Journal of Water and Wastewater, Vol. 32, No. 4, pp: 136-151

Urban Stormwater Management by Optimizing Low Impact Development Techniques and Integration of SWMM and SUSTAIN Models

A. H. Nazari [1], A. Roozbahani[2], S. M. Hashemy Shahdany[3]

1. MSc. Student of Water Resources Engineering, Dept. of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran
(Corresponding Author) roozbahany@ut.ac.ir
3. Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran

(Received May 8, 2021 Accepted June 28, 2021)

To cite this article:
Nazari, A. H., Roozbahani, A., Hashemy Shahdany, S. M. 2021. "Urban stormwater management by optimizing low impact development techniques and integration of SWMM and SUSTAIN models" Journal of Water and Wastewater, 32(4), 136-151. Doi: 10.22093/wwj.2021.285296.3138. (In Persian)

Abstract

Unsustainable development and rapid urbanization have led to changes in the hydrological characteristics of watersheds, and the risk of flooding has been increased consequently. One of the solutions used for quantitative and qualitative control of urban runoff is green infrastructure and low impact development (LID) based approaches that have attracted the attention of many researchers. In this study, SWMM was used to simulate the rainfall-runoff process in region 1, district 11, Tehran. Six scenarios, including different combinations of several LID types such as Green Roof, Rain Barrel, Bioretention Cell, Porous Pavement, Vegetated Swale, and Dry Pond were developed. Then the SUSTAIN model was utilized to assess each scenario's performance. Optimal solutions were then obtained using non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II), and a cost-effectiveness Pareto frontier curve was performed for all scenarios. Results showed that the selected solutions of scenarios one to six reduced the runoff volume by 53%, 4%, 66%, 72%, 31%, 34%, respectively. Scenario 4, with a combination of rain barrels, porous pavements, and vegetated swales with a runoff volume reduction of 72% and an implementation cost of $ 12.2 million, showed the best performance, comparing the other scenarios' corresponding optimal solutions. Scenario 6 also came in next with a 34% effectiveness and a cost of $ 7.1 million. The combined use of SUSTAIN and SWMM, in addition to the technical evaluation, helped to attain optimized, cost-effective solutions for developed scenarios as well. The results of this study can also help relevant organizations and decision-makers to design, evaluate performance, and implement costs of different LID scenarios.

Keywords: Urban Stormwater Management, LID, SUSTAIN, Green Infrastructure, NSGA-II Algorithm.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۲، شماره ۴، صفحه: ۱۵۱-۱۳۶

مدیریت رواناب شهری با رویکرد بهینه‌سازی روش‌های توسعه کم‌اثر و تلفیق مدل‌های SWMM و SUSTAIN

امیرحسین نظری [۱]، عباس روزبهانی [۲]، سید مهدی هاشمی شاهدانی [۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، تهران، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) roozbahany@ut.ac.ir
۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، تهران، ایران

(دریافت ۱۴۰۰/۲/۱۸ پذیرش ۱۴۰۰/۴/۷)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
نظری، ا. ح.، روزبهانی، ع.، هاشمی شاهدانی، س. م.، ۱۴۰۰، "مدیریت رواناب شهری با رویکرد بهینه‌سازی روش‌های توسعه کم‌اثر و تلفیق مدل‌های SWMM و SUSTAIN" مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۴)، ۱۵۱-۱۳۶. **Doi: 10.22093/wwj.2021.285296.3138**

چکیده

توسعه سریع و ناپایدار شهرها منجر به تغییر خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه‌ها شده و ریسک وقوع آب‌گرفتگی ناشی از رواناب‌های شهری را افزایش داده است. یکی از راه‌حل‌های به‌کار گرفته شده برای کنترل کمّی و کیفی رواناب‌های شهری، رویکردهای مبتنی بر زیرساخت‌های سبز و روش‌های توسعه کم‌اثر است که توجه پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است. در این پژوهش، از مدل SWMM به‌منظور شبیه‌سازی فرایند بارش رواناب در ناحیه یک منطقه ۱۱ شهرداری تهران استفاده شد. ۶ سناریو شامل ترکیبات مختلفی از انواع LID شامل بام سبز، مخزن باران، سلول نگهداشت‌زیستی، معابر نفوذپذیر، جوی باغچه و حوضچه نفوذ در نظر گرفته شد. سپس مدل SUSTAIN به‌منظور ارزیابی عملکرد هر سناریو به‌کار گرفته شد. در گام بعد پاسخ‌های بهینه از طریق الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II به‌دست آمد و برای هر سناریو یک منحنی پارتوی هزینه-عملکرد ارائه شد. نتایج نشان داد پاسخ‌های منتخب پیاده‌سازی سناریوهای ۱ تا ۶ به‌ترتیب حجم رواناب را به میزان ۵۳، ۴، ۶۶، ۷۲، ۳۱ و ۳۴ درصد کاهش دادند. سناریوی ۴ با ترکیبی از مخازن باران، معابر نفوذپذیر و جوی باغچه با ۷۲ درصد و هزینه ۱۲/۲ میلیون دلار، بهینه‌ترین عملکرد را نسبت به پاسخ‌های متناظر از سناریوهای دیگر نشان داد و سناریوی ۶ نیز با ۳۴ درصد کاهش حجم رواناب و هزینه ۷/۱ میلیون‌دلار در رتبه بعدی قرار گرفت. به‌کارگیری تلفیقی مدل‌های SUSTAIN و SWMM کمک کرد تا علاوه بر عملکرد فنی، هزینه و عملکرد هر سناریو ارزیابی و امکان بهینه‌سازی آن فراهم شد. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش می‌تواند مدیران شهری و تصمیم‌گیرندگان را در طراحی، تخمین عملکرد و هزینه‌های اجرایی سناریوهای LID یاری کند.

واژه‌های کلیدی: مدیریت رواناب شهری، روش‌های توسعه کم‌اثر، SUSTAIN، زیرساخت سبز، الگوریتم NSGA-II

۱- مقدمه

گسترش روز افزون و توسعه غیراصولی شهرها، افزایش جمعیت، سیستم‌های جمع‌آوری رواناب سنتی و فرسوده و همچنین تغییرات اقلیمی، تأثیرات منفی سیلاب‌های شهری را از نظر کمّی و کیفی افزایش دادند (Ghodsi et al., 2020) و با تغییر کاربری اراضی ناشی از توسعه شهرها، خصوصیات هیدرولوژیکی و پاسخ حوضه نسبت به بارش دستخوش تغییر شده است. از طرفی، بسیاری از سیستم‌های کنترل سیلاب شهری فاقد ظرفیت زهکشی کافی برای مقابله با افزایش سیلاب ناشی از پدیده‌هایی مانند تغییر اقلیم و

dx.doi.org/10.22093/wwj.2021.285296.3138

یا بارش‌های با شدت زیاد هستند و این موضوع منجر به افزایش ریسک سیلاب‌های شهری شده است. نکته حائز اهمیت در بحث کنترل و مدیریت سیلاب توسط شبکه‌های جمع‌آوری رواناب سطحی این است که علاوه بر در نظر گرفتن جنبه‌های فنی باید به مسائل اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی نیز توجه ویژه‌ای داشت (Tingsanchali, 2012).

به‌منظور تحقق این هدف توصیه شده است با اعمال محدودیت بر سیستم‌های رواناب شهری سنتی و جایگزین کردن روش‌های توسعه کم‌اثر[1]، آثار سوء بیش‌توسعه‌یافتگی شهرها به حداقل برسد (Rezazadeh Helmi et al., 2019).

مفهوم توسعه کم‌اثر معمولاً در آمریکای شمالی و نیوزلند استفاده می‌شود و اولین بار در سال ۱۹۷۷ توسط فلچر و همکاران در یک گزارش مربوط به برنامه‌ریزی برای کاربری اراضی در Vermont آمریکا استفاده شد تا با رویکردی جدید و محیط‌زیستی، هزینه مدیریت سیلاب‌های شهری به حداقل رسانده شود (Fletcher et al., 2015).

به‌طور کلی روش‌های LID، مبتنی بر حفظ نقطه‌ای و محلی رواناب در مبدأ بوده و علاوه بر اثر کنترلی روی کمیت رواناب، فرایند انتقال را به حداقل می‌رساند که این مهم باعث کاهش میزان آلودگی رواناب بوده و آثار مثبت محیط‌زیستی به همراه خواهد داشت. روش‌های LID انواع مختلفی دارند و از پرکاربردترین آنها می‌توان به بام سبز[2]، مخازن باران[3]، سلول‌های نگهداشت زیستی[4] و معابر نفوذپذیر[5] اشاره کرد. در ادبیات فنی از روش‌های توسعه کم‌اثر با عناوینی مانند BMP[6] و GI[7] نیز نام برده شده است. در کشور چین نیز رویکردی مشابه برای ساخت شهرهایی موسوم به شهر اسفنجی[8] آغاز شده است.

