

## Investigating multi-objective optimization algorithms for the design of urban spaces with a focus on quantitative and qualitative control of urban runoff

Sadegh Oraei Zare<sup>1\*</sup>, Forough Alizadeh Sanami<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ph.D., Surface Water Department, Iran Water Resources Management Company, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Ph.D., Department of Water and Environment, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction

Surface runoff is considered one of the main components of the hydrological cycle and represents a vital source of water supply for various ecosystems and human activities. As urbanization continues to expand at an unprecedented rate in today's era, the transformation of permeable surfaces, such as soil and vegetation, into impervious surfaces like asphalt and concrete has led to significant adverse changes in both the quality and quantity of surface runoff. This shift not only alters the natural flow patterns but also increases the speed at which water travels over these surfaces, often resulting in higher volumes of runoff that can overwhelm drainage systems and lead to flooding. Moreover, the quality of surface runoff has been negatively impacted, as it often carries pollutants such as heavy metals, oils, sediments, and nutrients from urban areas into nearby water bodies. This pollution poses serious threats to aquatic ecosystems and can compromise the safety of drinking water supplies. Recognizing these challenges, flood management methods have been developed to harness this resource in a controlled manner, ensuring that it is utilized effectively to meet the increasing water demands of urban populations. Through the application of these integrated approaches, communities can better manage their water resources while promoting sustainable urban development and preserving the health of local ecosystems.

#### Materials and Methods

Based on this and considering the importance of runoff management in a metropolis like Tehran, this research focuses on a specific segment of the catchment area within the 22nd district of Tehran municipality. The study aims to evaluate the effects of Best Management Practices (BMPs) on the quantity and quality of runoff by employing advanced mathematical models that simulate precipitation and runoff dynamics. To comprehensively investigate this subject, the research incorporates three critical objective functions: first, runoff quality, which is assessed through parameters such as Biochemical Oxygen Demand over five days (BOD5) and Total Suspended Solids (TSS); second, runoff quantity, which involves measuring the volume of runoff generated in each sub-basin; and third, cost considerations, which encompass both flood damage costs and the maintenance expenses associated with implementing BMPs. Through this multifaceted approach, the study aims to compare the effectiveness of two optimization models—Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGAI) and Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)—in achieving optimal runoff management solutions. By integrating these various dimensions, the research not only seeks to enhance the understanding of runoff behavior in urban environments but also aspires to contribute valuable insights for policymakers and urban planners in developing sustainable strategies for managing stormwater in Tehran and similar metropolitan areas.

#### Results and Discussion

The results of these two multi-objective evolutionary optimization algorithms conclude that the NSGAI optimization algorithm is more suitable due to the use of features such as crowding distance and the speed of performing different steps in the optimization algorithm. In addition, the use of MOPSO optimization algorithm will be easier due to the inclusion of fewer parameters than NSGAI. It is also necessary to mention that reaching the steady state in NSGAI will take place in fewer generations than MOPSO. Also, the results of the evaluation of BMPs in the form of different scenarios showed that the application of these solutions can reduce the peak discharge from 16.3% to 1.50% and also reduce the volume of runoff from 9.2% to 37.4% depending on the type and number of BMPs used at the basin level. Considering that, in general, the phenomenon of rainfall-runoff is a process that is strongly influenced by uncertain factors, and the inappropriate selection of design parameters leads to the incorrect estimation of the flood discharge and as a result, the selection of unfavorable dimensions for structures and technical performance becomes inappropriate or uneconomical. Designs and ultimately financial and human losses will be many. Therefore, the correct selection of design parameters is very important.

## Conclusion

In this research, after analyzing the uncertainty of the temporal and spatial distribution of rainfall as well as the initial moisture of the soil using the Monte Carlo simulation method and analyzing the sensitivity of the flood hydrograph to the continuation of the rainfall, flood management strategies in the region were thoroughly investigated. The results of the investigations showed that the highest peak flow is obtained from rainfall with a duration of 0.5 hours; in this case, the range of peak flow changes is equal to 34.8 cubic meters per second, which indicates the presence of high uncertainty in the input parameters of the rainfall-runoff model. In this regard, better results can be achieved by applying methods such as uncertainty analysis of inputs and effective parameters on the results of modeling or analyzing the sensitivity of the model to changing parameters. Among the input factors of rainfall-runoff models that have a noticeable effect on the results, we can mention the temporal and spatial distribution of rainfall, the continuity of rainfall, and the previous soil moisture conditions. Additionally, incorporating advanced statistical techniques and machine learning algorithms may further enhance predictive accuracy and optimize flood management strategies in urban environments, ultimately leading to more effective decision-making and improved resilience against flooding events.

**Keywords:** NSGAI, MOPSO, BMPs, Multi-objective optimization algorithm.

**Article Type:** Research Article

## Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

## Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

## Authors' contribution

**Sadegh Oraei Zare:** Conceptualization, conducting software/statistical analyses, writing the initial draft of the article; **Forough AliZadeh Sanami:** Performing software analyses, writing and revising the article.

\*Corresponding Author, E-mail: [Sadegh.oraei@gmail.com](mailto:Sadegh.oraei@gmail.com)

**Citation:** Oraei Zare, S., & Alizadeh Sanami, F. (2025). Investigating multi-objective optimization algorithms for the design of urban spaces with a focus on quantitative and qualitative control of urban runoff. *Water and Soil Management and Modeling*, 5(1), 301-316.  
doi: 10.22098/mmws.2024.14703.1426

Received: 17 February 2024, Received in revised form: 19 March 2024, Accepted: 15 April 2024, Published online: 21 March 2025  
*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2025, Vol. 5, No. 1, pp. 301-316

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## بررسی الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه به منظور طراحی فضاهای شهری با رویکرد مهار کمی-کیفی رواناب سطحی

صادق اروعی زارع<sup>۱\*</sup>، فروغ علی‌زاده صنمی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دکتری، گروه آب‌های سطحی، شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دکتری، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

### چکیده

از جمله عواملی که می‌تواند در کیفیت و کمیت رواناب‌های شهری تأثیر قابل توجهی داشته باشد، رشد و توسعه شهری و آگاهی از اثرات محیط‌زیستی آن بر جامعه است. در سال‌های اخیر مفهوم جدیدی به نام روش‌های مدیریت مناسب سیلاب و با نام اختصاری BMPs در راستای مهار کمی و کیفی سیلاب‌های شهری مطرح شده است. در این مقاله سعی شده است با در نظر گرفتن سه تابع هدف کیفیت رواناب، کمیت رواناب و هزینه (شامل خسارت سیلاب و هزینه‌های نگهداری از BMPs) ضمن مقایسه دو الگوی بهینه‌سازی NSGAI و MOPSO به ارائه سناریو مناسب برای طراحی شهری رویکرد مهار کمی و کیفی رواناب پرداخته شود. بر این اساس و با توجه به اهمیت مدیریت رواناب در کلانشهری مانند تهران، در این تحقیق قسمتی از منطقه ۲۲ شهرداری تهران انتخاب و نسبت به ارزیابی اثرات BMPs بر کمیت رواناب با استفاده از مدل‌های ریاضی بارش-رواناب اقدام شد. با مقایسه نتایج نسل آخر دو الگوریتم مشخص شد که میانگین جواب‌های بهینه NSGAI بهینه‌تر و انحراف معیار جواب‌ها در نسل آخر نسبت به MOPSO بیشتر که این نشان‌دهنده کارایی بهتر NSGAI است اما استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی MOPSO به دلیل دخیل بودن پارامترهای کمتری نسبت به NSGAI از سهولت بیشتری برخوردار خواهد بود. حداقل نمودن توابع هدف در ساختار پیشنهادی به‌عنوان هدف اصلی استفاده از این ابزار مطرح بوده است در الگوریتم NSGA-II بیشتر از MOPSO است. لازم به ذکر است رسیدن به حالت پایدار در NSGAI در تعداد نسل‌های کمتری نسبت به MOPSO صورت خواهد گرفت. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی BMPs در قالب سناریوهای مختلف نشان داد که به کارگیری این راهکارها می‌تواند باعث کاهش دبی اوج از ۱۶/۳ به ۵۰/۱ درصد و نیز کاهش حجم رواناب از ۹/۲ تا ۳۷/۴ درصد بسته به نوع و تعداد BMPs به کار رفته در سطح حوضه شود. همچنین با بررسی سناریوهای منتخب نتیجه مشخص شد که در بیش از ۶۰ درصد از کاربری‌های مرتبط با فضای سبز، مخازن ماند زیستی و در کاربری‌های مسکونی و صنعتی کف‌پوش‌های نفوذپذیر و مخازن جمع‌آوری آب باران پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: NSGAI، MOPSO، الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه، BMPs

### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Sadegh.oraei@gmail.com

استناد: اروعی زارع، صادق و علی‌زاده صنمی، فروغ (۱۴۰۴). بررسی الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه به منظور طراحی فضاهای شهری با رویکرد مهار کمی-کیفی رواناب سطحی. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۵(۱)، ۳۰۱-۳۱۶.  
doi: 10.22098/mmws.2024.14703.1426

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱



مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۱، صفحه ۳۰۱ تا ۳۱۶  
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان

## ۱- مقدمه

حوضه مورد نظر به پنج زیرحوضه تقسیم شد و مقدار بهینه مساحت حوضه، درصد کاهش آلودگی رواناب، حجم ذخیره، میزان هزینه ایجاد مخازن محاسبه شد.

