

Evaluating the Effect of Low-Impact Development Methods on Urban Runoff Control Using Optimization Algorithms

Sedigheh Modarresi Tabatabaei¹ , Hamidreza Moradi^{2*} , Mehdi Vafakhah³ , Javad Vahidi⁴ 

Received: 12-11-2025, Revised: 31-01-2026, Accepted: 12-02-2026, Published: 14-02-2026

<https://doi.org/10.22034/19.71.4>

Extended Abstract*

Introduction

In recent decades, rapid urban growth, vegetation loss, and land use changes have led to increased runoff and urban flooding. Floods in cities disrupt daily life, challenge urban services, and damage infrastructure. Floods cause significant human and financial losses worldwide, which makes urban runoff and stormwater management a critical challenge. Therefore, effectively managing the quantity and quality of urban runoff has become essential for reducing flooding and facilitating the reuse of water. Low Impact Development methods have shown efficacy in reducing urban runoff, and the main challenge is to propose optimal management measures that decrease runoff volume while exploring the potential use of runoff for other urban purposes. The methods are designed to manage stormwater at its source, minimize runoff, decrease contamination, and provide positive environmental effects. Several studies have shown the benefits of Low Impact Development (LID) methods in managing urban runoff and the other studies have demonstrated their effectiveness when combined with optimization algorithms. This study aims to apply LID methods including green roof, rain garden, rain barrel, infiltration trench, permeable pavement, bioretention system, and vegetative swale and optimize their combinations using metaheuristic algorithms, like the non-dominated sorting genetic algorithm and gray wolf optimizer to control flood in an urban watershed in Tehran.

Materials and Methods

The study area is located in District 7 and parts of District 1 in Region 5 in the northwest of Tehran, with an area of 9.1 km². There are two Sub-regions, including 11 sub-watersheds in the study area. The area is a highly urbanized site including residential areas, streets, and parks. This area is especially significant due to the densely populated residential and commercial centers; in fact, it has a great socioeconomic value. It faces flooding and frequent problems in its drainage system because of intense rainfall events, inadequate channel capacities, and urban waste repletion. For the first time, this research utilized sixteen various combinations of 7 LID methods, including green roof, rain garden, rain barrel, infiltration trench, permeable pavement, bioretention system, and vegetative swale to control floods in the urban watershed. Hydraulic and hydrological modeling were

1- Ph.D. Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran Province, Iran, hedyeh_modarres@yahoo.com

2- Professor, Hamidreza Moradi Rekabdar, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran Province, Iran, *Corresponding Author: rmoradi@modares.ac.ir

3- Professor, Mehdi Vafakhah, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran Province, Iran, vafakhah@modares.ac.ir

4- Assistant Professor, Javad Vahidi, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, jvahidi@iust.ac.ir

conducted using a six-hour design rainfall, and the parameters for LID methods settlement were established in the SWMM model for the 25-year return period. The results were integrated and evaluated using NSGA-II and GWO in MATLAB. The answer on the Pareto fronts generated by NSGA-II and GWO algorithm were compared and the optimized answers were proposed by the GWO algorithm. The innovative approach of this research simultaneously addresses runoff reduction, cost efficiency, and service performance sustainability. Introducing a desirable optimization algorithm, it proposed a suitable optimized combination for urban flood control in the study area.

Results and Discussion

Calibration and validation of the SWMM model demonstrated its accurate performance in simulating floods in this area. The results of simulating total runoff and peak discharge without implementing LID methods showed that the drainage network is not suitable for rainfall with a 25-year return period, and it is unable to transfer the runoff properly. Modeling LID methods for 25-year, 6-hour rainfall, separately and in various combinations, indicated that the greatest effectiveness of LIDs on reducing runoff volume and discharge is associated with combinations of three or four methods. Running the coupled model of SWMM with NSGA-II and GWO algorithms for various combinations of LID methods and comparing the results, the combination of bioretention system, green roof, vegetative swale, and infiltration trench was chosen because it could effectively reduce runoff volume, be cost-effective, and demonstrate minimal performance reduction compared to other combinations. Comparing the answers provided by the optimization algorithms, the Pareto fronts generated by the GWO algorithm suggested suitable solutions for various values of all three objective functions, due to their better density and distribution. Therefore, the optimized combination proposed by the GWO algorithm, demonstrated the best performance by surpassing another method, and could reduce runoff volume by 60 to 70 percent and peak discharge by 70 percent in the study area. The cost of implementing the combination is approximately \$900,000 to \$1,200,000.

Conclusion

The growth of urban areas and the transformation of natural landscapes into cities have resulted in more impervious surfaces, increased runoff, and a higher risk of flooding. Low Impact Development (LID) methods have been suggested as effective solutions to address these challenges. This study conducted multi-objective optimization of LID methods in an urban watershed using the SWMM model and the NSGA-II and GWO algorithms. Unlike previous studies that mainly emphasized single-objective optimization, this research simultaneously focused on minimizing runoff volume, minimizing cost, and the sustainability of methods' performance. The findings showed that the combination of bioretention systems, green roofs, vegetative swales, and infiltration trenches is very effective in controlling runoff and flooding in the study area. The GWO algorithm is more efficient compared to NSGA-II, achieving a significant reduction of 60 to 70 percent in runoff volume at a reasonable cost. The proposed solutions of this research can play a crucial role in reducing water loss in arid and semi-arid regions, thereby facilitating the optimal utilization of water resources. Ultimately, the simulation-optimization approach serves as a reliable and effective tool for urban planning experts and flood control specialists to improve the quality and quantity of urban water by selecting the best combination of LID methods.

Keywords: *Flood Management, Gray Wolf Optimizer, Low impact development methods, Non-dominated sorting genetic algorithm II, Storm Water Management Model*

Article type: Research Article

Acknowledgements

The cooperation and assistance of Tarbiat Modares University is appreciated

Conflicts of Interest

There is no conflict of interest in this research, as confirmed by all authors.

Data Availability Statement

The data used in this research are available through correspondence with the corresponding author.

Authors' contribution

Sedigheh Modarresi Tabatabaei: Performing the stormwater management model, executing the algorithms, conducting all analyses, and writing the article.

Hamodreza Moradi: Guidance in conducting analyses, editing, and revising the article.

Mehdi Vafakhah: Consultation on performing the stormwater management model and selecting methods, and revising the article.

Javad Vahidi: Consulting on implementing the algorithms

Citation: Farhadi M, Modarresi Tabatabaei S, Moradi Rekabdar H.M, Vafakhah M, Vahidi J. Evaluating the effect of low-impact development methods on urban runoff control using optimization algorithms. *jwmseir* 2026; 19(71): 52-71

Iran-Watershed Management Science & Engineering, Year 2026, Vol 19, No 71, PP 52 - 71

Publisher: Watershed Management Society of Iran

© Author(s)



ارزیابی اثرگذاری روش‌های توسعه کم‌پیامد بر کنترل رواناب‌های شهری با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی

صدیقه مدرس طباطبائی^۱، حمیدرضا مرادی^{۲*}، مهدی وفاخواه^۳، جواد وحیدی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱، تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵

<https://doi.org/10.22034/19.71.4>

چکیده

در دهه‌های اخیر، توسعه بی‌رویه شهرنشینی، تخریب پوشش گیاهی، تغییر کاربری اراضی موجب افزایش رواناب‌ها و تشدید سیلاب‌های شهری شده است. در این زمینه، مدیریت کمیت و کیفیت رواناب‌ها به منظور کاهش حجم و دبی رواناب‌ها و استفاده مجدد از آنها، اهمیت ویژه‌ای یافته است. در این مقاله، برای اولین بار ۱۶ ترکیب مختلف از هفت روش توسعه کم‌پیامد (LID) شامل بام سبز، باغچه بارانی، شبکه استحصال باران، ترانشه نفوذ، روکش نفوذپذیر، سامانه نگهداشت زیستی و جوی باغچه با هدف کنترل سیلاب در یک حوزه آبخیز شهری در ناحیه هفت منطقه پنج شهر تهران بکار گرفته شد. مدل‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی روش‌ها با استفاده از مدل SWMM انجام شد و نتایج با الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری گرگ خاکستری و ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب در محیط MATLAB تلفیق شد. با توجه به اینکه اکثر مطالعات پیشین بر روی بهینه‌سازی تک‌هدفه روش‌های توسعه کم‌پیامد تمرکز دارند، این پژوهش یک رویکرد نوآورانه بهینه‌سازی چندهدفه حاصل از ادغام مدل SWMM با الگوریتم‌های NSGAI و GWO را معرفی می‌نماید که به طور همزمان به توابع هدف مشتمل بر کاهش حجم رواناب، کاهش هزینه روش‌های توسعه کم‌پیامد و به حداقل رساندن کاهش عملکرد روش‌ها در طول دوره بهره‌برداری می‌پردازد. در این پژوهش، روش ترکیبی سامانه نگهداشت زیستی، بام سبز، جوی باغچه و ترانشه نفوذ به عنوان روش ترکیبی بهینه منتخب الگوریتم GWO معرفی شد. ترکیب پیشنهادی الگوریتم GWO با برتری نسبت به الگوریتم دیگر، منجر به کاهش ۶۰-۷۰ درصدی حجم رواناب و کاهش حدود ۷۰ درصدی دبی اوج جریان در خروجی‌های حوضه با هزینه‌ای در حدود ۹۰۰,۰۰۰ تا ۱,۲۰۰,۰۰۰ دلار شد. نتایج این پژوهش قادر است به کارشناسان و مدیران شهری در امور مختلفی مانند طراحی، ارزیابی عملکرد، برآورد هزینه و انتخاب ترکیب‌های بهینه از روش‌های مختلف توسعه کم‌پیامد یاری رساند.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب، روش‌های توسعه کم‌پیامد، کنترل سیل، مدل مدیریت آب باران

نوع مقاله: پژوهشی

استناد: مدرس طباطبائی صدیقه، مرادی رکابدار حمیدرضا، وفاخواه مهدی، وحیدی جواد. ارزیابی اثرگذاری روش‌های توسعه کم‌پیامد بر کنترل رواناب‌های شهری با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۴۰۵؛ ۱۹(۷۱): ۵۲-۷۱

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱۴۰۴، دوره ۱۹، شماره ۷۱، صفحه ۵۲-۷۱



© نویسندگان

ناشر: انجمن آبخیزداری ایران

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران، hedyeh_modarres@yahoo.com

۲- استاد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران، *نویسنده مسئول: hrmoradi@modares.ac.ir

۳- استاد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران، vafakhah@modares.ac.ir

۴- دانشیار، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران، jvahidi@iust.ac.ir

