



# Dynamic Performance Indicators in Multi-Criteria Decision-Making for LID Strategy Selection for Rehabilitation of Urban Stormwater Drainage Networks

Gita Mirzaei<sup>1</sup> | Ali Moussavi<sup>2</sup> | Afshin Ashrafzadeh<sup>3</sup>

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: [gita6313@chmail.ir](mailto:gita6313@chmail.ir)

2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: [moussavi@guilan.ac.ir](mailto:moussavi@guilan.ac.ir)

3. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [a.ashrafzadeh@ut.ac.ir](mailto:a.ashrafzadeh@ut.ac.ir)

---

## Article Info

---

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Sep. 28, 2025

**Revised:** Nov. 6, 2025

**Accepted:** Apr. 27, 2026

**Published online:** May. 2026

**Keywords:**

AHP Method,  
Hydrological-Hydraulic  
Simulation,  
Linear Assignment method,  
TOPSIS Method,  
Urban Flood Management

Despite extensive investments in flood control infrastructure, urban flooding remains a critical challenge for cities. Low Impact Development (LID) strategies have emerged as decentralized and environmentally friendly approaches for managing urban runoff. The primary distinction of this research lies in developing an innovative integrated framework that combines hydrological-hydraulic simulation with Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) based on dynamic and holistic performance indicators (reliability, resiliency, and vulnerability). The performance of 12 different LID scenarios in a 62-hectare network in Rasht, Guilan Province, Iran was simulated using SWMM 5.2. Evaluation was conducted using three dynamic performance indicators alongside the economic indicator of life cycle cost, with scenario ranking performed using AHP, Linear Assignment, and TOPSIS methods. Results demonstrated that the combined high-coverage scenario (GPR-H) achieved the most significant improvement in performance indicators, reducing total outflow volume by 42.26% and peak discharge by 1.19 m<sup>3</sup>/s. Comparison of the MCDM methods revealed that the choice of weighting method plays a decisive role in the final prioritization; AHP and Linear Assignment methods selected scenarios with superior hydraulic performance, whereas TOPSIS, due to the negligible weight assigned to the reliability indicator, favored lower-cost options. The present study confirms that the proposed dynamic performance indicators provide powerful tools for LID assessment, and the developed framework can serve as an effective decision-support tool for urban managers.

---

Cite this article: Mirzaei, G., Moussavi, A., Ashrafzadeh, A., (2026) Dynamic Performance Indicators in Multi-Criteria Decision-Making for LID Strategy Selection for Rehabilitation of Urban Stormwater Drainage Networks, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (3), 671-692. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.403160.670014>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.403160.670014>

---



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Despite significant investments in traditional flood control infrastructure (FCI), urban flooding remains a critical challenge, especially during rainfall events that exceed the design storm. Low Impact Development (LID) strategies offer a decentralized, environmentally friendly approach to managing urban runoff and reducing pressure on conventional drainage systems. However, selecting the optimal type, combination, and spatial extent of LIDs is a complex task. This study aims to develop and demonstrate a systematic, integrated framework for selecting the best LID strategies to enhance the resilience of existing urban drainage networks under extreme rainfall conditions.

### Method

The research employs a comprehensive framework that combines detailed hydrological-hydraulic simulation with Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) analysis. The study introduces three dynamic and holistic performance indicators—reliability, resilience, and vulnerability (RRV)—alongside an economic indicator (annualized life cycle cost), moving beyond static performance measures commonly used in previous studies.

The approach was applied to a 62-hectare urban drainage network in Rasht, Iran. Using the Storm Water Management Model (SWMM 5.2), the hydraulic performance of 12 different LID scenarios was simulated. These scenarios involved three LID practices—Green Roofs (GR), Permeable Pavements (PP), and Rain Barrels (RB)—implemented individually and in combination at low (L), medium (M), and high (H) spatial coverage levels.

A novel operational framework was defined for the drainage network, using the design storm intensity as a threshold to identify critical periods during a severe 43-hour evaluation storm. This allowed for a more precise calculation of the RRV indicators at each network node, reflecting the system's dynamic performance under stress.

The 12 scenarios were ranked using three different MCDM methods: the Analytic Hierarchy Process (AHP), Linear Assignment (LA), and the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). The weighting of criteria was handled differently: the Eigenvector method (incorporating decision-maker judgment) was used for AHP and LA, while the Entropy method (objective, data-based) was used for TOPSIS.

### Results

Implementing LIDs, especially combinations with high spatial coverage, significantly improved the drainage network's performance. The scenario combining all three LIDs (GR+PP+RB, denoted as GPR) at high coverage (GPR-H) achieved a 42.26% reduction in total runoff volume at the network outlet compared to the base scenario (no LIDs). The use of RRV indicators proved superior to single-metric assessments (e.g., peak flow reduction). They provided a more holistic and realistic evaluation by accounting for the duration, frequency, and severity of flooding events, leading to more informed decision-making. The choice of MCDM method significantly influenced the results due to the underlying weighting techniques. AHP and LA methods, which assigned higher weights to reliability and vulnerability, consistently prioritized scenarios with combined LIDs and high coverage (e.g., GPR-H, GR+PP at high coverage denoted as GP-H) as optimal, favoring superior hydraulic performance over cost. Due to the Entropy method's objective weighting, the reliability indicator received a very low weight (because of its low variability across scenarios), causing TOPSIS to favor single LID scenarios with lower costs (e.g., GR-H, PP-M), despite their weaker hydraulic performance. A comparative analysis of the top-ranked scenario from each MCDM method showed that the scenario selected by AHP delivered the best hydraulic performance (a 1.19 m<sup>3</sup>/s reduction in peak flow) at a reasonable cost, demonstrating its effectiveness for this application.

### Conclusion

This study successfully developed a robust framework for selecting optimal LID strategies. It highlights the critical importance of using dynamic performance indicators like reliability, resilience, and vulnerability for a realistic assessment of urban drainage systems. The research also underscores that the weighting of criteria in MCDM is a pivotal step that can drastically alter the outcome. The proposed AHP-based approach, which effectively balances performance and cost, is recommended as a powerful decision-support tool for urban planners and managers seeking to enhance the resilience of stormwater drainage networks against climate change and increasing urbanization.

**Funding**

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

**Authorship contribution**

Conceptualization, methodology, and data curation were collaboratively designed and executed by all authors. Software, investigation and resources was conducted by Gita Mirzaei and validated by Ali Moussavi and Afshin Ashrafzadeh. All authors contributed to writing, reviewing, and editing the manuscript, ensuring a cohesive final submission.

**Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process**

During the preparation of this work the authors did not use Generative AI and AI-assisted technologies.

**Data availability statement**

Data available on request from the authors.

**Acknowledgements**

The authors extend their gratitude to University of Guilan for its support.

**Ethical considerations**

The authors confirm that the study was conducted in accordance with ethical principles, and no data fabrication, falsification, plagiarism, or misconduct occurred.

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

## شاخص‌های عملکرد پویا در تحلیل‌های چندمعیاره برای انتخاب راهبردهای LID به منظور توان‌بخشی شبکه‌های زهکشی سیلاب شهری

گیتا میرزائی<sup>۱</sup> | سید علی موسوی<sup>۲</sup> | افشین اشرف‌زاده<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: [gita6313@chmail.ir](mailto:gita6313@chmail.ir)

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: [mousavi@guilan.ac.ir](mailto:mousavi@guilan.ac.ir)

۳. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [a.ashrafzadeh@ut.ac.ir](mailto:a.ashrafzadeh@ut.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	با وجود سرمایه‌گذاری‌های گسترده در زیرساخت‌های کنترل سیلاب، این پدیده همچنان چالشی جدی برای شهرها محسوب می‌شود. راهبردهای توسعه کم‌اثر (LID) به عنوان رویکردی غیرمتمرکز و سازگار با محیط‌زیست برای مدیریت رواناب شهری مطرح هستند. تمایز اصلی این پژوهش، توسعه یک چهارچوب تلفیقی نوآورانه است که شبیه‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی را با تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) مبتنی بر شاخص‌های عملکردی پویا و کل‌نگر (اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری) تلفیق می‌کند. عملکرد ۱۲ سناریوی مختلف LID در شبکه‌ای ۶۲ هکتاری در شهر رشت با مدل SWMM 5.2 شبیه‌سازی شد. ارزیابی با سه شاخص عملکردی پویا و شاخص اقتصادی هزینه دوره بهره‌برداری انجام و رتبه‌بندی با سه روش AHP، تخصیص خطی و TOPSIS صورت گرفت. یافته‌ها نشان داد سناریوی ترکیبی با پوشش زیاد (GPR-H) بیشترین بهبود را در شاخص‌های عملکردی ایجاد کرد و توانست ۴۲/۲۶ درصد از حجم رواناب خروجی را کاهش داده و دبی اوج را ۱/۱۹ مترمکعب بر ثانیه کم کند. مقایسه روش‌های MCDM آشکار کرد که انتخاب روش وزندهی نقش تعیین‌کننده‌ای در اولویت‌بندی نهایی دارد؛ به طوری که AHP و تخصیص خطی سناریوهای با عملکرد برتر هیدرولیکی را انتخاب کردند، در حالی که TOPSIS به دلیل وزن ناچیز شاخص اعتمادپذیری، گزینه‌های کم‌هزینه‌تر را ترجیح داد. پژوهش حاضر نشان داد شاخص‌های عملکردی پیشنهادی ابزار قدرتمندی برای ارزیابی LIDها هستند و رویکرد ارائه‌شده می‌تواند به عنوان ابزار تصمیم‌گیری کارا برای مدیران شهری مورد استفاده قرار گیرد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۶	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۸/۱۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۷	
تاریخ انتشار: خرداد ۱۴۰۵	
واژه‌های کلیدی:	
روش تاپسیس، روش تحلیل سلسله‌مراتبی، روش تخصیص خطی، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی، مدیریت سیلاب شهری	
استناد: میرزائی؛ گیتا، موسوی؛ سیدعلی، اشرف‌زاده؛ افشین، (۱۴۰۵) شاخص‌های عملکرد پویا در تحلیل‌های چندمعیاره برای انتخاب راهبردهای LID به منظور توان‌بخشی شبکه‌های زهکشی سیلاب شهری، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۳)، ۶۹۲-۶۷۱.	
	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.
<a href="https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.403160.670014">https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.403160.670014</a>	
DOI: <a href="https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.403160.670014">https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.403160.670014</a>	

## مقدمه

با وجود سرمایه‌گذاری‌های گسترده در زیرساخت‌های کنترل سیل<sup>۱</sup> (FCI)، پدیده سیلاب همچنان چالش جدی شهرهای سراسر جهان محسوب می‌شود. اگرچه مفاهیم جدید مدیریت خطر سیل بر FCI متمرکز نیست، ولی بسیاری از شهرها همچنان برای جلوگیری از خسارت سیل روی FCI حساب می‌کنند. فرض بر این است که مناطق ساخته شده موجود فقط می‌توانند روی FCI حساب کنند؛ زیرا عقب نشینی در مقیاس بزرگ اغلب غیرممکن است (Liao, 2013)، در حالی که مدیریت سیل به وسیله راهبردهای توسعه کم‌تخریب (LID) به عنوان یک گزینه اغلب نادیده گرفته می‌شود. در فلسفه زیرساخت‌های سبز (GI)، آب باران به عنوان مهم‌ترین منبع جریان‌های سطحی و زیرزمینی شناخته می‌شود که نباید به سرعت تخلیه شود بلکه باید ذخیره، تصفیه و بازیابی شود (Zhang et al., 2007).

LID به منظور کاهش اثرات منفی شهرنشینی بر محیط زیست ایجاد شده است. این رویکرد را می‌توان برای سازگاری با تغییرات اقلیمی، کنترل منابع آلاینده غیرنقطه‌ای و کاهش پدیده جزیره گرمایی مورد استفاده قرار داد (Lee et al., 2012). LIDها راهبردهای کوچک مقیاس هستند که بر کنترل غیرمتمرکز و توزیعی رواناب (Liu et al., 2021) و کاهش رواناب از طریق نفوذ، ذخیره و تبخیر و تعرق، پایه‌ریزی شده‌اند. LID برای کاهش فشار بر ظرفیت زیرساخت‌های زهکشی شهری و ترمیم پیامدهای توسعه در پروژه‌های عمران شهری و ساخت و ساز عمومی به امری اجتناب‌ناپذیر و به عنوان بخش مهمی از مدیریت رواناب در کلان‌شهرها تبدیل شده است (Huang et al., 2018). با توجه به طیف گسترده مزایای LIDها و این واقعیت که آن‌ها می‌توانند به طور موثر در طرح‌ها و پروژه‌های مدیریت یکپارچه سیلاب شهری نقش‌آفرینی کنند، کاربرد این راهبردها برای کشورهای در حال توسعه به شدت توصیه شده است (Movahedinia et al., 2019). LID از طریق ارتقای مدیریت موثر رواناب شهری می‌تواند به دستیابی به هدف توسعه پایدار کمک کند (Liu et al., 2021). با استفاده از LIDها که در آن‌ها، حفظ شرایط هیدرولوژیکی (حین توسعه شهری) یا برگرداندن ویژگی‌های هیدرولوژیکی به شرایط قبل از توسعه، دنبال می‌شود می‌توان رواناب‌های شهری را بهتر مدیریت کرد. LIDها به دو دسته سازه‌ای و غیرسازه‌ای دسته بندی شده‌اند. از مهمترین رویکردهای سازه‌ای می‌توان به زیست حوضچه‌ها<sup>۲</sup>، باغچه‌های بارانی<sup>۳</sup>، بام سبز<sup>۴</sup>، ترانشه‌های نفوذ<sup>۵</sup>، بشکه‌های باران<sup>۶</sup> و سنگفرش نفوذپذیر<sup>۷</sup> اشاره کرد. رویکردهای غیرسازه‌ای شامل حفظ عرصه‌های طبیعی، استفاده از پوشش گیاهی بومی و به حداقل رساندن سطوح غیرقابل نفوذ است (Hunt et al., 2010).

به منظور طراحی و استفاده کارآمدتر از LID، ابزارهای مدل‌سازی برای پشتیبانی در ارزیابی گزینه‌ها مورد نیاز است (Artina et al., 2005). در صورتی که شاخص‌های ارزیابی متعدد و متنوع باشند، ارزیابی پیچیده شده و نیازمند تحلیل‌های کارآمد خواهد بود. مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره از ابزارهای قدرتمند مناسب برای چنین تحلیل‌هایی هستند که در چند دهه اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این تصمیم‌گیری‌ها به جای استفاده از یک معیار سنجش بهینگی از چندین معیار، استفاده می‌شود. سامانه‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری در کنار مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی از موتورهای قدرتمند انجام محاسبات LID هستند، که برای شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل اثربخشی هیدرولوژیکی LID استفاده شده‌اند (Song & Chung, 2017).

