



Journal of Environmental Studies

Vol. 48, No. 1, Spring 2022

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir
Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Multi- Criteria Prioritization of Green Infrastructure Practices and Their Combinations to Control Runoff in Tehran Metropolitan

Iman Saeedi¹, Ali Reza Mikaeili Tabrizi^{1*}, Abdolreza Bahremend², Abdolrassoul Salmanmahiny¹

1 Department of Environmental Sciences, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2 Department of Watershed Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Gorgan, Iran

DOI: 10.22059/JES.2022.335865.1008264

Document Type
Research Paper

Received
Desember 19,
2021

Accepted
March 27, 2021

Abstract

Urban green infrastructure (GI) development is a technique for reducing the consequences of urbanization on the hydrological cycle. This research aims to propose proper GI practices for urban areas of Tehran metropolitan using multi-criteria decision-making methods, including the Analytical Hierarchy Process (AHP) and TOPSIS. The framework of this research has seven main steps. Firstly, relevant criteria and sub-criteria were selected. Secondly, these criteria were weighted with a panel of nine experts with various fields related to the research from different viewpoints using AHP. A sensitivity analysis was conducted using PYSIS software to avoid possible bias. In the third step, all GI practices' suitability was evaluated and prioritized using the weight of selected criteria and sub-criteria. Finally, different scenarios for combining practices were defined, assessed, and prioritized. The results indicate that the porous pavement is the most suitable GI practice for Tehran, while green swale received the weakest. The results also revealed that infiltration trench, bio-retention bed, rainwater harvesting, retention pond, bio-retention pond, and green roof held the rank of second to seven of GI suitability. In terms of GI combination, ten essential GI combinations for the city of Tehran were proposed, including conveyance- detention, conveyance-restoration, conveyance-irrigation, detention- conveyance, detention- absorption, detention- irrigation, and absorption-irrigation. Finally, for each of the combination scenarios, GI combinations were proposed.

Keywords: Low impact development, Sustainable development, Urban hydrology, Analytical Hierarchy Process (AHP), TOPSIS

* Corresponding Author:

Email: amikaeili@gau.ac.ir

Introduction

Urban development disturbs the natural infiltration of runoff by creating impermeable surfaces. With the increase of impermeable levels in the watersheds, the volume of runoff also increases, and cities will be exposed to waterlogging and floods in the rainy season. Therefore, the level of groundwater resources is expected to have lowered gradually. Today's main policy to face this problem centers on using traditional flood systems like concrete channelization to convey runoff which increases the problem of groundwater recharge. So, it seems that Green Infrastructure Development (GID) could play a crucial role in the restoration of the disrupted hydrological cycle, lowering the runoff problem, and moving toward urban sustainability.

Reviewing the scientific literature on the use of green infrastructure to reduce hydrological disturbance in Iranian Cities, it is clear that scattered studies have been conducted to provide a plan for GID. Recent studies mostly focused on the hydrological benefits of green infrastructure development, and other environmental, social, and economic factors affecting the development of green infrastructure have been ignored. If we are determined to use green infrastructure to improve the hydrological performance of the city, we must inevitably identify and weigh other contributing factors for a multi-objective selection. In addition, prioritizing individual practices of green infrastructure may not be sufficient, as green infrastructures are generally synergistic in combination. Therefore, the main aim of this study is to achieve a framework for prioritizing green infrastructure practices and a combination of them to control runoff in Tehran. In this regard, the following objectives have been defined to achieve the main aim:

- Achieving appropriate criteria for selecting and prioritizing types of green infrastructure
- The weighting of selected criteria and sub-criteria
- Considering the importance of combining different forms of green infrastructure
- Achieving the best combination of green infrastructure based on multi-criteria decision making

Materials and methods

Study area

Tehran is a metropolitan area with about 730 km² and more than 8.5 million people, located in the south part of the Alborz Mountains. The city is comprised of 22 districts. The middle districts and downtown areas are urbanized, while the other districts have more open spaces and untouched lands. The slope of most parts of the city is about 3-9 percent, mainly from the north to the south. There are seven natural rivers streaming the city. These natural valley-rivers play important roles in natural ventilation and runoff conveying. Tehran has a diverse Land use. Apart from big green patches dispersed in the northern parts and the urban fringe areas, all patches of the city are manmade and impermeable.

Tehran has faced rapid growth in the current decades. Rapid urbanization has worsened the natural hydrological cycle and jeopardized this megacity of waterlogging and floods. Flood risk is one of the second most important natural hazards in Tehran. The city is coated with impermeable surfaces like buildings, highways, roads, and parking lots. In rainy seasons rainfall rapidly turns into runoff flowing throughout the streets and finally leaves the urban watershed. Consequently, the level of groundwater supply is expected to have diminished.

Methods

The framework of this research has four steps.

1. Selection of relevant criteria and sub-criteria
2. Determining the weight of each criterion and sub-criteria
3. Reaching of decision matrix,
4. Prioritization of green infrastructure practices
5. Development of combination scenarios
6. Prioritization of combination scenarios

Each step is elaborated on below.

This step was done by reviewing scientific sources and interviewing experts and specialists. At this step, we tried to select criteria for multivariate decision models that are more repetitive in scientific

texts and are by the study area's geographical, climatic conditions, and realities. Finally, the criteria in introducing green infrastructure in Tehran with the aim of runoff control includes five main criteria: runoff quantity control, runoff quality control, cost, compatibility with city structure, and adaptation to the climate of the city.

A combination of an expert panel and the Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to weight the selected criteria. A questionnaire was first prepared by the standard structure of pairwise comparison, which is common in the hierarchical analysis method. Then, 15 faculty members, consulting engineers, and researchers in various fields related to the development of green infrastructure in urban areas were surveyed. Then the weight of criteria, sub-criteria, and inconsistency coefficients were calculated. Meanwhile, the responses of 6 participants had an inconsistency coefficient of more than one-tenth and were excluded. Therefore, nine experts participated in the weighting process of the criteria. Expert Choice was used to calculate the weight of criteria and incompatibility coefficients.

To compile the decision matrix and achieve the ability of the studied green infrastructure types, a review of scientific literature was performed. At this step, we referred to studies that examined the ability of green infrastructure about each of the criteria.

At this stage, the TOPSIS method was used to prioritize green infrastructure. TOPSIS is a multi-criteria decision-making method programmed based on the similarity of the solution to the ideal solution and the distance from the non-ideal solution. This technique can be used to rank, compare different options, select the best option and determine the distances between options. Different forms of green infrastructure were prioritized based on the final decision matrix and the weight of the studied criteria. R (package topsis) was used to prioritize the alternatives .

Sensitivity analysis is performed to ensure results and confirm that the weighting is non-biased. The method is that values are added or subtracted to each indicator, and the model will run again with the changes made, and the results will be compared. In this study, PYSIS software was used to analyze the sensitivity of the results of this study. To ensure that the scores and weights were non-biased, sensitivity analysis was done with a 30% change in weights for 10,000 repetitions.

To combine different forms of green infrastructure, five main functions of green infrastructure for runoff management were identified, including infiltration, storage, conveyance, irrigation, and rainwater collection. Based on these performances, different scenarios for the combination of GI practices were identified and scored .

Equation 1 was used for prioritizing the combination scenarios.

$$A = (S1 \times D1) + (S2 \times D2)$$

Where A is the final score of each compound, S1 is the final score of the green infrastructure expressed in the row, D1 is the green infrastructure score expressed in the row in the runoff management process, S2 is the green infrastructure score expressed in the column, D2 is the green infrastructure score in the column in the runoff management process.

Discussion of Results

Results revealed that permeable pavement with a score of 0.756 is the most suitable, while green atmosphere with 0.342 points was selected as the most unsuitable form of green infrastructure for the city of Tehran. Infiltration trenches, rain beds, rainwater harvesting systems, detention ponds, bio-retention ponds, and green roofs were ranked second to seventh.

The sensitivity analysis results showed that with a 30% change in coefficients and 10,000 times of model implementation, we did not see much difference in the results of this research, and again permeable pavement has been introduced as the most appropriate option. The lack of change in the ranking of options in the sensitivity analysis indicated the low level of subjectivist bias.

In the next step, to achieve appropriate scenarios, a combination of different practices of green infrastructure from Formula 1 was used, and 112 possible combination scenarios were examined, scored, and ranked. Finally, three preferred scenarios for each combination based on the hydrological performance were proposed.

Conclusion

In this study, a framework was proposed to use multi-objective prioritization of different forms of green infrastructure to control runoff in Tehran. The results showed that the permeable pavement is the most suitable form of green infrastructure for Tehran, while the green swale is the most unsuitable. Infiltration trenches, rain gardens, rainwater collection reservoirs, ponds, biological ponds, and green roofs were ranked second to seventh. Also, to achieve the appropriate composition patterns of green infrastructure, the functions of different types of green infrastructure were divided into infiltration, storage, conveyance, irrigation, and rainwater collection and the combined scenarios of these Infrastructures were examined. This study proposed a suitable scenario of 30 green infrastructure combinations with different hydrological performances for development with other purposes.

اولویت‌بندی چند معیاره زیرساخت‌های سبز و ترکیب‌های آنها برای کنترل رواناب در کلان شهر تهران

ایمان سعیدی^۱، علیرضا میکائیلی تبریزی*^۱، عبدالرضا بهره مند^۲، عبدالرسول سلمان ماهینی^۱

۱. گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۲. گروه آب‌خیزداری، دانشکده مرتع و آب‌خیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۰۳

چکیده

توسعه زیرساخت‌های سبز شهری یکی از فونونی است که امروزه برای کنترل رواناب شهری و کاهش اثرات شهرنشینی بر چرخه هیدرولوژی طبیعی در دهه‌های اخیر معرفی شده است. این پژوهش بر آن است تا با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، انواع و ترکیب‌های مناسب زیرساخت‌های سبز شهری برای کنترل رواناب در شهر تهران را شناسایی کند و پیشنهاد دهد. چهارچوب کلی این تحقیق دارای چهار گام اساسی است. نخست معیارها و زیرمعیارهای تاثیرگذار انتخاب شدند. در گام دوم، پنل خبرگان متشکل از ۹ خبره با گرایش‌های تخصصی متفاوت و مرتبط با موضوع جهت بررسی موضوع تحقیق از زوایای مختلف شکل گرفت که حاصل آن دستیابی به وزن تاثیر معیارها و زیرمعیارها بود. جهت جلوگیری از سوگیری تحت تاثیر ذهنیت خبرگان، نتایج مورد حساسیت سنجی قرار گرفت. در مرحله سوم توان شکل‌های مختلف زیرساخت‌های سبز نسبت به معیارهای انتخابی با استفاده از مرور مطالعات پیشین تعیین گردید و زیرساخت‌های مطالعه شده مورد اولویت دهی قرار گرفتند. در نهایت سناریوهای مختلف ترکیب انواع زیرساخت‌های سبز بررسی و اولویت‌دهی شدند. نتایج نشان داد کف سازی نفوذپذیر مناسب‌ترین شکل زیرساخت سبز برای شهر تهران می‌باشد در حالی که جوی سبز نامناسب‌ترین است. در این پژوهش، به ترتیب ترانسه نفوذ، باغچه باران، مخزن جمع‌آوری آب باران، برکه نکه داشت، برکه نکه زیستی، و بام سبز در رتبه بندی دوم تا هفتم قرار گرفتند. همچنین جهت اطمینان از نتایج به دست آمده تحلیل حساسیت صورت گرفت. در مقوله ترکیب زیرساخت‌های سبز، ده ترکیب مهم برای شهر تهران مشتمل بر انتقال-نگه‌داشت، انتقال-ذخیره، انتقال-آبیاری، نکه داشت-انتقال، نکه داشت-جذب، جذب-انتقال، نکه داشت-ذخیره، نکه داشت-آبیاری، و جذب-آبیاری وجود دارد. در نهایت هر کدام از ترکیب سه سناریوی ترکیب زیرساخت‌های سبز پیشنهاد شد.

