Sharif Civil Engineering Journal (2025), **41**(2), 70-89

Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

https://sjce.journals.sharif.edu



Review Article

Decentralized Urban Runoff Management with Emphasis Upon On-Site Runoff Pollution Reduction: A Systematic Review

Farkhondeh Khorashadi Zadeh [1*], Mohadeseh Shafiei [2], Ali Asadi [3], Leila Mosleh[4], Mohammad Reza Jabedari[5] and Alireza Moghaddam Nia[6]

1. Water and Environmental Engineering Group, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
2. Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
3. Department of Water Engineering Sciences, Faculty of Agriculture, University of Sciences and Research, Tehran, Iran.
4. Department of Urban Management and Urban Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
5. Systems Engineering, Morgan State University, United States.
6. Department of Environmental Sciences and Technologies, Faculty of Energy and Sustainable Resources Engineering. Faculty of Interdisciplinary Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.

* corresponding author:(khorashadi@sharif.edu)

Article Info

Article history:

Received: 12 March 2024

Revised: 26 May 2024

Accepted: 24 June 2024

Keywords:

Decentralized management,
urban runoff,
low-impact development methods,
on-site control of polluted runoff.

Abstract

Urban development has resulted in an increase in impermeable surfaces, and consequently, volume and peak discharge of surface runoff. In Addition, it perturbs the natural water cycle, including reduced pervious surfaces and increased surface runoff volume. Urban development engenders multifaceted issues, encompassing urban flood, degradation of surface water and groundwater quality, and a drop in groundwater levels. Conventional urban runoff management has usually adhered to a centralized approach, relying upon the construction of structural elements such as concrete channels to divert runoff. In recent decades, in order to diminish the deleterious impacts of urbanization, modern and decentralized methodologies have been introduced to mitigate the peak flow, volume, and pollution load of urban runoff by restoring the natural hydrological conditions before urban development. In different countries around the world, these strategies have been introduced and implemented by different terminologies, such as low-impact development, green infrastructure, sustainable urban drainage systems, water-sensitive urban design, and sponge cities. This research seeks to study the pioneering decentralized approaches of urban runoff management, introducing their benefits and comparing their efficacy in controlling contaminated runoff. Moreover, the challenges and limitations of each approach are discussed. By investigating the experiences of pioneering countries and successful projects, the feasibility of deploying these strategies and also the optimal conditions for the implementation of each approach in the metropolises of Iran are precisely assessed. Decision-makers and urban planners can benefit from this research in order to apply these approaches in Iranian cities, notably the expansive metropolis of Tehran. Reviewing the existing global and national experiences in this field shows that, in general, none of the Best Management Practices (BMPs) and Low Impact Developments (LIDs) techniques can alone meet all the goals of runoff management. Examining different scenarios of combining low-impact development methods using modeling is necessary to choose the most effective and economic scenario according to the characteristics of the study area. SWMM and SUSTAIN are among the widely used modeling tools in this field. Finally, the use of various decentralized techniques in each region should be based on observing all the technical principles and criteria related to their design, implementation, maintenance, and exploitation. In this context, reviewing the guidelines of different regions of the world can be helpful, but local studies should be done to evaluate the effectiveness of the discussed approaches, especially in terms of reducing the types of pollutants present in the runoff entering the facility.

To Cite this article:

Khorashadi Zadeh, F., Shafiei, M., Asadi, A., Mosleh, L., Jabedari, M. and MoghaddamNia, A. 2025. Decentralized urban runoff management with emphasis upon on-site runoff pollution reduction: a systematic review, Sharif Civil Engineering Journal, **41**(2), 70-89. https://doi.org/10.24200/j30.2024.64134.3307

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

Funding

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

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors contribution statement

First name and Last name of Frist Author: Farkhondeh Khorashadi Zadeh
First name and Last name of Second Author: Mohadeseh Shafiei
First name and Last name of Third Author: Ali Asadi
First name and Last name of **Forth** Author: Leila Mosleh
First name and Last name of Fifth Author: Mohammad Reza Jabedari
First name and Last name of Sixth Author: Alireza Moghaddam Nia

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی مروری

مروری بر مدیریت غیرمتمرکز رواناب شهری با تأکید برکاهش میزان بار آلودگی رواناب شهری در محل

فرخنده خراشادی‌زاده [*۱]، محدثه شفیعی [۲]، علی اسدی [۳]، لیلا مصلح [۴]، محمدرضا جبه داری [۵] و علیرضا مقدم نیا [۶]

[۱] گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده‌ی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

[۲] دانشکده‌ی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

[۳] گروه علوم مهندسی آب، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

[۴] گروه مدیریت شهری- مهندسی شهرسازی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

[۵] مهندسی سیستم، دانشگاه ایالتی مورگان، ایالت متحده‌ی آمریکا.

[۶] گروه آموزشی علوم و فناوری‌های محیطی، دانشکده‌ی مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[*] نویسنده مسئول (khorashadi@sharif.edu)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۱۲/۲۲

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۴/۰۴

واژگان کلیدی:

مدیریت غیرمتمرکز،

رواناب شهری،

روش‌های توسعه‌ی کم اثر،

کنترل رواناب آلوده در محل.

چکیده

پیامد توسعه‌ی شهری، افزایش سطوح غیرقابل نفوذ و در نتیجه افزایش حجم رواناب سطحی است. علاوه‌بر این، توسعه‌ی شهری، چرخه‌ی طبیعی آب را مختل می‌کند و مشکلاتی، نظیر: سیلاب، تنزل کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی، و افت سطح آب زیرزمینی را به‌دنبال دارد. معمولاً، مدیریت رواناب شهری به‌صورت متمرکز و بر مبنای ایجاد تمهیدات سازه‌ای است. به‌منظور کاهش آثار منفی شهرنشینی، رویکردهای نوین و غیرمتمرکز معرفی شده‌اند، تا با بازسازی شرایط هیدرولوژیک قبل از توسعه، حجم و بار آلودگی رواناب شهری را کاهش دهند. این رویکردها با عناوین مختلف، نظیر: توسعه‌ی کم اثر، زیرساخت سبز، و طراحی شهری حساس به آب در مناطق مختلف دنیا اجرا شده‌اند. هدف پژوهش حاضر، بررسی رویکردهای نوین مدیریت غیرمتمرکز رواناب شهری و مقایسه‌ی کارآمدی آن‌ها در کنترل رواناب آلوده در محل است. با مرور تجربیات کشورهای پیشرو، شرایط بهینه‌ی اجرای هر کدام از رویکردها بررسی شده است. برنامه‌ریزان مدیریت شهری می‌توانند از نتایج پژوهش حاضر در جهت به‌کارگیری رویکردهای ذکرشده بهره‌برداری کنند.

۱. مقدمه

پیامد افزایش تراکم جمعیت در شهرها و توسعه‌ی شهری، افزایش اجتناب‌ناپذیر سطوح غیرقابل نفوذ است؛ که منجر به تغییر چرخه‌ی طبیعی هیدرولوژیکی، از جمله: کاهش نفوذ طبیعی و افزایش رواناب سطحی می‌شود. رواناب شهری، آلاینده‌های حاصل از سطوح شهری را به حوضه‌های آبخیز مجاور حمل می‌کند، که باعث تنزل کیفیت آب می‌شود و آثار نامطلوبی در پیکره‌های آبی دریافت‌کننده می‌گذارد. رواناب شهری در ورود و جابجایی طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های موجود در آبراهه‌ها نقش دارد. از جمله‌ی آلاینده‌های مذکور می‌توان به رسوب‌ها، آفت‌کش‌ها، و مواد مغذی محوطه‌های چمنی پارک‌ها و باغ‌ها، ویروس‌ها، باکتری‌ها، فلزات سنگین، و مواد مغذی ناشی از فضولات حیوانات خانگی، و سیستم‌های فاضلاب معیوب اشاره کرد.[۱]

به‌منظور دستیابی به توسعه‌ی شهری پایدار و ایجاد تعادل در نیازهای محیط‌زیستی، اجتماعی، و اقتصادی، در کوتاه‌مدت، میان‌مدت، و بلندمدت، روی‌آوردن به دیدگاه مدیریت یکپارچه‌ی منابع آب شهری ضروری است. در این دیدگاه، تمام قسمت‌های چرخه‌ی آب، شامل: آب‌های سطحی، زیرزمینی، محیط‌های طبیعی، و انسان‌ساخت، همگی با عنوان یک سیستم یکپارچه در نظر گرفته می‌شوند. مدیریت یکپارچه‌ی رواناب سطحی از سه جهت اهمیت دارد: کنترل سیلاب، کنترل آلودگی منابع آبی، و جلوگیری از هدررفت آب، و امکان استفاده‌ی مجدد از آن.

پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارش در مناطق خشک و نیمه‌خشک، علاوه‌بر ایجاد سیلاب‌های مخرب، موجب هدررفت آب‌های سطحی می‌شود. لذا، مهار رواناب‌های سطحی و بهره‌برداری مناسب از آن‌ها می‌تواند راهکار مناسبی برای جلوگیری از هدررفت آب و تبدیل تهدید به فرصت باشد. با مدیریت یکپارچه‌ی رواناب سطحی شهری می‌توان علاوه‌بر کنترل سیلاب، آلودگی منابع آبی را کاهش داد و همچنین، امکان استفاده‌ی مجدد از رواناب برای مصارف دیگر را نیز فراهم کرد.

روش‌های متعددی برای کاهش میزان آلودگی رواناب شهری وجود دارد. اقدام‌های مدیریتی برای پیشگیری و یا کاهش آلودگی رواناب شهری می‌توانند

استناد به این مقاله:

خراشادی‌زاده، فرخنده، شفیعی، محدثه، اسدی، علی،مصلح، لیلا، جبه داری، محمدرضا و مقدم نیا، علیرضا، ۱۴۰۴. مروری بر مدیریت غیرمتمرکز رواناب شهری با تأکید بر کاهش میزان بار آلودگی رواناب شهری در محل. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۲)، صص.۷۰-۸۹. https://doi.org/10.24200/j30.2024.64134.3307

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

حق مولف © نویسندگان

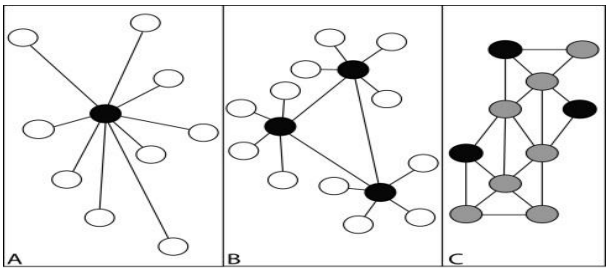
ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

به‌سادگی تعیین مقدار مناسب کود برای باغچه‌ی یک خانه و یا به‌پیچیدگی احداث یک سازه‌ی مهندسی، همچون تالاب سیلاب‌گیر[1] باشند. به‌کارگیری روش‌هایی که توسعه‌ی شهری را با کمترین خسارت‌های محیطی به پیش ببرند، از مهم‌ترین مسئولیت‌های مدیران شهری است؛ که مزایای استفاده از آن‌ها، عبارت‌اند از: ۱) عدم نیاز به وجود فضای خالی برای ساختن مخازن بزرگ در محیط متراکم شهری، ۲) کاهش بار آلودگی و بهبود کیفیت رواناب قبل از رسیدن به منابع آب، ۳) جلوگیری از تخریب محیط‌زیستی در مناطق مسکونی و تجاری، ۴) بازگردانی حوضه‌ی آبخیز به رژیم هیدرولوژیکی قبل از توسعه به واسطه‌ی نفوذ، تصفیه، ذخیره، تبخیر، و نگهداشت رواناب در نزدیک‌ترین محل به منبع تولید آن، ۵) کاهش حجم جریان و دبی اوج.[۲ و ۳]

الگوی جمع‌آوری رواناب سطحی می‌تواند به‌صورت متمرکز یا غیرمتمرکز باشد (شکل ۱). در الگوی متمرکز (شکل۱- A)، فاضلاب از چند منطقه‌ی پراکنده و مختلف به یک تصفیه‌خانه‌ی مرکزی منتقل می‌شود. در الگوی غیرمتمرکز (شکل۱-B)، فاضلاب در نزدیک‌ترین مکان به محل تولید یا به محل بالقوه‌ی مصرف، تصفیه و استفاده‌ی مجدد می‌شود. لذا، در این نوع الگو برای تصفیه‌ی فاضلاب کل شهر ممکن است چند تصفیه‌خانه‌ی محلی موردنیاز باشد. در الگوی ترکیبی (شکل۱- C)، فاضلاب در همان مکان تولید، تصفیه و استفاده‌ی مجدد می‌شود و در شرایط حجم مازاد بر ظرفیت تصفیه‌ی محلی (مانند سیلاب)، به شبکه‌ی اصلی برگردانده می‌شود.[۴]

از طرفی، روش‌های غیرمتمرکز مدیریت آلودگی رواناب‌های سطحی را می‌توان به دو دسته‌ی روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای تقسیم کرد. رویکردهای غیرسازه‌ای، رویکردهای سازمانی و پیشگیری از آلودگی هستند، که برای جلوگیری یا کاهش آلاینده‌های ورودی به رواناب و یا کاهش حجم رواناب طراحی شده‌اند؛ که شامل تسهیلات ثابت دائم نمی‌شوند و معمولاً با تغییر رفتار از طریق مقررات دولتی (برای مثال قوانین برنامه‌ریزی و محیط‌زیستی)، متقاعدسازی و یا ابزارهای اقتصادی کار می‌کنند. تقسیم‌بندی‌های مختلفی برای اقدام‌های غیرسازه‌ای (در واقع بازدارنده) انجام شده است.[۵] بنیاد تحقیقات آب و محیط‌زیست نیوزلند این اقدامات را در سه دسته‌ی کلی قرار داده است:

۱) برنامه‌ریزی/ مقررات (شامل: کنترل‌های تخلیه، کنترل‌های مواد خطرناک، کنترل‌های طراحی شهری (WSUD، LID)، عوارض/ مشوق‌ها)؛



شکل ۱. انواع الگوهای جمع‌آوری رواناب سطحی، شامل: A) متمرکز، B) غیرمتمرکز، و C) ترکیبی. دایره‌های سیاه: تولیدکننده‌ی منفرد، دایره‌های سفید: مصرف‌کننده‌ها، دایره‌های خاکستری: مصرف‌کننده‌های مشارکتی.[۴]

۲) آموزش/ توسعه (شامل: تشویق جلوگیری از آلودگی، ترویج مشارکت در فعالیت‌های کنترل رواناب شهری؛

۳) کنترل منشأ (شامل نظافت منطقه).[۶]

روش‌های غیرسازه‌ای ساده می‌توانند نیاز به ساخت کنترل‌کننده‌های رواناب بزرگ، مانند حوضچه‌های نگهداشت دائمی و سیستم‌های انتقال رواناب را کاهش دهند، تا بدین‌وسیله از هزینه‌های زیرساخت کل پروژه کاسته شود.

در مقابل، روش‌های سازه‌ای به جداسازی آلودگی از رواناب می‌پردازند، که طیف وسیعی از روش‌های توسعه‌ی کم اثر[2]، به‌کارگیری پکیج‌های تصفیه، و احداث تصفیه‌خانه‌های محلی را در برمی‌گیرند. سرمایه‌گذاری برای محافظت از کیفیت آب، که در جوامع مختلف در سراسر دنیا درحال انجام است، از طریق روش‌های توسعه‌ی کم‌اثر بیشترین سود را در بر دارد؛ زیرا با حفظ و احیای مناطق طبیعی، مدیریت آب باران و کاهش رواناب حاصل می‌شود. از طرفی، زیرساخت‌های سبز (GI)[3]، زیرمجموعه‌ای از روش‌های توسعه‌ی کم اثر (LID)[4]، نه فقط می‌توانند با مدیریت بهتر رواناب به بهبود کیفیت آب کمک کنند، بلکه گاهی اوقات با هزینه‌ی کمتری نسبت به روش‌های رایج می‌توانند باعث ایجاد فرصت‌هایی، نظیر: توسعه‌ی مجدد، فراهم‌کردن فرصت‌های تفریحی، و کمک به دستیابی به سایر اهداف اجتماعی، اقتصادی، بهداشتی، و محیط زیستی شوند.