LID، از جمله روکش نفوذپذیر^{۱۰}، سامانه نگهداشت زیستی^{۱۱}، باغچه بارانی^{۱۲}، ترانشه نفوذ^{۱۳} و سامانه استحصال آب باران^{۱۴}، می تواند دبی اوج رواناب را تا ۵۴/۷ درصد و حجم کل رواناب را تا ۷۵/۲ درصد کاهش دهد. همچنین نظری و همکاران [۱۶] در یک ناحیه شهری در تهران از انواع LID شامل بام سبز^{۱۵}، استحصال آب باران، سامانه نگهداشت زیستی، ترانشه نفوذپذیر و جوی باغچه^{۱۶} استفاده نمودند و مدل SUSTAIN به منظور ارزیابی عملکرد هر روش بکار گرفته شد و پاسخ های بهینه از طریق الگوریتم بهینه سازی NSGA-II بدست آمد. نتایج نشان داد که پیاده سازی روش ها حجم رواناب را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد. Kumar و همکاران [۱۳] نیز، برنامه ریزی تحلیلی استفاده از بام های سبز و ترانشه های نفوذ را برای کنترل رواناب سطحی در یک منطقه شهری در دهلی هند ارائه دادند. به منظور تجزیه و تحلیل هزینه-فایده روش ها، الگوریتم NSGA-II با مدل SWMM تلفیق شد. نتایج نشان داد که سناریوهای بهینه پیشنهادی مدل همزمان با کنترل هزینه و سطح اجرای روش ها، حجم رواناب شهری را نیز به حداقل می رساند. Ayoubi Ayoubli و همکاران [۴]، با تهیه نقشه خطر سیل به ارزیابی عملکرد روش های توسعه کم پیامد برای کاهش خطر سیل در یک منطقه از شهر شیراز پرداختند. در این پژوهش از مدل SWMM برای شبیه سازی سیلاب و از مدل های^{۱۷} MCDM برای ارائه سناریوهای مدیریتی در بررسی آسیب پذیری سیل پرداخته شد. نتایج نشان داد که استفاده از روش های توسعه کم پیامد در مدیریت سیل برای رویدادهای بارش با دوره بازگشت کمتر از ۱۰ سال مؤثر بود و با اعمال رویکرد ترکیبی روش ها، کاهش ۲۲/۸ درصدی در سیلاب های منطقه حاصل شد. اسکندری و سلطانی نیا [۷] از الگوریتم های بهینه سازی کپک مخاطی (SMA)^{۱۸} و NSGA-II برای بهینه سازی بکارگیری روش های توسعه کم پیامد شامل سامانه نگهداشت زیستی، روکش نفوذپذیر و جوی باغچه با هدف افزایش کیفیت رواناب شهری و حداقل نمودن هزینه ها، در یک منطقه شهری در تهران استفاده کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم بهینه سازی کپک مخاطی در مقایسه با الگوریتم NSGA-II از عملکرد مطلوبتری برخوردار بوده و راه حل های مقرون بصرفه تری را پیشنهاد می نماید و از میان روش های بکارگرفته شده، سامانه نگهداشت زیستی اثربخشی بیشتری دارد. در پژوهش Seo و همکاران [۲۱]، از الگوریتم ژنتیک و مدل PCSWMM برای بهینه سازی روش های توسعه کم پیامد برای کاهش رواناب سطحی در منطقه ای شهری در سئول کره جنوبی استفاده شد. در این پژوهش

در طول چند دهه اخیر، توسعه بی رویه شهرنشینی و از بین رفتن پوشش گیاهی باعث تبدیل زمین های طبیعی و بکر به مناطق غیرقابل نفوذ شده است. تغییر کاربری اراضی اصلی ترین عامل افزایش میزان رواناب های سطحی و افزایش در تعداد و حجم وقایع سیلابی^{۱۹}، در سطح حوضه های شهری است [۲۲]. در هنگام وقوع بارش ها، جاری شدن رواناب و پدیده سیلاب در مناطق شهری، باعث اختلال در زندگی روزمره شهرنشینان شده، سلامتی آنان را تهدید نموده و خسارات زیادی به زیرساخت های شهری وارد می نماید [۳]. کنترل سیلاب های ناشی از بارش های شدید و ناکارآمدی سامانه زهکشی شهری، مسئله بسیار مهمی است که محققان را بر آن داشته تا روش هایی را طراحی نمایند که تمام یا بخشی از نقاط ضعف و مشکلات روش های سنتی را مرتفع ساخته و توجیه اقتصادی و سازگاری خوبی نیز با محیط زیست داشته باشد [۱۷]. با توجه به موارد ذکر شده و مسئله کم آبی و بحران آب در مناطق خشک و نیمه خشک کشور، کنترل سیلاب ها و رواناب های سطحی در سطح شهرها با استفاده از روش های مدیریتی توسعه کم پیامد^{۲۰} امری ضروری به نظر می رسد و در این راستا الگوریتم های بهینه سازی^{۲۱} می توانند در انتخاب بهینه این روش ها به منظور رفع مشکلات ناشی از سیلاب های شهری مؤثر باشند.

پژوهش های بسیاری در دنیا در مورد اثر روش های توسعه کم پیامد بر کنترل رواناب های شهری از دیدگاه کمی، کیفی و اقتصادی در مدیریت سیلاب و رواناب های شهری انجام شده است. در برخی از این پژوهش ها نیز از الگوریتم های بهینه سازی برای کاهش حجم رواناب و دبی اوج سیلاب استفاده شده است. در این زمینه در پژوهش Mani و همکاران [۱۵] از ادغام مدل بارش رواناب SWMM^{۲۲} و الگوریتم های بهینه سازی کلنی مورچگان (MOALOA)^{۲۳} و NSGA-II^{۲۴} و روش تصمیم گیری چند معیاره TOPSIS^{۲۵} برای شبیه سازی و بهینه سازی روش های توسعه کم پیامد در یک حوضه شهری در تهران استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان داد که روش های توسعه کم پیامد در حالت بهینه سازی شده، باعث کاهش چشمگیری در حجم رواناب در گره های سیلابی و خروجی حوضه شده اند. Abdelkebir و همکاران [۱] با بکارگیری روش های توسعه کم پیامد در تلفیق با مدل مدیریت آب باران و سامانه اطلاعات جغرافیایی، در حوزه آبخیز شهری در الجزایر نشان دادند که اجرای پنج روش

10- Permeable Pavement

11- Bioretention System

12- Rain Garden

13- Infiltration Trench

14- Rain Barrel

15- Green Roof

16- Vegetative Swale

17- Multiple-criteria decision-making

18- Slime Mould Algorithm

1- Landuse

2- Runoff

3- Flood

4- Low Impact Development

5- Optimization Algorithm

6- Storm Water Management Model

7- Multi-objective Antilion Optimization Algorithm

8- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

9- Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

چهار روش بام سبز، روکش نفوذپذیر، سامانه نگهداشت زیستی و ترانشه نفوذ مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه بکارگیری روش‌ها، باعث کاهش چشمگیر در میزان رواناب و دبی اوج نشد، اما مشخص شد که با ایجاد تغییرات محدود در کاربری اراضی می‌توان میزان دبی اوج جریان را در سیلاب‌ها کاهش دهد.

با توجه به موارد ذکر شده می‌توان اذعان داشت که در زمینه کنترل کمیت و کیفیت سیلاب در حوزه‌های آبخیز شهری، استفاده از روش‌های توسعه کم پیامد، یکی از راهکارهای مدیریتی مورد وثوق در سطح جهان است که بهره‌گیری از آن در حال افزایش است ولیکن کمتر پژوهشی در خصوص بررسی اثرات ترکیبی چندین روش توسعه کم پیامد بطور همزمان برای کاهش اثرات سیل و یا رواناب‌های شهری انجام شده است. در پژوهش حاضر به بررسی هفت روش مختلف در ترکیب‌های متعدد شامل سه و چهار روش پرداخته شده است. همچنین این پژوهش برای اولین بار به موضوع بهینه‌سازی کاربرد روش‌های توسعه کم پیامد در ترکیب‌های چندگانه با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب و گرگ خاکستری، برای کنترل سیلاب‌های شهری پرداخته است.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعه این پژوهش در شهر تهران واقع شده است. این محدوده در ناحیه هفت و بخش‌هایی از ناحیه یک منطقه پنج در شمال غرب شهر تهران واقع شده و حدوداً بین ارتفاع ۱۳۰۰ تا ۱۶۰۰ متری از سطح دریا امتداد یافته است. این محدوده، منطقه‌ای کاملاً شهری شامل مناطق مسکونی، خیابان‌ها و پارک‌ها است. محدوده پژوهش مشتمل بر دو زیرمنطقه فرعی شامل ۱۱ زیرحوضه است و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک شامل گروه‌های B، C و D را در برمی‌گیرد. شیب حوضه‌های فرعی بین ۴/۵ تا ۹/۵ درصد متغیر است. شماره منحنی حوضه بالای ۸۷ است که این موضوع نشان‌دهنده نفوذپذیری کم اراضی محدوده به دلیل توسعه شهرنشینی و ناسازگاری آن با استانداردهای توسعه شهری پایدار است. سامانه زهکشی فعلی آن شامل ۶۶ کانال اصلی با طولی حدود ۴۳/۳ کیلومتر و مشتمل بر زهکشی زیرزمینی، کانال‌های سرپوشیده، جوی‌های سرباز در دو طرف خیابان‌های اصلی و جوی‌های فرعی در معابر شهر است. ضریب زبری کانال‌ها در محدوده ۰/۱۱ تا ۰/۱۵ قرار دارد. این منطقه به دلیل وجود مراکز مسکونی و تجاری متراکم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و وقایع بارندگی شدید، عدم کفایت ظرفیت کانال‌ها و زباله‌های شهری باعث ایجاد آب‌گرفتگی و اختلال مکرر در سامانه زهکشی آن می‌شود. شکل ۱ نقشه محدوده مطالعه، زیرمنطقه‌ها، زیرحوضه‌ها، شبکه زهکشی و محل گره‌ها را نشان می‌دهد.

آماده سازی، اجرا، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWMM

در این پژوهش نسخه ۵،۱ مدل مدیریت آب باران SWMM-

EPA که یک مدل شبیه‌سازی دینامیک بارش-رواناب است برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی محدوده مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از نقشه کاربری اراضی و همچنین بازدید میدانی، منطقه مورد مطالعه به ۱۱ زیرحوضه که در شکل ۱ نمایش داده شده است، تقسیم شد.

داده‌های بارش این پژوهش در دوره پایه ۱۹۹۰-۲۰۲۲ مربوط به ایستگاه سینوپتیک مهرآباد واقع در مجاورت محدوده مطالعه است و داده‌های بارش طرح شش ساعته در مدلسازی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱] و [۱۰]. اطلاعات نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعه و مدل رقومی ارتفاع (DEM)^۱ پنج متر، مرز حوضه مطالعه، مرز زیرحوضه‌های هیدرولوژیکی، خروجی‌های شبکه زهکشی، محل تلاقی زهکش‌ها و موقعیت زهکش‌های اصلی و فرعی آن از شهرداری تهران دریافت و وارد مدل شد. همچنین بافت خاک محدوده مطالعه و زیرحوضه‌های آن، پس از برداشت تعداد ۲۸ نمونه خاک با توزیع تقریباً یکنواخت از کل محدوده، تعیین و در مدلسازی مورد استفاده قرار گرفت.

بعد از تنظیم نمودن فرضیات اولیه در مدل SWMM و ورود داده‌های لازم، مدل اجرا شد و شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی صورت پذیرفت.

بدلیل نبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری دبی در حوضه‌های شهری تقریباً آمار و اطلاعاتی در این مناطق وجود ندارد. بنابراین به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWMM، ۵ واقعه بارش بصورت میدانی در محدوده مطالعاتی اندازه‌گیری شد و پس از اندازه‌گیری، سه واقعه بارش برای واسنجی و دو واقعه دیگر نیز برای اعتبارسنجی مدل SWMM استفاده شد. میزان دبی جریان در محدوده بوسیله خط‌کش Rod که واسنجی آن قبلاً انجام شده بود، اندازه‌گیری شد. [۱۹] و [۴] بدین منظور از شاخص‌های ناش-ساتکیف^۲ و مجذور میانگین مربعات خطا^۳ استفاده شد. هرچقدر مقدار معیار ناش-ساتکیف نزدیک به یک باشد، نشان‌دهنده بالا بودن دقت شبیه‌سازی مدل است و هر چه مقدار مجذور میانگین مربعات خطا کوچکتر باشد تفاوت داده‌های مشاهده‌ای و برآوردشده کمتر و دقت پیش‌بینی مدل بیشتر است [۱۸].