کلید واژه‌ها: توسعه‌های کم اثر، توسعه پایدار، هیدرولوژی شهری، تحلیل سلسله مراتبی، تاپسیس.

سراغاز

که بیش از ۵۵ درصد جمعیت کل کره زمین است و پیش بینی می‌شود که این نرخ در سال ۲۰۳۰ به ۶۰ درصد و ۲۰۵۰ میلادی به ۶۸ درصد کل جمعیت زمین برسد (United Nations, 2018). افزایش شهرنشینی در ایران نیز به شکل فزاینده‌ای وجود دارد. مطابق با آمارها از سال ۱۹۷۶ جمعیت شهری با رشد متوسط سالانه ۴/۳ درصد

توسعه صنعتی و شهرنشینی ارتباط بین انسان و محیط طبیعی را دچار تغییرات زیادی کرده است. افزایش سطح درآمد در شهرها منجر به شکل‌گیری موج‌های مهاجرت جمعیتی روستائیان با هدف دستیابی به سطح رفاهی بالاتر شده است. مطابق با گزارش سازمان ملل متحد نرخ شهرنشینی در جهان در سال ۲۰۱۶ به ۴/۲ میلیارد نفر رسید

مختلفی شده است که جدای از تفاوت‌های جزئی، همه آنها تقریباً یک هدف کلی را دنبال می‌کنند: کاهش اثرات زیان بار توسعه شهری به چرخه آب با نزدیک ساختن ساختار و عملکرد بسترهای شهری به محیط‌های طبیعی. مفهوم طراحی شهری حساس به آب، شهرهای اسفنجی، معرفی زیرساخت‌های سبز شهری، توسعه‌های کم‌اثر، و بهترین راهکارهای مدیریتی از نمونه‌های این کلید واژگان است که در دهه اخیر موضوع تحقیق‌های گسترده شده است.

زیرساخت‌های سبز رویکردی جامع در برنامه‌ریزی و توسعه شهری است که هدفش کاهش اثرات توسعه شهری بر محیط زیست و زیر حوضه آبخیز هست. زیرساخت سبز واژه‌ای انعطاف پذیر است و به سیستم‌ها و شکل‌های اطلاق می‌شود که از سیستم‌های طبیعی استفاده یا تقلید می‌کند تا منجر به جذب سطحی، تبخیر و یا استفاده مجدد از رواناب در منشا آن گردند. این قبیل شیوه‌های توسعه با هدف کنترل و کاهش رواناب در محل منشا رواناب و بازگشت جریان‌های طبیعی هیدرولوژیکی به حالت قبل از اختلال اطلاق می‌شوند. به نظر می‌رسد، استفاده از این تکنیک‌ها در راستای کاهش اثرات منفی کمی و کیفی رواناب در آبخیزهای شهری ابزار مناسبی است و شهرها را به پایداری نزدیک می‌کند (Bai et al., 2018). بام سبز، کف‌سازی نفوذپذیر، مخازن ذخیره آب باران، باغچه‌های باران، استخرهای ذخیره و جذب آب، جوی‌های سبز و تالاب‌های مصنوعی از شکل‌ها متداول زیرساخت‌های سبز هستند که توانایی بهبود عملکرد و حتی جابجایی با سیستم‌های زهکشی مرسوم در شهرها را دارند و می‌توانند جریان‌های هیدرولوژیکی را به شکل پایدارتر و محیط زیست دوست‌تر هدایت و کنترل کنند.

در حقیقت زیرساخت‌های سبز با استفاده از اجزا و ساختارهای هیدرولوژیکی طبیعی در صدد هستند تا علاوه بر کنترل آب‌های سطحی، برخی مزیت‌های محیط زیستی و اجتماعی نیز برای محیط به ارمغان آورد. برخلاف سیستم‌های زهکشی سیلاب، نگرش زیرساخت‌های سبز

رشد داشته است در حالی که نرخ رشد جمعیت روستایی در این بازه زمانی تنها ۱/۳۳ درصد بوده است (Fanni, 2006). این در حالی است که توسعه شهری، مشکلات زیادی برای چرخه‌های طبیعی عناصر و اکوسیستم به وجود آورده است که یکی از آنها اختلال در چرخه طبیعی آب است. توسعه شهری با خلق سطوح نفوذناپذیر منجر به کاهش فیلتراسیون طبیعی رواناب می‌شود (Palermo et al., 2019). با افزایش سطوح نفوذناپذیر در سطح حوضه‌های آبخیز، حجم رواناب نیز افزایش یافته و شهرها در معرض سیل و آبگرفتگی معابر در فصول بارش خواهند شد (Bai et al., 2018). این در حالی است که هنوز در اکثر شهرها تفکر انتقال و خروج سریع رواناب و پساب از محدوده شهری در دستور کار قرار دارد. این شیوه مواجهه با جریان‌های هیدرولوژیکی حاصل از توسعه شهری از بعد کمی منجر به از دست دادن منابع آب حوضه آبخیز، به هم خوردن نظام هیدرولوژیکی طبیعی و کاهش سطح آب زیرزمینی در بلند مدت خواهد شد (Herrmann and Schmida, 2000). در بعد کیفی نیز افزایش سطوح نفوذناپذیر شهری منجر به افزایش نرخ انتقال آلودگی‌های غیرنقطه‌ای در رواناب شده و کیفیت هیدرولوژی مجاری طبیعی آب و آب‌ریزها را دچار دگرگونی می‌کند که تأثیرات سلسله باری بر اکوسیستم، فلور و فون بومی حوضه‌های آبخیز خواهند داشت (Version, 2018; Zellner et al., 2016). از طرف دیگر کاهش کیفیت رواناب با حجم و سرعت آن منجر به فرسایش بستر و حاشیه رودخانه‌ها، افزایش رسوب در پایین دست و تغییر کیفیت اکوسیستم و موجودات زنده می‌شود (Bai et al., 2018).

از آنجا که معکوس و یا متوقف کردن توسعه شهرها امکان پذیر نیست، به نظر می‌رسد تبعیت از رویکردهای اکولوژیکی در راستای نزدیکی ساختار و عملکرد شهرها به محیط‌های طبیعی لازم است. رعایت اصول اکولوژیکی در علم هیدرولوژی شهری منجر به معرفی کلید واژه‌های

مدت از آب‌های زیرزمینی در بلند مدت باعث کاهش سطح سفرهای آب زیرزمینی و شور شدن آبخوان‌هایی می‌شود که به واسطه افزایش سطوح نفوذ ناپذیر تغذیه آنها دچار اختلال شده است. خطر بزرگی که وجود تمدن در این مناطق را با تهدید جدی روبه رو می‌کند. بنابراین با توجه به شواهد رو به افزایش وجود اختلال‌های هیدرولوژیکی حاد در مناطق حساس اکولوژیک نیمه خشک، لزوم توجه بیشتر به نزدیکی ساختارهای هیدرولوژیکی موجود در شهرها و نزدیکی آنها به ساختارهای طبیعی با استفاده از سیستم‌های مدیریت پایدار سیلاب احساس می‌شود.

مطالعات صورت گرفته در ارتباط با توسعه زیرساخت‌های سبز در مناطق نیمه خشک جهان متنوع بوده و شاخه‌های مختلف معرفی این شکل‌ها در شهرها را پوشش می‌دهد. در شاخه مطالعات میدانی، Lizárraga و همکاران (۲۰۱۷)، اثر ترکیبی استفاده از باغچه باران و ترانشه نفوذ بر کمیت و کیفیت رواناب حاصل از آبخیز محوطه دانشگاهی واقع در اقلیم نیمه خشک مکزیکی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که این شکل‌های زیرساخت‌های سبز به ترتیب قابلیت جذب ۲.۲۵ و ۵.۳۷ درصد از حجم رواناب را به ترتیب در سال پرباران و کم باران دارند (Lizárraga-Mendiola et al., 2017). مطالعه‌ای دیگر Lodhi و Acharya (۲۰۱۴) به مطالعه تجربی سودمندی برکه‌های ننگه‌داشت بر غلظت فسفر رواناب در مناطق خشک پرداختند. نتایج نشان داد که تفاوت معناداری بین غلظت فسفر در رسوب‌های پس از باران و قبل از باران در برکه‌های ننگه‌داشت‌ها وجود دارد. غلظت فسفر در رسوب‌های پس از باران به شکل معناداری بیشتر از مقدار فسفر در رسوب‌های قبل از باران در برکه‌های ننگه‌داشت است (Lodhi and Acharya, 2014). در شاخه مطالعات شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های هیدرولیکی - هیدرولوژیکی، Walsh و همکاران (۲۰۱۴)، به شبیه‌سازی بلند مدت بازدهی سیستم‌های جمع‌آوری آب باران در شهرکی در کالیفرنیا پرداختند. نتایج نشان داد

نسبت به سیلاب‌ها منبعی با ارزش است نه چیزی دور ریختنی. بر همین اساس بسیاری از شهرها از برنامه‌های توسعه زیرساخت‌های سبز و توسعه‌های کم‌اثر برای کاهش رواناب و آلودگی‌های غیرنقطه‌ای حمایت می‌کنند. با این حال به نظر می‌رسد توسعه زیرساخت‌های سبز در شهرهایی با اقلیم خشک و نیمه خشک دارای اولویت‌های بالایی باشد.

