

Optimization of Low Impact Development Systems in Sponge City Modeling (Case Study: District 2, Tehran)

Sonia Sadeghi^{1*} , Jamal Mohammad Vali Samani² 

¹PhD student, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

²Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Corresponding Author's E-mail: sonia_6812@yahoo.com

Received: 22 May 2025
Revised: 06 July 2025

Accepted: 11 July 2025
Published: 02 Aug, 2025



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: This study aimed to design and optimize a sponge city model in Tehran using the Low Impact Development (LID) approach, SWMM hydrological modeling, and the NSGA-II optimization algorithm. This study specifically utilized five types of Low Impact Development (LID) elements, including Vegetated Swales (VS), Permeable Pavement (PP), Green Roofs (GR), Bioretention Cells (BRC), and Rain Barrels (RB), in the design and optimization of the model. The best combination of LID elements for surface water management was selected. Simulation of the plan showed that for rainfall events with return periods of 5, 10, and 50 years, the total runoff reduction rates were 31.8%, 20.7%, and 18.5% respectively, and the peak flow reduction rates were 20.3%, 17.85%, and 12.6% respectively. These results indicate the positive performance of LID systems in controlling runoff and peak flow. For severe rainfall events, integrated approaches are recommended. Finally, this research shows that the sponge city approach and LID elements are an efficient and sustainable solution for surface water management in urban areas, especially under climate change conditions and increasing rainfall intensity.

Keywords: Nature-Based Solutions, Sustainable Cities, Urban Hydrology, Urban Planning

Introduction: Modern cities face challenges from climate change, including increased severe rainfall and flooding, which damage infrastructure and affect quality of life. The sponge city approach is presented as a novel and sustainable solution for urban runoff management based on Low Impact Development (LID¹) (Han and Wu., 2019; Shang et al., 2016). LID uses small-scale green infrastructure like green roofs and permeable pavements to store, infiltrate, and treat rainwater locally (Han and Wu., 2019). This method reduces pressure on traditional systems, improves groundwater quality, and decreases flood risk. Implementing the sponge city concept in District 2 of Tehran is important due to its high population and runoff challenges. Hydrological simulation models like SWMM² are powerful tools; SWMM is widely used and capable of accurately modeling urban processes and the impact of LID (Rossman, 2015). Effective LID design is complex and requires simultaneously considering multiple objectives (such as runoff volume and peak, required area, and cost), making it a Multi-Objective Optimization Problem (MOOP) (Tao et al., 2019). Algorithms like NSGA-II are suitable for solving MOOP. This research aimed to determine the optimal location and design of LID systems in District 2 of Tehran, developing a multi-objective simulation and optimization model based on SWMM and NSGA-II to find the best combination and area allocation of LID to minimize total runoff, reduce peak flow, and optimize costs.

Methodology: This research focused on hydrological modeling and multi-criteria optimization of rainwater management using Low Impact Development (LID) methods to manage urban runoff and reduce flood impacts. District 2 of Tehran, a high-density residential area of about 230 hectares with high imperviousness (85%), was selected as the case study and divided into 17 sub-catchments (Fig. 1). Hydrological modeling was performed using SWMM software, employing the Horton method for infiltration and the dynamic wave method for network

² Storm Water Management Model

¹ Low Impact development

flow. Five LID types (VS¹, PP², GR³, BRC⁴, RB⁵) were considered for implementation in 20 urban blocks. Details of these LID types and their parameters are presented in [Table 2](#). The multi-objective NSGA-II algorithm was used to determine their optimal arrangement and combination. A comprehensive optimization model integrating SWMM and NSGA-II via MATLAB was developed. A schematic representation of the methodology is shown in [Figs. 2](#) and [5](#). Decision variables were the layout ratios of the five LID types in the blocks (60 variables). The objective functions were minimizing total runoff, peak flow, and the total cost of LID facilities.

Results and Discussion: Multi-objective optimization aims to find the best balance between multiple conflicting objectives. While analyzing the Pareto front is common, visualizing solutions becomes challenging with more than three objectives. This paper proposed using 2D scatter plots between objectives to address this limitation. The Pareto optimal solution sets for LID layout ratios were analyzed under different short-term rainfall events, focusing on heavy rainfall. Each solution represents a specific LID layout plan defined by 60 decision variables. [Fig. 6](#) illustrates the relationships between total runoff cost, peak flow cost, and design rainfall conditions (5, 10, and 50-year return periods) using these plots, highlighting the best cost-benefit combinations and aiding decision-makers by showing trade-offs and diminishing marginal returns. Analysis of [Fig. 6](#) indicated that changes in LID system cost did not significantly affect peak flow variations, suggesting the NSGA-II algorithm successfully found the Pareto front. The scatter plots revealed key relationships: total LID system cost vs. total runoff volume formed a Pareto front with a clear trade-off where increased cost reduced runoff, showing diminishing marginal returns. Conversely, cost vs. peak flood flow plots showed limited variation in peak flow despite cost changes, particularly for 5 and 10-year storms. This suggests flood peak flow was less sensitive to cost changes than total runoff in the Pareto optimal solutions, indicating NSGA-II found a diverse set of non-dominated solutions effectively covering trade-offs. Two distinct optimal schemes were selected from the Pareto set based on the principle of diminishing marginal returns: Scheme 1 minimized cost for maximum total runoff reduction, and Scheme 2 focused on minimizing cost for maximum flood peak flow reduction. [Tables 5](#) and [6](#) detail their performance for 5, 10, and 50-year events. For 5 and 10-year events, Scheme 1 was deemed desirable and economical, offering higher total runoff reduction (around 22.1% and 18.7%) with a lower budget compared to Scheme 2, and comparable peak flow reduction (around 15.4% and 11.2% vs around 15.6% and 11.8%). However, for the 50-year storm, both schemes showed significantly reduced effectiveness in total runoff (around 18%) and peak flow (around 7.5-8%) reduction. This suggests designed LID systems are less capable of managing excess water during very heavy rainfall, and addressing such events may require complementary or combined solutions with substantially higher investment, as simply increasing LID ratios or budget might not be sufficient.

Conclusion: This research evaluated the effectiveness of implementing optimal Low Impact Development (LID) methods for urban runoff management in District 2, Tehran. SWMM simulations showed significant peak flow reduction compared to the no-LID scenario. For Scheme 1 (10-year design), total runoff reduction rates were 31.8%(5-year), 20.7%(10-year), and 18.5%(50-year). Peak flow reductions were 20.3%(5-year), 17.85%(10-year), and 12.6%(50-year). These results indicate positive LID performance in controlling runoff and peak flow. The SWMM + NSGA-II model is effective for designing nature-based systems, reducing flood risks, improving groundwater, and serving as a valuable tool for urban planners. However, effectiveness against very severe rainfall may be limited.

© 2023 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

⁴ Bioretention Cells
⁵ Rain Barrels

¹ Vegetated Swales
² Permeable Pavement
³ Green Roofs

بهینه‌سازی سامانه‌های توسعه کم‌اثر در مدل‌سازی شهر اسفنجی (مطالعه موردی: منطقه ۲ تهران)

سونیا صادقی^{۱*}، جمال محمد ولی سامان^۲

^۱دانش‌آموخته دکتری تخصصی، گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
^۲استاد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: sonia_6812@yahoo.comوبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۵ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱

چکیده: مالعه حاضر با هدف طراحی و بهینه‌سازی یک مدل شهر اسفنجی در منطقه‌ای از تهران انجام شده است. با بهره‌گیری از رویکرد توسعه کم‌اثر (LID) و ابزارهای پیشرفته‌ای مانند مدل‌سازی هیدرولوژیکی SWMM و الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II، بهترین ترکیب و آرایش عناصر LID برای مدیریت مؤثر آب‌های سطحی انتخاب شده است. این مطالعه به‌طور خاص از پنج نوع عنصر LID شامل ترانسه گیاهی (VS)، سنگفرش نفوذپذیر (PP)، سقف‌های سبز (GR)، سلول ماند بیولوژیکی (BRC) و بشکه‌های باران (RB) در طراحی و بهینه‌سازی مدل استفاده کرده است. بر اساس شبیه‌سازی طرح شماره یک برای رویداد بارندگی با دوره بازگشت ده‌ساله، نرخ کاهش رواناب کل سیستم برای بارش‌های با دوره بازگشت ۵، ۱۰ و ۵۰ ساله به ترتیب ۳۱/۸٪، ۲۰/۷٪ و ۱۸/۵٪ محاسبه گردید. همچنین، نرخ کاهش جریان اوج برای این دوره‌های بازگشت به ترتیب ۲۰/۳٪، ۱۷/۸۵٪ و ۱۲/۶٪ به دست آمد. این نتایج حاکی از عملکرد مثبت سیستم‌های LID در کنترل رواناب و پیک جریان در منطقه مورد مطالعه است. با این حال، برای مقابله با رویدادهای بارندگی شدید و پیچیدگی‌های سیستم‌های شهری، نیاز به اتخاذ رویکردهای یکپارچه و ترکیبی از روش‌های مختلف احساس می‌شود. مدل ارائه شده در این مطالعه می‌تواند به‌عنوان یک الگو برای اجرای پروژه‌های مشابه در سایر مناطق شهری مورد استفاده قرار گیرد. در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد شهر اسفنجی و استفاده از عناصر LID می‌تواند به‌عنوان یک راهکار کارآمد و پایدار برای مدیریت آب‌های سطحی در مناطق شهری، به‌ویژه در شرایط تغییرات اقلیمی شدید، مورد توجه قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: برنامه‌ریزی شهری، راهکارهای مبتنی بر طبیعت، شهرهای پایدار، هیدرولوژی شهری.