شهر تهران به‌طور کلی و به‌خصوص نواحی مرکزی نیز از این قاعده مستثنی نبوده و آثار توسعه سریع، تغییر کاربری اراضی و عدم‌پاسخ‌گویی کافی سیستم زهکشی موجود، پس از وقوع بارش‌های نسبتاً شدید خود را در قالب سیلاب و آب‌گرفتگی نشان داده و ضرورت اصلاح و بهسازی سیستم رواناب شهری را یادآور می‌شود. در این راستا، شریعت و همکاران با استفاده از مدل Autodesk SSA در منطقه ۱۱ شهر تهران روشی به‌منظور مدیریت ریسک رواناب شهری ارائه دادند. پس از مدل‌سازی منطقه و تعریف معیارهایی، ریسک سیلاب در کانال‌های درجه سه و چهار محاسبه و نقشه ریسک آب‌گرفتگی کانال‌ها تهیه شد. نتایج حاکی از آن بوده که حدود ۱۷ کیلومتر از ۴۲ کیلومتر از کانال‌های جمع‌آوری آب سطحی ریسک سیلاب بسیار زیادی دارند که ۱۰ تا ۲۶ درصد طول کل کانال‌ها را تشکیل می‌دهد (Shariat et al., 2019).

همچنین روزبهانی و همکاران با استفاده از مدل SWMM[9] سیستم رواناب شهری ناحیه‌ای از منطقه ۱۱ تهران را تحت سناریوهای اقلیمی شبیه‌سازی و توسط معیارهای اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری، تاب‌آوری و شاخص پایداری ارزیابی کردند که این شاخص‌ها به‌ترتیب برابر با ۷۷/۸۹، ۷۷/۷۳ و ۷۱/۶۱ درصد محاسبه شد (Roozbahani et al., 2020).

برای مدل‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و انتقال آلودگی در سیستم‌های رواناب شهری مدل‌هایی مانند SWMM، Autodesk SSA و MIKE URBAN توسعه داده شده و یکی از پرکاربردترین آنها مدل SWMM است. بهرامی و همکاران با استفاده از روش‌های LID مانند سلول نگهداشت زیستی، مخازن باران، بام سبز، جوی باغچه[10] و اعمال سناریوهای مختلف بارشی با دوره بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال در شهر سنندج و توسط SWMM به ارزیابی حجم رواناب در دوره‌های پیش و پس از توسعه پرداختند که نتایج حاکی از کاهش ۳۵ تا ۵۰ درصدی دبی اوج بوده است (Bahrami et al., 2017).

مظفری و همکاران نیز در پژوهشی به‌وسیله مدل EPA SWMM به بررسی مدیریت کمّی و کیفی رواناب شهری در بخشی از منطقه ۲۲ شهرداری تهران پرداختند. در این پژوهش جوی باغچه، سلول‌های نگهداشت زیستی و بام سبز در کنترل جریان و بار آلودگی و غلظت جامدات معلق ارزیابی شدند. نتایج این پژوهش نشان داد بام سبز و جوی باغچه با متوسط کاهش ۱۸ و ۱۰

[1] Low Impact Development (LID)
[2] Green Roof (GR)
[3] Rain Barrel (RB)
[4] Bioretention Cell (BC)
[5] Porous Pavements (PP)
[6] Best Management Practices (BMP)
[7] Green Infrastructure (GI)
[8] Sponge City
[9] Storm Water Management Model (SWMM)
[10] Vegetated Swale (VS)

درصد کاهش دبی اوج خروجی از حوضه عملکرد بهتری دارد (Mozafari and Kobarfard, 2017).

همچنین دی پائولا و همکاران با هدف مدیریت رواناب شهری، یک مدل بهینه‌سازی را برای منطقه مطالعاتی در Napel به‌کار گرفتند. در این پژوهش به‌کارگیری LID ها، بر مبنای مدل بهینه‌سازی جستجوی هارمونیک فرا اکتشافی و SWMM بوده است. طبق نتایج، ترکیب مخازن باران با معابر نفوذپذیر، سلول‌های نگهداشت زیستی و بام سبز، ابزار مفیدی برای کاهش دبی پیک سیلاب به‌شمار می‌روند و مدل SWMM انعطاف‌پذیری لازم برای ترکیب با مدل‌های دیگر را دارد (De Paola et al., 2018).

بینش و همکاران نیز در پژوهشی واقع در حوضه سیل برگردان غرب تهران، تحت دو سناریوی وجود و عدم‌وجود روش‌های LID، با به کارگیری مدل SWMM، میزان عملکرد سیستم را در یک گره انتخابی ارزیابی کردند و طبق نتایج، با اضافه کردن جوی باغچه به سیستم رواناب شهری، حجم رواناب بین ۱۷ تا ۴۵ درصد کاهش داشته است (Binesh et al., 2018).

در پژوهشی دیگر پلاتز و همکاران عملکرد مدل SWMM را به‌وسیله قیاس کمّی داده‌های مشاهداتی و نتایج مدل‌سازی از طریق به‌کارگیری یک روش کالیبراسیون چند رویداده و چند هدفه ارزیابی کردند و با محاسبه معیارهای ارزیابی عملکرد نتیجه گرفتند که SWMM با دقت خوبی زمان پیک رواناب را تخمین می‌زند (Platz et al., 2020).

مدل SUSTAIN[1] توسعه داده شده توسط سازمان حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده ابزاری است که علاوه بر توانایی شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب در حوضه‌ها، قادر به ارزیابی هزینه-عملکرد و بهینه‌سازی سناریوهای مبتنی بر روش‌های توسعه کم‌اثر است.

چن و همکاران به‌منظور جهان‌شمول بودن و به تأیید رساندن قابلیت SUSTAIN در ارزیابی عملکرد سیستم‌های LID، آن را در یک حوضه در کشور تایوان به کار گرفتند. در این پژوهش، مدل برای منطقه موردنظر کالیبره و صحت‌سنجی شد و انواع مختلف LID و ترکیبات آنها سنجش و ارزیابی شد و نتایج حاصله رضایت‌بخش بودند (Chen et al., 2014).

همچنین در پژوهش دیگری در یک سایت صنعتی واقع در شهر Ma'nshaan چین، گائو و همکاران با به‌کارگیری مدل SUSTAIN و انواع مختلف LID آثار کنترلی رویکرد توسعه کم‌اثر را در بحث کنترل کیفی و کمّی رواناب نشان دادند (Gao et al., 2015).

جیا و همکاران، از SUSTAIN به‌منظور تجزیه‌وتحلیل هزینه و عملکرد چهار سناریو کنترل رواناب شامل ۱) وضعیت هیدرولوژیکی پیش از توسعه، ۲) وضعیت کنونی، ۳) اجرای LID با حداقل هزینه و ۴) اجرای LID با حداکثر عملکرد استفاده کردند. همچنین در نهایت از الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II برای بهینه‌سازی سناریوها استفاده شد (Jia et al., 2015).

مائو و همکاران نیز در پژوهشی از مدل SUSTAIN به‌منظور بررسی مزایای به‌کارگیری انواع LID به‌صورت ترکیبی در شهر جدید Foshan در چین استفاده کردند. در نهایت بهترین ترکیب از LID توسط ماژول بهینه‌سازی موجود در SUSTAIN در منطقه مورد مطالعه اعمال شد و نتایج نشان داد که حجم رواناب تا ۴۰ درصد و بار آلودگی تا ۶۰ درصد کاهش داشته است (Mao et al., 2017).

در پژوهشی دیگر در چین لی و همکاران از SUSTAIN و SWMM برای بهینه‌سازی طراحی SPC و کاهش رواناب، بر اساس حداقل‌سازی هزینه و حداکثرسازی عملکرد استفاده کردند. نتایج نشان داد که سناریوی برتر می‌تواند تا ۱۲/۳ درصد از هزینه‌های اجرا بکاهد در حالی که قیود فنی را نیز ارضا کند (Li et al., 2018).

در این پژوهش برای اولین بار در کشور، با رویکرد مبتنی بر روش‌های توسعه کم‌اثر و تلفیق دو مدل SWMM و SUSTAIN، سناریوهایی متشکل از LIDهای متناسب با منطقه مورد مطالعه- ناحیه یک منطقه ۱۱ شهر تهران - تدوین شده و با توجه به معیارهای هزینه و عملکرد هر سناریو، اثرات آن بر عملکرد سیستم فرعی رواناب شهری (کانال‌های درجه ۳ و ۴) ارزیابی شد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، مراحل پژوهش به‌صورت شماتیک در فلوچارت شکل ۱ نمایش داده شده است و در ادامه با جزئیات بیشتری شرح داده خواهد شد.