در پژوهش حاضر، ابتدا روش‌های غیرمتمرکز سازه‌ای مدیریت رواناب شهری و مزایای آن‌ها معرفی شده‌اند. سپس، تجارب جهانی و ملی در زمینه‌ی استفاده از روش‌های مذکور در مدیریت رواناب شهری ارائه شده است. در انتها، روش‌های مختلف ارزیابی رویکردهای توسعه‌ی کم اثر، از جمله شبیه‌سازی‌های کمّی و کیفی رواناب شهری مرور شده‌اند.

۲. معرفی رویکردهای غیرمتمرکز مدیریت رواناب شهری

سامانه‌های متعارف مدیریت رواناب شهری، که به‌عنوان سامانه‌های متمرکز شناخته شده هستند، مبتنی بر فلسفه‌ای برای ایجاد تمهیداتی هستند که رواناب‌ها را با سرعت، در حد امکان از مناطق شهری دور کنند و در نقطه‌ای پایین‌دست، حجم بالای رواناب جمع‌آوری‌شده را مدیریت و به آب‌های پذیرنده تخلیه کنند. راهکارهای اخیر، اغلب با استفاده از سازه‌های انتقال بتنی غیرقابل نفوذ صورت می‌گیرد و منجر به افزایش آلودگی و مواد جامد معلق می‌شود، که می‌تواند از آستانه‌ی تحمل آب‌های سطحی پذیرنده فراتر رود.

در دهه‌های اخیر، اجرای راه‌حل‌های طبیعی‌تر از نظر محیط‌زیستی و حساس‌تر به آب، ، شتاب قابل‌توجهی پیدا کرده است. رویکردهای جدیدی، در قالب راهکارهای غیرمتمرکز، برای کاهش آثار منفی شهرنشینی در کیفیت و کمیت رواناب معرفی‌شده‌اند. با کاهش حجم رواناب و سیلاب، رویکردهای غیرمتمرکز می‌توانند نقش اساسی در کاهش آثار منفی شهرنشینی در هیدرولوژی و کیفیت آب داشته باشند. در کشورهای مختلف، راهکارهای غیرمتمرکز عناوین مختلفی دارند: مدیریت یکپارچه‌ی منابع آب شهری (IUWM)[5]، سامانه‌ی زهکشی پایدار شهر (SUDS)[6]، کنترل در منشأ[7]، بهترین شیوه‌های مدیریت (BMP)[8]، توسعه‌ی کم اثر (LID)، طراحی شهری حساس به آب (WSUD)[9]، و مدیریت نوآورانه‌ی رواناب شهری[10].[۷] رویکردهای ذکرشده به سبب نگرانی‌های

[1] Storm Water Wetland
[2] Low Impact Development
[3] Green Infrastructure
[4] Low Impact Development
[5] Integrated Urban Water Management
[6] Sustainable Drainage System
[7] Source Control
[8] Best Management Practices
[9] Water Sensitive Design
[10] Innovative Stormwater Management

حاصل از پایداری در مناطق شهری به‌وجود آمده‌اند، که شامل کاهش سطوح غیرقابل نفوذ، نگهداشت رواناب در محل، افزایش نفوذ، و تبخیر- تعرق سیلاب، و بازسازی شرایط هیدرولوژیک قبل از توسعه می‌شوند. اقدام‌های اخیر می‌توانند شرایط رواناب را به قبل از توسعه‌ی شهری، یا حتی بهتر تبدیل کنند.[۸]

عملیات زیرساخت سبز، از جمله راه‌حل‌های توسعه‌ی پایدار شهری یا توسعه‌ی مجدد هستند، که مبتنی بر فلسفه‌ی مدیریت سیلاب در محل هستند و نفوذ و ذخیره‌سازی را افزایش می‌دهند، زمان اوج رواناب را به تأخیر می‌اندازند، حجم رواناب را کاهش می‌دهند، و حرکت آلاینده‌ها را کنترل می‌کنند. عنوان بهترین شیوه‌های مدیریت (BMP) را معمولاً برای اقدام‌های رویکردهای غیرمتمرکز در مقیاس بزرگ به‌کار می‌برند، در حالی که در مقیاس کوچک، از عنوان توسعه‌ی کم اثر (LID) استفاده می‌شود.

۳. اقدام‌های توسعه‌ی کم اثر (LID)

توسعه‌ی کم اثر، یک روش برنامه‌ریزی و طراحی مهندسی برای مدیریت رواناب شهری، با هدف تقلید رژیم هیدرولوژیکی پیش از توسعه است. اگرچه بهترین شیوه‌های مدیریت رواناب، با مقیاس بزرگ در ذخیره‌ی حجم بالایی از رواناب و بهبود کیفیت کلی حوضه‌های آبخیز شهری مؤثر هستند، اما معمولاً یافتن فضای خالی برای ساختن آن‌ها در محیط متراکم شهری دشوار است. به‌علاوه، این چنین عملیاتی بیش از کنترل، نقش بهبود کیفیت رواناب را قبل از رسیدن به منابع آب پذیرنده انجام می‌دهند. بنابراین، ایده‌ی اقدام‌های توسعه‌ی کم اثر اغلب رویکرد مناسب‌تری برای مدیریت رواناب و کنترل آلودگی در حوضه‌های آبخیز شهری است.[۳] توسعه‌ی کم اثر بر حفاظت از ویژگی‌های طبیعی و استفاده از کنترل‌کننده‌های هیدرولوژیکی مهندسی‌شده‌ی کوچک‌مقیاس برای نفوذ، فیلتر، ذخیره، تبخیر، و نگهداشت رواناب در نزدیکی منشأ آن تأکید می‌کند. راهبرد اساسی به‌کارگیری روش‌های توسعه‌ی کم اثر، کاهش تخریب-های محیطزیستی در مناطق مسکونی و تجاری است. به‌عبارت دیگر، هدف کلی استفاده از اقدام‌های توسعه‌ی کم اثر، تقلیدکردن یا تلاش برای بازسازی مصنوعی هیدرولوژی منطقه به شرایطی است که هنوز توسعه نیافته و حجم رواناب متأثر از توسعه‌ی شهری نشده باشد. اقدام‌های توسعه‌ی کم اثر، روش نسبتاً جدیدی در مدیریت سیلاب شهری است و عمدتاً، در مناطق تازه‌تأسیس شهری استفاده می‌شوند و می‌توانند باعث میرایی آلودگی، کاهش حجم جریان، و کاهش دبی اوج شوند.[۲ و ۳]

به‌منظور استفاده از روش‌های توسعه‌ی کم اثر، شرایط مختلفی، از جمله: ۱) شرایط اقلیمی، ۲) سامانه‌ی شهری و شهرسازی، تراکم جمعیت و تراکم ساخت و سازها، ۳) میزان پذیرش اجتماعی و فرهنگی طرح‌ها از سوی مردم، دولت، و دستگاه قانونگذار، ۴) هزینه‌ها و پارامترهای اقتصادی، ۵) قوانین و استانداردهای موجود در زمینه‌ی تأمین و مصرف آب، و ۶) امکان ترکیب روش‌های منتخب پیشنهادی باید در نظر گرفته شوند.[۹]

۱.۳. انواع روش‌های توسعه‌ی کم اثر

از جمله روش‌هایی که در راهبرد توسعه‌ی کم اثر گنجانده می‌شوند، عبارت‌اند از: ۱) باغچه‌های باران‌زاد (حوضچه‌های زیستی)، ۲) سقف‌های با پوشش گیاهی (بام سبز)، ۳) ذخیره‌سازی در کنار پیاده‌روها، ۴) گودال‌ها، حائل‌ها، و نوارهای با پوشش گیاهی، ۵) قطع ارتباط هدایت‌کننده‌های رواناب پشت‌بام[11]، ۸) قطع ارتباط سطوح نفوذناپذیر[12]، ۹) مخازن ذخیره‌ی موقت و یا دائمی رواناب، ۱۰) ترانشه‌های نفوذ.[۲] هدف اصلی رویکردهای غیرمتمرکز ذکرشده، کاهش حجم رواناب از سطوح غیرقابل نفوذ[13] و همچنین، کاهش میزان آلودگی وارده بر آب‌های پذیرنده است.[۱۰] در ادامه، برخی از روش‌های توسعه‌ی کم‌اثر معرفی شده‌اند.

۱.۱.۳. سامانه‌های مهار و ذخیره‌ی آب باران

یکی از مؤثرترین راه‌های کنترل رواناب در منشأ، ذخیره‌سازی آب باران با استفاده از مخازن یا بشکه‌های کوچک آب (شکل ۲)، به‌منظور آبیاری فضای سبز خانگی است. سامانه‌های مهار و ذخیره‌ی آب باران قرن‌هاست که برای تأمین نیازهای ذخیره‌ی آب شهری،[۱۱] استفاده می‌شوند و در حال حاضر، رویکرد معمول در هند، آفریقا، آمریکا، آسیا، استرالیا، و بسیاری از مناطق دیگر برای تأمین نیاز ذخیره‌ی آب است و مقبولیت اجتماعی قابل‌توجهی دارد (برای مثال، پروژه انجام‌شده در هند (۲۰۱۰)،[۱۲]). رویکرد ذکرشده، در شهرهای ژاپن و آلمان معمولاً برای کنترل سیل، مدیریت آلودگی رواناب، و دیگر نیازها استفاده می‌شود؛ [۱۳-۱۵] و به‌علاوه، اقدامی مؤثر برای سازگاری با آثار تغییرات آب و هوایی است.

از مزایای سامانه‌ی مهار و ذخیره‌ی آب باران می‌توان به این موارد اشاره کرد:

۱) جمع‌آوری و ذخیره‌ی رواناب بام ساختمان‌ها، ۲) استفاده از آب باران برای مصارفی همچون آبیاری فضای سبز و باغچه‌ها در محل بارش، ۳) کاهش حجم رواناب ورودی به شبکه‌ی جمع‌آوری رواناب از طریق انفصال هیدرولیکی پشت بام از شبکه‌ی آب‌های سطحی، ۴) نصب و راه‌اندازی آسان، ۵) قیمت ارزان.[۱۷ و ۱۸]

با وجود ویژگی‌های ذکرشده، سامانه‌ی مهار و ذخیره‌ی آب باران معایبی نیز دارد، از جمله: ۱) خطر بالاگرفتگی در گلوگاه، ۲) بهبود ناچیز کیفیت آب، ۳) عدم تضمین عملکرد صحیح آن به‌دلیل قرارگیری مالک دستگاه به‌عنوان اپراتور، ۴) نیازمند به وجود فضای مناسب جهت استقرار منبع ذخیره، ۵) کارایی مناسب برای مناطقی که بیش از ۴ ماه در سال بارندگی دارند.[۱۷ و ۱۸]

مطالعات مختلفی در نقاط مختلف جهان در زمینه‌ی اثربخشی سیستم‌های مهار و ذخیره‌ی آب انجام شده است. برای مثال، بررسی مزایای سیستم‌های ذخیره‌ی آب باران در شهرهای ایالات متحده، توسط استیفن[14] و همکاران (۲۰۱۳)،[۱۹] نشان داد عملکرد مخازن باران، تابعی از اندازه‌ی مخزن و الگوی آب و هواست.



شکل ۲. سامانه‌ی مهار و ذخیره‌ی آب باران.[۱۶]

[11] Roof Leader Disconnection
[12] Impervious Surface Reduction and Disconnection
[13] Impervious surface
[14] Steffen



شکل ۳. چاهک‌های نفوذ آب باران.[۳۰]

یک بشکه‌ی باران منفرد (۵۰ گالن) نصب‌شده در یک قطعه‌ی مسکونی قادر به ایجاد تقریباً ۵۰٪ اثربخشی ذخیره‌ی آب برای نیاز آب غیرآشامیدنی در شهرهای ساحل شرقی، جنوب‌شرقی، غربی مرکزی، و شمال غربی اقیانوس آرام است. نتایج آن‌ها همچنین نشان می‌دهد که برداشت آب باران می‌تواند حجم رواناب رگبار را تا ۲۰٪ در نواحی نیمه‌خشک کاهش دهد. لیو[15] (۱۹۹۲)،[۲۰] نیز اثربخشی بشکه‌های باران را در کاهش دبی اوج در یک حوضه‌ی آبخیز نیمه‌شهری بررسی کرده و دریافته است که برای یک طوفان با دوره‌ی بازگشت کمتر از ۳ سال، با جمع‌کردن همه‌ی حجم بارش دریافتی سقف‌ها، بشکه‌های باران برای کنترل سیل کافی هستند.

۲.۱.۳. چاهک‌های جذبی

چاهک‌های جذبی یا چاهک‌های نفوذ آب باران (شکل۳)، مخازن کوچک مکعبی یا استوانه‌ای هستند، که پس از حفاری، درون آن‌ها به وسیله‌ی سنگ لاشه پر می‌شود و دیواره‌ی آن‌ها با یک تیغه یا غلاف از جنس آجر، بلوک‌های پیش‌ساخته‌ی بتنی، و یا حلقه‌های پلی‌اتیلن مشبک پوشانده و اطراف و درون آن با مواد درشت‌دانه پُر می‌شود.[۱۷]

از مزایای سامانه‌ی چاهک‌های جذبی می‌توان به این موارد اشاره کرد:

۱) تسهیل نفوذ آب به داخل خاک، ۲) کاهش حجم و ایجاد تأخیر در حرکت رواناب، ۳) کمک به تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی و تأمین بخشی از نیاز طبیعی آبخوان، ۴) تصفیه‌ی طبیعی رواناب، ۵) کاهش شوری آب زیرزمینی و پس‌زدن اولیه‌ی آب شور در مناطق نزدیک به دریا، ۶) کمک به بهبود محیط‌زیست با کاهش میزان رواناب سطحی آلوده، ۸) هزینه‌ی نسبتاً کم اجرایی، و ۹) سهولت اجرا (البته بسته به شرایط منطقه و جنس خاک) اشاره کرد.[۱۷ و ۱۸]

با وجود ویژگی‌های ذکرشده، سامانه‌ی چاهک‌های جذبی در خاک‌های با قابلیت زهکش پایین، پایداری پی سازه‌های اطراف را تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه‌بر این، در صورتی که رواناب آلودگی‌های شیمیایی و صنعتی داشته باشد، به‌علت آلوده‌شدن آبخوان، مناسب نیست و توصیه نمی‌شود. همچنین، به منظور جلوگیری از گرفتگی، این سامانه نیاز به پایش و نگهداری دارد و کارایی آن در کاهش آلاینده‌ی ذرات معلق و فلزات سنگین، متوسط ارزیابی شده است.[۱۷ و ۱۸]

۳.۱.۳. روکش‌های نفوذپذیر

روکش‌های نفوذپذیر یا متخلخل (شکل ۴) انواع خاصی از سطوح هستند، که با تشکیل یک سامانه‌ی نفوذ، به رواناب اجازه‌ی عبور می‌دهند و برخی از



شکل ۴. روکش‌های نفوذپذیر.[۲۱]

آلاینده‌های موجود در رواناب را پالایش می‌کنند. این روش، قابلیت پیاده‌سازی برای روکش سطوح پیاده‌روها، پارکینگ‌ها، و خیابان‌ها را دارد.[۱۷]

با توجه به اینکه روسازی‌های نفوذپذیر در معرض نفوذ رواناب به هنگام وقوع بارش قرار می‌گیرند، لازم است تمهیداتی مطابق این شرایط رعایت شوند:[۱۷ و ۱۸]

۱. در معابری که بار ترافیکی نسبتاً پایینی دارند، استفاده شوند (برای مثال، پیاده‌روها، کوچه‌های با ترافیک پایین، و حیاط منازل).