۱- مقدمه

بارندگی‌های شدید و سیل. این چالش‌ها نه تنها به زیرساخت‌های شهری آسیب می‌رسانند، بلکه بر کیفیت زندگی شهروندان نیز تاثیر منفی می‌گذارند. در این زمینه، رویکرد شهر اسفنجی^۱ به‌عنوان یک راهکار نوین و پایدار

شهرهای مدرن با چالش‌های قابل توجهی ناشی از تغییرات آب‌وهوایی مواجه هستند، از جمله افزایش شدت و فراوانی

¹ Sponge City

با توجه به اینکه منطقه ۲ به‌عنوان یکی از پرجمعیت‌ترین مناطق تهران، با چالش‌های قابل‌توجهی در زمینه رواناب شهری روبه‌رو است، اجرای مفهوم شهر اسفنجی در این منطقه می‌تواند گامی حیاتی در جهت بهبود محیط شهری، افزایش تاب‌آوری در برابر بلایای طبیعی و ارتقای کیفیت زندگی شهروندان باشد.

در سال‌های اخیر، مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی مانند SWMM، InfoWorks CS و MIKE URBAN جایگاه ویژه‌ای یافته و به ابزارهای قدرتمندی برای ارزیابی و طراحی سیستم‌های مدیریت آب‌های شهری تبدیل شده‌اند. این مدل‌ها، با فراهم آوردن امکان شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیکی در مناطق شهری، به پژوهشگران و مهندسان این قابلیت را می‌دهند که اثربخشی روش‌های گوناگون مدیریت آب‌های سطحی، به‌خصوص شیوه‌های توسعه کم‌اثر (LID)، را به‌دقت بررسی و ارزیابی کنند. در میان این ابزارها، مدل SWMM که توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا توسعه یافته است، به‌عنوان یکی از پرکاربردترین مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی در سطح جهان شناخته می‌شود. این مدل از توانایی بالایی در شبیه‌سازی طیف وسیعی از فرآیندهای هیدرولوژیکی شهری برخوردار است؛ فرآیندهایی شامل تولید رواناب سطحی، چگونگی نفوذ آب در خاک، جریان در شبکه‌های جمع‌آوری، و همچنین مسائل مربوط به کیفیت آب و آلودگی‌ها. یکی از قابلیت‌های برجسته و کلیدی مدل SWMM، توانایی آن در مدل‌سازی دقیق تاثیر روش‌های LID بر کنترل رواناب و ارتقاء کیفیت آب است. به این ترتیب، با استفاده از مازول‌های تخصصی LID که در این مدل تعبیه شده‌اند، می‌توان اثرات به‌کارگیری عناصری مانند بام‌های سبز، حوضچه‌های نفوذ و بیوفیلترها را بر کاهش حجم و شدت رواناب، کنترل فرسایش خاک و بهبود کیفیت آب به‌صورت کمی و دقیق بررسی نمود. به همین دلیل، مدل SWMM در سال‌های اخیر به‌عنوان ابزاری نیرومند و قابل‌اعتماد در مطالعات متعددی برای ارزیابی اثربخشی استراتژی‌های توسعه کم‌اثر (LID) در مدیریت جامع آب‌های سطحی مورد استفاده قرار گرفته است.

برای مدیریت رواناب شهری و کاهش اثرات نامطلوب بارندگی شدید معرفی شده است. این رویکرد پیشنهادی که بر مبنای توسعه کم‌اثر (LID¹) استوار است، باهدف مدیریت جامع آب باران و کنترل رواناب سطحی از مبدأ عمل می‌کند. عملی شدن این هدف از طریق استفاده بهینه از زیرساخت‌های سبز کوچک‌مقیاس مانند بام‌های سبز، روسازی‌های نفوذپذیر و مخازن ذخیره آب باران صورت می‌پذیرد (Han and Wu., 2019). این روش با تمرکز بر ذخیره، نفوذ و تصفیه آب باران در همان محل بارش، ضمن کاهش فشار بر سیستم‌های سنتی جمع‌آوری آب‌های سطحی، به‌طور قابل‌توجهی به بهبود کیفیت آب‌های زیرزمینی و کاهش خطرات ناشی از سیلاب‌های شهری کمک می‌کند. نکته حائز اهمیت این است که اثربخشی این رویکرد حتی در محیط‌های پیچیده شهری که با تغییرات گسترده در پوشش سطح زمین (مانند افزایش سطوح غیرقابل نفوذ) مواجه هستند نیز حفظ می‌شود (Bai et al., 2018). امکانات LID شامل طیف وسیعی از عناصر مانند باغ‌های بارانی، پیاده‌روهای نفوذپذیر، بام‌های سبز، سلول‌های نگهداری زیستی، شبکه‌های باران و موارد دیگر می‌شوند.

یکی از دلایل بنیادین کاربرد و توسعه سامانه‌های توسعه کم‌اثر (LID) در مدیریت رواناب شهری، ماهیت طبیعت‌محور و تمرکز این رویکرد بر کاهش رواناب از مبدأ است. برخلاف سیستم‌های سنتی زهکشی که عمدتاً مبتنی بر جمع‌آوری و انتقال سریع رواناب به کانال‌ها و شبکه‌های فاضلاب می‌باشند، سیستم‌های LID با بهره‌گیری از سازه‌های کوچک‌مقیاس و قابل ادغام با فضاهای شهری، فرصت نفوذ، ذخیره‌سازی، و تصفیه محلی رواناب را فراهم می‌آورند. این مزیت مفهومی منجر به کاهش بار وارد بر سیستم‌های انتقال، افزایش تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، کاهش خطر سیلاب‌های ناگهانی، و بهبود کیفیت آب می‌گردد. چنین رویکردی هم‌کارایی هیدرولوژیکی سیستم‌های مدیریت شهری را افزایش می‌دهد و هم به لحاظ زیست‌محیطی، اقتصادی و منظر شهری مزایای قابل‌توجهی دارد.

¹ Low Impact Development

Tao et al. (2019) در مطالعه‌ای پیرامون ساخت شهر اسفنجی در شانگهای، با ترکیب مدل SWMM و الگوریتم NSGA-II، طراحی بهینه سیستم‌های LID را برای کاهش هزینه و افزایش اثربخشی کنترل رواناب انجام دادند. این مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از این ابزارها دارای پیشینه علمی معتبر در زمینه مدیریت آب شهری و طراحی بهینه زیرساخت‌های سبز است.

این مطالعات به خوبی نشان می‌دهند که طراحی بهینه LID مسئله‌ای پیچیده است که نیازمند در نظر گرفتن هم‌زمان چندین عامل نظیر کاهش رواناب، حذف آلودگی و هزینه ساخت است. به همین دلیل، الگوریتم‌های هوشمند به‌عنوان ابزارهایی کارآمد برای حل این مسئله چندوجهی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در همین راستا، تحقیقات اخیر روش‌های متنوعی برای بهینه‌سازی طراحی و اجرای سیستم‌های مدیریت بارش ارائه داده‌اند. به‌عنوان مثال، Ghodsi et al., (2016) یک الگوریتم ژنتیک را پیشنهاد دادند که حجم رواناب و هزینه LID را با در نظر گرفتن شرایط آب‌وهوایی مختلف بهینه می‌کند و در تابع هدف خود، وزن‌های برابری به هزینه ساخت، مقدار رواناب و کیفیت رواناب اختصاص می‌دهد. Paola et al., (2018) از الگوریتم جستجوی هارمونی برای کاهش حجم سیلاب و هزینه‌های سیستم‌های مدیریت بارش استفاده کردند. همچنین، Liu et al. (2022) الگوریتم NSGA-II را با مدل شبیه‌سازی SWMM ترکیب کردند تا رواناب، بار آلودگی و هزینه ساخت را بهینه‌سازی کنند، و Tao et al., (2019) در شهر شانگهای، از همین الگوریتم NSGA-II برای کاهش هزینه‌های سیستم‌های مدیریت بارش و افزایش میزان کنترل رواناب بهره بردند.

مجموع این تحقیقات حاکی از پیشرفت قابل توجه در روش‌های چیدمان و طراحی بهینه LID است که با تمرکز فزاینده‌ای بر روی رویکردهای چندهدفه و ترکیب تکنیک‌های پیچیده بهینه‌سازی همراه بوده است که غالباً با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی قدرتمندی نظیر SWMM انجام می‌شود.

درحالی‌که، مطالعات قبلی در زمینه بهینه‌سازی توسعه

با توجه به قابلیت‌های مدل SWMM در مدل‌سازی LID، مطالعات متعددی از این ابزار قدرتمند برای ارزیابی عملکرد این راهکارها و بهینه‌سازی پیاده‌سازی آن‌ها در مناطق شهری بهره برده‌اند.

برای مثال، تحقیقات Shang et al., (2016) نشان داد که با ادغام باغ‌های باران و کانال‌های نفوذپذیر در مدل SWMM، می‌توان عملکرد این تسهیلات را، به‌ویژه در مناطق شهری جدید، به‌طور دقیق ارزیابی کرد. این مطالعه بر اهمیت استفاده از حوضه‌های آبخیز مشابه برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل در شرایط کمبود داده تاکید داشت. در همین راستا، Zhang et al., (2019) با بهره‌گیری از مدل SWMM و یک رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر مزایا، به توزیع بهینه سه نوع تسهیلات LID در یک شهر تجاری پرداختند و نشان دادند که می‌توان با استفاده از این مدل، بهترین مکان‌یابی برای تسهیلات LID را با هدف بهبود کیفیت آب و کاهش رواناب سطحی تعیین نمود.

فراتر از ارزیابی و مکان‌یابی ساده، Kyle et al., (2018) با ترکیب مدل SWMM و یک الگوریتم تکاملی چندهدفه، قابلیت‌های این مدل را برای ارزیابی سناریوهای مختلف کنترل LID گسترش دادند. این رویکرد به محققان امکان می‌دهد تا تاثیر ترکیبات مختلف LID را بر عملکرد کلی سیستم‌های زهکشی شهری به‌طور جامع بررسی کنند. علاوه بر این، Macro et al., (2019) نیز با توسعه یک مدل منبع باز که مدل SWMM را با یک جعبه‌ابزار بهینه‌سازی ابتکاری ادغام می‌کند، گامی مهم در جهت بهبود فرآیند بهینه‌سازی LID برداشته‌اند. این ابزار به کاربران امکان می‌دهد تا انواع مختلف LID با اندازه‌ها و پیکربندی‌های متنوع را ارزیابی کرده و بهترین گزینه را برای دستیابی به اهداف متفاوت مدیریت آب‌های سطحی انتخاب نمایند.