در گزارشی (Heaney et al. (2006 در بخش‌های مختلف به بررسی زمینه روش‌های کاهش آلودگی و حجم رواناب با در نظر گرفتن مسایل اقتصادی پرداختند. از جمله اهداف این تحقیق ارزیابی اثرات تالاب‌ها در کنترل کیفی رواناب شهری و همچنین ایجاد یک مدل بهینه‌سازی در این زمینه است. در رابطه با موضوع بهینه‌سازی آن‌ها به تعریف یک تابع هدف جهت حداقل‌سازی هزینه ایجاد و همچنین در نظر گرفتن محدودیت‌هایی تحت عنوان شرایط جریان‌های ورودی و خروجی در BMPs و محدودیت‌های اجرای استانداردهای مربوطه پرداختند. همچنین، (Perez et al. (2005 با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی مقدار دبی پیک رواناب سطحی و هزینه‌های اجرای BMPs در حوضه‌های شهری با استفاده از مکان‌یابی در زیرحوضه‌های مختلف پرداختند. در ادامه، در پژوهشی، (Baptista et al. (2007 به بررسی کاربرد BMPs با در نظر گرفتن سه شاخص هزینه ایجاد، اثر محیط‌زیستی و کنترل کمی سیلاب‌ها پرداختند. در این تحقیق یک تابع جهت در نظر گرفتن سه شاخص فوق پیشنهاد و سپس با استفاده از نرم‌افزار AvDren به تعیین میزان ارزش برای هرکدام از BMPs پرداخته شد. در پژوهشی دیگر، (Obropta and Kardos (2007 در مروری بر مدل‌های کمی و کیفی سیلاب شهری: داشته‌اند. آن‌ها به‌طور جامع به بیان خصوصیات مربوط به آن‌ها پرداخته‌اند که می‌توان به‌عنوان یک مرجع مفید در انتخاب انواع آن‌ها استفاده کرد.

(Mejía and Moglen (2009 با توجه به یک مدل شبیه‌سازی سیلاب و بهینه کردن کاربری اراضی، اثر توسعه شهرنشینی و کاهش مناطق نفوذناپذیر بر کمیت و کیفیت سیلاب را بررسی کردند. در این تحقیق به دو سؤال پاسخ داده شد: ۱- مناطق نفوذناپذیر چه تأثیری بر سیلاب دارند؟ ۲- در یک حوضه شهری مناطق با کاربری مسکونی چگونه می‌توانند توسعه پیدا کنند؟ علاوه بر این، (Abi Aad et al. (2010 روش جدیدی برای مدل‌سازی دو باغچه آبیاری بارانی و سیستم‌های نگهدارنده باران با استفاده از مدل SWMM پیشنهاد داده‌اند. برای این منظور با برنامه‌های جداگانه اثر BMPs بر رواناب ارزیابی شد و ورودی مدل SWMM به نحوی تغییر داده شد که با مشخصات رواناب خروجی یکسان باشد. در نهایت اثر تجمعی استفاده از BMP در سطح حوضه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در پژوهشی دیگر، (Wang et al. (2017 به ارزیابی و مدل‌سازی ابزارهای کاهش رواناب، با استفاده از مدل SWMM پرداختند. ایشان از سه سناریوی

در عصر حاضر افزایش جمعیت و در نتیجه افزایش تقاضا برای بهره‌برداری از منابع آبی باعث شده است تا رواناب سطحی به‌عنوان یکی از مهمترین منابع تأمین آب محسوب شود. از سوی دیگر رشد روزافزون جمعیت و افزایش روند شهرنشینی منجر به تغییر کاربری اراضی طبیعی به شکل مناطق مسکونی، تجاری و یا صنعتی شده‌اند. این امر باعث کاهش نفوذپذیری و در نتیجه افزایش حجم و دبی اوج رواناب ناشی از بارش و نیز افزایش غلظت آلاینده‌ها و در نهایت کاهش کیفیت رواناب می‌شود. افزایش کمیت رواناب ناشی از افزایش سطوح نفوذناپذیر، مناطق شهری را از یک طرف با تهدید و از سوی دیگر با فرصت مواجه کرده است. طغیان سیل و تلفات مالی و جانی ناشی از آن و نیز آلودگی‌های محیط‌زیستی ناشی از رواناب سطحی از جمله این تهدیدها به حساب می‌آیند. این در حالیست که با مهار صحیح رواناب و به کارگیری روش‌های مدیریت سیل می‌توان از این منبع آبی به بهترین شکل بهره گرفت. در حال حاضر رویکرد رایج در کشور در خصوص مدیریت رواناب سطحی به صورت جمع‌آوری و زهکشی رواناب از سطح حوضه با استفاده از مجموعه‌ای از مجاری شامل لوله‌ها، کانال‌ها و تونل‌های هدایت‌کننده جریان و انتقال آن به منابع جریان واقع در پایین‌دست بدون توجه به بار آلاینده‌های موجود در رواناب است. این در حالیست که بخش عمده آلودگی منابع آب از آلودگی رواناب سطحی ناشی می‌شود و سیستم‌های فعلی قادر به حذف این آلاینده‌ها نیستند. از سوی دیگر زمان اجرای این سیستم‌ها طولانی بوده و مشکلاتی را در طول زمان اجرا و بهره‌برداری به همراه خواهند داشت.

به‌طور کلی سیلاب شهری از چهار دیدگاه ایجاد رواناب شهری، مهار رواناب شهری، خسارت سیلاب و هزینه‌های ایجاد روش‌های مهار سیلاب مورد بررسی قرار می‌گیرد. کلیه فعالیت‌هایی که در جهت پیشگیری، مدیریت بحران در حین وقوع سیلاب و بعد از وقوع سیلاب انجام می‌گیرد، تحت عنوان مدیریت سیلاب نام‌گذاری می‌شود. از این‌رو در سال‌های اخیر مفهوم جدیدی به نام بهترین شیوه‌های مدیریت<sup>۱</sup> و با نام اختصاری BMPs در راستای مهار کمی و کیفی سیلاب‌های شهری مطرح شده است. در همین زمینه، در مطالعه‌ای (Rathnam et al. (2004 به بهینه‌سازی هزینه ایجاد مخازن ذخیره جهت کنترل آلودگی و کمیت رواناب شهری پرداختند. در این تحقیق که از مدل‌سازی پویا با تکنیک پیشرو استفاده شده، با در نظر گرفتن دو سناریوی توأم (۶۰ درصد کاهش آلودگی و ۹۰ درصد کنترل کمی رواناب) اندازه مخازن ذخیره در یک حوضه شهری متشکل از چند زیر حوضه تعیین شد.

<sup>۱</sup> Best Management Practices (BMPs)

موجب باعث بهبود نتایج و پیش‌بینی در مدل‌سازی بارش-رواناب شده است. علاوه بر این، Hosseinzadeh Kohi et al. (2024) به بهینه‌سازی طراحی کانال‌های جمع‌آوری رواناب شهری برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش اطمینان‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی پرداختند. در این پژوهش شبکه جمع‌آوری رواناب منطقه ۱۰ شهرداری تهران مورد بازطراحی بهینه قرار گرفت. در همین راستا شبکه جمع‌آوری در دو مرحله توسط مدل SWMM شبیه‌سازی شد. از الگوریتم ژنتیک نیز به‌عنوان ابزاری جهت بهینه‌کردن بازطراحی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی شبکه در وضع موجود نشان داد که با افزایش دوره بازگشت از ۲ تا ۱۰ سال، حجم رواناب خروجی از ۴۵/۹ تا ۵۹/۷ هزار مترمکعب افزایش یافت که موجب افزایش آسیب‌پذیری از ۱۰/۴ تا ۱۲/۲ درصد و کاهش اطمینان‌پذیری از ۹۷/۵ تا ۹۵/۸ درصد شده است. در شبیه‌سازی شبکه در شرایط آبی نیز شاخص آسیب‌پذیری در دوره‌های بازگشت ۵ و ۱۰ سال، ۱۲/۷ و ۱۳/۹ درصد و شاخص اطمینان‌پذیری نیز ۹۵/۳ و ۹۴/۳ به دست آمد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که در تکرار ۱۶۸ام، الگوریتم به پاسخ نهایی خود به مقدار ۰/۳ رسیده و این پاسخ تا تکرار ۳۰۰ ثابت باقی مانده است. همچنین بازطراحی بهینه موجب کاهش آسیب‌پذیری شبکه تا ۷/۶ درصد و افزایش اطمینان‌پذیری تا ۹۸/۱ درصد شد. این پژوهش نشان داد که بازطراحی بهینه می‌تواند علاوه بر رفع مشکلات شبکه در وضع موجود، توانایی سامانه را نیز در برابر تهدیدات تغییر اقلیم آینده بالا برد.

