸'۰۰۰ مترمکعب رواناب را نفوذ دهد؛ در حالی که حوضچه نفوذ زیستی با زهکش کمترین میزان اثربخشی را داشت. به طور کلی، یافته های این پژوهش بیانگر آن است که طراحی اصولی، انتخاب موقعیت مناسب، توجه به ویژگی های خاک و شرایط هیدرولوژیک منطقه از عوامل تعیین کننده در افزایش کارایی سامانه های نفوذ زیستی و تحقق مدیریت پایدار رواناب شهری محسوب می شوند.

واژه های کلیدی: مدیریت سیلاب شهری، حوضچه های نفوذ زیستی، مدیریت منابع آب، آب زیرزمینی و مدیریت نفوذ

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

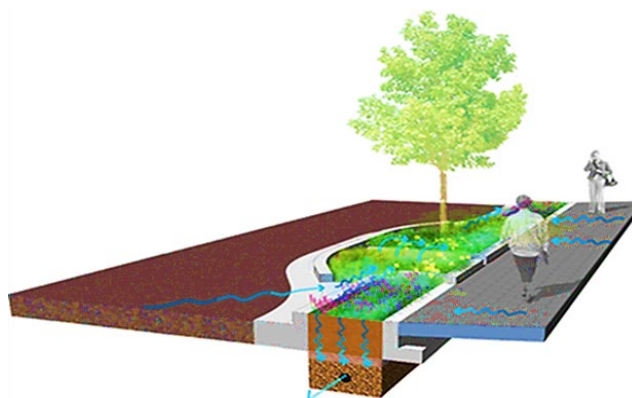


## مقدمه

گسترش و توسعه نواحی شهری و صنعتی‌شدن نواحی کشاورزی و به تبع آن افزایش روند شهرنشینی سبب افزایش سطوح نفوذناپذیر شهری همچون: آسفالت‌ها، سنگ‌فرش معابر، ساختمان‌ها و... شده است که باعث کاهش شدید نفوذپذیری رواناب به داخل خاک شده و باعث دگرگونی هیدرولوژی شهری می‌شود (۸). این عوامل منجر به افزایش حجم رواناب، اوج رواناب و کاهش شدید تغذیه آب‌های زیر زمینی شده و باعث ایجاد مخاطراتی همچون: آب‌گرفتگی معابر، سیل، آلودگی رواناب‌ها، آسیب‌های اجتماعی و اقتصادی می‌شود (۴). در بیشتر شهرهای جهان سیستم‌های زهکشی و انتقال آب سستی توانایی پاسخگویی به حجم انبوه رواناب نداشته و باعث ایجاد مشکلات زیادی می‌شوند (۱۵). در سال‌های اخیر، استفاده از رویکردهای نوین و پایدار در مدیریت رواناب شهری مورد توجه خاصی قرار گرفته است. در میان این رویکردها، به‌کارگیری حوضچه‌های نفوذ زیستی (Bioretention Basins) مطابق شکل ۱ به‌عنوان یکی از راهکارهای مبتنی بر طبیعت اهمیت ویژه‌ای یافته است (۱۰). این حوضچه‌ها علاوه بر کاهش حجم رواناب، به بهبود کیفیت آن از طریق فیلتر کردن و کاهش آلاینده‌ها کمک کرده و همچنین باعث تغذیه بهتر منابع آب زیرزمینی می‌شوند (۵). به دلیل وجود فضای سبز، این حوضچه‌ها نقش مؤثری در ارتقای زیبایی بصری محیط‌های شهری نیز ایفا می‌کنند (۱۷). حوضچه‌های نفوذ زیستی معمولاً از لایه‌های مختلفی شامل خاک، شن، پوشش‌های گیاهی و در برخی موارد زهکش‌های تحتانی تشکیل شده‌اند که فرایند جذب، فیلتر کردن مواد معلق و شیمیایی، کاهش رواناب و افزایش نفوذپذیری آب به سفره‌های زیرزمینی را فراهم می‌کنند (۳ و ۲۲). ساختار انعطاف‌پذیر این سیستم سبب می‌شود بتوان آنها را با شرایط اقلیمی، جنس خاک و محدودیت‌های فضایی انطباق داد (۲۳). با توجه به اثرهای مثبت زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی، بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه به سمت استفاده گسترده از این رویکرد حرکت کرده‌اند. در همین راستا،

پژوهش حاضر با هدف بررسی عملکرد حوضچه‌های نفوذ زیستی از نظر کاهش حجم رواناب و بهبود کیفیت آن در شرایط اقلیمی خاص انجام می‌شود (۱). افزون بر ابعاد فنی و زیست‌محیطی، حوضچه‌های نفوذ زیستی دارای مزایای اقتصادی و اجتماعی نیز هستند. اجرای این سیستم‌ها در مقایسه با توسعه و نگهداری زیرساخت‌های خاکستری سستی هزینه‌های کمتری را به مدیریت شهری تحمیل می‌کند و از سوی دیگر موجب ارتقای کیفیت زندگی شهروندان می‌شود (۱۸). همچنین حضور این سیستم‌ها در بافت شهری به ایجاد فضاهای سبز جدید، بهبود آسایش حرارتی، ارتقای سلامت روانی ساکنان و افزایش تعاملات اجتماعی کمک می‌کند؛ بنابراین حوضچه‌های نفوذ زیستی را می‌توان به عنوان یکی از راهکارهای کلیدی برای تحقق اهداف توسعه پایدار شهری و تاب‌آورسازی شهرها در برابر تغییرات اقلیمی قلمداد کرد (۸).

پژوهش‌های پیشین نیز بر اهمیت و کارایی این رویکرد تأکید داشته‌اند. در سال ۲۰۲۰ یک پژوهش حوضچه‌های حفظ زیستی را در شهر ملبورن استرالیا در مساحت ۳۳ هکتار مورد مطالعه قرار داد که بر اساس نتایج حاصله مشخص شد که حوضچه‌های نفوذ زیستی باعث کاهش اثرهای نامطلوب شهر شده و حجم کل رواناب ناشی از نزولات جوی را تا درصد قابل توجهی کاهش می‌دهد و همین‌طور کیفیت آب را تا حد استاندارد بهبود می‌بخشد (۱۲). همچنین در مطالعه‌ای حوضچه‌های نفوذ زیستی را بررسی کردند. نتایج حاصله حاکی از آن است که متداول‌ترین BMP‌های مورد استفاده مانند حوضچه‌های نگهداری، تالاب‌ها و چمن‌زارها، هرچند پتانسیل کاهش حجم رواناب را ارائه می‌دهند؛ ولی در مورد حذف آلاینده‌ها بسیار ضعیف عمل می‌کنند. اغلب مواد مورد استفاده در این حوضچه می‌توان به کمپوست، کربن فعال، رس، زئولیت و ماسه اشاره کرد. خاک رس و زئولیت برای حذف فلزات استفاده می‌شود (۱۹). اکبری‌ان و همکاران (۱۴۰۴) کاهش نفوذپذیری خاک در سامانه‌های تغذیه مصنوعی در اثر ته‌نشینی مواد معلق بررسی کردند که نتیجه حاکی از آن است که ته‌نشینی مواد معلق باعث انسداد منافذ خاک شده و نفوذپذیری را کاهش می‌دهند (۲).