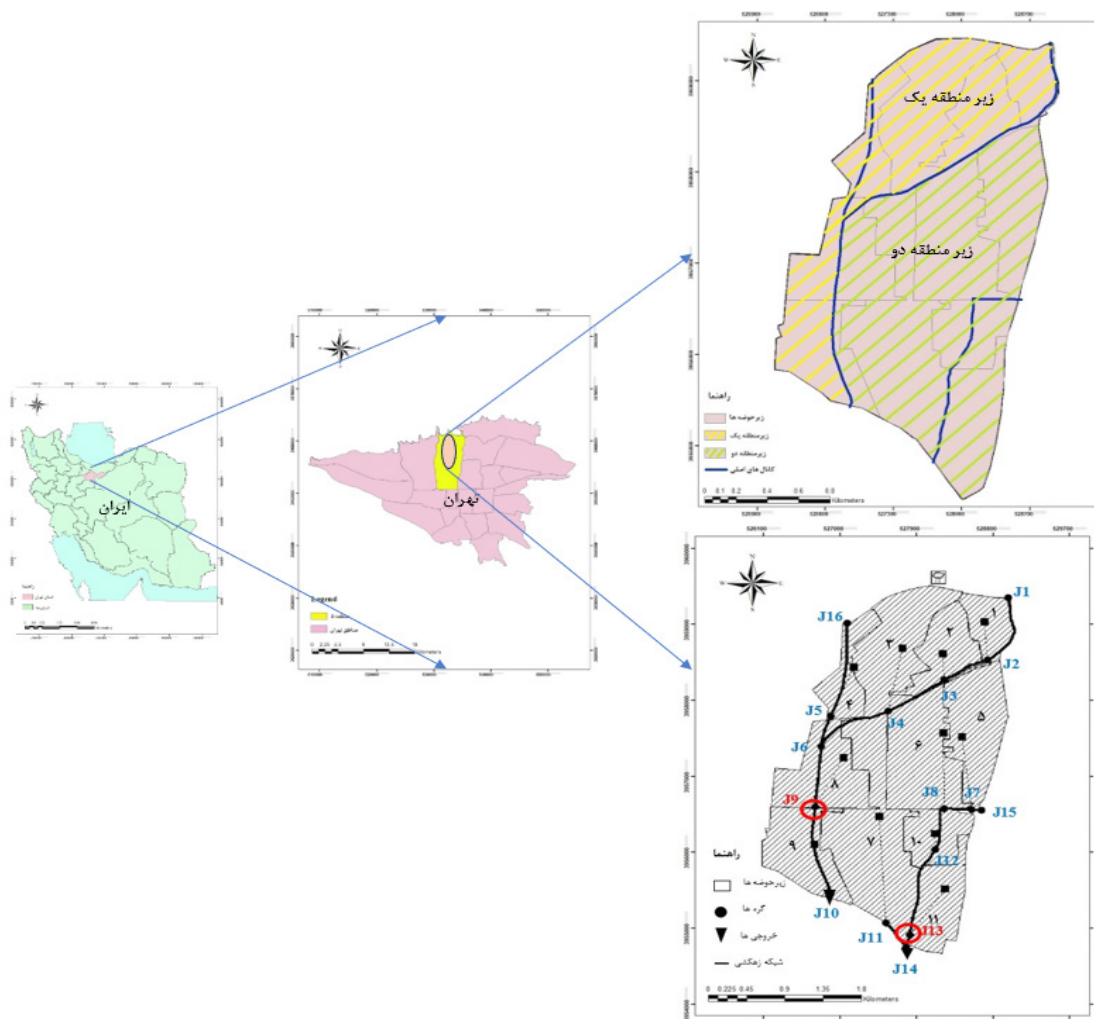
مدلسازی روش‌های توسعه کم پیامد

تعدادی از روش‌های توسعه کم پیامد، بر اساس داده‌ها و اطلاعات موجود، بازدیدهای میدانی و متناسب با نوع کاربری اراضی و امکان بهره‌گیری از این روش‌ها در محدوده مورد مطالعه، معرفی شدند. با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و با توجه به قابلیت مدل بارش رواناب SWMM برای مدلسازی روش‌های توسعه کم پیامد، مساحت و تعداد واحدهای مربوط به هر روش در هر زیرحوضه بطور جداگانه محاسبه و وارد مدل شد. در این پژوهش روش‌های توسعه کم پیامد

1- Digital Elevation Model

2- Nash-Sutcliffe efficiency

3- Root Mean Square Error



شکل ۱- محدوده مطالعه، زیرمنطقه‌ها، زیرحوضه‌ها، شبکه زهکشی و محل گره‌ها
Fig 1. Locations of the study area, sub-regions, sub-watersheds, drainage network and nodes

در پژوهش حاضر متغیرهای تصمیم‌گیری بهینه‌سازی مساحت روش‌های توسعه کم پیامد در هر یک از زیرحوضه‌ها است [۱۵]. متغیرهای تصمیم به صورت رابطه (۱) بیان می‌شوند:

$$DV = x_{ij} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_s \quad j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \quad (1)$$

که در اینجا DV = متغیر تصمیم، x_{ij} = سطح هر روش LID در زیرحوضه i ام است. n_s = تعداد زیرحوضه، j = نوع روش توسعه کم پیامد است. ۱ = بام سبز، ۲ = باغچه بارانی، ۳ = روکش نفوذپذیر، ۴ = سامانه نگهداشت زیستی، ۵ = ترانشه نفوذ، ۶ = جوی باغچه و ۷ = شبکه استحصال باران. تابع هدف یک حداقل رساندن حجم رواناب در خروجی‌های حوضه و گره‌های سیلابی را نشان می‌دهد.

متغیرهای تصمیم در مدل شبیه‌سازی ادغام‌شده با الگوریتم‌های بهینه‌سازی تعبیه شده‌اند. رابطه‌های (۲) تا (۴) به ترتیب توابع هدف مساله چندهدفه بهینه‌سازی این پژوهش را بیان می‌کنند. رابطه (۲)

$$\text{Min } F_1 = 0.5 \times \left(\frac{VO_1 - VO_{\min}}{VO_{\max} - VO_{\min}} \right) + 0.5 \times \left(\frac{FV_1 - FV_{\min}}{FV_{\max} - FV_{\min}} \right)$$

مشمول بر سامانه نگهداشت زیستی، ترانشه‌های نفوذ، روکش‌های نفوذپذیر، بام‌های سبز، باغچه‌های بارانی، جوی باغچه‌ها و شبکه‌های استحصال باران، بصورت جداگانه و در ترکیب‌های مختلف مدل‌سازی شد و در نهایت اثرگذاری روش‌ها در میزان کاهش دبی اوج رواناب، حجم رواناب کل حوضه و آبگرفتگی گره‌ها، در بارش طرح ۲۵ ساله مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت [۲۰]. جدول ۱ ترکیب‌های مختلف روش‌های توسعه کم پیامد مدل‌سازی شده در مدل SWMM را نشان می‌دهد.

بهینه‌سازی روش‌های توسعه کم پیامد با بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری

الگوریتم‌های فراابتکاری، الگوریتم‌های بهینه‌سازی هستند که برای بررسی مسائل پیچیده‌ای که با استفاده از رویکردهای استاندارد قابل حل نیستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این الگوریتم‌ها از فرآیندهای طبیعی مانند ژنتیک، رفتار ازدحامی و تکامل الهام گرفته‌اند و برای شناسایی پاسخ‌های بهینه در فضای جستجو استفاده می‌شوند. در این پژوهش الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و GWO^۲ با درنظر گرفتن سه تابع هدف برای بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

رساندن هزینه اجرای روش‌های توسعه کم پیامد را نشان می‌دهد.

$$\text{Min } F_2 = \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \frac{X_l(j) \times UC_l}{\text{Maximum Cost}} \quad (3)$$

که در آن F_2 = تابع هدف دو، J = تعداد زیرحوضه‌ها، L = تعداد انواع مختلف روش‌های توسعه کم پیامد (LID)، $X_l(j)$ = مساحت هر روش LID در زمین حوضه، UC_l = هزینه واحد هر روش LID، Maximum Cost = هزینه ساخت و نگهداری روش‌های توسعه کم پیامد در حالتی که حداکثر مساحت مجاز را پوشش می‌دهند. رابطه (۴) تابع هدف سه یعنی به حداقل رساندن کاهش عملکرد روش‌های توسعه کم پیامد در طول دوره بهره‌برداری را نشان می‌دهد [۱۵].

$$\text{Min } F_3 = 0.5 \times \left(\frac{VO_2 - VO_1}{VO_1} \right) + 0.5 \times \left(\frac{FV_2 - FV_1}{FV_1} \right)$$

که در آن F_3 = تابع هدف سه، VO_1 = حجم رواناب در خروجی برای شرایط عادی که گرفتگی و خرابی در LIDها رخ نمی‌دهد، VO_2 = حجم رواناب در خروجی زمانی که روش‌های LID، حداکثر گرفتگی و یا انسداد را دارند و FV_2 = مجموع حجم رواناب در گره‌های سیلابی زمانی که روش‌های LID، حداکثر گرفتگی یا انسداد مورد انتظار را دارند.

بخش دوم توابع هدف یک و سه بیان می‌کند که اگر گره‌های سیلابی در منطقه مورد مطالعه وجود نداشته باشند، جریان اوج

که در آن F_1 = تابع هدف یک، VO_1 = حجم رواناب در خروجی برای شرایط عادی که گرفتگی و خرابی در LIDها رخ نمی‌دهد، $VO_{\min}$ = حداقل حجم رواناب در خروجی زمانی که روش‌های LID حداکثر سطح مجاز را پوشش می‌دهند، $VO_{\max}$ = حداکثر حجم رواناب در خروجی زمانی که روش‌های توسعه کم پیامد به کار گرفته نمی‌شوند، FV_1 = مجموع حجم جریان در تمام گره‌های سیلابی و برای شرایط عادی که گرفتگی و خرابی روش‌های LID رخ نمی‌دهد، $FV_{\min}$ = مجموع حداقل حجم جریان در تمام گره‌های سیلابی زمانی که LIDها حداکثر مساحت مجاز را پوشش می‌دهند، $FV_{\max}$ = مجموع حداکثر حجم جریان در تمام گره‌های سیلابی در زمانی که روش‌های LID مستقر نیستند. عبارت اول در سمت چپ تابع هدف، کاهش حجم رواناب در خروجی را نشان می‌دهد، در حالی که عبارت دوم کاهش پتانسیل سیل‌گیری را در گره‌هایی که سامانه زهکشی ظرفیت کافی برای عبور رواناب طراحی را ندارد، نشان می‌دهد. تابع F_1 هنگامی برابر با صفر است که تمام روش‌های LID حداکثر سطح مجاز خود را پوشش دهند، و F_1 زمانی برابر با یک می‌شود که LIDها مستقر نیستند. در نظر گرفتن VO و FV به ترتیب برای جلوگیری از سیل در داخل و پایین‌دست حوضه ضروری است. به حداقل رساندن میزان رواناب در خروجی حوضه از جاری شدن سیل در پایین‌دست آن به عنوان یک محدوده شهری آسیب‌پذیر جلوگیری می‌کند. رابطه (۳) تابع هدف دو یعنی به حداقل