[1] System for Urban Stormwater Treatment and Analysis IntegratioN (SUSTAIN)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2021.285296.3138

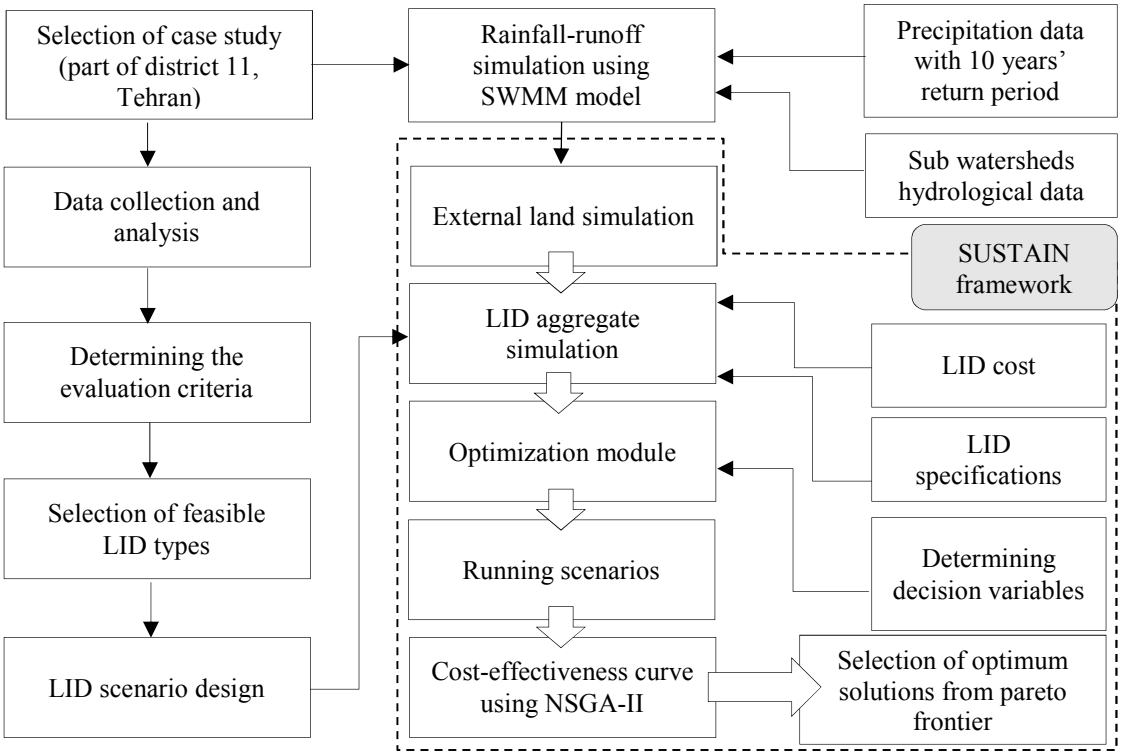

Fig. 1. Research flowchart: LID-BMP planning for urban stormwater managment using SWMM and SUSTAIN model

شکل ۱- فلوچارت پژوهش: برنامه‌ریزی LID برای مدیریت رواناب شهری توسط تلفیق مدل SWMM و SUSTAIN

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه ۱۱ شهرداری تهران در مرکز شهر تهران واقع شده و جمعیتی بالغ بر ۲۸۳۰۰۰ نفر دارد. این منطقه از منظر سیاسی، تاریخی، فرهنگی و اقتصادی اهمیت زیادی دارد. مساحت این منطقه معادل ۱۲/۰۶ کیلومترمربع و شیب متوسط آن ۲ درصد تخمین زده شده است (Shariat et al., 2018).

عمده کاربری اراضی منطقه، مسکونی بوده و یا به معابر اختصاص دارد. در این پژوهش ناحیه یک منطقه ۱۱ شهرداری تهران برای ارزیابی عملکرد روش‌های LID بر کمیت رواناب و سیستم رواناب شهری انتخاب شد. مساحت این ناحیه برابر ۲/۷ کیلومترمربع بوده و در شمال منطقه ۱۱ واقع شده است. محدوده تغییرات ارتفاعی این ناحیه در پست‌ترین و بلندترین نقطه به‌ترتیب برابر با ۱۱۵۳ و ۱۲۰۷ متر از سطح دریا است. سیستم جمع‌آوری رواناب شهری در این ناحیه شامل ۳۲۱ کانال از نوع درجه سه و چهار است که وظیفه تخلیه رواناب به خارج از محدوده را به دوش کشیده و در نهایت به یکی از سه کانال اصلی خیام، سزاوار و یا فیروزآبادی منتهی می‌شود. سیستم تخلیه رواناب شهری کنونی از مشکلاتی مانند انباشت زباله در مجاری، ظرفیت کم کانال‌ها و آب‌گرفتگی‌های متعدد در هنگام بارندگی رنج می‌برد (Behzadi et al., 2019). موقعیت منطقه مطالعاتی در شکل ۲ قابل‌مشاهده است.

۲-۲- مدل‌سازی بارش رواناب توسط SWMM

مدل EPA SWMM یک مدل شبیه‌سازی بارش-رواناب پویا است که برای هر دو نوع از بارش تک رویداد و بلندمدت در حوضه‌های شهری و به‌منظور شبیه‌سازی کمّی و کیفی رواناب استفاده می‌شود (Rossman, 2015).

این مدل به‌طور گسترده‌ای برای برنامه‌ریزی، تجزیه‌وتحلیل و طراحی‌های مرتبط با سیستم‌های جمع‌آوری رواناب در مناطق شهری استفاده شده است (Rossman, 2015).

در این پژوهش برای شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب در ناحیه یک منطقه ۱۱ شهرداری تهران، مدل توسعه داده شده توسط روزبهانی و همکاران، اطلاعات به‌روز رسانی و استفاده شد

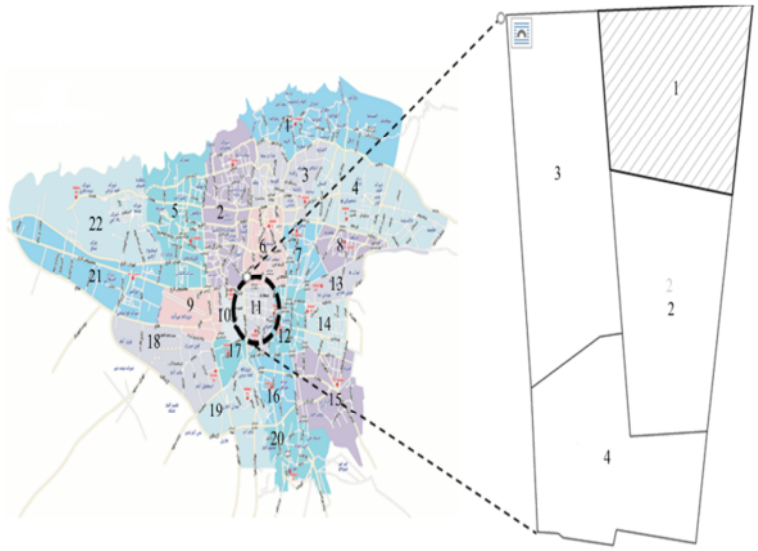

Fig. 2. Location of region 1, district 11, Tehran

شکل ۲- موقعیت مکانی ناحیه یک منطقه ۱۱ شهر تهران

(Roozbahani et al., 2020).

رویداد بارشی استفاده شده در این مدل از نوع تک رویداد و ۶ ساعته بوده و به‌دلیل اینکه دوره بازگشت طراحی عمده کانال‌های درجه سه و چهار موجود در منطقه (بیش از ۹۰ درصد) مورد مطالعه ۱۰ ساله بوده است، در این پژوهش نیز از بارش با دوره بازگشت ۱۰ ساله استفاده شد (Behzadi et al., 2019).

جنس خاک منطقه به‌طور معمول در گروه C و B هیدرولوژیکی قرار می‌گیرد و از روش SCS به‌منظور محاسبات نفوذ استفاده شد. همچنین شماره منحنی اکثر زیرحوضه‌ها بیشتر از ۹۰ است که نشان از نفوذپذیری کم، در منطقه دارد.