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد در اکثر تحقیقات گذشته که در زمینه بهینه‌سازی روش‌های مهار سیلاب در حوضه‌های شهری انجام شده است، به انتخاب تابع هدف کیفیت رواناب در کنار سایر توابع هدف پرداخته نشده است، بلکه بیشتر به در نظر گرفتن کمیت رواناب و هزینه‌های روش‌های مهار سیل و نهایتاً خسارت وارد بر منطقه ناشی از سیلاب و عدم توانایی سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی جهت انتقال و یا جریان آب برگشت پرداخته شده است. به‌طور خلاصه در این تحقیق سعی شده است ضمن شبیه‌سازی و در نظر گرفتن تعدادی از روش‌های مهار سیلاب بنام BMPs به بررسی اثر توأمان این روش‌ها در مهار کمی و کیفی و هزینه‌ای سیلاب‌های شهری پرداخته شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد تحقیق بخشی از حوضه شهر تهران واقع در منطقه ۲۲ شهرداری تهران است. این محدوده در حد فاصل طول شرقی ۵۱ درجه و ۹ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۱۲ دقیقه و عرض شمالی ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه قرار گرفته است. این حوضه مساحتی بالغ بر ۱۱ کیلومتر مربع دارد و از شمال به ارتفاعات ۲۲۱۵

سنگ‌فرش متخلخل، جمع‌آوری باران و بام سبز استفاده کردند و نتیجه گرفتند که سنگ‌فرش متخلخل بهترین ابزار در کاهش حجم رواناب است و حدود ۳۰ درصد میزان رواناب را کاهش داد است. همچنین، Babaei et al. (2018) به ارزیابی سیستم زهکشی منطقه شهری ارومیه با استفاده از دو روش SWMM و PROMERHEE II پرداختند. آن‌ها پس از تقسیم‌بندی منطقه به ۲۲ زیرحوضه و پس از ارزیابی و واسنجی مدل با استفاده از سه واقعه مشاهده‌ای و معرفی CN به‌عنوان حساس‌ترین شاخص در برآورد میزان رواناب سطحی، به این نتیجه رسیدند که در دوره بازگشت ۱۰ ساله برای جلوگیری از جاری شدن سیل در این حوضه باید عمق کانال‌ها حدود ۲۰ درصد افزایش یابد. همچنین نتایج آنها نشان داد هر دو مدل SWMM و PROMERHEE II زیرحوضه‌های یکسانی را به‌عنوان بحرانی‌ترین نواحی معرفی کردند.

Roozbahani et al. (2020) با استفاده از مدل SWMM

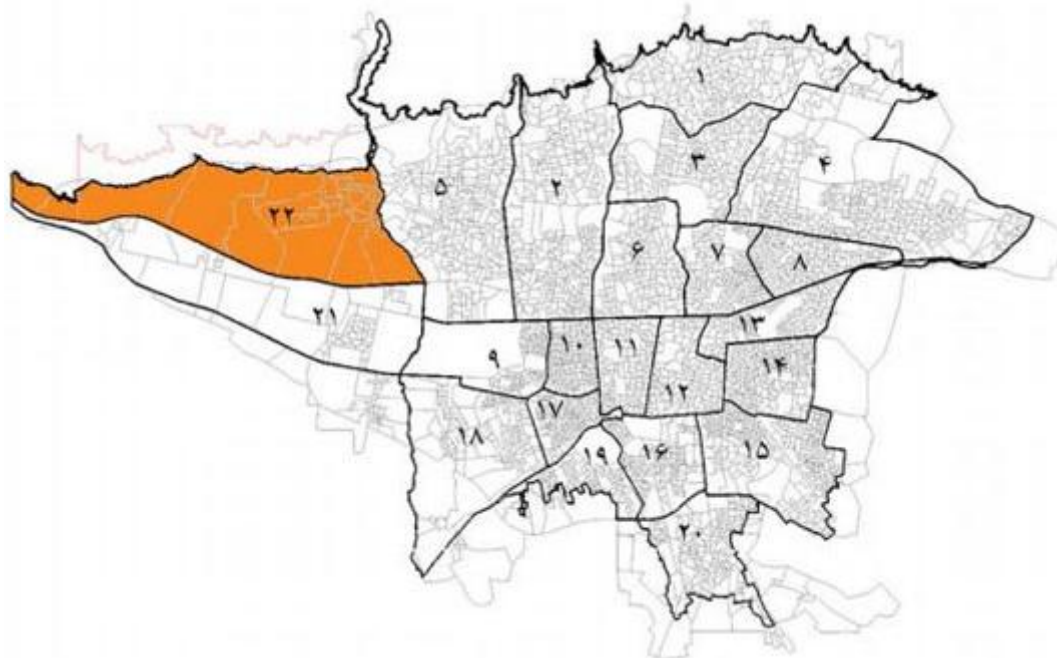
سیستم رواناب شهری ناحیه‌ای از منطقه ۱۱ تهران را تحت سناریوهای اقلیمی شبیه‌سازی و توسط معیارهای اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری، تاب‌آوری و شاخص پایداری ارزیابی کردند که این شاخص‌ها به ترتیب برابر با ۷۷/۸، ۷۷/۷ و ۷۱/۶ درصد محاسبه شد. سپس، Momeneh (2021) به مقایسه عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی با مدل IHACRES در مدل‌سازی جریان حوضه آبریز رودخانه گاماسیاب پرداخت. در این پژوهش، به مدل‌سازی جریان برای حوضه آبریز رودخانه گاماسیاب، واقع در غرب ایران، پرداخته شده است. برای این منظور از مدل‌های هوش مصنوعی (AI) شامل، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) از نوع پرسپترون چندلایه (MLP)، شبکه عصبی تابع پایه شعاعی (RBF) و مدل حافظه طولانی کوتاه-مدت (LSTM) استفاده شده است. علاوه بر این، برای ارزیابی بهتر مدل‌های AI از یک مدل تخصصی نیمه‌مفهومی بارش-رواناب نیز با عنوان IHACRES بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل‌های AI، ابزار مفید برای مدل‌سازی نوسانات جریان هستند و توصیه می‌شود در مطالعات آبی، این ابزار بیش‌تر مورد استفاده قرار گیرد. در پژوهشی، Mirzania et al. (2021) تأثیر موجب بر افزایش دقت مدل‌های تخمینی در مدل‌سازی بارش-رواناب را در حوضه صوفی‌چایی شبیه‌سازی نمودند. در این تحقیق فرآیند بارش-رواناب در حوضه صوفی‌چای با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و هیبرید موجب-شبکه عصبی (WANN) مورد مطالعه قرار گرفته است. داده‌های بارش-رواناب در طول دوره آماری (۱۳۸۰-۱۳۹۸) برای آموزش و صحت‌سنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت و شش سناریو برای هر مدل در نظر گرفته شد. نتایج این سناریوها نشان داد که بهترین ورودی برای مدل‌ها، مربوط به سناریوی پنج است که در آن از دبی با یک تأخیر، بارش ماه مورد نظر و بارش با یک تأخیر استفاده شده است. نتایج نشان داد که

۲۰۰-۴۰۰ میلی‌متر است. همچنین متوسط درجه حرارت سالیانه شهر تهران حدود ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد و حداکثر درجه حرارت آن تا ۴۱ درجه سانتی‌گراد است. در این تحقیق از بارش طراحی شش ساعته با دوره بازگشت پنج ساله استفاده شده است.

در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه در کشور به همراه نقشه رقوم ارتفاعی منطقه نمایش داد. در شکل ۲ نیز شبکه آبراهه‌های منطقه ارائه شده است. جدول ۱ مشخصات فیزیوگرافی منطقه را نشان می‌دهد.

متری کوهپایه‌های البرز و از جنوب به ضلع شمالی پارک جنگلی چیتگر ختم می‌شود. دو رودخانه اصلی کن و چیتگر از منطقه ۲۲ شهرداری تهران عبور می‌کنند که از این میان رودخانه چیتگر در ضلع غربی حوضه مورد تحقیق قرار می‌گیرد.

این رودخانه پس از عبور از پارک چیتگر به رودخانه کرج می‌ریزد. رواناب سطح حوضه مورد تحقیق از طریق مجاری پیشنهادی برای منطقه به دریاچه مصنوعی (که بر اساس طرح تفصیلی پیشنهاد شده) تخلیه می‌شود. بطور کلی متوسط سالیانه بارش در تهران ۲۳۰ میلی‌متر گزارش شده و دامنه تغییرات آن بین



شکل ۱- حوضه شهر تهران واقع در منطقه ۲۲ شهرداری تهران  
Figure 1- The area of Tehran located in District 22 of the Tehran Municipality

جدول ۱- مشخصات فیزیوگرافی منطقه

Table 1- Physiographic characteristics of the area

مساحت (هکتار)	محیط (کیلومتر)	شیب متوسط حوضه (درصد)	ارتفاع متوسط حوضه (متر)	طول آبراهه اصلی (متر)	زمان تمرکز به روش SCS (دقیقه)	عدد منحنی در شرایط رطوبتی متوسط
670.2	14.3	6.6	1319	4282	30	60

هیدرولیکی (شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی در وضع موجود)، ۳- داده‌های لازم جهت شبیه‌سازی کیفی (پارامترهای معادلات ایجاد و آلودگی). مراحل مختلف تحقیق در شکل ۳ نشان داده است.

### ۲-۳- شبیه‌سازی کمی و کیفی

در این تحقیق از یکی از متداول‌ترین مدل‌های بارش رواناب در مناطق شهری، مدل SWMM که در تحقیقات متعددی به کار برده شده است، برای مدل‌سازی بارش-رواناب استفاده شد. با

### ۲-۲- جمع‌آوری و تحلیل داده‌های مورد نیاز

به‌منظور دستیابی به هدف تحقیق که مدیریت بهینه کمی و کیفی رواناب‌های شهری است، پس از انتخاب منطقه مورد مطالعه (بدلیل توسعه کم مناطق با کاربری‌های گوناگون و اجرای محدود شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی) ابتدا داده‌های مورد نیاز از مراجع مختلف استخراج شد.