جدول ۱- ترکیب‌های مختلف روش‌های توسعه کم پیامد

Table 1. Different combinations of the LID methods

Combination of LID methods	ترکیب روش‌های توسعه کم پیامد	ردیف NO.
Rain Garden+ Green Roof	باغچه بارانی و بام سبز	1
Rain Garden+ Rain Barrel	باغچه بارانی و بشکه استحصال باران	2
Green Roof+ Permeable Pavement	بام سبز و روکش نفوذپذیر	3
Rain Garden+ Permeable Pavement	باغچه بارانی و روکش نفوذپذیر	4
Rain Barrel+ Permeable Pavement	بشکه استحصال باران و روکش نفوذپذیر	5
Bioretention+ Vegetative Swale	سامانه نگهداشت زیستی و جوی باغچه	6
Rain Garden+ Green Roof+ Permeable Pavement	باغچه بارانی و بام سبز و روکش نفوذپذیر	7
Rain Garden+ Rain Barrel+ Permeable Pavement	باغچه بارانی و بشکه استحصال باران و روکش نفوذپذیر	8
Rain Garden+ Rain Barrel+ Vegetative Swale	باغچه بارانی و بشکه استحصال باران و جوی باغچه	9
Bioretention+ Green Roof+ Vegetative Swale	سامانه نگهداشت زیستی و بام سبز و جوی باغچه	10
Bioretention+ Rain Barrel+ Vegetative Swale	سامانه نگهداشت زیستی و بشکه استحصال باران و جوی باغچه	11
Rain Garden+ Green Roof+ Vegetative Swale	باغچه بارانی و بام سبز و جوی باغچه	12
Bioretention+ Green Roof+ Vegetative Swale+ Infiltration Trench	سامانه نگهداشت زیستی و بام سبز و جوی باغچه و ترانشه نفوذ	13
Rain Garden+ Green Roof+ Permeable Pavement + Infiltration Trench	باغچه بارانی و بام سبز و روکش نفوذپذیر و ترانشه نفوذ	14
Rain Garden+ Rain Barrel+ Permeable Pavement + Infiltration Trench	باغچه بارانی و بشکه استحصال باران و روکش نفوذپذیر و ترانشه نفوذ	15
Bioretention+ Rain Barrel + Vegetative Swale+ Infiltration Trench	سامانه نگهداشت زیستی و بشکه استحصال باران و جوی باغچه و ترانشه نفوذ	16

مرکزی جمهوری اسلامی ایران در سال ۱۳۹۶) تعیین شده است [۱۵]. با توجه به موارد پیشگفت، نتایج اجرای مدل ادغام شده در قالب جبهه‌های پارتو برای هریک از الگوریتم‌های فوق، حاصل شد [۶]. پس از بررسی و تحلیل نتایج، مناسب‌ترین الگوریتم فراابتکاری و مطلوب‌ترین ترکیب بهینه روش‌های توسعه کم پیامد از دیدگاه کاهش حجم رواناب، هزینه بکارگیری روش‌ها و افزون بر آنها حداقل رساندن کاهش عملکرد روش‌های توسعه کم پیامد در طول دوره بهره‌برداری، معرفی شد.

نتایج

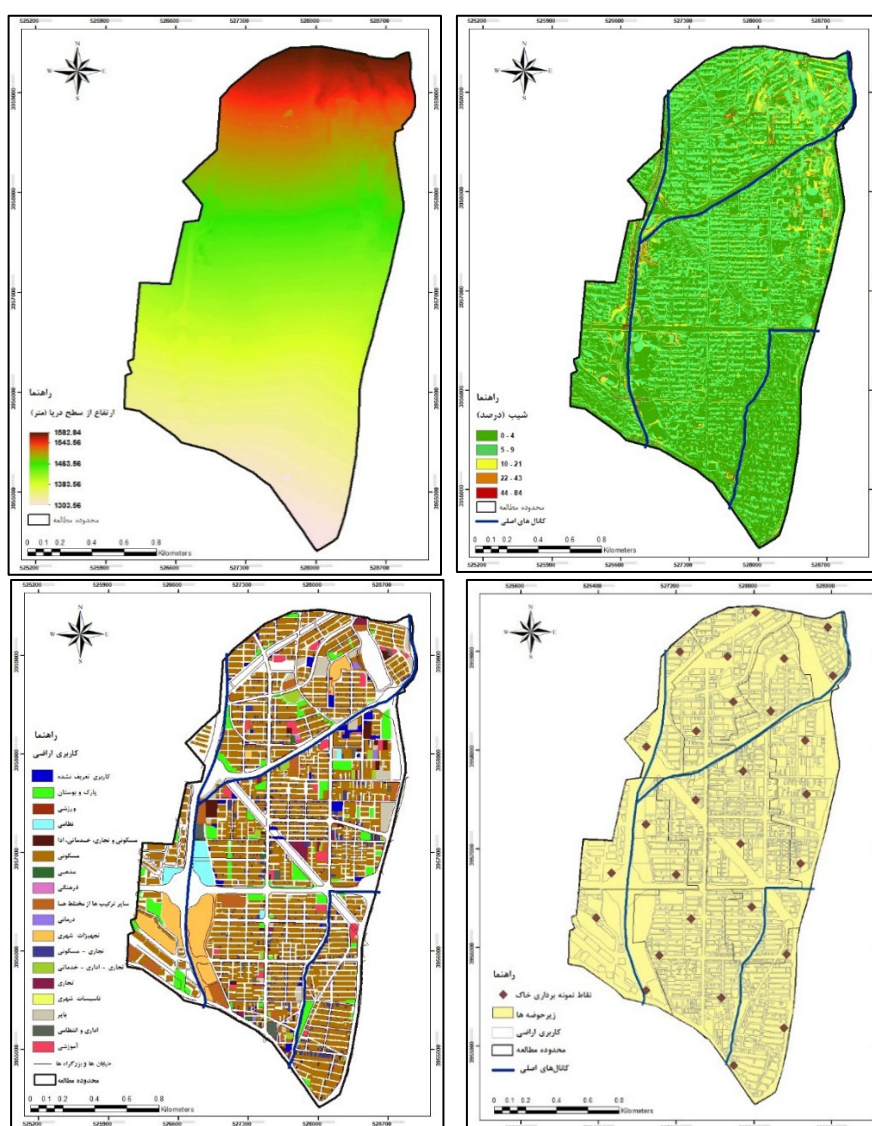
آماده‌سازی و اجرای مدل SWMM

نقشه ارتفاع و شیب حاصل شده از DEM و کاربری اراضی و نقاط برداشت بافت خاک محدوده مطالعه در شکل ۲ نمایش داده

رواناب در خروجی حوضه به جای مجموع حجم جریان در گره‌های سیلابی (FV) در نظر گرفته می‌شود [۱۵]. مساله بهینه‌سازی سه هدفه این پژوهش با بکارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری GWO و NSGA-II با استفاده از ۱۰۰ تکرار و تعداد جمعیت اولیه معادل ۱۵۰ در داخل مدل حل شد. متغیرهای تصمیم نشان‌دهنده سطح اجرای هر روش توسعه کم پیامد در هر زیرحوضه هستند. این مدل برای هر یک از روش‌های ترکیبی بطور متوسط در حدود ۱۰ بار تا رسیدن به نتایج مورد انتظار اجرا شد.

هزینه‌های پیاده‌سازی و نگهداری روش‌های توسعه کم پیامد

هزینه روش‌های توسعه کم پیامد شامل تمامی هزینه‌های ساخت و نگهداری آنها در طول عمر ۲۰ ساله آنها است. هزینه‌ها بر اساس فهرست قیمت‌های منتشر شده توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی ایران [۹] و با اعمال نرخ افزایش هزینه قابل اجرا در ایران (بانک



شکل ۲- نقشه ارتفاع (بالا چپ)، شیب (بالا راست)، کاربری اراضی (پایین راست) و نقاط برداشت بافت خاک (پایین چپ) محدوده مطالعه
Fig 2. Elevation (top left), Slope (top right), land use (bottom left), and soil sampling points (bottom right) of the study area

شده است. مقادیر محاسبه شده برای زیرحوضه‌های منطقه در جدول ۲ و اطلاعات مربوط به هر کدام از کانال‌ها شامل شماره کانال، شماره گره‌های بالادست و پایین‌دست، طول کانال، عمق کانال، عرض کانال و شکل آنها در جدول ۳ ارائه شده است. جدول ۴ وضعیت کانال‌های سیلابی و جدول ۵ وضعیت گره‌های سیلابی محدوده مطالعه را در دوره بازگشت ۲۵ ساله نشان می‌دهد. همانگونه که در جدول ۴ و ۵ ملاحظه می‌شود در دوره بازگشت ۲۵ ساله، دو کانال C8 و C13 وضعیت بحرانی داشته و دو گره J9

جدول ۲- مقادیر محاسباتی پارامترهای زیرحوضه‌های محدوده مطالعه

Table 2. Calculated parameters of sub-watersheds

زیرحوضه Sub-watershed	مساحت (هکتار) Area	شیب (درصد) Slope	عرض معادل (متر) Width	نفوذناپذیری (درصد) Imperviousness
1	36/185	9/5	425/7	80
2	57/374	7/6	462/4	80
3	105/265	6/6	630	80
4	42/898	6/4	311	80
5	92/591	7/3	492/5	70
6	109/205	6	695/6	85
7	166/311	5/2	581/5	85
8	85/198	6/8	698/3	75
9	75/315	4/8	607/4	90
10	45/740	4/6	594	90
11	60/178	4/4	396	90

جدول ۳- اطلاعات کانال‌های محدوده مطالعه در مدل SWMM

Table 3. Data of the channels in the study area

کانال (زهکش) Channel	گره بالادست Upstream node	گره پایین‌دست Downstream node	طول کانال (متر) Length	عمق کانال (متر) Depth	عرض کانال (متر) Width	شکل ابراهه Shape
C1	J1	J2	1025	0.45	0.81	مستطیلی روباز Rectangle-open
C2	J2	J3	465	0.45	0.81	مستطیلی بسته
C3	J3	J4	898	0.45	0.81	مستطیلی بسته
C4	J4	J6	830	0.45	0.81	مستطیلی بسته
C5	J16	J5	1056	0.45	0.8	مستطیلی بسته
C6	J5	J6	478	0.45	0.8	مستطیلی بسته
C7	J6	J9	841	0.45	0.8	مستطیلی بسته
C8	J9	J10	1200	0.45	0.8	مستطیلی بسته
C9	J15	J7	113	0.45	0.8	مستطیلی بسته
C10	J7	J8	340	0.45	0.8	مستطیلی بسته
C11	J8	J12	586	0.45	0.8	مستطیلی بسته
C12	J12	J13	1185	0.45	0.8	مستطیلی بسته
C13	J13	J14	256	0.45	0.94	مستطیلی بسته
C14	J14	J11	459	0.45	0.94	مستطیلی بسته

جدول ۴- وضعیت کانال‌های سیلابی محدوده مطالعه

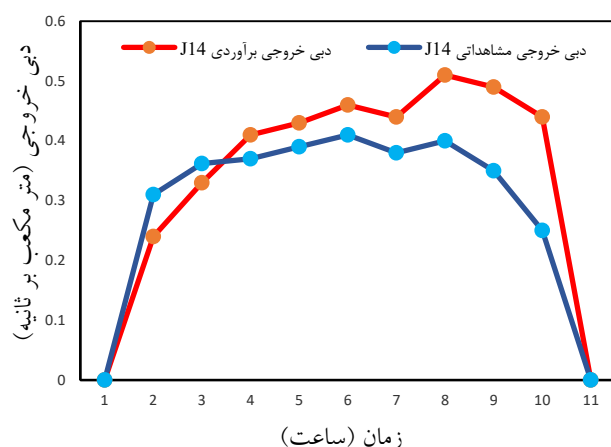
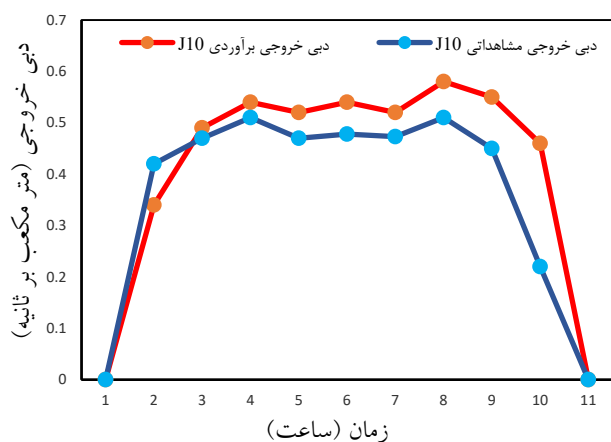
Table 4. The flooding channels in the study area

کانال (زهکش)	پرشدن گره بالادست (ساعت)	پرشدن گره پایین دست (ساعت)	پرشدن هر دو گره (ساعت)	جریان بحرانی (ساعت)	کاهش ظرفیت (ساعت)
Channel	Upstream full	Downstream full	Both end full	Critical flow	Capacity limit
C8	1/53	1/53	1/53	1/53	1/53
C13	2/66	2/66	2/66	2/66	2/66

جدول ۵- وضعیت رواناب و دبی اوج در گره‌های سیلابی

Table 5. The runoff volume and peak discharge at the flooding nodes

شماره گره Node No.	مدت جریان سیل (ساعت) Duration	دبی حداکثر سیلاب (متر مکعب بر ثانیه) Peak discharge	حجم کل جریان (10^3 متر مکعب) Runoff volume
J9	1/54	5	43/6
J13	2/66	6/3	42



شکل ۳- مقادیر دبی برآورد شده و مشاهده‌ای در رگبار مورخ ۱۴۰۱/۱۱/۱۲ در خروجی J10 (بالا) و خروجی J14 (پایین)

Fig 3. The estimated and observed discharge value at J10 (top) and J14 (bottom) on 2023 Feb.1st

و J13 نیز به ترتیب با حجم جریانی معادل ۴۳/۶ و ۴۲ هزار متر مکعب، در محدوده مطالعه وضعیت سیلابی دارند.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWMM

نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل در جدول ۶ ارائه شده است. همچنین نمودارهای مربوط به واسنجی و اعتبارسنجی مدل شامل مقادیر برآورد شده و مشاهده‌ای دو نمونه از وقایع رگبار، در شکل‌های ۳ و ۴ در خروجی‌های J10 و J14 نشان داده شده است.