۲-۳- معرفی مدل EPA SUSTAIN

مدل SUSTAIN یک افزونه مبتنی بر نرم‌افزار ArcGIS است و می‌تواند به‌منظور تجزیه‌وتحلیل و مدیریت رواناب شهری و آلودگی‌های ناشی از آن استفاده شود. این مدل قابلیت به‌کارگیری در مقیاس‌های کوچک محلی و در مقیاس‌های بزرگتر مثل حوضه‌های آبریز را داشته و همچنین قادر به شبیه‌سازی بارش‌های تک رویداد و پیوسته است (Lee et al., 2012).

مدل SUSTAIN یک بسته کامل از الگوریتم‌هایی است که علاوه بر دقت در محاسبات فنی و تئوری، تحلیلی بر مبنای هزینه و عملکرد ارائه می‌دهد تا نتایج آن در فاز عملیاتی و دنیای واقعی نیز مؤثر باشد (USEPA, 2009).

در مدل SUSTAIN یک ماژول بهینه‌سازی تعبیه شده که می‌تواند برای مقایسه سناریوهای LID به کار گرفته شود (Chen et al., 2014).

به‌طور کلی SUSTAIN از اجزای اصلی زیر تشکیل شده و در ادامه تشریح خواهد شد: ۱) Framework Manager، ۲) ماژول شبیه‌سازی زمین[1]، ۳) ماژول LID، ۴) ماژول هزینه، ۵) ماژول بهینه‌سازی و ۶) ماژول پس پردازش[2].

Framework Manager: شامل چارچوب و الگوریتم‌هایی است که اجزا و ماژول‌های مختلف را به‌هم مرتبط کرده و به بیان دیگر مرکز فرمان مدل محسوب می‌شود.

ماژول Land Simulation: ماژول LS در مدل SUSTAIN از دو طریق می‌تواند رواناب یا آلودگی تولید شده را شبیه‌سازی کند. به‌طور پیش‌فرض، مدل با استفاده از الگوریتم‌های موجود در SWMM، هیدروگراف را محاسبه می‌کند که اصطلاحاً به آن شبیه‌سازی داخلی[3] گفته می‌شود. همچنین، در صورتی که منطقه پیش‌تر توسط مدل‌هایی مانند SWMM یا HSPF[4] شبیه‌سازی شده

[1] Land Simulation Module
[2] Post-Processor
[3] Internal Simulation
[4] Hydrological Simulation Program Fortran (HSPF)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2021.285296.3138

باشد می‌توان نتایج آن را توسط گزینه شبیه‌سازی خارجی[1] وارد پروسه مدل‌سازی کرد که در این پژوهش نیز از این مهم استفاده شد.

ماژول LID: این ماژول یک شبیه‌ساز رواناب و انتقال آلودگی فرایند محور است که دامنه گسترده‌ای از LID ها را پوشش می‌دهد. همچنین کلیه فرایندهای هیدرولوژیکی انجام شده شامل به دام افتادن رواناب، تبخیر، نفوذ سطحی و عمقی و رواناب خروجی در سازه‌های کنترل رواناب (LID) توسط این ماژول شبیه‌سازی می‌شود که منجر به کاهش حجم رواناب و دبی اوج و یا کاهش بار آلودگی خواهد بود. در شکل ۳ فرایند عمومی کنترل رواناب توسط LID ها قابل‌مشاهده است.

ماژول هزینه: این ماژول بر اساس FCC[2] هر LID، هزینه کل اجرای LID را تخمین می‌زند. مدل SUSTAIN از پایگاه داده‌ای پشتیبانی می‌کند که هزینه هر یک از عناصر یاد شده در آن جمع‌آوری شده و قابل‌استفاده است. در واقع FCC به خدمات و المان‌های تشکیل‌دهنده هر LID گفته می‌شود که برای ساخت و اجرای یک واحد از طول، سطح و یا حجم آن موردنیاز است (برای مثال خاک‌برداری و خاک‌ریزی، تسطیح و پارچه فیلتر). جزئیات و منابع این پایگاه داده در گزارش معرفی مدل SUSTAIN منتشرشده توسط سازمان حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده قابل‌دسترسی است (USEPA, 2009).

هزینه کل از معادله ۱ به‌دست می‌آید

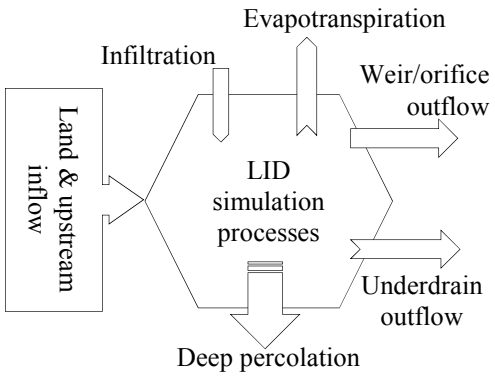

Fig. 3. The generic process of runoff control using LID methods (USEPA, 2009)

شکل ۳- فرایند عمومی کنترل رواناب توسط LID (USEPA, 2009)

[1] External Simulation
[2] Fundamental Construction Component (FCC)

$$Cost = a + b.(Length)^c + d.(Area)^e + f.(Volume)^g \quad (۱)$$

که در آن

a، b، c، d، e، f و g پارامترهای هزینه هستند که وابسته به هزینه‌های آماده‌سازی، طول، سطح و یا حجم هر FCC است.

ماژول بهینه‌سازی: ماژول بهینه‌سازی در SUSTAIN به‌منظور یافتن مقرون‌به‌صرفه‌ترین راه‌حل‌های کنترل کمیت و کیفیت رواناب توسط روش‌های LID-BMP تعبیه شده است. این ماژول از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی برای انجام جستجوی ترکیب‌های بهینه BMP که مطابق با معیارهای تصمیم‌گیری تعریف شده توسط کاربر هستند استفاده می‌کند (USEPA, 2009).

تابع هدف می‌تواند یکی از گزینه‌های "کمینه‌سازی هزینه" یا "توسعه منحنی هزینه-عملکرد" باشد که به‌ترتیب از روش و الگوریتم‌های جستجوی پراکنده[3] و NSGA-II استفاده شده است. در این پژوهش به‌منظور ارزیابی هزینه و عملکرد سناریوهای طراحی شده از روش NSGA-II استفاده شد که به یافتن راه‌حل‌های نزدیک بهینه[4] کمک می‌کند.

تحت گزینه آنالیز هزینه-عملکرد در SUSTAIN، هدف جستجو شناسایی راه‌حل‌های مقرون‌به‌صرفه و با توجه به اهداف مسئله (کنترل حجم یا اوج رواناب) است. این مسئله چند هدفه می‌تواند به شرح زیر بیان شود

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} \sum_{i=1}^{n} \text{Cost}(LID_i) \\ &\text{Minimize} \ \ EF \end{aligned} \quad (۲)$$

که در آن

LID_i مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم LID موردنظر و مرتبط به مکان i و EF فاکتور ارزیابی (در این پژوهش حجم رواناب) است. به‌طور کلی شش متغیر تصمیم شامل قطر، ارتفاع، ارتفاع روزنه/بند، طول، تعداد LID و عمق خاک در فرایند بهینه‌سازی سناریوها مؤثر است.

ماژول پس پردازش: این ماژول وظیفه پردازش نتایج به‌دست آمده و ارائه آن به‌صورت بصری را بر عهده دارد.

[3] Scatter Search
[4] Near Optimum Solutions

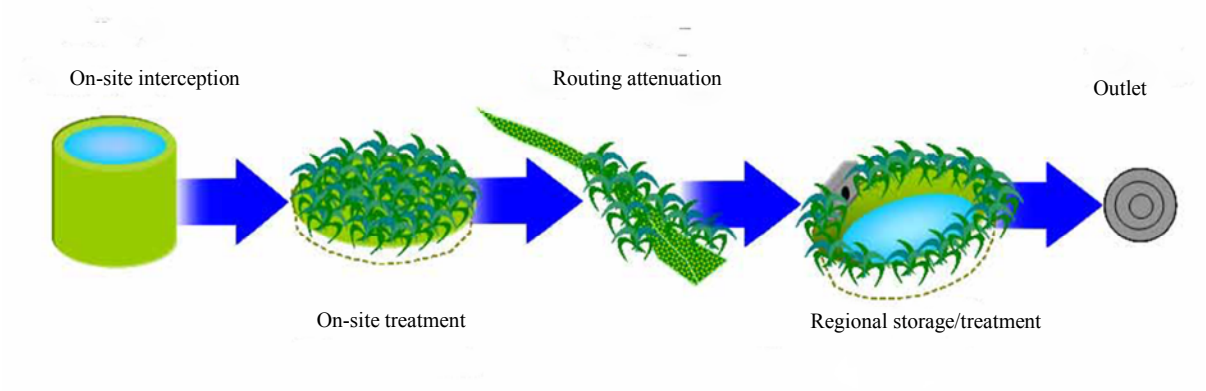

Fig. 4. Generic runoff removal process using aggregate BMPs in SUSTAIN (USEPA, 2009)