به‌طورکلی، در این تحقیق از سه دسته داده استفاده شده است: ۱- مشخصات فیزیوگرافی منطقه، ۲- داده‌های هیدرولوژیکی و

$$W = \text{میزان آلودگی شسته‌شده در طول زمان (Kg hr}^{-1}\text{)}$$

$$B_1 = \text{ثابت شستشو (hr}^{-1}\text{)}^{B_2} \left(\frac{\text{mm}}{\text{hr}}\right)^{B_2}$$

$$B_2 = \text{عدد توان (بی‌بعد)}$$

$$q = \text{نرخ رواناب (mm hr}^{-1}\text{)}$$

$$M = \text{میزان آلودگی ایجاد شده (Kg)}$$

#### ۴-۲- انتخاب روش‌های کنترل سیلاب (BMPs)

در این تحقیق برای انتخاب روش‌های کنترل سیلاب به ویژگی‌هایی نظیر: توپوگرافی و شیب عمومی منطقه، توانایی در کاهش دبی اوج سیلاب و آلودگی ناشی از آن، هزینه‌های اجرایی و شرایط اقلیمی توجه شده است و بر این اساس سه BMPs، روسازی متخلخل، مخزن ماند زیستی و مخازن جمع‌آوری آب باران انتخاب شد (Woods-Ballard et al., 2007).

#### ۴-۵- ساختار مسئله بهینه‌سازی چند هدفه

تابع هدف: در این مسأله سه تابع هدف به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

الف) حداقل نمودن کل خسارات ناشی از سیل

توجه به کوتاه مدت بودن دوره بارش‌های شبیه‌سازی شده در این تحقیق، از اثر تبخیر در مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب صرف‌نظر شده است. همچنین برای روندیابی جریان از روش موج سینماتیکی استفاده شده است. از مهمترین فرضیات این تحقیق عدم در نظر گرفتن مقادیر خسارت غیرمحسوس، غیر مستقیم و ثانویه سیلاب در برآورد خسارت ناشی از آن است. خسارات غیرمستقیم بخشی از خسارات محسوس بوده که کمی کردن آن مشکل است و پس از وقوع سیل وارد می‌آیند. همچنین اثر ذوب برف نیز در این تحقیق صرف‌نظر شده است.

از جمله آلاینده‌های مدل شده در این تحقیق شامل پارامترهای  $BOD_5^1$  و  $TSS^2$  است. در این تحقیق برای شبیه‌سازی روابط ایجاد آلودگی از رابطه تابع توانی (رابطه ۱) و شستشو از رابطه تابع نمایی (رابطه ۲) با پارامترهای به شرح جدول ۲ استفاده شده است (Egodawatta et al., 2009).

$$B = \text{Min}(C_1 C_2 t^{C_3}) \quad (1)$$

$B$  = پارامتر ایجاد آلودگی

$C_1$  = حداکثر آلودگی ایجاد شده ( $\text{Kg. m}^{-1}$ )

$C_2$  = نرخ ثابت ایجاد آلودگی ( $\frac{\text{Kg}}{\text{m.day}^{C_3}}$ )

$C_3$  = عدد توان برای پارامتر  $t$  (بی‌بعد)

$t$  = تعداد روزهای خشک

$$W = B_1 q^{B_2} M \quad (2)$$

$$F_1 = \min \left( \sum_{i=1}^{32} \left( 1.1 \left( \sum_{j=1}^3 \text{cost} I_{ij} + 10.14 ALID_{ij}^{0.7} \right) + \sum_{j=1}^4 (CL_j A_{ij}) \right) + \text{cost} D \right) \quad (3)$$

$$\text{cost} I_{ij} = 16.055 ALID_{ij1} + 20722.3 ALID_{ij2} - 432 \quad (4)$$

$$\text{cost} D = \sum_{f=1}^{nflood} 14500 (3.28 \times h_f^3 - 22.9 \times h_f^2 + 51.2 \times h_f + 2) \quad (5)$$

$$h_f = \beta_f \sqrt{1000 \times \nabla_f} \quad (6)$$

$$\beta_f = \sqrt{2S_f / B_f} \quad (7)$$

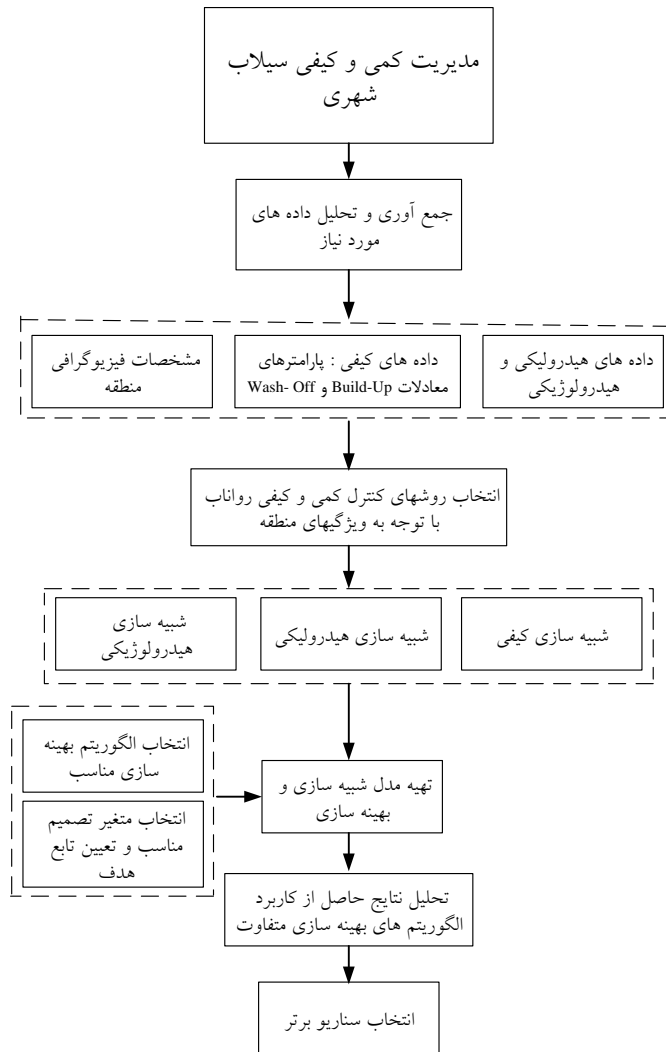
$$CN_i = \frac{\sum_{j=1}^4 (c_n A_{ij})}{\sum_{j=1}^4 A_{ij}} \quad (8)$$

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^4 (c_j A_{ij})}{\sum_{j=1}^4 A_{ij}} \quad (9)$$

$$\nabla_f = f \left( SWMM \left( \left[ \sum_{j=1}^3 ALID_{ij1}, \sum_{j=1}^3 ALID_{ij2}, \sum_{j=1}^3 ALID_{ij3}, A_{i1}, A_{i2}, A_{i3} \right], CN, C \right) \right) \quad (10)$$

<sup>2</sup> Toxic shock syndrome

<sup>1</sup> Biochemical oxygen demand



شکل ۲- روند انجام تحقیق  
Figure 2- Research process

جدول ۲- پارامترهای رابطه‌های ۱ و ۲  
Table 2- Parameters of Eqs. 1 and 2

کاربری اراضی					پارامتر	معادلات آلودگی			
سایر: فضای سبز و پارک		صنعتی		مسکونی پرتراکم	مسکونی کم تراکم				
C2	C1	C2	C1	C2	C2*	C1*			
1.9	59.6	9.1	193.6	2.6	74.5	0.9	3.0	TSS	ایجاد آلودگی
0.0	1.6	0.0	3.7	0.0	0.0	0.0	1.9	BOD5	BUILD-UP
B2		B1		B2	B1	B2*	B1*	TSS	شستشو WASH-OFF
1.7	0.1	2.5	0.3	2.2	0.7	0.2	0.4		
0.1	0.1	0.7	0.1	0.4	0.1	0.2	0.4	BOD5	

جدول ۳- هزینه‌های ایجاد کاربری‌های مختلف ( $CL_j$ )

Table 3- The costs of creating different land uses ( $CL_j$ )

ارزش یک متر مربع (دلار)	نوع کاربری
4000	مسکونی کم تراکم (اداری، تجاری، آموزشی)
8000	مسکونی پرتراکم
2000	صنعتی
500	سایر (فضای سبز و پارک)



جدول ۴- تعیین ضریب تولید رواناب و عدد منحنی در کاربری‌های مختلف

Table 4- Determination of runoff production coefficient and curve number in different land uses

کاربری	مسکونی کم تراکم	مسکونی پرتراکم	صنعتی	سایر (فضای سبز و پارک)
ضریب تولید رواناب ( $C_i$ )	0.5	0.6	0.7	0.2
عدد منحنی ( $CN_i$ )	87	92	81	70

$\forall_f$ : میزان حجم رواناب تولیدی در گره سیلابی شده  $f$  (لیتر)

$S_f$ : شیب زیرحوضه مرتبط با گره سیلابی شده  $f$

$B_f$ : عرض زیرحوضه‌ایی که در آن که مرتبط با گره  $f$  است.