شکل ۱. تصویر شماتیک از حوضچه نفوذ زیستی

دادند. آنها هشت فناوری توسعه کم‌تأثیر (LID) شامل حوضچه نفوذ زیستی، ترانشه نفوذ، باغ باران، بام سبز، روسازی نفوذپذیر، بشکه باران، چمن‌زارها را بررسی کردند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که ۶۰ درصد از رواناب ناشی از بارندگی با دوره بازگشت یک‌ساله کنترل‌شده و رواناب سطحی یک زیرحوضچه با استفاده از حوضچه نفوذ زیستی، ترانشه نفوذ، باغ باران بیش از ۸۰ درصد کاهش یافته است (۹). این مطالعات و سایر مطالعات مشابه (۱۳)، نشان می‌دهد که حوضچه‌های نفوذ زیستی به عنوان بخشی از راهکارهای توسعه کم‌تأثیر، نقشی اساسی در مدیریت پایدار رواناب شهری، کاهش اثرهای منفی ناشی از توسعه شهری و بهبود کیفیت آب دارند و می‌توانند به عنوان یک رویکرد کلیدی در طراحی و برنامه‌ریزی شهری مورد توجه قرار گیرند.

### مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف بررسی و ارزیابی عملکرد انواع مختلف حوضچه‌های نفوذ زیستی در کاهش حجم رواناب سطحی ناشی از نزولات جوی در محدوده شرقی شهرستان قزوین انجام شده است. روش‌شناسی این پژوهش مبتنی بر یک رویکرد مرحله‌ای شامل شناسایی ویژگی‌های اقلیمی و هیدرولوژیک منطقه مورد مطالعه، گردآوری داده‌های پایه، پردازش اطلاعات محیطی، بهره‌گیری از نرم‌افزارهای مدل‌سازی و طراحی سناریوهای مختلف برای ارزیابی حوضچه‌های نفوذ زیستی

رنجبری و همکاران (۱۴۰۳) به بررسی نرم‌افزار sewerGEMS در شبیه‌سازی رواناب شهری بر اساس تعداد و مساحت زیرحوضه‌ها پرداختند که نتیجه نشان می‌دهد میزان حجم رواناب در حالت نه زیرحوضه ۴ درصد و بیشینه دبی اوج رواناب ۲۰ درصد بیشتر از هفده زیرحوضه است (۲۱). لی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی حوضچه‌های نفوذ کنار جاده‌ای پرداخته‌اند. تأسیسات حفظ زیستی کنار جاده‌ای (RBR) نوعی از شیوه‌های توسعه کم‌تأثیر هستند که رواناب حاصل از بارندگی را عمدتاً از روی روسازی جاده‌ها جمع‌آوری می‌کند و تأثیر قابل توجهی در حفظ رواناب‌ها دارند و میزان درصد نفوذ آب به درون خاک را تا میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد (۱۲). لولین (۲۰۱۹) انواع سناریوهای طراحی حوضچه نفوذ زیستی را بسته به عمق حوضچه، عمق خاک و نفوذ خاک بومی بررسی کرد. بر اساس یافته‌های این مطالعه، افزایش عمق حوضچه می‌تواند نفوذپذیری و درصد حذف رواناب را به صورت چشمگیری افزایش دهد (۱۱). در زمینه طراحی و کاهش ریسک، زمانی که فضا در طراحی حوضچه نفوذ زیستی محدود است، عمق حوضچه باید در اولویت قرار گیرد. سیستم‌های نفوذ زیستی با هدایت هیدرولیکی بومی خاک بیشتر می‌توانند در کاهش خطر حتی زمانی که فضای حوضچه محدود است، ارزشمند باشند (۲۰). فریاز و مانیکویز (۲۰۲۱)، رویکردهای توسعه کم‌تأثیر (LID) را با مطالعه موردی دانشگاه دلاسال واقع در پردیس لاگونا کشور فیلیپین مورد بررسی قرار

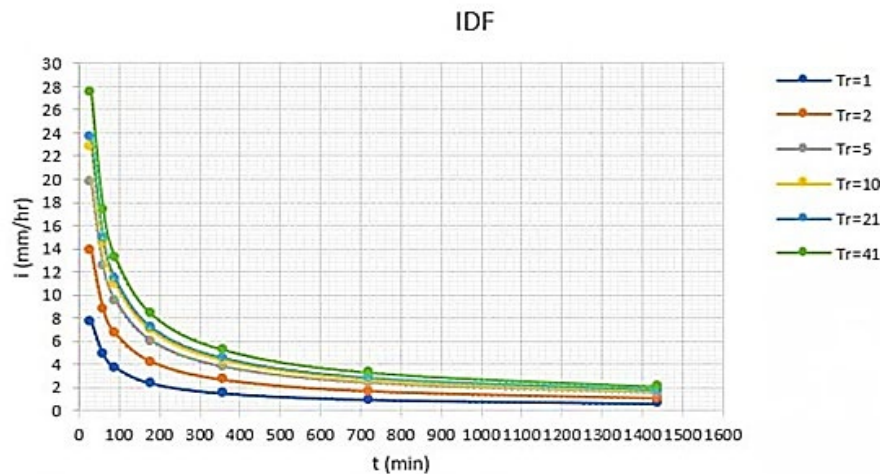
بوده است. برای انجام مدل‌سازی و ارزیابی عملکرد سیستم‌های نفوذ زیستی در کاهش رواناب، مجموعه‌ای از داده‌های محیطی، اقلیمی و هیدرولوژیک گردآوری شد که نقش کلیدی در تعریف ورودی مدل‌ها و تحلیل نتایج داشتند. در این راستا، ابتدا داده‌های بارش ۴۰ ساله متوالی (۱۳۶۲ الی ۱۴۰۲) از ایستگاه هواشناسی واقع در شهرستان قزوین گردآوری شد. با استفاده از مقادیر بارش بیشینه در بازه‌های زمانی مختلف، منحنی‌های شدت - مدت - دوره بازگشت (IDF) برای دوره‌های بازگشت ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۱ و ۴۱ ساله ترسیم شد که این منحنی‌ها مبنای اصلی طراحی و شبیه‌سازی بارش‌های شدید در مدل هیدرولوژیک بودند. برای تعیین رابطه شدت - مدت - دوره بازگشت، داده‌های بارش سالانه بیشینه از ایستگاه‌های هیدرولوژیک منطقه جمع‌آوری شد و مقادیر بارش برای مدت‌های مختلف از ۵ دقیقه تا ۲۴ ساعت استخراج گردید. سپس با استفاده از تحلیل فراوانی بارش و توزیع آماری گامبل، مقدار بارش متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف محاسبه شد که در شکل ۲ ارائه شده است. در ادامه، شدت بارش به‌عنوان تابعی از مدت بارش و دوره بازگشت برازش شد و ضرایب مدل با روش حداقل مربعات تعیین شد. این رابطه IDF به‌عنوان ورودی مدل SWMM برای شبیه‌سازی رواناب در زیرحوضه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. معادله IDF استخراج‌شده برای منطقه در معادله ۱ ارائه شده است.