شکل ۴- فرایند عمومی حذف رواناب توسط روش aggregate در SUSTAIN (USEPA, 2009)

۲-۴- طراحی سناریوها

۲-۴-۱- الگوی حذف رواناب از مبدأ تا مقصد

به‌طور کلی هر LID باتوجه به خصوصیات بالقوه‌ای که دارد برای مکان‌ها و شرایط خاصی به کار گرفته می‌شود. برای مثال گزینه‌هایی مثل مخازن باران یا بام سبز به‌منظور به دام انداختن بارش در محل بام ساختمان‌ها استفاده می‌شوند و در مبدأ جلوی ورود رواناب به سیستم رواناب شهری گرفته می‌شود. علاوه بر این، با به‌کارگیری انواع مختلف LID به‌صورت ترکیبی و در قالب سناریوهای گوناگون می‌توان نقاط ضعف یک LID را با نقاط قوت یک نوع LID دیگر پوشش داد. به‌همین منظور، از الگوی فرایند-محور شکل ۴ برای تشکیل سناریوها استفاده شد که رواناب را طی چندین مرحله از مبدأ تا مقصد (خروجی هر زیرحوضه) همراهی کرده و عملکرد مثبتی در زمینه کنترل کمیت و کیفیت رواناب به جا می‌گذارد. طبق این الگو مراحل زیر طی خواهد شد: جمع‌آوری در محل: مخازن باران و بام سبز، از جمله LID هایی هستند که رواناب را در بام ساختمان‌ها به دام می‌اندازند. تخمین زده می‌شود حدود ۵۶ درصد از منطقه مطالعاتی متشکل از بام ساختمان‌ها باشد که کنترل رواناب آن اهمیت زیادی دارد. خروجی رواناب به جا مانده از این بخش وارد مرحله بعد می‌شود.

تصفیه در محل: در گام دوم، معابر نفوذپذیر و سلول نگهداشت زیستی مواردی هستند که معمولاً در بافت‌های تجاری، مجاورت ساختمان‌ها و در کنار معابر قابل‌استفاده هستند.

حذف در مسیر: LID مناسب این مرحله جوی باغچه است که علاوه بر انتقال رواناب اثر کاهشی نیز بر روی رواناب خواهد داشت. این نوع LID می‌تواند به‌صورت ترکیبی و در مسیر کانال‌های موجود نیز استفاده شود.

ذخیره/تصفیه منطقه‌ای: حوضچه‌های نفوذ[1] معمولاً در نزدیکی خروجی حوضه جانمایی می‌شوند و کاربرد آن نیز فرامحلی است و کلیه رواناب به جا مانده از زیرحوضه‌ها به این حوضچه‌ها هدایت می‌شود.

۲-۴-۲- تولید و تدوین سناریوها برای ورود به مدل SUSTAIN

به‌منظور تجزیه‌وتحلیل اثر کنترلی روش‌های توسعه کم‌اثر و زیرساخت‌های سبز بر روی رواناب شهری، ۶ سناریو از ترکیب LIDهای مختلف و با در نظر گرفتن الگوی شکل ۴ تدوین و آماده ورود به مدل SUSTAIN شد که جزئیات آن مطابق جدول ۱ است.

با توجه به بافت متراکم و کمبود فضا در منطقه مورد مطالعه، تلاش بر این بود که گزینه‌های منتخب از میان LID های موجود با واقعیت‌های منطقه انطباق داشته باشند.

سناریو ۱: طبق این سناریو، رواناب ناشی از بام ساختمان‌ها توسط GR [2] به دام انداخته شده و بخشی از آن در سیستم نفوذ کرده و حذف می‌شود. در مرحله بعدی رواناب باقیمانده به‌ترتیب وارد BC [3] و VS [4] شده و پس از آن به خروجی زیرحوضه هدایت می‌شود.

سناریو ۲: مشابه سناریوی ۱ است، با این تفاوت که در مرحله

[1] Dry Pond (DP)
[2] Green Roof (GR)
[3] Bioretention Cell (BC)
[4] Vegetated Swale (VS)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2021.285296.3138

جدول ۱- سناریوهای طراحی شده به‌منظور مقایسه، بهینه‌سازی و ارزیابی عملکرد ترکیبات مختلف LID

Table 1. Designed scenarios for comparison, optimization, and performance assessment of different combinations of LIDs

Scenario	LID type			
	On-site interception	On-site treatment	Routing attenuation	Regional storage/treatment
S1	GR	BC	VS	-
S2	RB	BC	VS	-
S3	GR	PP	VS	-
S4	RB	PP	VS	-
S5	GR+RB	BC+PP	VS	-
S6	GR+RB	BC+PP	VS	DP

اول به جای بام سبز از مخازن باران برای جمع‌آوری رواناب از بام ساختمان‌ها استفاده شده است. با توجه به اینکه طبق الگوی به کارگرفته شده، رواناب ذخیره شده در RB [1] به مرحله بعد یعنی BC تخلیه می‌شود، بنابراین انتظار می‌رود مرحله اول اثر کنترلی خود را از دست بدهد، به همین دلیل تمام رواناب ذخیره شده در مخازن باران به BC و سپس به جوی باغچه می‌ریزد. سناریو ۳: در گام اول رواناب توسط GR دریافت و خروجی آن به معابر نفوذپذیر هدایت می‌شود. رواناب باقیمانده از مرحله دوم (تصفیه در محل) به جوی باغچه و سپس به خروجی زیرحوضه هدایت می‌شود.

سناریو ۴: به سناریوی ۳ شباهت دارد با این تفاوت که از مخازن باران به جای بام سبز برای جمع‌آوری رواناب موجود در بام ساختمان‌ها استفاده شده است.

سناریو ۵: در این سناریو تمامی LIDهای استفاده شده در سناریوهای ۱ تا ۴ به کار گرفته شده است به‌طوری که در گام دریافت در محل به‌صورت ترکیبی از مخازن باران و بام سبز، در گام تصفیه در محل از سلول‌های نگهداشت زیستی و معابر نفوذپذیر و در مرحله حذف در مسیر از جوی باغچه استفاده شد.

سناریو ۶: مشابه سناریوی ۵ است با این تفاوت که فضایی در نزدیکی خروجی حوضه برای اجرای یک حوضچه نفوذ دیده شده است تا علاوه بر تکمیل الگوی شکل ۴، نتایج ارزیابی این سناریو برای تصمیم‌گیرندگان و بهره‌برداران فراهم آید. شماتیک سناریوهای تعریف شده در شکل ۵ قابل‌مشاهده است.

۳- نتایج

۳-۱- بهینه‌سازی سناریوهای LID

پس از تعیین نوع سناریو در SUSTAIN، متغیرهای تصمیم و هزینه‌های مربوط به هر LID که لازمه‌ی فعال شدن ماژول بهینه‌سازی است، مطابق جدول ۲ برای مدل تعریف شد. متغیرهای تصمیم در این پژوهش شامل طول، تعداد LID، قطر، عمق خاک و ارتفاع بند/خاک‌ریز [2] در نظر گرفته شد. همچنین، برای تخمین هزینه واحد هر LID از بانک اطلاعاتی موجود در SUSTAIN استفاده شد. به‌منظور انجام بهینه‌سازی، منطقه مطالعاتی با توجه به وضعیت فعلی کانال‌های موجود و محل تخلیه آن به ۹ زیرحوضه اصلی تقسیم‌بندی شد به‌طوری که هم‌زمان از الگوی تخلیه رواناب توسط کانال‌های منطقه تبعیت و زمان تمرکز آن کمتر از گام‌های زمانی در شبیه‌سازی باشد تا در محاسبات مربوط به مسیریابی سیلاب تولید خطا انجام نشود. به بیان دیگر در صورتی که مساحت هر زیرحوضه کمتر از ۰/۵ کیلومترمربع باشد مقدار خطای شبیه‌سازی ترکیبی [3] در مقابل شبیه‌سازی توزیعی [4] کمتر از ۵ درصد خواهد بود (Mao et al., 2017). در شکل ۶ نحوه توزیع کاربری اراضی، LID ها و نحوه مسیریابی آن مشخص شده است.