اساس FCI بر استفاده از امکانات وسیع و متمرکز در شهرها برای کنترل سیلاب و پیشگیری از غرقاب شدن است (Jia et al., 2013). اما با این وجود به دلیل محدودیت‌های اقتصادی و فنی نمی‌توان برای FCI ظرفیت نامحدود در نظر گرفت و اغلب FCI را به ازای رگبار طراحی با دوره بازگشتی که بر مبنای بودجه در دسترس و با لحاظ کردن سطح حفاظت که متناسب با کاربری اراضی محدوده طرح تعیین شده، ساخته می‌شوند. بنابراین FCI در روبرو شدن با رگبارهای بیش از رگبار طراحی عملکرد رضایت‌بخش خود را از دست داده و دچار سیل‌گیری‌های محدود یا گسترده می‌شوند. برای رسیدگی به این معضل تغییر در شرایط هیدرولوژیکی سطوح شهری از طریق ایجاد LIDها می‌تواند راهگشا باشد. در این پژوهش انتخاب مناسب‌ترین LIDها از بین راهکارهای امکان‌پذیر متعدد برای توان‌بخشی و بهبود عملکرد یک سامانه زهکشی سیلاب شهری در روبرویی با رگبارهای شدیدتر از رگبار طراحی به وسیله رویکردی مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره و بر پایه شاخص‌های عملکردی اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری در کنار شاخص اقتصادی هزینه دوره عملکرد

1. Flood control infrastructure
2. B-Retention cells
3. Rain garden
4. Green roof
5. Infiltration trenches
6. Rain barrel
7. Permeable pavement



مد نظر قرار گرفت. این پژوهش به توسعه چارچوبی یکپارچه پرداخته است که شبیه‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی را با تحلیل چندمعیاره مبتنی بر شاخص‌های عملکردی پویا تلفیق می‌کند و امکان ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از راهبردهای LID تحت شرایط عدم قطعیت را فراهم می‌سازد.

### پیشینه پژوهش

Liu et al. (2021) پیشرفت‌های اخیر در مورد اصول، طراحی، عملکرد، مزایا و معایب و هزینه‌های شیوه‌های مختلف LID را بررسی کردند. اگرچه LID در بسیاری از کشورها در مدیریت رواناب شهری به طور گسترده اعمال شده و موفقیت خود را نشان داده است، هنوز برخی از چالش‌های اصلی در مسیر اجرا (مانند گرفتگی و کیفیت رواناب (Liu et al., 2021) و طراحی و جایابی (Huang et al., 2018)) این راهبردها وجود دارد که می‌تواند در جهت‌گیری کارهای تحقیقاتی آینده مورد توجه قرار گیرد.

انتخاب نوع، محل نصب، اندازه و تعداد و هزینه‌های ساخت، بهره‌برداری و نگهداری همه عوامل مهمی هستند که بر اثربخشی هیدرولوژیکی در مقایسه با کارایی اقتصادی LIDها مؤثرند. حتی طراحی و جانمایی بهینه یا نزدیک بهینه در یک نوع LID به تعداد زیادی پارامتر وابسته است. احمد و همکاران (Ahammed et al., 2012) برای اصلاح سامانه زهکشی سیلاب شهری داکا در بنگلادش، با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره و روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) بهترین سناریوی اصلاحی را انتخاب کردند. جوکسیمویچ و آلم (Joksimovic & Alam, 2014) به ارزیابی هزینه مناسب‌ترین LIDها در محدوده‌ای از لندن برای کاهش رواناب پرداختند که ارزیابی درصد کاهش رواناب در مقابل هزینه، منجر به انتخاب راهبردی تلفیقی از ترانسه نفوذ و بام سبز به عنوان راه‌حل کارآمد و اقتصادی شد. سانگ و چونگ (Song & Chung, 2017) برای اولویت‌بندی راهبردهای LID امکان‌پذیر در موقعیت‌های مکانی مختلف، یک چهارچوب تحلیل چند معیاره بر مبنای عملکرد هیدرولوژیکی، شاخص‌های اجتماعی و ویژگی‌های فیزیکی-هندسی بر بستر وب معرفی کردند. لی و همکاران (Li et al., 2019) یک سامانه ارزیابی جامع مبتنی بر ترکیب شاخص‌های اجتماعی، محیط زیستی و اقتصادی را برای ارزیابی عملکرد LIDهای مختلف بر مبنای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی در مدل SWMM و روش تحلیل چندمعیاره AHP ارائه کردند. آن‌ها با اجرای پنج سناریو از ترکیب LIDهای مختلف با موقعیت‌های مکانی و اندازه‌های متنوع (شامل زیست حوضچه‌ها، آبروهای علفی، باغچه‌های بارانی، سنگفرش نفوذپذیر و مخازن ذخیره) در بخش کوچکی از شهر نانینگ در گوانگشی چین، رویکرد پیشنهادی خود را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که سناریوی سبز که در آن ۳۴/۵ و ۴۶ درصد از سطح کل اختصاص داده شده به LIDها، به ترتیب به حوضچه‌های زیستی و باغچه‌های بارانی تعلق گرفته بود، دارای بهترین عملکرد بود و موجب کاهش ۷۵ درصدی حجم رواناب سالانه شد. لوان و همکاران (Luan et al., 2019) برای انتخاب ترکیب زیرساخت‌های سبز در شهر ژوهای چین برای مدیریت سیلاب شهری از تحلیل چند شاخصه به روش TOPSIS بر مبنای چهار شاخص مختلف شامل دو شاخص کمی، یک شاخص کیفی و یک شاخص اقتصادی بهره‌گیری کردند. فیلیپس و همکاران (Phillips et al., 2022) ارزیابی اثرات توزیع مکانی و پیکربندی زیرساخت‌های سبز بر عملکرد تجمعی آن‌ها از نظر راندمان حذف آلاینده، هزینه و دسترسی عمومی با استفاده از رویکرد TOPSIS مبتنی بر شبیه‌سازی در SWMM را در بنگلور هند انجام دادند. آن‌ها توزیع پراکنده GIها با قید امکان‌پذیر بودن را بهینه‌ترین حالت دانستند و اعلام کردند در مواردی که پیکربندی‌های پراکنده غیرممکن است، پیکربندی‌های متمرکز باید در مکان‌های با غلظت آلاینده بالاتر و نرخ جریان پایین‌تر قرار داده شوند.

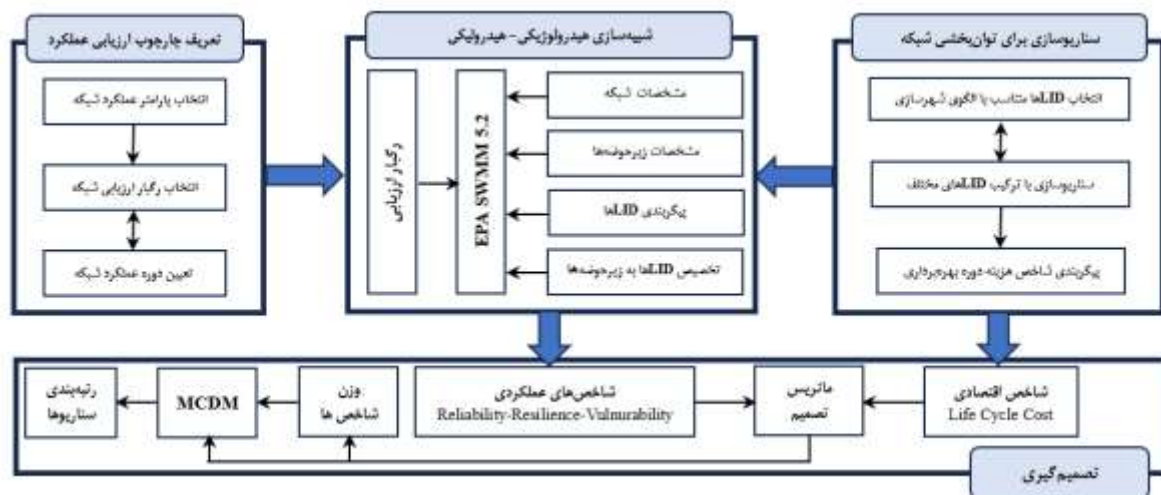
Chae et al. (2024) چهارچوبی سیستماتیک برای مکان‌یابی عملی و مؤثر سنگفرش نفوذپذیر با هدف بازیابی چرخه آب حوضه‌های آبریز با در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی آینده به وسیله MCDM تکراری معرفی کردند. آن‌ها اولویت مکانی سنگفرش نفوذپذیر در یک مطالعه موردی در حوضه آبریز ۵۷ کیلومتر مربعی موک‌گامچئون گروه جنوبی را با استفاده از روش جفت شده تاپسیس فازی و VIKOR تعیین کردند. نتایج مطالعه آن‌ها تأیید کرد که پیش‌بینی‌های اقلیمی مختلف می‌تواند بر نتایج اولویت‌بندی تأثیر بگذارد و روش مکان‌یابی آن‌ها بازیابی چرخه آب را به شکلی مؤثرتر بهبود بخشید.

Taheri et al. (2025) با استفاده از روش AHP چهار سناریوی ترکیبی از پنج راهبرد مختلف بشکته‌های باران، باغچه‌های بارانی، سنگفرش‌های نفوذپذیر، ترانسه‌های نفوذ و آبروهای علفی برای داخل و خارج منازل مسکونی در یک مطالعه موردی واقع در منطقه ۱۰ شهر تهران را با بهره‌گیری از ۲۲ شاخص کمی-کیفی مبتنی بر معیارهای زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و فنی برای رسیدگی به چالش‌های پایداری این راهبردها به ویژه در کشورهای در حال توسعه انجام دادند. ادغام شاخص‌های جدید، مانند حمایت قانونی و مشارکت دولت، پذیرش ذینفعان مختلف و محلی‌سازی در کنار شاخص‌های معمول قبلی، چارچوب تصمیم‌گیری جامع‌تری برای آن‌ها فراهم کرد و

نشان داد که این چهارچوب می‌تواند برای کشورهای در حال توسعه، که در آن‌ها محدودیت‌های اقتصادی و شرایط محلی به طور قابل توجهی بر مدیریت پایدار سیلاب شهری تأثیر می‌گذارند، ارزشمند باشد و راهنمایی‌های عملی برای برنامه‌ریزان شهری فراهم کند.

### روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش توسعه رویکرد انتخاب بهترین ترکیب LIDها در زیرحوضه‌های شهری برای بهبود عملکرد شبکه‌های دفع آب‌های سطحی، در صورت وقوع رگبارهای شدیدتر از رگبار طراحی با بهره‌گیری از تحلیل‌های چند شاخصه بر مبنای شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و هزینه دوره عملکرد، دنبال شد. این رویکرد به صورت روندنمای شکل ۱ طراحی و پیکربندی شده است.



شکل ۱. روندنمای رویکرد انتخاب راهبردهای LID برای توان‌بخشی شبکه در برابر رگبارهای شدیدتر از رگبار طراحی

### شاخص‌های عملکردی پویا

در این پژوهش از این سه شاخص عملکردی پویا - اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری - برای ارزیابی جامع عملکرد شبکه زهکشی تحت سناریوهای مختلف LID استفاده شد. این شاخص‌ها در ارتباط با عملکرد یک سامانه در چهارچوب اهداف تعیین شده، تعریف شده‌اند. هدف اصلی از ایجاد یک شبکه زهکشی سیلاب شهری، جمع‌آوری و هدایت سیلاب رگبارهای مختلف و جلوگیری از آب گرفتگی در محدوده تحت پوشش شبکه است. در این شبکه‌ها، جاری شدن سیل در سطح معابر تحت عنوان سیل‌گیری تعبیر شده و نشان دهنده شکست در عملکرد تلقی می‌شود. در عمل سیل‌گیری شبکه زمانی رخ می‌دهد که تراز سطح آب در هر گره شبکه، از تراز سطح زمین در آن گره تجاوز کند. در این شرایط جریان سیلاب، که یا در گره‌ها جذب نشده و یا از آن‌ها سرریز گشته، در سطح معابر جاری شده و تا زمان فروکش، در سطح باقی خواهد ماند. بنابراین عملکرد شبکه را می‌توان بر مبنای سری‌های زمانی تراز سطح آب گره‌های شبکه در مقایسه با تراز سطح زمین، به شکلی پویا مورد ارزیابی قرار داد.

شاخص اعتمادپذیری به صورت احتمال عملکرد رضایت بخش یک سامانه در دوره زمانی عملکرد آن، تعریف شده است (Hashimoto et al., 1982). در این پژوهش برای برآورد شاخص اعتمادپذیری در هر گره شبکه، از سری‌های زمانی تراز سطح آب آن گره استفاده شده و در مقایسه با تراز سطح زمین، وضعیت عملکرد شبکه در هر مقطع زمانی ارزیابی شد:

$$Z_{i,t} = \begin{cases} 0 & , H_{i,t} > G_i \\ 1 & , H_{i,t} \leq G_i \end{cases} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

که  $Z_{i,t}$  متغیر وضعیت عملکرد در گره  $i$  و مقطع زمانی  $t$ ،  $H_{i,t}$  تراز هیدرولیکی جریان در گره  $i$  و مقطع زمانی  $t$  و  $G_i$  تراز سطح زمین در محل گره  $i$  است. به این ترتیب اعتمادپذیری در گره  $i$ ، که با  $\alpha_i$  نمایش داده می‌شود، از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\alpha_i = \left( \sum_{t=1}^n Z_{i,t} \right) / n \quad \text{(رابطه ۲)}$$

شاخص برگشت‌پذیری، قابلیت سامانه در بازگشت به وضعیت عادی پس از شکست را اندازه‌گیری می‌کند. برای محاسبه شاخص برگشت‌پذیری گره‌ی، ابتدا سری زمانی متغیر حالت بازگشت عملکرد از وضعیت نامطلوب به وضعیت رضایت‌بخش،  $W_{i,t}$ ، به وسیله رابطه

زیر تهیه شد:

$$W_{i,t} = \begin{cases} 1 & , Z_{i,t} = 0 \wedge Z_{i,t+1} = 1 \\ 0 & , otherwise \end{cases} \quad \text{رابطه (۳)}$$

سپس شاخص برگشت‌پذیری در گره  $i$  که با  $\gamma_i$  نمایش داده می‌شود، از رابطه زیر برآورد شد:

$$\gamma_i = \sum_{t=1}^n W_{i,t} / (n - \sum_{t=1}^n Z_{i,t}) \quad \text{رابطه (۴)}$$

آسیب‌پذیری عبارت است از بزرگی محتمل شکستی که احتمال دارد رخ دهد. حتی زمانی که احتمال شکست کم است، باید به عواقب احتمالی شکست توجه شود. برای ارائه یک بیان ریاضی از آسیب‌پذیری ابتدا باید به هر متغیر عملکرد در حالت شکست ( $X_j \in F$ ) یک شاخص عددی متناسب با شدت شکست و یک احتمال وقوع متناسب با شدیدترین عملکرد نامطلوب، تخصیص داده شود. در هر گره شبکه، عمق سیل‌گیری به عنوان شاخص عددی شدت شکست در نظر گرفته شد و برای محاسبه احتمال وقوع پس از مرتب‌سازی نزولی سری زمانی عمق سیل‌گیری از فرمول احتمال ویبول استفاده شد. برای محاسبه اعتمادپذیری ابتدا عمق سیل‌گیری در هر گره و مقطع زمانی از رابطه زیر محاسبه شد:

$$DF_{i,t} = \begin{cases} H_{i,t} - G_i & , H_{i,t} > G_i \\ 0 & , H_{i,t} \leq G_i \end{cases} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که  $DF_{i,t}$ ، عمق سیل‌گیری در گره  $i$  و مقطع زمانی  $t$  است. پس از تهیه سری‌های زمانی عمق سیل‌گیری و تشکیل مجموعه  $F_i$  در هر گره  $i$ ، آسیب‌پذیری آن گره از رابطه زیر محاسبه شد:

$$v_i = \sum_{j \in F_i} DF_{i,j} e_{i,j} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که  $e_{i,j}$ ، احتمال وقوع هر عضو  $j$  مجموعه  $F_i$  و  $v_i$  آسیب‌پذیری گره  $i$  است. لازم به ذکر است که مقادیر آسیب‌پذیری بی‌بعد نیستند و برخلاف مقادیر اعتمادپذیری و برگشت‌پذیری که بین صفر و یک هستند، مقادیر بیش از یک هم می‌تواند داشته باشد.