در مناطق نیمه خشک بارش عموماً به دو شکل اتفاق می‌افتد: طول دوره متوسط / حجم زیاد در فصل بارش و طول دوره کوتاه / حجم کم در فصل‌های خشک سال رخ می‌دهد (Saeedi and Goodarzi, 2020). از نظر علم هیدرولوژی این الگوی بارش منجر به افزایش حجم رواناب، کاهش زمان پیک سیلاب، شستشوی ذرات و مواد جمع شده در دوره خشک قبل و انتقال آنها از بالا دست به پایین دست می‌شود. خلق نرخ بالای رواناب و آلودگی‌های غیر نقطه‌ای در مناطق نیمه خشک به واسطه پوشش گیاهی پراکنده، ساختار حساس خاک و شرایط توپوگرافی نیز نیز تشدید می‌شود. این در حالی است که شهرهای موجود در مناطق نیمه خشک به واسطه نرخ مهاجرت بالا از روستا به شهر، به خصوص در کشورهای در حال توسعه، از سرعت رشد بالایی برخوردار می‌باشند. همچنین مطابق با گزارش‌های UN مناطق نیمه خشک و خشک جزء نقاط حساس جهان در تغییرات اقلیمی می‌باشند و انتظار می‌رود که تنوع بارش و دمای بالایی را تجربه کنند. از طرف دیگر سیستم‌های مدیریت سیلاب در شهرهای نیمه خشک عموماً بر پایه خروج سریع سیلاب از محل به توسط شبکه‌ها و کانال‌های سطح شهر است که منجر به کاهش تغذیه آب‌های زیر زمینی و انتقال حجم بالایی از آلودگی‌ها به پایین دست می‌شود که زمینه ساز تغییر اکوسیستم و کیفیت زندگی در مناطق پایین دست است. همچنین در بسیاری از گزارش‌ها، شهرهای مناطق نیمه خشک درجه وابستگی بالایی به آب‌های زیرزمینی برای مصارف شرب، آبیاری کشاورزی و فضای سبز گزارش شده است. استفاده بلند

در ایران نیز تلفیق اکولوژی و هیدرولوژی در توسعه شهری و معرفی روش درصدهای توسعه زیرساخت‌های سبز در راستای مدیریت رواناب و پایداری شهری موضوع جدیدی است و مطالعات در شاخه‌های محدودی در این باره صورت پذیرفته است. برخی مقالات تنها به استخراج شاخص‌های تاثیرگذار بر معرفی توسعه‌های کم‌اثر در شهرهای ایران پرداخته‌اند. به عنوان مثال در مطالعه‌ای با استفاده از تحلیل محتوا، نویسندگان اقدام به استخراج ابعاد و مولفه‌های اساسی طراحی شهری حساس به آب در شهرهای ایران پرداختند و گزارش دادند که بعد پایداری محیط زیستی و مولفه کیفیت منابع آب مهمترین بعد و مولفه ضرورت استفاده از این رویکرد در شهرهای ایران است (Shokri Biaragh and Nematimehr, 2019). در مطالعه‌ای دیگر، مهمترین شاخص برای پیاده سازی الگوی طراحی شهری حساس به آب در شهر تهران را حکمرانی حساس به آب گزارش شد (Kalantari et al., 2017). در مطالعه‌ای دیگر Aghili Mahabadi و همکاران (۲۰۲۲) اقدام به اولویت‌بندی چند معیاره شش نوع از توسعه‌های کم اثر بر مبنای ۴ شاخص کاهش حجم رواناب، کاهش دبی اوج، معیارهای اقتصادی و اجتماعی کردند. در این مطالعه از ترکیب آنتروپی شانون و تاپسیس بهره برد (Aghili Mahabadi et al., 2022). نتایج نشان داد که مخزن جمع‌آوری باران و سیستم نکه داشت زیستی انتخاب‌های مناسبی برای محدوده مطالعاتی (اصفهان) بودند. برخی مقالات نیز اقدام به مدلسازی رواناب شهری با تاکید بر واقعیت‌های هیدرولوژیک شهرها دارند. نمونه آن تحقیقی است که به منظور تعیین ابعاد بهینه شبکه زهکشی شهر گرگان از مدل هیدرولوژی- هیدرولیکی SWMM استفاده کرد (Badiezadeh et al., 2016). نتایج حاصل از این تحقیق نشان دهنده انطباق قابل قبول این مدل با مقادیر مشاهداتی دارد. مطالعه‌ای دیگر نیز توسعه فضای باز شهری حساس به آب را در شهرهای مناطق خشک و نیمه خشک ایران مناسب برای کاهش وابستگی فضای سبز شهری به

که بیشترین کاهش حجمی بلند مدت رواناب بین ۱۰.۱ درصد و ۱۲.۴ درصد برای بازه زمانی مطالعه شده با استفاده از مخازن جمع‌آوری آب باران ۷۵۷۱ لیتری تا ۲۲۷ لیتری است (Walsh et al., 2014). نتایج تحلیل بازدهی اقتصادی نیز نشان داد که برای محدوده مطالعاتی مخازن با حجم ۲۲۷ لیتر بشتین هزینه سود را با کاهش ۶۵۰۰ لیتر رواناب در زمان انجام مطالعه ایجاد می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر اثر توسعه زیرساخت‌های سبز کف سازی نفوذ پذیر، باغچه‌های باران و جوی سبز در یک فضای باز دانشگاهی که در منطقه‌ای نیمه خشک واقع شده مورد شبیه سازی قرار گرفت. محدوده مطالعاتی ۲.۵ کیلومتر مربع وسعت داشت که چهل درصد آن را فضاهای نفوذ ناپذیر پوشانده شده است. مطابق با امار ۵۰ ساله بارش، میانگین بارش در محدوده مطالعاتی ۵۵۰ میلی متر است که به شکل ناهمگون در طول سال پخش شده است. از این میزان بارش بیش از ۷۸ درصد در فصل تابستان صورت می‌گیرد. نتایج نشان داد هر سه شکل زیرساخت سبز مطالعه شده دارای اثر معناداری در کاهش حجم رواناب و پیک سیلاب هستند (Niu et al., 2016). در این تحقیق نکته‌ای که حائز اهمیت است، انطباق فصل رویش گیاهان با فصل بارش می‌باشد که امکان استفاده از ترکیب‌های جوی سبز و باغچه باران را فراهم می‌کند. در کشور ایران شرایط متفاوت است و عدم انطباق فصل رشد گیاهان با فصل بارش پیچیدگی‌هایی در خصوص استفاده از ترکیب‌های زیرساخت سبز ایجاد است (Saeedi and Darabi, 2015). York و همکاران (۲۰۱۵)، در مطالعه‌ای متفاوت به بررسی اثرات محیط زیستی توسعه زیرساخت‌های سبز کنترل سیلاب و تنوع اقلیمی بر میزان دریافتی آب در منطقه شهر دریاچه شور در ایالات متحده پرداختند. در این تحقیق از مدل SWMM استفاده شد. نتایج نشان داد که اجرا سیستم‌های جمع‌آوری آب باران و باغچه‌های بارانی به شکل واحد یا ترکیب با هم تاثیر حداقلی را بر روی ارتفاع سطح آب دریاچه دارد (York et al., 2015).

تبعیت می‌کند و بین حدود ۸۹ روز در شمال تهران تا ۳۳ روز در جنوب شهر تهران نوسان دارد. همچنین در محدوده تهران بین ۲۰۵ تا ۲۱۳ روز هوای صاف تا کمی ابری وجود دارد. به طور متوسط بیشترین حجم بارش در فصول زمستان و بهار رخ می‌دهد و تهران شاهد کمترین میزان بارش در فصل تابستان است. این مشکل با افزایش جمعیت و توسعه سطوح نفوذناپذیر، به مخاطره‌ای جدی برای شهر تهران بدل شده است. تهران تاکنون سیل‌های متعدد و بزرگی را تجربه کرده است که از نمونه‌های آن می‌توان به سیل سال‌های ۱۳۳۳، ۱۳۴۷، ۱۳۶۶، ۱۳۷۰، ۱۳۷۴، ۱۳۸۹ و ۱۳۹۱ اشاره کرد. در سال‌های اخیر سیاست‌های مقابله تصمیم‌گیران شهری بیشتر گسترش زیرساخت‌های عمرانی از قبیل دیوار کشی و تعریض رودخانه‌ها، کانال‌ها، سیل بندها و افزایش چاه‌های جذبی در سطح شهر، بوده است. اما هنوز هم مشکل رواناب و سیل به عنوان دومین مخاطره جدی شهر تهران شناخته شده است.

روش تحقیق

چهارچوب کلی این تحقیق دارای چهار گام اساسی است. ۱- گزینش معیارها و زیرمعیارهای تاثیرگذار ۲- تعیین وزن تاثیر معیارها و زیرمعیارها ۳- تدوین ماتریس تصمیم‌گیری، ۴- اولویت‌بندی اشکال زیرساخت‌های سبز ۳- تدوین سناریوهای ترکیب ۴- اولویت‌بندی به سناریوهای ترکیب. در ادامه هر گام تشریح شده است.

گزینش معیارها و زیر معیارهای تاثیرگذار

این گام با استفاده از مرور منابع معتبر علمی و مصاحبه با کارشناسان و متخصصان صورت پذیرفت. در این مرحله سعی شد معیارهایی برای ورود به مدل‌های تصمیم‌گیری چند متغیره انتخاب شوند که در متون علمی و مصاحبه با کارشناسان و خبرگان تکرار بیشتری داشته و منطبق با شرایط جغرافیایی، اقلیمی و واقعیت‌های محدوده مطالعاتی باشند. در یک جمع‌بندی کلی، معیارهای نهایی تاثیرگذار در روند معرفی زیرساخت‌های سبز در شهر تهران با هدف

منابع آب زیرزمینی مناسب ارزیابی کردند (Saeedi and Goodarzi, 2020b).