$cn_j$ : عدد منحنی مرتبط با کاربری  $j$  ام

$CN_i$ : عدد منحنی معادل در زیرحوضه  $i$  ام

$C_j$ : ضریب رواناب مرتبط با کاربری  $j$  ام

$C_i$ : ضریب رواناب معادل در زیرحوضه  $i$  ام

F(SWMM): مدل شبیه سازی SWMM

$Con_p^{ave}$ : مقدار متوسط غلظت پارامتر  $p$  ام در کل حوضه مورد

بررسی (میلی گرم در لیتر)

$Con_p^{st}$ : مقدار استاندارد پارامتر  $p$  ام (میلی گرم در لیتر)

$np$ : تعداد ماده آلاینده مورد شبیه سازی

$Ct_i^p$ : میزان غلظت ماده آلاینده  $p$  ام در زیرحوضه  $i$  ام

(میلی گرم در لیتر)

$R_i$ : میزان رواناب تولیدی در زیرحوضه  $i$  ام

تابع هدف اول شامل هزینه اجرای BMP از نوع Rain

Barrel و Porous Pavement (ترم اول) و Bio-Retention

(ترم دوم) و هزینه ایجاد کاربری‌های مختلف در هر زیرحوضه

(ترم سوم) با در نظر گرفتن ۱۰ درصد هزینه اجرای BMP و

هزینه ناشی از سیلابی شدن (ترم چهارم) است. رابطه‌های

هزینه‌ای این سه نوع BMP به صورت زیر است:

$$Cost_{Rain\ Barrel} = 2936 V - 432 \quad (17)$$

$$Cost_{Porous\ Pavement} = 65000 A \quad (18)$$

$$Cost_{Bio-Retention} = 18.5 V^{0.7} \quad (19)$$

با توجه به اینکه مجموع ارزش کاربری‌های واقع در هر

زیرحوضه برابر با ۱۴۵۰۰ دلار است، مقدار هزینه ناشی از سیلابی

شدن برای کل زیرحوضه‌های سیلابی شده محاسبه می‌شود.

رابطه ۱۰ به تعیین حجم سیلاب در گره‌های سیلابی شده بر

اساس مدل شبیه‌سازی SWMM می‌پردازد. مطابق این رابطه،

اطلاعات ورودی مورد نیاز جهت شبیه‌سازی عبارتند از: مجموع

سطح هر یک از BMP و سطح هر کاربری در هر زیرحوضه به

طور تفکیک شده و عدد منحنی معادل و ضریب رواناب معادل.

ب) کاهش میزان تختی پارامترهای کیفی TSS و BOD از میزان استاندارد

$$F_2 = \min \left( \sum_{p=1}^{np} \max \left( \frac{Con_p^{ave}}{Con_p^{st}} - 1, 0 \right) \right) \quad (11)$$

$$Con_p^{ave} = \frac{\sum_{i=1}^{32} \left( Ct_i^p \times \sum_{j=1}^4 A_{ij} \right)}{\sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^4 A_{ij}} \quad (12)$$

ج) حداقل نمودن میزان رواناب تولیدی

$$F_3 = \min \left( \sum_{i=1}^{32} R_i \right) \quad (13)$$

ضریب تولید رواناب مرتبط با هر کاربری در هر زیرحوضه و

عدد منحنی متناسب با آن مطابق جدول ۴ است.

محدودیت‌ها:

$$0 \leq ALID_{ij1} \leq 0.6 \times A_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, 32, \quad j = 1, 2, 3 \quad (14)$$

$$0 \leq ALID_{ij2} \leq 0.4 \times A_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, 32, \quad j = 1, 2, 3 \quad (15)$$

$$0 \leq ALID_{ij3} \leq A_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, 32, \quad j = 4 \quad (16)$$

در این روابط متغیرها به صورت زیر تعریف می‌شود (شکل ۴):

$i$ : معرف زیر حوضه

$j$ : معرف نوع کاربری

$k$ : معرف نوع BMP

$CL_j$ : هزینه ایجاد کاربری  $j$  ام (بر اساس جدول ۳ به دست

می‌آید)

$costI_{ij}$ : هزینه مرتبط با اجرای BMP در کاربری  $j$  ام واقع در

زیرحوضه  $i$  ام

$A_{ij}$ : سطح کاربری  $j$  ام در زیر حوضه  $i$  ام (متر مربع)

$costD$ : خسارت ناشی از سیلاب در حوضه مورد بررسی

$ALID_{ijk}$ : سطح تحت پوشش BMP،  $k$  ام مرتبط با کاربری  $j$

ام در زیرحوضه  $i$  ام (متر مربع)

$nflood$ : تعداد کل گره‌های سیلابی شده

$f$ : گره‌های از زیرحوضه‌ها که سیلابی شده‌اند.

$h_f$ : تراز سطح آب در گره سیلابی شده  $f$

$\beta_f$ : ضریب تبدیل حجم به ارتفاع در گره سیلابی شده  $f$

و پراکندگی جواب‌ها انتخاب می‌کند. بنابراین، اصل نخبه‌گرایی کاملاً رعایت می‌شود (Deb et al., 2000).

## ۷-۲- استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای

### حل مسأله

الگوریتم PSO برای اولین بار در ۱۹۷۵ توسط کندی<sup>۳</sup> و ابرهارد<sup>۴</sup> توصیف شد. اساس کار PSO بر این اصل استوار است که در هر لحظه هر ذره<sup>۴</sup> مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته است و بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد، تنظیم می‌کند.

اگر فضای جستجو یک فضای D بعدی باشد، بنابراین ذره i از جمعیت می‌تواند با یک بردار D بعدی نمایش داده شود،  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$ . سرعت (تغییر مکان) این ذره نیز می‌تواند با یک بردار D بعدی دیگر نمایش داده شود،  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^T$ . بهترین مکان جستجو شده تا بحال توسط ذره i بصورت  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})^T$  نشان داده می‌شود. با تعریف g بعنوان اندیس بهترین ذره در جمعیت (بدین معنی که ذره g بهترین نقطه در بین کل اعضاء باشد) و در نظرگیری اندیس‌های بالانویس بعنوان شماره تکرار، جمعیت ذرات مطابق با دو معادله زیر به حرکت واداشته می‌شوند (Kennedy and Eberhart, 1995).

$$v_{id}^{n+1} = v_{id}^n + cr_1^n (p_{id}^n - x_{id}^n) + cr_2^n (p_{gd}^n - x_{id}^n) \quad (21)$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \quad (22)$$

که  $d = 1, 2, \dots, D$  و  $i = 1, 2, \dots, N$  برابر با اندازه جمعیت، c یک ضریب ثابت مثبت بنام ثابت شتاب،  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت بین [0,1] و  $n = 1, 2, \dots$ . نشان دهنده شماره تکرار است.

## ۳- نتایج و بحث

### ۱-۳- مقایسه نتایج حاصل از کاربرد الگوریتم ازدحام ذرات

#### (MOPSO) و الگوریتم ژنتیک (NSGAI)

با اجرای مدل پیشنهادی توسط دو ابزار و برای ۱۰۰ نسل در طی ۱۰۰ تکرار مقادیر بهینه حاصل شد. تعداد نسل‌های انتخابی به صورت تجربی و بر اساس سعی و خطا است. همچنین از آنجا که دستیابی به جواب بهینه کلی در هیچ یک از ابزارهای مبتنی بر جستجوی تصادفی با احتمال ۱۰۰ درصد امکان ندارد، لذا در این تحقیق سعی شده تعداد تکرار به گونه‌ای انتخاب شود که جواب

در رابطه ۱۱، دومین تابع هدف که کاهش میزان تخطی از پارامترهای کیفی TSS و BOD از میزان استاندارد است، ارائه شده است. تابع هدف سوم نیز که با هدف حداقل نمودن میزان رواناب شبیه‌سازی شده در زیرحوضه‌ها پایه‌گذاری شد، مطابق رابطه ۱۳ است. جهت محاسبه این مقدار تابع هدف نیز لازم است که مدل شبیه‌سازی SWMM اجرا شده و مقدار رواناب تولیدی در هر زیرحوضه استخراج گردد. مجموع رواناب تولیدی در کل حوضه به‌عنوان سومین هدف این تحقیق مورد توجه قرار می‌گیرد.

## ۶-۲- بهینه‌سازی چندهدفه و استفاده از الگوریتم‌های

### بهینه‌سازی تکاملی برای مهار رواناب‌های شهری

در مسائل چند هدفه به جای یک تابع هدف، چندین تابع هدف باید بصورت همزمان بهینه شوند. در چنین شرایطی معمولاً مسئله دارای بیش از یک جواب بهینه خواهد بود که به آن‌ها جواب‌های بهینه پارتو گفته می‌شود.

مفهوم بهینه پارتو به این صورت قابل تشریح است که  $\bar{X}_* = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  یک بهینه پارتو است اگر برای هر  $\{1, 2, \dots, k\}$  داشته باشیم (برای یک مسئله کمینه‌سازی):

$$\forall i \in I : f(\bar{X}_*) \leq f(\bar{X}_i) \quad (20)$$

که در آن n تعداد متغیرهای فضای تصمیم و k تعداد توابع هدف است. به عبارت دیگر  $\bar{X}_*$  یک بهینه پارتو است اگر هیچ بردار  $\bar{X}$  دیگری وجود نداشته باشد که به ازای بهبود بخشیدن برخی از توابع هدف حداقل یک تابع هدف را بدتر نکند. جواب‌های بهینه پارتو تحت عنوان جواب‌های غیر پست نیز شناخته می‌شوند.