کاربرد مدل SWMM و الگوریتم NSGA-II در طراحی و ارزیابی راهکارهای LID در مطالعات متعددی بررسی شده است. به‌عنوان نمونه، Shang et al. (2016) به ارزیابی عملکرد تلفیق باغ‌های بارانی و کانال‌های نفوذپذیر با استفاده از SWMM در مناطق شهری پرداختند و عملکرد آن را در کاهش رواناب و سیلاب اثبات کردند. همچنین،

تقویت نفوذ و فیلتراسیون طبیعی رواناب در برخی سازه‌های LID، به‌طور غیرمستقیم در بهبود کیفیت آب‌های زیرزمینی مؤثر واقع شود. با این حال، تمرکز اصلی این مطالعه بر مدیریت کمی رواناب و کاهش دبی اوج سیلاب بوده است. در نتیجه، نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری ارزشمند و مؤثر برای برنامه‌ریزان شهری و طراحان سیستم‌های آب و فاضلاب مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش‌شناسی

این پژوهش با هدف مدیریت بهینه رواناب شهری و کاهش اثرات سیلاب، به مدل‌سازی هیدرولوژیکی و بهینه‌سازی چندمعیاره سیستم‌های مدیریت آب باران مبتنی بر روش‌های توسعه با تأثیر کم (LID) پرداخته است. در این مطالعه، منطقه ۲ شهر تهران به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد و به ۱۷ زیرحوضه تقسیم گردید. سپس، مدل‌سازی هیدرولوژیکی این منطقه با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی (SWMM) انجام گرفت. پنج نوع مختلف روش LID برای پیاده‌سازی در ۲۰ بلوک شهری در نظر گرفته شد و با بهره‌گیری از الگوریتم چندهدفه NSGA-II، چیدمان و ترکیب بهینه آن‌ها مشخص گردید. بدین منظور، یک مدل جامع بهینه‌سازی چندهدفه با تلفیق قابلیت شبیه‌سازی SWMM و توانایی الگوریتم NSGA-II توسعه داده شد.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی یک محله مسکونی پرتراکم در شمال غرب تهران (ناحیه ۲، منطقه ۳) با مساحتی حدود ۲۳۰ هکتار است (شکل ۱). این منطقه به دلیل گسترش شهرنشینی، عمدتاً با کاربری مسکونی و پوشش آسفالتی همراه است و از شبکه‌ای از معابر و فضاهای سبز محدود تشکیل شده است. به‌منظور تحلیل دقیق‌تر رفتار هیدرولوژیکی، منطقه به ۱۷ زیرحوضه تقسیم‌بندی شد. زمین‌شناسی منطقه به‌طور کلی مسطح بوده و شیب ملایمی (۰.۵ درصد) از شمال به جنوب دارد. با توجه به افزایش سطح غیرقابل نفوذ (حدود ۸۵ درصد)، رواناب سطحی در این منطقه به‌شدت افزایش یافته

کم‌اثر (LID) روش‌های گوناگونی را بررسی کرده‌اند، تمرکز آن‌ها معمولاً بر دو یا سه هدف محدود و اغلب مرتبط با رواناب بوده است؛ اما استانداردهای جامع ارزیابی شهرهای اسفنجی رویکردی گسترده‌تر را طلب می‌کنند و نیازمند بررسی هم‌زمان چندین عامل هستند؛ عواملی همچون حجم رواناب، پیک رواناب، مساحت موردنیاز برای انواع مختلف LID و هزینه‌های مربوط به پیاده‌سازی آن‌ها؛ بنابراین، طراحی مؤثر استراتژی‌های LID مستلزم توجه هم‌زمان به این اهداف متعدد است که این مسئله را به یک چالش پیچیده در حوزه بهینه‌سازی چندهدفه (MOOP) تبدیل می‌کند. برای حل کارآمد مسائل چندهدفه (MOOP)، ضروری است که نظرات و ترجیحات تصمیم‌گیرندگان در فرایند انتخاب بهترین راهکار از میان مجموعه راه‌حل‌های بهینه در نظر گرفته شود. در این زمینه، الگوریتم‌هایی مانند NSGA-II ابزارهای ارزشمندی محسوب می‌شوند. قابلیت الگوریتم NSGA-II در یافتن راه‌حل‌های بهتر می‌تواند از طریق تغییر روش محاسبه تناسب (fitness) بهبود یابد و توانایی آن در ارائه گزینه‌های مناسب‌تر برای انتخاب تصمیم‌گیرنده را افزایش دهد.

این پژوهش با هدف تعیین مکان‌یابی و طراحی بهینه سامانه‌های مدیریت آب‌های سطحی مبتنی بر طبیعت (LID) در منطقه ۲ تهران انجام شده است. برای دستیابی به این هدف، یک مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی چندهدفه بر مبنای نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شد. مدل پیشنهادی این تحقیق از تلفیق مدل هیدرولوژیکی SWMM و الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II بهره می‌برد. هدف اصلی این مدل، یافتن بهترین ترکیب از انواع LID و تخصیص بهینه مساحت به هر نوع در هر بلوک شهری است؛ به‌گونه‌ای که هم‌زمان منجر به حداقل‌سازی رواناب کل، کاهش جریان اوج سیلاب و بهینه‌سازی هزینه‌های احداث و نگهداری سامانه شود. با استفاده از این مدل، می‌توان به یک طرح جامع و کارآمد برای مدیریت رواناب شهری دست‌یافت. این طرح، ضمن کاهش خطرات ناشی از سیلاب، به بهبود کیفیت آب‌های زیرزمینی و افزایش سرانه فضای سبز شهری نیز کمک شایانی می‌نماید. این طرح، ضمن کاهش خطرات ناشی از سیلاب، می‌تواند با

هیدرولیکی است.

۲-۳- تحلیل الگوهای بارندگی و سری زمانی

در این پژوهش، با بهره‌گیری از منحنی‌های شدت - مدت - دوره بازگشت ارائه‌شده در طرح جامع مدیریت آب‌های سطحی تهران (۱۳۹۱) و **شکل ۳**، به تحلیل رواناب ناشی از بارندگی و ارزیابی تاثیر روش‌های مدیریت آب باران بر کاهش حجم رواناب و دبی اوج پرداخته‌شده است. این منحنی‌ها ابزاری قدرتمند برای برآورد میزان رواناب ناشی از بارندگی‌های با شدت و مدت‌زمان مختلف هستند.

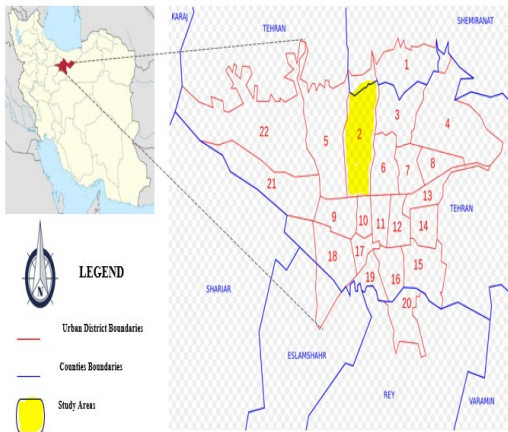


Fig. 1 Study area in the eastern part of Tehran metropolis
شکل ۱ منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر در کلان‌شهر تهران

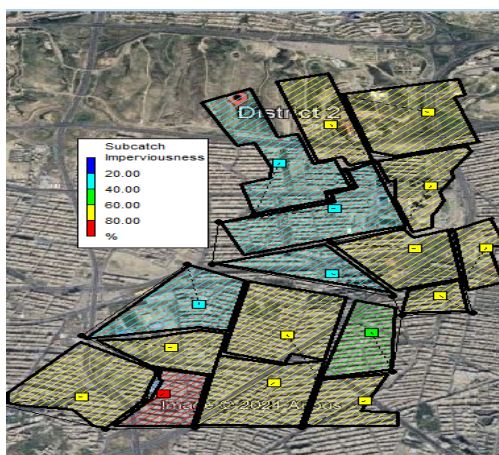


Fig. 2 Case Study

شکل ۲ منطقه مورد مطالعه

است. این وضعیت ناشی از گسترش شهرنشینی و پوشش غالب آسفالت است. باین‌حال، به دلیل ماهیت تثبیت‌شده منطقه، تغییرات قابل‌توجهی در کاربری زمین پیش‌بینی نمی‌شود. تنها ۱۵ درصد از منطقه را فضاهای سبز (پارک‌ها) و زیرساخت‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی (کانال‌ها) تشکیل می‌دهند. مدل‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از نرم‌افزار SWMM انجام شد. در این مدل، از مخزن غیرخطی برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در هر یک از زیرحوضه‌ها استفاده‌شده است.