۲. کمینه‌ی نفوذپذیری خاک باید ۰/۸ سانتی‌متر در ساعت باشد و همچنین، در حوضه‌ی موردنظر نسبت سطوح نفوذناپذیر به نفوذپذیر ۳ به ۱ باشد.

۳. روسازی نفوذپذیر در مناطق آلوده و سمی توصیه نمی‌شود.

۴. در جانمایی سطوح مذکور، عمق یخبندان بررسی شود.

از مزایای روش اخیر می‌توان به موارد: ۱) ذخیره‌ی موقت آب، ۲) تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی، ۳) تصفیه‌ی رواناب شهری و بهبود کیفیت آن با استفاده از مکانیزم‌های صاف‌کردن، جذب سطحی خاک، و تجزیه‌ی بیولوژیکی به‌دلیل عبور رواناب از لایه‌های خاک، ۴) استفاده برای سطوح نفوذناپذیر شهری، مانند روکش پیاده‌روها و پارکینگ‌ها، صحن ساختمان‌های اداری و عمومی، و حیاط منازل و املاک خصوصی، ۵) کاهش حجم رواناب درصورت استفاده‌ی یکپارچه و پوشش ۳۰ درصدی سطح حوضه، ۶) جلوگیری از انباشت آب در سطح خیابان، ۷) افزایش نرخ نفوذ آب، و ۸) جلوگیری از خیس‌شدن عابران پیاده به هنگام عبور وسائط نقلیه و گِل‌آلودشدن آن اشاره کرد.[۱۷ و ۱۸]

با وجود ویژگی‌های ذکرشده، روش روکش‌های نفوذپذیر معایبی نیز دارد، که به این شرح است:[۱۷ و ۱۸]

۱. باتوجه به اینکه گرفتگی، کارایی سیستم‌های مذکور را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد، استفاده از روکش‌های نفوذپذیر نیز باید در مناطقی استفاده شود که رواناب، حاوی موادی از قبیل رس و لای نباشد و موجب پُرشدن فضای خالی بین دانه‌های آن نشود.

۲. با توجه به زمان ماند هیدرولیکی در روکش‌های نفوذپذیر، ممکن است نگهداشت رواناب در روکش‌های ذکرشده پس از دو بارش همزمان پاسخگو نباشد و کارایی خود را از دست بدهد.

[15] Lyu

۳. در مناطق با بار ترافیکی بالا و دارای رواناب آلوده توصیه نمی‌شود.

۴. هزینه‌ی راه‌اندازی بالاتر نسبت به روسازی‌های معمولی.

مطالعات مختلفی در مورد عملکرد و اثربخشی روسازی‌های نفوذپذیر در نقاط مختلف جهان انجام شده است. آل‌یاسری و ژو[16] (۲۰۱۶)،[۲۲] رواناب قبل از ساخت و بعد از ساخت روسازی نفوذپذیر در سنت لوییس ایالات متحده را مقایسه کرده و دریافته‌اند که کاهش رواناب از ۱۳٪ برای آسفالت متخلخل تا ۴۶٪ برای سنگفرش‌های بتنی به هم پیوسته‌ی نفوذپذیر متغیر بوده است. بیشتر قابلیت‌های کاهش حجم سنگفرش‌های نفوذپذیر به اندازه‌ی مساحت زهکشی مشارکت‌کننده نسبت داده می‌شود. ارزیابی قابلیت سه نوع روسازی نفوذپذیر در بهبود کیفیت رواناب، در دوره‌ی زمانی ۲۲ ماهه، در مَدیسون ایالت ویسکانسِن ایالات متحده نشان داد که: ۱) روسازی نفوذپذیر جامدات معلق را تا تقریباً ۶۰٪ کاهش می‌دهد، ۲) غلظت کلراید در زمستان کاهش یافته است، اما دوباره در بهار آزاد شده است، ۳) آلاینده‌های محلول را به‌طورمؤثر تصفیه نمی‌کنند، و ۴) pH بالارفته در بتن نفوذپذیر ممکن است فسفات را کاهش دهد.[۲۳] همچنین، نتایج آزمایش‌های میدانی ۱۵ ماهه، به‌طورواضح، مزایای زیست‌محیطی سنگفرش‌های متخلخل در زمینه‌های: ۱) کاهش حجم و دبی اوج رواناب سطحی، ۲) مهار آب باران، ۳) تغذیه‌ی آب زیرزمینی، ۴) کاهش حرارت سطح سنگفرش (کاهش اثر پدیده‌ی جزیره‌ی حرارتی شهری)، و ۵) تبخیر رواناب نفوذی به داخل مواد سنگفرش را نشان داده است.[۲۴]

۴.۱.۳. جوی‌باغچه‌ها

جوی‌باغچه یا آبراهه‌ی علفکاری‌شده (شکل ۵)، کانال خاکی عریض و کم‌عمقی است که برای جلوگیری از فرسایش و تسهیل نفوذ آب به درون خاک علفکاری‌شده است. شیب کم جوی‌باغچه با استفاده از موانع در طول مسیر، نفوذ رواناب در خاک را افزایش می‌دهد و در این راستا، بخش قابل‌ملاحظه‌ای از آلودگی‌های آب نیز زدوده می‌شود.[۱۱]

بهبود کیفیت رواناب به‌دلیل نفوذ بخشی از رواناب در خاک، کمک به تغذیه‌ی زیرزمینی و ایجاد چشم‌انداز و منظر زیباتر در شهر آب از مزایای روش جوی‌باغچه است.[۱۱، ۱۸، و ۱۹] مکانیزم نفوذ در جوی‌باغچه‌ها باعث تغذیه‌ی آب زیرزمینی می‌شود. البته، جوی‌باغچه‌ی مرطوب در تغذیه‌ی آب زیرزمینی مشارکت خیلی کمی دارد. مطالعه‌ای در ارتباط با ارزیابی عملکرد جوی‌باغچه‌ها



شکل ۵. جوی‌باغچه‌ها.[۲۶]

در تصفیه‌ی رواناب بزرگراه،[۲۵] نشان داده است که: ۱) جوی‌باغچه‌ها به‌طورقابل‌توجهی جامدات معلق کل و فلزات سرب، مس، روی، و کادمیم را حذف کرده‌اند، ۲) آلاینده‌های متصل به ذرات، بیشترین میزان حذف را داشته‌اند، و ۳) مکانیزم تصفیه‌ی غالب، ته‌نشینی و صاف‌کردن درون لایه‌ی علف بوده است. همچنین، مرور فرآیندهای بهبود کیفیت رواناب در جوی‌باغچه‌ها توسط گاوریک[17] و همکاران (۲۰۱۹)،[۲۶] نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات تجربی کیفیت جریان جوی‌باغچه بر حذف آلاینده‌های همراه با رواناب جاده و به ویژه جامدات معلق تمرکز کرده و مطالعات نسبتاً کمی هم در مورد مواد مغذی، باکتری‌های همراه با هیدروکربن‌ها، مواد نیازمند اکسیژن، کلراید، و باکتری نشانگر مدفوع انجام شده است.

با وجود مزایای جوی‌باغچه‌ها، سامانه‌ی اخیر معایبی نیز دارد که موجب می‌شود تا در مناطق توسعه‌یافته، کارایی کمتری داشته باشد. در مناطق مذکور، به‌دلیل تراکم جمعیت و رشد صنعتی، بار رسوب بالا و تخریب پوشش گیاهی مشاهده می‌شود و این اتفاق باعث ایجاد مانداب و ایجاد تجمع پشه در منطقه خواهد شد. همچنین، روش جوی‌باغچه نیازمند شیب مناسب (کمتر از ۵٪) است و مساحتی معادل حدود ۴ هکتار را می‌تواند تحت سرویس قرار دهد. وجود خاک خشک با نفوذپذیری زیاد، از قبیل: ماسه، لوم ماسه، ماسه‌ی لومی، لوم، و سیلت لومی، نیز یکی دیگر از شرایطی است که استفاده از روش جوی‌باغچه را محدود می‌کند.[۱۱ و ۱۸]

۵.۱.۳. ترانشه‌های نفوذ

ترانشه‌ی نفوذ (شکل ۶)، یک ترانشه‌ی طویل و کم‌عرض است، که درون آن با ذرات درشت‌دانه و قطعات سنگ پُر می‌شود و معمولاً مجرای خروجی ندارد. رواناب ورودی به تأسیسات ذکرشده در فضای خالی مابین ذرات درشت‌دانه موقتاً ذخیره می‌شود و به‌تدریج از کف و دیواره‌ها به درون خاک اطراف ترانشه نفوذ می‌کند.[۱۷]

از مزایای سامانه‌ی ترانشه‌های نفوذ، می‌توان به موارد: ۱) کاهش حجم رواناب، ۲) تغذیه‌ی آبخوان، ۳) نیاز به فضای کم و عدم آشفتگی محیطی به‌علت زیرسطحی‌بودن آن، ۳) بهبود کیفیت رواناب، و ۴) قابلیت استفاده در بین جاده‌ها اشاره کرد.[۱۷ و ۱۸] الزامی‌بودن بررسی و کنترل گرفتگی در آن‌ها، توصیه به استفاده از سیستم پیش‌تصفیه برای آن، نیاز به فاصله‌ی کمینه‌ی ۱/۲ متری



شکل ۶. ترانشه‌های نفوذ.[۳۱]

[16] Alyaseri & Zhou

[17] Gavrić

از آب زیرزمینی (توصیه می‌شود سطح آب زیرزمینی پایین باشد)، و نامناسب‌بودن در مناطق صنعتی و تجاری، از معایب ترانشه‌های نفوذ به‌حساب می‌آید.[۱۷ و ۱۸]

مهندسان طراحی به‌طورکلی از ترانشه‌های نفوذ برای نواحی زهکشی کوچک‌تر از ۵ هکتار، با نفوذپذیری نسبتاً بالا استفاده می‌کنند.[۲۷] ترانشه‌های نفوذ اغلب برای نواحی خشک خیلی مناسب هستند، زیرا آب زیرزمینی را تغذیه می‌کنند. در بیشتر آب و هواهای سرد می‌توانند قابل اجرا باشند، اما چالش‌هایی برای استفاده‌ی آن‌ها نیز وجود دارد.

داده‌های عملکرد برای کنترل‌کننده‌های بر پایه‌ی نفوذ رواناب، به‌طورکلی، به حجم رواناب دریافت‌شده، رواناب نفوذیافته، و همچنین، سطح پیش‌فرض نفوذ خاک مرتبط هستند.[۲۸] بررسی اثربخشی حوضه‌ی نفوذ رواناب[18] در حذف آلاینده‌ها از رواناب شهری در شرق سیدنی توسط بریچ[19] و همکاران (۲۰۰۵)،[۲۹] نیز نشان داده است که حوضه‌های نفوذ رواناب به‌طور متوسط تا زیاد در حذف مواد معلق و فلزات کمیاب مس، سرب، و روی مؤثر بوده‌اند. مطالعات کمی برای ارزیابی عملکرد ترانشه‌های نفوذ با درنظرگرفتن نفوذ هم از سمت دیواره‌ی کناری و هم کف انجام شده است (برای مثال، نوشتار لی[20] و همکاران (۲۰۱۴)،[۳۰]).

۶.۱.۳. مخازن نگهداشت زیستی (باغچه‌های باران‌زاد)

سیستم‌های نگهداشت زیستی یا باغچه‌های باران‌زاد به‌طورگسترده در سراسر جهان، از جمله ایالات متحده‌ی آمریکا، استرالیا، چین، بریتانیا، کانادا، سنگاپور، و نیوزلند نصب می‌شوند.[۳۲] مخازن نگهداشت زیستی (شکل ۷)، از یک محدوده‌ی مخزن‌مانند سطحی و یک لایه‌ی خاکی زیرین تشکیل می‌شوند. آبی که در لایه‌ی بالائی سیستم جمع می‌شود، از لایه‌های علف‌کاری‌شده‌ی سطحی، لایه‌ی کود گیاهی، و لایه‌ی خاک تراوا عبور می‌کند و درنهایت، در سنگدانه‌های بستر به‌طورموقت ذخیره می‌شود. آب ورودی به سامانه، یا به لایه‌های پائین‌تر خاک نفوذ می‌کند و یا از طریق یک لوله‌ی زهکشی مشبک به سمت تخلیه‌گاه یا یک کانال خروجی هدایت می‌شود. در مناطق شهری با تراکم زیاد، نواحی مانند نوارهای میانی خیابان، پارکینگ‌ها، جزایر ترافیکی، پیاده‌روها، و سایر مناطق غیرقابل نفوذ، برای درنظرگرفتن سامانه‌های نگهداشت زیستی مناسب هستند.[۱۰]



شکل ۷. مخازن نگهداشت دائمی زیستی و باغچه‌های باران‌زاد.[۳۳]

باغچه‌ی باران‌زاد، شرایط نفوذ و تصفیه‌ی رواناب جمع‌آوری شده را فراهم می‌کند و منجر به کاهش دبی اوج و حجم رواناب می‌شود. البته مطالعه‌ای نشان داده است که تسهیلات برداشت آب، مانند باغچه‌های باران‌زاد، می‌توانند به‌طورمؤثر سیل‌گرفتگی با شدت بارش کم را کم کنند، اما قادر به کاهش سیلاب با بزرگی بالا را ندارند.[۳۴] باغچه‌های باران‌زاد در ظاهر همانند باغچه‌های معمولی هستند؛ بنابراین، باغچه‌های باران‌زاد به راحتی می‌توانند جایگزین باغچه‌های موجود در منازل یا حاشیه‌ی خیابان‌ها شوند.

کاهش دبی اوج و حجم رواناب مناطق نفوذناپذیر، ایجاد شرایط مناسب برای نفوذ آب به درون خاک، تصفیه‌ی رواناب (توانائی پاکسازی رسوب‌های ریزدانه، فلزات سنگین، مواد آلی و مغذی، باکتری‌ها، و مواد ارگانیک)، انعطاف فراوان برای تطابق و همخوانی با محل احداث طبق شرایط و ویژگی‌های محل موردنظر و ایجاد منظره‌ی زیبا به‌واسطه‌ی کاشت انواع گیاهان از مزایای باغچه‌های باران‌زاد هستند. از محدودیت‌های باغچه‌های باران‌زاد می‌توان به عدم کارایی آن‌ها در شیب‌های زیاد (بیش از ۱۵٪) و ایجاد مشکل در عملکرد و از کارافتادن آن‌ها در صورت وجود بار زیاد رسوب‌ها اشاره کرد.[۳۵]

تانگ[21] و همکاران (۲۰۲۰)،[۳۶] نشان داده‌اند که حتی اگر حوضچه‌های نگهداشت زیستی، بخش کوچکی از مساحت شهر را اشغال کنند، می‌توانند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای اثر هیدرولوژیکی نامطلوب حاصل از نفوذناپذیری را کاهش دهند.