### دوره زمانی عملکرد شبکه

بهره‌برداری از شبکه‌های زهکشی سیلاب شهری به صورت متناوب و گسسته بوده و به زمان وقوع بارش‌ها و کمی پس از آن محدود می‌شود. از این رو بررسی عملکرد این شبکه‌ها فقط در دوره‌های زمانی وقوع سیلاب امکان‌پذیر است. برای سناریوهای توان‌بخشی شبکه، دوره عملکرد می‌تواند برابر با کل دوره تداوم (به صورت پیوسته) رگبار ارزیابی باشد. اما با توجه به روابط شاخص‌های عملکردی دوره عملکرد شبکه می‌تواند نقشی دو سویه در مقدار عددی شاخص‌های عملکردی داشته باشد. به عنوان نمونه اگر در توزیع زمانی رگبار ارزیابی، بخش‌های شدید رگبار در یک بازه زمانی کوتاه متمرکز شده باشد انتخاب دوره عملکرد برابر با کل دوره تداوم بارش، صورت رابطه شاخص اعتمادپذیری را بزرگ کرده و در نتیجه مقدار عددی اعتمادپذیری بزرگ شده و به عدد یک نزدیک خواهد شد. در حالی که ممکن است عملکرد شبکه در این وضعیت چندان رضایت‌بخش نباشد. از این رو محدود کردن دوره عملکرد توسط یک آستانه برای شدت بارش لحظه‌ای می‌تواند راه حل مناسبی برای این مشکل باشد. در این مطالعه دوره عملکرد شبکه بر اساس آستانه شدت رگبار طراحی تعریف شد. این چارچوب دوره عملکرد تنها بازه‌هایی از رگبار ارزیابی را در بر می‌گیرد که در آن‌ها شدت بارش لحظه‌ای از شدت رگبار طراحی بیشتر باشد. این رویکرد مزایای قابل توجهی دارد:

- جلوگیری از تخمین بیش از حد شاخص اعتمادپذیری ناشی از لحاظ کردن دوره‌های با بارش کم
- تمرکز بر بازه‌های بحرانی که شبکه واقعاً در معرض خطر سیل‌گیری قرار دارد
- افزایش دقت محاسبات شاخص‌های عملکردی پویا

اگرچه این روش ممکن است به دوره‌های عملکرد ناپیوسته منجر شود، اما انعکاس بهتری از عملکرد واقعی شبکه در شرایط بارشی شدید ارائه می‌دهد. این چارچوب عملیاتی، ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از اثربخشی راهبردهای LID در مدیریت رویدادهای بارش فراتر از رگبار طراحی فراهم می‌سازد.

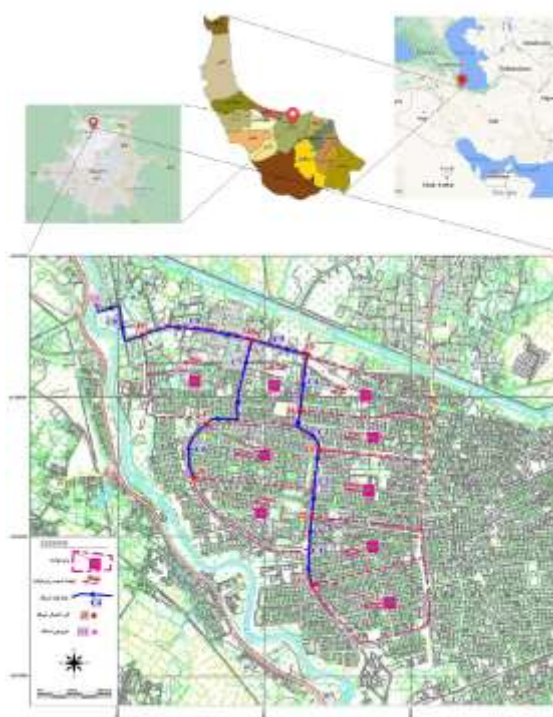
### شبیه‌سازی عملکرد LIDها در SWMM 5.2

یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند و پرکاربرد در زمینه کنترل سیلاب شهری، نرم‌افزار SWMM است، که قابلیت شبیه‌سازی LIDهای متنوع در آن وجود دارد. بیستا و همکاران (Bista et al., 2025) در تازه‌ترین ارزیابی از پژوهش‌های مرتبط با مدیریت سیلاب شهری به کمک

تحلیل‌های چندهدفه نشان داده‌اند که در بیش از ۷۰ درصد این پژوهش‌ها از مدل SWMM به عنوان مدل شبیه‌ساز استفاده شده است. در این پژوهش از نسخه ۶۴ بیتی SWMM 5.2 استفاده شد، که اول آگست ۲۰۲۲ منتشر شده است.

### مطالعه موردی

برای ارزیابی رویکرد پیشنهادی این پژوهش شبکه زهکشی سیلاب شهری بخشی از شهر رشت (برای زهکشی محدوده‌ای به وسعت ۶۲ هکتار در شهرک گلزار) در استان گیلان انتخاب شد. در شکل ۲ موقعیت محدوده مورد مطالعه در ایران، استان گیلان و شهر رشت در کنار آرایش شبکه زهکشی سیلاب نمایش داده شده است. محدوده تحت پوشش شبکه از ۹ زیرحوضه تشکیل شده است که رواناب حاصل از بارندگی روی آن‌ها در محل گره‌های شبکه وارد ۹ خط انتقال بتنی به قطرهای اسمی ۹۰۰ تا ۱۳۵۰ میلی‌متر و طول ۱۹۸۹ متر می‌شود. شیب لوله‌های شبکه در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۵۴ درصد تغییر کرده است. ضریب زبری مانینگ لوله‌ها در شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه، ۰/۱۳ در نظر گرفته شد. رگبار طراحی این شبکه یک رگبار ۶ ساعته با دوره بازگشت ۲ سال (Butler & Davies, 2011) و شدت ۶/۱۳ میلی‌متر بر ساعت و مجموع بارش ۳۶/۷۸ میلی‌متر بود. برای شبیه‌سازی فرایند نفوذ در SWMM از مدل نفوذ هورتون استفاده شد و با در نظر گرفتن بافت رسی خاک محدوده مطالعه موردی ضرایب این مدل (نرخ نفوذ اولیه ۲۵ میلی‌متر بر ساعت، نرخ نفوذ نهایی ۰/۲۵ میلی‌متر بر ساعت و ضریب زوال ۴ بر ساعت) مقدار دهی شد (Gironás et al., 2009). در جدول ۱ مشخصات زیرحوضه‌ها و در جدول ۲ مشخصات لوله‌های شبکه در محدوده مورد مطالعه معرفی شده است.



شکل ۲. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران، استان گیلان و شهر رشت و آرایش شبکه زهکشی سیلاب شهری

جدول ۱. مشخصات زیرحوضه‌های شبکه زهکشی سیلاب شهری مطالعه موردی

شناسه	گره خروجی	مساحت (ha)	عرض (m)	شیب (%)	سطوح نفوذناپذیر (%)
SB1	J1	۸/۱۴	۱۱۶۰	۲/۵۵	۹۴/۰
SB2	J2	۸/۷۹	۱۲۵۰	۱/۵۰	۹۵/۰
SB3	J3	۷/۳۷	۱۰۵۰	۱/۴۰	۹۶/۰
SB4	J4	۶/۷۹	۹۷۰	۳/۰۰	۹۴/۰
SB5	J5	۶/۲۴	۸۹۰	۳/۰۰	۹۴/۰
SB6	J6	۵/۸۳	۸۳۰	۳/۰۰	۹۳/۳
SB7	J7	۹/۱۰	۱۳۰۰	۲/۲۰	۹۴/۲
SB8	J8	۴/۳۰	۶۱۰	۲/۰۰	۹۷/۱
SB9	J9	۵/۵۲	۷۸۰	۱/۷۴	۹۲/۰

**جدول ۲. مشخصات لوله‌های شبکه زهکشی سیلاب شهری مطالعه موردی**

شناسه	گره ورودی	گره خروجی	طول (m)	قطر اسمی (mm)	قطر داخلی (mm)	شیب لوله (%)	تراز کف ورودی (m)	تراز کف خروجی (m)
C1	J1	J2	۲۵۸/۸	۹۰۰	۹۱۴	-۰/۳۳	-۱۲/۸۹	-۱۳/۸۳
C2	J2	J3	۲۰۵/۵	۹۰۰	۹۱۴	-۰/۴۹	-۱۳/۸۳	-۱۴/۸۳
C3	J3	J4	۱۷۳/۴	۹۰۰	۹۱۴	-۰/۰۵	-۱۴/۸۳	-۱۴/۹۱
C4	J4	J5	۱۴۹/۲	۱۰۵۰	۱۰۶۷	-۰/۵۴	-۱۵/۰۷	-۱۵/۸۷
C5	J5	J8	۲۰۴/۳	۱۳۵۰	۱۳۷۲	-۰/۲۰	-۱۶/۲۷	-۱۶/۶۷
C6	J6	J7	۲۷۶/۴	۹۰۰	۹۱۴	-۰/۴۲	-۱۳/۸۳	-۱۵/۰۰
C7	J7	J8	۱۹۷/۲	۱۰۵۰	۱۰۶۷	-۰/۴۹	-۱۵/۲۱	-۱۶/۱۷
C8	J8	J9	۳۳۰/۲	۱۳۵۰	۱۳۷۲	-۰/۱۶	-۱۶/۶۷	-۱۷/۲۰
C9	J9	O1	۱۶۷/۱	۱۳۵۰	۱۳۷۲	-۰/۱۸	-۱۷/۲۰	-۱۷/۵۰

بررسی کاربری اراضی در محدوده مطالعه موردی نشان داد که فضای مناسب برای ایجاد برخی از LIDها در دسترس نیست. به عنوان نمونه آبروهای علفی، زیست‌حوضچه‌ها، باغچه‌های بارانی و ترانشه‌های نفوذ در سطح بسیار محدودی قابل اجرا خواهند بود که انتظار چندانی از اثرگذاری آن‌ها وجود ندارد. با توجه به سطح گسترده کاربری مسکونی و معابر در این محدوده، راهبرد بام سبز (GR) و شبکه باران (RB) برای اجرا در کاربری مسکونی (ساختمان‌ها) و راهبرد سنگفرش نفوذپذیر (PP) برای اجرا در معابر، انتخاب شد. با توجه به وضعیت کاربری اراضی در محدوده مورد مطالعه فرض شد بیشترین سطح قابل اجرا برای بام سبز معادل ۳۲ درصد، شبکه باران معادل ۰/۲۵ درصد و سنگفرش نفوذپذیر معادل ۲۵ درصد مساحت زیر حوضه‌ها باشد.

هزینه دوره بهره‌برداری (عمر) هر LID به صورت مجموع هزینه ایجاد و هزینه نگهداری محاسبه می‌شود. در این پژوهش راهبردهای LID منتخب دارای عمر یکسان نیستند و بنابراین باید از ارزش معادل سالانه برای مقایسه آن‌ها استفاده شود. با بررسی منابع مختلف هزینه دوره بهره‌برداری سه راهبرد منتخب PP، GR و RB به صورت ارزش معادل سالانه استخراج و در جدول ۳ گزارش شده است. این مقادیر در محاسبه شاخص اقتصادی هر سناریو مورد استفاده قرار گرفت.

**جدول ۳. هزینه دوره عملکرد و اجزای آن برای LIDهای منتخب در مطالعه موردی**

راهبرد LID	هزینه ایجاد	هزینه نگهداری	طول عمر (سال)	هزینه دوره عملکرد (ارزش معادل سالانه)	منبع
PP	۱۲۰ \$/m <sup>2</sup>	۰/۹۱ \$/m <sup>2</sup>	۲۰	۱۴/۵۸ \$/m <sup>2</sup>	(Lee et al., 2020)
GR	۲۸۷ \$/m <sup>2</sup>	۳/۷۸ \$/m <sup>2</sup>	۵۰	۵۲/۱۸ \$/m <sup>2</sup>	(Lee et al., 2020)
RB	۱۵۵ \$/m <sup>3</sup>	۱/۵۵ \$/m <sup>3</sup>	۲۰	۱۶/۲۶ \$/m <sup>3</sup>	(Huang et al., 2018)

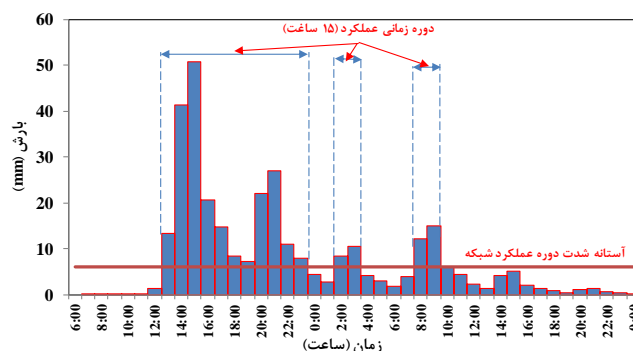
در سناریوسازی برای ارزیابی عملکرد LIDهای مختلف و میزان اثرگذاری آن‌ها با در نظر گرفتن بعد اقتصادی و فنی از نظر مساحت تحت پوشش سه سطح کم (۳۰ درصد فضای در دسترس) متوسط (۶۰ درصد فضای در دسترس) و زیاد (۱۰۰ درصد فضای در دسترس) در نظر گرفته شد. در نامگذاری سناریوها از پسوند L برای سطح کم، از پسوند M برای سطح متوسط و از پسوند H برای سطح زیاد استفاده شد از آن جا که اجرای RB فقط در محوطه ساختمان‌ها امکان‌پذیر است و در الگوی ساخت و ساز شهر رشت به دلیل کمبود اراضی شهری مساحت بسیار ناچیزی برای RB در دسترس قرار دارد. بنابراین این راهبرد از سناریوسازی به صورت منفرد کنار گذاشته شد و فقط دو راهبرد PP و GR در سناریوسازی منفرد مورد استفاده قرار گرفت. در سناریوسازی ترکیبی، ترکیب دو راهبرد PP و GR با سه سطح از مساحت اشغالی سه سناریو ایجاد کرد که در نامگذاری فقط از حرف اول آن‌ها یعنی G و P استفاده شد (GP). سه سناریو هم از ترکیب هر سه راهبرد منتخب با سه سطح اشغالی تشکیل شد، که در نامگذاری آن‌ها از پیشوند GPR و پسوند سطح اشغالی استفاده شد. در جدول ۴ این ۱۲ سناریو معرفی شده‌اند.