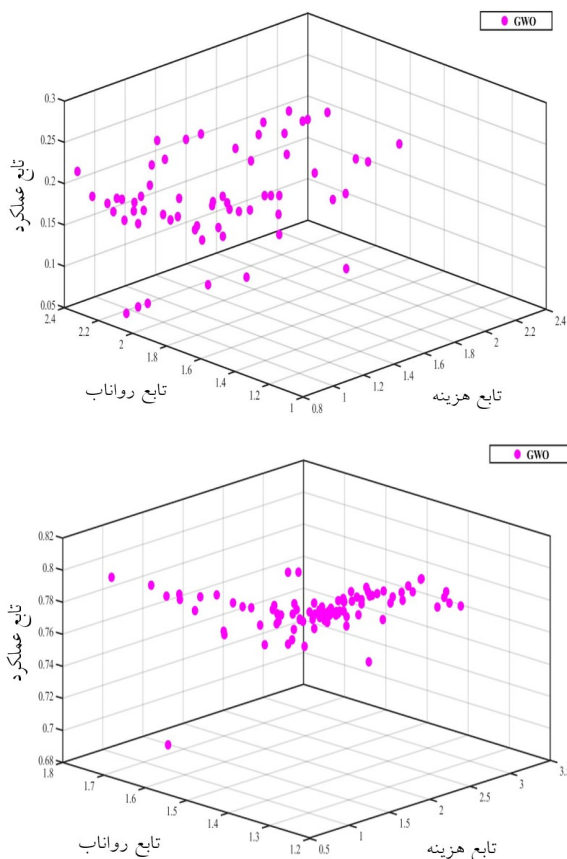
جدول ۶- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWMM

Table 6. Results of calibration and validation of SWMM

تاریخ بارندگی Rainfall event	معیار نش-سانتکلیف Nash-Sutcliffe efficiency	مجدور میانگین مربعات خطا RMSE	واسنجی Calibration
12/11/1401	0/53	0/09	واسنجی Calibration
17/12/1401	0/68	0/09	
25/12/1401	0/65	0/18	
01/01/1402	0/72	0/11	اعتبارسنجی Validation
02/01/1402	0/75	0/07	

مدلسازی روش‌های توسعه کم پیامد در مدل SWMM

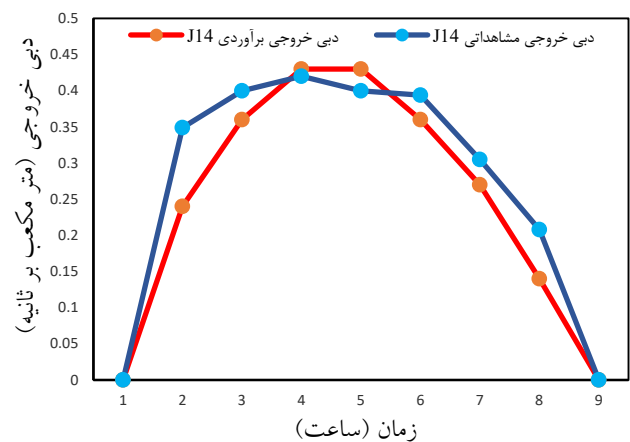
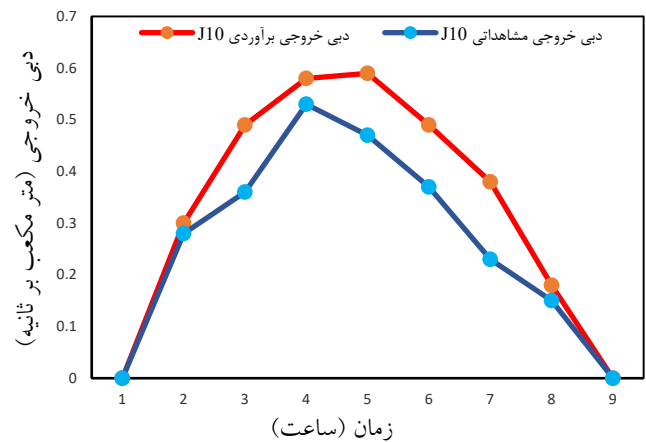
بررسی و مقایسه نتایج مدلسازی هر یک از روش‌ها بصورت جداگانه و در ترکیب‌های مختلف، نشانگر اثرات مختلف این روش‌ها بر کاهش حجم جریان رواناب و دبی اوج جریان در بارش



شکل ۵- نتایج بهینه‌سازی الگوریتم GWO در زیرمنطقه یک (بالا) و زیرمنطقه دو (پایین)

Fig 5. Pareto fronts of the GWO model in Sub-region 1 (top) and Sub-region 2 (bottom)

(راه‌حل) پیشنهادی هر یک از الگوریتم‌ها و همچنین نمودارهای سه‌بعدی آنها برای الگوریتم‌های GWO و NSGA-II برای هر دو زیرمنطقه محدوده مطالعه در شکل‌های ۵ تا ۸ ارائه شده است. شکل ۹ سطح بهینه اجرای روش ترکیبی منتخب در زیرحوضه‌های محدوده مطالعه را نمایش می‌دهد. حداکثر سطح ممکن هر یک از روش‌ها به همراه سطح بهینه آنها در جدول ۸ ارائه شده است. بر اساس نتایج بهینه‌سازی روش ترکیبی سامانه نگهداشت زیستی، بام سبز، جوی باغچه و ترانشه نفوذ بوسیله الگوریتم‌های فراابتکاری اشاره شده و با توجه به پاسخ‌های بدست آمده در جبهه‌های پارتو خروجی الگوریتم‌ها، الگوریتم گرگ خاکستری به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی مطلوب در پژوهش حاضر معرفی شد و سطح بهینه اجرای روش ترکیبی منتخب بوسیله الگوریتم گرگ خاکستری بدست آمد. همانطور که در شکل ۹ و جدول ۸ مشاهده می‌شود، حداکثر سطح بهینه اجرای روش منتخب مربوط به زیرحوضه هفت و یازده در مجاورت خروجی‌های محدوده مطالعه است.



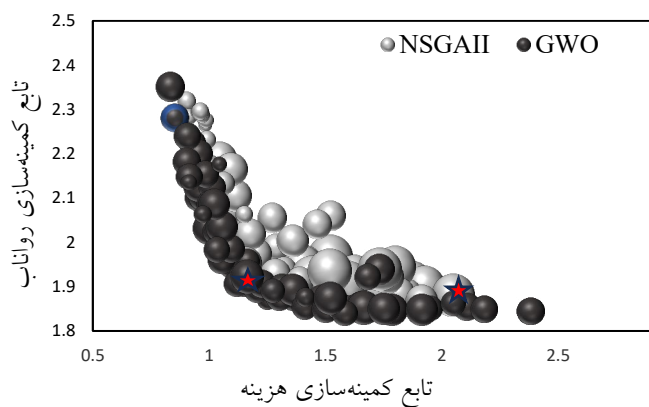
شکل ۴- مقادیر دبی برآورد شده و مشاهده‌ای در رگبار مورخ ۱۴۰۲/۰۱/۰۱ در خروجی J10 (بالا) و خروجی J14 (پایین)

Fig 4. The estimated and observed discharge value at J10 (top) and J14 (bottom) on 2023 Mar.21st

طرح ۲۵ ساله است. بدین ترتیب که بکارگیری حداکثر مساحت روش‌های توسعه کم پیامد در ترکیب باغچه بارانی، بام سبز، روکش نفوذپذیر و ترانشه نفوذ، بیشترین کاهش در حجم جریان را در خروجی‌های محدوده ایجاد نمود. همچنین ترکیب دوگانه سامانه نگهداشت زیستی و جوی باغچه همانند بکارگیری روش‌ها بصورت جداگانه، کمترین کاهش در حجم جریان را سبب شد. جدول ۷ درصد کاهش حجم جریان در محدوده مطالعه را نشان می‌دهد.

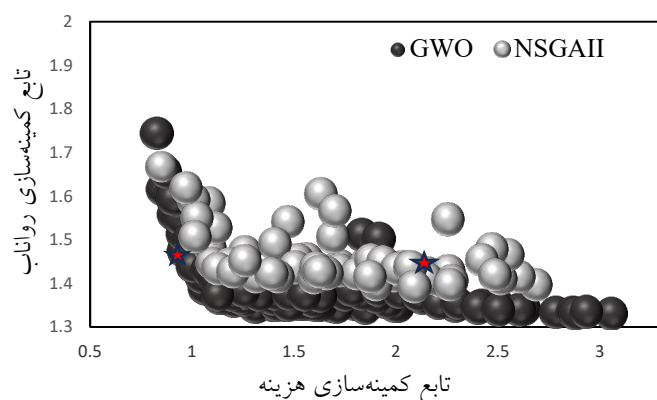
بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

با مقایسه نتایج خروجی الگوریتم‌ها برای کلیه روش‌های جداگانه و ترکیبی، روش ترکیبی شامل سامانه نگهداشت زیستی، بام سبز، جوی باغچه و ترانشه نفوذ، به عنوان مطلوبترین روش برای حداقل رساندن حجم رواناب و دبی اوج سیلاب با در نظر گرفتن حداقل هزینه و افزون بر آن به حداقل رساندن کاهش عملکرد روش‌های توسعه کم پیامد در طول دوره بهره‌برداری معرفی و انتخاب شد. نتایج بهینه‌سازی روش منتخب در قالب جبهه‌های پارتو به همراه پاسخ



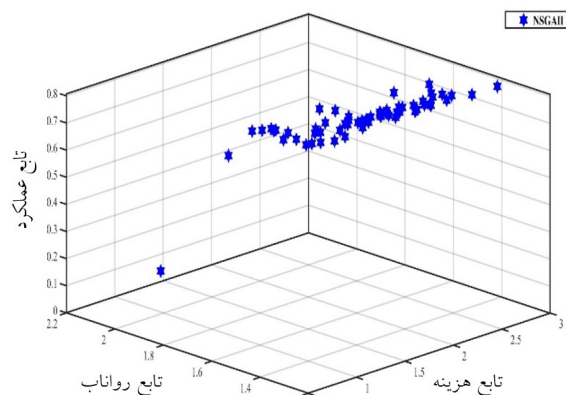
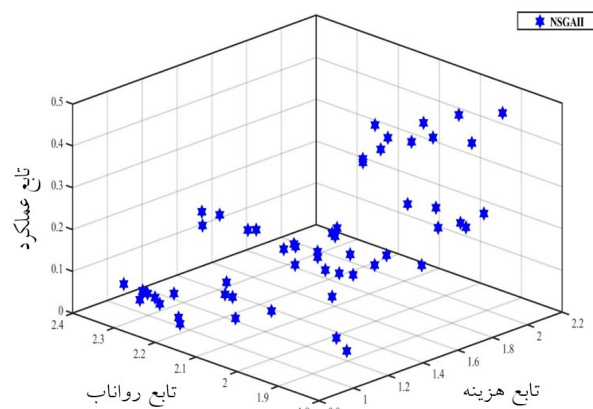
شکل ۷- نتایج بهینه سازی الگوریتم GWO و NSGA-II در زیرمنطقه یک