$$i = \frac{95 \times t_r^{0.16}}{t^{0.67}} \quad (1)$$

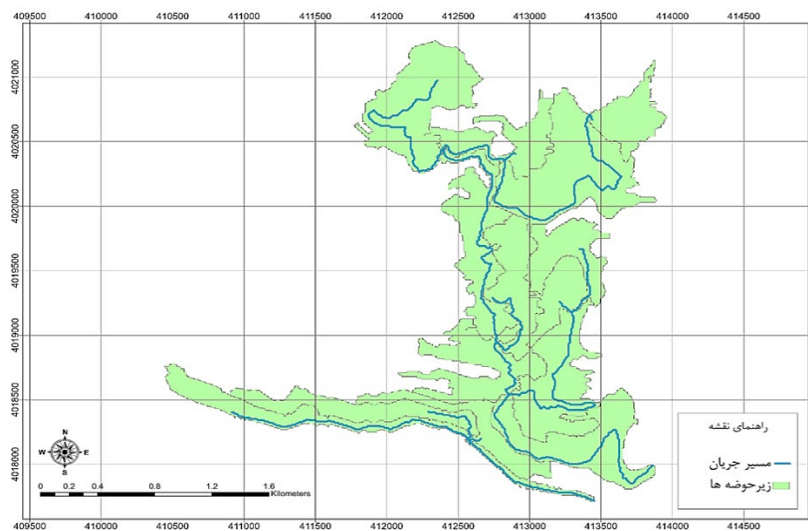
برای تعیین ویژگی‌های کاربری اراضی در محدوده مورد مطالعه، ابتدا لایه‌های مکانی (Shapefile) مرتبط گردآوری و در محیط ArcGIS پردازش شدند. پس از انجام مراحل پیش‌پردازش و تصحیح توپوگرافی، طبقه‌بندی کاربری اراضی با استفاده از تحلیل‌های مکانی و روش‌های تفسیر تصویر انجام شد. در نتیجه، کاربری‌های عمده شامل اراضی مسکونی، کشاورزی و فضاهای سبز شناسایی و تفکیک شد. بر اساس این طبقه‌بندی، نسبت سطوح نفوذناپذیر (مانند سطوح آسفالتی و بتنی)،

نیمه‌نفوذپذیر (از جمله چمن‌زارها و اراضی خاکی متراکم) و نفوذپذیر (شامل باغات و اراضی کشاورزی) با دقت محاسبه شد. این تفکیک نقشی اساسی در تعیین رفتار هیدرولوژیک حوضه و به‌ویژه برآورد حجم رواناب دارد. در ادامه، ویژگی‌های خاک منطقه به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در فرایند نفوذ مورد بررسی دقیق قرار گرفت. داده‌های مرتبط با بافت خاک، عمق لایه‌های سطحی و ظرفیت نگهداری آب، از طریق آزمایش‌های مکانیک خاک انجام‌شده روی گمانه حفار شده در محدوده مطالعه استخراج شد. این اطلاعات برای تعیین پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی مانند هدایت هیدرولیکی، ظرفیت نفوذ و رفتار رطوبتی خاک ضروری بود. به منظور انجام مدل‌سازی هیدرولوژیک و آماده‌سازی داده‌های ورودی، از نرم‌افزار ArcGIS همراه با الحاقیه Hec-GeoHMS استفاده شد. مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت ۱۰ متر وارد محیط GIS شد و پس از اعمال تصحیحات لازم، پارامترهای توپوگرافیک شامل شیب، جهت جریان، نقاط تمرکز جریان و مرزهای حوضه استخراج شد. مطابق شکل ۳ تحلیل‌های حاصل نشان داد که محدوده مطالعه به ۱۶ زیرحوضه مستقل (قسمت عمده این زیرحوضه‌ها در خارج از محدوده شهر قرار دارند) تفکیک می‌شود که هر یک دارای ویژگی‌های متفاوتی از نظر مساحت، شیب، درصد نفوذپذیری و نوع کاربری هستند. این ساختار تفکیکی مبنای اصلی تعریف ورودی‌ها و تنظیم پارامترهای مدل در مراحل بعدی شبیه‌سازی هیدرولوژیک قرار گرفت.

در گام دوم، به‌منظور شبیه‌سازی فرایند بارش - رواناب و تحلیل رفتار هیدرولوژیک حوزه مورد مطالعه از مدل SWMM (Storm Water Management Model) استفاده شد. دلیل انتخاب این مدل آن است که نرم‌افزار MIDS اساساً بر مبنای شرایط اقلیمی، خاکی و پارامترهای طراحی ویژه ایالت مینه‌سوتای آمریکا توسعه یافته و بسیاری از مفروضات و ضرایب آن با ویژگی‌های اقلیمی و هیدرولوژیک ایران و به‌ویژه استان قزوین همخوانی ندارد. در مقابل، مدل SWMM به دلیل



شکل ۲. نمودار IDF منطقه قزوین در دوره بازگشت‌های ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۱ و ۴۱ ساله



شکل ۳. زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه

دربردارنده تبخیر، نفوذ، چالاب و برگاب است بیشتر باشد، رواناب تشکیل می‌شود. میزان رواناب در نرم‌افزار مربوطه توسط معادله مانینگ محاسبه می‌شود (معادله ۲) و همچنین عمق آب در سطح هر زیرحوضه به صورت پیوسته توسط حل عددی محاسبه می‌شود.