۲-۲- مدل بارش - رواناب

پیش از ساخت مدل SWMM برای منطقه مورد تحقیق، لازم است داده‌های فیزیوگرافیکی و هیدرولوژی منطقه، اطلاعات شبکه لوله‌ها، داده‌های بارندگی و دیگر داده‌های مربوط به منطقه جمع‌آوری و به SWMM وارد شود. با توجه به درصد سطح غیرقابل نفوذ، تقسیم‌بندی بلوک‌ها و جهت جریان لوله‌ها، منطقه مورد مطالعه به ۱۷ زیرحوضه تقسیم شد. نتایج کلی در **شکل ۲** نشان داده‌شده است. در فرآیند ایجاد یک مدل جدید در نرم‌افزار شبیه‌سازی (SWMM)، تعیین دقیق پارامترهای اولیه از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، دو پارامتر کلیدی یعنی مدل‌های نفوذ و روندیابی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای مدل‌سازی فرآیند نفوذ آب در خاک، نرم‌افزار SWMM سه روش هورتون، گرین - آمپت و شماره منحنی (CN) را ارائه می‌دهد. در این مطالعه، روش هورتون به دلیل سادگی و کارایی مناسب انتخاب‌شده است. در این روش، نرخ نفوذ با مقایسه شدت بارندگی و نفوذپذیری خاک تعیین می‌شود. از مزایای این روش، نیاز به تنها سه پارامتر مشخصه خاک است که به‌آسانی قابل‌اندازه‌گیری هستند (Horton, 1933). برای شبیه‌سازی جریان آب در شبکه جمع‌آوری، SWMM سه روش جریان ماندگار، موج سینماتیکی و موج دینامیکی را ارائه می‌دهد. از میان این روش‌ها، روش موج دینامیکی به دلیل توانایی در مدل‌سازی دقیق شرایط جریان پیچیده، از جمله جریان تحت‌فشار و پدیده‌های برگشت آب، به‌عنوان روش برتر انتخاب‌شده است (Back, 2015). این روش به‌طور دقیق‌تری قادر به شبیه‌سازی رفتار جریان در شرایط مختلف

جدول ۱ تنظیم پارامترهای مدل هیدرولوژیکی و هیدرولیکی

Table 1 Parameters setting of model hydrological and hydraul

Parameters	Description	Values
Max. infil. rate	Maximum rate on the horton infiltration curve (mm/hr)	78.1
Min. infil. rate	Minimum rate on the horton infiltration curve (mm/hr)	3.82
Decay constant	Decay constant for the horton infiltration curve (1/hr)	2
N-imperv	Mannings N for impervious area	0.013
N-perv	Mannings N for pervious area	0.15
Dstore-imperv	Depth of depression storage on impervious area (mm)	3.15
Dstore-perv	Depth of depression storage on pervious area (mm)	5.08
Zero-imperv (%)	Percent of impervious area with no depression storage (%)	25
Conduit roughness	Manning's roughness coefficient	0.015

روش‌های زیر برای مدیریت آب باران استفاده کرده است:

ترانشه گیاهی (VS^1) کانال‌هایی کم‌عمق با پوشش گیاهی هستند که عمدتاً برای کاهش سرعت جریان و هدایت رواناب سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سازه‌ها ممکن است تأثیر محدودی در حذف ذرات معلق بزرگ داشته باشند، اما فاقد سازوکار مؤثر برای تصفیه شیمیایی یا زیستی رواناب می‌باشند؛ لذا در صورت نیاز به عملکرد کیفی، استفاده از سلول‌های نگهداری زیستی (Bioretention Cells) توصیه می‌شود. سنگفرش نفوذپذیر (PP^2) که سطوحی مانند پیاده‌روها و پارکینگ‌ها با مواد نفوذپذیر برای هدایت سریع آب باران به داخل زمین محسوب می‌شوند؛ سقف‌های سبز (GR^3) که پوشش گیاهی روی بام ساختمان‌ها برای کاهش رواناب و بهبود دمای محیط را شامل می‌شوند؛ سلول ماند بیولوژیکی (BRC^4) که حوضچه‌های کوچکی پر شده با خاک، گیاهان و میکروارگانیسم‌ها برای تصفیه آب باران هستند؛ و بشکه‌های باران (RB^5) که مخازنی معمولاً نصب شده در پشت بام ساختمان‌ها برای جمع‌آوری آب باران به شمار می‌روند. پارامترهای طراحی و عملکرد این سیستم‌ها بر اساس استانداردهای چین (Li et al, 2014) و با توجه به شرایط خاص محل اجرا تنظیم شده است. [جدول ۲](#) جزئیات دقیق این تنظیمات را ارائه می‌دهد.

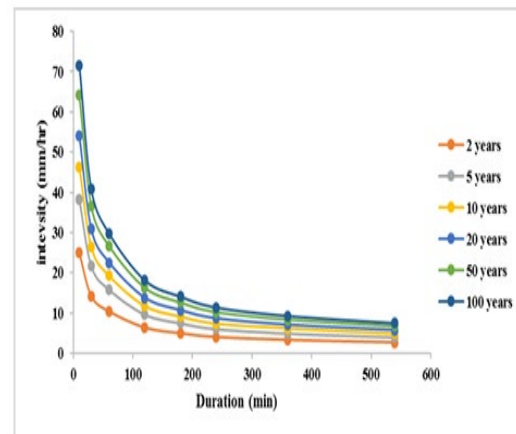


Fig. 3 The rainfall-intensity-duration-return period of the station covers the case study region

شکل ۳ منحنی شدت - مدت - دوره بازگشت بارندگی ایستگاه منطقه مورد مطالعه

۲-۴- پیاده‌سازی روش‌های توسعه کم‌اثر (LID) در مدل SWMM

برای استفاده از روش‌های توسعه کم‌اثر (LID) در مدل SWMM، ابتدا نیاز است که انواع مختلف تنظیمات طراحی LID، بدون توجه به اندازه آن‌ها، تعریف شوند. پس از آن، این تنظیمات باید با توجه به نیازهای هر زیرحوضه ترکیب شده و اندازه مناسب برای آن‌ها تعیین گردد. نرم‌افزار SWMM 5.1 هشت نوع مختلف LID را برای انتخاب در اختیار کاربران قرار می‌دهد. مطالعه حاضر به‌طور خاص از

⁴ Bio Retention Cell

⁵ Rain Barrels

¹ Vegetative Swales

² Permeable Pavements

³ Green Roofs

روش برای مناطق وسیع مناسب است و انعطاف‌پذیری بالایی در ترکیب انواع LID دارد.

♦ **اجرای متوالی Sequential LID:** در این روش، زیرحوضه اصلی به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم‌شده و هر بخش به یک روش LID خاص اختصاص می‌یابد. رواناب خروجی از یک بخش به بخش یا عنصر LID بعدی هدایت می‌شود. این رویکرد برای مناطق کوچک‌تر یا زمانی که نیاز به بررسی دقیق عملکرد هر مرحله از مدیریت رواناب وجود دارد، مناسب‌تر است (Rossman, 2012).

در این شبیه‌سازی خاص، طرح‌بندی متوالی LID به‌عنوان گزینه مینا انتخاب و به کار گرفته شد. بر این اساس، مناطق موردنظر به بخش‌های کوچک‌تری تقسیم شدند تا هر بخش به یک تسهیلات خاص LID یا یک نوع کاربری زمین مربوط شود. شکل ۵ شمای کلی یک نمونه از این آرایش‌های متوالی LID و نحوه جریان آب در آن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در **شکل ۵** نمایش داده شده است، رواناب از سطوح مختلف شهری (مانند جاده، بام، فضای سبز) به عناصر مشخص LID هدایت می‌شود. برای مثال، سنگفرش نفوذپذیر (PP) رواناب ناشی از سطوح سخت (مانند جاده) و بارندگی مستقیم را جذب می‌کند. بام‌های سبز مجهز به مخازن ذخیره آب باران (GR (RB)) رواناب بام‌ها را جمع‌آوری کرده که قابل‌استفاده برای آبیاری است. ترانشه گیاهی یا سلول نگهداری زیستی (VS/BRC) نیز به‌عنوان عنصری انتقال‌دهنده عمل کرده، رواناب جمع‌آوری شده از فضای سبز اصلی و همچنین خروجی‌های سنگفرش نفوذپذیر و بام سبز را قبل از خروج نهایی از سیستم مدیریت می‌کند. پس از طراحی این برنامه جامع برای استقرار و ترکیب روش‌های LID در سطح زیرحوضه‌ها بر اساس طرح متوالی، چالش مهم بعدی تعیین ابعاد بهینه برای هر یک از این عناصر LID است تا بتوان به اقتصادی‌ترین و کارآمدترین راه‌حل نهایی دست‌یافت.

به‌منظور تعریف پارامترهای نفوذ در مدل هورتون، از اطلاعات خاک‌شناسی و زمین‌شناسی موجود در محدوده منطقه ۲ تهران استفاده شده است. داده‌های موجود از مطالعات پیشین شرکت‌های مشاور شهری و گزارش‌های فنی طرح‌های جامع و تفصیلی شهرداری مبنای تعیین مقادیر حداکثر و حداقل نرخ نفوذ قرار گرفتند. بر این اساس، نرخ حداکثر نفوذ (۷۸.۱ میلی‌متر بر ساعت) مربوط به نواحی دارای پوشش سبز یا خاک نفوذپذیر بوده و نرخ حداقل نفوذ (۳.۸۲ میلی‌متر بر ساعت) معرف شرایط سطوح نیمه‌نفوذپذیر منطقه است. برای سطوح غیرقابل نفوذ نیز، مدل SWMM بر اساس درصد مشخصی از سطح بدون ذخیره‌سازی، عملاً نفوذ را صفر در نظر گرفته است؛ لذا کلیه پارامترهای تعریف‌شده، واقع‌بینانه و مبتنی بر شرایط فیزیکی و کاربری اراضی منطقه انتخاب شده‌اند.

۲-۵- استقرار روش‌های توسعه کم‌اثر (LID) در زیرحوضه‌ها

در این پژوهش، گام نخست شامل شناسایی مکان‌های مناسب برای اجرای روش‌های مدیریت آب باران (LID) در سطح زیرحوضه‌ها بود. با استفاده از ابزار GIS، تعداد ۲۰ مکان مناسب در پنج منطقه مختلف برای استقرار این روش‌ها تعیین شد. **شکل ۴** نقشه منطقه مورد مطالعه را با تفکیک کاربری‌های زمین مختلف نشان می‌دهد و نحوه توزیع اولیه و امکان ترکیب انواع روش‌های LID (مانند سنگفرش نفوذپذیر، ترانشه گیاهی، بام سبز، بشکه باران و سلول نگهداری زیستی) را در این مناطق به تصویر می‌کشد. این مکان‌ها امکان ترکیب‌های گوناگونی از روش‌های LID را در هر منطقه بر اساس کاربری‌های موجود فراهم می‌آورند.