Fig 7. Pareto fronts of the GWO and NSGA-II in Sub-region 1



شکل ۸- نتایج بهینه سازی الگوریتم GWO و NSGA-II در زیرمنطقه دو

Fig 8. Pareto fronts of the GWO and NSGA-II in Sub-region 2



شکل ۶- نتایج بهینه سازی الگوریتم NSGA-II در زیرمنطقه یک (بالا) و زیرمنطقه دو (پایین)

Fig 6. Pareto fronts of the NSGA-II in Sub-region 1 (top) and Sub-region 2 (bottom)

جدول ۷ - درصد کاهش حجم جریان در محدوده مطالعه

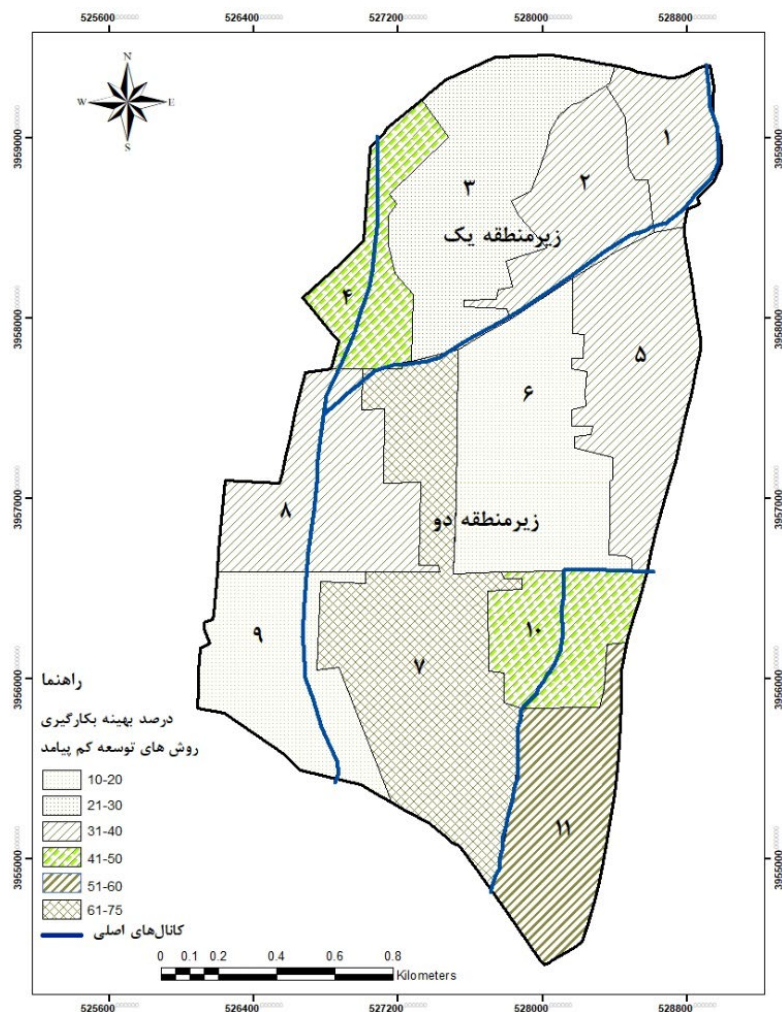
Table 7. Runoff volume reduction (%) in the study area

ردیف No.	نوع روش توسعه کم پیامد	Low Impact development method	درصد کاهش حجم جریان در خروجی J10 Runoff Volume Reduction (%) in J10	درصد کاهش حجم جریان در خروجی J14 Runoff Volume Reduction (%) in J14
1	باغچه بارانی	Rain Garden	15/92	23/61
2	بام سبز	Green Roof	23/18	32/36
3	بشکه استحصال باران	Rain Barrel	18/71	22/45
4	روکش نفوذپذیر	Permeable Pavement	17/04	23/91
5	سامانه نگهداشت زیستی	Bioretention	33/52	27/11
6	جوی باغچه	Vegetative Swale	28/5	27/11

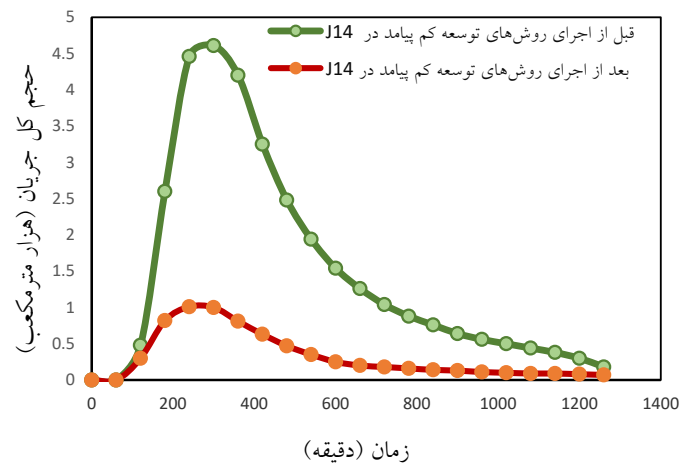
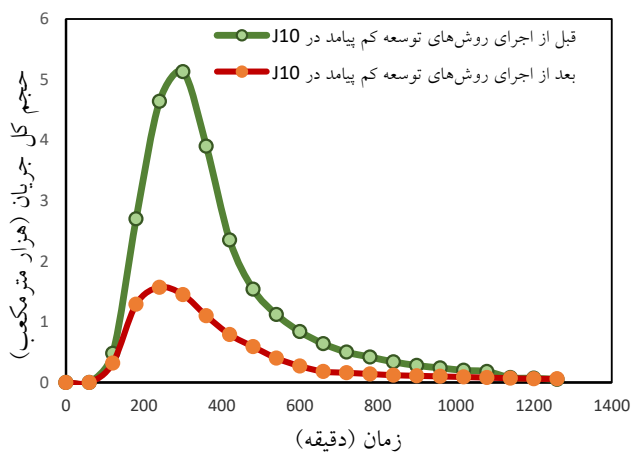
29/45	27/93	Infiltration Trench	ترانشه نفوذ	7
47/23	33/52	Rain Garden+ Green Roof	باغچه بارانی و بام سبز	8
29/74	27/65	Rain Garden+ Rain Barrel	باغچه بارانی و بشکه استحصال باران	9
29/74	33/52	Green Roof+ Permeable Pavement	بام سبز و روکش نفوذپذیر	10
21/86	24/30	Rain Garden+ Permeable Pavement	باغچه بارانی و روکش نفوذپذیر	11
21/873	15/43	Bioretention+ Vegetative Swale	سامانه نگهداشت زیستی و جوی باغچه	12
30/32	29/60	Rain Barrel+ Permeable Pavement	بشکه استحصال باران و روکش نفوذپذیر	13
68/51	49/16	Rain Garden+ Green Roof+ Permeable Pavement	باغچه بارانی و بام سبز و روکش نفوذپذیر	14
43/15	41/34	Rain Garden+ Rain Barrel+ Permeable Pavement	باغچه بارانی و بشکه استحصال باران و روکش نفوذپذیر	15
5/83	3/91	Rain Garden+ Rain Barrel+ Vegetative Swale	باغچه بارانی و بشکه استحصال باران و جوی باغچه	16
55/6	38/56	Bioretention+ Green Roof+ Vegetative Swale	سامانه نگهداشت زیستی و بام سبز و جوی باغچه	17
35/59	32/68	Bioretention+ Rain Barrel+ Vegetative Swale	سامانه نگهداشت زیستی و بشکه استحصال باران و جوی باغچه	18
56/6	39/06	Rain Garden+ Green Roof+ Vegetative Swale	باغچه بارانی و بام سبز و جوی باغچه	19
59/18	41/34	Bioretention+ Green Roof+ Vegetative Swale+ Infiltration Trench	سامانه نگهداشت زیستی و بام سبز و جوی باغچه و ترانشه نفوذ	20
69/10	49/16	Rain Garden+ Green Roof+ Permeable Pavement + Infiltration Trench	باغچه بارانی و بام سبز و روکش نفوذپذیر و ترانشه نفوذ	21
43/44	41/62	Rain Garden+ Rain Barrel+ Permeable Pavement + Infiltration Trench	باغچه بارانی و بشکه استحصال باران و روکش نفوذپذیر و ترانشه نفوذ	22
36/15	32/96	Bioretention+ Rain Barrel + Vegetative Swale+ Infiltration Trench	سامانه نگهداشت زیستی و بشکه استحصال باران و جوی باغچه و ترانشه نفوذ	23

روش ترکیبی فوق بر کاهش حجم رواناب در گره‌های سیلابی و کاهش قابل توجه در میزان دبی و حجم رواناب در خروجی‌های محدوده مطالعه در مقایسه با شرایط بدون اجرای روش‌ها است.

مدلسازی روش ترکیبی سامانه نگهداشت زیستی، بام سبز، جوی باغچه و ترانشه نفوذ در مدل SWMM میزان اثرگذاری اجرای روش ترکیبی بر میزان حجم رواناب، در محیط SWMM مدلسازی و هیدروگراف‌های خروجی محاسبه شد. نتایج بدست آمده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج مرتبط با آن در جداول ۹ و ۱۰ بیانگر اثرگذاری اجرای



شکل ۹- سطح بهینه اجرای روش ترکیبی
Fig 9. Optimized area of the combined method



شکل ۱۰- هیدروگراف خروجی زیرمنطقه یک در خروجی J10 (چپ) و زیرمنطقه دو در خروجی J14 (راست)
Fig 10. Hydrograph of Sub-region 1 in J10 (left) and Sub-region 2 in J14 (right)

جدول ۸- حداکثر سطح و سطح بهینه روش‌های توسعه کم پیامد در زیرحوضه‌های محدوده مطالعه

Table 8. Percentage of maximum and optimized area of LID methods in each sub-watershed

سطح بهینه روش‌ها/ کل سطح (درصد) Optimum area/Total area (%)				حداکثر سطح روش‌ها/ کل سطح (درصد) Maximum possible area/Total area (%)				زیرحوضه Sub-watershed
ترانشه نفوذ Infiltration Trench	جوی باغچه Vegetative Swale	سامانه نگهداشت زیستی Bioretention System	بام سبز Green Roof	ترانشه نفوذ Infiltration Trench	جوی باغچه Vegetative Swale	سامانه نگهداشت زیستی Bioretention System	بام سبز Green Roof	
0	2.7	5.25	25.4	0	10.5	11.1	25.4	1
0.4	20	5	12.2	1.743	20	15.3	34.9	2
0.1	19	6.5	5	0.146	22.8	15.2	44.9	3
0	9.3	9.6	26	0	18.6	19.8	40.8	4
0.03	11	6.5	17	0.108	16.6	32.4	50.2	5
0.03	6.6	0	7.2	0.081	19.8	5.036	50.5	6
0.45	14.5	8.7	52	0.962	19.8	16.2	60.1	7
0	15	14	7	0	20	20	35.7	8
0	1.5	0	11	0	19.8	14.9	15.1	9
0	0	5.8	38.3	0	19.2	8.745	42	10
0.04	9	0	48.2	0.183	15	19.9	62.8	11

