



Hydrological Performance of the Infiltration Based Low Impact Development Under Different Design Criteria

Milad Mehri¹ | Seyed Mehdi Hashemi² | Saman Javadi³

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: milad.mehri@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mehdi.hashemy@ut.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: javadis@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 23 September 2023 Received in revised form 6 November 2023 Accepted 5 March 2024 Published online 17 May 2025 Keywords: <i>Bioretention cell</i> <i>Stormwater management</i> <i>SWMM model</i> <i>Urban flood</i> <i>Urban hydrology</i>	Urbanization increases impervious areas and results in more runoff generation. More runoff generation can increase the risk of flooding. Therefore, it becomes necessary to use runoff control measures. Low impact development (LID) methods are among the runoff control measures. The bioretention cell is one of the low impact development methods that has been noticed due to the significant reduction in runoff volume and increase in infiltration. However, the overall performance of the bioretention cell varies in different areas and different designs. In the present study, the performance of bioretention cells was evaluated under different design conditions. Also, the SWMM model was used in the modeling of the study area to evaluate the performance of the bioretention cells. The results of the present study showed that the bioretention cells are capable of reducing flood and increasing infiltration. Bioretention cells reduced the peak discharge by 65 to 25 percent for rainfall with a return period of two to 20 years. The results also showed that by increasing the thickness of the surface layer of the bioretention cell, there would be even more runoff reduction. Increasing the saturated hydraulic conductivity of the soil layer of the bioretention cell also increases the performance of this low impact development method. The present study shows that the use of infiltration based low impact development methods, such as bioretention cell, can help in improving the hydrological conditions of urban areas.

Cite this article: Mehri, M., Hashemi, S. M., & Javadi, S. (2025). Hydrological Performance of the Infiltration Based Low Impact Development Under Different Design Criteria. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (1), 131-145.
DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.360802.1107>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.360802.1107>

Publisher: University of Tehran Press.



عملکرد هیدرولوژیکی توسعه کم‌اثر مبتنی بر نفوذ تحت معیارهای طراحی مختلف

میلاذ مهری^۱ | سیدمهدی هاشمی^۲ | سامان جوادی^۳

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: milad.mehri@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mehdi.hashemy@ut.ac.ir
۳. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: javadis@ut.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
شهرسازی موجب افزایش سطوح نفوذناپذیر و در نتیجه تولید رواناب بیش‌تر می‌شود. تولید رواناب بیش‌تر می‌تواند خطر سیلاب را افزایش دهد. بنابراین استفاده از روش‌های کنترل رواناب ضرورت پیدا می‌کند. روش‌های توسعه کم‌اثر از جمله روش‌های نوین کنترل رواناب است. واحد زیست‌ماند یکی از روش‌های توسعه کم‌اثر است که به دلیل کاهش قابل‌توجه حجم رواناب و افزایش نفوذ موردتوجه قرار گرفته است. با این حال عملکرد جامع واحد زیست‌ماند در مناطق مختلف و برای طراحی‌های مختلف متفاوت است. در پژوهش حاضر عملکرد واحد زیست‌ماند تحت شرایط طراحی مختلف موردارزیابی قرار گرفت. همچنین برای بررسی عملکرد واحد زیست‌ماند از مدل SWMM در مدل‌سازی منطقه مورد مطالعه استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد که واحد زیست‌ماند امکان کاهش سیلاب و افزایش نفوذ را دارد. واحد زیست‌ماند موجب کاهش اوج رواناب خروجی از منطقه به مقدار ۶۵ تا ۲۵ درصد برای بارش با دوره‌های بازگشت دو تا ۲۰ ساله شد. نتایج همچنین نشان داد که با افزایش ضخامت لایه سطحی واحد زیست‌ماند امکان کاهش بیش‌تر رواناب وجود دارد. افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع لایه خاک واحد زیست‌ماند نیز موجب افزایش عملکرد این روش توسعه کم‌اثر می‌شود. پژوهش حاضر نشان می‌دهد به کارگیری روش‌های توسعه کم‌اثر مبتنی بر نفوذ (همچون واحد زیست‌ماند) می‌تواند در بهبود شرایط هیدرولوژیکی مناطق شهری کمک‌کننده باشد.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷ کلیدواژه‌ها: سیلاب شهری مدیریت رواناب واحد زیست‌ماند هیدرولوژی شهری مدل SWMM