به طور کلی، الگوریتم‌های کلاسیک تکاملی چند هدفه که از طبقه‌بندی غیرپست و پارامتر تسهیم<sup>۱</sup> استفاده می‌نمایند، به دلایل زیر مورد انتقاد قرار می‌گیرند:

- در روش رسیدن به جواب، از روش نخبه‌گرایی استفاده نمی‌شود.
- نیاز به تعیین یک پارامتر تسهیم وجود دارد.

در این پژوهش از الگوریتم چند هدفه NSGA-II که برای اساس طبقه‌بندی غیر پست عمل می‌کند، استفاده می‌شود که در آن عیوب ذکر شده مرتفع شده است. مخصوصاً اینکه این الگوریتم از یک روش طبقه‌بندی با پیچیدگی محاسباتی از درجه  $mN_g^2$  استفاده می‌کند. ثانیاً این الگوریتم دارای یک عملکرد انتخاب است که یک ظرف آمیزش را از ترکیب جمعیت‌های والد و فرزند به وجود می‌آورد و بهترین جواب‌ها را با توجه به برازش و گسترش

<sup>3</sup> Eberhart

<sup>4</sup> Particle

<sup>1</sup> Sharing Parameter

<sup>2</sup> Kennedy

(NSGAI) از سرعت اجرای بالاتری برخوردار است و پارامترهای کمتر و روند ساده‌تری را شامل می‌شود اما نسبت به الگوریتم ژنتیک (NSGAI) در نسل‌های بالاتری به همگرایی می‌رسد ضمن آنکه پراکندگی داده آن نسبت به الگوریتم ژنتیک (NSGAI) کمتر است.

۲-۳- ارائه نتایج با استفاده از مدل NSGA-II به عنوان مدل برتر با استفاده از الگوریتم NSGA-II، مدل پیشنهادی اجرا شده و بر اساس شاخص همگرایی مشخص شد که مدل پس از ۱۰۰ همگرا شده است. لازم به ذکر است که عدم تغییر در مقدار شاخص گفته شده، یکی دیگر از معیارهای همگرایی الگوریتم NSGA-II محسوب می‌شود.

نکته‌ای قابل توجه در کلاسه‌بندی صورت گرفته این است که با توجه به تعدد سناریوهای مدیریتی که پس از اجرای مدل بهینه‌سازی تولید می‌شود لازم است سناریوهای منتخبی جهت ارائه به مدیران تصمیم‌گیر تولید شود تا تصمیم‌گیرندگان بتوانند بر پایه آن‌ها و با توجه به مسائل اقتصادی مرتبط با هر سیاست، مناسب‌ترین رویکرد را جهت مهار سیلاب اتخاذ نمایند. لذا با استفاده از نتایج حاصل از اجرای مدل پیشنهادی با ابزار NSGAI، کلاس‌بندی بر روی نسل برتر صورت گرفت. بر این اساس با توجه به مقدار توابع هدف مرتبط با ۱۰۰ نقطه واقع بر روی منحنی تبادل (۱۰۰ کروموزم)، تعداد ۳ کلاس انتخاب شد (جدول ۶).

بر اساس Error! Reference source not found. می‌توان دریافت که برای بیش از ۶۰ درصد کاربری‌های مسکونی کم تراکم، مسکونی پرتراکم و صنعتی، اجرای BMP نوع اول و دوم پیشنهاد نشده است. این امر در مورد کاربری مرتبط با فضای سبز، پارک‌ها و ... برعکس بوده بگونه‌ای که تقریباً در بیش از ۶۰ درصد این نوع از کاربری‌ها، اجرای BMP از نوع مخزن ماند زیستی مورد توجه قرار گرفته است.

نزدیک به بهینه کلی<sup>۱</sup> حاصل شود. برای این منظور مدل پیشنهادی برای تکرارهای مختلف مورد اجرا قرار گرفت و نتایج نشان‌دهنده مناسب بودن تعداد ۱۰۰ تکرار جهت تعیین مقادیر بهینه است. چرا که مطابق نتایج حاصله، تعداد تکرارهای بیش از ۱۰۰ تغییرات قابل توجهی را در مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم ایجاد نمی‌نماید. بنابراین بر اساس تعداد تکرار ۱۰۰، نسل برتر انتخاب و نتایج بر پایه آن مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه منحنی تبادل بهینه بین سه هدف در نظر گرفته شده به صورت سه‌بعدی است، لذا ترسیم آن نمی‌تواند دید مناسبی از وضعیت تغییرات توابع هدف مورد بررسی ارائه نماید. برای این منظور با استفاده از روش کلاسه‌بندی k-means اقدام به طبقه‌بندی نسل بهینه شد.

لازم به ذکر است جهت تعیین معیار همگرایی منحنی‌های تبادل بدست آمده با استفاده از این الگوریتم، از شاخص ارائه شده توسط (Chen et al., 2007) استفاده شده است. در این شاخص دو پارامتر میزان پراکنش مجموعه جواب‌های تولیدی و حداکثر تعداد جواب‌های غیرپیست واقع بر روی منحنی تبادل مورد توجه قرار گرفته است. بر اساس مقادیر فاصله تجمع برای هر جواب، می‌توان معیار همگرایی را به صورت رابطه (۲۳) ارائه نمود.

$$DM = \frac{d_b + d_e + \sum_{i=1}^{n-1} |d_i - \bar{d}|}{d_b + d_e + (n-1)\bar{d}} \quad (23)$$

در این رابطه متغیرها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$d_b, d_e$ : مقادیر حدی بر روی منحنی تبادل همگرا شده

$d_i$ : مقدار فاصله تجمع برای هر جواب واقع بر منحنی تبادل

$\bar{d}$ : میانگین مقادیر فاصله تجمع جواب‌ها

$n$ : تعداد نقاط واقع بر روی منحنی تبادل همگرا شده

شرط همگرایی الگوریتم زمانی حاصل می‌شود که مقدار معیار DM به صفر نزدیک باشد.

همان‌طور که از جدول ۵ مشخص است علی‌رغم اینکه الگوریتم ازدحام ذرات (MOPSO) نسبت به الگوریتم ژنتیک

جدول ۵- مقایسه نتایج بهینه‌سازی پس از ۱۰۰ نسل

Table 5- Comparison of optimization results after 100 generations

الگوریتم	متوسط			انحراف معیار		
	تابع هدف اول (دلار)	تابع هدف دوم (بی‌بعد)	تابع هدف سوم (متر مکعب)	تابع هدف اول (دلار)	تابع هدف دوم (بی‌بعد)	تابع هدف سوم (متر مکعب)
NSGA-II	36.1	0.2	65.4	4.8	0.2	3.4
MOPSO	51.6	0.5	51.6	2.8	0	3.4

<sup>1</sup> Near to Global Solution

جدول ۶- بازه تغییرات توابع هدف مورد بررسی در هر کلاس

Table 6- The range of changes of objective functions studied in each class

شماره کلاس	تابع هدف اول (دلار * ۱۰۹)		تابع هدف سوم (متر مکعب)		تابع هدف دوم (بی‌بعد)	
	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
1	38.3	44.4	61.5	66.9	0.1	0.2
2	28.6	31.9	66.2	7.2	0.2	0.3
3	31.6	38.1	59.4	67.2	0.1	0.3

جدول ۷- درصد سطح تحت پوشش هر کاربری و BMP مرتبط با هر کلاس (سناریوهای منتخب فضاهای شهری)

Table 7- Percentage of surface covered by each user and BMP related to each class (selected scenarios of urban spaces)

شماره کلاس	بدون BMPs	مخزن ماند زیستی	مخزن جمع‌آوری آب باران	کف نفوذپذیر	سایر	صنعتی	مسکونی پرتراکم	مسکونی کم‌تراکم	شماره کلاس
1	0.4	0.7	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	1
2	0.2	0.5	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.3	2
3	0.1	0.6	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.2	3

توابع هدف در منحنی تبادل بهینه توسط الگوریتم NSGA-II از پراکندگی نسبتاً بیشتری نسبت به الگوریتم MOPSO برخوردار می‌باشند که این امر نشان از گستردگی سناریوهای تولیدی توسط الگوریتم NSGA-II دارد. در واقع با استفاده از این الگوریتم می‌توان سناریوهای بیشتر با تنوع قابل توجه در مقادیر توابع هدف در اختیار مدیر تصمیم‌گیر قرار داد. در خصوص پیشنهاد سناریوهای مختلف برای طراحی شهری با استفاده از الگوریتم NSGA-II باید گفت که با توجه به اینکه در این تحقیق، حداقل نمودن توابع هدف در ساختار پیشنهادی به‌عنوان هدف اصلی استفاده از این ابزار مطرح بوده است لذا روند کاهش اهداف مورد بررسی، که برآمده از اجرای مکرر است در الگوریتم NSGA-II بیشتر از MOPSO است.