طراحی حوضچه‌ی نگهداشت زیستی و انتخاب مؤلفه‌های آن به ویژگی‌های هیدرولوژیکی، بار آلودگی رواناب، نوع پوشش گیاهی، محیط خاک، و لایه‌های زیرین بستگی دارد.[۳۷] انتخاب دقیق پوشش گیاهی در حین طراحی سیستم‌های فیلتراسیون زیستی برای دستیابی به نتایج عملی موردنظر حیاتی است. دوام و رشد گیاه شدیداً وابسته به آب و هواست و این به‌وضوح نیاز برای پژوهش بر عملکرد حوضچه‌های نگهداشت زیستی در آب‌وهواهای مختلف را نشان می‌دهد.[۳۸ و ۳۹] بررسی نوع و ماهیت رواناب ورودی به نگهداشت زیستی نیز حیاتی است. اگر انتظار می‌رود که رواناب شامل رسوهای معلق بالا باشد، مطلوب است که نوارهای بافر گیاهی (علف)، به منظور پیش‌تصفیه نصب شود.[۴۰]

راهنماهای طراحی ویژه‌ای برای نصب و اجرای سیستم‌های نگهداشت زیستی برای مناطق جغرافیایی منتخب توسعه یافته‌اند.[۴۱ و ۴۲] ویژایارغاوان[22] و همکاران (۲۰۲۱)،[۴۳] بیان کرده‌اند که سازگارکردن راهنماهای طراحی بدون درنظرگرفتن شرایط زیرساختی و آب‌وهوایی محلی اغلب به شکست اجرایی سیستم‌های نگهداشت زیستی منجر می‌شوند، که در حال حاضر بسیاری از شهرداری‌ها با آن مواجه هستند. برای مثال، وانگ[23] و همکاران (۲۰۱۷)،[۴۴] اشاره کرده‌اند که اثربخشی ضعیف سیستم‌های نگهداشت زیستی نصب‌شده در کشورهای گرمسیری (استوایی، مانند سنگاپور) غالباً به‌دلیل اینکه سیستم‌های مذکور براساس راهنماهای مناطق معتدل طراحی شده‌اند، رخ می‌دهد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود بررسی‌های هدفمند محلی و میدانی بر سیستم‌های نگهداشت زیستی، برای دست‌کم ۸ ماه قبل و بعد از تصفیه انجام شود.[۴۳]

[18] Stormwater Infilteration Basin
[19] BIRCH
[20] Lee
[21] Tang
[22] Vijayaraghavan
[23] Wang

۷.۱.۳. مخازن ذخیره‌ی موقت رواناب

استخرها یا حوضچه‌های نگهداشت موقت رواناب (شکل ۸)، مخازن و یا تأسیسات ذخیره‌ی سطحی هستند که با ذخیره‌ی موقت رواناب حاصل از بارندگی و کنترل جریان خروجی، موجب کاهش دبی اوج سیلاب می‌شوند. میزان جریان خروجی از مخازن مذکور به ظرفیت تأسیسات پایین‌دست مخزن بستگی دارد.[۴۶]

از مزایای سامانه‌ی مخازن ذخیره‌ی موقت رواناب می‌توان به: ۱) کمک به ته‌نشینی مواد جامد معلق، و ۲) قابل استفاده‌بودن در مناطق توسعه‌یافته و پر تراکم شهری، و همچنین پارکینگ‌ها اشاره کرد.[۴۶] تجمع پشه و حشرات در منطقه، در صورت طراحی و نگهداری ضعیف حوضچه‌های نگهداشت، و امکان ایجاد بو و مزاحمت برای ساکنان در صورت عدم زهکشی مناسب در محدوده‌ی شهری، از محدودیت‌های سامانه‌ی مخازن ذخیره موقت رواناب است.

۸.۱.۳. مخازن ذخیره‌ی دائمی

در اوقات خشک و بدون باران، که فقط جریان پایه برقرار است، مخزن ذخیره‌ی دائمی (شکل ۹) به صورت یک حوضچه‌ی دائمی عمل می‌کند و سطح آب حوضچه از سطح فوقانی بخش دائمی مخزن بالاتر نمی‌رود. در مواقع سیلابی، جریان ورودی به حجم موجود در بخش دائمی مخزن افزوده می‌شود و بخش دیگری از مخزن را اشغال می‌کند که در بالای مخزن دائمی قرار دارد، سپس به‌تدریج تخلیه می‌شود. این گونه مخازن در کنترل و ته‌نشینی رسوب‌های ورودی به حوضچه مؤثر هستند و کیفیت آب را نیز تا حد زیادی بهبود می‌بخشند.[۴۷]



شکل ۸. مخازن ذخیره‌ی موقت رواناب.[۴۵]



شکل ۸. مخازن ذخیره‌ی دائمی.[۴۸]

حوضچه‌های دائمی یا مرطوب نسبت به حوضچه‌های نگهداشت موقت و خشک، غالباً منظره‌ی زیباتری را ایجاد می‌کنند و کارآیی بیشتری در تصفیه‌ی رواناب‌های شهری دارند. اما، استفاده از آن‌ها در شرایطی مطرح می‌شود که یک جریان پایه‌ی دائمی در سراسر طول سال، یا در بیشتر اوقات، وارد حوضچه یا استخر شود.[۴۷] مقایسه‌ی اثربخشی حوضه‌های نگهداشت موقت و دائمی (برای جلوگیری از آثار منفی افزایش رواناب) در شهرستان جیمزسیتی ویرجینیا نشان داد که در رخدادهای طوفانی، حوضه‌های خشک غلظت بالاتری از رسوب‌ها و مواد مغذی محلول را نسبت به حوضچه‌ی مرطوب تخلیه می‌کنند.[۴۷]

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که زمان ماند هیدرولیکی (HRT)[۲۴] یک حوضچه‌ی نگهداشت دائمی، متغیر کلیدی تعیین‌کننده‌ی اثربخشی تصفیه‌ی آن است.[۴۸] همچنین، یک پژوهش پایشی به مدت ۱ سال بر حوضچه‌ی ذخیره‌ی دائمی در ساحل ویرجینیای ایالات متحده‌ی آمریکا نشان داد که ویژگی‌های بارش، شامل: عمق بارش، بیشینه‌ی شدت بارش، و دوره‌ی خشک پیشین، نقش مهمی در اثربخشی حذف و تصفیه‌ی حوضچه‌های ذخیره‌ی دائمی داشته است.[۴۹]

۹.۱.۳. تالاب مصنوعی

تالاب‌های مصنوعی (شکل ۱۰)، حوضچه‌های نگهداشت کم‌عمقی هستند که با دریافت جریان پایه‌ی دائم و پیوسته و استفاده از پوشش گیاهی متراکم از سرعت رواناب می‌کاهند و زمان لازم را برای رسوب‌گذاری، نفوذ آب، و جذب بیولوژیک آلاینده‌ها به‌وجود می‌آورند.[۵۰] کارایی تالاب‌ها مصنوعی در کاهش دبی اوج سیلاب ورودی، قابل قبول است و همچنین، سازگاری خوبی با محیط اطراف و شرایط اکولوژیکی بالقوه‌ی منطقه دارد. اما، در کاهش حجم سیلاب، کارایی ضعیفی نشان می‌دهند.[۵۰] نقطه‌ی ضعف عمده‌ی این تأسیسات نیاز به جریان پایه‌ی دائم و همیشگی برای حصول اطمینان از ادامه‌ی حیات تالاب است.

در زمینه‌ی حذف آلودگی، تالاب‌های مصنوعی از مؤثرترین کنترل‌کننده‌ها به‌حساب می‌آیند. تالاب‌های مصنوعی کمتر به تغییرات بار آلودگی حساس‌اند و قادر به تصفیه‌ی آب معدن‌کاری، فاضلاب صنعتی، فاضلاب خانگی، فاضلاب حیوانی، رواناب شهری، و رواناب مزرعه هستند.[۵۱] نتایج مطالعه‌ای نشان داده است که وجود پوشش گیاهی (که به‌طور قابل‌توجهی اثربخشی فرآیند تصفیه را افزایش می‌دهد) و زمان ماند بهینه، مقاومت سیستم در برابر غلظت متغیر آلاینده‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد.[۵۱]



شکل ۹. تالاب مصنوعی.[۵۲]

[24] Hydraulic Residence Time

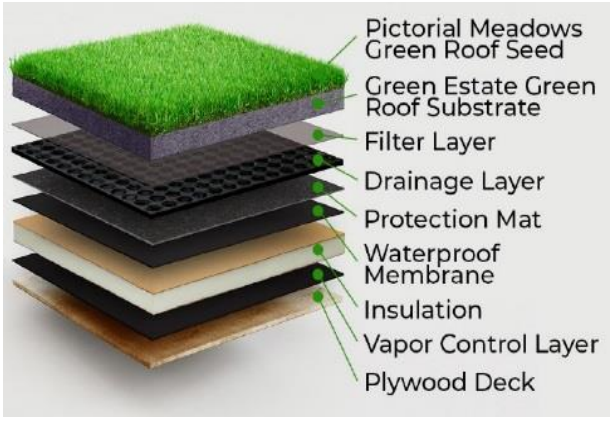
برنامه‌ریزان باید بین استفاده از یک تالاب مصنوعی برای مدیریت رواناب و انحراف رواناب به یک تالاب طبیعی تفاوت قائل باشند؛ آن‌ها باید از انحراف رواناب به تالاب طبیعی جلوگیری کنند، چون تغییر هیدرولوژی یک تالاب طبیعی می‌تواند به نوبه‌ی خود به اکوسیستم طبیعی آسیب وارد کند.

۱۰.۱.۳. بام سبز

بام سبز (شکل ۱۱)، سامانه‌ی چندلایه‌ای است که سقف و بالکن یک ساختمان را با پوشش گیاهی می‌پوشاند و با جذب و نگهداری بخشی از حجم باران و با استفاده از فرآیندهای تبخیر- تعرق و تصفیه، حجم و دبی اوج رواناب را کاهش می‌دهد. بنابراین، می‌تواند خطر مشکلات سیل‌گرفتگی ناگهانی در نواحی شهری را کاهش دهد.[۵۳] مطالعات پیشین، عملکرد بام‌های سبز در زمینه‌ی کاهش حجم رواناب و تأخیر دبی اوج را در مقایسه با بام‌های مرسوم گزارش کرده‌اند.[۵۴ و ۵۵] علاوه‌بر این، بام سبز موجب بهبود کیفیت آب‌وهوا، حفظ زیبائی شهر، و جلوگیری از اتلاف انرژی ساختمان می‌شود.[۵۴] بام‌های سبز را می‌توان برای بسیاری از مناطق، از جمله خانه‌های مسکونی و آپارتمان‌ها، تأسیسات صنعتی، ساختمان‌های تجاری، و گاراژها طراحی کرد. با وجود این، عواملی نظیر ظرفیت باربری سقف، مقاومت غشاء سقف برای نفوذ رطوبت و ریشه، وزش باد، و شکل و شیب سقف باید قبل از آن درنظر گرفته شوند.

هزینه‌ی بالاتر نسبت به بام‌های سنتی، مناسب‌نبودن برای بام با شیب تند (بیش از ۲۵ تا ۳۰ درجه از قبیل سوله‌های صنعتی)، نیاز به مراقبت و نگهداری از پوشش گیاهی، تقویت سازه‌ی سقف، امکان نفوذ آب به داخل سقف در صورت آسیب و عدم اجرای مناسب و نیاز به آبیاری زیاد در زمان رشد و جوانه‌زدن گیاه از معایب سامانه‌ی بام سبز هستند.[۱۷ و ۱۸]

اگرچه بام‌های سبز گران هستند، اما در طی ۳۰ سال گذشته، به‌دلیل مزایایشان، در بیشتر کشورهای توسعه‌یافته، مانند آلمان، استرالیا، سوییس، اتریش، ایالات متحده‌ی آمریکا، ژاپن، سنگاپور، و کره‌ی جنوبی، محبوب‌تر شده‌اند.[۵۶ و ۵۷] از آنجا که در نواحی شهری توسعه‌یافته، مساحت سطح بام ۴۰ تا ۵۰ درصد همه‌ی سطوح نفوذناپذیر کل را تشکیل می‌دهد، بام سبز روش مؤثری در کاهش رواناب و دبی اوج در نواحی شهری در نظر گرفته می‌شود.[۵۷] شفیک[۲۵] و همکاران (۲۰۱۸)،[۵۷] بر روی عملکرد بام‌های سبز در سئول (کره‌ی جنوبی) بیان اظهار کرده‌اند که نگهداشت رواناب بر روی بام‌های سبز غالباً به شدت و مدت رخدادهای بارندگی بستگی دارد، که مقدار میانگین آن در شهر سئول بین ۱۰ تا ۶۰ درصد در رخدادهای بارش، متفاوت بوده است. ایشان دریافته‌اند که کاربرد گسترده‌ی بام سبز، نتایج امیدوارکننده‌ای برای مدیریت رواناب در نواحی متراکم شهری سئول ارائه می‌کند.



شکل ۱۱. بام سبز.[۵۶]

عملکرد مدیریت رواناب بام سبز تحت انواع مختلف بام سبز و شرایط آب‌وهوایی متفاوت است.[۵۸] نتایج نگهداشت رواناب بام‌های سبز به سن بام سبز هم بستگی دارد.[۵۵] مطالعات پیشین نشان داده‌اند که بام‌های سبز قدیمی‌تر می‌توانند رواناب بارش بیشتری را در مقایسه با بام سبز جدید نگه دارند.[۵۵] انتخاب عمق محیط خاک بام سبز، عامل بسیار مهمی در کاهش دبی اوج است.[۵۷]

۲.۳. طراحی و اجرای اقدام‌های توسعه‌ی کم اثر

یکی از مسائل مهم در بکارگیری روش‌های توسعه‌ی کم اثر، تعیین مکان‌های مناسب برای احداث آن‌ها با توجه به معیارهای مختلف است. محل اجرای روش‌های توسعه‌ی کم اثر در میزان دبی اوج و حجم جریان تأثیرگذار است و احداث آن‌ها در مکان‌های نامناسب می‌تواند منجر به بدترشدن شرایط دفع سیلاب شود.[۱۹] با توجه به وجود انواع اقدام‌های توسعه‌ی کم اثر و مکان‌های بالقوه‌ی طراحی، فرآیند انتخاب انواع مناسب روش‌های توسعه‌ی کم اثر، در شرایط مکانی متفاوت پیچیده است. از طرف دیگر، بودجه‌ی محدود، تعیین یک راه‌حل توافقی برای هماهنگی بین توسعه و حفاظت از منابع را ایجاب می‌کند. بنابراین، فرآیند اخیر نیازمند اطلاعات ورودی زیاد و معیارهای متعدد برای تصمیم‌گیری است. زمانی که بیش از یک معیار تصمیم‌گیری دخیل باشد، تصمیم‌گیری ضرورتاً یک تصمیم‌گیری چندمعیار (MCDM)[26] خواهد شد. حتی، تعیین طرح ایده‌آل یا نزدیک به ایده‌آل در مورد یک نوع از روش‌های توسعه‌ی کم اثر، نیازمند درنظرگرفتن بیش از ۱۲ پارامتر است.[۵۹] لذا ضروری است به منظور ارائه‌ی برنامه‌ی مدیریت رواناب در حوضه‌های آبخیز شهری برای انتخاب مناسب‌ترین نوع، مکان، و ترکیبی از روش‌های توسعه‌ی کم اثر، مجموعه‌ای از معیارهای دخیل مدنظر قرار گیرند.

۴. تجارب جهانی در استفاده از رویکردهای نوین مدیریت رواناب شهری

در سال‌های گذشته، پذیرش فناوری و شیوه‌های غیرمتمرکز مدیریت رواناب شهرها، به ویژه زیرساخت‌های سبز افزایش پیدا کرده است؛ که از جمله‌ی عوامل مؤثر در آن، مزایای تأمین منابع و حفاظت محیط‌زیست و از سوی دیگر، صرفه‌جویی در هزینه‌های کلان احداث زیرساخت‌های سنتی کنترل رواناب در شهرهاست. سایر عوامل مؤثر در افزایش اقبال به مدیریت غیرمتمرکز رواناب، شامل کاهش خسارت‌های ناشی از رواناب، بهبود کیفیت هوا، و بهبود زیبایی‌شناختی شهری است.[۶۰]

حامیان محیط‌زیست، راهکارهایی را برای تشویق و حمایت از زیرساخت‌های سبز پیشنهاد کرده‌اند، که از آن جمله می‌توان به تصویب قوانینی برای کمک به اجرای پروژه‌ها و کمک به ایجاد پایگاه اطلاعاتی در مورد نحوه‌ی اجرا و صرفه‌ی اقتصادی اشاره کرد. با وجود این، برخی از مهندسان مشاور و مدیران شهری، انتقادهایی را در مورد ریسک و عدم اطمینان در مورد هزینه و امکان دستیابی به اهداف کیفیت آب مطرح کرده‌اند. در مقابل، مدافعان این استدلال را مطرح می‌کنند که بدون تأمین مالی برای اقدام‌های زیرساخت سبز، آسیب‌های اقتصادی و آثار کیفیت آب ناشی از رواناب پرهزینه‌تر از حمایت از چنین اقدام‌هایی خواهد بود.[۶۰]

[25] Shafique

[26] Multi Criteria Decision Making

تحولاتی که طی نیم قرن گذشته در دیدگاه‌های مرتبط با مدیریت آب‌های سطحی رخ داده است، تحقیقات و بررسی‌های بین‌المللی درباره‌ی این دیدگاه‌ها و جمع‌بندی اقدام‌ها و تجارب کاربردی درمناطق مختلف جهان، در مجموع حاکی از آن است که شرایط و امکانات، محدودیت‌ها، و الزامات محلی می‌باید در جذب و بومی‌سازی دیدگاه‌های نوین در نظر گرفته شوند.[۶۰] در ادامه، تجربه‌های چند کشور از قاره‌های مختلف، با ویژگی‌های مختلف محیطی به‌طور مختصر ارائه شده‌اند.