استناد: مهری، میلاذ؛ هاشمی، سیدمهدی و جوادی، سامان (۱۴۰۴). عملکرد هیدرولوژیکی توسعه کم‌اثر مبتنی بر نفوذ تحت معیارهای طراحی مختلف. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۵ (۱)، ۱۳۱-۱۴۵. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.360802.1107>



۱. مقدمه

شهرسازی تأثیر نامطلوبی بر فرایندهای هیدرولوژیکی شهری مانند تسریع سرعت جریان رواناب و افزایش دبی اوج دارد، بنابراین موجب افزایش خطر سیلاب شهری می‌شود (Chen et al., 2015). سیلاب شهری از نظر تعداد تلفات جانی و خسارت به اموال، زیرساخت‌های عمومی و منابع طبیعی یک خطر طبیعی است و مدت زمان طولانی است که مکرراً اتفاق می‌افتد بدون این که مشکل آن کاملاً حل شود (Shuster et al., 2005; Luo et al., 2022). تأثیر شهرسازی و در نتیجه افزایش سطوح نفوذناپذیر بر روی تغییرات خطر سیلاب شهری در تورنتو، کانادا نشان داد که شهرسازی باعث ایجاد رواناب سطحی و میزان دبی رودخانه زیادتر و زمان‌های کوتاه‌تر برای رسیدن دبی اوج رواناب می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که مناطق تحت تأثیر سیلاب ناگهانی و افزایش دشت سیلابی ناشی از شهرسازی نه تنها به درصد سطح نفوذناپذیر بلکه به توزیع مکانی پوشش سطحی نفوذناپذیر نیز بستگی دارد. سیلاب در زمین‌هایی با تغییرات مکانی سطوح نفوذناپذیر در مقایسه با توزیع یکنواخت این سطوح به شدت تشدید می‌شود (Feng et al., 2021).

برای کاهش اثرات شهرسازی، توسعه روش‌های مدیریت رواناب ضروری است. یکی از روش‌های نوظهور مدیریت رواناب شهری، روش‌های توسعه کم‌اثر (LID) می‌باشد. روش‌های LID در کنترل رواناب از روش‌های توزیع‌شده (اغلب زیرساخت‌های سبز) استفاده می‌کند تا هیدرولوژی حوضه‌های شهری را به شرایط قبل از توسعه شهری نزدیک کند (Eckart et al., 2017; Zhu et al., 2019). بررسی عملکرد روش‌های LID در حوضه آبریز شهری استان گوانگدونگ^۱، چین نشان داد که روش‌های LID می‌توانند به طور مؤثر حجم رواناب وقایع بارندگی کوچک و متوسط را کاهش دهند و حداکثر نرخ کاهش رواناب نیز ۹۴/۴ درصد بود. برای عملیات طولانی‌مدت، LID می‌تواند ۵۲/۹ درصد از حجم بارندگی سالانه را بگیرد و رواناب سالانه را تا ۲۸/۰ درصد کاهش دهد (Yin et al., 2020). پژوهش دیگری در حوضه متراکم شهری در هنگ کنگ نشان داد که به کارگیری روش‌های LID می‌تواند مقدار کل و اوج رواناب را حدود ۳۵ تا ۴۵ درصد برای بارش با دوره بازگشت‌های دو، ۱۰ و ۵۰ ساله کاهش دهد. با این حال، روش‌های LID ممکن است به تنهایی برای مدیریت رواناب در مناطق متراکم ساخته‌شده هنگ کنگ کافی نباشد (Zhuang et al., 2023). در تیانجین^۲، شمال چین نشان داده شد که انتخاب طرح LID و موقعیت قرارگیری آن در حوضه مهم‌ترین عمل در به کارگیری روش‌های LID است. پژوهش انجام‌شده در تیانجین نشان داد که طرح‌های بهینه‌سازی LID می‌تواند ضریب رواناب سطحی را از ۰/۷ به حدود ۰/۵ کاهش دهد (Yang et al., 2023).