۳-۲- آنالیز هزینه-عملکرد سناریوها

اطلاعات هر ۶ سناریو به مدل SUSTAIN وارد شد و توسط گزینه آنالیز هزینه-عملکرد ماژول بهینه‌سازی، منحنی‌های هزینه عملکرد هر سناریو در قالب جبهه پارتوهایی تولید شده و در شکل ۷ نمایش

[1] Rain Barrel (RB)

[2] Weir Height
[3] Aggregate Simulation
[4] Distributed Simulation

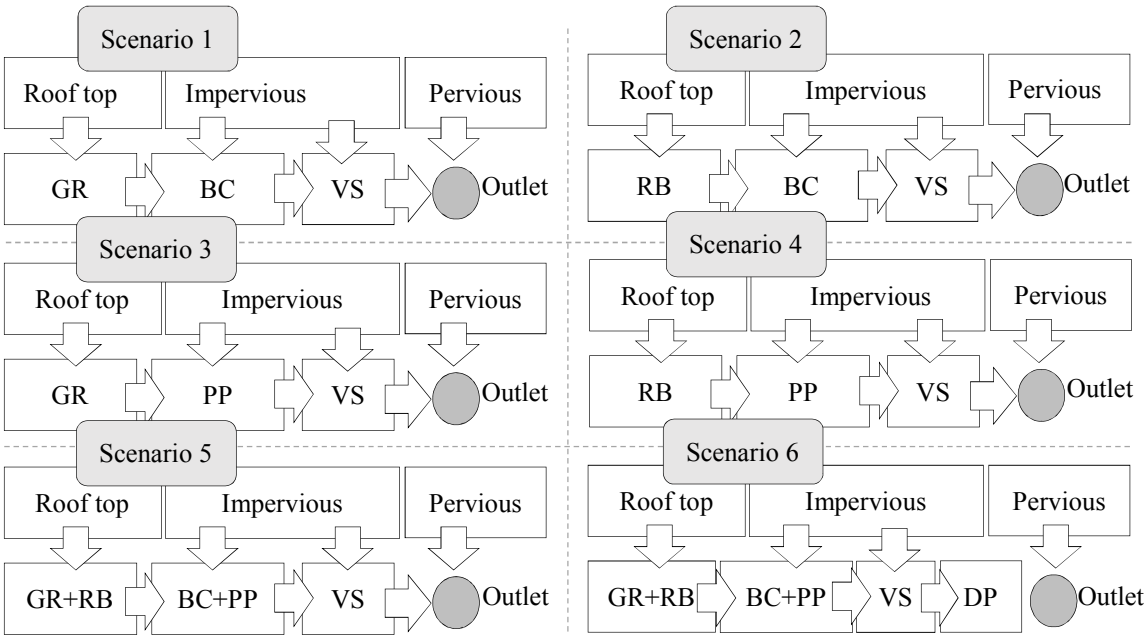

Fig. 5. Defined aggregate LID scenarios schematic

شکل ۵ – شماتیک سناریوهای LID تعریف شده

جدول ۲– متغیرهای تصمیم برای بهینه‌سازی سناریوها و اطلاعات هزینه مربوط به هر LID

Table 2. Decision variables for scenario optimization and LID's construction cost

BMP type	Decision variables	Range		Cost data			
		Min	Max	Linear cost ($/m)	Area cost ($/m^2)	Volume cost ($/m^3)	Constant cost ($)
Rain barrel	Diameter (m)	0.5	0.9	0	0	654.1	0
	Height (m)	0.9	1.8				
	Number of units	0	35087				
Green roof	Length (m)	9.1	15.2	0	187	63.3	0
	Weir height (m)	0.1	0.2				
	Soil depth (m)	0.1	0.5				
	Number of units	0	14032				
Bioretention cell	Length (m)	12.2	24.4	24.3	10.5	96.3	9.6
	Weir height (m)	0.1	0.2				
	Soil depth (m)	0.6	1.8				
	Number of units	0	88				
Porous pavement	Length (m)	3	30.5	34.3	38.4	50.8	0.2
	Weir height (m)	0.1	0.2				
	Soil depth (m)	0.6	1.2				
	Number of units	0	2140				
Vegetated swale	Number of units	0	88	41	0	0	0
Dry pond	Length (m)	12.2	30.5	0	5.5	119.5	1852
	Soil depth (m)	0.3	0.9				

dx.doi.org/10.22093/wwj.2021.285296.3138

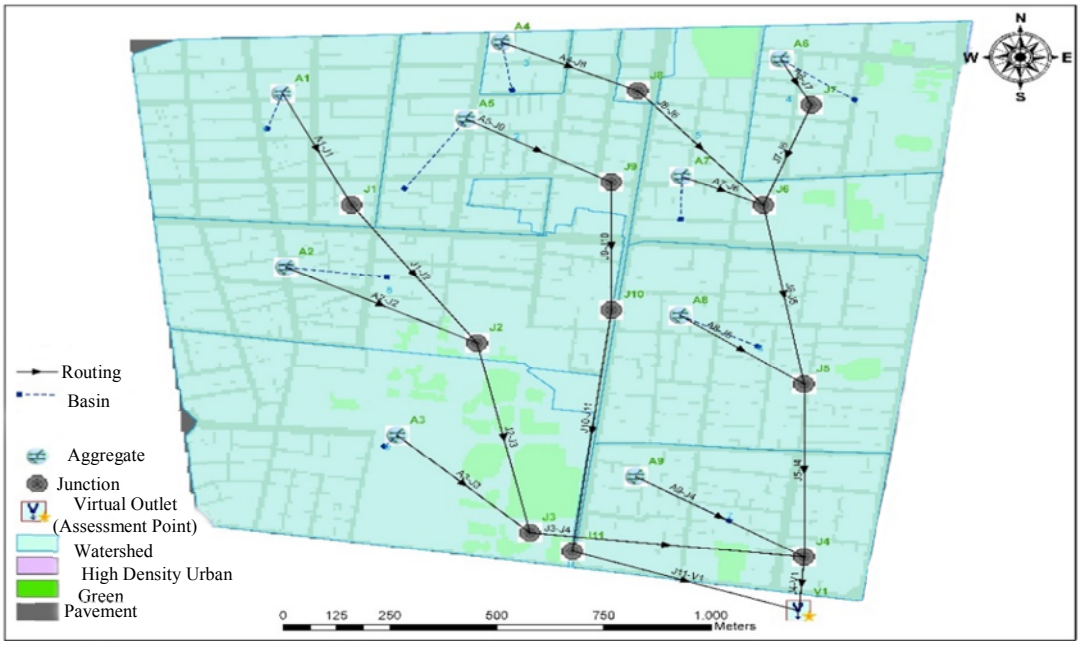

Fig. 6. Case study map, watershed delineation, aggregate LID placement, runoff routing and land use distribution (Pavement, Pervious, Impervious)

شکل ۶- نقشه منطقه مورد مطالعه، حوضه‌بندی و نحوه جانمایی LIDهای ترکیبی و مسیریابی رواناب و نحوه توزیع کاربری ارضی (معبر، نفوذپذیر، نفوذناپذیر)

داده شده است. محور افقی نمودار هزینه برحسب میلیون دلار و محور عمودی نشان‌دهنده درصد کاهش حجم رواناب است. نقاط خاکستری رنگ، معرف تمامی راه‌حل‌های ممکن و نقاط نارنجی رنگ نشان‌دهنده پاسخ‌های بهینه (Non-Dominated Solutions) هر سناریو است که نسبت به نقاط نارنجی رنگ دیگر برتری ندارد و انتخاب راه‌حل برتر از بین نقاط بهینه می‌تواند به عوامل مختلفی بستگی داشته باشد. شرط انتخاب پاسخ برتر که با رنگ سبز مشخص شده بر اساس نقطه زانوی هر جبهه است که از آن نقطه به بعد نرخ عملکرد به هزینه کاهش داشته و به این معنی است که حتی با وجود هزینه بیشتر، رواناب مقدار کمی کاهش پیدا کرده است. هر نقطه روی جبهه‌های پارتو حاوی اطلاعاتی از متغیرهای تصمیم و خصوصیات LID ها است؛ اطلاعات مربوط به راه‌حل‌های منتخب در جدول ۳ قابل‌مشاهده است. طبق نتایج به‌دست آمده، نقاط منتخب سناریوهای یک تا شش به ترتیب حجم رواناب را به میزان ۵۳، ۴، ۶۶، ۷۲، ۳۱ و ۳۴ درصد کاهش داده‌اند. هزینه‌های مربوط به اجرای این سناریوها نیز به‌ترتیب برابر با ۲۲۶/۳، ۰/۸، ۱۵/۴، ۱۲/۲، ۷ و ۷/۱ میلیون دلار تخمین زده شده که چون در سناریوی ۱ مساحت زیادی از منطقه به‌وسیله بام سبز پوشانده شده، هزینه بسیار زیادی داشته است.