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

در این معادله:

Q: دبی (مترمکعب بر ثانیه)

A: سطح مقطع جریان (مترمربع)

انعطاف‌پذیری زیاد در تعریف مشخصات حوزه‌های آبریز، امکان اعمال شرایط بومی و قابلیت شبیه‌سازی دقیق سامانه‌های مدیریت رواناب شهری، به‌عنوان گزینه اصلی در این پژوهش انتخاب شد.

نرم‌افزار SWMM از معادلات پیوستگی (بقای جرم، انرژی)

و مومنتوم در محاسبات خود استفاده می‌کند. به منظور محاسبه میزان رواناب در نرم‌افزار SWMM، هر زیرحوضه مانند یک مخزن عمل کرده؛ به‌طوری که جریان‌های ورودی که دربردارنده نزولات جوی، ذوب برف و... است، از میزان تلفات که

R: شعاع هیدرولیکی (متر)

S: میزان شیب

n: ضریب زبری مانینگ

$$\text{کاهش حجم از کف حوضچه (معادله ۳):}$$

$$V_{inf} = I_R (DDT) \left( \frac{A_B}{12 \frac{\text{in}}{\text{ft}}} \right) = 0.06(DDT)(DDT) \left( \frac{A_B}{12 \frac{\text{in}}{\text{ft}}} \right) \quad (۳)$$

که در آن:

IR: نرخ نفوذ به خاک‌های بومی ۰/۰۶ اینچ در ساعت

$A_B$ : مساحت سطح پایین حوضچه

DDT: زمان کاهش رواناب (hr) است.

کاهش حجم در اثر زهکش (معادله ۴):

$$V_a = \left( \frac{A_U + A_B}{2} \right) (n - FC) D_U \quad (۴)$$

که در آن:

$A_U$ : مساحت سطح حوضچه در زیر زهکش

$A_B$ : مساحت سطح پایین حوضچه

(n-FC): کسر تخلخل از ظرفیت خاک

$D_U$ : عمق حوضچه از زهکش تا انتها

کاهش حجم از طرفین حوضچه (معادله ۵):

$$V_{inf} = I_R \left( \frac{DDT}{2} \right) \left( \frac{A_O - A_U}{12 \frac{\text{in}}{\text{hr}}} \right) = 0.06 \left( \frac{DDT}{2} \right) \left( \frac{A_O - A_U}{12 \frac{\text{in}}{\text{hr}}} \right) \quad (۵)$$

که در آن:

$A_O$ : مساحت سطح بالایی حوضچه

$A_U$ : مساحت سطح حوضچه در زیر زهکش

DDT: زمان کاهش (hr)

به‌طورکلی، تلفیق توانمندی‌های سه نرم‌افزار HEC-GeoHMS، SWMM و MIDS این امکان را فراهم ساخت تا فرایند مدل‌سازی با دقت و جامعیت بیشتری انجام شود.

در تمامی این سناریوها ابعاد هندسی به‌صورت ثابت و یکسان در نظر گرفته شد تا امکان مقایسه دقیق بین گزینه‌ها فراهم شود. مشخصات طراحی شامل طول ۶۰ متر، عرض ۱/۵ متر و تعداد ۱۰ واحد برای هر نوع سیستم بوده و این ابعاد در

در گام سوم، ارزیابی عملکرد هر یک از سناریوهای طراحی حوضچه‌های نفوذ زیستی با استفاده از نرم‌افزار MIDS (Minimal Impact Design Standards) انجام شد. ابزاری تخصصی برای تحلیل و طراحی سازه‌های کنترل با کمترین تأثیر (LID/BMP) است که قابلیت محاسبه و گزارش‌گیری شاخص‌های کلیدی عملکرد هیدرولوژیک را داراست. ورودی‌های اصلی مدل شامل مشخصات هندسی هر سازه (طول، عرض، عمق و تعداد واحدها)، پارامترهای خاک، مشخصات پوشش گیاهی داخل سازه‌ها و پارامترهای اقلیمی منطقه است. MIDS برای هر سناریو شاخص‌هایی از قبیل حجم ورودی رواناب، حجم ذخیره‌سازی موقت داخل سازه، درصد کاهش حجم رواناب نسبت به وضعیت پایه و شاخص‌های اولیه مرتبط با ارتقای کیفیت آب (مانند حذف توده رسوبی و کاهش کسر آلاینده‌ها در خروجی) را محاسبه می‌کند. داده‌های خروجی به‌صورت سالانه استخراج شد تا امکان مقایسه کمی بین سناریوها فراهم شود. برای افزایش قابلیت مقایسه، پارامترهای هندسی سازه‌ها در تمامی سناریوها ثابت نگه داشته شد و تنها نوع سازه و وضعیت زهکشی (با یا بدون زهکش) تغییر داده شد. گفتنی است که تحلیل حساسیت پارامترهای کلیدی مانند هدایت هیدرولیکی خاک و درصد سطح نفوذپذیر در حوزه انجام شده تا حساسیت نتایج به عدم قطعیت‌های ورودی ارزیابی شود. همچنین محدودیت‌های مدل‌سازی از جمله فرضیات مربوط به همگنی خاک درون سازه، مقیاس مدل‌شده برای کف‌پوش نفوذپذیر و عدم شبیه‌سازی کامل فرایندهای کیفی پیچیده در تفسیر نتایج مد نظر قرار گرفتند. این چارچوب تحلیلی امکان سنجش کمی اثربخشی هر سناریو در کاهش رواناب و ارائه توصیه‌های طراحی مبتنی بر شواهد را فراهم ساخت.

معادلات حاکم بر کاهش حجم رواناب به شرح زیر است:

رواناب مطرح هستند. انتخاب این شش سیستم به دلیل تنوع در نحوه عملکرد هیدرولوژیک، شرایط اجرایی و میزان انطباق‌پذیری با بافت شهری منطقه مورد مطالعه صورت گرفت.