واحد زیست‌ماند (BRC)^۳ یکی از مهم‌ترین روش‌های LID است که توانایی کاهش حجم رواناب، به حداقل رساندن جریان‌های اوج، تغذیه مجدد آب زیرزمینی، افزایش تبخیر و تعرق و کاهش جرم آلاینده‌های ورودی به آب‌های سطحی و زیرزمینی را دارد (Hunt et al., 2008; Yang & Chui, 2018). Davis (2008) جریان ورودی و خروجی از دو واحد زیست‌ماند ساخته‌شده در محوطه دانشگاه مرلند^۴ را به مدت نزدیک به دو سال تحت بررسی قرارداد که ۴۹ واقعه رواناب در آن به وقوع پیوست. به طور کلی، نتایج پژوهش Davis (2008) نشان داد که واحد زیست‌ماند می‌تواند برای به حداقل رساندن اثرات هیدرولوژیکی توسعه شهری مؤثر باشد. ۱۸ درصد از وقایع رواناب به اندازه کافی کوچک بودند که واحد زیست‌ماند کل حجم جریان ورودی را نگهدارد و هیچ جریان خروجی ایجاد نکند. همچنین میانگین کاهش دبی اوج ۴۹ و ۵۸ درصد برای دو واحد زیست‌ماند یادشده مشاهده شد. DeBusk and Wynn (2011) یک واحد زیست‌ماند که در بلکسبورگ، ویرجینیا برای جمع‌آوری رواناب یک پارکینگ نصب شده بود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که واحد زیست‌ماند با موفقیت حجم جریان و اوج جریان خروجی از پارکینگ را به ترتیب ۹۷ و ۹۹ درصد کاهش داده است. Willard et al. (2017) به مطالعه عملکرد واحدهای زیست‌ماند در بلاکسبورگ، ویرجینیا پس از هفت

سال کارکرد آن واحدهای زیست‌ماند پرداختند. نتایج نشان داد برای رگبارهایی که رواناب خروجی از واحدهای زیست‌ماند تولید کردند در ابتدای این دوره هفت ساله ۹۱ درصد کاهش در اوج جریان و ۹۸ درصد کاهش در حجم جریان ناشی از واحدهای زیست‌ماند به وجود آمد و پس از هفت سال ۸۲ درصد کاهش در اوج جریان و ۸۴ درصد کاهش در حجم جریان ناشی از همان واحدهای زیست‌ماند وجود داشت. این نتایج نشان داد که واحدهای زیست‌ماند در کاهش جریان ناشی از رگبارها پس از هفت سال هنوز مؤثر باقی مانده است. *de Macedo et al.* (2019) رفتار یک واحد زیست‌ماند را در سائو کارلوس برزیل، در طی دوره خشک که در دسترس بودن آب در این دوره حیاتی است، ارزیابی کردند. نتایج به دست آمده متوسط راندمان نگهداشت رواناب ۷۰ درصد را برای واحد زیست‌ماند نشان داد. با در نظر گرفتن تنها جنبه‌های در دسترس بودن آب، پتانسل رواناب ذخیره شده توسط واحد زیست‌ماند می‌تواند برای اهداف غیر شرب دوباره مورد استفاده قرار گیرد و تقاضای آب در حوضه آبریز را حداقل در طول فصل خشک به نصف کاهش دهد.

بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان داد که روش توسعه کم‌اثر واحد زیست‌ماند عملکرد قابل قبولی در کنترل رواناب حوضه‌های شهری دارد. همچنین باید گفت که واحد زیست‌ماند از جمله روش‌های توسعه کم‌اثر مبتنی بر نفوذ است که با نگهداشت رواناب و ایجاد نفوذ حتی امکان تغذیه آب‌های زیرزمینی را نیز دارد. عملکرد روش‌های LID مبتنی بر نفوذ بسیار به شرایط مکانی و شرایط طراحی این روش‌ها وابسته می‌باشد. به این دلیل دامنه عملکرد برای روش‌های LID مبتنی بر نفوذ بسیار زیاد است (Eckart et al., 2017). در همین راستا برای تکمیل خلأ مطالعاتی، پژوهش حاضر اقدام به بررسی جامعی از عملکرد واحد زیست‌ماند کرده است. در پژوهش حاضر عملکرد هیدرولوژیکی واحد زیست‌ماند تحت شرایط طراحی مختلف برای لایه‌های واحد زیست‌ماند، مورد بررسی قرار گرفت. در همین راستا، از مدل مدیریت رواناب سطحی SWMM^۱ برای بررسی عملکرد LID مورد نظر استفاده شد. همچنین منطقه مورد مطالعه پژوهش حاضر بخشی از منطقه ۱۳ از شهرداری شهر تهران در نظر گرفته شد. عملکرد واحد زیست‌ماند در پژوهش حاضر به طور خلاصه در بخش‌های زیر مورد بررسی قرار گرفت؛ ۱- ارزیابی عملکرد واحد زیست‌ماند در افزایش حجم نفوذ و کاهش حجم رواناب خروجی از حوضه مورد مطالعه، ۲- ارزیابی عملکرد واحد زیست‌ماند در کاهش و تأخیر دبی اوج رواناب خروجی از حوضه، ۳- ارزیابی عملکرد واحد زیست‌ماند در کاهش حجم سیلاب و نقاط سیلابی، ۴- ارزیابی گسترده واحدهای زیست‌ماند قرار داده شده در منطقه از لحاظ کاهش رواناب و افزایش نفوذ در هر کدام از این واحدهای زیست‌ماند و استخراج مساحت بهینه زهکشی شده به هر واحد زیست‌ماند و ۵- ارزیابی تأثیر تغییرات در مشخصات فنی لایه سطحی و لایه خاک واحد زیست‌ماند در عملکرد هیدرولوژیکی این روش توسعه کم‌اثر.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه پژوهش حاضر منطقه‌ای است به حدود مساحت ۶۵ هکتار که در شرق منطقه ۱۳ از مناطق شهرداری تهران قرار گرفته است. این منطقه دارای بافت شهری بسیار متراکم است و کاربری زمین آن به طور عمده مسکونی و تجاری می‌باشد. از دلایل انتخاب این منطقه می‌توان به وقوع آب‌گرفتگی‌های مکرر پس از هر بارش اشاره کرد که نارضایتی شهروندان را در این منطقه موجب شده است. همچنین وجود بافت متراکم شهری که موجب تولید رواناب زیادتری می‌شد، این امکان را می‌داد که عملکرد به کارگیری روش‌های توسعه کم‌اثر بیشتر مورد توجه باشد. شکل (۱) منطقه مورد مطالعه و توزیع شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی شهری در مدل SWMM را نشان می‌دهد.

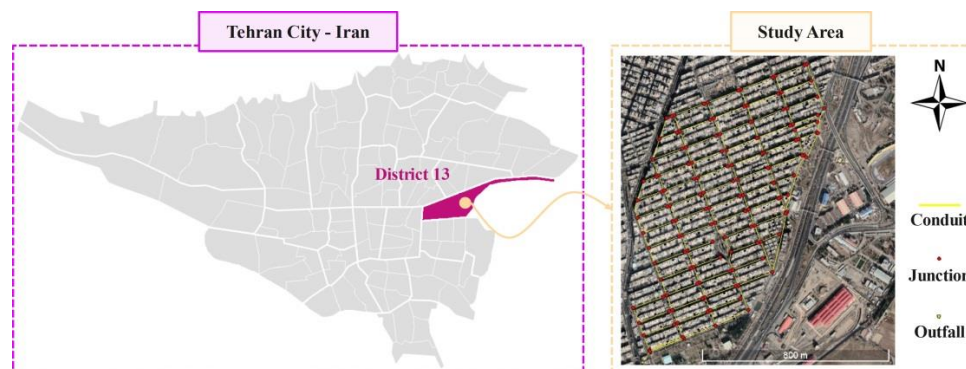


Figure 1. Study area and the developed SWMM model for stormwater collection system in the study area

۲.۲. محاسبات رواناب سطحی

مراحل انجام پژوهش حاضر در فلوچارت نشان داده شده در شکل (۲) قابل مشاهده است. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، از مدل SWMM در مدل‌سازی رواناب سطحی منطقه مورد مطالعه استفاده شد. SWMM یک مدل بارش-رواناب برای مدل‌سازی اجزای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی حوضه آبریز (به ویژه حوضه‌های شهری) است. این مدل همچنین توانایی مدل‌سازی روش‌های مختلف LID در حوضه‌های شهری را دارد و تجزیه و تحلیل پاسخ حوضه برای سناریوهای مختلف وقایع بارندگی را انجام می‌دهد (Swathi et al., 2018). در پژوهش حاضر، در راستای ارزیابی عملکرد هیدرولوژیکی به کارگیری واحد زیست‌ماند در منطقه مورد مطالعه، حوضه منطقه مورد مطالعه به ۲۳۵ زیرحوضه تقسیم شد.