برای اجرای مؤثر این روش‌ها در هر زیرحوضه، دو راهکار اصلی وجود دارد:

♦ **اجرای یکپارچه (Integrated LID):** در این رویکرد، یک یا چند نوع LID در یک زیرحوضه بزرگ‌تر مستقر می‌شوند تا بخشی از رواناب تولیدی را در همان محدوده کنترل کنند. این

جدول ۲ تنظیم پارامترهای LID

Table 2 Parameters setting of LID practices

LID s type	Construction	Parameter option	Parameter value	
Permeable pavement	Surface	Berm height (mm)	3	
		Surface roughness (Mannings N)	0.012	
		Surface slope (%)	1	
	Pavement	Thickness (mm)	120	
		Void ratio (voids/So LID s)	0.2	
		Permeability (mm/hr)	2450	
		Storage	Thickness (mm)	230
			Void ratio (voids/So LID s)	0.75
	Green roof	Surface	Seepage rate (mm/hr)	300
			Berm height (mm)	6.35
Vegetation volume fraction			0.85	
Surface roughness (Mannings N)			0.23	
Soil		Surface slope (%)	1	
		Thickness (mm)	600	
		Porosity (volume fraction)	0.5	
		Conductivity (mm/hr)	12.7	
		Drainage mat	Thickness (mm)	200
			Void fraction	0.75
Vegetative swale	Surface	Roughness (Mannings N)	0.014	
		Berm height (mm)	6	
		Vegetation volume fraction	0.85	
	Surface	Surface roughness (Mannings N)	0.24	
		Surface slope (%)	1	
Rain barrel	Storage	Swale side slope (run/rise)	7.33	
		Barrel height (mm)	500	
Bio retention cell	Surface	Width (m)	1	
		Length (m)	equal to that of the contiguous urban design	
		upper edge (m)	0.2	

ژنتیک تک‌هدفه بنا شده، با ترکیب مفاهیم تسلط و فاصله ازدحامی به دنبال یافتن راه‌حل‌های بهینه است. در این الگوریتم، راه‌حل‌ها بر اساس این مفاهیم رتبه‌بندی می‌شوند و مراحل آن به شرح زیر طی می‌شود: ابتدا جمعیتی اولیه از راه‌حل‌ها به صورت تصادفی تولید می‌گردد، سپس هر

۲-۶- مدل بهینه‌سازی

در این مقاله، از الگوریتم NSGA-II که یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه معرفی شده توسط (2003) Deb et al., استفاده شده است. این الگوریتم که بر اساس الگوریتم

از ترکیب بهترین راه‌حل‌ها از نسل فعلی و نسل جدید انتخاب می‌گردد؛ این مراحل تا رسیدن به شرایط توقف تکرار می‌شوند

متغیر تصمیم

محل تحقیق شامل بیست منطقه است که هر کدام به یکی از چهار دسته اداری (A)، تجاری (B)، فضای سبز (G) یا مسکونی (R) تقسیم می‌شوند. برای ارتقای پایداری شهری، روش‌های کم‌اثر توسعه (LID) متفاوتی برای هر منطقه پیشنهاد شده است. هر منطقه دارای ترکیب‌های منحصربه‌فردی از روش‌های LID است که نسبت‌های طرح‌بندی آن‌ها به‌عنوان متغیرهای تصمیم بهینه‌سازی عمل می‌کنند. در مجموع ۶۰ متغیر تصمیم وجود دارد که به‌صورت رابطه (۱) نشان داده می‌شوند:

$$D(\text{Num}, \text{Type}) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، "Num" شماره سریال بلوک را نشان می‌دهد و "Type" نوع روش مدیریت آب باران LID را مشخص می‌کند: سنگفرش نفوذپذیر (PP)، بام سبز (GR)، ترانشه گیاهی (VS)، سلول ماند بیولوژیکی (BRC) یا بشکه باران (RB). برای اطمینان از اجرای عملی، نسبت‌های چیدمان LID باید با دستورالعمل‌های ارائه شده در "راهنمای فنی ساخت شهر اسفنجی (آزمایشی)" هماهنگ باشند. [جدول ۳](#) حداکثر نسبت‌های مجاز چیدمان LID را برای انواع مختلف بلوک و سطوح زیرین ارائه می‌دهد.

تابع هدف

برای ارزیابی اثربخشی روش‌های توسعه با تاثیر کم (LID)

[جدول ۳](#) حداکثر نسبت‌های آرایش LID برای انواع مختلف بلوک‌ها

Table 3 Maximum LID s layout ratios for different types of blocks

Maximum LID s layout ratios				
Land Classification	PP (%)	GR (%)	VS (%)	BRC (%)
A	60	95	86	60
B	65	95	86	60
G	75	-	95	45
R	45	95	75	30

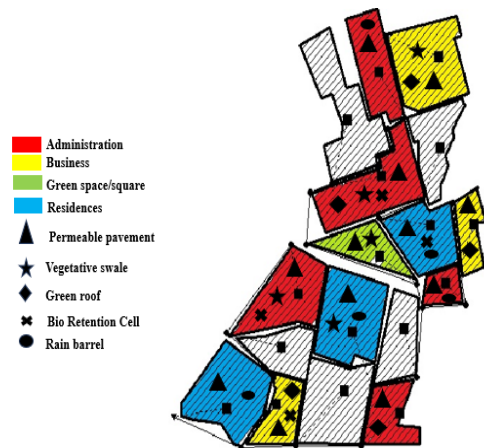


Fig. 4 LID s combination schemes in each block to be transformed

شکل ۴ نمایش روش‌های مختلف ترکیب (LIDها) در هر بخش (بلوک)

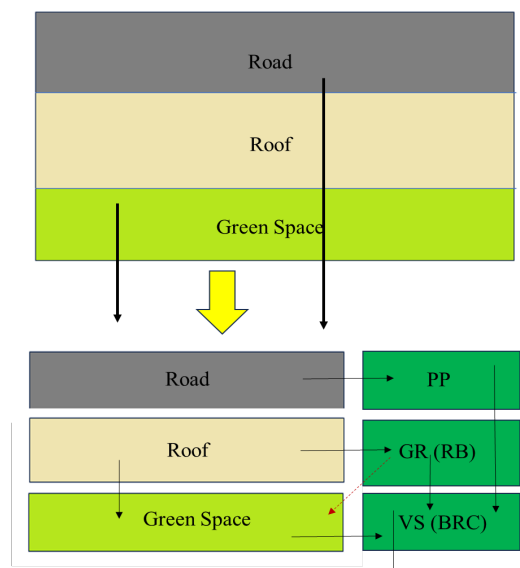


Fig. 5 Schematic diagram of LID s deployment

شکل ۵ دیاگرام شماتیک استقرار شیوه‌های توسعه پایدار (LIDs)

راه‌حل بر اساس تابع هدف ارزیابی شده و راه‌حل‌ها بر اساس تسلط و فاصله شلوغی رتبه‌بندی می‌شوند. در ادامه، والدین برای تولید نسل بعدی بر اساس رتبه‌بندی انتخاب شده و نسل جدید از طریق عملگرهای ژنتیکی مانند ترکیب و جهش تولید می‌شود. پس از آن، راه‌حل‌های نسل جدید نیز بر اساس تسلط و فاصله شلوغی رتبه‌بندی شده و نسل بعدی

استفاده شده‌اند، به صورت جزئی برای هر یک از انواع LID مورد بررسی (PP, GR, VS, RB, BRC) در **جدول ۴** ارائه شده‌اند و مبنای مالی محاسبات تابع هدف هزینه در فرایند بهینه‌سازی بوده‌اند. هزینه‌های ارائه شده برای تسهیلات PP, GR, VS و BRC به ازای هر مترمربع سطح اجرا است، در حالی که هزینه RB (بشکه باران) به ازای هر واحد بشکه محاسبه شده است.

اتصال مدل هیدرولیکی شهری SWMM به الگوریتم

بهینه‌سازی NSGA-II

مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی شهری SWMM، به واسطه ذخیره‌سازی اطلاعات خود در قالب پرونده‌های متنی، امکان ارتباط مستقیم با محیط‌های برنامه‌نویسی نظیر MATLAB را فراهم می‌آورد. در این مطالعه، از MATLAB برای ایجاد یک حلقه ارتباطی بین SWMM و الگوریتم چندهدفه NSGA-II استفاده شده است. در هر تکرار از فرایند بهینه‌سازی، مقادیر جدید متغیرهای تصمیم‌گیری (که توسط الگوریتم NSGA-II تولید می‌شوند) به فایل‌های تنظیمات SWMM منتقل شده و سپس مدل SWMM اجرا می‌گردد. خروجی‌های مدل SWMM، شامل نتایج شبیه‌سازی جریان در شبکه جمع‌آوری رواناب، به عنوان ورودی برای محاسبه تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بدین ترتیب، یک حلقه بازخوردی بین مدل SWMM و الگوریتم NSGA-II برقرار شده و فرایند بهینه‌سازی به صورت خودکار ادامه می‌یابد.

اگرچه در این پژوهش هزینه اجرای عناصر LID به عنوان یکی از اهداف اصلی بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و در

بر سیستم‌های زهکشی شهری، محققان معمولاً موارد زیر را بررسی می‌کنند: کنترل حجم آب، بهبود کیفیت آب، هزینه ساخت. این مطالعه بر روی کمی‌سازی نسبت هزینه به فایده ساخت یک "شهر اسفنجی" با در نظر گرفتن سه تابع هدف اصلی تمرکز دارد: رواناب کل، جریان اوج، کل هزینه امکانات (Csum) LID. دو تابع هدف اول می‌توانند مستقیماً از فایل گزارش SWMM استخراج شوند. فرمول محاسبه تابع هزینه کل (Csum) امکانات LID در رابطه (۲) ارائه شده است.

$$C_{sum} = \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^4 S_{ij} \times C_j + (\sum_{i=1}^{20} D_{i5}) \times C_5 \quad (2)$$

که در آن

S_{ij} : نسبت آرایش نوع خاصی از LID در یک بلوک را نشان می‌دهد.

C_j : هزینه ساخت LIDها (PP, BRC, GR یا VS) را به ازای هر واحد سطح نشان می‌دهد.