### منطقه مورد مطالعه

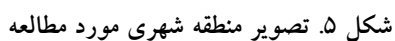
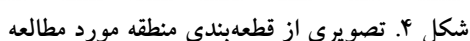
منطقه مورد مطالعه در بخش شرقی شهرستان قزوین واقع شده و بخشی از شمال شرقی این شهر را با مساحت تقریبی  $4/74$  کیلومتر مربع دربرمی‌گیرد (مساحت حوزه آبریز این منطقه، طبق شکل ۴ برابر با  $34/5$  کیلومتر مربع است). این محدوده مطابق شکل ۵ از سمت شمال به آزادراه قزوین-تهران، از سمت شرق به رودخانه باراجین، از سمت جنوب به بلوار معلم و از سمت غرب به بلوار سردار قاسم سلیمانی محدود می‌شود. مطالعات ژئوتکنیکی منطقه نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از خاک منطقه دارای نفوذپذیری متوسط است؛ این ویژگی بر فرایند نفوذ و عملکرد حوضچه‌های زیستی در مدیریت رواناب تأثیر مستقیم دارد. نتایج حاصل از آزمایش‌های مکانیک خاک نشان داد که بافت غالب خاک از نوع شن لای دار همراه با ماسه با نفوذپذیری  $5 \times 10^{-6}$  میلی‌متر بر ثانیه است. شرایط اقلیمی منطقه نیمه‌خشک بوده و بارندگی عمدتاً در فصول پاییز و زمستان رخ می‌دهد. میانگین بارش سالانه حدود  $320$  میلی‌متر و متوسط دمای سالیانه در حدود  $14$  درجه سانتی‌گراد است. الگوی بارش منطقه عموماً کوتاه‌مدت اما با شدت نسبتاً زیاد بوده که منجر به تولید رواناب سریع و افزایش خطر وقوع سیلاب‌های شهری می‌شود. این شرایط در کنار توسعه سطوح نفوذناپذیر، ضرورت استفاده از راهکارهای نوین و پایدار مدیریت رواناب مانند حوضچه‌های نفوذ زیستی را برجسته می‌کند. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به‌عنوان الگویی برای سایر مناطق شهری مشابه در کشور که با مشکلات هیدرولوژیک و محدودیت‌های نفوذ خاک مواجه‌اند، مورد استفاده قرار گیرد.

### نتایج و بحث

فرایند انجام مدل‌سازی که در این پژوهش بر پایه تقسیم حوضه

کلیه سناریوها بدون تغییر باقی ماند. هدف از این یکسان‌سازی، حذف اثرگذاری متغیرهای هندسی و تمرکز بر تحلیل تفاوت‌های عملکردی ناشی از ویژگی‌های ذاتی هر سیستم نفوذ زیستی بود؛ به بیان دیگر، نتایج به‌دست‌آمده به‌طور مستقیم بازتاب‌دهنده قابلیت‌های هیدرولوژیک و اکولوژیک هر نوع سیستم بوده و نه متأثر از تغییرات ابعاد یا ظرفیت فیزیکی آنها. به منظور شبیه‌سازی دقیق‌تر شرایط واقعی و ارزیابی جامع، فرایند مدل‌سازی در قالب چهار قطعه اصلی انجام شد (مطابق شکل ۴). در هر قطعه، سناریوهای مختلف نفوذ زیستی به طور مستقل و تحت شرایط مشابه بارش و رواناب مورد تحلیل قرار گرفتند. این رویکرد باعث شد تا مقایسه نتایج نه‌تنها در سطح کلی حوضه آبریز، بلکه در مقیاس خردتر و در چهار بخش مجزای منطقه نیز امکان‌پذیر شود. بدین ترتیب، در هر یک از این قطعات، شش نوع سیستم نفوذ زیستی مدل‌سازی و خروجی‌های مربوط به شاخص‌هایی همچون حجم کل رواناب، میزان ذخیره‌سازی و درصد کاهش رواناب به طور جداگانه محاسبه و سپس با یکدیگر مقایسه شد. همچنین گفتنی است که به دلیل محدودیت‌های نرم‌افزار، سناریوی مربوط به کف‌پوش نفوذپذیر تنها در مساحت معادل یک‌پنجم مساحت زیرحوضه مدل‌سازی شد؛ بنابراین نتایج حاصل از این سناریو در مقایسه با سایر سناریوها باید با در نظر گرفتن این محدودیت تفسیر و تحلیل شود.

با توجه به شرایط اقلیمی و خاکی منطقه، نتایج حاصل می‌تواند مبنای مناسبی برای انتخاب بهینه‌ترین گزینه‌های مدیریتی در محیط‌های شهری مشابه قرار گیرد. به منظور ارزیابی جامع و مقایسه‌ای عملکرد سیستم‌های نفوذ زیستی در مدیریت رواناب شهری، شش سناریوی متفاوت طراحی و مدل‌سازی شد. این سناریوها شامل حوضچه نفوذ زیستی بدون زهکش تحتانی، حوضچه نفوذ زیستی با زهکش تحتانی، کف‌پوش یا پیاده‌رو نفوذپذیر، جعبه درختی بدون زهکش، جعبه درختی با زهکش، و ترانشه نفوذی هستند که هر یک از آنها به‌عنوان یکی از رویکردهای پرکاربرد توسعه کم‌اثر (LID) در مدیریت پایدار



بر اساس خروجی های نرم افزار MIDS، نتایج عددی حجم رواناب سالانه حذف شده در هر سناریو مطابق جدول ۱ به ترتیب