انتخاب رگبار ارزیابی یکی از گام‌های مهم رویکرد پیشنهادی است. رگبار ارزیابی باید به اندازه کافی تداوم داشته و در توزیع زمانی آن پالس‌های متعدد شدت وجود داشته باشد. این ویژگی می‌تواند پالس‌های متعدد سیل‌گیری شبکه را به دنبال داشته باشد و با تولید مقادیر متنوع شاخص‌های عملکردی امکان ارزیابی بهتر سناریوهای LID را در مقایسه با سناریوی پایه (بدون LID) فراهم کند. با بررسی دوره آماری بارندگی ایستگاه سینوپتیک رشت، رگباری ۴۳ ساعته با مجموع بارش ۳۲۵ میلی‌متر که توزیع زمانی آن در شکل ۴ نشان داده شده

است، انتخاب شد. این رگبار در ساعت ۶ بامداد روز ۱۰ اکتبر ۱۹۸۵ آغاز و تا ساعت ۲۳ روز ۱۱ اکتبر ۱۹۸۵ ادامه داشت. بیشینه شدت این رگبار ۹ ساعت پس از شروع رگبار و برابر با ۵۱ میلی‌متر بر ساعت است. در شکل ۳ آستانه شدت لحظه‌ای دوره عملکرد نیز نشان داده شده است. مقاطع زمانی با بارش بیش از این آستانه جزء دوره عملکرد محسوب می‌شوند. بر این مبنا دوره عملکرد شبکه مورد مطالعه در مجموع ۱۵ ساعت است، که مطابق شکل ۳، پیوسته نیست. شبیه‌سازی هیدرولوژیکی - هیدرولیکی سناریوها در SWMM با فواصل ۱۰ دقیقه تا ۲۴ ساعت پس از خاتمه رگبار ارزیابی (ساعت ۲۳ روز ۱۲ اکتبر ۱۹۸۵) انجام شد.

جدول ۴. معرفی ۱۲ سناریو مورد استفاده در مطالعه موردی

شناسه سناریو	ترکیب LIDهای هر سناریو
GR-H	بام سبز با پوشش ۷۵ درصد
GR-M	بام سبز با پوشش ۵۰ درصد
GR-L	بام سبز با پوشش ۲۰ درصد
PP-H	سنگ‌فرش نفوذپذیر با پوشش ۷۵ درصد
PP-M	سنگ‌فرش نفوذپذیر با پوشش ۵۰ درصد
PP-L	سنگ‌فرش نفوذپذیر با پوشش ۲۰ درصد
GP-H	ترکیب بام سبز و سنگ‌فرش نفوذپذیر با پوشش ۷۵ درصد
GP-M	ترکیب بام سبز و سنگ‌فرش نفوذپذیر با پوشش ۵۰ درصد
GP-L	ترکیب بام سبز و سنگ‌فرش نفوذپذیر با پوشش ۲۰ درصد
GPR-H	ترکیب بام سبز ، سنگ‌فرش نفوذپذیر و بشکه باران با پوشش ۷۵ درصد
GPR-M	ترکیب بام سبز ، سنگ‌فرش نفوذپذیر و بشکه باران با پوشش ۵۰ درصد
GPR-L	ترکیب بام سبز ، سنگ‌فرش نفوذپذیر و بشکه باران با پوشش ۲۰ درصد



شکل ۳. توزیع زمانی رگبار ارزیابی در مقایسه با آستانه شدت دوره عملکرد برای تعیین دوره عملکرد

پس از ساخت مدل سناریوی پایه (بدون LID) در SWMM، ۱۲ مدل هم برای ۱۲ سناریوی LID ساخته شد. برای این منظور ابتدا سه LID منتخب مطابق با لایه‌بندی پیشنهادی بای و همکاران (Bai et al., 2018)، ساخته شد. سپس در هر زیرحوضه، متناسب با پیکربندی سناریوی مربوطه، مقداردهی سطح تحت پوشش هر LID انجام و متناسب با آن درصد سطوح نفوذناپذیر و عرض زیرحوضه اصلاح شد. پس از مقداردهی و اصلاح همه زیر حوضه‌ها مدل ذخیره و آماده اجرای شبیه‌سازی شد.

#### مدل‌های چند شاخصه

در این پژوهش از سه روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، تاپسیس (TOPSIS) و تخصیص خطی برای رتبه‌بندی سناریوهای LID استفاده شد. روش AHP با بهره‌گیری از مقایسات زوجی و تجزیه سلسله‌مراتبی، امکان تحلیل سازگار معیارها را فراهم می‌سازد. روش TOPSIS بر مبنای محاسبه فاصله سناریوها از جواب ایده‌آل و ضد ایده‌آل عمل می‌کند. تخصیص خطی نیز با در نظر گرفتن امکان جبران بین شاخص‌ها، به رتبه‌بندی نهایی می‌پردازد.

برای وزندهی معیارها، از دو رویکرد متفاوت بهره‌گیری شد. در AHP و تخصیص خطی از روش بردار ویژه مبتنی بر قضاوت کارشناسی، و در تاپسیس از روش آنتروپی مبتنی بر پراکندگی ذاتی داده‌ها استفاده شد. این انتخاب آگاهانه، امکان مقایسه تأثیر فلسفه‌های مختلف وزن‌دهی بر خروجی نهایی تحلیل‌های چندمعیاره را فراهم کرد.



## یافته‌های پژوهشی و بحث

نتایج شبیه‌سازی سناریوی پایه (بدون LID) نشان داد که زیرحوضه SB9 هیچ‌گونه سیل‌گیری نداشته و از فرآیند توان‌بخشی مستثنی شد. برای هشت زیرحوضه باقیمانده، ۱۲ سناریوی LID در SWMM شبیه‌سازی و سپس شاخص‌های عملکردی پویا (اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری) از طریق تحلیل سری‌های زمانی تراز آب در گره‌ها با گام زمانی ۱۰ دقیقه محاسبه شد. شاخص آسیب‌پذیری با استفاده از نرمال‌سازی نسبت به بیشترین مقدار در بین سناریوها بی‌بعد شد. شاخص اقتصادی هزینه دوره بهره‌برداری نیز بر اساس سطح تحت پوشش هر LID برآورد شد. خلاصه نتایج سیل‌گیری در جدول ۵، مقادیر شاخص‌های محاسبه‌شده در جدول ۶، پارامترهای آماری شاخص‌های ارزیابی در جدول ۷ و روند تغییرات شاخص‌ها در شکل ۴ ارائه شده است.

جدول ۵. خلاصه نتایج سیل‌گیری گره‌ها (خروجی زیرحوضه‌ها)

خروجی زیرحوضه	پارامتر	سناریو												
		GPR-L	GPR-M	GPR-H	GP-L	GP-M	GP-H	PP-L	PP-M	PP-H	GR-L	GR-M	GR-H	Base
SB1	تعداد رخداد سیل‌گیری	۲۱	۶	۳	۲۱	۱۰	۳	۲۵	۱۸	۱۲	۲۹	۲۴	۱۵	۳۱
	تعداد پالس سیل‌گیری	۲	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۲	۲	۲
	حداکثر عمق سیل‌گیری	۰/۳۶۲	۰/۱۱	۰/۰۲۸	۰/۳۶۲	۰/۲۰۱	۰/۰۴	۰/۴۶۱	۰/۳۹	۰/۳۰۲	۰/۴۳۶	۰/۳۳۷	۰/۲۰۶	۰/۵۳۳
	حداقل عمق سیل‌گیری (m)	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۰۱۴	۰/۰۰۲	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷	۰/۰۱۹
SB2	تعداد رخداد سیل‌گیری	۳۴	۱۸	۱۳	۳۴	۲۴	۱۳	۳۷	۳۰	۲۳	۴۴	۴۰	۳۵	۴۶
	تعداد پالس سیل‌گیری	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳
	حداکثر عمق سیل‌گیری	۰/۷۰۶	۰/۳۷۸	۰/۲۴۷	۰/۷۰۷	۰/۵۰۱	۰/۲۵	۰/۸۳۱	۰/۷۲۶	۰/۶۰۷	۰/۸۲۳	۰/۶۹۳	۰/۵۲۹	۰/۹۴۹
	حداقل عمق سیل‌گیری (m)	۰/۰۱۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴
SB3	تعداد رخداد سیل‌گیری	۴۲	۲۴	۱۹	۴۲	۳۰	۲۰	۴۵	۳۶	۲۷	۵۵	۵۱	۴۵	۵۵
	تعداد پالس سیل‌گیری	۳	۲	۲	۳	۲	۲	۳	۲	۲	۳	۳	۳	۲
	حداکثر عمق سیل‌گیری	۱/۰۶۱	۰/۶۸	۰/۴۹۸	۱/۰۶۳	۰/۸۳۲	۰/۵۰۳	۱/۱۹	۱/۰۶۱	۰/۹۱۸	۱/۲۰۳	۱/۰۶۸	۰/۸۹۳	۱/۳۰۳
	حداقل عمق سیل‌گیری (m)	۰/۰۰۶	۰/۰۱۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷	۰/۰۴۹	۰/۰۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲۷	۰/۰۳۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۱۲	۰/۰۰۵
SB4	تعداد رخداد سیل‌گیری	۱۵	۲	۰	۱۵	۸	۰	۱۹	۱۵	۱۰	۲۲	۱۸	۱۰	۲۱
	تعداد پالس سیل‌گیری	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۲	۲	۱	۲
	حداکثر عمق سیل‌گیری	۰/۲۲	۰/۰۱۵	۰	۰/۲۲۱	۰/۰۸۴	۰	۰/۳۱۵	۰/۲۳۶	۰/۱۵۵	۰/۳۱۵	۰/۲۱۲	۰/۰۹۹	۰/۳۵
	حداقل عمق سیل‌گیری (m)	۰/۰۲۶	۰/۰۰۷	۰	۰/۰۲۸	۰/۰۰۱	۰	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۱۲	۰/۰۰۱
SB5	تعداد رخداد سیل‌گیری	۲۶	۱۴	۱۲	۲۶	۲۰	۱۲	۲۹	۲۳	۱۸	۳۴	۳۰	۲۶	۲۸
	تعداد پالس سیل‌گیری	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۲
	حداکثر عمق سیل‌گیری	۰/۷۲۸	۰/۴۸۹	۰/۳۴۵	۰/۷۲۹	۰/۵۸۴	۰/۳۴۸	۰/۸۰۸	۰/۷۳۹	۰/۶۵۴	۰/۸	۰/۷۱۹	۰/۶۱۱	۰/۷۷۹
	حداقل عمق سیل‌گیری (m)	۰/۰۲۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۹	۰/۰۱۵	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲
SB6	تعداد رخداد سیل‌گیری	۴	۰	۰	۴	۲	۰	۷	۵	۴	۶	۴	۱	۹
	تعداد پالس سیل‌گیری	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	حداکثر عمق سیل‌گیری	۰/۰۸۷	۰	۰	۰/۰۸۷	۰/۰۱۲	۰	۰/۱۵۳	۰/۱۱	۰/۰۶۶	۰/۱۳۵	۰/۰۷۵	۰/۰۱۵	۰/۲
	حداقل عمق سیل‌گیری (m)	۰/۰۲۵	۰	۰	۰/۰۲۵	۰/۰۰۴	۰	۰/۰۰۷	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۱۶	۰/۰۱۸	۰/۰۱۵	۰/۰۰۱
SB7	تعداد رخداد سیل‌گیری	۱۰	۳	۱	۱۰	۴	۱	۱۲	۸	۷	۱۱	۹	۶	۱۲
	تعداد پالس سیل‌گیری	۲	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۲	۲	۲
	حداکثر عمق سیل‌گیری	۰/۳۲۲	۰/۰۵۱	۰/۰۰۵	۰/۳۲۳	۰/۱۷۱	۰/۰۰۵	۰/۴۱۷	۰/۳۴۶	۰/۲۶۶	۰/۳۹۶	۰/۳۰۴	۰/۱۷۸	۰/۴۵۴
	حداقل عمق سیل‌گیری (m)	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۴۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۴۲	۰/۰۰۵	۰/۰۲۵	۰/۰۱۱	۰/۰۱۶	۰/۰۲
SB8	تعداد رخداد سیل‌گیری	۱۸	۶	۴	۱۸	۱۰	۴	۲۰	۱۵	۱۰	۲۲	۱۹	۱۵	۱۹
	تعداد پالس سیل‌گیری	۲	۱	۱	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۲	۲	۲
	حداکثر عمق سیل‌گیری	۰/۴۷	۰/۲۳۳	۰/۱۲۴	۰/۴۷۱	۰/۳۳۷	۰/۱۲۸	۰/۵۴	۰/۴۷۹	۰/۴۰۲	۰/۵۳۱	۰/۴۶۲	۰/۳۶۲	۰/۴۶۷
	حداقل عمق سیل‌گیری (m)	۰/۰۰۱	۰/۰۳۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۲۱	۰/۰۲۲	۰/۰۱۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵

با توجه به شکل ۴ افزایش اعتمادپذیری و برگشت‌پذیری و کاهش آسیب‌پذیری به ازای افزایش سطح پوشش LID، روندی منطقی و قابل پیش‌بینی داشت، اما شیب تغییرات در زیرحوضه‌های مختلف متفاوت بود؛ شیب تغییرات شاخص‌های عملکردی نسبت به تغییر سطح پوشش در خروجی زیرحوضه‌های واقع در ابتدای خطوط لوله انتقال سیلاب، نظیر SB1 تا SB3، نسبت به زیرحوضه‌های واقع در انتهای خطوط شبکه، بیشتر بود. این روند را می‌توان به تاثیر زیرحوضه‌های بالادست از طریق نگهداشت و جذب رواناب بر نحوه سیل‌گیری گره‌های

پایین دست نسبت داد. البته نمی‌توان از تاثیر عمق بیشترگره‌ها و ابعاد بزرگتر مجاری پایین دست شبکه بر این روند چشم‌پوشی کرد؛ زیرا این دو عامل ظرفیت ذخیره بیشتری در بخش انتهایی شبکه ایجاد کرده و اختلاف مقادیر شاخص‌ها در سطوح پوشش متنوع را کمتر کرده است. نکته قابل توجه دیگر در شکل ۴ بهبود چشمگیر عملکرد شبکه در سناریوهای ترکیبی LIDهای مختلف در مقایسه با سناریوهای منفرد بود، که در همه زیرحوضه‌ها شاخص‌های عملکردی آن‌ها با دامنه تغییرات کمتر، مقادیر مطلوب‌تری داشت.