سناریوی ۲ کمترین هزینه و کمترین عملکرد را از آن خود کرده است. عملکرد ضعیف سناریوی ۲ می‌تواند ناشی از دو دلیل باشد: ۱) طبق الگوی به‌کار گرفته شده، رواناب به دام افتاده توسط RB به BC تخلیه می‌شود و عملاً در مرحله اول حذف رواناب انجام نمی‌شود چرا که مخازن باران با ذخیره رواناب و استفاده در روزهای خشک باعث کاهش رواناب می‌شوند در حالی که این مسئله در این سناریو رعایت نشده است.

۲) سلول‌های نگهداشت زیستی به‌طور معمول به‌منظور کنترل کیفیت رواناب به کارگرفته می‌شوند و در بارش‌های با دوره بازگشت نسبتاً بالا اثر کاهشی کمتری دارند و از طرفی به‌دلیل محدودیت فضا در منطقه مورد مطالعه امکان استفاده از تعداد زیاد BC وجود نداشته است به‌طوری که تنها حدود ۰/۰۰۱ درصد از سطح منطقه با این نوع LID پوشانده شده است. سناریوی ۳ با کاهش حجم رواناب ۶۶ درصد و متشکل از بام سبز، معابر نفوذپذیر و جوی باغچه یک سناریوی مؤثر به حساب می‌آید و سناریوی ۴

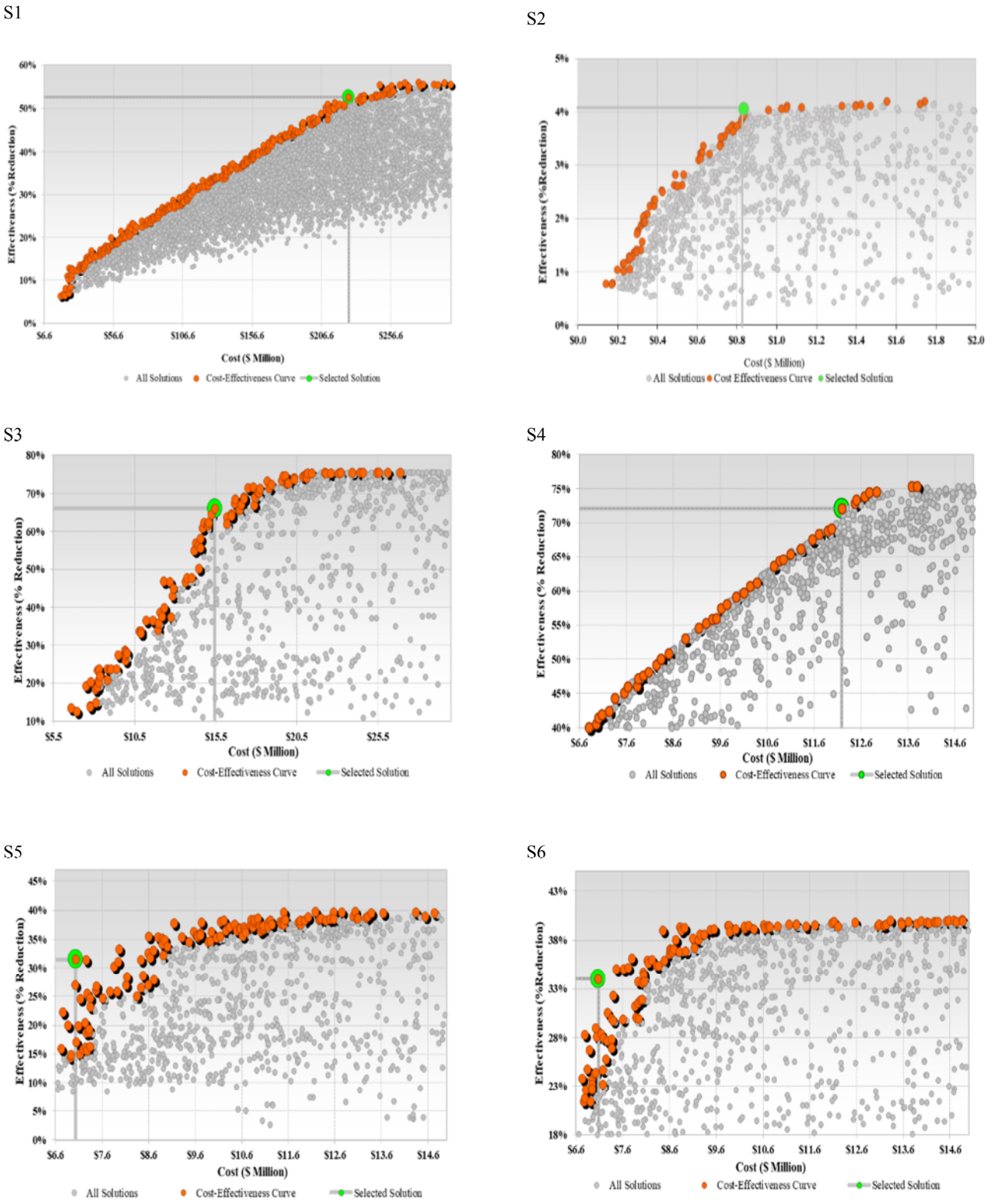

Fig. 7. Cost-Effectiveness curves for scenarios one to six. Grey, orange and green dots illustrate all solutions, non-dominated solutions (optimized) and selected solution, respectively

شکل ۷- منحنی‌های هزینه-عملکرد سناریوهای یک تا شش. نقاط خاکستری کل پاسخ‌ها، نقاط نارنجی پاسخ‌های بهینه و نقطه سبز نشانگر پاسخ بهینه منتخب هستند

dx.doi.org/10.22093/wwj.2021.285296.3138

جدول ۳- جزئیات پاسخ‌های منتخب بهینه از هر سناریو شامل هزینه کل و هزینه BMP، حجم کاهش یافته رواناب، سطح پوشیده شده هر سناریو و هر BMP و تعداد آن

Table 3. Selected optimum solutions specifications and details for each scenario including total cost, BMP implementation cost, runoff volume reduction, total area covered by scenarios, and BMP number of units

Scenario	LID type	Number of units	Area(m^2)	Cost (Th$)	Total surface area (m^2)	Total cost (M$)	Vol. reduction(%)
S1	G.R	12250	1055332	224458	1063902	226.3	53
	B.R	267	6886	1748			
	V.S	124	1382	62			
S2	R.B	1130	0	81	4128	0.8	4
	B.R	85	3038	720			
	V.S	66	736	33			
S3	G.R	160	13378	4374	83444	15.4	66
	P.P	1550	68781	11033			
	V.S	74	825	37			
S4	R.B	1370	0	158	75820	12.2	72
	P.P	1410	75423	12031			
	V.S	16	178	8			
S5	G.R	130	11566	3321	45746	7.0	31
	R.B	2740	0	398			
	B.R	4	93	14			
	P.P	740	32911	3277			
	V.S	42	468	21			
S6	G.R	130	10870	3042	44099	7.1	34
	R.B	2050	0	302			
	B.R	11	321	66			
	P.P	600	31884	3572			
	V.S	20	223	10			
	D.P	1	372	92			

با کاهش ۷۲ درصد بهترین عملکرد را نسبت به بقیه سناریوها داشته است. در سناریوی ۵ تمام LIDهای مناسب بافت منطقه به‌صورت ترکیبی به کار گرفته شده‌اند و نقطه منتخب در این سناریو قادر به کاهش ۳۱ درصد رواناب است و با هزینه ۷ میلیون دلاری بعد از سناریوی ۲ کمترین هزینه را دارد. سناریوی ۶، مشابه سناریوی ۵ بوده و فرض شده در مجاورت خروجی حوضه فضای کافی برای احداث یک حوضچه نفوذ وجود داشته باشد تا رواناب باقیمانده به آنجا منتقل و سپس وارد خروجی حوضه شود. نقطه منتخب این سناریو حجم رواناب را تا ۳۴ درصد کاهش داده که نسبت به سناریوی قبلی عملکرد بهتری داشته است.

یکی از راه‌حل‌هایی که می‌تواند برای مقایسه پاسخ‌های برتر از هر سناریو استفاده شود، نرخ هزینه به عملکرد است. در واقع توسط این روش صرفاً پاسخ‌های برتر (سبز رنگ) با هم مقایسه می‌شود و نه همه سناریوها؛ چراکه در غیر این صورت نیاز به تعریف شاخص‌های مختلف و روش‌های تصمیم گیری چندمعیاره است.