۱۵۳

جدول ۱. نتایج مدل سازی انواع سناریوهای حوضچه نفوذ زیستی

| مشخصات عملکردی حوضچه های نفوذ زیستی        |                |                                           |                |                                           |                |                                           |                |                                           |                       |
|--------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------|-----------------------|
| سناریو ها                                  | قطعه اول       |                                           | قطعه دوم       |                                           | قطعه سوم       |                                           | قطعه چهارم     |                                           | جمع (m <sup>3</sup> ) |
|                                            | درصد<br>عملکرد | رواناب<br>کاهش یافته<br>(m <sup>3</sup> ) | درصد<br>عملکرد | رواناب<br>کاهش یافته<br>(m <sup>3</sup> ) | درصد<br>عملکرد | رواناب<br>کاهش یافته<br>(m <sup>3</sup> ) | درصد<br>عملکرد | رواناب<br>کاهش یافته<br>(m <sup>3</sup> ) |                       |
| سناریو اول<br>(حوضچه نفوذ زیستی بدون زهکش) | ۱۷٪            | ۱۲۷۳۳/۵۴                                  | ۳٪             | ۱۴۸۵۷/۳۶                                  | ۱۱٪            | ۱۴۷۶۶/۴۲                                  | ۸٪             | ۱۳۴۹۹/۵۲                                  | ۵۵۸۶۶/۸۴              |
| سناریو دوم<br>(حوضچه نفوذ زیستی با زهکش)   | ۷٪             | ۵۲۴۳/۲۲                                   | ۱٪             | ۴۹۵۲/۴۵                                   | ۴٪             | ۵۳۷۳/۲۴                                   | ۳٪             | ۵۰۶۲/۳۲                                   | ۲۰۶۳۱/۲۴              |
| سناریو سوم<br>(کفپوس نفوذ پذیر)            | ۸۴٪            | ۶۲۹۱۸/۶                                   | ۸۳٪            | ۴۱۱۰۵۳/۶۹                                 | ۸۴٪            | ۱۱۲۸۳۸/۱۲                                 | ۸۴٪            | ۱۴۱۷۴۴/۹۶                                 | ۷۲۸۵۵۵/۴۶             |
| سناریو چهارم<br>(جعبه درختی بدون زهکش)     | ۱۳٪            | ۹۷۳۷/۴۱                                   | ۲٪             | ۹۹۰۴/۹۰                                   | ۸٪             | ۱۰۷۴۶/۴۸                                  | ۷٪             | ۱۱۸۱۲/۰۸                                  | ۴۲۲۰۰/۸۹              |
| سناریو پنجم<br>(جعبه درختی بازهکش)         | ۱۰٪            | ۷۴۹۰/۳۱                                   | ۲٪             | ۹۹۰۴/۹۰                                   | ۶٪             | ۸۰۵۹/۸۶                                   | ۵٪             | ۸۴۳۷/۲۰                                   | ۳۳۸۹۲/۲۹              |
| سناریو ششم<br>(ترانشه نفوذی)               | ۱۶٪            | ۱۱۹۸۴/۵۰                                  | ۳٪             | ۱۴۸۵۷/۳۶                                  | ۱۰٪            | ۱۳۴۳۳/۱۱                                  | ۸٪             | ۱۳۴۹۹/۵۲                                  | ۵۳۷۷۴/۵۰              |

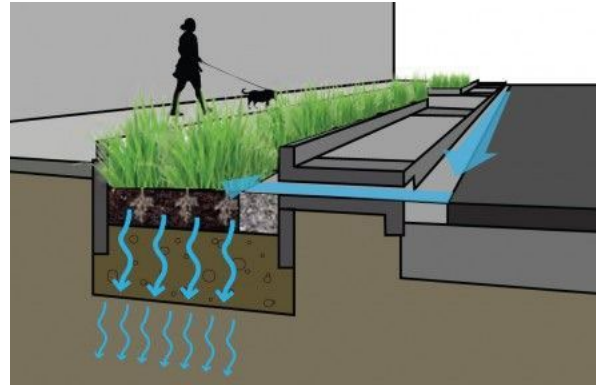
شامل سناریوی سوم (کف‌پوش نفوذپذیر) با  $72/8555/46$  مترمکعب، سناریوی اول (حوضچه نفوذ زیستی بدون زهکش) با  $55/866/84$  مترمکعب، سناریوی ششم (ترانشه نفوذی) با  $53/774/50$  مترمکعب، سناریوی چهارم (جعبه درختی بدون زهکش) با  $4220/89$  مترمکعب، سناریوی پنجم (جعبه درختی با زهکش) با  $33/892/29$  مترمکعب و سناریوی دوم (حوضچه نفوذ زیستی با زهکش) با  $20631/24$  مترمکعب بود. همان‌گونه که دیده می‌شود، سناریوی سوم یعنی کف‌پوش نفوذپذیر با اختلاف قابل توجهی نسبت به سایر سناریوها عملکرد بهتری در حذف حجم رواناب داشت. این نتیجه را می‌توان ناشی از توزیع مکانی مناسب کف‌پوش‌ها در مسیرهای اصلی جریان، مساحت زیاد حوضچه نسبت به سایر حوضچه‌ها و افزایش فرصت نفوذ سطحی دانست؛ به‌طوری که حتی در مقیاس محدود نیز کاهش چشمگیری در حجم رواناب کل حوضه ایجاد کرده است. به منظور بیان شفاف‌تر سناریوهای مندرج در جدول ۱، شکل ۶، هر یک از سناریوها را به تصویر کشیده است. سناریوی اول، یعنی حوضچه نفوذ زیستی بدون زهکش نیز با حجم حذف  $55/866$  مترمکعب عملکرد قابل قبولی داشت و نشان داد که طراحی سیستم‌های بدون زهکش در خاک‌های با نفوذپذیری متوسط تا زیاد می‌تواند سبب افزایش ذخیره موقت آب و نفوذ تدریجی آن به لایه‌های زیرین شود. پس از آن، سناریوی ترانشه نفوذی با  $53/774$  مترمکعب رواناب حذف‌شده جایگاه سوم را به خود اختصاص داد که نشان‌دهنده قابلیت زیاد این سیستم در ذخیره و نفوذ آب به‌ویژه در مسیرهای خطی و حاشیه معابر است. در مقابل، حوضچه‌های دارای زهکش تحتانی (سناریوی دوم) کمترین کارایی را در میان تمامی سناریوها داشتند و تنها موفق به حذف  $20631$  مترمکعب رواناب شدند. دلیل اصلی این امر وجود زهکش در موقعیت میانی حوضچه و خروج سریع آب از سیستم بود که زمان ماند و فرصت نفوذ را به طور محسوسی کاهش داد. در سناریوهای جعبه درختی نیز نوع بدون زهکش (سناریو چهارم) نسبت به نوع با زهکش (سناریو پنجم) عملکرد بهتری نشان

داد. مقایسه نتایج میان چهار قطعه مدل‌سازی‌شده نیز نشان داد که کارایی هر سناریو به شدت تابع ویژگی‌های مکانی است. مطالعات سایر پژوهشگران نشان داده‌اند که پیاده‌سازی سیستم‌های نفوذ زیستی (LID) مانند حوضچه نفوذ زیستی بدون زهکش، ترانشه نفوذی و کف‌پوش نفوذپذیر می‌تواند کاهش قابل توجهی در حجم رواناب و دبی اوج ایجاد کند (۱۴ و ۱۶)؛ به‌طوری که عملکرد کف‌پوش‌های نفوذپذیر در کاهش رواناب سطحی تا ۷۰-۳۰ درصد و حوضچه نفوذ زیستی بدون زهکش تا حدود ۶۳ درصد گزارش شده است (۷ و ۱۰). نتایج حاصل از این پژوهش، به ویژه سناریوی کف‌پوش نفوذپذیر که بیشترین کاهش رواناب را نشان داد، با این یافته‌ها هم‌راستاست. اگرچه میزان درصد حذف رواناب سایر پژوهشگران با درصد حذف مطالعه حال حاضر متفاوت است، ولی مقدار حذف رواناب تفاوت چندانی دارد. این مقایسه تأکید می‌کند که طراحی و توزیع مناسب سازه‌های LID، همراه با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاک و توپوگرافی، نقش تعیین‌کننده‌ای در اثربخشی سیستم‌ها دارد.