بررسی جدول های ۱ تا ۷ نشان می‌دهد با مقایسه سناریوهای مختلف و نتایج حاصل، استفاده از الگوریتم چند هدفه می‌تواند برای مدیران در انتخاب بهترین رویکرد و تصمیم‌گیری مناسب مفید واقع شود و هزینه‌های کمتری را در پی داشته باشد. جهت ارزیابی چگونگی تأثیر بهترین اقدامات مدیریت سیل بر روی دبی اوج در منطقه مورد تحقیق ابتدا نسبت به انتخاب BMP ها متناسب با شرایط آب و هوایی و وضعیت کاربری اراضی اقدام شد. به این ترتیب روسازی متخلخل انتخاب شدند. روسازی متخلخل به‌عنوان یک راهکار مدیریتی جهت مهار دبی اوج مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور زیرحوضه-هایی که تأثیر قابل ملاحظه‌ای در تولید رواناب دارند انتخاب شدند. برای تشخیص این زیرحوضه‌ها مدل بارش- رواناب در حالات مختلف اجرا شد. در هر اجرا، یکی از زیرحوضه‌ها حذف و دبی اوج سیل در نقطه خروجی حوضه پس از حذف آن زیرحوضه اندازه‌گیری شد. نتیجه حاصل با حالتی که کلیه زیرحوضه‌ها حضور دارند مقایسه شد و به این ترتیب درصد مشارکت هر زیرحوضه در تولید رواناب در نقطه خروجی حوضه

همان‌طور که در قسمت‌های قبلی نیز بیان شد از جمله عواملی که می‌تواند در کیفیت و کمیت رواناب‌های شهری تأثیر قابل توجهی بگذارد، رشد و توسعه شهری و آگاهی از اثرات محیط‌زیستی رواناب بر جامعه است. از طرفی افزایش جمعیت و در نتیجه افزایش تقاضا برای بهره‌برداری از منابع آبی باعث شده است تا رواناب سطحی به‌عنوان یکی از مهمترین منابع تأمین آب محسوب شود. از سوی دیگر رشد روزافزون جمعیت و افزایش روند شهرنشینی منجر به تغییر کاربری اراضی طبیعی به شکل مناطق مسکونی، تجاری و یا صنعتی شده‌اند. این امر باعث کاهش نفوذپذیری و در نتیجه افزایش حجم و دبی اوج رواناب ناشی از بارش و نیز افزایش غلظت آلاینده‌ها و در نتیجه کاهش کیفیت رواناب می‌شود. این در حالیست که با مهار صحیح رواناب و به کارگیری روش‌های مدیریت سیل می‌توان از این منبع آبی به بهترین شکل بهره گرفت. لذا در این تحقیق به‌منظور در نظر گرفتن اثر توأمان کمیت و کیفیت رواناب از دو الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه رایج و پرکاربرد استفاده شد و ضمن مقایسه کارایی آن‌ها و انتخاب الگوریتم برتر، به انتخاب سناریوهای برتر توسط آن الگوریتم انتخابی پرداخته شد.

در خصوص مقایسه بین الگوریتم NSGA-II و MOPSO، براساس توابع آزمایش نشان‌دهنده آن است که مدل MOPSO در بیشتر موارد همگرایی بهتری را نسبت به مدل NSGA-II تولید می‌کند. همچنین در مواردی که جواب‌های مدل NSGA-II از کیفیت بالاتری برخوردار است، زمان اجرای مدل یا توزیع جواب‌ها در مدل MOPSO بهتر است. این در حالی است که در یک مسئله واقعی و برحسب نوع توابع هدف و کاربرد آن نتایج ممکن است عکس نتایج حاصل از کاربرد این الگوریتم‌ها با توابع آزمایش قرار دادی باشد.

از طرفی ضمن آنکه مقادیر توابع هدف الگوریتم MOPSO در نسل‌های بالاتری به همگرایی می‌رسد، مقادیر بهینه مرتبط با

رواناب دارند، گام مهمی در برنامه‌ریزی مدیریت سیلاب است. زیرحوضه‌هایی با کاربری‌های خاص مانند پارکینگ، ورزشی و مناطق کم‌تراکم ممکن است رواناب بیشتری تولید کنند که نشان‌دهنده تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر الگوی رواناب است. اهمیت استفاده از BMPs مانند روسازی متخلخل تنها به کنترل دبی اوج محدود نمی‌شود، بلکه می‌تواند به بهبود کیفیت آب و کاهش آلودگی ناشی از رواناب نیز منجر شود. این اقدامات بخشی از رویکردهای مدیریت پایدار منابع آب هستند که در برابر چالش‌های زیست‌محیطی و تغییرات اقلیمی ضروری به نظر می‌رسند. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به مدیران شهری و برنامه‌ریزان کمک کند تا راهکارهای مؤثری برای مدیریت سیلاب‌ها و حفظ منابع آب طراحی کنند. همچنین، این یافته‌ها می‌تواند به سیاست‌گذاران در تدوین قوانین و مقررات مربوط به مدیریت منابع آب و توسعه پایدار یاری رسانند. با توجه به چالش‌های موجود در زمینه مدیریت آب و تغییرات اقلیمی، توجه به روش‌های نوین مانند روسازی متخلخل و ارزیابی دقیق تأثیرات آن‌ها بر روی دبی اوج رواناب، می‌تواند راهگشای حل مشکلات موجود باشد.

مشخص شد. از میان زیرحوضه‌هایی که بیشترین تأثیر را در تولید رواناب دارند، زیرحوضه‌های که حداقل دارای کاربری پارکینگ، ورزشی، مناطق کم‌تراکم شامل مسکونی کم‌تراکم، فرهنگی-مذهبی و آموزشی-تحقیقاتی هستند برای ارزیابی اثر روسازی متخلخل مورد بررسی قرار گرفتند. این مناطق شامل زیرحوضه‌های ۱، ۶، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۲۲، ۲۳ و ۲۷ است.

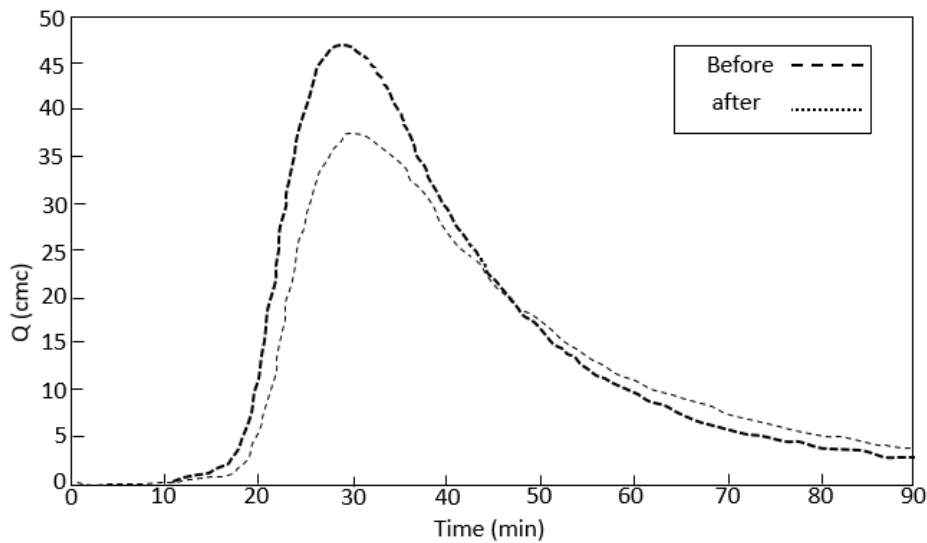
انتخاب بهترین اقدامات مدیریت سیلاب BMPs متناسب با شرایط خاص هر منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است. این انتخاب باید بر اساس ویژگی‌های اقلیمی، نوع خاک، نوع کاربری اراضی و سایر عوامل محیطی انجام شود. یکی از گزینه‌های مؤثر در این زمینه، استفاده از روسازی متخلخل است که به دلیل قابلیت جذب آب و کاهش رواناب سطحی، می‌تواند در مناطق با بارش‌های شدید بسیار کارآمد باشد.

استفاده از مدل بارش-رواناب برای شناسایی زیرحوضه‌های مؤثر در تولید رواناب، یک روش علمی و منطقی است. با حذف تدریجی زیرحوضه‌ها و اندازه‌گیری دبی اوج در نقطه خروجی حوضه، محققان می‌توانند تأثیر هر زیرحوضه را بر روی تولید رواناب مشخص کنند. این فرآیند به شناسایی نقاط بحرانی کمک کرده و می‌تواند به بهینه‌سازی مدیریت منابع آب منجر شود. همچنین، شناسایی زیرحوضه‌هایی که بیشترین تأثیر را در تولید

جدول ۸- میزان مشارکت تعدادی از زیرحوضه‌ها در تولید رواناب

Table 8- The level of participation of several sub-basins in runoff production

درصد مشارکت در تولید رواناب	دبی اوج در نقطه خروجی حوضه (مترمکعب بر ثانیه)		شماره زیرحوضه
	قبل از حذف زیرحوضه	پس از حذف زیرحوضه	
5.3	1.4	5.4	1
62	1.4	8.4	2
5.2	1.4	9.4	3
8.2	1.4	45.8	4
5.3	1.4	5.4	5
5.3	1.4	5.4	6
3.2	1.4	46	7
6.2	1.4	9.4	8
8.3	1.4	3.4	9
5	1.4	7.4	10



شکل ۳- هیدروگراف سیل در نقطه خروجی حوضه قبل و پس از به کارگیری روسازی متخلخل  
Figure 3- Flood hydrograph at the exit point of the basin before and after using porous pavement