با مرور منابع علمی موجود در زمینه استفاده از زیرساخت‌های سبز جهت کاهش اختلال هیدرولوژیکی مشخص می‌شود که مطالعات پراکنده‌ای در ارتباط با برنامه‌ریزی توسعه زیرساخت‌های سبز صورت گرفته است. عمده اهداف مطالعات اخیر پیرامون مزایای هیدرولوژیکی توسعه زیرساخت‌های سبز است و سایر عوامل محیطی، اجتماعی و اقتصادی اثرگذار در توسعه زیرساخت سبز نادیده گرفته شده است. اگر ما مصمم به استفاده از زیرساخت‌های سبز جهت بهبود عملکرد هیدرولوژیک شهر باشیم، ناگزیر باید سایر معیارهای تاثیرگذار جهت اولویت‌بندی این اشکال را شناسایی و وزن‌دهی کنیم. علاوه بر آن، اولویت‌بندی تک تک شکل‌های زیرساخت‌های سبز نیز ممکن است کارآیی لازم را نداشته باشد، چراکه این قبیل زیرساخت‌های سبز عموماً در ترکیب با هم دارای هم‌افزایی می‌باشند. بر مبنای موارد ذکر شده، هدف اصلی این تحقیق دستیابی به چهارچوبی برای اولویت‌بندی چند معیاره اشکال و ترکیب‌های مختلف زیرساخت‌های سبز برای کنترل رواناب شهر تهران است.

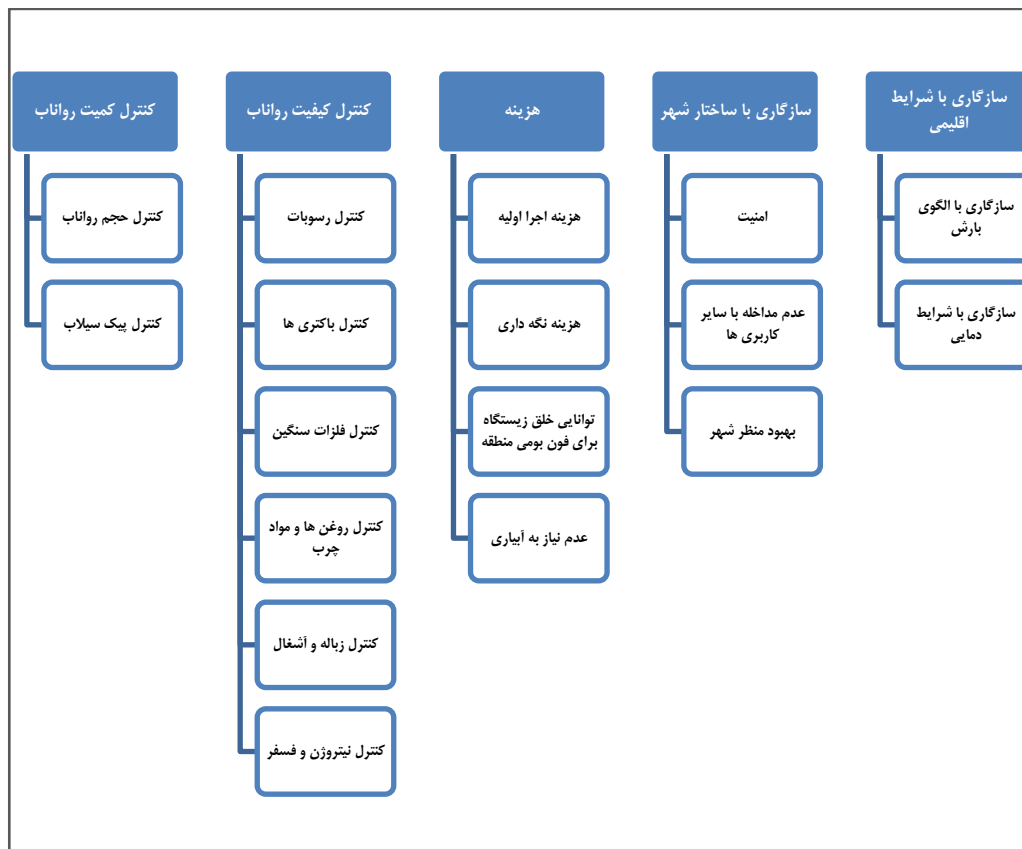
مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی: شهر تهران

کلان‌شهر تهران بزرگترین شهر ایران و دومین شهر پرجمعیت خاورمیانه است. شهر تهران از شمال به توسط رشته کوه البرز و از جنوب نیز به وسیله بیابان‌های قم محدود شده است. از حاشیه شمالی این شهر رود- دره های هفت‌گانه شهر در جریان است که به واسطه حجم بالای بارش، آبخیز گسترده و جغرافیای کوهپایه‌ای شهر، طغیان‌های فصلی متعدد و سالانه‌ای را در تهران شاهد هستیم. بارش سالانه در شهر تهران عموماً تحت تاثیر تغییرات ارتفاعی شمال - جنوب شهر بوده و بین حداکثر ۴۲۲ میلیمتر در شمال تهران تا ۱۴۵ میلیمتر در جنوب شرق تهران متغیر است. تعداد روزهای بارش نیز از همین روند

معیارهای تعریف شده برای این پنج معیار کلی در شکل ۱ نشان داده شده است.

کنترل رواناب مشتمل بر پنج دسته معیار کلی کنترل کمیت رواناب، کنترل کیفیت رواناب، هزینه، سازگاری با ساختار شهر، و سازگاری با اقلیم شهر قابل دسته بندی هستند. زیر



شکل ۱. معیارها و زیر معیارهای انتخاب شده جهت اولویت بندی اشکال مناسب زیرساخت‌های در شهر تهران

خبره در روند وزن دهی به معیارها مشارکت داشتند. جدول ۱ اطلاعات خبرگان شرکت کننده در تحقیق را نشان داده است. در روند محاسبات وزن معیارها و ضرایب ناسازگاری از نرم افزار Expert Choice استفاده شد.

تدوین ماتریس تصمیم گیری

جهت تدوین ماتریس تصمیم گیری و دستیابی به توانایی اشکال زیرساخت‌های سبز مطالعه شده از مرور متون علمی بهره گرفته شد. در این مرحله به مطالعاتی که توانایی زیرساخت‌های سبز را در ارتباط با هر کدام از معیارها مورد بررسی قرار داده اند، رجوع شد. در این گام به توانایی هر کدام از زیرساخت سبز در معیارهای مطالعه

تعیین وزن تاثیر معیارها و زیرمعیارها

جهت وزن دهی معیارهای انتخاب شده از نظرات خبرگان و روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) بهره گرفته شد. در این باره ابتدا پرسش نامه‌ای مطابق با ساختار استاندارد مقایسه زوجی که در روش تحلیل سلسله مراتبی متداول است، تهیه گردید. سپس اقدام به نظر سنجی از ۱۵ نفر از اعضای هیات علمی، مهندسان مشاور، و محققان در زمینه مختلف مرتبط با توسعه زیرساخت‌های سبز در بسترهای شهری شد. در ادامه وزن معیارها، زیرمعیارها، و ضرایب ناسازگاری محاسبه شدند. در این بین پاسخ‌های ۶ نفر از مشارکت کنندگان دارای ضریب ناسازگاری بیشتر از یک دهم بودند و کنار گذاشته شدند. بنابراین مجموعاً ۹

جدول ۱. مشخصات خبرگان گزینش شده در تحقیق

مشارکت کنندگان	سن	مدرک تحصیلی	تخصص	شغل و مرتبه علمی	سابقه اشتغال
خبیره ۱	۴۳	دکتری	مدیریت منابع آب	مهندس مشاور	بیشتر از ۱۰ سال
خبیره ۲	۴۳	دکتری	آبخیزداری	عضو هیات علمی دانشگاه	بیشتر از ۱۰ سال
خبیره ۳	۴۶	دکتری	مدیریت، برنامه ریزی و آموزش محیط زیست	عضو هیات علمی دانشگاه	بیشتر از ۱۰ سال
خبیره ۴	۳۸	دکتری	آمایش سرزمین	مدیر ارشد دستگاه‌های اجرایی	بین ۶ و ۱۰ سال
خبیره ۵	۵۶	دکتری	معماری منظر	عضو هیات علمی دانشگاه	بیشتر از ۱۰ سال
خبیره ۶	۴۸	دکتری	برنامه ریزی شهری	عضو هیات علمی دانشگاه	بیشتر از ۱۰ سال
خبیره ۷	۴۲	دکتری	معماری	مهندس مشاور	بیشتر از ۱۰ سال
خبیره ۸	۴۶	دکتری	مهندسی آب	عضو هیات علمی دانشگاه	بیشتر از ۱۰ سال
خبیره ۹	۳۹	دکتری	مهندسی منابع آب	عضو هیات علمی	بین ۶ و ۱۰ سال

سبز را خلاصه کرده است. مطابق با این مطالعات، اشکال مختلف زیرساخت‌های سبز مشتمل بر جوی سبز^۱، مخزن جمع‌آوری آب باران^۲، باغچه باران^۳، برکه نگه‌داشت^۴، ترانشه نفوذ^۵، کف‌سازی نفوذپذیر^۶، برکه نگه‌داشت زیستی^۷، و بام سبز^۸ در ارتباط با معیارهای بررسی شده امتیازدهی شدند. شکل ۲ تصاویری از زیرساخت‌های سبز مطالعه شده را نشان می‌دهد.

شده در چهار مقیاس رتبه‌ای بدون تاثیر (N)، تاثیر کم (L)، تاثیر متوسط (M)، تاثیر زیاد (H) تقسیم بندی شدند. سپس امتیازدهی به این معیارها از یک تا چهار صورت گرفت. نظر به تعیین وزن نسبی معیارها و زیرمعیارها در گام دوم، ماتریس تصمیم‌گیری جهت اولویت‌بندی زیرساخت‌های سبز در دسترس قرار گرفت. جدول ۲ نتایج مرور متون علمی در ارتباط با توانایی اشکال مختلف زیرساخت‌های



شکل ۲. انواع زیرساخت‌های سبز. ۱: کف‌سازی نفوذپذیر، ۲: جوی سبز، ۳: باغچه باران، ۴: ترانشه نفوذ، ۵: برکه نگه‌داشت، ۶: برکه نگه‌داشت زیستی، ۷: سیستم جمع‌آوری آب باران، و ۸: بام سبز