جدول ۹- میزان کاهش حجم رواناب در گره‌های سیلابی محدوده بعد از اجرای روش‌ها

Table 9. Runoff volume reduction in flooding nodes

شماره گره Node No.	حجم جریان قبل از اجرای روش‌ها (هزار متر مکعب) Runoff volume before applying LID methods	حجم جریان بعد از اجرای روش‌ها (هزار متر مکعب) Runoff volume after applying LID methods	کاهش حجم جریان (درصد) Fraction of reduced runoff volume
J9	43/6	17/6	59/63
J13	42	12/4	71

جدول ۱۰- میزان دبی اوج و حجم رواناب در خروجی‌های محدوده قبل و بعد از اجرای روش‌ها

Table 10. Runoff volume and peak discharge at the watershed outlets

وضعیت Status	دبی اوج در J10 (مترمکعب بر ثانیه) Peak discharge at J10	دبی اوج در J14 (مترمکعب بر ثانیه) Peak discharge at J14	حجم رواناب در J10 (هزار متر مکعب) Runoff volume at J10	حجم رواناب در J14 (هزار متر مکعب) Runoff volume at J14
قبل از اجرای روش‌ها Before applying LID methods	5.13	4.61	51.6	48.6
بعد از اجرای روش‌ها After applying LID methods	1.576	1.014	21	14

بحث و نتیجه‌گیری

تحلیل نتایج شبیه‌سازی رواناب و ارزیابی کارایی مدل SWMM نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWMM در ارتباط با کلیه وقایع رگبار برداشت شده مشتمل بر معیار نش- ساتکلیف (۰/۵۳) تا (۰/۷۵) و مجذور میانگین مربعات خطا (۰/۰۷ تا ۰/۱۸)، نشان‌دهنده

این است که برآورد دبی و حجم رواناب در وقایع بررسی شده انطباق خوبی با مقادیر مشاهداتی مؤلفه‌های جریان دارد. این مهم بیانگر این است که مدل SWMM دقت مورد نیاز برای شبیه‌سازی رواناب شهری در این محدوده را دارد. نتایج بدست آمده با یافته‌های Dabas و همکاران [۵]، Ma و همکاران [۱۴]، صفائی ایوری [۱۹]

و Ayoubi Ayoublu [۴]، مبنی بر دقت مدل در شبیه‌سازی مطابقت دارد.

در این زمینه نتایج شبیه‌سازی رواناب کل و دبی اوج در شرایط بدون اجرای روش‌های توسعه کم پیامد نشان داد که شبکه زهکشی محدوده مطالعه برای بارندگی طرح با دوره بازگشت ۲۵ ساله مناسب نیست و در دو کانال C8 و C13 دچار آب‌گرفتگی است. بدین معنا که این شبکه برای انتقال رواناب دچار اشکال شده و قادر به انتقال کامل آن نیست. این نتایج با مشاهدات وقایع رگبار و بازدیدهای میدانی مطابقت کامل دارد، بنابراین ضروری می‌نماید که برای جلوگیری از آب‌گرفتگی و سیلابی شدن منطقه و به منظور رفع مشکل عدم کفایت هیدرولیکی مجاری، با ایجاد تغییرات در وضعیت مناطق نفوذناپذیر بوسیله اجرای روش‌های توسعه کم پیامد، سرعت جریان و حجم سیلاب را کاهش داد.

تحلیل نتایج مدل‌سازی روش‌های توسعه کم پیامد

مدل‌سازی روش‌ها در بارش شش ساعته ۲۵ ساله، بصورت جداگانه و در ترکیب‌های مختلف نشان داد که بیشترین اثرگذاری روش‌ها بر کاهش حجم جریان بصورت جداگانه مربوط به روش سامانه نگهداشت زیستی ۳۳/۵۲ درصد در زیرمنطقه یک و بام سبز ۳۲/۳۶ درصد در زیرمنطقه دو است. در مورد کاهش دبی جریان نیز بیشترین اثر کاهش مربوط به روش روکش نفوذپذیر در زیرمنطقه یک و بام سبز در زیرمنطقه دو است.

مدل‌سازی ترکیب‌های مختلف از دو روش توسعه کم پیامد نیز نشان داد که در زیرمنطقه یک بیشترین کاهش حجم جریان مربوط به روش‌های ترکیبی باغچه بارانی و بام سبز با ۳۳/۵۲ درصد و بام سبز و روکش نفوذپذیر با ۳۳/۵۲ درصد و بیشترین کاهش دبی جریان مربوط به بام سبز و روکش نفوذپذیر با ۲۸/۹۴ درصد است. در زیرمنطقه دو در خروجی J14 نیز بیشترین میزان کاهش در دبی جریان و حجم جریان مربوط به روش ترکیبی باغچه بارانی و بام سبز است. مدل‌سازی ترکیب‌های مختلف سه روش نشان داد که در زیرمنطقه یک مؤثرترین ترکیب برای کاهش حجم رواناب در زیرمنطقه یک، باغچه بارانی، بام سبز و روکش نفوذپذیر با کاهش ۴۹/۱۶ درصد است. باغچه بارانی و شبکه استحصال باران و جوی باغچه نیز با ۴۵/۸۱ درصد کاهش دبی جریان، بهترین عملکرد را نشان داده است. در زیرمنطقه دو در خروجی J14 نیز اجرای ترکیبی روش باغچه بارانی و بام سبز و روکش نفوذپذیر، بهترین عملکرد را در کاهش حجم و دبی جریان از خود نشان داده است. مدل‌سازی ترکیبی چهار روش نیز نشان داد در زیرمنطقه یک در خروجی J10، روش ترکیبی باغچه بارانی و بام سبز و روکش نفوذپذیر و ترانشه نفوذ بالاترین اثرگذاری را بر کاهش حجم و دبی جریان داشته است. در زیرمنطقه دو در خروجی J14 نیز، ترکیب همین روش‌ها بیشترین کاهش را در مؤلفه‌های جریان ایجاد نموده است. از دیدگاه تأثیرگذاری ترکیب روش‌ها بر کاهش دبی و حجم جریان

رواناب، نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های Abdelkebir و همکاران [۱]، عقیلی و همکاران [۲] و جزائری و همکاران [۱۲] مطابقت دارد.

تحلیل نتایج بهینه‌سازی چندهدفه روش ترکیبی منتخب با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

با اجرای مدل تلفیقی SWMM با الگوریتم‌های GWO، NSGA-II برای ترکیب‌های مختلف روش‌های توسعه کم پیامد، ترکیب سامانه نگهداشت زیستی، بام سبز، جوی باغچه و ترانشه نفوذ به دلیل اثرگذاری مناسب بر کاهش حجم رواناب و دبی جریان، هزینه کمتر و حداقل بودن کاهش عملکرد در مقایسه با سایر ترکیب‌ها انتخاب شد. در شکل‌های ۵ تا ۸ راه‌حل‌های غیرمغلوب مساله بهینه‌سازی سه هدفه به صورت دو بعدی و سه بعدی برای دو زیرمنطقه نشان داده شده‌اند. اعداد روی محور X و محور Y به ترتیب مقادیر تابع هدف اول (حداقل رساندن حجم رواناب در خروجی‌های حوضه و گره‌های سیلابی) و تابع هدف دوم (حداقل رساندن هزینه اجرای روش‌های توسعه کم پیامد) را نشان می‌دهند. راه‌حل‌ها یا نقاط روی جبهه‌های پارتو با دایره‌هایی با قطرهای مختلف نشان داده شده و اندازه دایره‌ها ارزش تابع هدف سوم (به حداقل رساندن کاهش عملکرد روش‌ها از طریق گرفتگی و انسداد) را نشان می‌دهد. قطرهای کوچکتر نشان‌دهنده راه‌حل‌های بهتر در نتایج بهینه‌سازی است. همانطور که ملاحظه می‌شود راه‌حل‌های GWO نسبت به راه‌حل‌های NSGA-II توزیع گسترده‌تر (یعنی تنوع انتخاب یا راه‌حل‌های بیشتر) و تراکم بیشتری دارند. الگوریتم GWO، به ترتیب تعداد ۷۱ و ۹۴ راه‌حل نامغلوب و الگوریتم NSGA-II، تعداد ۶۱ و ۶۷ راه‌حل برای دو زیرمنطقه تولید کرده‌اند. شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند که NSGA-II قادر به تولید هیچ راه‌حلی برای $F_1 < F_2$ نیست و پاسخ پیشنهادی آن در محدوده هزینه‌ای بالاتری نسبت به GWO قرار دارد و این در حالی است که GWO برای اهداف F_1 و F_2 طیف وسیع‌تری از راه‌حل‌های نامغلوب و راه‌حل‌هایی با هزینه کمتر را تولید کرده است. موارد نشان‌دهنده قابلیت بیشتر الگوریتم GWO برای جستجوی دقیق‌تر و گسترده‌تر در فضای مسائل چندهدفه بهینه‌سازی و محاسبه راه‌حل‌های نامغلوب در قالب جبهه پارتو است. الگوریتم GWO به دلیل ارائه نتایج بهتر نسبت به الگوریتم دیگر به عنوان الگوریتم منتخب این پژوهش معرفی شد. عملکرد مطلوب الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی روش‌های توسعه کم پیامد با یافته‌های Mani و همکاران [۱۵]، نظری و همکاران [۱۶] و اسکندرپور و همکاران [۸] مطابقت دارد.

تحلیل نتایج بهینه‌سازی چندهدفه الگوریتم گرگ خاکستری

همانگونه که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش (بدر شدن) تابع هدف دوم (که نشان‌دهنده هزینه است) از ۰/۸ به ۱/۲ در هر دو زیرمنطقه، تابع هدف اول در زیر منطقه یک و دو به ترتیب از ۲/۳۵ به ۱/۹ و از ۱/۷۴ به ۱/۳۸ کاهش یافته و در واقع بهبود

می‌یابد. از این پس روند کاهشی تابع هدف اول با شیب کمتر در هر دو زیر منطقه ادامه می‌یابد و این در حالی است که تابع هدف دوم (هزینه) از ۱/۱ به حدود ۳ می‌رسد. لازم به ذکر است که با بدتر شدن تابع هدف دوم یعنی افزایش هزینه‌ها به بیش از ۱/۵، تابع هدف اول بهبود نمی‌یابد و این بدان معناست که با صرف هزینه بیشتر نمی‌توان حجم رواناب و دبی سیل محدوده مطالعه را از حد مشخص شده کمتر نمود. بنابراین راه حل پیشنهادی الگوریتم فوق، بهترین راهکار موجود از دیدگاه دو تابع یک و دو است. همچنین راه‌حل‌های پیشنهادی برای تابع هدف سوم (کاهش عملکرد روش‌ها در طول دوره بهره‌برداری) برای دو زیرمنطقه یک و دو از ۰/۲ تا ۰/۷ است که ارقام قابل توجهی نبوده و بیانگر این موضوع است که نتایج الگوریتم گرگ خاکستری علاوه بر دو تابع اول و دوم، در خصوص تابع سوم نیز بهترین نتیجه را نشان داده است. با توجه به موارد ذکر شده جبهه‌های پارتو تولید شده بوسیله الگوریتم GWO دارای تراکم و توزیع مناسبی هستند و می‌توانند راه‌حل‌های مناسبی را برای مقادیر مختلف همه توابع هدف این پژوهش پیشنهاد کنند که این امر عملکرد دقیق و مؤثر مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. بنابراین راه حل پیشنهادی الگوریتم فوق، بهترین راهکار موجود از دیدگاه هر سه تابع یک، دو و سه در پژوهش حاضر محسوب می‌شود.