D_{i5} : تعداد بشکه‌های باران در یک بلوک خاص را مشخص می‌کند.

C_5 : هزینه ساخت RB را به ازای هر واحد نشان می‌دهد (هزینه ساخت واحدهای تسهیلات LID در **جدول ۴** نشان داده شده است).

برای انواع LID مساحت‌محور نظیر سنگفرش نفوذپذیر (PP)، سلول نگهداری زیستی (BRC)، بام سبز (GR) و ترانشه گیاهی (VS)، هزینه بر اساس حاصل ضرب مساحت اختصاص یافته در یک بلوک شهری (S_{ij}) در هزینه ساخت به ازای هر واحد سطح (C_j) محاسبه می‌شود؛ در مقابل، برای بشکه‌های باران (RB) که به صورت واحدی نصب می‌شوند، هزینه از حاصل ضرب تعداد واحدهای تخصیص یافته در یک بلوک (D_{i5}) در هزینه ساخت به ازای هر واحد (C_5) به دست می‌آید. تابع هدف هزینه کل (C_{sum}) مجموع حاصل ضرب‌های فوق را برای تمامی انواع LID مورد مطالعه و در تمامی بلوک‌های شهری مورد نظر محاسبه می‌نماید. مقادیر عددی دقیق برای هزینه‌های ساخت واحد (C_j) برای LIDهای مساحت‌محور و C_5 برای بشکه باران) که به عنوان ورودی‌های ثابت مدل هزینه

جدول ۴ هزینه ساخت انواع LID

Table 4 Construction cost of unit LID practices

LID Practice	Construction Cost (USD1)
Permeable Pavement (PP)	475191200
Green Roof (GR)	104026120
Vegetated Swale (VS)	77488400
Rain Barrel (RB)	225965080
Bio Retention Cell (BRC)	133419440

مدیریت آب‌های سطحی (LIDs) تاثیر چندانی بر نوسانات پیک جریان ندارد. این ثبات جزئی در پیک جریان، حاکی از عملکرد موفق الگوریتم NSGA-II در یافتن مجموعه راه‌حل‌های پارتو است. به عبارت دیگر، این الگوریتم توانسته است تعادل بهینه‌ای بین هزینه و منفعت را شناسایی کند. با بررسی نمودارهای پراکندگی در [شکل ۶](#)، روابط کلیدی میان اهداف بهینه‌سازی آشکار می‌شود. در ستون سمت چپ، رابطه میان هزینه کل سیستم LID و حجم کل رواناب برای تمامی دوره‌های بازگشت بارندگی مشاهده می‌گردد؛ نقاط مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیرمغلوب را تشکیل می‌دهند که یک جبهه پارتو با شکل مشخص و نمایانگر رابطه مبادله‌ای واضح را ایجاد می‌کند. در این رابطه، با افزایش هزینه صرف شده، حجم کل رواناب کاهش می‌یابد، اما شیب این جبهه به تدریج ملایم‌تر می‌شود که نشان‌دهنده اصل کاهش بازده حاشیه‌ای است؛ به این معنی که دستیابی به کاهش‌های بیشتر در حجم رواناب پس از نقطه‌ای مشخص، نیازمند سرمایه‌گذاری به مراتب بیشتری خواهد بود. در مقابل، تحلیل نمودارهای ستون سمت راست که رابطه میان هزینه کل سیستم LID و جریان اوج سیلاب را نمایش می‌دهند، یافته قابل توجهی را آشکار می‌سازد: به‌ویژه برای سناریوهای بارندگی ۵ و ۱۰ ساله (و تا حدی برای ۵۰ ساله)، با وجود تغییرات نسبتاً قابل توجه در هزینه، مقادیر جریان اوج سیلاب نوسانات یا تغییرات محدودی از خود نشان می‌دهند و در یک بازه نسبتاً کوچک‌تر قرار دارند. این مشاهده نشان می‌دهد که در مجموعه راه‌حل‌های بهینه پارتو به دست آمده، جریان اوج سیلاب در مقایسه با حجم کل رواناب، حساسیت کمتری نسبت به تغییرات در هزینه سیستم LID از خود نشان می‌دهد. این ثبات نسبی در پیک جریان در گستره‌ای از هزینه‌ها، حاکی از عملکرد موفق الگوریتم NSGA-II در یافتن مجموعه متنوع و گسترده‌ای از راه‌حل‌های غیرمغلوب (جبهه پارتو) است که تعادل‌های ممکن میان اهداف متضاد (کاهش هزینه، کاهش رواناب، کاهش پیک جریان) را به خوبی پوشش داده است؛ به عبارت دیگر، الگوریتم توانسته است طیفی از گزینه‌ها را شناسایی کند که نشان می‌دهند چگونه می‌توان با

مدل‌سازی لحاظ گردیده است، اما تحلیل مالی جامع در قالب ارزیابی هزینه-فایده انجام نشده است. از این رو، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، علاوه بر تحلیل هیدرولوژیکی و هزینه‌های ساخت، اثرات اقتصادی-اجتماعی، هزینه‌های نگهداری بلندمدت و مزایای زیست‌محیطی نیز به صورت کمی و نظام‌مند بررسی شوند تا امکان ارزیابی جامع‌تری از پایداری و اثربخشی سیستم‌های LID فراهم گردد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- راه‌حل بهینه از نظر هزینه و منفعت

بهینه‌سازی چندهدفه با هدف یافتن بهترین تعادل بین اهداف متضاد متعدد، از اهمیت بالایی برخوردار است. رویکرد معمول در این حوزه، تحلیل جبهه پارتو است. با این حال، در مسائل با بیش از سه هدف، تجسم و درک راه‌حل‌های پارتو به چالش می‌انجامد. در این مقاله، روشی جدید پیشنهاد شده است که با استفاده از نمودارهای پراکندگی دوبعدی بین دو هدف، به رفع این محدودیت‌ها می‌پردازد. این مقاله مجموعه‌های راه‌حل‌های بهینه پارتو را برای نسبت‌های طرح‌بندی LID در رویدادهای بارش کوتاه‌مدت با شدت‌های مختلف، با تمرکز بر بارش شدید، تجزیه و تحلیل می‌کند. هر راه‌حل یک طرح خاص چیدمان LID را نشان می‌دهد که توسط ۶۰ متغیر تصمیم‌گیری تعیین می‌شود. [شکل ۶](#) به کمک نمودارهای پراکنده دوبعدی، رابطه میان هزینه کل رواناب، هزینه ناشی از پیک جریان و شرایط بارندگی طراحی (با دوره بازگشت ۵، ۱۰ و ۵۰ ساله) را به تصویر می‌کشد. در این نمودارها، بهترین ترکیب هزینه-فایده که با اهداف فعلی پژوهش همخوانی دارد، برجسته شده است.

این نوع تجسم داده، تصمیم‌گیران را قادر می‌سازد تا با در نظر گرفتن اولویت‌های خود و اصل کاهش بازده حاشیه‌ای در اقتصاد، انتخاب‌های آگاهانه‌تری داشته باشند. [شکل ۶](#) نشان می‌دهد که تغییرات در هزینه سیستم‌های

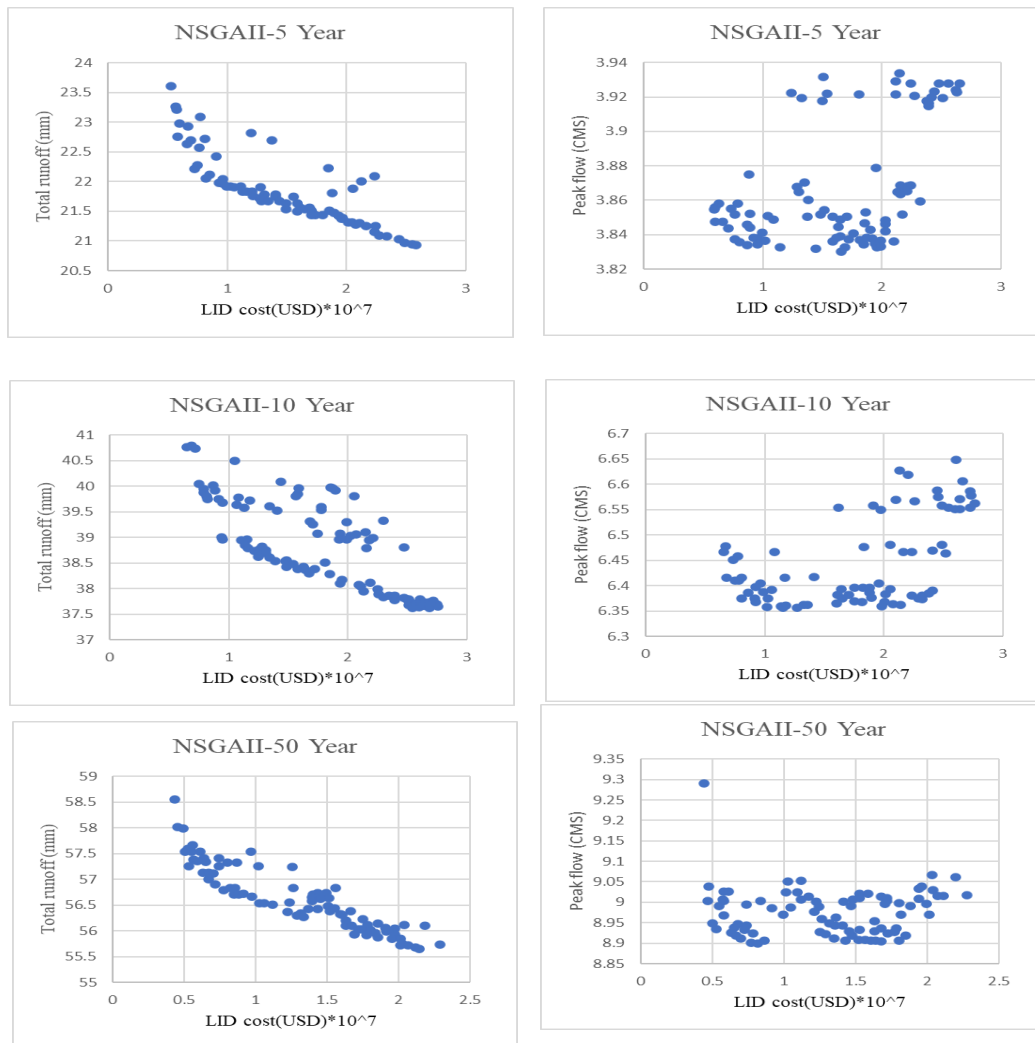


Fig. 6 Nondominated solution sets under different return period's rainfall of NSGA-II