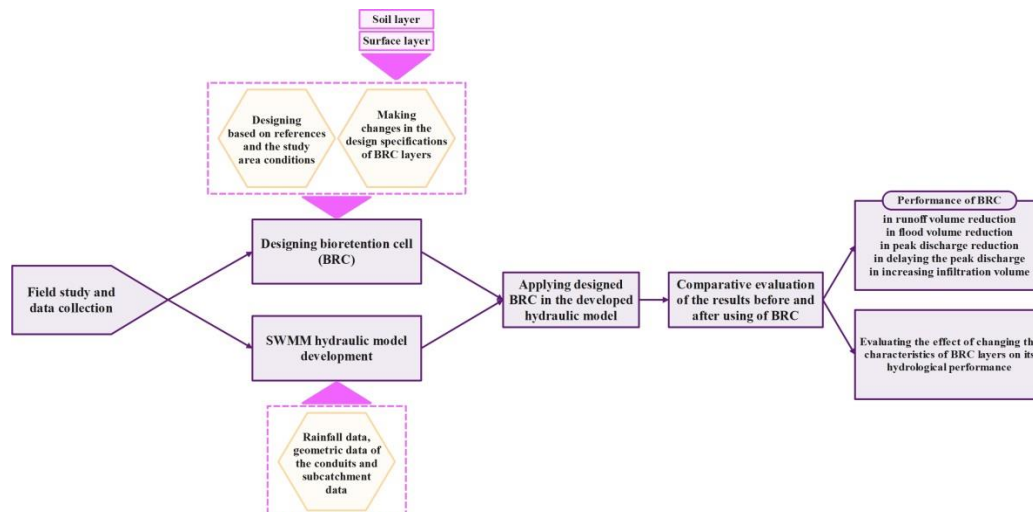


Figure 2. Flowchart of the present study

بیان آب سطحی در SWMM با در نظر گرفتن هر زیرحوضه به عنوان یک مخزن غیر خطی ایجاد می‌شود، که در آن تغییر در عمق جریان سطحی با توجه به زمان فقط تفاوت بین ورودی بارندگی و مجموع تلفات تبخیر، نفوذ و جریان رواناب است که با استفاده از معادله مانینگ و به صورت تابعی از عمق محاسبه می‌شود. در هر زیرحوضه تعریف شده در SWMM برای محاسبه رواناب سطحی، زیرحوضه‌ها به عنوان یک کانال مستطیلی در نظر گرفته می‌شوند، به طوری که عرض زیرحوضه برابر عرض کانال مورد نظر خواهد بود. به این ترتیب با در نظر گرفتن زیرحوضه به عنوان یک کانال

مستطیلی هم‌عرض با زیرحوضه، SWMM از معادله مانینگ برای محاسبه دبی رواناب زیرحوضه استفاده می‌کند. معادله مانینگ استفاده‌شده در مدل SWMM به صورت زیر می‌باشد (Rossman & Huber, 2016a):