جدول ۶. شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده در تحلیل‌های چند شاخصه در خروجی زیرحوضه‌ها

سناریو														شاخص	خروجی زیرحوضه
GPR-L	GPR-M	GPR-H	GP-L	GP-M	GP-H	PP-L	PP-M	PP-H	GR-L	GR-M	GR-H	Base			
۰/۷۶۷	۰/۹۳۳	۰/۹۶۷	۰/۷۶۷	۰/۸۸۹	۰/۹۶۷	۰/۷۲۲	۰/۸۰۰	۰/۸۶۷	۰/۶۷۸	۰/۷۳۳	۰/۸۳۳	۰/۶۵۶	۰/۶۵۶	اعتمادپذیری	SB1
۰/۰۹۵	۰/۱۶۷	۰/۳۳۳	۰/۰۹۵	۰/۱۰۰	۰/۳۳۳	۰/۰۸۰	۰/۰۵۶	۰/۰۸۳	۰/۰۶۹	۰/۰۸۳	۰/۱۳۳	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	برگشت‌پذیری	
۱/۱۵۳	۰/۱۲۱	۰/۰۲۴	۱/۱۶۴	۰/۳۲۵	۰/۰۲۶	۲/۰۸۰	۱/۲۹۵	۰/۶۹۰	۲/۱۲۵	۱/۱۴۶	۰/۴۲۰	۳/۳۰۹	۳/۳۰۹	آسیب‌پذیری (m)	
۰/۰۹۸	۰/۰۱۰	۰/۰۰۲	۰/۰۹۹	۰/۰۲۸	۰/۰۰۲	۰/۱۷۷	۰/۱۱۰	۰/۰۵۹	۰/۱۸۱	۰/۰۹۸	۰/۰۳۶	۰/۲۸۲	۰/۲۸۲	آسیب‌پذیری	
۴۸۶/۲	۹۷۲/۳	۱۶۲۰/۵	۴۸۳/۹	۹۶۷/۹	۱۶۱۳/۱	۷۷/۱	۱۵۴/۲	۲۵۷/۰	۴۰۶/۸	۸۱۳/۷	۱۲۵۶/۲	-	-	LCC (\$1000)	
۰/۶۲۲	۰/۸۰۰	۰/۸۵۶	۰/۶۲۲	۰/۷۳۳	۰/۸۵۶	۰/۵۸۹	۰/۶۶۷	۰/۷۴۴	۰/۵۱۱	۰/۵۵۶	۰/۶۱۱	۰/۴۸۹	۰/۴۸۹	اعتمادپذیری	SB2
۰/۰۵۹	۰/۱۱۱	۰/۱۵۴	۰/۰۵۹	۰/۰۸۳	۰/۱۵۴	۰/۰۵۴	۰/۰۶۷	۰/۰۸۷	۰/۰۶۸	۰/۰۷۵	۰/۰۸۶	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	برگشت‌پذیری	
۴/۶۶۰	۰/۸۷۱	۰/۳۳۲	۴/۶۸۳	۱/۹۰۰	۰/۳۴۸	۶/۱۴۴	۴/۲۰۷	۲/۴۱۳	۶/۷۸۸	۵/۲۸۵	۳/۲۴۷	۷/۸۶۰	۷/۸۶۰	آسیب‌پذیری (m)	
۰/۳۹۷	۰/۰۷۴	۰/۰۲۸	۰/۳۹۸	۰/۱۶۲	۰/۰۳۰	۰/۵۲۳	۰/۳۵۸	۰/۲۰۵	۰/۵۷۸	۰/۴۵۰	۰/۲۷۶	۰/۶۶۹	۰/۶۶۹	آسیب‌پذیری	
۵۳۹/۸	۱۰۷۹/۶	۱۷۹۹/۴	۵۳۷/۴	۱۰۷۴/۸	۱۷۹۱/۴	۹۸/۱	۱۹۶/۱	۳۳۶/۹	۴۳۹/۳	۸۷۸/۷	۱۴۶۴/۵	-	-	LCC (\$1000)	
۰/۵۳۳	۰/۷۳۳	۰/۷۸۹	۰/۵۳۳	۰/۶۶۷	۰/۷۷۸	۰/۵۰۰	۰/۶۰۰	۰/۷۰۰	۰/۳۸۹	۰/۴۳۳	۰/۵۰۰	۰/۳۸۹	۰/۳۸۹	اعتمادپذیری	SB3
۰/۰۷۱	۰/۰۸۳	۰/۱۰۵	۰/۰۷۱	۰/۰۶۷	۰/۱۰۰	۰/۰۶۷	۰/۰۵۶	۰/۰۷۴	۰/۰۵۵	۰/۰۵۹	۰/۰۶۷	۰/۰۳۶	۰/۰۳۶	برگشت‌پذیری	
۸/۴۹۹	۲/۷۵۵	۱/۶۰۸	۸/۵۳۳	۴/۸۳۸	۱/۵۶۸	۱۰/۳۴۲	۱/۶۳۴	۵/۰۰۲	۱۱/۶۰۱	۹/۶۵۰	۷/۳۸۵	۱۱/۷۵۲	۱۱/۷۵۲	آسیب‌پذیری (m)	
۰/۷۲۳	۰/۲۳۴	۰/۱۳۷	۰/۷۲۶	۰/۴۱۲	۰/۱۳۳	۰/۸۷۲	۰/۶۴۹	۰/۴۲۶	۰/۹۸۷	۰/۸۲۱	۰/۶۲۸	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	آسیب‌پذیری	
۴۴۶/۵	۸۹۲/۹	۱۴۸۸/۲	۴۴۴/۵	۸۸۸/۹	۱۴۸۱/۶	۸۱/۱	۱۶۲/۲	۲۷۰/۴	۳۶۳/۴	۷۲۶/۷	۱۲۱۱/۲	-	-	LCC (\$1000)	
۰/۸۳۳	۰/۹۷۸	۱/۰۰۰	۰/۸۳۳	۰/۹۱۱	۱/۰۰۰	۰/۷۸۹	۰/۸۳۳	۰/۸۸۹	۰/۷۵۶	۰/۸۰۰	۰/۸۸۹	۰/۷۶۷	۰/۷۶۷	اعتمادپذیری	SB4
۰/۰۶۷	۰/۵۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۶۷	۰/۱۲۵	۱/۰۰۰	۰/۰۵۳	۰/۰۶۷	۰/۱۰۰	۰/۰۹۱	۰/۱۱۱	۰/۱۰۰	۰/۰۹۵	۰/۰۹۵	برگشت‌پذیری	
۰/۹۵۷	۰/۰۱۰	۰/۰۰۰	۰/۹۶۵	۰/۱۳۸	۰/۰۰۰	۱/۶۷۱	۰/۹۱۸	۰/۳۸۲	۱/۶۵۸	۰/۸۶۹	۰/۲۵۱	۱/۸۷۲	۱/۸۷۲	آسیب‌پذیری (m)	
۰/۰۸۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۸۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۰	۰/۱۴۲	۰/۰۷۸	۰/۰۳۳	۰/۱۴۱	۰/۰۷۴	۰/۰۲۱	۰/۱۵۹	۰/۱۵۹	آسیب‌پذیری	
۴۱۷/۰	۸۳۴/۰	۱۳۹۰/۰	۴۱۵/۱	۸۳۰/۳	۱۳۸۳/۸	۷۵/۸	۱۵۱/۵	۲۵۲/۵	۳۳۹/۴	۶۷۸/۸	۱۱۳۱/۳	-	-	LCC (\$1000)	
۰/۷۱۱	۰/۸۴۴	۰/۸۶۷	۰/۷۱۱	۰/۷۷۸	۰/۸۶۷	۰/۶۷۸	۰/۷۴۴	۰/۸۰۰	۰/۶۲۲	۰/۶۶۷	۰/۷۱۱	۰/۶۸۹	۰/۶۸۹	اعتمادپذیری	SB5
۰/۰۷۷	۰/۱۴۳	۰/۱۶۷	۰/۰۷۷	۰/۱۰۰	۰/۱۶۷	۰/۰۶۹	۰/۰۸۷	۰/۱۱۱	۰/۰۸۸	۰/۱۰۰	۰/۱۱۵	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	برگشت‌پذیری	
۳/۵۹۶	۰/۹۶۱	۰/۴۵۸	۳/۶۱۲	۱/۶۵۰	۰/۴۷۵	۴/۵۰۳	۳/۲۴۶	۱/۹۹۴	۴/۹۵۱	۴/۰۲۰	۲/۷۲۱	۴/۳۰۷	۴/۳۰۷	آسیب‌پذیری (m)	
۰/۳۰۶	۰/۰۸۲	۰/۰۳۹	۰/۳۰۷	۰/۱۴۰	۰/۰۴۰	۰/۳۸۳	۰/۲۷۶	۰/۱۷۰	۰/۴۲۱	۰/۳۴۲	۰/۲۳۲	۰/۳۶۶	۰/۳۶۶	آسیب‌پذیری	
۲۸۳/۲	۷۶۶/۴	۱۲۷۷/۴	۳۸۱/۵	۷۶۳/۰	۱۲۷۱/۷	۶۹/۶	۱۳۹/۲	۲۳۲/۱	۳۱۱/۹	۶۲۳/۸	۱۰۳۹/۶	-	-	LCC (\$1000)	
۰/۹۵۶	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۹۵۶	۰/۹۷۸	۱/۰۰۰	۰/۹۲۲	۰/۹۴۴	۰/۹۵۶	۰/۹۳۳	۰/۹۵۶	۰/۹۸۹	۰/۹۰۰	۰/۹۰۰	اعتمادپذیری	SB6
۰/۲۵۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۲۵۰	۰/۵۰۰	۱/۰۰۰	۰/۱۴۳	۰/۲۰۰	۰/۲۵۰	۰/۱۶۷	۰/۲۵۰	۱/۰۰۰	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	برگشت‌پذیری	
۰/۰۹۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۹۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰	۰/۱۷۵	۰/۱۰۸	۰/۰۴۷	۰/۱۷۳	۰/۰۷۲	۰/۰۰۸	۰/۲۶۶	۰/۲۶۶	آسیب‌پذیری (m)	
۰/۰۰۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۸	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۱۵	۰/۰۰۹	۰/۰۰۴	۰/۰۱۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱	۰/۰۲۳	۰/۰۲۳	آسیب‌پذیری	
۳۵۸/۰	۷۱۶/۱	۱۱۹۳/۴	۳۵۶/۴	۷۱۲/۹	۱۱۸۸/۱	۶۵/۰	۱۳۰/۱	۲۱۶/۸	۲۹۱/۴	۵۸۲/۸	۹۷۱/۳	-	-	LCC (\$1000)	
۰/۸۸۹	۰/۹۶۷	۰/۹۸۹	۰/۸۸۹	۰/۹۵۶	۰/۹۸۹	۰/۸۶۷	۰/۹۱۱	۰/۹۲۲	۰/۸۷۸	۰/۹۰۰	۰/۹۳۳	۰/۸۶۷	۰/۸۶۷	اعتمادپذیری	SB7
۰/۲۰۰	۰/۳۳۳	۱/۰۰۰	۰/۲۰۰	۰/۲۵۰	۱/۰۰۰	۰/۱۶۷	۰/۱۲۵	۰/۱۴۳	۰/۱۸۲	۰/۲۲۲	۰/۳۳۳	۰/۱۶۷	۰/۱۶۷	برگشت‌پذیری	
۰/۴۲۷	۰/۰۳۹	۰/۰۰۳	۰/۴۲۹	۰/۱۷۹	۰/۰۰۳	۰/۷۲۸	۰/۵۸۳	۰/۳۰۲	۰/۷۸۱	۰/۴۵۲	۰/۱۸۰	۰/۹۷۵	۰/۹۷۵	آسیب‌پذیری (m)	
۰/۰۳۶	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰	۰/۰۳۷	۰/۰۱۵	۰/۰۰۰	۰/۰۶۲	۰/۰۵۰	۰/۰۲۶	۰/۰۶۶	۰/۰۳۸	۰/۰۱۵	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	آسیب‌پذیری	
۵۵۸/۸	۱۱۱۷/۷	۱۸۶۲/۸	۵۵۶/۳	۱۱۱۲/۷	۱۸۵۴/۵	۱۰/۱۵	۲۰۳/۰	۳۳۸/۴	۴۵۴/۸	۹۰۹/۷	۱۵۱۶/۱	-	-	LCC (\$1000)	
۰/۸۰۰	۰/۹۳۳	۰/۹۵۶	۰/۸۰۰	۰/۸۸۹	۰/۹۵۶	۰/۷۷۸	۰/۸۳۳	۰/۸۸۹	۰/۷۵۶	۰/۷۸۹	۰/۸۳۳	۰/۷۸۹	۰/۷۸۹	اعتمادپذیری	SB8
۰/۱۱۱	۰/۱۶۷	۰/۲۵۰	۰/۱۱۱	۰/۲۰۰	۰/۲۵۰	۰/۱۰۰	۰/۱۳۳	۰/۱۰۰	۰/۰۹۱	۰/۱۰۵	۰/۱۳۳	۰/۱۰۵	۰/۱۰۵	برگشت‌پذیری	
۱/۲۰۹	۰/۳۰۷	۰/۰۸۸	۱/۲۱۶	۰/۵۵۵	۰/۰۹۳	۱/۸۲۳	۱/۳۰۳	۰/۹۱۸	۲/۰۱۰	۱/۴۰۲	۰/۷۹۴	۱/۴۶۹	۱/۴۶۹	آسیب‌پذیری (m)	
۰/۱۰۳	۰/۰۲۶	۰/۰۰۸	۰/۱۰۳	۰/۰۴۷	۰/۰۰۸	۰/۱۵۵	۰/۱۱۱	۰/۰۷۸	۰/۱۷۱	۰/۱۱۹	۰/۰۶۸	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	آسیب‌پذیری	
۲۶۴/۱	۵۲۸/۱	۸۸۰/۲	۲۶۲/۹	۵۲۵/۸	۸۷۶/۳	۴۸/۰	۹۵/۹	۱۵۹/۹	۲۱۴/۹	۴۲۹/۸	۷۱۶/۴	-	-	LCC (\$1000)	

در شکل ۵ تغییرات شاخص‌های عملکردی در زیرحوضه‌های مختلف به ازای سناریوهای مختلف LID نمایش داده شده است. در شکل ۵ نیز به وضوح عملکرد بهتر LID ترکیبی در مقایسه با LIDهای منفرد به چشم می‌خورد. در بین سناریوهای مختلف GPR-H و