شکل ۶ مجموعه‌های جواب غالب‌نشده تحت دوره بازگشت‌های مختلف بارندگی در الگوریتم

کمینه‌سازی هزینه در قبال دستیابی به حداکثر کاهش در حجم کل رواناب انتخاب شد. طرح دوم، تحت عنوان "طرح بهینه هزینه-اوج جریان سیلاب"، با تمرکز بر کمینه‌سازی هزینه در قبال دستیابی به حداکثر کاهش در جریان اوج سیلاب برگزیده شد. جزئیات عملکرد این دو طرح منتخب برای رویدادهای بارندگی با دوره‌های بازگشت ۵، ۱۰ و ۵۰ ساله، به ترتیب در [جدول‌های ۵](#) و [۶](#) ارائه شده است. با بررسی داده‌های [جدول‌های ۵](#) و [۶](#) برای رویدادهای بارندگی با دوره‌های بازگشت ۵ و ۱۰ ساله، مشاهده می‌شود که طرح اول (طرح بهینه هزینه-رواناب کلی، [جدول ۵](#)) به عنوان یک راهکار مطلوب و اقتصادی برای این شرایط مطرح است. این

بودجه‌های متفاوت به سطوح مختلفی از کنترل رواناب و پیک جریان دست‌یافت و این تعادل‌ها را به وضوح در فضای حل به تصویر کشیده است.

۲-۳- تحلیل طرح‌های بهینه LID

در پی نتایج حاصل از فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه و با در نظر گرفتن اصل اقتصادی کاهش بازده حاشیه‌ای در پی افزایش اقدامات در سیستم‌های توسعه کم‌اثر (LID)، دو طرح بهینه متمایز از میان مجموعه راه‌حل‌های بهینه پارتو انتخاب گردید. طرح نخست، که به آن "طرح بهینه هزینه-حجم رواناب کل" گفته می‌شود، با اولویت‌دهی به

در برابر بارش‌های بسیار سنگین و کوتاه‌مدت، توانایی کمتری در مدیریت و کنترل مؤثر آب مازاد دارند. این وضعیت چالش‌برانگیز در شرایط بارندگی شدید، مطرح‌کننده این نکته است که مقابله با این پدیده‌ها صرفاً با افزایش ساده نسبت آرایش LID یا صرفاً افزایش بودجه برای طرح‌های LID ممکن است راه‌حل کافی و مناسبی برای دستیابی به سطح بالایی از اثربخشی در مدیریت بارش‌های بسیار شدید نباشد. در نتیجه، اثربخشی کلی روش‌های LID در منطقه مطالعاتی به‌طور قابل توجهی تحت تاثیر شدت رویدادهای بارندگی قرار می‌گیرد.

برای طوفان‌های شدید، نیازمند بررسی راهکارهای تکمیلی یا ترکیبی است که احتمالاً سرمایه‌گذاری مالی به‌مراتب بیشتری را نیز طلب می‌کند تا بتواند درصدهای کاهش مشابه با بارش‌های کمتر شدید را محقق سازند، درحالی‌که طرح‌های بهینه‌شده برای دوره بازگشت ۵۰ ساله لزوماً پرهزینه‌تر از طرح‌های بهینه دوره‌های کمتر نیستند؛ اما کارایی کمتری دارند.

۳-۳- نتایج شبیه‌سازی مدل راه‌حل بهینه

طرح شماره یک، که برای رویداد بارندگی با دوره بازگشت ده‌ساله طراحی گردیده بود، با بهره‌گیری از مدل هیدرولیکی شهری SWMM شبیه‌سازی و صحت‌سنجی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی که در [شکل ۷](#) به تصویر کشیده

طرح، همان‌طور که در [جدول ۵](#) مشخص است، در مقایسه با طرح دوم ([جدول ۵](#))، معمولاً با بودجه اجرایی نسبتاً پایین‌تر و کارایی بالاتری در کاهش حجم کل رواناب دارد (حدود ۲۲/۱٪ و ۱۸/۷٪ کاهش). علاوه بر این، میزان کاهش دبی اوج سیلاب در این طرح (حدود ۱۵/۴٪ و ۱۱/۲٪) با طرح دوم (حدود ۱۵/۶٪ و ۱۱/۸٪ در [جدول ۶](#)) در این دو دوره بازگشت، قابل‌مقایسه و نزدیک به هم است، هرچند طرح دوم کمی در کاهش پیک جریان برتری دارد. این تعادل مطلوب میان هزینه نسبتاً پایین، کاهش مؤثر رواناب کل و کاهش دبی اوج قابل‌قبول، طرح بهینه هزینه-رواناب کلی (طرح ۱) را به یک راه‌حل بهینه اقتصادی برای مدیریت آب‌های سطحی در منطقه مورد مطالعه در شرایط بارندگی متوسط (دوره‌های بازگشت ۵ و ۱۰ ساله) تبدیل می‌کند.

اما هنگامی‌که شدت بارندگی به بارش طراحی با دوره بازگشت ۵۰ ساله می‌رسد، همان‌طور که در ردیف مربوط به دوره بازگشت ۵۰ ساله در [جدول ۵](#) قابل مشاهده است، عملکرد هر دو طرح پیشنهادی دستخوش تغییر می‌شود. در این شرایط شدید بارندگی، درصد کاهش حجم کل رواناب (حدود ۱۸٪ در طرح ۱ و ۱۷٪ در طرح ۲) و به‌ویژه درصد کاهش جریان اوج سیلاب (حدود ۷/۵٪ در طرح ۱ و ۸٪ در طرح ۲) در مقایسه با دوره‌های بازگشت ۵ و ۱۰ ساله به‌طور محسوسی کمتر است. این کاهش در کارایی نشان می‌دهد که سیستم‌های LID طراحی‌شده بر مبنای این بهینه‌سازی،

جدول ۵ طرح ۱: راه‌حل بهینه هزینه-رواناب کل

Table 5 Scheme 1: total runoff-cost optimal solution

Return Period (year)	Total Runoff (mm)	Runoff Reduction (%)	Peak Flow (CMS)	Peak Flow Reduction (%)	LID S Cost (Rial)
5	21.99	22.1	3.838	15.4	2.252E+12
10	38.97	18.7	6.403	11.2	2.322E+12
50	56.72	18	8.948	7.5	2.032E+12

جدول ۶ طرح ۲: راه‌حل بهینه پیک جریان-رواناب کل

Table 6 Optimal peak flow-total runoff solution

Return Period (year)	Total Runoff (mm)	Runoff Reduction (%)	Peak Flow (CMS)	Peak Flow Reduction (%)	LID S Cost (Rial)
5	22.054	21.8	3.832	15.6	2.362E+12
10	39.641	17.3	6.357	11.8	2.524E+12
50	57.408	17	8.899	8	1.833E+12

منطقه ۲ تهران انجام شد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مدل SWMM نشان داد که اجرای طرح‌های بهینه LID منجر به کاهش قابل‌توجهی در دبی حداکثر سیستم در مقایسه با حالت بدون LID می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از فرایند بهینه‌سازی چندهدفه و تحلیل جبهه پارتو، از میان ترکیب‌های مختلف توسعه کم‌اثر (LID)، طرح شماره یک به‌عنوان ترکیب بهینه برای شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه معرفی می‌گردد. این طرح با تمرکز بر بیشینه‌سازی کاهش حجم کل رواناب، در بازه‌های بازگشت ۵ و ۱۰ ساله عملکرد مطلوب‌تری نسبت به سایر گزینه‌ها از خود نشان داده و در عین حال با هزینه اجرایی پایین‌تری نیز همراه بوده است. به‌طور مشخص، طرح شماره یک موفق به کاهش رواناب کل به میزان ۲۲/۱٪ و ۱۸/۷٪ کاهش دبی اوج به میزان ۱۵/۴٪ و ۱۱/۲٪ به ترتیب برای رویدادهای با دوره بازگشت ۵ و ۱۰ ساله شده است. این در حالی است که کاهش دبی اوج در این ترکیب تفاوت محسوسی با طرح دوم نداشته و از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه‌تر است. از این‌رو، این ترکیب به‌عنوان گزینه بهینه برای اجرای راهکارهای مبتنی بر LID در جهت مدیریت مؤثر رواناب سطحی و کاهش خطر سیلاب در مناطق شهری پیشنهاد می‌شود.

شده‌اند، کاهش چشمگیر دبی حداکثر سیستم پس از اجرای اقدامات مدیریتی مبتنی بر سرزمین (LIDها) را نسبت به حالت بدون LID نشان می‌دهد. برای بارش‌های با دوره بازگشت ۵، ۱۰ و ۵۰ ساله، نرخ‌های کاهش رواناب کل سیستم به ترتیب ۳۱/۸٪، ۲۰/۷٪ و ۱۸/۵٪ محاسبه شد. به‌طور مشابه، نرخ‌های کاهش جریان اوج برای این دوره‌های بازگشت به ترتیب ۲۰/۳٪، ۱۷/۸۵٪ و ۱۲/۶٪ یافت شد. لازم به ذکر است که در این مطالعه، از میان دو طرح بهینه‌شده روی جبهه پارتو، طرح شماره یک به دلیل عملکرد مطلوب‌تر در کاهش رواناب و هزینه پایین‌تر در دوره‌های بازگشت رایج، به‌عنوان طرح منتخب برای شبیه‌سازی دقیق انتخاب گردید. همچنین، به دلیل عدم دسترسی به داده‌های میدانی دقیق در منطقه مورد مطالعه، صحت‌سنجی مدل بر اساس مقایسه سناریوهای پیش‌فرض (وضعیت بدون LID و وضعیت طراحی‌شده) و تحلیل رفتار منطقی مدل در بازه‌های مختلف بارندگی انجام شده است.

۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف ارزیابی اثربخشی پیاده‌سازی روش‌های توسعه کم‌اثر (LID) به‌منظور مدیریت رواناب شهری در

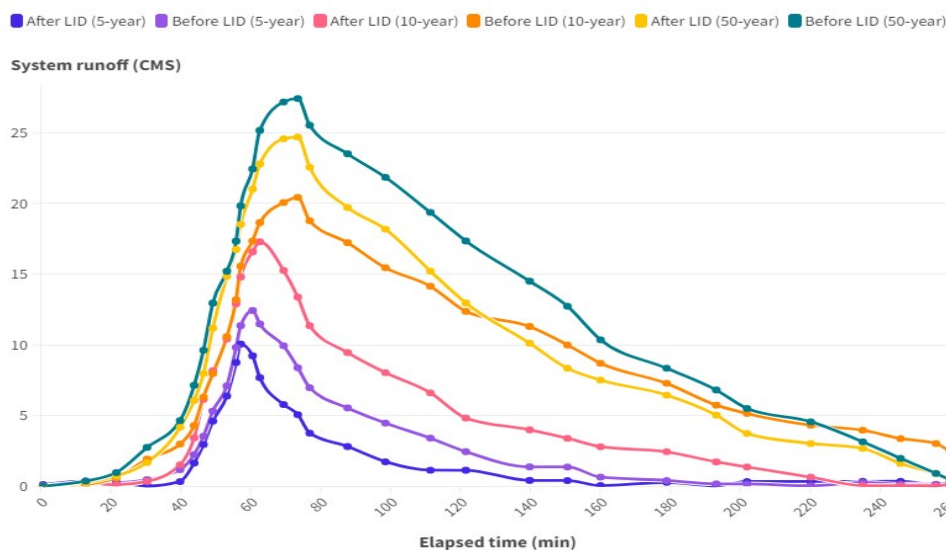


Fig. 7 Simulation results of the optimal solution

شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی راه‌حل بهینه

بهینه، ضمن کاهش خطرات ناشی از سیلاب، می‌تواند به بهبود کیفیت آب‌های زیرزمینی و افزایش سرانه فضای سبز شهری کمک کند و به‌عنوان ابزاری ارزشمند برای برنامه‌ریزان شهری و طراحان سیستم‌های آب و فاضلاب مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، اثربخشی این روش‌ها در برابر بارش‌های بسیار شدید ممکن است محدودتر باشد و نیازمند بررسی راهکارهای تکمیلی باشد. با توجه به تنوع ساختارها و شرایط اجرایی تسهیلات LID، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، پیش از بهینه‌سازی، تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای مؤثر مانند هزینه اجرا، نرخ نفوذ، و شیب زمین انجام گیرد. این کار می‌تواند در شناسایی عوامل کلیدی، افزایش دقت مدل و کارایی تصمیم‌گیری چندمعیاره نقش بسزایی ایفا کند.

بر اساس شبیه‌سازی طرح شماره یک برای رویداد بارندگی با دوره بازگشت ده‌ساله، نرخ کاهش رواناب کل سیستم برای بارش‌های با دوره بازگشت ۵، ۱۰ و ۵۰ ساله به ترتیب ۳۱/۸٪، ۲۰/۷٪ و ۱۸/۵٪ محاسبه گردید. همچنین، نرخ کاهش جریان اوج برای این دوره‌های بازگشت به ترتیب ۲۰/۳٪، ۱۷/۸۵٪ و ۱۲/۶٪ به دست آمد. این نتایج حاکی از عملکرد مثبت سیستم‌های LID در کنترل رواناب و پیک جریان در منطقه مورد مطالعه است.

در نهایت، این پژوهش نشان می‌دهد که مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی چندهدفه توسعه‌یافته بر پایه SWMM و الگوریتم NSGA-II ابزار مؤثری برای تعیین مکان‌یابی و طراحی بهینه سامانه‌های مدیریت آب‌های سطحی مبتنی بر طبیعت در مناطق شهری است. اجرای این طرح‌های

Tehran..

Data Availability Statement

The data presented in this study are available in the article itself.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Baek, S.-S., Choi, D.-H., Jung, J.-W., et al. (2015). Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea: experimental and modeling approach. *Water Research*, vol. 86, pp. 122–131. DOI: [10.1016/j.watres.2015.08.038](https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.038)
- Bai, Y., Zhao, N., Zhang, R., & Zeng, X. (2018). Storm water management of low impact development in urban areas based on SWMM. *Water*, vol. 11, no. 1, p. 33. DOI: [10.3390/w11010033](https://doi.org/10.3390/w11010033)
- Deb, K., Mohan, M., & Mishra, S. (2003). Towards a quick computation of well-spread pareto-optimal solutions. *Proceedings of International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. EMO 2003*, pp. 222–236, Faro, Portugal. DOI: [10.1007/3-540-36970-8_16](https://doi.org/10.1007/3-540-36970-8_16)
- Flanagan, K., Branchu, P., Ramier, D., & Gromaire, M. C. (2016). Evaluation of the relative roles of a vegetative filter strip and a biofiltration swale in a treatment train for road runoff. *Water Science & Technology*, vol. 75, no. 3-4, pp. 987–997. DOI: [10.2166/wst.2016.578](https://doi.org/10.2166/wst.2016.578)

5- List of Symbols

Num	Block serial number
Type	LID (Type of LID stormwater management method)
LID	Low Impact Development
SWMM	Storm Water Management Model
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
MOOP	Multi-Objective Optimization Problem
VS	Vegetated Swales
PP	Permeable Pavement
GR	Green Roofs
BRC	Bioretention Cells
RB	Rain Barrels

Acknowledgments

We would like to express our gratitude for the unwavering support of Tarbiat Modares University.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, S. S. and J. M. V. S.; Methodology, S. S. and J. M. V. S.; Software, S. S.; Data analysis, S. S.; Writing-Original Draft Preparation, S. S.; Writing-Review and Editing, J. M. V. S.; Supervision, J. M. V. S.. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

This research originated from the doctoral thesis of the first author (Sonia Sadeghi) and was carried out with the support of Tarbiat Modares University of

- Ghodsi, S. H., Kerachian, R., & Zahmatkesh, Z. (2016). A multistakeholder framework for urban runoff quality management: application of social choice and bargaining techniques. *Science of the Total Environment*, vol. 550, pp. 574–585. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2016.01.052](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.052)
- Han, X., & Wu, Y. (2019). Construction and application of the Sponge City in different precipitation regions: case studies in Pingxiang and Jinan, China. *Energy Procedia* 159, 207-212. DOI: [10.1016/j.egypro.2019.09.060](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.09.060)
- Kyle, E., Zach, M., & Tirupati, B. (2018). Multiobjective optimization of low impact development stormwater controls. *J. Hydrol.*, 562, 564-576. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2018.05.021](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.021)
- Liu, J., Gao, X.-J., Jiao, Y.-B., Xue, S.-H., Lü, P., Yang, X., Kang, K., & Han, J.-B. (2022). Multi-objective optimization of the urban drainage system based on SWMM and NSGA-II I algorithm. *China Rural Water and Hydropower*, 0(9), 90-94. (In Persian) DOI: [10.21203/rs.3.rs-2303660/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2303660/v1)
- Macro, K., Matott, L.S., Rabideau, A., Ghodsi, S.H., & Zhu, Z. (2019). OS-TRICH- SWMM: A new multi-objective optimization tool for green infrastructure planning with SWMM . *Environ. Modell. Softw.* 113, 42-47. DOI: [10.1016/j.envsoft.2018.12.004](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.12.004)
- Paola, F. D., Giugni, M., Pugliese, F., & Romano, P. (2018). Optimal design of LID s in urban stormwater systems using a harmonysearch decision support system. *Water Resources Management*, vol. 32, no. 15, pp. 4933–4951. DOI: [10.1007/s11269-018-2041-y](https://doi.org/10.1007/s11269-018-2041-y)
- Rossman, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.1*. US EPA, Cincinnati, OH, USA.
- Oraci, Z. S., Saghafian, B., & Shamsai, A. (2012). Multi-objective optimization for combined quality-quantity urban runoff control. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, no. 12, pp. 4531–4542. DOI: [10.5194/hess-16-4531-2012](https://doi.org/10.5194/hess-16-4531-2012)
- Shang, R., Wang, H., Huang, N., Li, H., Wang, S., Zhang, B., Wan, N., & Deng, Z. (2016). Effect simulation and evaluation of low-impact development measures in new city. *China Water & Wastewater* 32 (11), 141-146. (In Persian) DOI: [10.1016/j.envsoft.2016.12.004](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.12.004)
- Tao, T., Xiao, T., Wang, L., & Yan, H. (2019). Multi-objective optimization design of low-impact development plan in sponge city construction. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, vol. 47, no. 1, pp. 92–96. (In Persian) DOI: [10.11943/j.issn.0253-3747.2019.01.014](https://doi.org/10.11943/j.issn.0253-3747.2019.01.014)
- Sun, Y. W., Li, Q. Y., Liu, L., Xu, C. D., & Liu, Z. P. (2014). Hydrological simulation approaches for BMPs and LID practices in highly urbanized area and development of hydrological performance indicator system. *Water Science & Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 143–154. DOI: [10.3724/SP.J.1230.2014.00143](https://doi.org/10.3724/SP.J.1230.2014.00143)
- Zhang, M., Zhou, K., Zhang, T., Li, J., & Feng, P. (2019). Hydrological responses and stormwater control effects of typical urban LID measures. *Journal of Hydroelectric Engineering*, vol. 38, no. 5, pp. 57–71. (In Persian) DOI: [10.11660/j.issn.1000-0860.2019.05.007](https://doi.org/10.11660/j.issn.1000-0860.2019.05.007)