جدول ۲. بازدهی اشکال مختلف زیرساخت‌های سبز با توجه به معیارهای مطالعه شده

نوع زیرساخت سبز	کنترل کمیت رواناب						کنترل کیفیت رواناب		سازگاری با ساختار شهر			هزینه			سازگاری با اقلیم شهر	
	نیترژن و فسفر	فلزات سنگین	باکتری‌ها	رسموبات	روغن‌ها	آنتی‌بیوتیک و زیاده	هجوم رواناب	پیک سیلاب	مغز شهر	مداخله	امینت	آبیاری	نگهداری	اجرا	بازرسی	3
جوی سبز	M ¹ _{2,3}	M ¹	L ¹ _{2,3}	M ¹	M ¹	M ¹	L ¹	L ¹	M ⁹	H ⁹	H ⁹	H ⁹	M ⁸	M ⁸	L ¹³	M ¹³
مخزن جمع آوری آب باران	N ¹	N ¹	N ¹	N ¹	N ¹	N ¹	M ¹	H ¹	L ⁹	L ⁹	L ⁹	N ⁹	L ⁸	M ⁸	M ¹⁴	M ¹⁴
باغچه باران	M ^{1,4,5}	H ^{1,3,4,5}	M ^{4,5}	M ^{4,5}	H ¹	H ¹	M ¹	L ¹	H ⁹	H ⁹	H ⁹	H ¹⁰	M ⁸	M ⁸	L ¹⁰	M ¹⁰
برکه نکه داشت	L ^{2,3,6}	H ^{2,3}	M ^{2,3,6}	M ^{2,3}	M ¹	H ¹	L ¹	M ¹	H ⁹	M ⁹	L ⁹	L ¹¹	M ⁸	M ⁸	M ¹⁴	M ¹⁴
ترانشه نفوذ	M ^{2,3}	H ¹	H ¹	H ¹	M ¹	H ¹	H ¹	H ¹	N ⁹	M ⁹	M ⁹	L ¹⁰	M ⁸	M ⁸	N ¹⁰	N ¹⁰
کف سازی نفوذ پذیر	L ³	M ¹	M ¹	H ¹	H ¹	M ¹	H ¹	M ¹	N ⁹	L ⁹	L ⁹	L ⁹	H ⁸	H ⁸	H ¹⁴	M ¹⁴
برکه نکه داشت زیستی	M ^{2,3}	M ^{2,3}	M ^{2,3}	M ^{2,3}	M ¹	H ¹	L ¹	H ¹	H ⁹	H ⁹	H ⁹	N	H ⁸	M ⁸	L	L
بام سبز	L ¹	L ¹	L ¹	L ¹	L ¹	L ¹	M ¹	M ¹	M ⁹	L ⁹	L ⁹	H ¹²	H ⁸	H ⁸	L ⁸	L ⁸

(H) بالا، (M) متوسط، (L) کم، (N) بی تفاوت

1: (Water and Commission, 2013), 2: (Revitt et al., 2003), 3: (Debo and Reese, 2002), 4: (Y. Liu et al., 2017), 5: (J. Liu et al., 2014), 6: (Fletcher et al., 2004), 7: (Venner et al., 2013), 8: (Strecker et al., 2010), 9: (Ariza et al., 2019), 10: (Lizárraga-Mendiola et al., 2017), 11: (Tyagi et al., 2008), 12: (Van Mechelen et al., 2015), 13: (Niu et al., 2016), 14: (Saeedi and Goodarzi, 2020)

به اطمینان از نتایج و تایید غیر مغرضانه بودن وزن‌دهی انجام می‌پذیرد. روش کار بدین صورت است که به هر یک از شاخص‌ها مقادیری اضافه و یا کم می‌شود و مدل با تغییرهای صورت گرفته دوباره اجرا خواهد شد و نتایج مقایسه می‌شود. در این تحقیق از نرم افزار PYSIS برای تحلیل حساسیت نتایج این تحقیق استفاده شد. به جهت اطمینان در رابطه با غیرمغرضانه بودن امتیازها و وزن‌ها، تحلیل حساسیت با ۳۰ درصد تغییر در وزن‌ها برای ۱۰۰۰۰ بار تکرار صورت گرفت.

تدوین سناریوهای ترکیب

جهت ترکیب اشکال مختلف زیرساخت‌های سبز در ابتدا پنج عملکرد اصلی زیرساخت‌های سبز جهت مدیریت رواناب مشتمل بر نفوذ، نگه‌داشت، انتقال، آبیاری، و جمع آوری آب باران مشخص شدند. روابط و توالی‌های مناسب

اولویت‌بندی اشکال زیرساخت‌های سبز

در این مرحله به جهت اولویت‌بندی زیرساخت‌های سبز از روش تاپسیس استفاده شد. تاپسیس یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است که بر مبنای شباهت راه‌حل به راه‌حل ایده آل و دوری از راه‌حل غیر ایده آل برنامه‌ریزی شده است. از این تکنیک می‌توان برای رتبه‌بندی، مقایسه گزینه‌های مختلف، انتخاب بهترین گزینه و تعیین فواصل بین گزینه‌ها بهره برد. بر مبنای ماتریس تصمیم‌گیری نهایی و وزن معیارهای بررسی شده، اشکال مختلف زیرساخت‌های سبز اولویت‌دهی شدند. تمامی محاسبات صورت گرفته برای اولویت‌بندی گزینه‌ها با استفاده از نرم افزار R و پکیج topsis انجام شد.

تحلیل حساسیت اولویت‌بندی بدست آمده

حساسیت‌سنجی یا تحلیل حساسیت به خاطر دستیابی

می‌شود. در مثالی دیگر از روابط مناسب و ممکن می‌توان انتظار داشت که رواناب ابتدا به مکانی مناسب انتقال پیدا کند و در آنجا نگه‌داشت می‌شود و در انتها برای آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین انتظار می‌رود که اشکال مختلف زیرساخت‌های سبز جهت مدیریت بهینه رواناب در ترکیب‌های بیشتر از دو فرایند مورد استفاده قرار گیرند.

و محتمل که حاصل ترکیب این عملکردهای اصلی است، در جدول ۳ خلاصه شده است. این روابط حاصل نادیده گرفته شدن ترکیب‌های نامناسب از فرایندهای اصلی زیرساخت‌های سبز است (Ariza et al., 2019). به عنوان مثال نمی‌توان انتظار داشت که رواناب ابتدا نفوذ می‌کند، سپس برای آبیاری استفاده می‌شود و در انتها نگه‌داشت

جدول ۳. فرایندهای هیدرولیکی مورد انتظار (Ariza et al., 2019)

فرایند نهایی فرایند آغازین	نفوذ	نگه‌داشت	انتقال	جمع‌آوری آب باران	آبیاری
نفوذ			×	×	×
نگه‌داشت	×		×	×	×
انتقال	×	×		×	×
جمع‌آوری آب باران					
آبیاری					

این اطلاعات حاصل انطباق داده‌های جدول ۲ و ۳ است. مطابق با این روند امتیازدهی، عدد ۵ نماینده توانایی بسیار بالا، ۴ توانایی بالا، ۳ توانایی متوسط، ۲ توانایی کم، و ۱ توانایی بسیار کم انواع زیرساخت‌های سبز مطالعه شده در فرایند بررسی شده هستند.

از طرف دیگر اشکال مختلف زیرساخت‌های سبز مطالعه شده در این تحقیق دارای توانایی متفاوتی در فرایندهای اصلی مدیریت رواناب هستند. جدول ۴ توانایی اشکال مختلف زیرساخت‌های سبز را در پنج فرایند اصلی مدیریت رواناب نشان داده است. لازم به توضیح است که

جدول ۴. نمرات داده شده به زیرساخت‌های سبز برای هر فرایند

نوع زیرساخت سبز	نفوذ	نگه‌داشت	انتقال	جمع‌آوری آب باران	آبیاری
جوی سبز	۲	۱	۵	۰	۰
مخزن جمع‌آوری آب باران	۰	۴	۰	۵	۵
باغچه باران	۳	۴	۰	۰	۴
برکه نگه‌داشت	۳	۵	۰	۱	۱
تراشه نفوذ	۵	۳	۳	۰	۰
کف‌سازی نفوذپذیر	۵	۳	۰	۰	۰
برکه نگه‌داشت زیستی	۵	۵	۰	۰	۰
بام سبز	۰	۳	۰	۰	۴

جدول زیرساخت‌های سبز ذکر شده در ردیف‌ها نماینده شروع زنجیره ترکیب می‌باشند و ستون‌ها نیز نماینده ترکیب دوم این زنجیره هستند (جدول ۵). فرایندهای ممکن کنترل رواناب برای هر کدام از ترکیب‌های اشکال مختلف زیرساخت‌های سبز در تقاطع ردیف و ستون

اولویت‌بندی سناریوهای ترکیب

با در نظر گرفتن توانایی متفاوت اشکال مختلف زیرساخت‌های سبز در مدیریت رواناب، می‌توان جدول ترکیب فرایندها را کامل‌تر نمود و به جای فرایندها اشکال مختلف زیرساخت‌های سبز را قرار داد (جدول ۵). در این

جدول ۵ آورده شده است. جهت امتیازدهی به هر ترکیب، از رابطه ۱ استفاده شد (منبع: نویسندگان).

امتیاز نهایی زیرساخت سبز بیان شده در ردیف، D1 توان زیرساخت سبز بیان شده در ردیف در فرایند مدیریت رواناب، S2 برابر با زیرساخت سبز بیان شده در ستون، D2 توان زیرساخت سبز بیان شده در ستون در فرایند مدیریت رواناب ذکر شده است.

جدول ۵ آورده شده است. جهت امتیازدهی به هر ترکیب، از رابطه ۱ استفاده شد (منبع: نویسندگان).

$$A = (S1 \times D1) + (S2 \times D2) \quad (1)$$

که در آن A برابر با امتیاز نهایی هر ترکیب، S1 برابر با

جدول ۵. حالات مختلف ترکیب زیرساخت‌های سبز از نظر ترکیب عملکردها (Ariza et al., 2019)

نوع زیرساخت سبز	جوی سبز	مخزن جمع آوری آب باران	باغچه باران	برکه نکه داشت	تراشه نفوذ	کف سازی نفوذپذیر	برکه نکه داشت زیستی
جوی سبز		C.D C.R C.Ir	C.D C.I C.Ir	C.D C.I	C.I	C.I	C.D C.Ir
مخزن جمع آوری آب باران	D.C				D.C D.I		
باغچه باران	IC D.C	D.R I.R D.Ir I.Ir			I.C D.C D.I	D.I	
برکه نکه داشت							
تراشه نفوذ	I.C	D.R I.R C.R D.Ir I.Ir C.Ir	C.I C.Ir				C.Ir
کف سازی نفوذ پذیر		D.R I.R D.Ir I.Ir			D.C D.I	D.I	
بام سبز	D.C	D.R D.Ir	D.IR				