۱.۴. ایالات متحده‌ی آمریکا

به‌نظر می‌رسد اولین استفاده از رویکردهای توسعه‌ی کم اثر در ایالات متحده، با معرفی قانون آب پاک فدرال ایالات‌متحده در سال ۱۹۷۲ توسعه یافته است.[۶۱] رویکردهای توسعه‌ی کم اثر، اولین بار در سال ۱۹۹۳ در ناحیه‌ی پرینس جورج ایالت مریلند آمریکا، به‌عنوان روشی برای کاهش آثار منفی شهرنشینی و نفوذناپذیری سطوح بیان شده است.[۶۲] اصطلاح بهترین شیوه‌های مدیریت (BMPs)، سپس برای پرداختن به مسائل آلودگی استفاده شده است.

در ایالات متحده، رویکردهای توسعه‌ی کم اثر توسط هر ایالت با تنوع زیاد اجرا و مدیریت می‌شود. برای کمک به متخصصان برنامه‌ریزی منطقه‌ای، سازمان حفاظت از محیط‌زیست ایالات‌متحده، وب‌سایت مخصوصی برای ابزارهای طراحی شهری رویکردهای توسعه‌ی کم اثر فراهم ساخته است.[۶۱]

کوپلند[۲۷] (۲۰۱۶)،[۶۰] کارشناس منابع و سیاست‌های محیط‌زیستی، در گزارشی با عنوان زیرساخت سبز و مسائل مربوط به مدیریت رواناب شهری (متعلق به خدمات تحقیقات کنگره‌ی ایالات متحده)، مانع اصلی بر سر راه توسعه‌ی زیرساخت‌های ذکرشده را کمبود بودجه بیان کرده است. برای رفع این مشکل بسیاری از شهرداری‌ها در ایالات متحده سعی می‌کنند با ارائه‌ی مشوق‌ها، شهروندان و مالکان خانه‌ها را تشویق کنند تا از زیرساخت‌های سبز استفاده کنند؛ متداول‌ترین نوع مکانیسم‌های تشویقی محلی، عبارت‌اند از: تخفیف یا اعطای اعتبار در تأمین هزینه‌ها، تخفیف یا تأمین مالی در نصب روش‌های خاص، و اعطای جایزه و تقدیر. برنامه‌ی مجوز سبز شیکاگو، مجوزها را برای پروژه‌هایی که معیارهای طراحی خاصی، شامل شیوه‌های مدیریت بهتر رواناب را در نظر می‌گیرند، سریع‌تر بررسی می‌کند. طرح پاداش نسبت مساحت در پورتلند، مساحت مجاز احداث بنای ساختمان را در ازاء افزودن بام سبز افزایش می‌دهد. برخی از شهرداری‌ها برای هزینه‌ی بشکه‌های باران، کاشت گیاهان، و سایر موادی که می‌توانند برای کنترل رواناب استفاده شوند، یارانه می‌دهند.

شهر نیویورک، متراکم‌ترین شهر در ایالات‌متحده، از طریق وزارت حفاظت از محیط‌زیست، به تغییر رویکرد مدیریت رواناب تحت برنامه‌ی راهبردی حفاظتی ۱۴-۲۰۱۱ روی آورده است؛ که هدف آن، بیشینه‌سازی زیرساخت‌های سبز و کاهش رواناب از مناطق توسعه‌یافته‌ی موجود و جدید است. برای دستیابی به هدف مذکور، برنامه‌ریزی شده است که در طی ۲۰ سال آینده به‌تدریج تمهیداتی برای جمع‌آوری ۲۵ میلی‌متر اول بارندگی در ۱۰٪ از مناطق غیرقابل‌نفوذ ایجاد شود. طرح زیرساخت سبز سرمایه‌گذاری عمومی و خصوصی را در زمینه‌ی جوی‌باغچه‌ها، بام‌های سبز، و سایر تمهیدات کنترل در منشأ افزایش می‌دهد. سایر مزایای طرح زیرساخت سبز: دمای خنک‌تر شهری، کیفیت هوای بهتر، فضای سبز بیشتر، صورت‌حساب‌های انرژی کمتر، ارزش ملک بالاتر، و کاهش سرریز فاضلاب ترکیبی هستند.[۶۲]

علاوه‌بر تجربیات عملیاتی ایالات متحده، مطالعات پژوهشی زیادی نیز انجام شده است.[۶۳] طبق نتایج مطالعات اخیر، تصفیه‌ی اولین رواناب، که غلظت بیشتری از آلاینده دارد، سیاست مدیریتی بهتری نسبت به تصفیه‌ی کل رواناب پس از پیوستن به آب‌های سطحی است. این موضوع به این دلیل بیان می‌شود که عامل اصلی هزینه‌ی تصفیه، حجم آب است (نه غلظت آلاینده) و همچنین، بازده حذف در غلظت‌های بالاتر بیشتر است.[۶۳]

۲.۴. کانادا

کانادا در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰ شروع به توسعه‌ی برنامه‌ریزی سیلاب، شامل حوضچه‌های نگهداشت بر روی آبروی کنار جاده و سیستم‌های لوله‌کشی کرده است.[۶۴] در سال ۱۹۹۲، استان بریتیش کلمبیا کتاب راهنمای برنامه‌ریزی سیلاب را تهیه کرد، که تشخیص داد حوضچه‌های نگهداشت می‌توانند سیل را کاهش دهند؛ اما معمولاً از فرسایش مداوم کانال، که آثار نامطلوب در اموال و ماهیگیری ایجاد می‌کند، جلوگیری نمی‌کنند. راه‌حل‌های نگهداشت نیز اغلب اجازه نمی‌دهند جریان پایه‌ی پایدار، که از نظر اکولوژیکی در ماه‌های خشک حیاتی است، جریان داشته باشد.

در سال ۲۰۰۳، کتابچه‌ی راهنمای برنامه‌ریزی و طراحی مدیریت توسعه‌ی کم اثر رواناب و سیلاب منتشر شده است؛[۶۵] که در آن، بر فرصت‌های نفوذ در مقیاس محلی تمرکز و تشخیص داده شده است که در راه‌حل‌های مدیریت سیلاب باید شرایط خاص محلی را در نظر بگیرند. هدف نهایی توسعه‌ی کم اثر، حفظ شرایط هیدرولوژیک طبیعی یا پیش از توسعه و کمینه‌ساختن حجم رواناب تولیدشده در منطقه (به‌عنوان مثال، محله، بخش فرعی، یا قطعه‌ی فردی) تعریف شده است. کاهش رواناب به‌صورت کاهش حجم کل رواناب از طریق نگهداری آب توسط تاج درختان، تبخیر، برداشت آب باران، و تبخیر-تعرق رواناب تعریف می‌شود. روش توسعه‌ی کم اثر در راهنمای مذکور، شامل مجموعه‌ای از راهبردهای طراحی سایت است، که رواناب را با روش‌های سازه‌ای توزیع‌شده در مقیاس کوچک، از طریق فرآیندهای نفوذ، تبخیر- تعرق، برداشت، فیلتراسیون، و نگهداشت رواناب به میزان کمینه می‌رساند. همچنین در آن، تعدادی سازه‌ی توسعه‌ی کم اثر پیشنهاد شده است، که در تعدادی از آن‌ها فضایی برای ذخیره‌ی برف نیز فراهم شده است. سازه‌ها برای مقاومت در برابر شرایط آب‌وهوای سرد در منطقه، مقاومت در برابر شرایط یخ‌زدگی و ذوب‌شدن، و در صورت امکان بهبود کیفیت رواناب ذوب برف سازگار شده‌اند. نگرانی‌هایی وجود دارد که در آب‌وهوای سرد، که زمین می‌تواند یخ‌زده باشد، با نفوذپذیری ضعیف بستر و نرخ رشد بیولوژیکی پایین، که همزمان با جریان‌های زیاد ناشی از ذوب برف‌های بعدی است، روش‌های توسعه‌ی کم اثر ممکن است کمتر مؤثر باشند. با وجود این، روسین[۲۸] و همکاران (۲۰۰۹)،[۶۶] نشان داده‌اند در حالی که آثار ناشی از آب‌وهوای سرد مشاهده شده است، اما آن‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای راندمان هیدرولیکی روش‌های توسعه‌ی کم اثر را تغییر نداده‌اند.

۳.۴. فرانسه

به‌دلیل تنوع رویدادهای سیل در اروپا، انعطاف‌پذیری زیادی در اهداف و اقدام‌ها به دولت‌های اروپایی واگذار می‌شود.[۶۷] به‌عنوان مثال، در پاریس، روش ارسال

[27] Copeland

[28] Roseen

آب به خارج از شهر از طریق لوله به مدیریت آن در محل یا در سطح حوضه‌ی رودخانه، با استفاده از روش‌های جایگزین، از جمله بام‌های سبز، باغچه‌های باران‌زاد، و تالاب‌ها تغییر کرده و تشویق به صاف‌کردن و استفاده‌ی مجدد از آب در دستور کار قرار گرفته است. در سال ۲۰۰۶، رویکردهای جایگزین چند شهر دیگر فرانسه تشریح شده‌اند.[۶۸] در سال ۲۰۱۴، دفتر بین‌المللی آب، در لیموژ، مجموعه‌ای از «روش‌های جایگزین» ساختارهای کنترل رواناب را براساس نگهداشت و نفوذ ارائه کرده است.[۶۹]

۴.۴. هلند

هلند مثالی است که در آن اهداف خاص اتخاذ توسعه‌ی کم اثر (LID) یا WSUDبا شرایط جغرافیایی محلی تعریف می‌شود.[۳] بخش اعظم هلند، شامل زمین‌های پست ساحلی است، که از دریا پس گرفته شده‌اند و سطوح آن‌ها پایین‌تر از سطح دریا قرار دارد و توسط دایک‌ها محافظت می‌شوند. با توجه به بارندگی‌هایی که مناطق شهری درحال گسترش را تهدید می‌کند، لازم است اقدام‌هایی برای مدیریت پایدارتر آب ایجاد شود. در سپتامبر ۱۹۹۸، بارندگی ۱۳۰ میلی‌متر در ۲۴ ساعت، باعث جاری‌شدن سیل شدید در بسیاری از مناطق پست هلند شد، زیرا ظرفیت زهکشی زمین‌های پست ساحلی هلند برای حذف ۱۴ میلی‌متر بارندگی در هر ۲۴ ساعت طراحی شده بود.[۳] در نتیجه، نگهداری و جمع‌آوری غیرمتمرکز آب باران (به‌عنوان مثال، آب‌های نگهداری‌شده توسط بام‌های سبز یا جمع‌آوری‌شده از ساختمان‌ها و مناطق ترافیکی) و ذخیره‌ی محلی آب باران در نهرهای کنار جاده، حوضچه‌ها، دریاچه‌ها، و مخازن الزامی شده است.[۷۰]

فقط آب اضافه بر ظرفیت نگهداشت، نفوذ و ذخیره در محل می‌تواند از پلدرها (Polders) به رودخانه‌ها یا کانال‌ها و از آنجا به دریا تخلیه شود.[۳] توسعه‌های شهری جدید در دشت‌های هلند مستلزم ساخت‌وساز و ادغام اجباری رواناب روباز است، که شامل ۵ الی۱۰ درصد از مساحت زمین‌های در حال‌توسعه است.[۷۰]

۵.۴. ژاپن

ژاپن کشوری غالباً کوهستانی است. شهرهایی با تراکم بالا در مناطق کم‌ارتفاع ساخته شده‌اند و به‌طور فزاینده‌ای در معرض سیل هستند. نزدیک به ۳۰٪ از شهرهای ژاپن در گذشته، باران‌های سیل‌آسای محلی (بیش از ۱۰۰ میلی‌متر در ساعت) را تجربه کرده‌اند.[۳] ژاپن در سال ۱۹۷۳، استفاده از پیاده‌روهای قابل‌نفوذ را به‌عنوان رویکردی برای آنچه که به توسعه‌ی کم اثر تبدیل شده است، معرفی کرده است. در سال ۱۹۹۳، روش مذکور برای استفاده‌ی احتمالی در جاده‌های کم‌تردد گسترش یافته و از آن زمان در جاهای دیگر معرفی شده است.[۴] کتابچه‌ی راهنمای تصفیه‌ی رواناب سطح جاده در سال ۲۰۰۵ منتشر شده است.[۷۱] انجمنی صنعتی در ژاپن به منظور ارتقاء فناوری و تأسیسات ذخیره، نفوذ، و استفاده از آب باران در مقیاس حوضه‌ی رودخانه تأسیس شده است. هدف نهایی انجمن صنعتی ژاپن، دستیابی به تعادل بین کنترل سیل و استفاده از آب و حفظ محیط آبی بوده است. روش‌های تشویق‌شده شامل گودال‌هایی مرطوب با پوشش گیاهی کنار پیاده‌روهای نفوذپذیر، آسفالت‌های نفوذپذیر، جوی‌باغچه‌ها و ذخیره‌سازی و نفوذ آب باران در مجاورت جاده‌هاست.[۷۲] هر سامانه‌ای باید حفظ و تمیز نگه داشته شود و همچنین، آلودگی حاصل از "شست‌وشوی اولیه" نیاز به توجه خاصی دارد. تعمیر و نگهداری نیاز به همکاری بین سازمان‌های دولتی محلی، مالکان ساختمان‌ها، و مقام‌های راه‌ها را برجسته می‌کند.[۷۳]

۶.۴. تایوان

کشور تایوان اهمیت یک رویکرد کاملاً خاص مبتنی بر "طراحی شهری حساس به آب" (WSUD) را مطرح کرده است.[۳] توپوگرافی ساحل شرقی جزیره‌ی تایوان، تپه‌ای تا کوهستانی با رودخانه‌های کوتاه و جریان موسمی است، که به سمت ساحل غربی تخلیه می‌شوند. بیشتر شهرهای تایوان بر روی دشت‌ها و دلتاها ساخته شده‌اند. به‌عنوان مثال، هسینچو[۲۹]، یک شهر به‌سرعت در حال رشد است، که هم از خشکسالی و هم از سیل رنج می‌برد.[۳] مدیریت آب پایدار در شهر هسینچو، مستلزم ادغام شبکه‌ای از آب‌های زیرزمینی و سطحی روباز، برای حفظ و ذخیره‌ی آب باران در مناطق توسعه‌ی شهری جدید، مانند دشت‌های روانابی و زمین‌های کشاورزی موجود است. مناطقی که به‌عنوان دشت‌های روانابی در طول رویدادهای بارش شدید، که درگذشته رخ داده‌اند، شاید فقط یک‌بار در ۱۰۰ سال عمل کرده‌اند. اما، به احتمال زیاد، به‌دلیل آثار تغییرات آب‌وهوایی، برای اهداف کشاورزی محفوظ و مناسب‌تر خواهند شد. از دشت‌های روانابی برای توسعه‌ی شهری نمی‌توان استفاده کرد، اما، مکان‌های مناسبی برای نگهداشت و نفوذ رواناب در فصل مرطوب و در فصل خشک، نیز، برای اهداف کشاورزی مناسب هستند.[۷۰]