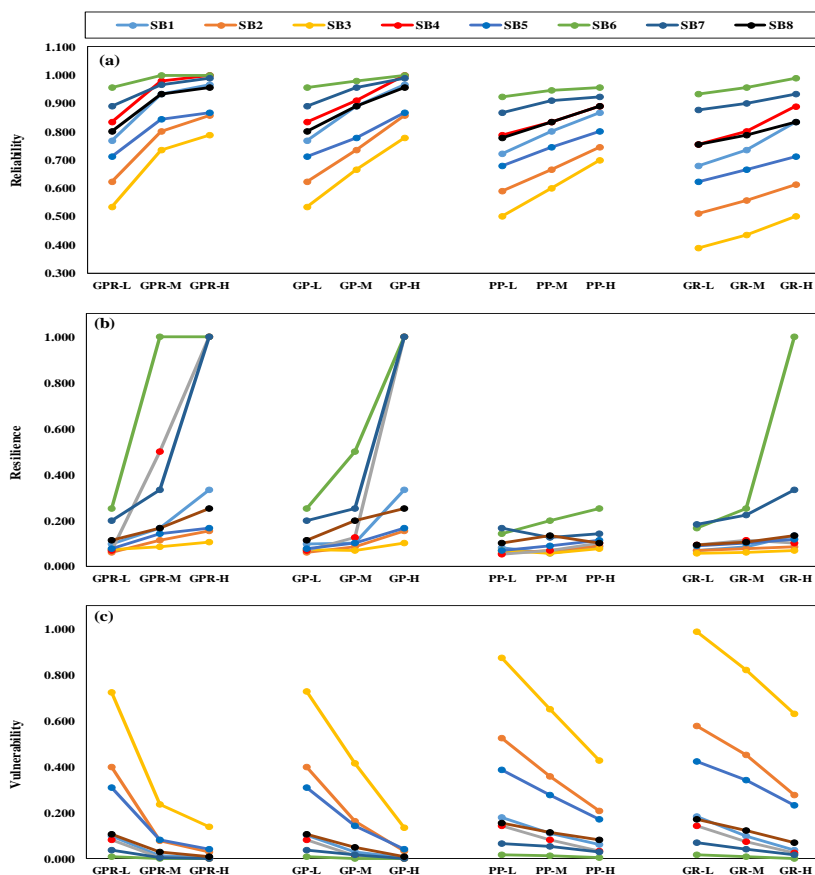
GP-H بهترین عملکرد و GR-L و PP-L ضعیف‌ترین عملکرد را از خود نشان دادند. با توجه به این شکل بیشترین تغییرات اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری به ازای سناریوهای مختلف در زیرحوضه SB3 و کمترین تغییرات این دو شاخص در زیرحوضه SB6 اتفاق افتاد. شاخص برگشت‌پذیری در زیرحوضه SB4، و پس از آن در SB7 بیشترین تغییرات و به ترتیب در زیرحوضه‌های SB3، SB5 و SB2 کمترین تغییرات را داشت. این تفاوت رفتار سه شاخص عملکردی نشان دهنده اهمیت و اثرگذاری آن‌ها در تحلیل‌های چندمعیاره برای انتخاب سناریوی برتر توان‌بخشی شبکه سیلاب است، که می‌تواند در کنار هم بازتاب جنبه‌های متفاوتی از عملکرد پویای سناریوهای مختلف باشند.

جدول ۷. پارامترهای آماری شاخص‌های عملکردی در زیرحوضه‌های مختلف

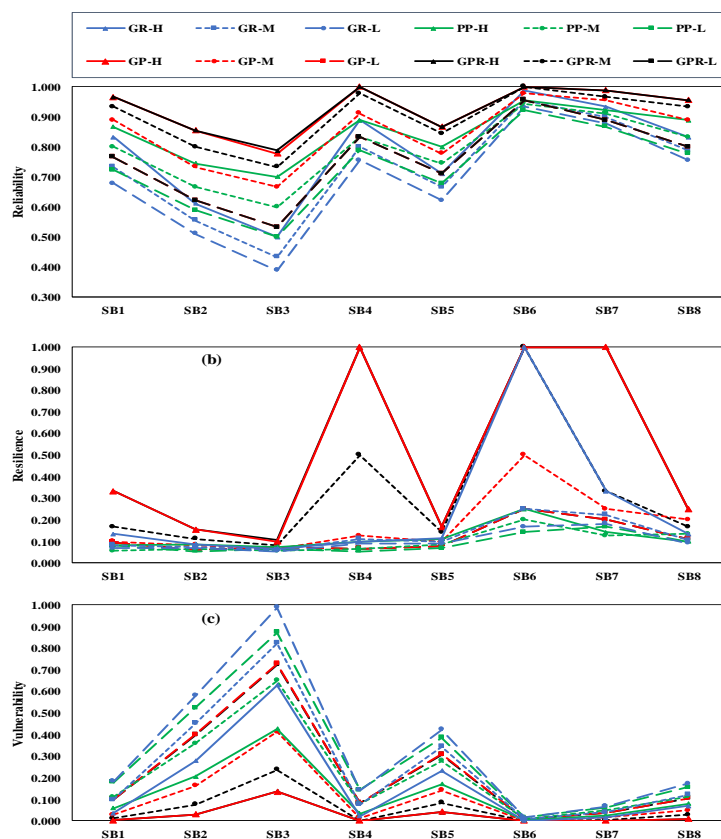
شاخص عملکردی	پارامتر	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8
میانگین		۰/۸۲۷	۰/۶۸۱	۰/۵۹۶	۰/۸۷۶	۰/۷۵۰	۰/۹۶۶	۰/۹۲۴	۰/۸۵۱
اعتماد پذیری	انحراف معیار	۰/۰۹۸	۰/۱۱۶	۰/۱۳۵	۰/۰۸۳	۰/۰۸۱	۰/۰۲۷	۰/۰۴۳	۰/۰۷۱
	ضریب تغییرات	۰/۱۱۹	۰/۱۷۰	۰/۲۲۶	۰/۰۹۵	۰/۱۰۸	۰/۰۲۸	۰/۰۴۶	۰/۰۸۴
برگشت پذیری	میانگین	۰/۱۳۶	۰/۰۸۸	۰/۰۷۳	۰/۲۷۳	۰/۱۰۸	۰/۵۰۱	۰/۳۴۶	۰/۱۴۶
	انحراف معیار	۰/۰۹۷	۰/۰۳۵	۰/۰۱۶	۰/۳۶۰	۰/۰۳۴	۰/۳۷۹	۰/۳۱۲	۰/۰۵۸
	ضریب تغییرات	۰/۷۱۳	۰/۳۹۲	۰/۲۲۱	۱/۳۱۷	۰/۳۱۲	۰/۷۵۶	۰/۹۰۲	۰/۳۹۵
آسیب پذیری	میانگین	۰/۰۷۵	۰/۲۹۰	۰/۵۶۲	۰/۰۵۵	۰/۲۲۸	۰/۰۰۶	۰/۰۲۹	۰/۰۸۳
	انحراف معیار	۰/۰۶۳	۰/۱۹۰	۰/۲۸۹	۰/۰۵۲	۰/۱۳۲	۰/۰۰۶	۰/۰۲۳	۰/۰۵۴
	ضریب تغییرات	۰/۸۳۷	۰/۶۵۵	۰/۵۱۵	۰/۹۳۹	۰/۵۸۰	۱/۰۰۸	۰/۷۹۰	۰/۶۴۹
	میانگین	۷۶۷/۴	۸۵۲/۲	۷۰۴/۸	۶۵۸/۳	۶۰۵/۰	۵۶۵/۲	۸۸۲/۲	۴۱۶/۹
هزینه بهره برداری	انحراف معیار	۵۴۵/۸	۵۹۵/۳	۴۹۲/۴	۴۵۹/۹	۴۲۲/۶	۳۹۴/۸	۶۱۶/۳	۲۹۱/۲
	ضریب تغییرات	۰/۷۱۱	۰/۶۹۹	۰/۶۹۹	۰/۶۹۹	۰/۶۹۹	۰/۶۹۹	۰/۶۹۹	۰/۶۹۹

در پژوهش‌های پیشین مرتبط با تحلیل‌های چندمعیاره LIDها نظیر سانگ و چونگ [Song; and Chung, 2017] و لی و همکاران [Li et al., 2019] از شاخص‌هایی چون کاهش عمق سیلگیری یا حجم رواناب یا تاخیر در زمان دبی اوج، که به طور مستقیم از خروجی مدل هیدرولوژیکی - هیدرولیکی قابل استخراج است، به عنوان شاخص استفاده شده بود. در این پژوهش جایگزین کردن این شاخص‌ها با شاخص‌های عملکردی مطرح و دنبال شد. در این جا برخی مزایای استفاده از شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری به جای شاخص‌های مستقیم بررسی می‌شود. به عنوان نمونه اگر به پارامترها و شاخص‌های مختلف دو سناریوی GP-L و GR-H در جدول ۵ و ۶ در زیرحوضه SB3 توجه شود، ملاحظه می‌شود که اگر قرار بود شاخص بیشینه عمق سیلگیری برای انتخاب سناریوی برتر از بین این دو سناریو، مورد استفاده قرار گیرد، سناریوی GR-H به خاطر بیشینه عمق سیلگیری (۰/۸۹۳ متر) کمتر بر GP-L (با بیشینه عمق سیلگیری ۱/۰۶۳ متر) برتری داشت. در حالی که سناریوی GP-L از نظر دو شاخص اعتمادپذیری و برگشت‌پذیری بر GR-H برتری داشته و تنها در شاخص آسیب‌پذیری ضعف دارد. همین موضوع در مورد دو سناریوی GP-M و PP-H در زیرحوضه SB5 هم صادق است، یعنی بر مبنای بیشینه عمق سیلگیری GP-M با مقدار ۰/۵۸۴ متر بر PP-H با مقدار ۰/۶۵۴ متر برتری دارد اما از نظر دو شاخص عملکردی اعتمادپذیری و برگشت‌پذیری PP-H بر GP-M برتری دارد.

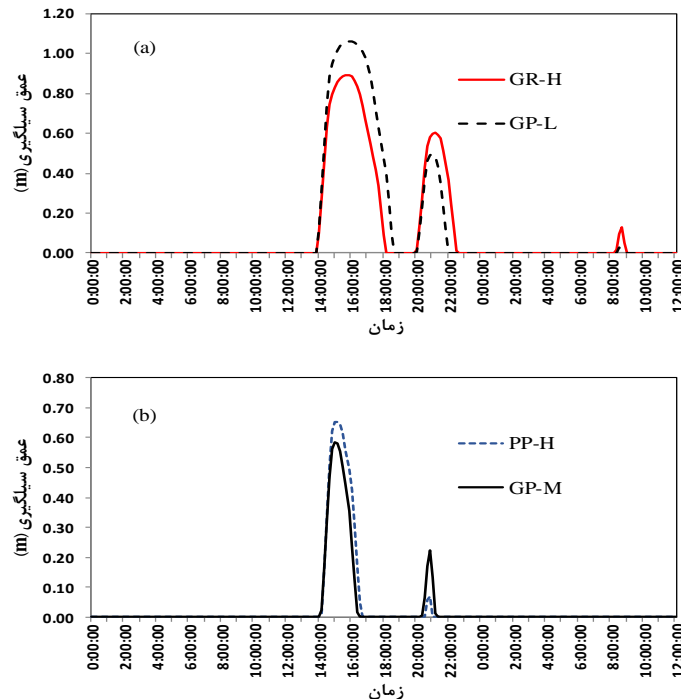
برای روشن‌تر شدن موضوع، سری زمانی عمق سیلگیری گره J3 در خروجی زیرحوضه SB3 برای دو سناریوی GP-L و GR-H و سری زمانی عمق سیلگیری گره J5 در خروجی زیرحوضه SB5 برای دو سناریوی GP-M و PP-H در شکل ۶ نمایش داده شده است. مطابق شکل (a) - ۶ مدت زمان سیلگیری GP-L نسبت به GR-H کوتاه‌تر بود، در حالی که اوج عمق سیلگیری آن بیشتر بود. همین روند در شکل (b) - ۶ در گره خروجی زیرحوضه SB5 در مورد سناریوی PP-H در مقایسه با سناریوی GP-M مشاهده می‌شود به این معنی که تداوم سیلگیری GP-M نسبت به PP-H طولانی‌تر است در حالی که بزرگی سیلگیری لحظه‌ای PP-H نسبت به GP-M بیش‌تر است. آشکار است که تصمیم‌گیری و قضاوت بر مبنای توزیع زمانی سیلگیری نسبت به تصمیم‌گیری بر مبنای یک مقطع زمانی با بیشینه مقدار سیلگیری، دقیق‌تر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شاخص‌های عملکردی به خاطر بازتاب پویا، کل‌نگر و جامع‌تر وضعیت سیلگیری شبکه نسبت به شاخص‌های مستقیم و جزئی‌نگر ارجحیت داشته و به تصمیم‌گیری مبتنی بر اطلاعات بیشتر منجر خواهد شد.



شکل ۴. تغییرات شاخص‌های عملکردی به ازای تغییر سطح پوشش LIDها در زیرحوضه‌های مختلف: (a) اعتمادپذیری، (b) برگشت‌پذیری و (c) آسیب‌پذیری



شکل ۵. تغییرات شاخص‌های عملکردی در زیر حوضه‌های مختلف به ازای سناریوهای مختلف LID: (a) اعتمادپذیری، (b) برگشت‌پذیری و (c) آسیب‌پذیری



شکل ۶. سری زمانی عمق سیل گیری (a): گره J3 در خروجی زیرحوضه SB3 در دو سناریوی GP-M و PP-H (b): گره J5 در خروجی زیرحوضه SB5 در دو سناریوی GP-H و PP-H

جدول ۸. وزن شاخص‌های تصمیم‌گیری به روش آنتروپی

زیرحوضه	اعتمادپذیری	برگشت پذیری	آسیب‌پذیری	هزینه دوره بهره‌برداری
SB1	۰/۰۰۷۹۳	۰/۲۳۶۸۲	۰/۴۵۱۱۴	۰/۳۰۴۱۱
SB2	۰/۰۲۳۹۷	۰/۱۱۷۵۴	۰/۴۲۹۴۲	۰/۴۲۹۰۶
SB3	۰/۰۵۶۵۸	۰/۰۵۰۸۱	۰/۳۳۲۴۵	۰/۵۶۰۱۶
SB4	۰/۰۰۳۴۹	۰/۵۲۵۸۷	۰/۲۷۰۹۴	۰/۱۹۹۷۰
SB5	۰/۰۱۱۵۹	۰/۰۹۳۲۷	۰/۳۸۷۸۷	۰/۵۰۸۲۸
SB6	۰/۰۰۰۴۰	۰/۲۸۶۶۹	۰/۴۴۷۴۷	۰/۲۶۵۴۳
SB7	۰/۰۰۱۱۱	۰/۳۲۹۹۶	۰/۴۰۱۲۹	۰/۲۶۷۶۴
SB8	۰/۰۰۷۰۶	۰/۱۴۷۰۴	۰/۳۲۴۹۴	۰/۵۲۰۹۶

### ارزیابی وزن شاخص‌ها

وزن‌دهی شاخص‌های تصمیم‌گیری با روش آنتروپی و بردار ویژه انجام شد. در روش آنتروپی وزن‌دهی بر مبنای محتوای ماتریس تصمیم‌گیری انجام می‌شود. از آن‌جا که برای هر زیرحوضه یک ماتریس تصمیم‌گیری وجود دارد، بنابراین در زیرحوضه‌های مختلف وزن شاخص‌ها متفاوت است. در جدول ۸ مقادیر وزن چهار شاخص تصمیم‌گیری برای هشت زیرحوضه مورد مطالعه ارائه شده است. از این وزن‌ها در تحلیل‌های چندمعیاره به روش تاپسیس استفاده شد.