ارزشمندی درباره رفتار سیستم هیدرولوژیک زیرحوضه نیز ارائه می‌دهد. در واقع، این تحلیل می‌تواند به برنامه‌ریزی بهتر و اتخاذ تصمیمات مؤثرتر در زمینه مدیریت آب و طراحی زیرساخت‌های پایدار کمک کند. با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی و تغییرات اقلیمی که جوامع امروزی با آن مواجه هستند، استفاده از چنین روش‌هایی برای بهینه‌سازی مدیریت منابع آب و کاهش خطرات ناشی از سیلاب‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی در خصوص مقایسه قابلیت‌های مدل‌های بهینه‌سازی NSGA-II و MOPSO در این مسئله شبیه‌سازی-بهینه‌سازی باید گفت مقادیر بهینه مرتبط با توابع هدف در منحنی تبادل بهینه توسط الگوریتم NSGA-II از پراکندگی بیشتری نسبت به الگوریتم MOPSO برخوردار هستند که این امر نشان از گستردگی سناریوهای تولیدی توسط الگوریتم NSGA-II دارد. در واقع با استفاده از این الگوریتم می‌توان سناریوهای بیشتر با تنوع قابل توجه در مقادیر توابع هدف در اختیار مدیر تصمیم‌گیر قرار داد. این امر در نتایج حاصله از الگوریتم MOPSO ملاحظه نمی‌شود.

همچنین با مقایسه گزینه‌های مختلف ناشی از کاربرد الگوریتم NSGA-II این نتیجه حاصل می‌شود که جهت مهار آلودگی سیلاب لازم است سطوح مرتبط با کاربری مسکونی پرتراکم و صنعت کاهش یابد. بدین معنی که بیشترین تأثیر در ایجاد آلودگی را این نوع از کاربری‌های اراضی دارد هستند. علاوه بر این با توجه به پایین بودن ضریب تولید رواناب مرتبط

به‌منظور تعیین سطح مؤثر تحت پوشش روسازی متخلخل در هر زیرحوضه، از روش تحلیل حساسیت استفاده شد. در این فرآیند، ابتدا سطح پوشش Best Management Practices (BMPs) در زیرحوضه مورد نظر برابر با صفر فرض شد. سپس به تدریج و در مراحل مختلف، سطح BMPs از صفر درصد به دو درصد سطح زیرحوضه افزایش پیدا کرد. با این تغییرات، نمودار تغییرات دبی اوج در خروجی حوضه نسبت به تغییرات سطح پوشش BMPs در زیرحوضه ترسیم شد.

با بررسی این نمودار، مشخص می‌شود که اگرچه افزایش مساحت تحت پوشش BMPs تأثیر قابل توجهی بر راندمان این روش‌ها در کاهش دبی اوج دارد، اما تأثیر این عامل به یک مقدار خاص محدود می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش مساحت تحت پوشش BMPs تا آن مقدار مؤثر، تأثیر قابل توجهی در کاهش دبی اوج رخ می‌دهد، ولی پس از رسیدن به این حد، افزایش بیشتر مساحت تأثیر چندانی بر روی کاهش دبی اوج نخواهد داشت.

این یافته‌ها نشان می‌دهند که دبی اوج رواناب در نقطه خروجی از ۴۷/۱ مترمکعب بر ثانیه به ۳۷/۹ مترمکعب بر ثانیه کاهش می‌یابد. بدین ترتیب، با استفاده از این راهکار می‌توان به میزان ۱۹/۵ درصد از دبی اوج رواناب کاست. این نتایج اهمیت استفاده از BMPs را در مدیریت منابع آب و کنترل سیلاب‌ها به خوبی نشان می‌دهند. همچنین بیان‌کننده آن هستند که با انتخاب مناسب سطح پوشش BMPs می‌توان به نتایج مطلوب‌تری در کاهش اثرات منفی رواناب دست یافت. به علاوه، شایان ذکر است که تحلیل حساسیت نه تنها به شناسایی سطح مؤثر BMPs کمک می‌کند، بلکه اطلاعات

## منابع

- حسین‌زاده کوهی، حسین، اردستانی، مجتبی و سارنگ، امین (۱۴۰۳). بهینه‌سازی طراحی کانال‌های جمع‌آوری رواناب شهری برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش اطمینان‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۸۵-۱۰۱. doi:10.22098/mmws.2023.12222.1213
- میرزانی، احسان، ملک احمدی، حسین، شاه‌محمدی، یادگار و ابراهیم‌زاده، علی (۱۴۰۰). تأثیر موجک بر افزایش دقت مدل‌های تخمینی در مدل‌سازی بارش-رواناب (مطالعه موردی: حوضه صوفی‌چای). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۱)، ۷۹-۶۷. doi:10.22098/MMWS.2021.9335.1035
- مومنه، صادق (۱۴۰۱). مقایسه عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی با مدل IHACRES در مدل‌سازی جریان حوضه آبریز رودخانه گاماسیاب. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۱۶-۱۱. doi:10.22098/MMWS.2022.9972.1076.۱

## References

- Abi Aad, M. P., Suidan, M. T., & Shuster, W. D. (2010). Modeling techniques of best management practices: Rain barrels and rain gardens using EPA SWMM-5. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6), 434-443. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000136.
- Babaei, S., Ghazavi, R., & Erfanian, M. (2018). Urban flood simulation and prioritization of critical urban sub-catchments using SWMM model and PROMETHEE II approach. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 105, 3-11. doi: 10.1016/j.pce.2018.02.002
- Baptista, M., Nascimento, N., Castro, L. M. A., & Fernandes, W. (2007, January). Multicriteria evaluation for urban storm drainage. In *Proceedings of the first switch Scientific Meeting University of Birmingham, Birmingham, UK* (pp. 1-8).
- Chen, L., McPhee, J., & Yeh, W. W. G. (2007). A diversified multiobjective GA for optimizing reservoir rule curves. *Advances in Water Resources*, 30(5), 1082-1093. doi:10.1016/j.advwatres.2006.10.001.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T. (2000). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. In *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI: 6<sup>th</sup> International Conference Paris, France, September 18-20, 2000 Proceedings 6* (pp. 849-858). Springer Berlin Heidelberg.

با کاربری چهارم (سایر)، که برابر با ۰/۲ در نظر گرفته شده است، جهت کاهش میزان رواناب لازم است این سطح مقدار بیشتری را در کل حوضه به خود اختصاص دهد.

## تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

## دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

## مشارکت نویسندگان

صادق اروعی زارع: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخه مقاله؛ فروغ علی‌زاده صنمی: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری، نگارش و اصلاحیه مقاله.

- Egodawatta, P., Thomas, E., & Goonetilleke, A. (2009). Understanding the physical processes of pollutant build-up and wash-off on roof surfaces. *Science of the Total Environment*, 407(6), 1834-1841.
- Heaney, J.P., Lee, J.G., Rapp, D.N. & C.A. Pack. (2006). *Life cycle Optimisation for Highway BMPs*. *Water Science and Technology*, 54(6-7), 477-484.
- Hosseinzadeh Kohi, H., Ardestani, M., Sarang, A. (2024). Optimizing the design of urban runoff collection channels to reduce vulnerability and increase reliability against climate change. *Water and Soil Management and Modeling*, (4)1, 101-85. doi:10.22098/mmws.2023.12222.1213
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995, November). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks* (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE.
- Mejía, A. I., & Moglen, G. E. (2009). Spatial patterns of urban development from optimization of flood peaks and imperviousness-based measures. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(4), 416-424. doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2009)14:4(416).
- Mirzania, A., Malek Ahmadi, H., Shah Mohammadi, Y., & Ebrahimzadeh, A. (2021). The effect of wavelet on increasing the accuracy of estimated models in rainfall-runoff modeling (Case study: Sufichai basin). *Water and Soil Management and Modeling*,

- (3)1, 67-79.  
doi:10.22098/MMWS.2021.9335.1035
- Momene, S. (2022). Comparison of the performance of artificial intelligence models with the IHACRES model in modeling the flow of the Gamasiab River catchment. *Water and Soil Management and Modeling*, (3)2, 1-16. doi:10.22098/MMWS.2022.9972.1076
- Obropta, C. C., & Kardos, J. S. (2007). Review of urban stormwater quality models: deterministic, stochastic, and hybrid approaches 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 43(6), 1508-1523.
- Perez-Pedini, C., Limbrunner, J. F., & Vogel, R. M. (2005). Optimal location of infiltration-based best management practices for storm water management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(6), 441-448. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:6(441)
- Rathnam, E. V., Cheeralaiyah, N., & Jayakumar, K. V. (2004, July). Dynamic programming model for optimization of storm-water retention pond in multiple catchment system. In *Proceedings of the International Conference on Hydrology: Science & Practice for the 21<sup>st</sup> Century*, Imperial College, London, England (pp. 12-16).
- Rozebahani, A., Behzadi, P. & Massah Bavani, A. 2020. Analysis of performance criteria and sustainability index in urban stormwater systems under the impacts of climate change. *Journal of Cleaner Production*, 271,122727.
- Wang, Y., Sun, M., & Song, B. (2017). Public perceptions of and willingness to pay for sponge city initiatives in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 11-20. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.02.002
- Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2007). *The SUDS Manual* (Vol. 697). London: Ciria.