۵. ارزیابی عملکرد رویکردهای غیرمتمرکز مدیریت رواناب سطحی شهری

برای ارزیابی مزایای محلی در مقیاس کوچک و همچنین، آثار تجمعی اجرای صدها یا حتی هزاران رویکرد، بهترین شیوه‌ی مدیریتی (BMP) و توسعه‌ی کم اثر (LID)، در سطح یک حوضه‌ی آبریز وسیع، عوامل تأثیرگذار متنوعی نیاز به بررسی دارند. توجه به این نکته ضروری است که یک راه‌حل استاندارد منفرد در همه‌جا نمی‌تواند مؤثر باشد. عواملی مانند فعالیت‌های انسانی و ویژگی‌های طبیعی در مقیاس حوضه‌ی آبریز می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی از مکانی به مکان دیگر تغییر کنند. چالش اصلی پیش روی تصمیم‌گیرندگان این است که چگونه بهترین ترکیب رویکردها را برای اجرا از بین گزینه‌های زیاد موجود انتخاب کنند.[۷۴]

مطالعات مختلف، روش‌های متنوعی برای انتخاب بهترین رویکردهای مدیریت غیرمتمرکز رواناب پیشنهاد کرده‌اند و در سال‌های اخیر، سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری در مورد طراحی رویکردهای مذکور توسعه یافته است. ابزارهای مدل‌سازی به‌طور مشخص برای پشتیبانی از انتخاب و ارزیابی گزینه‌های مناسب LID/BMP لازم هستند.[۷۴] در طول دو دهه‌ی گذشته، پیشرفت‌های عمده‌ای در ابزارهایی که مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیندهای محیطی شهری را تسهیل می‌کنند، وجود داشته است. اما نکته‌ی ضروری در مدل‌های مذکور، درنظرگرفتن چرخه‌ی آب در مدل‌سازی آب شهری است. مدل‌های آب شهری از نظر نحوه‌ی ساختار و قابلیت‌های آن‌ها برای بررسی جنبه‌های مختلف سیستم آب شهری بسیار متفاوت هستند. بنابراین، انطباق یک مدل مناسب با یک زمینه‌ی خاص برای دستیابی به اهداف مدیریت آب شهری ضروری است.[۷۵] برای تسهیل استفاده از ابزارهای پشتیبان تصمیم توسط مدیران حوضه‌ی آبریز، ابزارهای مدل‌سازی ذکرشده باید شامل ادغام یکپارچه‌ی رابط سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مدل‌های شبیه‌سازی حوضه‌ی آبریز، مدل‌های شبیه‌سازی

[29] Hsinchu

بر پایه‌ی فرآیند LID/BMP، و مدل‌های بهینه‌سازی هزینه باشند.[۷۴] از جمله روش‌های پشتیبان تصمیم‌گیری می‌توان به سیستم پشتیبان بهترین رویکرد مدیریتی بر پایه‌ی GIS (Best Management Practice Decision Support System[30]،[۷۶]) و همچنین، سامانه‌ی ادغام تصفیه و تجزیه‌وتحلیل رواناب شهری (System for Urban Stormwater Treatment and Analysis INtegration[31]،[۷۷]) اشاره کرد. هر دو روش BMPDSS و SUSTAIN، کاربردهای چندمقیاسی (سایت، منطقه، و حوضه‌ی آبخیز)، شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای BMP و شبیه‌سازی‌های بهینه‌سازی هزینه را انجام می‌دهند.

در کنار روش‌های جامع و پیچیده‌ی ذکرشده، گاهی نیاز به ابزارهای انتخاب ساده‌تری به‌عنوان ابزاری برای بررسی رویکردهای مختلف مدیریت غیرمتمرکز وجود دارد.[۷۸] یک سامانه‌ی انتخاب چندمتغیره برای طراحی LID/BMP ایجاد کرده‌اند؛ که شاخص‌های آن شامل ۱۲ شاخص رده‌ی اول و ۲۶ شاخص رده‌ی دوم است، که بازتاب‌کننده‌ی ویژگی‌های منطقه‌ی موردنظر است. روش انتخاب به این صورت است که ابتدا به هر شاخص رده‌ی دوم، یک مقدار عددی الحاق می‌شود که براساس ویژگی‌های منطقه و اطلاعات در مورد LID/BMP است. ابتدا، شاخص‌ها، نرمال و سپس، برای تعیین رتبه‌ی هر شاخص رده‌ی اول، ادغام می‌شوند. درنهایت، LID/BMP های مناسب برای یک منطقه‌ی مشخص بر حسب رده‌ی امتیازهای نهایی انتخاب می‌شوند. آن‌ها، همچنین، برای تسهیل این سازوکار رده‌بندی، یک نرم‌افزار (به نام BMPSELEC)، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جاوا طراحی کرده‌اند.

به‌طورکلی، برای ارزیابی رویکردهای نوین مدیریت غیرمتمرکز رواناب، در ابتدا باید هر کدام از رویکردها، دقیقاً از جهت‌های مختلف، از جمله مزایا و معایب، اصول طراحی و ساخت، و هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری بررسی شوند. سپس، پارامترهای اساسی نوع و میزان آلاینده‌ی ورودی و دبی رواناب و همچنین، ویژگی‌های منطقه‌ی موردنظر برای احداث آن‌ها، از جمله: میزان تراوایی زمین، نوع کاربری مجدد رواناب، مقدار زمین موجود برای احداث سازه، و شیوه‌ی نگهداری از تأسیسات تعیین شود. درنهایت، با تلفیق اطلاعات ذکرشده و با به‌کارگیری نرم‌افزارهای مدل‌سازی، تصمیم نهایی برای انتخاب بهترین رویکرد برای منطقه‌ی موردنظر گرفته شود.

۱.۵. شبیه‌سازی کمّی و کیفی رواناب

همان‌طور که بیان شد، برای انتخاب بهترین رویکردهای مدیریت رواناب، ابزارهای مدل‌سازی به کمک سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری می‌آیند. در واقع، در ابتدا با استفاده از ابزارهای مدل‌سازی، گزینه‌های موردنظر از بین بی‌شمار حالت مختلف چیدمان رویکردهای غیرمتمرکز انتخاب می‌شوند، که هدف‌شان ایمن‌ساختن رفتار هیدرولیکی سیستم رواناب است؛ در حالی که همزمان نیز به اهداف کیفیت آب و به راه‌حل‌های کم‌هزینه دست یابند. اگرچه تحلیل اقتصادی بندرت در مدل‌سازی رواناب شامل می‌شود، زوپو[32] (۲۰۰۱)،[۷۹] به چگونگی گسترش ارزیابی مدیریت رواناب در اثر ترکیب گزینه‌های مختلف تحلیل‌های اقتصادی با مدل‌سازی رواناب اشاره کرده است. در نتیجه، از هزینه‌های مختلف، از جمله: هزینه‌های طراحی، ساخت، نگهداری، جایگزینی، دفع و تملک زمین، تشخیص و کمّی‌سازی می‌شوند.[۸۰] تقریباً، بیشتر مدل‌های مدیریت رواناب، شامل زهکشی می‌شوند؛ اما آنچه در توسعه‌ی پایدار اهمیت دارد، استفاده از مدل‌هایی است که به رواناب به‌عنوان منبعی نگاه شود که می‌تواند جذب (تغذیه آبخوان) و یا به صورت مجدد استفاده شود.

پیچیدگی در مدل‌های رواناب از مدل‌های ساده‌ی یکپارچه تا مدل‌های توزیع‌یافته‌ی مکانی متغیر است. مدل‌های یکپارچه برای تخمین‌های اولیه‌ی رفتار حوضه‌ی آبریز مفید هستند، اما برای تحلیل هر LID کوچک‌مقیاس منفرد و آثار آن‌ها در دینامیک جریان خیلی مناسب نیستند.[۸۰] توصیف سیستم‌های مدیریت رواناب توزیع‌یافته (برای مثال رویکردهای مختلف LID) نیاز به توصیف مکانی منطقه‌ی موردمطالعه دارد، که به‌اندازه‌ی کافی برای رویکردهای LID منفرد دقیق باشد.[۸۱] اگر توصیف رفتار واقعی جریان و بار آلودگی در یک LID منفرد لازم باشد، پیچیدگی بیشتر مدل نیاز خواهد بود.

مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی رواناب وجود دارند.[۸۰] از میان آن‌ها، HSPF، STORM، SUSTAIN، و SWMM از معروف‌ترین و پرکاربردترین مدل‌ها هستند. هلت[33] و همکاران (۲۰۱۸)،[۸۰] مقایسه‌ای بین این مدل‌ها، براساس نوع دسترسی، مقیاس زمانی مدل‌سازی، توصیف مکانی، و توصیف LID ها، انجام داده‌اند (جدول ۱۲ در نوشتار ذکرشده،[۸۰]). براساس مقایسه‌ی انجام‌شده، دو مدل SWMM و SUSTAIN با داشتن دسترسی عمومی، توصیف مکانی توزیع‌یافته و قابلیت بررسی همه نوع LID، را می‌توان جامع‌تر از بقیه به‌حساب آورد.

مدل SUSTAIN، که با تلاش EPA (آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده‌ی آمریکا) توسعه یافته است، ابزاری برای ارزیابی، انتخاب، و جایگذاری BMPها در حوضه‌ی آبخیز شهری است.[۷۷] یکی از قابلیت‌های SUSTAIN ارزیابی رویکردهای مدیریتی در چندین مقیاس، از کاربردهای محلی تا حوضه‌ی آبخیز است.

مدل SWMM پیچیدگی کمتری نسبت به SUSTAIN دارد؛ که به‌منظور شبیه‌سازی مدیریتی و پیش‌بینی کمّی و کیفی مرتبط با شبکه‌های مرکب تهیه شده است. در عین حال، از مدل SWMM، عملاً در کلیه‌ی زمینه‌های زهکشی، اعم از طراحی ساده‌ی سامانه‌ی جمع‌آوری تا تحلیل‌های پیچیده‌ی هیدرولیکی و مطالعات کیفی جریان استفاده شده است. مدل SWMM تحلیل اقتصادی نیز انجام می‌دهد و در ارزیابی و شبیه‌سازی سیستم‌های رواناب شهری عملکرد خوبی نشان داده است (برای مثال، به نوشتار فروتن‌دانش[34] (۲۰۲۱)،[۸۲] مراجعه شود).

داده‌های موردنیاز برای مدل SWMM، بسیار گسترده و مشتمل بر داده‌های فیزیوگرافی زیرحوضه‌ها، مشخصات مربوط به سازه‌های سامانه، اطلاعات مربوط به نگهداری سامانه، شدت دبی در دوره‌های خشک، وضعیت نقاط تخلیه، آمار و اطلاعات مربوط به بارندگی، هیدروگراف‌های سیلاب‌ها، و وضعیت کیفی جریان در مسیل‌ها هستند.

در مطالعات بسیاری با استفاده از مدل SWMM به بررسی رواناب و روش‌های نوین مدیریت رواناب پرداخته شده است. برای مثال، با استفاده از مدل SWMM و تحلیل حساسیت نشان داده شده است که استفاده از سامانه‌های

[30] BMPDSS
[31] SUSTAIN
[32] Zoppou
[33] Holt
[34] ForutanDanesh

روباز برای کاهش مقدار دبی اوج رواناب و جلوگیری از سیلاب، تأثیر بیشتری نسبت به سامانه‌های بسته دارد.[۸۳] در مطالعه‌ی کیم[۳۵] و همکاران (۲۰۱۸)،[۸۴] روش‌های توسعه‌ی کم اثر در منطقه‌ی صنعتی Cheongju در کره‌ی جنوبی بررسی و انواع LID با استفاده از مدل بارش- رواناب SWMM ارزیابی شده‌اند. نتایج ایشان نشان داده است که همه‌ی روش‌های LID مطالعه‌شده، عملکرد مناسبی برای کاهش رواناب داشته‌اند، با این‌حال، روش بشکه‌های باران، کمترین اثر را داشته‌اند.

۶. تجارب ایران در به‌کارگیری مدیریت غیرمتمرکز رواناب شهری

با توجه به پذیرش جهانی رویکرد غیرمتمرکز مدیریت رواناب سطحی شهری و اهمیت آن در دستیابی به توسعه‌ی پایدار در کلان‌شهرها، رویکردهای مذکور و تجارب جهانی آن‌ها، در ایران نیز موردتوجه مدیران و برنامه‌ریزان کنترل رواناب سطحی شهری قرار گرفته‌اند. برای نمونه، به بررسی این موضوع در طرح جامع آب‌های سطحی شهرداری تهران و همچنین، در گزارش‌های تهیه‌شده در سطوح دانشگاهی می‌توان اشاره کرد. در همین راستا، مطالعاتی در زمینه‌ی مدل‌سازی رویکردهای غیرمتمرکز مدیریت رواناب سطحی شهری در فاز پژوهشی/ آزمایشگاهی در کشور انجام شده است (برای مثال، به نوشتارهای ۸۵ الی ۸۷ مراجعه شود.[۸۵-۸۷]). برای نمونه، کمالی و همکاران (۲۰۱۲)،[۸۵] کارایی یک روسازی نفوذپذیر را تحت بارگذاری رسوب در شهر تهران، در طول عمر عملیات روسازی، آزمایش و ارزیابی کرده‌اند. علاوه‌بر این، عملکرد روسازی‌های نفوذپذیر را در حذف کل جامدات معلق (TSS) و آلاینده‌های انتخابی مواد مغذی (مانند: N-NO3- ، N-NH4+ و P-PO4-3) از رواناب سطحی بررسی کرده و دریافته‌اند که در هدایت هیدرولیکی روسازی نفوذپذیر،۲۰٪ کاهش پس از سه سال هیدرولوژیکی رخ داده و روسازی‌های نفوذپذیر به ترتیب ۱۰۰، ۲۳، و ۵۹ درصد بازده در حذف رسوب (TSS)، حذف P-P۴-۳ ، و N-NH۴+ در طول کل مطالعه داشته است.

همچنین، با استفاده از روش‌های نوین مدیریتی، شامل: ترانشه‌های نفوذ، باغچه‌ی باران‌زاد، و روسازی‌های نفوذپذیر و با استفاده از مدل‌سازی در SWMM، به مدیریت خطرپذیری سیلاب شهری در منطقه‌ی ۲۲ تهران پرداخته شده است.[۸۶] براساس نتایج مدل‌سازی، باغچه‌ی باران‌زاد ۱۰٪ بیشتر از ترانشه‌های نفوذ و ۲۱٪ بیشتر از روسازی‌های نفوذپذیر در کاهش دبی اوج تأثیرگذار بوده و استفاده‌ی بهینه از ترکیب سه روش نوین ذکرشده، منجر به کاهش قابل‌ملاحظه و مؤثر دبی اوج شده است.

تأثیر به‌کارگیری رویکردهای جوی‌باغچه و روسازی نفوذپذیر در کاهش بار آلودگی رواناب در بخشی از منطقه‌ی ۱۰ تهران، توسط بینش و همکاران (۲۰۱۵)،[۸۸] بررسی شده است. براساس نتایج آن‌ها، روسازی نفوذپذیر عملکرد بهتری در کاهش دبی اوج سیلاب و حذف آلودگی و جوی‌باغچه کارایی مناسب‌تری در کاهش زمان فروکش سیلاب داشته است؛ اما در کل، ترکیب دو راهکار مدیریتی اخیر، بهترین گزینه در بیشتر سناریوها تشخیص داده شده است. رجب‌نژاد (۲۰۱۷)،[۸۷] با مدل‌سازی در نرم‌افزار SWMM، رویکردهای نوین مدیریت رواناب شهری (LID/BMP) را، از نظر کارآمدی کیفی و کمّی رواناب، با استفاده از سناریوهای بام سبز، ترانشه‌ی نفوذ، روکش نفوذپذیر، و سناریوی ترکیبی (روکش نفوذپذیر به همراه ترانشه‌ی نفوذ)، در پردیسان قم بررسی کرده و دریافته است که سناریوی ترکیبی، بهترین کارآمدی را در کاهش آلایندگی و دبی اوج رواناب، و سناریوی بام سبز کمترین بازده را در کاهش آلودگی داشته‌اند.