(I) نفوذ، (D) نکه داشت، (C) انتقال، (R) جمع آوری آب باران، (Ir) آبیاری

نتایج حاصل از تحلیل نظرات خبرگان در رابطه با وزن معیارها و زیر معیارهای انتخاب شده در جدول ۶ نشان داده شده است. همچنین در این جدول وزن قطعی زیرمعیارها که حاصل ضرب وزن اصلی معیارها و وزن زیرمعیارها است نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است بیشترین وزن قطعی به کنترل حجم رواناب است که برابر با ۰.۲۱۳۸۴ می باشد. پس از آن کنترل پیک سیلاب با ضریب ۰.۱۱۰۱۶ در رتبه دوم است. معیار سازگاری با اقلیم و کنترل غلظت فلزات سنگین به ترتیب با ضرایب

نتایج

وزن معیارها و زیر معیارها

امتیازبندی زیرساخت‌های سبز مطابق با وزن معیارها و زیر معیارهای محاسبه شده در جدول ۶، همچنین مطابق با توانایی اشکال مختلف زیرساخت‌های سبز شهری مطالعه شده (جدول ۲)، ماتریس

نتایج حاصل از تحلیل نظرات خبرگان در رابطه با وزن معیارها و زیر معیارهای انتخاب شده در جدول ۶ نشان داده شده است. همچنین در این جدول وزن قطعی زیرمعیارها که حاصل ضرب وزن اصلی معیارها و وزن زیرمعیارها است نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است بیشترین وزن قطعی به کنترل حجم رواناب است که برابر با ۰.۲۱۳۸۴ می باشد. پس از آن کنترل پیک سیلاب با ضریب ۰.۱۱۰۱۶ در رتبه دوم است. معیار سازگاری با اقلیم و کنترل غلظت فلزات سنگین به ترتیب با ضرایب

حالی که جوی سبز با ۰/۳۴۲ امتیاز نامناسب‌ترین شکل زیرساخت‌سبز برای شهر تهران انتخاب شد. به ترتیب ترانشه نفوذ، باغچه باران، مخزن جمع‌آوری آب باران، برکه نگه‌داشت، برکه نگه‌داشت زیستی، و بام‌سبز در رتبه بندی دوم تا هفتم قرار گرفتند.

تصمیم‌گیری تهیه شد (جدول ۷) و اولویت‌بندی معیارها با استفاده از روش تاپسیس صورت پذیرفت. نتایج این اولویت‌بندی در جدول ۸ منعکس شده است. لازم به ذکر است در این روند محاسباتی ضریب نزدیکی به گزینه ایده آل ۰/۵ در نظر گرفته شد. مطابق با جدول ۸ کف سازی‌های نفوذپذیر با امتیاز ۰/۷۵۶ مناسب‌ترین است در

جدول ۶. وزن معیارها و زیر معیارها

وزن قطعی معیارها	وزن زیر معیارها	زیر معیارها	وزن معیار اصلی	معیار کلی
۰.۲۱۳۸۴	۰.۶۶	کنترل حجم رواناب	۰.۳۲۴	کنترل کمی رواناب
۰.۱۱۰۱۶	۰.۳۴	کنترل پیک سیلاب		
۰.۰۵۳۸۶۸	۰.۲۰۱	کنترل رسوبات	۰.۲۶۸	کنترل کیفی رواناب
۰.۰۳۷۵۲	۰.۱۴	کنترل باکتری‌ها		
۰.۰۸۶۰۲۸	۰.۳۲۱	کنترل غلظت فلزات سنگین		
۰.۰۳۳۵	۰.۱۲۵	کنترل روغن‌ها و مواد چرب		
۰.۰۴۱۸۰۸	۰.۱۵۶	کنترل آشغال و زباله		
۰.۰۱۵۲۷۶	۰.۰۵۷	کنترل نیترژن و فسفر		
۰.۰۵۲۷	۰.۴۲۵	هزینه اجرا	۰.۱۲۴	هزینه
۰.۰۲۶۵۳۶	۰.۲۱۴	هزینه نگه‌داری		
۰.۰۴۴۷۶۴	۰.۳۶۱	نیاز به آبیاری		
۰.۰۵۰۸۲	۰.۳۸۵	امنیت	۰.۱۳۲	سازگاری با ساختار شهر
۰.۰۴۸۰۴۸	۰.۳۶۴	مداخله با دیگر کاربری‌ها		
۰.۰۳۳۱۳۲	۰.۲۵۱	بهبود ساختار منظر شهر		
۰.۱۱۲۷۸۴	۰.۷۴۲	سازگاری با حداقل بارش	۰.۱۵۲	سازگاری با اقلیم
۰.۰۳۹۲۱۶	۰.۲۵۸	سازگاری با دمای هوا		

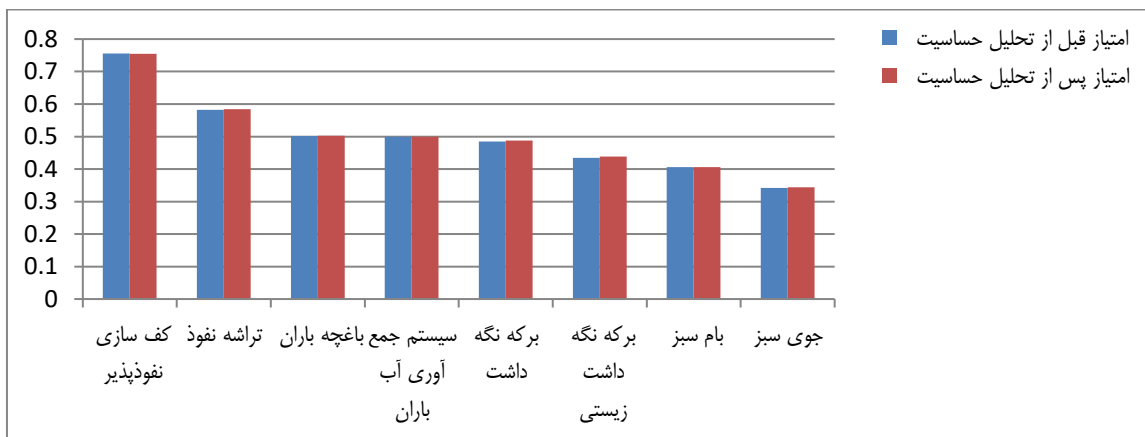
تحلیل حساسیت

چندانی را شاهد نیستیم و باز هم کف‌سازی نفوذ پذیر به عنوان مناسب‌ترین گزینه معرفی شده است. عدم تغییر در رتبه بندی گزینه‌ها در این تحقیق پس از حساسیت‌سنجی تاکید‌کننده تاثیرپذیری اندک نتایج از سوگیری‌های مغرضانه و ذهنیت‌گرایی است.

شکل ۳ اولویت‌بندی سازگاری انواع زیرساخت‌های سبز قبل و پس از تحلیل حساسیت را نشان داده است. همانطور که مشخص است، با ۳۰ درصد تغییر در ضرایب و ۱۰۰۰۰ بار اجرای مدل، در نتایج این تحقیق تغییر

جدول ۷. ماتریس تصمیم گیری

نوع زیرساخت سبز	معیارهای انتخاب															
	نیتروژن و فسفر	فلزات سنگین	باکتری ها	رسوبات	روغن ها	آشغال و زباله	حجم رواناب	پیک سیلاب	منظر شهر	مداخله	امنیت	آبیاری	نگهداری	اجرا	بارش	دما
جوی سبز	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
مخزن جمع آوری آب باران	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۴	۲	۲	۲	۱	۲	۴	۴	۴	۴
باغچه باران	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
برکه نکه داشت	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۲	۴	۴	۴	۴	۴
تراشه نفوذ	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۱	۴	۲	۴	۴	۱	۱	۱
کف سازی نفوذ پذیر	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۱	۴	۲	۴	۴	۴	۴	۴
برکه نکه داشت	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۲	۲	۲
بام سبز	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۲	۲	۲
وزن معیار	۰.۰۱۵۲۷۶	۰.۰۸۶۰۲۸	۰.۰۳۲۵۲	۰.۰۵۲۸۶۸	۰.۰۳۳۵	۰.۰۴۱۸۰۸	۰.۰۳۳۸۴	۰.۱۱۰۱۶	۰.۰۳۳۱۳۳	۰.۰۴۸۰۴۸	۰.۰۵۰۸۲	۰.۰۴۴۷۶۴	۰.۰۲۶۵۲۶	۰.۰۵۲۷	۰.۱۱۳۷۸۴	۰.۰۴۹۳۱۶
جهت تاثیر	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+



شکل ۳. امتیازهای حاصل از میزان مناسب بودن شکل‌های مختلف زیرساخت‌های سبز قبل از تحلیل حساسیت

شد و ۱۱۲ سناریو ترکیب محتمل مورد بررسی، امتیازدهی و رتبه بندی قرارگرفتند. جدول ۹ سه سناریو ممتاز برای هر ترکیب را بر مبنای عملکرد هیدرولوژیک مطالعه شده نشان داده است.

بر مبنای اطلاعات جدول ۹، در سناریوهایی که هدف انتقال (C) و نگهداشت است، ترکیب جوی سبز با برکه نگه داشت بیشترین امتیاز را کسب کرده است (۴.۱۴ امتیاز) و می تواند در دستورکار برنامه ریزان قرار گیرد. در مثالی دیگر اگر هدف بازداشت و آبیاری باشد (D.Ir)، بهترین ترکیب می تواند برکه نگه داشت و مخزن جمع آوری باران باشد (۴.۹۳ امتیاز).