مقدار وزن شاخص‌ها در روش بردار ویژه با استفاده از مقایسه‌های زوجی، بر مبنای قضاوت تصمیم‌گیرنده در مورد اهمیت نسبی شاخص‌ها و با امتیاز عددی یک تا نه، به ترتیب برای اهمیت مساوی تا اهمیت مطلق، تعیین می‌شود. در این پژوهش امتیازات شاخص‌های تصمیم‌گیری، با ترتیب اولویت امتیازی به صورت اعتمادپذیری با امتیاز پنج، آسیب‌پذیری با امتیاز سه، هزینه دوره بهره‌برداری با امتیاز دو و برگشت‌پذیری با امتیاز یک، در نظر گرفته شد. در این امتیازدهی به هیچ‌یک از شاخص‌ها برتری مطلق داده نشد. بر مبنای این امتیازها ماتریس مقایسه‌های زوجی شاخص‌های تصمیم‌گیری تهیه و بر پایه آن مقادیر وزن شاخص‌ها به روش بردار ویژه برای اعتمادپذیری ۰/۴۸۲۹، آسیب‌پذیری ۰/۲۷۲۰، هزینه دوره بهره‌برداری ۰/۱۵۷۰ و برای برگشت‌پذیری ۰/۰۸۸۲ محاسبه شد. از این وزن‌ها در تحلیل‌های چند شاخصه به روش AHP و تخصیص خطی استفاده شد.

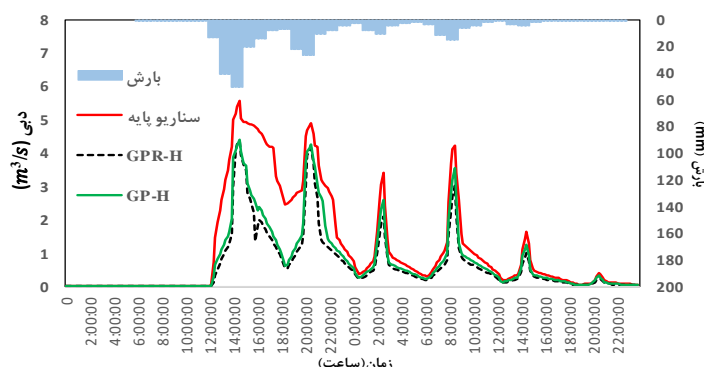
### رتبه‌بندی سناریوها

پس از اجرای مدل AHP بر اساس هزینه دوره بهره‌برداری، اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری، رتبه‌بندی سناریوهای ۱۲ گانه در هشت زیرحوضه مورد مطالعه مشخص شد. نتایج این رتبه‌بندی در جدول ۹ ارائه شده است. مطابق جدول ۹، سناریوی GPR-H متشکل از بام سبز، سنگفرش نفوذپذیر و بشکه‌باران با سطح اشغال زیاد در پنج زیرحوضه و سناریوی GP-H متشکل از بام سبز، سنگفرش نفوذپذیر با سطح اشغال زیاد در سه زیرحوضه به عنوان سناریوی برتر انتخاب شدند. این نتیجه نشان می‌دهد که روش AHP، با در نظر گرفتن وزن نهایی معیارها، حتی با وجود هزینه دوره بهره‌برداری زیاد در این سناریوها اولویت را به سناریوهایی با سطح پوشش زیاد LID داده است.، قرارگیری پرتکرار این دو سناریو در رتبه‌های اول تا سوم در زیرحوضه‌های مختلف، برتری آشکار آن‌ها را از منظر شاخص‌های تصمیم‌گیری تایید می‌کند. توجه این رتبه‌بندی را می‌توان در اولویت‌بندی معیارها بر اساس مقایسه‌های زوجی و بردار ویژه جستجو کرد. مطابق این وزندهی، معیارهای اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری در اولویت اول و دوم اهمیت قرار گرفتند، در حالی که هزینه دوره بهره‌برداری در اولویت سوم بود. در نتیجه، سناریوهایی که به دلیل سطح اشغال زیاد، عملکرد بهتری در معیارهای با اولویت بالاتر (مانند اعتمادپذیری) داشتند، موفق به کسب امتیاز نهایی بالاتری شدند و نقش سطح اشغال زیاد (H) در برتری سناریوها مشهود است.

برای بررسی عینی عملکرد سناریوهای برتر، هیدروگراف سیلاب خروجی از کل شبکه برای دو سناریوی GPR-H و GP-H با سناریوی پایه (بدون LID) در شکل ۷ مقایسه شده است. اگرچه نتایج AHP برتری این دو سناریو را تایید می‌کند، شکل ۷ نشان می‌دهد که عملکرد هیدرولوژیکی - هیدرولیکی آن‌ها بسیار به هم نزدیک است. مهم‌ترین تمایز مشاهده شده، مربوط به حجم رواناب خروجی است؛ به طوری که سناریوی GPR-H به دلیل وجود بشکه‌های باران، علیرغم سطح اشغال کم این LID، توانسته است با ذخیره بخشی از رواناب، حجم خروجی را به طور موثرتری کاهش دهد. این مشاهده حاکی از آن است که در صورت تخصیص فضای بیشتر به بشکه باران، می‌توان بهبود قابل توجه عملکرد کلی شبکه را انتظار داشت.

جدول ۹. رتبه بندی سناریوها به روش AHP در هر یک از زیرحوضه‌ها

رتبه	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8
۱	GPR-H	GPR-H	GP-H	GP-H	GPR-H	GPR-M	GP-H	GPR-H
۲	GP-H	GP-H	GPR-H	GPR-H	GP-H	GP-H	GPR-H	GP-H
۳	PP-L	PP-L	PP-L	PP-L	PP-L	GPR-H	PP-L	PP-L
۴	GPR-M	GPR-M	GPR-M	PP-M	GPR-M	PP-L	PP-M	GPR-M
۵	PP-M	PP-H	PP-H	GPR-M	PP-M	PP-M	GPR-M	PP-M
۶	PP-H	PP-M	PP-M	PP-H	PP-H	GR-H	PP-H	PP-H
۷	GP-M	GP-M	GP-M	GP-M	GP-M	PP-H	GR-L	GP-M
۸	GR-H	GP-L	GPR-L	GP-L	GP-L	GP-M	GP-L	GP-L
۹	GP-L	GPR-L	GP-L	GPR-L	GPR-L	GR-L	GP-M	GPR-L
۱۰	GPR-L	GR-H	GR-H	GR-L	GR-H	GP-L	GPR-L	GR-H
۱۱	GR-L	GR-L	GR-L	GR-H	GR-L	GPR-L	GR-H	GR-L
۱۲	GR-M	GR-M	GR-M	GR-M	GR-M	GR-M	GR-M	GR-M



شکل ۷. مقایسه هیدروگراف سیلاب خروجی کل شبکه در سناریوی پایه با دو سناریوی برتر پرتکرار در روش AHP و تخصیص خطی

اجرای تحلیل چندمعیاره به روش تخصیص خطی برای رتبه‌بندی سناریوهای ۱۲ گانه در هشت زیرحوضه، نتایج جدول ۱۰ را به دنبال داشت. این روش نیز مشابه AHP، در بیشتر زیرحوضه‌ها اولویت بالایی را به سناریوهای GPR-H و GP-H اختصاص داد، اگرچه در ترتیب رتبه‌بندی تفاوت‌های جزئی با AHP مشاهده شد. بر اساس نتایج تخصیص خطی، سناریوی GP-H در هفت زیرحوضه به عنوان گزینه برتر انتخاب شد و تنها در زیرحوضه SB3 سناریوی GPR-H در اولویت اول قرار گرفت. علیرغم اختلافات جزئی در نتایج دو روش تخصیص خطی و AHP، نقش تاثیرگذار قضاوت تصمیم‌گیرنده در رتبه‌بندی سناریوها در هر دو روش مشهود است. این شباهت را می‌توان به چگونگی محاسبه وزن شاخص‌ها و اهمیت کمتر هزینه دوره بهره‌برداری نسبت به معیارهای اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری در هر دو روش نسبت داد. برای مقایسه عملکرد کلی سناریوهای برتر شناسایی شده توسط روش تخصیص خطی با سناریوی پایه، می‌توان به شکل ۷ مراجعه کرد، چرا که سناریوهای برتر در این روش همان GPR-H و GP-H بودند که در روش AHP نیز برتری مشابهی داشتند.

در مقابل، روش تاپسیس با استفاده از وزن‌دهی به روش آنتروپی اجرا شد. نتایج این تحلیل که در جدول ۱۱ ارائه شده است، الگوی متفاوتی را در رتبه‌بندی سناریوها نشان می‌دهد. بر خلاف دو روش قبلی، تاپسیس برتری را به سناریوهای متشکل از LIDهای منفرد با سطوح اشغالی متنوع داد. این امر با حضور پرتکرار سناریوهای GR و PP در بین رتبه‌های اول تا سوم در زیرحوضه‌های مختلف مشهود است. بررسی مقادیر شاخص‌های این سناریوها در جدول ۶ و شکل ۵ نشان می‌دهد که سناریوهای برتر در روش تاپسیس عمدتاً به دلیل برتری در شاخص‌های آسیب‌پذیری و هزینه دوره بهره‌برداری انتخاب شدند. این شاخص‌ها با توجه به وزن بیشتری که توسط روش آنتروپی به آن‌ها اختصاص یافته بود، تاثیر تعیین‌کننده‌ای در برتری سناریوهای منتخب داشتند.

جدول ۱۰. رتبه‌بندی سناریوها به روش تخصیص خطی در هر یک از زیرحوضه‌ها

رتبه	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8
۱	GP-H	GP-H	GPR-H	GP-H	GP-H	GP-H	GP-H	GP-H
۲	GPR-H	GPR-H	GP-H	GPR-H	GPR-H	GPR-H	GPR-H	GPR-H
۳	GPR-M	GPR-M	GPR-M	GPR-M	GPR-M	GPR-M	GPR-M	GPR-M
۴	GP-M	PP-H	PP-H	GP-M	PP-H	GR-H	GP-M	PP-H
۵	PP-H	GP-M	GP-M	GR-H	GP-M	GP-M	GR-H	GP-M
۶	GR-H	PP-M	PP-M	PP-H	PP-M	GR-M	PP-H	GR-H
۷	PP-M	GP-L	GP-L	PP-M	GR-H	PP-H	PP-M	PP-M
۸	GP-L	GPR-L	GPR-L	GP-L	GP-L	GP-L	GR-M	GP-L
۹	GPR-L	GR-H	GR-H	GPR-L	GPR-L	GPR-L	GP-L	GPR-L
۱۰	GR-M	PP-L	PP-L	GR-M	PP-L	PP-M	GPR-L	GR-M
۱۱	PP-L	GR-M	GR-M	PP-L	GR-M	GR-L	GR-L	PP-L
۱۲	GR-L	GR-L	GR-L	GR-L	GR-L	PP-L	PP-L	GR-L

برای مقایسه عملکرد کلی سناریوهای برتر رتبه‌بندی تاپسیس با سناریوی پایه (بدون LID)، هیدروگراف سیلاب خروجی از کل شبکه در دو سناریوی GR-H و PP-M در مقابل هیدروگراف خروجی سناریوی پایه در شکل ۸ ترسیم شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که اگرچه این دو سناریو تأثیر متوسطی بر کاهش سیلاب خروجی داشته‌اند، اما به دلیل هزینه بهره‌برداری پایین‌تر در مقایسه با سناریوهای ترکیبی و در کنار عملکرد قابل قبول، توانسته‌اند رتبه‌های برتر را در زیرحوضه‌های مختلف به دست آورند.

تفاوت چشمگیر در نتایج رتبه‌بندی روش تاپسیس در مقایسه با روش‌های AHP و تخصیص خطی (که در جداول ۹، ۱۰ و ۱۱ منعکس شده) عمدتاً ناشی از تفاوت در مبانی وزندهی این روش‌ها است. همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، وزن اختصاص‌یافته به شاخص اعتمادپذیری توسط روش آنتروپی در تمامی زیرحوضه‌ها بسیار ناچیز بوده که این امر نقش این شاخص را در فرآیند تصمیم‌گیری به روش تاپسیس به شدت کمرنگ کرده است. وزن کم این شاخص به‌طور مستقیم به پراکندگی بسیار محدود مقادیر آن در بین سناریوهای ۱۲ گانه در هر زیرحوضه (جدول ۷)، مربوط می‌شود. در روش آنتروپی، وزن هر شاخص بر اساس میزان پراکندگی (آنتروپی) مقادیر آن در بین گزینه‌ها تعیین می‌گردد. هرچه پراکندگی مقادیر یک شاخص کمتر باشد، وزن کوچک‌تری به آن تخصیص می‌یابد؛ زیرا قدرت تمایزگذاری کمتری بین سناریوها دارد. در واقع وزن ناچیز شاخص اعتمادپذیری در روش آنتروپی، بازتابی از پراکندگی محدود داده‌های این شاخص در ماتریس تصمیم‌گیری بود، نه بی‌اهمیتی آن در ارزیابی عملکرد شبکه. نکته حائز اهمیت در نتایج تاپسیس، تأثیر حذف عملی

شاخص اعتمادپذیری (به دلیل وزن ناچیز) بر نتیجه نهایی رتبه‌بندی است، که منجر به برتری سناریوهایی با عملکرد کلی ضعیف‌تر شده است. این موضوع به وضوح اهمیت به کارگیری مجموعه‌ای جامع و متنوع از شاخص‌های عملکردی را در ارزیابی سناریوهای مختلف نشان می‌دهد و بر سودمندی به کارگیری تحلیل چندمعیاره با در نظر گرفتن شاخص‌های گوناگون برای ارزیابی و انتخاب بهینه LIDها تأکید دارد.