برای بخشی از منطقه‌ی ۱۳ شهر تهران، تحلیل آب‌گرفتگی معابر شهری و کارایی وضع موجود شبکه، به‌کمک مدلSWMM انجام شده است.[۸۹] با مقایسه‌ی نتایج حاصل از اجرای مدل در وضع موجود و با به‌کارگیری LID نشان داده شده است که به‌کارگیری رویکردهای نوین، می‌تواند آثار منفی سیلاب‌های با دوره‌ی بازگشت کوچک را تا حدود ۴۰٪ کاهش دهد.

با هدف کاهش آب‌گرفتگی و استفاده از روش‌های توسعه‌ی کم اثر، به مدیریت سیلاب شهری در قسمتی از منطقه‌ی ۲ شهرداری تبریز با استفاده از نرم‌افزار SWMM پرداخته شده است.[۸۵] در پژوهش حاضر، تأثیر ترانشه‌ی نفوذ و روسازی متخلخل در دبی اوج سیلاب ارزیابی شده و نتایج نشان داده است که استفاده از ترانشه‌ی نفوذ به‌عنوان بهترین راهکار مدیریتی، بیشترین اثر را در کاهش دبی اوج هیدروگراف سیل خروجی داشته است. آرژناکی[۳۶] و همکاران (۲۰۲۱)،[۹۰] با استفاده از مدل SWMM و اعمال رویکردهای مدیریتی مختلف، بهترین راهکار را برای کاهش مقدار اوج رواناب در شهرکرد شناسایی کرده و دریافته‌اند که مدل‌سازی مذکور مزایای بهره‌گیری از مدیریت سبز را تأیید می‌کند. نظری و همکاران (۲۰۲۳)،[۹۱] از چارچوب ترکیبی SUSTAIN، SWMM، و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره برای بهینه‌سازی ویژگی‌ها، هزینه‌ها، و مؤثربودن LID ها استفاده کرده‌اند.

در بخش دانشگاهی نیز، پایان‌نامه‌های زیادی در زمینه‌ی مدیریت رواناب سطحی انجام شده است، که در ادامه به چند مورد از جدیدترین آن‌ها اشاره شده است.

نعیمی (۱۳۹۴)،[۹۲] در پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد خود با بررسی بهترین شیوه‌های مدیریتی رواناب سطحی در سطح شهر، مناسب‌ترین روش‌ها را با توجه به عملکرد آن‌ها در جهت حفظ و تغذیه‌ی منابع آب زیرزمینی و نیز سازگاری با کلان‌شهر اصفهان، انتخاب و پس از آن با جمع‌آوری داده‌های بلندمدت بارش و برخی مشخصات حوضه، اقدام به مدل‌سازی رواناب سطحی کرده و دریافته است که با تغذیه‌ی رواناب‌ها به آب زیرزمینی، در صورت استفاده از شیوه‌های مدیریتی نوین، علاوه‌بر کمک به چرخه‌ی طبیعی هیدرولوژیکی، به‌دلیل پراکندگی و مقیاس کوچک‌تر نسبت به شیوه‌های مرسوم، ابعاد تأسیسات هیدرولیکی جمع‌آوری آب‌های سطحی کوچک‌تر می‌شود و بدین ترتیب، بهره‌برداری از آن‌ها ساده‌تر و اقتصادی‌تر خواهد بود.

ولی‌پور (۲۰۱۸)،[۹۳] در پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد خود به طراحی روسازی نفوذپذیر و مدیریت رواناب شهری در شهر خرم‌آباد پرداخته و با مدل‌سازی حجم رواناب سطحی و ارزیابی خروجی‌ها، راهکارهای متفاوتی در زمینه‌ی روسازی نفوذپذیر و جذب رواناب‌ها ارائه کرده است.

فروتن‌دانش (۲۰۲۱)،[۸۲] در پایان‌نامه‌ی دکترای خود به ارزیابی آثار اجرای روش‌های توسعه‌ی کم اثر و بهترین رویکردهای مدیریتی بر کمیت و کیفیت رواناب شهری در شهر گرگان پرداخته و بیان کرده است که نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWMM نشان می‌دهد که مدل مذکور، دقت موردنیاز برای شبیه سازی رواناب شهری را دارد.

[35] Kim

[36] Arjenaki

احمدی (۲۰۲۳)،[۹۴] در پایان‌نامه‌ی خود از الگوریتم فرابتکاری برای بهینه‌سازی مدیریت کمّی و کیفی رواناب در غرب شهر مشهد استفاده کرده و دریافته است که با انتخاب نوع، اندازه، و موقعیت LID های بهینه، سیلاب ناشی از بارش‌های با دوره‌ی بازگشت ۵۰ ساله مهار خواهد شد و پس از تصفیه، جهت استفاده‌های آتی ذخیره می‌شود.

به غیر از مطالعات پژوهشی و آزمایشگاهی، تاکنون در ایران پروژه‌ی عملیات گسترده درخصوص پیاده‌سازی رویکردهای مدیریت غیر متمرکز رواناب سطحی شهری اجرا نشده است.

۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

توسعه‌ی ساختاری برای مدیریت بهینه و غیرمتمرکز رواناب‌های شهری، علاوه‌بر درنظرگرفتن کاهش خسارت‌های وارد به سامانه در شرایط سیلابی، امکان بیشینه‌سازی پتانسیل ذخیره‌ی منابع مذکور، از طریق نفوذ و تغذیه‌ی منابع آب زیرزمینی را نیز با درنظرگرفتن پارامترهای کیفی فراهم می‌کند. همچنین، با کاهش میزان رواناب خروجی از حوضه و افزایش میزان نگهداشت آن درون حوضه می‌توان از رواناب بازیافتی در مصارف غیرشُرب استفاده کرد. این اقدام موجب می‌شود بخش زیادی از چاه‌های آب از چرخه‌ی تأمین آب فضای سبز و خدمات عمومی شهری منطقه حذف شوند. هدف اصلی استفاده از روش‌های توسعه‌ی کم اثر و زیرساخت‌های سبز مدیریت رواناب شهری، کاهش تخریب‌های محیط‌زیستی در مناطق شهری است. اقدام‌های ذکرشده، کنترل‌کننده‌های هیدرولوژیکی کوچک‌مقیاس را برای بازگردانی حوضه‌ی آبخیز به رژیم هیدرولوژیکی قبل از توسعه (به واسطه‌ی نفوذ، تصفیه، ذخیره، تبخیر، و نگهداشت رواناب در نزدیکی به منبع تولید آن) شامل می‌شوند. در واقع، اقدام‌های توسعه‌ی کم‌اثر می‌توانند باعث میرایی آلودگی، کاهش حجم جریان، و کاهش دبی اوج شوند.

در پژوهش حاضر، با معرفی هریک از روش‌های نوین مدیریت رواناب‌های سطحی، از جمله بام سبز، جوی‌باغچه‌ها، تالاب‌های مصنوعی، و روسازی نفوذپذیر، به مزایا و معایب هر یک از روش‌های مذکور اشاره و شرایط استفاده از آن‌ها به اختصار توضیح داده شده است.

مروری بر روش‌های مختلف توسعه‌ی کم اثر در زمینه‌ی مدیریت رواناب شهری نشان می‌دهد که هر کدام از روش‌های اخیر، آثار متفاوتی در رواناب دارند. برخی از آن‌ها (مانند حوضچه‌های ذخیره و نگهداشت موقت یا دائمی سیلاب) در کاهش حجم یا دبی اوج رواناب و در نتیجه، کاهش بار هیدرولوژیک شبکه و کاهش ابعاد سامانه‌ی زهکشی مؤثر هستند.

بررسی تجربیات جهانی در این زمینه نشان می‌دهد که به‌طورکلی، هیچ‌یک از بهترین راهکارهای مدیریتی و یا رویکردهای توسعه‌ی کم اثر نمی‌توانند به‌تنهایی تمام اهداف مدیریت رواناب را برآورده کنند و اجرای ترکیبی آن‌ها به نتایج بهتری در مدیریت رواناب شهری منجر خواهد شد. بررسی سناریوهای مختلف ترکیب روش‌های توسعه‌ی کم اثر با استفاده از مدل‌سازی، برای انتخاب مؤثرترین و اقتصادی‌ترین سناریو با توجه به ویژگی‌های منطقه‌ی مطالعاتی ضروری است. روش‌های SWMM و SUSTAIN از جمله روش‌های مدل‌سازی پرکاربرد در این زمینه هستند.

با مطالعات بر روی تجارب مطالعاتی و عملی کشورهای پیشرو، امکان‌سنجی کاربست رویکردهای اخیر در کلان‌شهرهای کشور و شرایط بهینه‌ی اجرای هر کدام از آن‌ها تعیین می‌شود. تصمیم‌گیرندگان و برنامه‌ریزان مدیریت شهری می‌توانند از نتایج پژوهش حاضر در جهت به‌کارگیری رویکردهای مذکور در شهرهای ایران، به خصوص کلان‌شهر تهران بهره‌برداری کنند.

درنهایت، استفاده از انواع روش‌هایLID و BMP در هر منطقه باید مبتنی بر رعایت کلیه‌ی اصول و ضوابط فنی مرتبط با طراحی، اجرا، نگهداری، و بهره‌برداری از آن‌ها باشد. در این زمینه بررسی دستورالعمل‌های مناطق مختلف جهان می‌تواند کمک‌کننده باشد؛ اما، بررسی‌های بومی و محلی برای ارزیابی کارآیی رویکردهای موردبحث، به ویژه از نظر کاهش انواع آلاینده‌های موجود در رواناب ورودی به تأسیسات باید انجام پذیرد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

پژوهش حاضر، نتیجه‌ی پروژه‌ی تحقیقاتی مصوب مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران با شماره‌ی ۱۳۷/۳۹۲۸۹۹ است. از مدیران و کارشناسان محترم این مرکز کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

References- منابع

1. Pakbaz, H. and Pirmoradian, M., 2012. Investigation on the quality of rainfall-induced runoffs in watersheds. Proceedings of the First Conference on Iran's Reservoirs [In Persian]. https://ircsa.ir/files/site1/maghalate_hamayesh/50.pdf

2. Ardeshir, A., 2016. Management of surface water collection system and urban flood control. AmirKabir University of Technology Publications, First Edition, page 230 [In Persian]. http://publication.aut.ac.ir/fa/book/show/5192

3. Wang, Y., 2015. A diagnostic decision support system for selecting best management practices in urban/suburban watersheds. Ph.D. thesis, University of Maryland, 301 P.

4. Helmrich, A., Markolf, S., Li, R., Carvalhaes, T., Kim, Y., Bondank, E., Natarajan, M., Ahmad, N. and Chester, M., 2021. Centralization and decentralization for resilient infrastructure and complexity. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, *1*(2), p. 021001. https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac0a4f

5. Taylor, A. and Wong, T., 2002. Non-structural stormwater quality best management practices – an Overview of their use, value, cost and evaluation. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Technical Report 02/11.

6. NZWERF, 2004. On-site stormwater management guideline. *New Zealand Water Environment Research Foundation*.

7. Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S. and Viklander, M. 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more–The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, *12*(7), pp. 525-542. https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314

8. Seo, M., Jaber, F., Srinivasan, R. and Jeong, J., 2017. Evaluating the Impact of Low Impact Development (LID) Practices on Water Quantity and Quality under Different Development Designs Using SWAT. *Water*, *9*(3), p. 193. https://doi.org/10.3390/w9030193

9. Michael, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, SB. and Djordjevic, S., 2004. Potential and limitations of LID modelling of urban flooding. *Journal of Hydrology*, *299*(3-4), pp. 284-299. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.014

10. Chen , J., Liu, Y., Gitau, M. W.,Engel, B. A., Flanagan, D.C. and Harbor, J. M., 2019. Evaluation of the effectiveness of green infrastructure on hydrology and water quality in a combined sewer overflow community. *Science of the Total Environment*, *665*, pp. 69-79. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.416

11. Reid, M., 1982. Lessons of history in the design and acceptance of rainwater cistern systems. In: Proceedings of the International Conference on Rainwater Catchment Systems, F.N. Fujimura (Editor). International Rainwater Catchment Systems Association, Honolulu, Hawaii, pp. 1-8.

12. Glendenning, C.J. and Vervoort, R.W., 2010. Hydrological impacts of rainwater harvesting (RWH) in a case study catchment: The Arvari River, Rajasthan, India. Part 1: Field-Scale Impacts. *Agricultural Water Management* *98*(2), pp. 331-340. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.09.003

13. Herrmann T. and Schmida, U., 1999. Rainwater utilization in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects. *Urban Water* *1*(4), pp. 307-316. https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00024-8

14. Nolde, E., 2007. Possibilities of rainwater utilisation in densely populated areas including precipitation runoffs from traffic surfaces. *Desalination*, *215*(1-3), pp. 1-11. https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.10.033

15. Furumai, H., 2008. Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use. *Physics and Chemistry of the Earth*, *33*(5), pp. 340-346. https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.029

16. https://santacruzpermaculture.com/2019/06/rainwater-harvesting-tanks-cisterns/

17. Hosseini, S. H., 2015. Utilizing low-impact development (LID) method in urban runoff management to reduce urban costs with an emphasis on tehran. International Conference on Advances in Civil Engineering, Architecture, Environmental Engineering, and Urban Management, Tehran, https://civilica.com/doc/389566 CAECONF01_033 [In Persian].

18. Barrett, M., 2015. *International low impact development conference 2015*. American Society of Civil Engineers/ASCE. http://dx.doi.org/10.1061/9780784479025

19. Steffen J., Jensen, M., Pomeroy, C. A., Burian, S. J., 2013. Water supply and stormwater management benefits of residential rainwater harvesting in U.S. cities. *Journal of the American Water Resources Association*, *49* (4), pp. 810-824. http://dx.doi.org/10.1111/jawr.12038

20. Lye, D.J., 1992. Microbiology of rainwater cistern systems: A review: (Cistern, Rainwater, Microorganisms). *Journal of Environmental Science & Health Part A*, *27*(8), pp.2123-2166. https://doi.org/10.1080/10934529209375845

21. https://www.usace.army.mil/Media/Images/igphoto/2000758566/

22. Alyaseri, I., Zhou, J., 2016. Stormwater volume reductionin combined sewer using permeable pavement: city of St. Louis. *Journal of Environmental Engineering*, *142* (4), p.04016002, https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001056

23. Selbig, W.R., Buer, N. and Danz, M.E., 2019. Stormwater-quality performance of lined permeable pavement systems. *Journal of Environmental Management*. *1*(251), p. 109510. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109510

24. Cheng, Y. Y., Lo, S. L., Ho, C. C., Lin, J. Y. and Yu, S. L., 2019. Field testing of porous pavement performance on runoff and temperature control in Taipei city. *Water*, *11* (12), p. 2635, https://doi.org/10.3390/w11122635

25. Stagge, J. H., Davis, A. P., Jamil, E. and Kim, H., 2012. Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff. *Water Research*, *46*(20), pp. 6731-6742. https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.02.037

26. Gavrić, S., Leonhardt, G., Marsalek, J. and Viklander, M., 2019. Processes improving urban stormwater quality in grass swales and filter strips: A review of research findings. *Science of the Total Environment*, *669*, 431-447. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.072

27. MDE, Maryland Department of the Environment, 2009. 2000 Maryland stormwater design manual Volumes I & II.

28. NHDES (New Hampshire Department of Environmental Services), 2011. Pollutant removal efficiencies for best management practices for use in pollutant loading analysis.