ضریب رواناب کلی  $0/87$  نشان می‌دهد که بخش عمده بارش به‌طور مستقیم به رواناب تبدیل می‌شود و ظرفیت نفوذ طبیعی کم است؛ بنابراین استقرار سازه‌های LID در چنین شرایطی می‌تواند تأثیر قابل توجهی در کاهش بار هیدرولیکی شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی داشته باشد. از منظر طراحی و مدیریت شهری، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب نوع سیستم‌های نفوذ زیستی (LID) باید با دقت و بر اساس ویژگی‌های خاک، توپوگرافی، کاربری زمین و محدودیت‌های فضایی انجام شود. در حوزه‌هایی با فضای محدود، سیستم‌های ترانشه نفوذی و جعبه‌های درختی بدون زهکش بیشترین کارایی را در ذخیره و نفوذ رواناب سطحی دارند؛ زیرا این سیستم‌ها می‌توانند در مسیرهای خطی و حاشیه معابر اجرا شده و فرصت نفوذ آب را به حداکثر برسانند. در مقابل، در فضاهای بازتر و با سطح کافی برای نصب سازه، حوضچه‌های نفوذ زیستی و کف‌پوش‌های نفوذپذیر کارایی



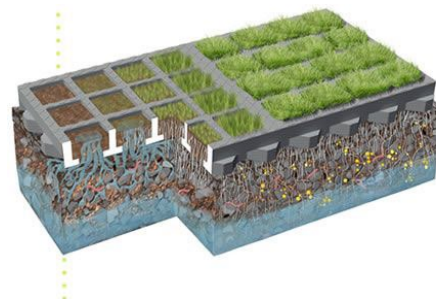
حوضچه نفوذ زیستی با زهکش تحتانی



حوضچه نفوذ زیستی بدون زهکش تحتانی



حوضچه نفوذ زیستی جعبه درختی بدون زهکش تحتانی



کفپوش نفوذ پذیر



ترانشه نفوذی



حوضچه نفوذ زیستی جعبه درختی با زهکش تحتانی

#### شکل ۶. تصاویر انواع حوضچه‌های نفوذ زیستی

آب‌گرفتگی، زمان لازم برای نفوذ تدریجی آب به لایه‌های زیرین تأمین شود. این امر به ویژه در خاک‌های با نفوذپذیری متوسط تا کم اهمیت دارد؛ زیرا زمان استقرار آب نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش بهره‌وری سیستم‌های LID دارد.

بیشتری دارند؛ زیرا ظرفیت ذخیره و نفوذ بیشتری ایجاد کرده و کاهش قابل توجهی در حجم رواناب کل حوضه فراهم می‌کنند. طراحی زهکش‌ها نیز باید به گونه‌ای صورت گیرد که علاوه بر جلوگیری از اشباع طولانی‌مدت خاک و ایجاد نقاط

تحلیل نتایج مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزارهای SWMM و MIDS نشان داد که میزان اثربخشی سیستم‌های نفوذ زیستی به شدت تابع مکان‌یابی، پارامترهای طراحی، نوع و نفوذپذیری خاک و پوشش سطحی منطقه است. سناریوی کف‌پوش نفوذپذیر، حتی در مقیاس محدود، بیشترین کاهش حجم رواناب را ایجاد کرده و اهمیت طراحی هندسی مناسب، توزیع مکانی کف‌پوش‌ها و انتخاب مصالح با نفوذپذیری زیاد را نشان می‌دهد. در کنار این، سناریوهای حوضچه نفوذ زیستی بدون زهکش و ترانشه‌های نفوذی نیز نقش قابل توجهی در ذخیره موقت آب و کاهش دبی اوج ایفا کردند؛ به‌طوری که ترکیب هوشمندانه این سیستم‌ها می‌تواند علاوه بر کاهش رواناب سطحی، به تغذیه مجدد آب زیرزمینی، کنترل سیلاب‌های شهری و بهبود شرایط زیست‌محیطی کمک کند. هرچند سناریوهای دارای زهکش سریع، مانند حوضچه‌های با زهکش میانی، حجم رواناب کمتری را حذف کردند، این یافته نیز بیانگر ضرورت طراحی دقیق زهکش‌ها برای حفظ زمان ماند آب و افزایش فرصت نفوذ است.

### نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این پژوهش، سیستم‌های نفوذ زیستی به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارهای مدیریت کم‌اثر شهری (LID) نقش قابل توجهی در کنترل کمی رواناب و بهبود شرایط هیدرولوژیک مناطق شهری دارد. خروجی‌های حاصل از مدل‌سازی نرم‌افزار MIDS نشان داد که میزان کارایی سناریوهای مورد بررسی به نوع سازه، نحوه زهکشی و سطح مؤثر تبادل آب با خاک بستگی مستقیم دارد. در میان سناریوهای مدل‌سازی‌شده، سناریوی پیاده‌روهای نفوذپذیر بیشترین کارایی را در کاهش رواناب نشان داد و توانست حدود ۷۲۸۰۰۰ مترمکعب از حجم رواناب تولیدی در حوضه را حذف کند. این مقدار عمدتاً نتیجه سطح توسعه‌یافته سازه و توزیع گسترده آن در سطح حوضه است که موجب افزایش چشمگیر نفوذ و

کاهش مؤثر رواناب شد. پس از آن، حوضچه نفوذ زیستی بدون زهکش تحتانی با حدود ۵۵۸۰۰ مترمکعب کاهش رواناب در رتبه دوم قرار گرفت. نتایج این سناریو نشان می‌دهد که حذف زهکش تحتانی باعث افزایش زمان ماند آب در محیط ریشه و بهبود فرایند نفوذ عمقی می‌شود. عملکرد ترانشه نفوذی نیز با کاهش حدود ۵۳۷۰۰ مترمکعب رواناب نشان داد که استفاده از مصالح درشت‌دانه و مسیر خطی نفوذ می‌تواند بازده قابل قبولی فراهم کند. جعبه‌های درختی بدون زهکش و با زهکش به ترتیب با کاهش ۴۲۲۰۰ و ۳۳۸۰۰ مترمکعب رواناب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند که این تفاوت بیانگر اثرگذاری مستقیم زهکش تحتانی بر کاهش زمان ماند و در نتیجه کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی سیستم است.