برای مقایسه نهایی سه روش تحلیل چندشاخصه، سناریوی رتبه اول هر روش در هر زیرحوضه استخراج و در SWMM شبیه‌سازی شد. عملکرد این سناریوها از منظر کاهش حجم رواناب و دبی اوج نسبت به سناریوی پایه مورد ارزیابی قرار گرفت، که نتایج کمی آن در جدول ۱۲ ارائه شده است. همچنین هزینه دوره بهره‌برداری گزینه برتر هر روش نیز در جدول ۱۲ درج شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، گزینه برتر روش AHP در مقایسه با گزینه‌های برتر روش‌های تاپسیس و تخصیص خطی، کاهش بسیار قابل توجهی هم در دبی پیک و هم در حجم رواناب خروجی ایجاد کرده است. این برتری عملکردی، حاکی از توانایی بالاتر روش AHP در انتخاب ترکیب و سطح تحت پوشش بهینه LIDها برای ارتقای کارایی شبکه است. این مزیت به ویژه هنگامی پررنگ‌تر می‌شود که هزینه دوره بهره‌برداری گزینه برتر روش AHP را با گزینه برتر روش تخصیص خطی مقایسه کنیم؛ به طوری که سناریوی منتخب AHP، علاوه بر عملکرد برتر، ۴۵۴ هزار دلار ارزان‌تر نیز تمام شده است. این عملکرد مطلوب از طریق مقایسه هیدروگراف‌های خروجی کل شبکه برای گزینه‌های برتر سه روش، که در شکل ۹ ارائه شده، به وضوح قابل تأیید است.

جدول ۱۱. رتبه‌بندی سناریوها به روش تاپسیس در هر یک از زیرحوضه‌ها

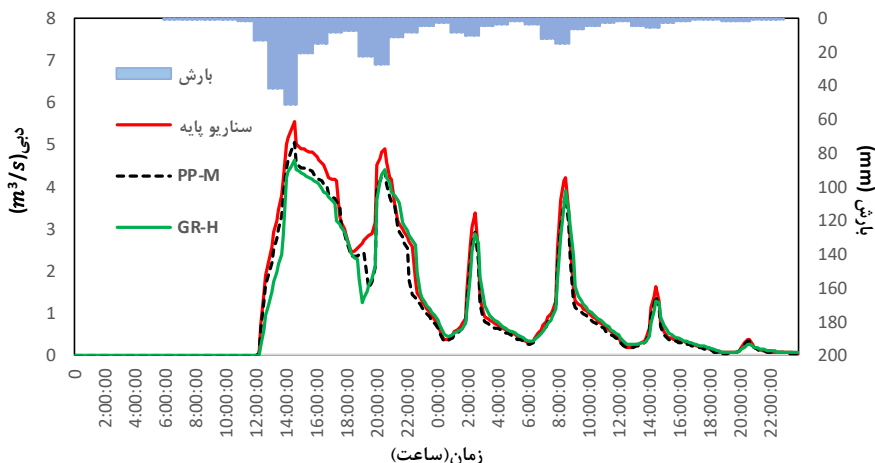
رتبه	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8
۱	GP-H	GR-M	GR-H	GP-L	GR-H	GP-H	PP-L	GR-H
۲	GR-H	GR-H	GR-M	PP-M	GR-M	PP-M	GR-H	GR-M
۳	PP-H	PP-M	GP-H	PP-H	PP-L	GR-L	PP-H	PP-L
۴	GP-L	GPR-L	GPR-L	GPR-L	GPR-L	GPR-H	GPR-L	GPR-L
۵	PP-L	GP-M	GPR-M	GPR-H	GPR-M	PP-H	GP-H	GPR-M
۶	PP-M	GP-H	GPR-H	PP-L	GPR-H	PP-L	PP-M	GPR-H
۷	GPR-H	GP-L	PP-H	GR-H	GP-H	GP-M	GP-L	GP-M
۸	GP-M	PP-L	GR-L	GPR-M	GR-L	GPR-L	GP-M	PP-M
۹	GR-M	PP-H	GP-L	GP-H	PP-M	GR-H	GR-M	PP-H
۱۰	GPR-M	GPR-H	PP-M	GR-M	GP-M	GP-L	GPR-H	GP-L
۱۱	GPR-L	GPR-M	PP-L	GR-L	GP-L	GPR-M	GPR-M	GP-H
۱۲	GR-L	GR-L	GP-M	GP-M	PP-H	GR-M	GR-L	GR-L

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

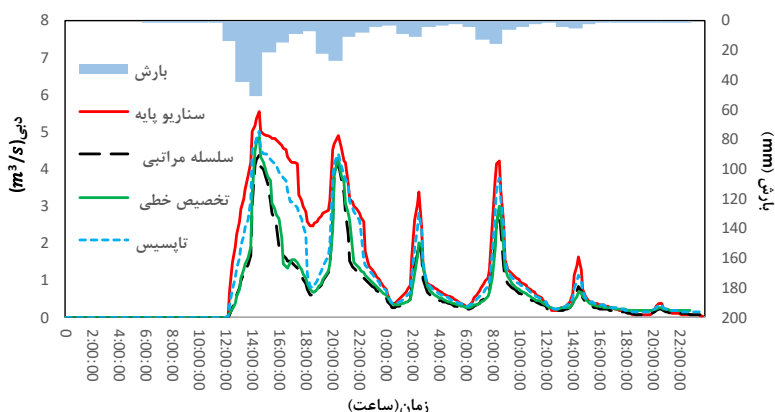
این پژوهش با هدف توسعه یک رویکرد نظام‌مند برای انتخاب بهینه راهبردهای توسعه کم‌اثر (LID) در شبکه‌های زهکشی شهری انجام شد. چارچوب پیشنهادی که تلفیقی از تحلیل چندمعیاره و شاخص‌های عملکردی پویا است، در یک شبکه ۶۲ هکتاری در شهر رشت مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌های پژوهش نشان داد که سناریوهای ترکیبی با پوشش زیاد (GPR-H) به بهبود همزمان تمام شاخص‌های عملکردی منجر شده و توانسته‌اند ۴۲/۲۶ درصد از حجم رواناب خروجی را کاهش داده و دبی اوج را ۱/۱۹ مترمکعب بر ثانیه کاهش دهند. تدوین چارچوب نوآورانه تعریف دوره عملکرد شبکه بر اساس آستانه شدت بارش طراحی، دقت ارزیابی شاخص‌های پویا را به طور معناداری افزایش داد.

مقایسه سه روش MCDM مورد استفاده نشان داد که انتخاب مکانیزم وزندهی تأثیر تعیین‌کننده‌ای در اولویت‌بندی نهایی دارد. به طوری که روش‌های AHP و تخصیص خطی با اتکا بر وزندهی کارشناسی، سناریوهای با عملکرد هیدرولیکی برتر را انتخاب کردند، در حالی که روش TOPSIS با مکانیزم وزندهی عینی، گزینه‌های ارزان‌تر را ترجیح داد. مقایسه نتایج AHP و تخصیص خطی در برابر روش تاپسیس در واقع یک تحلیل حساسیت کلان را در مورد تأثیر نظام وزن‌دهی بر تصمیم نهایی آشکار ساخت. در نهایت، روش AHP با تلفیق مناسب کارایی و هزینه به عنوان روش بهینه شناخته شد. این چارچوب می‌تواند ابزار مؤثری برای مدیران شهری در انتخاب راهبردهای LID باشد.

پیشنهاد می‌شود کاربرد چارچوب پیشنهادی در مقیاس‌های بزرگ‌تر شهری همراه با واسنجی و صحت‌سنجی پارامترهای مهم هیدرولیکی- هیدرولوژیکی و تحت سناریوهای تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گیرد. همچنین تلفیق معیارهای اجتماعی-زیست‌محیطی در کنار شاخص‌های فنی-اقتصادی و انجام تحلیل عدم قطعیت برای پارامترهای هیدرولوژیکی می‌تواند زمینه‌ساز پژوهش‌های آتی باشد. این توسعه‌ها می‌تواند کارایی چارچوب پیشنهادی را در شرایط واقعی‌تر و پیچیده‌تر شهری افزایش دهد.



شکل ۸. مقایسه هیدروگراف سیلاب خروجی شبکه در سناریوی پایه با دو سناریوی برتر روش تاپسیس



شکل ۹. مقایسه هیدروگراف سیلاب خروجی شبکه در گزینه‌های برتر منتخب روش‌های مختلف تحلیل چندمعیاره با سناریوی پایه

جدول ۱۲. مقایسه دبی پیک و حجم رواناب در خروجی کل شبکه در سناریو پایه و سناریوهای برتر روش‌های مختلف تحلیل چندمعیاره

روش تحلیل	هزینه دوره بهره‌برداری \$ ۱۰۰۰	مقدار دبی پیک (m <sup>3</sup> /sec)		کاهش دبی پیک (m <sup>3</sup> /sec)	کاهش دبی درصد	حجم رواناب (m <sup>3</sup> )		مقدار کاهش حجم	درصد کاهش حجم
		سناریو پایه	سناریو برتر			سناریو پایه	سناریو برتر		
تحلیل سلسله مراتبی	۱۱۰۱۳	۴/۳۸	۴/۳۸	۱/۱۹	۲۱/۳۶	۱۱۸۷۵۸	۱۱۸۷۵۸	۸۶۹۰۴	۴۲/۲۶
تخصیص خطی	۱۱۴۶۷	۴/۸۶	۴/۸۶	۰/۷۱	۱۲/۷۵	۱۳۷۵۴۴	۲۰۵۶۶۲	۶۸۱۱۸	۳۳/۱۲
تاپسیس	۷۱۶۴	۵/۰۴	۵/۰۴	۰/۵۳	۹/۵۲	۱۷۶۹۳۴	۲۸۷۲۸	۲۸۷۲۸	۱۳/۹۷

## ملاحظات اخلاقی

### حامی مالی

پژوهش حاضر هیچ گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

### مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دانشجو: تهیه و آماده‌سازی کدها و سناریوهای مدل‌سازی، اجرای مدل‌سازی‌ها و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله  
نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان در این پژوهش از هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی استفاده نکردند.

### بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

### تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

## REFERENCES

- Ahammed, F., Hewa, G. A., & Argue, J. R. (2012). Applying multi-criteria decision analysis to select WSUD and LID technologies. *Water Supply*, 12(6), 844-853. <https://doi.org/10.2166/ws.2012.060>
- Artina, S., Becciu, G., Maglionico, M., Paoletti, A., & Sanfilippo, U. (2005). Performance indicators for the efficiency analysis of urban drainage systems *Water science and technology*, 51(2), 109-118. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0038>
- Bai, Y., Zhao, N., Zhang, R., & Zeng, X. (2018). Storm Water Management of Low Impact Development in Urban Areas Based on SWMM. *Water*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/w11010033>
- Bista, A., Paus, K. A. H., & Seifert-Dähnn, I. (2025). Multi-objective optimization of nature-based solutions in urban stormwater management: A scoping review. *Environmental Modelling & Software*, 194, 106659. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106659>
- Butler, D., & Davies, J. W. (2011). *Urban drainage* (3rd Edition ed.). Crc Press. <https://doi.org/10.1201/9781315272535>
- Chae, S. T., Chung, E.-S., & Jiang, J. (2024). Enhancing Water Cycle Restoration through LID Practices Considering Climate Change: A Study on Permeable Pavement Planning by an Iterative MCDM Model. *Water Resources Management*, 38(9), 3413-3428. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03821-z>
- Gironás, J., Roesner, L. A., Davis, J., Rossman, L. A., & Supply, W. (2009). *Storm water management model applications manual*. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and ...
- Hashimoto, Tsuyoshi, Stedinger, J. R., & P, L. D. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research* 18(1), 14-20. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00014>
- Huang, C.-L., Hsu, N.-S., Liu, H.-J., & Huang, Y.-H. (2018). Optimization of low impact development layout designs for megacity flood mitigation. *Journal of Hydrology*, 564, 542-558. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.044>
- Hunt, W. F., Traver, R. G., Davis, A. P., Emerson, C. H., Collins, K. A., & Stagge, J. H. (2010). Low Impact Development Practices: Designing to Infiltrate in Urban Environments. In N.-B. Chang (Ed.), *Effects of Urbanization on Groundwater* (pp. 308-343). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784410783.ch12>
- Jia, H., Yao, H., Tang, Y., Yu, S. L., Zhen, J. X., & Lu, Y. (2013). Development of a multi-criteria index ranking system for urban runoff best management practices (BMPs) selection. *Environ Monit Assess*, 185(9), 7915-7933. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3144-0>
- Joksimovic, D., & Alam, Z. (2014). *Cost Efficiency of Low Impact Development (LID) Stormwater Management Practices*. 16th Conference on Water Distribution System Analysis,,
- Lee, H., Woo, W., & Park, Y. S. (2020). A User-Friendly Software Package to Develop Storm Water



- Management Model (SWMM) Inputs and Suggest Low Impact Development Scenarios. *Water*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/w12092344>
- Lee, J.-m., Hyun, K.-h., Choi, J.-s., Yoon, Y.-j., & Geronimo, F. K. F. (2012). Flood reduction analysis on watershed of LID design demonstration district using SWMM5. *Desalination and Water Treatment*, 38(1-3), 255-261. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.664377>
- Li, Q., Wang, F., Yu, Y., Huang, Z., Li, M., & Guan, Y. (2019). Comprehensive performance evaluation of LID practices for the sponge city construction: A case study in Guangxi, China. *Journal of Environmental Management*, 231, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.024>
- Liao, K.-H. (2013). From flood control to flood adaptation: a case study on the Lower Green River Valley and the City of Kent in King County, Washington. *Natural Hazards*, 71(1), 723-750. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0923-4>
- Liu, T., Lawluyv, Y., Shi, Y., & Yap, P.-S. (2021). Low Impact Development (LID) Practices: A Review on Recent Developments, Challenges and Prospects. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(9). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05262-5>
- Luan, B., Yin, R., Xu, P., Wang, X., Yang, X., Zhang, L., & Tang, X. (2019). Evaluating Green Stormwater Infrastructure strategies efficiencies in a rapidly urbanizing catchment using SWMM-based TOPSIS. *Journal of Cleaner Production*, 223, 680-691. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.028>
- Movahedinia, M., Samani, J. M. V., Barakhasi, F., Taghvaeian, S., & Stepanian, R. (2019). Simulating the effects of low impact development approaches on urban flooding: a case study from Tehran, Iran. *Water Sci Technol*, 80(8), 1591-1600. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.412>
- Phillips, D., Jamwal, P., Lindquist, M., & Gronewold, A. (2022). Assessing catchment-scale performance of in-stream Provisional Green Infrastructure interventions for Dry Weather Flows. *Landscape and Urban Planning*, 226, 104448. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104448>
- Song, J.-Y., & Chung, E.-S. (2017). A Multi-Criteria Decision Analysis System for Prioritizing Sites and Types of Low Impact Development Practices: Case of Korea. *Water*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/w9040291>
- Taheri, P., Alavi Moghaddam, M. R., & Piadeh, F. (2025). Sustainability assessment of low-impact development methods for urban stormwater management: A multi-criteria decision-making approach. *Sustainable cities and society*, 118, 106025. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.106025>
- Zhang, J., Cao, X.-S., & Meng, X.-Z. (2007). Sustainable urban sewerage system and its application in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(2), 284-293. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.10.001>