29. Birch, G. F., Fazeli, M. S. and Matthai, C. 2005. Efficiency of an infiltration basin in removing contaminants from urban stormwater. *Environmental Monitoring and Assessment*,101, pp. 23–38. https://doi.org/10.1080/15730620600855894

30. Lee, J. G., Borst, M., Brown, R. A., Rossman, L. and Simon, M. A., 2014. Modeling the hydrologic processes of a permeable pavement system. *Journal of Hydrologic Engineering*, *20* (5), p. 04014070. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001088

31.https://wiki.sustainabletechnologies.ca/wiki/Infiltration_Trench:_Life_Cycle_Costs

32. Kratky, H., Li, Z., Chen, Y., Wang, C., Li, X. and Yu, T., 2017. A critical literature review of bioretention research for stormwater management in cold climate and future research recommendations. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, *11*, pp.1-15. http://dx.doi.org/10.1007/s11783-017-0982-y

33. https://www.deeproot.com/blog/blog-entries/3-questions-about-bioretention-soils-and-infiltration/

34. Damodaram, Chandana, Marcio H. Giacomoni, C. Prakash Khedun, Hillary Holmes, Andrea Ryan, William Saour, and Emily M. Zechman, 2010. Simulation of combined best management practices and low impact development for sustainable stormwater management 1, *Journal of the American Water Resources Association*, *46*(5), pp. 907-918. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00462.x

35. Mahab Qhods Consulting Engineering Company (2011). Comprehensive plan for surface water Management in Tehran, Volume Eight, Modern Approach (LID/BMP Techniques). Technical and Engineering Consultancy Organization of Tehran Municipality, Technical and Civil Deputy [In Persian].

36. Tang, S., Jia, Z., Xu, Q., Luo, W. and Shan, Z., 2020. Examining the first flush effect based on the relationship between concentrations and discharge rates in a rain garden inflow. *Desalination and Water Treatment*, *180*, pp.174-184. https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25080

37. Vijayaraghavan, K., Kumar Biswal, B., Adam, M. G., Hong Soh, H., Lee Tsen-Tieng, D., Davis, A. P., Chew, S., H., Tan, P.Y., Babovic, V. and Balasubramanian, R., 2021. Bioretention systems for stormwater management: Recent advances and future prospects, *Journal of Environmental Management*, *292*, p. 112766. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112766

38. Hsieh, C. h., Davis and A. P., 2005. Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff. *Journal of Environmental Engineering*, *131* (11), pp. 1521–1531. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:11(1521)

39. Fassman-Beck, E., Wang, S., Simcock, R. and Liu, R., 2015. Assessing the effects of bioretention's engineered media composition and compaction on hydraulic conductivity and water holding capacity. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, *1* (4), p. 04015003. https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000799

40. Hunt, W. F., Hathaway, J. M., Winston, R. J. and Jadlocki, S. J., 2010. Runoff volume reduction by a level spreader-vegetated filter strip system in suburban Charlotte, *Journal of Hydrologic Engineering*, *15* (6), pp. 499–503. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000160

41. Roy-Poirier, A., Champagne, P. and Filion, Y., 2010. Review of bioretention system research and design: past, present, and future. *Journal of Environmental Engineering* *136* (9), 878–889. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000227

42. Goh, H. W., Lem, K. S., Azizan, N. A., Chang, C. K., Talei, A., Leow, C. S., Zakaria, N. A., 2019. A review of bioretention components and nutrient removal under different climates—future directions for tropics. *Environmental Science and Pollution Research*. *26* (15), pp. 14904–14919. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05041-0

43. Vijayaraghavan, K., Kumar Biswal, B., Adam, M. G., Hong Soh, H., Lee Tsen-Tieng, D., Davis, A. P., Chew, S., H., Tan, P.Y., Babovic, V. and Balasubramanian, R., 2021. Bioretention systems for stormwater management: Recent advances and future prospects, *Journal of Environmental Management*, *292*, p.112766. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112766

44. Wang, J., Chua, L. H. C. and Shanahan, P., 2017a. Evaluation of pollutant removal efficiency of a bioretention basin and implications for stormwater management in tropical cities. *Water Research and Technology*, *3*(1), 78–91. https://doi.org/10.1039/C6EW00285D

45. https://www.wake.gov/departments-government/water-quality-programs/watershed-management-erosion-sedimentation-control-floodplain-and-stormwater-management/stormwater-plan-review-and-permitting/stormwater-control-measures

46. Livingston, E. H., Shaver, E., Skupien, J. J., Horner, R. R., 1997. Operation, maintenance, and management of stormwater management systems. Watershed Management Institute, Inc; August 1997. https://stormwater.ucf.edu/wp-content/uploads/2014/09/stormwaterOMM.pdf

47. Fortunato , C., McDonough, O. and Chambers, R., 2012. The effectiveness of dry and wet stormwater detention basins as sediment and nutrient processors. In: *Managing Watersheds for Human and Natural Impacts: Engineering, Ecological, and Economic Challenges*. pp. 1-12. https://doi.org/10.1061/40763(178)98

48. Ivanovsky, A., Belles, A., Criquet, J., Dumoulin, D., Noble, P., Alary, C. and Billon, G., 2018. Assessment of the treatment efficiency of an urban stormwater pond and its impact on the natural downstream watercourse. *Journal of Environmental Management*, *226* (1), pp. 120-130. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.015

49. Nayeb Yazdi, Scott, D., Sample, D. J. and Wang, X., 2021. Efficacy of a retention pond in treating stormwater nutrients and sediment. *Journal of Cleaner Production*, 290, p. 125787. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125787

50. Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, Ch., Bray, R. and Shaffer, P., 2007. The SUDS manual (C697). CIRIA. http://www.scotsnet.org.uk/documents/NRDG/CIRIA-report-C753-the-SuDS-manual-v6.pdf

51. Vishwakarma, S. and Dharmendra, D., 2024. Evaluating domestic wastewater treatment efficiency of field scale hybrid flow constructed wetland in series. *Pollution*, *10* (1), pp. 392-403. https://doi.org/10.22059/POLL.2023.364339.2041

52. https://waterprojectsonline/custom_case_study/clifton-icw-2022/

53. Shafique, M., Kim, R. and Lee, D., 2016. The potential of green-blue roof to manage storm water in urban areas. *Nature Environment and Pollution Technology*, *15*, pp. 715– https://doi.org/719. 10.1111/j.1747-6593.2009.00174.x

54. Morgan, S., Celik, S. and Retzlaff, W., 2012. Green roof storm-water runoff quantity and quality. *Journal of Environmental Engineering*. *139*, pp. 471–478. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000589)

55. Getter, K.L., Rowe, D.B. and Andresen, J.A., 2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*. *31*, pp. 225–231. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.06.004

56. Vijayaraghavan K., 2016. Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. *57*, pp. 740–52. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119

57. Shafique, M., Kim, R. and Kyung-Ho, K., 2018. Green Roof for Stormwater Management in a Highly Urbanized Area: The Case of Seoul, Korea. *Sustainability*, *10*, p. 584; https://doi.org/10.3390/su10030584

58. Stovin, V., Vesuviano, G. and Kasmin, H., 2012. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*. *414*, pp. 148–161. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.022

59. Locatelli, L., Mark, O., Mikkelsen, P. S., Arnbjerg-Nielsen, K., Wong, T. and Binning, P. J., 2015. Determining the extent of groundwater interference on the performance of infiltration trenches. *Journal of Hydrology*, *529*, pp. 1360 –1372. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.047

60. Copeland, C., 2016. Green Infrastructure and Issues in Managing Urban Stormwater. Congressional Research Service 7-5700 R43131. www.crs.gov

61. EPA, 2017. Clean Water Act Methods Update Rule for the Analysis of Effluent. U.S. Environmental Protection Agency (EPA-HQ-OW-2014-0797, FRL-9957-24-OW).

62. Marks, A. A. C., 2014. Stormwater management in Boston: to what extent are demonstration projects likely to enable citywide use of green infrastructure? (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

63. Kayhanian, M. and Stenstrom, M. K., 2005. Mass loading of first flush pollutants with treatment strategy simulations. *Transportation Research Record*, *1904*, pp. 133–143. https://doi.org/10.3141/1904-14

64. Pati, A. and Sahoo, B., 2022. Effect of Low-Impact Development Scenarios on Pluvial Flood Susceptibility in a Scantily Gauged Urban–Peri-Urban Catchment. *Journal of Hydrologic Engineering*, *27*(1), p. 05021034. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002147

65. Ontario Ministry of Environment, 2003. Stormwater Management Planning and Design Manual.

66. Roseen, R. M., Ballestero, T. P., Houle, J. J., Avellaneda, P., Briggs, J., Fowler, G. and Wildey, R., 2009. Seasonal performance variations for storm-water management systems in cold climate conditions. *Journal of Environmental Engineering*, *135*(3), pp. 128-137.

https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(128)

67. EU, 2016. The EU floods directive. http://ec.europa.eu/environment/water/ï,ood_risk/implem.html

68. Maigne, J., 2006. Sustainable management of 'alternative techniques' in stormwater purification. École Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts (ENGREF - National School of Rural Water and Forestry Engineering). Centre de Montpellier, France. https://www.agroparistech.fr/IMG/doc/Version_finale_anglais_Maigne.doc

69. OIEau, 2014. Centre National de Formation aux Métiers de l'Eau (CNFME) e De nouvelles plates-formes pédagogiques dédiées à la gestion intégrée des eauxpluviales (in French). http://www.oieau.fr/oieau/notre-actualite-et-avancement-de/article/cnfme-de-nouvelles-plates-formes?lang¼fr

70. Schuetze, T. and Chelleri, L., 2013. Integrating decentralized rainwater management in urban planning and design: flood resilient and sustainable water management using the example of coastal cities in The Netherlands and Taiwan. *Water*, 5, pp. 593-616. https://doi.org/10.3390/w5020593

71. Jeong, H., Kim, H., Teodosio, B., Ramirez, R. and Ahn, J., 2015. A review of test beds and performance criteria for permeable pavements. In: Chang, et al. (Eds.), *Advances in Civil Engineering and Building Materials IV*. Taylor and Francis, London. https://doi.org/10.1201/b18415-58

72. ARSI, 2016. Association for rainwater storage and infiltration technology, Japan, Membership. http://arsit.or.jp/membership_list

73. Imbe, M., 2013. Stormwater treatment from the road in Japan. In: Regional Workshop on Eco-Efficient Water Infrastructure towards Sustainable Urban Development and Green Economy in Asia and the Pacific, 12-13 December 2013, Bangkok, Thailand.

http://www.unescap.org/sites/default/files/3.2%20Japan_Imbe.pdf

74. Lee, J. G., Selvakumar, A., Alvi, Kh., Riverson, J., Zhen, J.X., Shoemaker, L. and Lai, F., 2012. A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices. *Environmental Modelling and Software*, *37*, pp. 6-18. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.04.011

75. Mosleh, L. and Negahban-Azar, M., 2021. Role of models in the decision-making process in integrated urban water management: a review. *Water*, *13*(9), p.1252. https://doi.org/10.3390/w13091252

76. Jia, H. F., Lu, Y. W., Zhen, X. and Yu, S. L., 2012. Planning of LID-BMPs for urban runoff control: the case of Beijing Olympic village. *Separation and Purification Technology*, *84*, pp. 112–119.

https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.04.026

77. Shoemaker, L., Riverson, J., Khalid, A., Zhen, J., Sabu, P. and Rafi, T., 2009. SUSTAIN, a framework for placement of best management practices in urban watersheds to protect water quality. Report EPA/600/R-09/095, USEPA, Washington, DC, USA.

https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/sustain_complex_tools.pdf

78. Jia, H., Yao, H., Tang, Y., Yu, S.L., Zhen, J.X. and Lu, Y., 2013. Development of a multi-criteria index ranking system for urban runoff best management practices (BMPs) selection. *Environmental Monitoring and Assessment*. *185*, pp. 7915–793. https://doi.org/10.1007/s10661-013-3144-0

79. Zoppou, C. 2001. Review of urban storm water models. *Environmental Modelling and Software*, *16*(3), pp. 195–231. https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00084-0

80. Holt, E., Koivusalo, H., Korkealaakso, J., Sillanpää, N. and Wendling, L., 2018. Filtration systems for stormwater quantity and quality management, Guideline for Finnish implementation. *VTT technical Research Centre of Finland Ltd*, p. 95.

81. Krebs, G., Kokkonen, T., Valtanen, M., Setälä, H. and Koivusalo, H. 2014. Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. *512*, pp. 482–497. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.013

82. ForutanDanesh, 2021. Quantity and quality evaluation of urban runoff based on best management practices low-impact development (BMPs/LID) in gorgan. Ph.D thesis of watershed management. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University Faculty of Natural Resources, [in Persian].

83. Choi, Sumin, Seongsim Yoon, Byongju Lee, and Youngjean Choi, 2015. Evaluation of high-resolution QPE data for urban runoff analysis. *Journal of Korea Water Resources Association*. *48*(9), pp. 719-728. https://doi.org/10.3741/JKWRA.2015.48.9.719

84. Kim, J., Lee, J., Song, Y., Han, H. and Joo, J., 2018. Modeling the runoff reduction effect of low impact development installations in an industrial area, South Korea. *Water*, *10* (8), p. 967. https://doi.org/10.3390/w10080967

85. Kamali, M., Tajrishi, M. and Nazari Alavi, A., 2012. Investigation of surface runoff characteristics in Tehran. https://civilica.com/doc/166096. ICCE09_1029 [In Persian].

86. Taghizadeh, S., 2017. Performance evaluation and optimization of innovative management methods (LID-BMP) in improving the quality and quantity of surface runoff in Tehran: case study of region 22. Master's Thesis, University of Qom [In Persian]. https://sid.ir/paper/381460/fa

87. Rajabnezhad, M., 2017. Utilizing innovative methods (LID-BMPs) in urban runoff management with a focus on pollution reduction. Master's Thesis, University of Qom [In Persian].

https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/9208bd2d9ddda5875cde861d60a7a627

88. Binesh, 2015. Investigating the effect of applying the best management practices on the quantity and quality of urbun stormwater. Third National Conference on Flood Management and Engineering with Urban Floods Approach [in Persian].

89. Movahedinyia, M., Vali Samani, J. M. and Barakhshi, F., 2017. Investigating the effect of low-impact development (LID) rain barrel method on reducing urban flooding. *Water and Irrigation Management*, *7*(1), pp. 1-16. [InPersian]

https://doi.org/10.22059/jwim.2017.63736

90. Arjenaki, M. O., Sanayei, H. R. Z., Heidarzadeh, H. and Mahabadi, N. A., 2021. Modeling and investigating the effect of the LID methods on collection network of urban runoff using the SWMM model (case study: Shahrekord City). *Modeling Earth Systems and Environment*, *7*(1), pp. 1-16. https://doi.org/10.1007/s40808-020-00870-2

91. Nazari, A., Roozbahani, A. and Hashemy Shahdanu, S.M., 2023. Integrated SUSTAIN-SWMM-MCDM approach for optimal selection of LID practices in urbun stormwater systems. *Water Resource Management*, *37*, pp. 3769-3793. https://doi.org/10.1007/s11269-023-03526-9

92. Naeimi, G., 1394. Integrated storm water and groundwater management, a case study: Isfahan metropolis. Master thesis, Isfahn Industrial University, Civil Engineering Faculty, [in Persian].

93. Valipour, J., 2018. Designing Permeable Pavement and Urban Runoff Management (case study: Khorramabad City). Master thesis of Urban Design, Payam Noor University, East Tehran Branch [in Persian].

94. Ahmadi, H., 2023. Optimization of runoff management using metaheuristic algorithm. Master thesis of Business Managemen, Mashhad University [in Persian].