کمترین کارایی مربوط به حوضچه نفوذ زیستی دارای زهکش تحتانی بود که تنها ۲۰۶۰۰ مترمکعب رواناب را حذف کرد. این موضوع نشان می‌دهد که وجود زهکش سبب تخلیه سریع آب و کاهش حجم مؤثر ذخیره‌سازی و نفوذ طبیعی می‌شود. نتایج مدل SWMM نیز که مبتنی بر داده‌های توپوگرافی استخراج‌شده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) و تقسیم‌بندی ۱۶ زیرحوضه است، نشان داد ضریب رواناب متوسط وزنی منطقه ۰/۸۷ است. این مقدار بیانگر وجود درصد زیاد سطوح نفوذناپذیر و ظرفیت کم نفوذ خاک در محدوده شهری قزوین بوده و ضرورت استفاده از سامانه‌های نفوذ زیستی را در مدیریت رواناب، کاهش حجم جریان سطحی و کنترل پدیده آب‌گرفتگی شهری تأیید می‌کند. به‌طور کلی، یافته‌های ترکیبی دو مدل MIDS و SWMM نشان می‌دهد که استفاده هدفمند از زیرساخت‌های سبز به‌ویژه در مناطق با نفوذپذیری کم، می‌تواند به‌طور قابل توجهی موجب کاهش دبی اوج، افزایش زمان تمرکز، تقویت نفوذ عمقی، و بهبود شرایط هیدرولوژیک و زیست‌محیطی در مقیاس شهری شود. این نتایج می‌تواند مبنایی علمی برای تدوین راهبردهای طراحی و اجرا در پروژه‌های مدیریت سیلاب شهری در مناطق مشابه فراهم کند.

## References

## منابع مورد استفاده

1. Ainy, C. N., D. Harlan and H. Hanan. 2018. Storm water management approach to increase the quality of urban streetscape in Sudirman Street, Bogor City. *In: 3rd International Symposium for Sustainable Landscape Development*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
2. Akbarian Khalilabad. A., H. Karami and S. F. Mousavi. 2025. Temporal and Spatial Variations in Permeability and Efficiency of Artificial Recharge Basins Under Sediment-Laden Flow Conditions (Laboratory Study). *Journal of Water and Soil Science* 29(3):131-144. URL: <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-4478-fa.html>
3. Cahyono, C., D. Wjaya and Juliastuti. 2024. Planning For Kucica Residential Drainage System in South Tangerang City Using SWMM Modelling. *In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
4. Carollo, M., I. Butera and R. Revelli. 2022. Water savings and urban storm water management: Evaluation of the potentiality of rainwater harvesting systems from the building to the city scale. *PLoS One* 17(11): p.e0278107.
5. Dąbrowski, W. and M. Nowak. 2022. Potential of storm water storage tank outflow construction in the prevention of sewerage overload. *Applied Water Science* 12(8): 205.
6. Davis, A. P., M. Shokouhian, H. Sharma and C. Minami. 2009. Water quality improvement through bioretention media: Nitrogen and phosphorus removal. *Water Environment Research* 81(4): 397–405.
7. Dutta, A., A. S. Torres and Z. Vojinovic. 2021. Evaluation of pollutant removal efficiency by small-scale nature-based solutions focusing on bio-retention cells, vegetative swale and porous pavement. *Water* 13(17): 2361.
8. Fletcher, T. D., H. Andrieu and P. Hamel. 2015. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources* 51: 261–279.
9. Frias, R. A. and M. Maniquiz-Redillas. 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*.
10. Hunt, W. F., A. R. Jarrett, J. T. Smith and L. J. Sharkey. 2006. Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in North Carolina. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 132(6): 600–608.
11. Lewellyn, C. and B. Wadzuk. 2019. Evaluating the risk-based performance of bioinfiltration facilities under climate change scenarios. *Water* 11(9): 1765.
12. Li, J., S. Alinaghian, D. Joksimovic and L. Chen, L. 2020. An integrated hydraulic and hydrologic modeling approach for roadside bio-retention facilities. *Water* 12(5): 1248.
13. Li, Y.-Q., K.-W. Wang, K.-L. Zhang, Z.-W. Zhou and X.-H Yang. 2014. Spatial and temporal distributions of migration in bio-retention systems. *Thermal Science* 18(5): 1557–1562.
14. Lufira, R. D., T. Utami, S. Marsudi, C. A. Setyoningsih and R. R. Pratama. 2024. Enhancing adoption studies of LID-BMP's for Storm Water Management Drainage (SWMD) national stadium in Jayapura, Indonesia. *In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
15. Mishra, S.K. and V.P. Singh. 2013. Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology (Vol. 42), Springer Science and Business Media, New York.
16. Mishra, S. S. and V. K. Verma. 2021. Storm Water Purification in an Urban City of India using a Bio-retention Filter. *In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
17. Mutzner, L., K. Zhang, R.G. Luthy, H.P.H. Arp and S. Spahr. 2023. Urban stormwater capture for water supply: look out for persistent, mobile and toxic substances. *Environmental Science: Water Research and Technology* 9(12): 3094-3102.
18. Nazarpour, S., I. Gnecco and A. Palla. 2023. Evaluating the effectiveness of bioretention cells for urban stormwater management: A systematic review. *Water* 15(5): 913.
19. Okaikue-Woodi, F.E., K. Cherukumilli and J.R. Ray. 2020. A critical review of contaminant removal by conventional and emerging media for urban stormwater treatment in the United States. *Water Research* 187: 116434.
20. Rachman, L. M., D. P. T. Baskoro and C. J. R. Supriadi. 2020. The effect of bio-retention hole application on soil physical properties and productivity and quality of Camellia sinensis leaf. *In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.

21. Ranjbari Hajiabadi, M., Abedi Koupai, J. and M. Matinzadeh. 2024. Investigating the Performance of SewerGEMS Software in Simulating Urban Runoff for Small Basins (Case Study: Minab City). *Journal of Water and Soil Science* 28(4): 1-22. URL: <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-4424-fa.html>
22. Varneckaitė, L., V. Vinciūnas and D. Misiūnas. 2009. Vandens augalų naudojimas paviršinėms nuotekoms valyti [The use of water plants for storm water runoff treatment]. *Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania* 1(1): 65-67.
23. Zhou, Q. 2014. A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. *Water* 6(4): 976–992.