نقاط برتر از سناریوی یک تا شش به‌ترتیب نرخ هزینه به عملکردی برابر با ۴/۳، ۰/۲، ۰/۲۳، ۰/۱۷، ۰/۲۲۵ و ۰/۲۱ داشته‌اند. در نتیجه بهینه‌ترین پاسخ‌ها به‌ترتیب مربوط به S4، S2، S6، S5، S3 و S1 بوده است.

بنابراین پاسخ منتخب سناریوی ۴ با کمترین نرخ هزینه به عملکرد نسبت به سناریوهای دیگر برتر است. نقشه توزیع LIDها در سناریوی برتر، در شکل ۸ نمایش داده شده است. سناریوی ۱ نیز از نظر تحلیل هزینه و کارایی به‌دلیل هزینه بسیار زیاد در رتبه آخر قرار می‌گیرد. نکته قابل‌توجه دیگر این است که S2 اگرچه از

Fig. 8. Map of LID distribution in the selected scenario (scenario 4) in a part of the study area

شکل ۸- نقشه توزیع LIDها در سناریوی برگزیده (سناریو ۴) در قسمتی از منطقه مورد مطالعه

نظر نسبت هزینه به عملکرد رتبه دوم را دارد ولی به دلایلی که ذکر شد نمی‌تواند سناریوی مؤثری باشد چراکه در نهایت قادر به کاهش ۴ درصد از حجم رواناب است که میزان قابل‌توجهی نیست.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش اقدام به ارزیابی هزینه-عملکرد رویکردهای نوین و روش‌های توسعه کم‌اثر در مدیریت کمّی رواناب شهری، ناحیه یک منطقه ۱۱ شهر تهران به‌عنوان منطقه مطالعاتی کرد. بر این اساس شش سناریو متشکل از LIDهایی همچون بام‌سبز، مخازن باران، سلول‌های نگهداشت زیستی، معابر نفوذپذیر، جوی باغچه و حوضچه نفوذ و با تبعیت از یک الگوی فرایند-محور تدوین شدند. شبیه‌سازی بارش-رواناب توسط مدل SWMM انجام و مدل SUSTAIN برای تجزیه‌وتحلیل هزینه و عملکرد سناریوها در تلفیق با مدل SWMM به کار گرفته شد. سپس توسط ماژول بهینه‌سازی موجود در SUSTAIN و الگوریتم NSGA-II منحنی هزینه عملکرد رسم و پاسخ‌های بهینه از هر سناریو استخراج شد. در نهایت پاسخ منتخب از سناریوی ۴ نسبت به راه‌حل‌های متناظر بهینه از سناریوهای دیگر مقرون‌به‌صرفه‌تر ارزیابی شد که قادر به کاهش حجم رواناب تا ۷۲ درصد بوده و تخمین زده می‌شود هزینه‌ای معادل ۱۲/۲ میلیون دلار به‌منظور اجرای آن موردنیاز باشد. با در نظر گرفتن نرخ هزینه به عملکرد سناریوهای ۶، ۵، ۳ و ۱ به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند و سناریوی ۲ به‌طور کلی سناریوی مؤثری ارزیابی نمی‌شود.

مدل SWMM یکی از معتبرترین شبیه‌سازهای فرایندهای هیدرولیکی و هیدرولوژیکی در حوضه‌های شهری بوده و به کارگیری تلفیقی آن با مدل SUSTAIN کمک کرد تا علاوه بر بهینه‌سازی سناریوهای مبتنی بر LID، هزینه و عملکرد هر سناریو مورد ارزیابی و تجزیه‌وتحلیل قرار بگیرد. باتوجه به لزوم به‌کارگیری روش‌های توسعه کم‌اثر در کنترل کمیت و کیفیت رواناب شهری، نتایج به‌دست آمده از این پژوهش می‌تواند در طرح‌های مربوطه کاربرد عملیاتی داشته و تصمیم‌گیرندگان و مدیران شهری را در طراحی، تخمین هزینه‌های اجرایی و عملکرد سناریوها یاری کند. پیشنهاد می‌شود قابلیت این رویکرد در کنترل کمّی و کیفی رواناب در شهرهای دیگر نیز ارزیابی شود و به‌منظور انتخاب پاسخ بهینه از جبهه پارتو، از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه استفاده شود.

۵- قدردانی

به‌این وسیله از همکاری شهرداری منطقه ۱۱ تهران، شرکت‌های مهندسین مشاور و کلیه کارشناسانی که در تهیه اطلاعات موردنیاز این پژوهش مساعدت کردند، تشکر و قدردانی می‌شود.

References

Bahrami, J., Farooghi, F., Hosseini, S. & Rafiee, D. 2017. Effects of low-impact development of infiltration and storage facilities on urban runoff management in city of Sanandaj. *Journal of Water and Wastewater*, 28(5), 118-124. (In Persian)

Behzadi, P. Roozbahani, A. & Massah Bavani, A. 2019. Analysis of sustainability index in stormwater drainage systems under the climate change impacts (case study: district 11 of Tehran). *Ecohydrology*, 6(3), 631-649. (In Persian)

Binesh, N., Niksokhan, M. H. & Sarang, A. 2018. Quantifying resilience of urban drainage systems based on the hydraulic performance assessment. *Journal of Water and Wastewater*, 29(5), 61-71. (In Persian)

Chen, C. F., Sheng, M. Y., Chang, C. L., Kang, S. F. & Lin, J. Y. 2014. Application of the SUSTAIN model to a watershed-scale case for water quality management. *Water*, 6(12), 3575-3589.

De Paola, F., Giugni, M., Pugliese, F. & Romano, P. 2018. Optimal design of lids in urban stormwater systems using a harmony-search decision support system. *Water Resources Management*, 32(15), 4933-4951.

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., et al., 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – the evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525-542.

Gao, J., Wang, R., Huang, J. & Liu, M. 2015. Application of BMP to urban runoff control using SUSTAIN model: case study in an industrial area. *Ecological Modelling*, 318, 177-183.

Ghodsi, S. H., Zahmatkesh, Z., Goharian, E., Kerachian, R. & Zhu, Z. 2020. Optimal design of low impact development practices in response to climate change. *Journal of Hydrology*, 580, 124266.

Jia, H., Yao, H., Tang, Y., Yu, S. L., Field, R. & Tafuri, A. N. 2015. LID-BMPs planning for urban runoff control and the case study in China. *Journal of Environmental Management*, 149, 65-76.

Li, N., Qin, C. & Du, P. 2018. Optimization of China Sponge city design: the case of lincang technology innovation park. *Water*, 10(9), 1189.

Lee, J. G., Selvakumar, A., Alvi, K., Riverson, J., Zhen, J. X., Shoemaker, L., et al., 2012. A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices. *Environmental Modelling and Software*, 37, 6-18.

Mao, X., Jia, H. & Yu, S. L. 2017. Assessing the ecological benefits of aggregate LID-BMPs through modelling. *Ecological Modelling*, 353, 139-149.

Mozaffari, J. & Kobarfard, M. 2017. Investigation of qualitative and quantitative management at urban flood with EPA-SWMM model; case study district 22 of Tehran. *Journal of Iranian Water and Irrigation*, 7(3), 47-59. (In Persian)

Platz, M., Simon, M. & Tryby, M. 2020. Testing of the storm water management model low impact development modules. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 56, 283-296.

Rezazadeh Helmi, N., Verbeiren, B., Mijic, A., Van griensven, A. & Bauwens, W. 2019. Developing a modeling tool to allocate low impact development practices in a cost-optimized method. *Journal of Hydrology*, 573, 98-108.

Roozbahani, A., Behzadi, P. & Massah Bavani, A. 2020. Analysis of performance criteria and sustainability index in urban stormwater systems under the impacts of climate change. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122727.

Rossman, L. A., 2015. *Storm water management model user's manual version 5.1*. EPA- 600/R-14/413b, national risk management research laboratory. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA.

Shariat, R., Roozbahani, A. & Ebrahimian, A. 2018. Risk assessment of the urban runoff collection networks using spatial multi criteria decision making (case study : district 11 of Tehran). *Journal of Water and Wastewater*, 30(1)**,** 1-17. (In Persian)

Shariat, R., Roozbahani, A. & Ebrahimian, A. 2019. Risk analysis of urban stormwater infrastructure systems using fuzzy spatial multi-criteria decision making. *Science of the Total Environment*, 647**,** 1468-1477.

Shoemaker, L., Riverson, J. J., Alvi, Kh., Zhen, J. X., Paul, S., & Rafi, T. 2009. *SUSTAIN- a framework for placement of best management practices urban watersheds to protect water quality*. U.S Environmental Protection Agency (USEPA). Tetra Tech, Fairfax, Virginia, USA.

Tingsanchali, T. 2012. Urban flood disaster management. *Procedia Engineering*, 32**,** 25-37.