شایان ذکر است که در جدول ۸ حداکثر سطح قابل اجرا در میان روش‌های انتخاب شده مربوط به روش بام سبز در زیرحوضه‌های یازده و هفت به ترتیب به میزان ۶۲/۸ و ۶۰/۱ درصد و سطح بهینه اجرای همین روش نیز در زیرحوضه هفت به میزان ۵۲ درصد و در زیرحوضه یازده، ۴۸/۲ درصد است و دلیل آن مربوط به قرارگیری این دو زیرحوضه در خروجی محدوده مطالعه و افزایش حجم رواناب در این مناطق است. روش بام سبز بدلیل اثرگذاری در کاهش حجم رواناب و دبی سیل، در سایر زیرحوضه‌ها نیز سطوح قابل توجهی را به خود اختصاص داده است.

شکل ۹ نیز توزیع مکانی روش‌های LID مرتبط با مطلوب‌ترین راه‌حل به دست آمده با استفاده از بهینه‌سازی سه هدفه را نشان می‌دهد (نسبت مساحت بهینه روش‌های LID به حداکثر سطح قابل اجرای آنها). همانگونه که ملاحظه می‌شود در زیرحوضه‌های بالادست محدوده مطالعه بدلیل عدم وجود گره‌های سیلابی، درصد اجرای روش‌های LID از کم تا متوسط حدود ۱۰ تا ۴۰ درصد است. در مقابل، در زیرحوضه‌های هفت و یازده بدلیل قرارگیری در خروجی حوضه مطالعه، وجود یا مجاورت با گره‌های سیلابی J9 و J13، مناطق وسیعی مشتمل بر ۵۰ تا ۷۰ درصد زیرحوضه‌ها با روش ترکیبی معرفی شده پوشش داده شده است. راه‌حل انتخابی، روش‌های توسعه کم پیامد بهینه را بر اساس ظرفیت آنها برای کاهش حجم رواناب، کاهش هزینه‌ها و قابلیت ارائه خدمات ارائه نموده است. بطور کلی، زیرحوضه‌هایی که رواناب آنها از گره‌های سیلابی عبور می‌کند برای اجرای این روش‌ها مناسب‌تر و در اولویت هستند.

نتایج با یافته‌های Mani و همکاران [۱۵] در خصوص بکارگیری روش‌های توسعه کم پیامد در حالت بهینه‌سازی شده و اثر کاهشی آنها در حجم رواناب در گره‌های سیلابی و خروجی، مطابقت دارد. در نهایت امر راه‌حل‌های پیشنهادی مدل ادغام شده SWMM-GWO قادر است حجم رواناب در گره‌های خروجی و سیلابی زیرمنطقه‌های یک و دو را با هزینه‌ای در حدود ۹۰۰۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰۰۰ دلار، در حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد کاهش دهد.

تحلیل نتایج مدل‌سازی روش ترکیبی سامانه نگهداشت

زیستی، بام سبز، جوی باغچه و ترانشه نفوذ در مدل SWMM

جدول ۹ نشان می‌دهد که پس از اجرای روش ترکیبی منتخب حجم رواناب در گره‌های سیلابی مقادیر قابل توجهی کاهش یافته است. حجم جریان سیل در گره‌های سیلابی J9 و J13 قبل از اجرای روش‌ها به ترتیب معادل ۴۳/۶ و ۴۲ هزار مترمکعب بوده که پس از اجرای آنها به ترتیب به ۱۷/۶ و ۱۲/۴ هزار مترمکعب رسیده است و در کل حجم جریان در دو گره سیلابی، بین ۵۹ تا ۷۱ درصد کاهش یافته است. همچنین با توجه به هیدروگراف‌های خروجی محدوده مطالعه (شکل ۱۰) و جدول ۱۰، مشاهده می‌شود که دبی اوج جریان در خروجی J10 از ۵/۱۳ به ۱/۵۷۶ و در خروجی J13 از ۴/۶۱ به ۱/۰۱۴ مترمکعب بر ثانیه و در واقع دبی اوج جریان به حدود ۲۲ تا ۳۱ درصد مقدار اولیه در دو خروجی کاهش یافته است (۷۰ درصد کاهش). حجم رواناب نیز در این دو خروجی به ترتیب از ۵۱/۶ به ۲۱ و از ۴۸/۶ به ۱۴ هزار مترمکعب تقلیل یافته است. نتایج گویای اثرگذاری مشهود روش ترکیبی بر کاهش حجم و دبی سیلاب در محدوده مطالعه است.

با توجه به موارد فوق می‌توان اذعان کرد که بکارگیری روش‌های توسعه کم پیامد در مناطق شهری واقع در مناطق خشک و نیمه خشک مانند محدوده مطالعه می‌تواند در کاهش هدررفت آب حاصل از وقایع بارش و ساماندهی رواناب‌های حاصل از آن بسیار مؤثر باشد. حجم زیادی از آب را می‌توان از این طریق صرفه‌جویی نمود و برای مصارف مختلف آن در شهرها برنامه‌ریزی کرد. بر این اساس رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی پیشنهادی این پژوهش با اطمینان قادر است به کارشناسان شهرسازی و متخصصین کنترل سیل برای انتخاب ترکیب‌های بهینه از میان روش‌های - و کاهش سیل شهری و بهبود کمیت و کیفیت آب شهری یاری رساند.

سپاسگزاری

از همکاری و مساعدت دانشگاه تربیت مدرس، قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مساله مورد تایید همه نویسندگان است.

areas using slime mould algorithm. Sustainable Cities and Society. 93, 104508. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104508>

8. Eskandaripour, M. Golmohammadi, M.H. Soltaninia, Sh. 2024. Optimal low-impact development Facility Design in Urban Environments: A multidimensional optimization approach employing slime mould and nondominated sorting genetic algorithms. Urban Climate. 55, 101963.

<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101963>

9. Fallahi Zarandi, A. 2013. Selection the Optimum Combination of Best Management Practices (BMPs) with Economic Considerations in Improving the Quality of Urban Runoff in Tehran. PhD Diss. College of Engineering. Kharazmi University.

10. Ghazavi, R. Moafi Rabori, A. Ahadnejad Reveshty, M. 2017. Effects of Rainfall Intensity-Duration-Frequency Curves Reformation on Urban Flood Characteristics in a Semi-Arid Environment. ECOPERSIA. 5(2): 1799-1813.

<https://civilica.com/doc/2138507>

11. Ghahraman, B. Abkhezr, H. 2004. Improvement in Intensity-Duration-Frequency Relationships of Rainfall in Iran. Journal of Water and Soil Science.; 8 (2) :1-14. 20.1001.1.24763594.1383.8.2.1.4

12. Jazaeri, P. Fazloul, R. Masoudian, M. Javaheri, N. 2023. Investigation the Effect of Low-Impact Development Methods of Rainwater Storage Barrels and Infiltration Trenches on Reducing the Peak Discharges of Urban Floods Journal of Irrigation and Water Engineering. 13(51): 437-462. <https://doi.org/10.22125/IWE.2023.169909>

13. Kumar, S. Guntu, R. Agarwal, A. Govind Kumar, V. Pasupuleti, S. Kaushal, D. Gosian, A. Bronstert, A. 2022. Multi-objective optimization for stormwater management by green-roofs and infiltration trenches to reduce urban flooding in central Delhi. Journal of Hydrology. 606, 127455.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127455>

14. Ma, B. Wu, Z. Hu, C. Wang, H. Xu, H. Yan, D. 2022. Process-oriented SWMM real-time correction and urban flood dynamic simulation. Journal of Hydrology. 605, 127269.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127269>

15. Mani, M. Bozorg-Haddad, O. Loáiciga, H. A. 2019. A new framework for the optimal management of urban runoff with low-impact development stormwater control measures considering service-performance reduction. Journal of Hydroinformatics. 21(5): 727-744. doi: 10.2166/hydro.2019.126

16. Nazari, A.H. Roozbahani, A. Hashemy Shahdany, S.M. Urban Stormwater Management by Optimizing Low Impact Development

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسندگان مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

صدیقه مدرسی طباطبایی: اجرای مدل بارش رواناب، اجرای الگوریتم‌ها، انجام کلیه تحلیل‌ها، نگارش مقاله. حمیدرضا مرادی: راهنمایی در انجام تحلیل‌ها، ویرایش و بازبینی مقاله. مهدی وفاخواه: مشاوره در اجرای مدل بارش رواناب و انتخاب روش‌ها و بازبینی مقاله. جواد وحیدی: مشاوره در اجرای الگوریتم‌ها

منابع مورد استفاده

1. Abdelkebir, B. Maoui, A. Mokhtari, E. Eagle, B. Chen, J. Abouelnour, M. 2021. Evaluating Low-Impact Development practice performance to reduce runoff volume in an urban watershed in Algeria. Arab Journal of Geoscience. 14, 814.

<https://doi.org/10.1007/s12517-021-07178-0>

2. Aghili Mahabadi, N. Zarif Sanaci, H. R. Hatefi, S. M. 2022. Prioritization of Low-Impact Development Methods for Management of Urban Surface Runoff, Using the Fuzzy TOPSIS and TOPSIS Method (Case Study: Sepahan-Shahr Town, Isfahan). Amirkabir Journal of Civil Engineering. 53(11):4895-4912. <https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18619.6909>

3. Avand, M. Moradi, H. R. Ramazanzadeh Lasboyee, M. 2021. Spatial modeling of flood probability using geo-environmental variables and machine learning models, case study: Tajan watershed, Iran. Advances in Space Research. 67(10): 3169-3186.

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.02.011>

4. Ayoubi Ayoublu, S. Vafakhah, M. Pourghasemi, H.R. 2024. Efficiency evaluation of low impact development practices on urban flood risk. Journal of Environmental Management. 356, 120467.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120467>

5. Dabas, R. Kumar, S. Kumar, M. 2020. Applications of Low Impact Development for Managing the Storm Water Surface Runoff in Urban Areas. Conference paper. Advances in Civil Engineering and Infrastructural Development. pp 275-283.

https://doi.org/10.1007/978-981-15-6463-5_26

6. Emmerich, M.T.M. Deutz, A.H. 2018. A tutorial on multiobjective optimization: fundamentals and evolutionary methods. Natural Computing. 17: 585-609.

<https://doi.org/10.1007/s11047-018-9685-y>

7. Eskandaripour, M. Golmohammadi, M.H. Soltaninia, Sh. 2023. Optimization of low-impact development facilities in urban

20. Sazian, M. 2016. Studies on implementing the surface water management plan and the planning for the improvement of Tehran's rivers and canals. Tehran Organization of Surface Water Management. (Report)
21. Seo, S.B. Kim, K.M. Park, Ch. Hyemin, P. Yoo J. 2024. Genetic algorithm-based allocation of LID practices to mitigate urban flooding. *Natural Hazards*. 120, 447–462.
<https://doi.org/10.1007/s11069-023-06226-0>
22. Vafakhah, M. Bakhshi Tiragani, M. Khazei, M. 2013. Analysis of rainfall and discharge trend in Kashafrud Watershed. *Geography and development*. 10(29): 21-27. <https://sid.ir/paper/386671/fa>
- Techniques and Integration of SWMM and SUSTAIN Models. *Water and Wastewater*. 2021. 32(4):136-151. Doi: 10.22093/wwj.2021.285296.3138
17. Noori, H. Farzin, S. and Karami, H. 2018 . Performance Development of Modern Methods Using Multi-Objective Optimization in Urban Runoff Control. *Iran-Water Resources Research*. 14(3):57-70. <https://civilica.com/doc/1605673>
18. Rezayi, F. Bahremand, A. Berdi Shaikh, V. Dasturani, M. Tajbakhsh, S. M. 2018. Calibration and Evaluation of the SWMM Model in Runoff Simulation in District 9 of Mashhad City. *Journal of Water and Sustainable Development*. 5(2):91-100. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v5i2.67930>
19. Safaei Eyvari, J. 2021. Evaluating the Performance of Low-Impact Development Methods on Flood Management Using SWMM Model in the Kashmar City. Thesis of the Degree of Master of Science (M.Sc.) in Watershed Management Sciences and Engineering, 143.