جدول ۸. رتبه بندی اشکال مختلف زیرساخت‌های سبز بر اساس امتیازهای بدست آمده

رتبه بندی	امتیاز کسب شده	نوع زیرساخت سبز
۱	۰.۷۵۴	کف‌سازی نفوذ پذیر
۲	۰.۵۸۱	ترانشه نفوذ
۳	۰.۵۰۱	باغچه باران
۴	۰.۴۹۹	مخزن جمع آوری آب باران
۵	۰.۴۸۶	برکه نگه داشت
۶	۰.۴۳۶	برکه نگه داشت زیستی
۷	۰.۴۰۵	بام سبز
۸	۰.۳۴۲	جوی سبز

سناریوهای ترکیب زیرساخت‌های سبز

در گام بعد، به جهت دستیابی به سناریوهای مناسب از ترکیب اشکال مختلف زیرساخت سبز از رابطه ۱ استفاده

جدول ۹ امتیازبندی ترکیب‌های زیرساخت‌های سبز در رابطه با عملکرد آنها

انواع ترکیب	سناریوهای ترکیب	امتیاز	رتبه
انتقال - نگه داشت (C_D)	جوی سبز - باغچه باران	۳.۷۲	۳
	جوی سبز - برکه نگه داشت	۴.۱۴	۱
	جوی سبز - مخزن جمع آوری آب باران	۳.۷۴	۲
انتقال - ذخیره (C_R)	جوی سبز - مخزن جمع آوری آب باران	۴.۲۱	۱
	جوی سبز - برکه نگه داشت	۲.۲۰	۳
	ترانشه نفوذ - مخزن جمع آوری آب باران	۳.۰۸	۲
انتقال - آبیاری (C_Ir)	جوی سبز - مخزن جمع آوری آب باران	۴.۲۱	۱
	جوی سبز - باغچه باران	۳.۷۲	۲
	جوی سبز - برکه نگه داشت	۲.۲۰	۳
نگه داشت - انتقال (D_C)	باغچه باران - جوی سبز	۳.۷۲	۳
	برکه نگه داشت - جوی سبز	۴.۱۴	۱
	برکه نگه داشت زیستی - جوی سبز	۳.۸۹	۲
نگه داشت - جذب (D-I)	مخزن جمع آوری آب باران - ترانشه نفوذ	۴.۹۱	۲
	مخزن جمع آوری آب باران - کف سازی نفوذ پذیر	۵.۷۸	۱
	مخزن جمع آوری آب باران - برکه نگه داشت زیستی	۴.۱۸	۳
جذب - انتقال (I-C)	کف سازی نفوذ پذیر - جوی سبز	۵.۴۹	۱
	کف سازی نفوذ پذیر - ترانشه سبز	۴.۳۶	۲
	برکه نگه داشت زیستی - جوی سبز	۳.۸۹	۳
نگه داشت - ذخیره (D-R)	ترکیب مخزن جمع آوری آب باران	۴.۵۰	۳
	باغچه باران - مخزن جمع آوری آب باران	۴.۵۱	۲
	برکه نگه داشت زیستی - مخزن جمع آوری آب باران	۴.۶۸	۱

ادامه جدول ۹ امتیازبندی ترکیب‌های زیرساخت‌های سبز در رابطه با عملکرد آنها

رتبه	امتیاز	سناریوهای ترکیب	انواع ترکیب
۲	۵.۴۱	ترانشه نفوذ- مخزن جمع آوری آب باران	جذب - ذخیره (I-R)
۲	۶.۲۸	کف سازی نفوذ پذیر - مخزن جمع آوری آب باران	
۳	۴.۶۸	برکه نگه داشت زیستی - مخزن جمع آوری آب باران	
۱	۴.۹۳	برکه نگه داشت - مخزن جمع آوری آب باران	نگه داشت - آبیاری (D-Ir)
۲	۳.۷۵	ترانشه سبز - باغچه باران	
۳	۴.۶۸	برکه نگه داشت زیستی - مخزن جمع آوری آب باران	
۳	۵.۴۱	ترانشه نفوذ- مخزن جمع آوری آب باران	جذب- آبیاری (I-Ir)
۱	۶.۲۸	کف سازی نفوذ پذیر- مخزن جمع آوری آب باران	
۲	۵.۷۹	کف سازی نفوذ پذیر - باغچه باران	

بحث

در این مطالعه چهارچوبی برای اولویت بندی چند معیاره زیرساخت‌های سبز برای کنترل رواناب در شهر تهران معرفی شد جهت دستیابی به هدف تحقیق از ترکیب روش‌های اولویت بندی چند معیاره (AHP) و تاپسیس برای تجزیه تحلیل داده‌ها استفاده شد. استفاده از روش‌های اولویت‌بندی چند معیاره در انتخاب اشکال مختلف توسعه جهت کنترل رواناب به عنوان روشی معتبر است که در مطالعات پیشین معرفی شده است. به عنوان مثال Izanloo و Sheikh در مطالعه ای جهت اولویت‌بندی سناریوهای مدیریت رواناب سطحی از روش تاپسیس در شرایط وزن‌دهی مختلف استفاده کردند (Izanloo and Sheikh, 2019). همچنین تحقیقی دیگر نیز از ترکیب روش تاپسیس و تاپسیس فازی برای اولویت‌بندی اشکال مناسب توسعه‌های کم اثر برای بخشی از شهر اصفهان بهره بردند (Aghili Mahabadi et al., 2022).

نتایج این تحقیق نشان داد کف‌سازی‌های نفوذپذیر مناسب‌ترین شکل زیرساخت سبز برای شهر تهران می‌باشد در حالی که جوی سبز نامناسب‌ترین است. به ترتیب ترانشه نفوذ، باغچه باران، مخزن جمع آوری آب باران، برکه نگه داشت، برکه نگه داشت زیستی، و بام سبز در رتبه دوم تا هفتم قرار گرفتند. این نتایج همسو با Mani و همکاران (۲۰۱۹) است که کف‌سازی نفوذپذیر، باغچه‌های باران، و ترانشه‌های نفوذپذیر را روشی مناسب برای

بهینه‌سازی توسعه‌های کم اثر در شهر تهران پیشنهاد داده است (Mani et al., 2019). در این تحقیق همچنین از جوی سبز به عنوان یکی از اشکال توسعه‌های کم اثر برای دستیابی به بهینه‌سازی در منطقه ۶ تهران استفاده شد. جوی سبز اگرچه کمترین امتیاز را در مقام مقایسه با سایر اشکال زیرساخت سبز در این تحقیق کسب کرده است، اما پر بازده ترین شکل توسعه با هدف انتقال رواناب است. از آنجا که ترکیب زیرساخت‌های سبز برای دستیابی به اهداف هیدرولوژیک متفاوت در هر محدوده مطالعاتی حیاتی است، جوی سبز را می‌توان به عنوان یکی از ابزارهای کنترل رواناب برای سناریوهای مختلف بکار برد. همچنین نتایج این تحقیق همسو با Movahedinia و همکاران (۲۰۱۷) در معرفی مخازن جمع آوری آب باران به عنوان روشی مناسب برای کاهش حجم رواناب و پیک سیلاب می‌باشد (Movahedinia et al., 2017). همچنین نتایج تحقیقی مشابه ترکیب باغچه باران و برکه نگه داشت زیستی را برای کنترل رواناب در ناحیه نیمه خشک شهر مهاجران پیشنهاد نمود که این نتایج سازگار با نتایج این تحقیق است (Saeedi and Darabi, 2019). از طرف دیگر نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد بام سبز روشی مناسب برای کنترل رواناب در شهر تهران بر مبنای معیارهای مطالعه شده نیست. این نتایج بر خلاف برخی تحقیقاتی است که بام سبز را به عنوان روشی موثر برای کنترل رواناب در شهر تهران پیشنهاد داده‌اند (Moghbel and

نگه داشت زیستی - مخزن جمع آوری آب باران به ترتیب مناسب ترین ترکیب پیشنهاد شدند. این نتایج همچنین مطابق با Saeedi و Goodarzi (۲۰۲۰) است که ترکیب کف‌سازی نفوذپذیر، مخزن ذخیره آب باران و برکه نگه داشت را ترکیبی مناسب برای مقابله با چالش های کوتاه مدت رواناب، سیل و آب گرفتگی و بلند مدت کاهش سطح آب‌های زیرزمینی پیشنهاد دادند (Saeedi and Goodarzi, 2020).

نتیجه گیری

در این تحقیق چهارچوبی برای اولویت‌بندی چند معیاره اشکال مختلف زیرساخت‌های سبز برای کنترل رواناب شهر تهران پیشنهاد شد. نتایج نشان داد کف سازی‌های نفوذپذیر مناسب ترین شکل زیرساخت سبز برای شهر تهران می‌باشد در حالی که جوی سبز با نامناسب‌ترین است. به ترتیب ترانشه نفوذ، باغچه باران، مخزن جمع آوری آب باران، برکه نگه داشت، برکه نگه داشت زیستی و بام سبز در رتبه بندی دوم تا هفتم قرار گرفتند. همچنین در ادامه به جهت دستیابی به الگوهای ترکیب مناسب زیرساخت‌های سبز، عملکردهای انواع زیرساخت‌های سبز به دسته مشتمل بر نفوذ، نگه‌داشت، انتقال، آبیاری، و جمع آوری آب باران تقسیم شد و سناریوهای ترکیب این زیرساخت‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین، نتایج این تحقیق مجموعاً سناریو مناسب ۳۰ ترکیب زیرساخت‌های سبز با عملکرد هیدرولوژیکی متفاوت برای توسعه با اهداف مختلف پیشنهاد داده است.

این مطالعه دارای محدودیت‌هایی است که بیان آنها می‌تواند در تدوین مطالعات آتی راهنما باشد. ذهنیت‌گرایی موجود در نظرات خبرگان است که ممکن است عقیده‌های غیر علمی و شخصی بر روند وزن‌دهی معیارها تاثیرگذار باشد. هرچند استفاده از طیف گسترده ای از خبرگان با تخصص‌های متفاوت اما مرتبط به موضوع و کنترل پاسخ‌ها با نرخ ناسازگاری این ذهنیت‌گرایی را محدود می‌نماید.

(Salim, 2017). به نظر می‌رسد دلیل این اختلاف عدم بررسی برخی معیارهای تاثیر گذار مانند معیارهای اقلیمی، اقتصادی، و کنترل کیفیت رواناب در معرفی بام سبز است. از آنجا که عموماً زیرساخت‌ها در ترکیب با یکدیگر با اهداف هیدرولوژیک مختلف استفاده می‌شود، ترکیب‌های ممکن هیدرولوژیک شناسایی شد. سپس سناریوهای ممکن برای ترکیب اشکال زیرساخت‌ها بررسی شد و مجموعاً ۳۰ سناریو برتر معرفی شدند. این سناریوهای می‌توانند به عنوان راهنما برای برنامه ریزی توسعه زیرساخت سبز برای کنترل رواناب در شهر تهران مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال در ترکیب زیرساخت‌های سبز با هدف انتقال - نگه داشت، مناسب‌ترین سناریو ترکیب به ترتیب جوی سبز- برکه نگه داشت، جوی سبز- مخزن جمع آوری باران، و جوی سبز- مخزن جمع آوری باران معرفی شدند. از سناریوهای ترکیبی زیرساخت‌های سبز این تحقیق می‌توان همراه با تهیه برنامه ریزی فضایی زیرساخت سبز، جهت طراحی سیستم‌های پایدار مدیریت رواناب در شهر تهران به کار رود. این نتایج همسو با Tyagi و همکاران (۲۰۰۸) است که ترکیب جوی سبز- برکه نگه داشت را ترکیبی مناسب برای کنترل رواناب و جلوگیری از آب گرفتگی در محدوده مطالعاتی نیمه خشک مطالعه شده خود معرفی نمود (Tyagi et al., 2008).

در شاخه ای دیگر از اهداف هیدرولوژیک، نتایج این تحقیق نشان داد که سناریوهای برتر برای انتقال - آبیاری در این تحقیق به ترتیب جوی سبز- مخزن جمع آوری آب باران، جوی سبز- باغچه باران و جوی سبز- برکه نگه داشت پیشنهاد شد. به نظر می‌رسد این ترکیب‌ها می‌توانند در پارک‌ها و فضاهای سبز شهری تهران با هدف کاهش آبیاری و افزایش پایداری فضاهای سبز شهری مورد استفاده قرار گیرند.

در ترکیب های مناسب با هدف جذب - ذخیره، سناریوهای کف سازی نفوذ پذیر - مخزن جمع آوری آب باران، ترانشه نفوذ- مخزن جمع آوری آب باران، و برکه

مطالعاتی برای مدیریت یکپارچه رواناب مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق بخشی از رساله دکتری با عنوان «توسعه زیرساخت‌های سبز در مناطق شهری در راستای مدیریت رواناب» است که توسط دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان حمایت شده است (شماره گرنت: ۹۷۲۱۱۹۴۵۰۳). بدین وسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان تشکر و قدردانی می‌شود.

یادداشت‌ها

1. Green swale
2. Rain water harvesting cistern
3. Bio-retention bed
4. Retention pond
5. Infiltration trench
6. Porous pavement
7. Bio-retention pond
8. Green roof

همچنین تحلیل حساسیت صورت گرفته در این تحقیق تاکید کننده تاثیرپذیری اندک نتایج از سوگیری‌های مغرضانه و ذهنیت‌گرایی است. مطالعات آتی می‌تواند با ترکیب داده‌های جغرافیایی و استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، تصویری مکانی از اولویت‌بندی سناریوهای مختلف توسعه زیرساخت‌های سبز در شهر تهران را پیشنهاد کنند.

نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به عنوان راهنمایی برای کاهش مشکلات آب گرفتگی و سیلاب، استفاده مجدد از رواناب از طریق اجرای سناریوهای مختلف توسعه زیرساخت‌های سبز مورد استفاده برنامه‌ریزان و طراحان شهری قرار گیرد. در تسهیل استفاده از نتایج سناریوهای مختلف ترکیب زیرساخت‌های سبز باید اضافه کرد که مدیران و تصمیم‌گیران اجرایی می‌توانند با اهداف مختلف عملیاتی- مدیریتی خود و تاکید بر اهداف هیدرولوژیک، سناریوهای مربوطه را انتخاب و بکار گیرند. بنابراین نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند در محدوده

فهرست منابع

- Aghili Mahabadi, N., Zarif Sanayei, H. R., & Hatefi, S. M. (2022). Prioritization of Low-Impact Development Methods for Management of Urban Surface Runoff, Using the Fuzzy TOPSIS and TOPSIS Method (Case Study: Sepahan-Shahr Town, Isfahan). *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(11), 18. <https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18619.6909>
- Ariza, S. L. J., Martínez, J. A., Muñoz, A. F., Quijano, J. P., Rodríguez, J. P., Camacho, L. A., & Díaz-Granados, M. (2019). A multicriteria planning framework to locate and select sustainable urban drainage systems (SUDS) in consolidated urban areas. *Sustainability (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/su11082312>
- Badiezadeh, S., Bahremand, A., & Dehghani, amir amad. (2016). Urban flood management by simulation of surface runoff using SWMM model in Gorgan city, Golestan Province- Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(4), 155–170. https://jwsc.gau.ac.ir/article_2696.html
- Bai, Y., Zhao, N., Zhang, R., & Zeng, X. (2018). Storm water management of low impact development in urban areas based on SWMM. *Water (Switzerland)*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/w11010033>
- Debo, T. N., & Reese, A. (2002). *Municipal stormwater management*. CRC Press.
- Fanni, Z. (2006). Cities and urbanization in Iran after the Islamic revolution. *Cities*, 23(6), 407–411. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2006.08.003>
- Fletcher, T., Hydrology, M. U. C. R. C. for C., & Fletcher, T. (2004). *Stormwater flow and quality and the effectiveness of non-proprietary stormwater treatment measures: a review and gap analysis*.

CRC for Catchment Hydrology Australia.

- Herrmann, T., & Schmida, U. (2000). Rainwater utilisation in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects. *Urban Water*, 1(4), 307–316. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00024-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00024-8)
- Izanloo, R., & Sheikh, V. (2019). Prioritization of surface runoff management scenarios using TOPSIS method in different weighting conditions (case study: Bojnord city). *Journal of Water and Wastewater*, 29(6), 15–26.
- Kalantari, K., Hemati, G., & Jomehpour, M. (2017). Localization Pattern of Water Sensitive Cities (Case study: Tehran Metropolis). *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, 5(3), 469–493. <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2017.225430.656>
- Liu, J., Sample, D. J., Bell, C., & Guan, Y. (2014). Review and research needs of bioretention used for the treatment of urban stormwater. *Water*, 6(4), 1069–1099.
- Liu, Y., Engel, B. A., Collingsworth, P. D., & Pijanowski, B. C. (2017). Optimal implementation of green infrastructure practices to minimize influences of land use change and climate change on hydrology and water quality: Case study in Spy Run Creek watershed, Indiana. *Science of the Total Environment*, 601–602(February 2018), 1400–1411. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.015>
- Lizárraga-Mendiola, L., Vázquez-Rodríguez, G. A., Lucho-Constantino, C. A., Bigurra-Alzati, C. A., Beltrán-Hernández, R. I., Ortiz-Hernández, J. E., & López-León, L. D. (2017). Hydrological design of two low-impact development techniques in a semi-arid climate zone of central Mexico. *Water (Switzerland)*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/w9080561>
- Lodhi, A. R., & Acharya, K. (2014). Detention basins as best management practices for water quality control in an arid region. *Water Science and Engineering*, 7(2), 155–167. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.004>
- Mani, M., Bozorg-Haddad, O., & Loáiciga, H. A. (2019). A new framework for the optimal management of urban runoff with low-impact development stormwater control measures considering service-performance reduction. *Journal of Hydroinformatics*, 21(5), 727–744. <https://doi.org/10.2166/hydro.2019.126>
- Moghbel, M., & Salim, R. E. (2017). Environmental benefits of green roofs on microclimate of Tehran with specific focus on air temperature, humidity and CO2 content. *Urban Climate*, 20, 46–58.
- Movahedinia, M., Mohammad vali samani, J., & Barakhasi, F. (2017). Flooded areas reduction analysis by means of low impact development, rain barrel. *Water and Irrigation Management*, 7(1), 1–16. <https://doi.org/10.22059/jwim.2017.63736>
- Nations, U. (2018). World urbanization prospects: the 2018 revision. *CD-ROM Edition*.
- Niu, S., Cao, L., Li, Y., & Huang, J. (2016). Long-Term Simulation of the Effect of Low Impact Development for Highly Urbanized Areas on the Hydrologic Cycle in China. *International Journal of Environmental Science and Development*, 7(3), 225–228. <https://doi.org/10.7763/ijesd.2016.v7.773>
- Palermo, S. A., Turco, M., Principato, F., & Piro, P. (2019). Hydrological effectiveness of an extensive green roof in Mediterranean climate. *Water (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/w11071378>
- Revitt, M., Ellis, J. B., & Scholes, L. (2003). Review of the Use of stormwater BMPs in Europe. *Middlesex University, Middlesex*.
- Saeedi, I., & Darabi, H. (2015). *Campus landscape design based on resilience approach in water shortage state (case study: Campus of Malayer University)*.

- Saeedi, I., & Darabi, H. (2019). Ecological landscape design in semi-arid areas on basis of water sensitive urban design approach (case study: Mohajeran city). *Journal of Environmental Studies*, 44(4), 689–701.
- Saeedi, I., & Goodarzi, M. (2020a). Rainwater harvesting system: a sustainable method for landscape development in semiarid regions, the case of Malayer University campus in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 22(2), 1579–1598. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0218-8>
- Saeedi, I., & Goodarzi, M. (2020b). Rainwater harvesting system: a sustainable method for landscape development in semiarid regions, the case of Malayer University campus in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 22(2), 1579–1598. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0218-8>
- Shokri Biarargh, R., & Nematimehr, M. (2019). Sustainable management of urban water resources through water sensitive urban design (WSUD) in Iran (case study: Rasht city). *Environmental Sciences*, 17(1), 1–24. <https://doi.org/10.29252/envs.17.1.1>
- Strecker, E., Sheffield, A., Cristina, C., & Leisenring, M. (2010). Stormwater BMP guidance tool. *A Stormwater Best Management Practices Guide for Orleans and Jefferson Parishes*.
- Tyagi, A., Chongtoua, B., & Medina, D. (2008). Meeting challenges of stormwater management in semi arid climates with low impact development. *World Environmental and Water Resources Congress 2008: Ahupua'a - Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2008*, 316. [https://doi.org/10.1061/40976\(316\)28](https://doi.org/10.1061/40976(316)28)
- Van Mechelen, C., Dutoit, T., & Hermy, M. (2015). Adapting green roof irrigation practices for a sustainable future: A review. *Sustainable Cities and Society*, 19, 74–90. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.007>
- Venner, M., Leisenring, M., Strecker, E., & Pankani, D. (2013). *Current Practice of Post-Construction Structural Stormwater Control Implementation for Highways*.
- Version, D. (2018). *Urban , pluvial flooding Blue-green infrastructure as a strategy for resilience Document Version : Publisher ' s PDF , also known as Version of record Creative Commons License : Urban , pluvial flooding*.
- Walsh, T. C., Pomeroy, C. A., & Burian, S. J. (2014). Hydrologic modeling analysis of a passive, residential rainwater harvesting program in an urbanized, semi-arid watershed. *Journal of Hydrology*, 508, 240–253. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.038>
- Water, B., & Commission, S. (2013). Stormwater best management practices: guidance document. *Revised by: Boston Water and Sewer Commission. Prepared by: Geosyntec Consultants*.
- York, C., Goharian, E., & Burian, S. J. (2015). Impacts of large-scale stormwater green infrastructure implementation and climate variability on receiving water response in the Salt Lake City Area. *American Journal of Environmental Sciences*, 11(4), 278–292. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2015.278.292>
- Zellner, M., Massey, D., Minor, E., & Gonzalez-Meler, M. (2016). Exploring the effects of green infrastructure placement on neighborhood-level flooding via spatially explicit simulations. *Computers, Environment and Urban Systems*, 59, 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.008>