$$Q = \frac{1}{n} S^{\frac{1}{2}} R^{\frac{2}{3}} A \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این معادله، ضریب n عبارت است از زبری سطح زیرحوضه و S شیب متوسط زیرحوضه است (m/m)، A مقطعی است مستطیلی شکل که به عنوان مقطع یک کانال مستطیلی با عرض W (یعنی عرض زیرحوضه) و ارتفاع d (که نماینده مقدار آب قابل جاری شدن در داخل زیرحوضه است) عمل می‌کند. R نیز شعاع هیدرولیکی مقطع A خواهد بود (A و R به ترتیب بر حسب مترمربع و متر هستند). همچنین پارامترهای n و S و W به عنوان مقادیر ورودی برای زیرحوضه‌ها در SWMM وارد می‌شوند و مقدار d نیز در نتیجه مدل‌سازی بارش-رواناب در هر زیرحوضه محاسبه می‌شود. بارش‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل بارش‌های شش ساعته با دوره‌های بازگشت دو، پنج، ۱۰ و ۲۰ ساله بود که هایتوگراف‌های این بارش‌ها در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. همچنین باید گفت که این بارش‌ها از منحنی‌های شدت-مدت-فرآوانی (IDF)^۷ منطقه مورد مطالعه پژوهش حاضر با استفاده از روش بلوک‌های متناوب استخراج شدند. مقادیر تجمعی عمق بارش‌ها برای بارش با دوره‌های بازگشت دو، پنج، ۱۰ و ۲۰ ساله به ترتیب برابر ۱۷/۱۴، ۲۱/۹۲، ۲۵/۵۹ و ۲۷/۶۸ میلی‌متر بود.

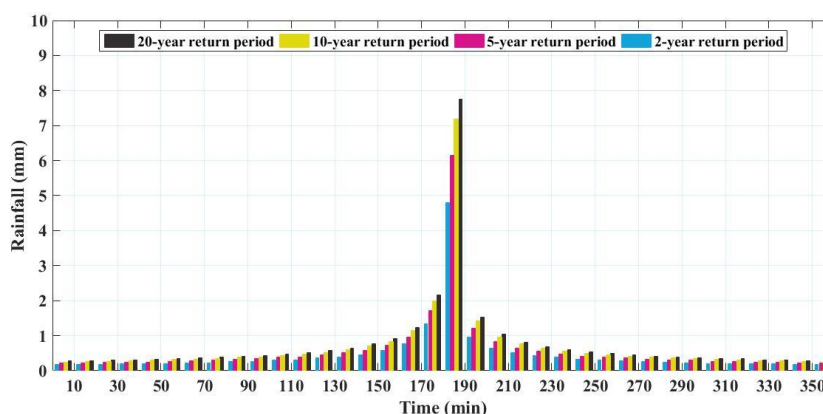


Figure 3. Rainfall hyetographs used in the present study

۳.۲. به کارگیری روش توسعه کم‌اثر مبتنی بر نفوذ واحد زیست‌ماند

یک واحد زیست‌ماند از نظر مفهومی از چندین لایه افقی تشکیل شده است. در ساده‌ترین حالت واحد زیست‌ماند شامل سه لایه افقی است که بر روی خاک‌های طبیعی منطقه قرار می‌گیرد. این سه لایه شامل لایه سطحی، لایه خاک و لایه ذخیره‌سازی است (شکل ۴) (Rossman & Huber, 2016b). لایه سطحی محل رشد گیاهان و همچنین محل تجمع رواناب گرفته‌شده از مناطق زهکشی‌شده به واحد زیست‌ماند است. مشخصات لایه خاک نیز به گونه‌ای انتخاب می‌شود که علاوه بر حمایت از پوشش گیاهی موجود در داخل واحد زیست‌ماند، باید بتواند رواناب جمع‌آوری‌شده در لایه سطحی را در کم‌ترین زمان ممکن در خود نفوذ دهد. آخرین لایه از لایه‌های واحد زیست‌ماند، لایه ذخیره‌سازی است که در تماس با خاک‌های طبیعی منطقه خواهد بود. این لایه با هدف تأمین فضای ذخیره‌سازی بیش‌تر برای رواناب ورودی به واحد زیست‌ماند به کار گرفته می‌شود (Hoffmann et al., 2020). در پژوهش حاضر طراحی لایه ذخیره‌سازی به صورتی بود که این لایه توانایی ذخیره‌کردن رواناب ناشی از بارش با دوره بازگشت دو ساله را داشت. شکل (۴) واحد زیست‌ماند به کار گرفته‌شده در پژوهش حاضر به همراه پارامترهای طراحی آن و همچنین جریان‌های ورودی و خروجی آن را نشان

می‌دهد. همچنین باید بیان کرد که پارامترهای طراحی براساس منابع و شرایط محیطی منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند. در پژوهش حاضر با توجه به محدودیت مکانی موجود در منطقه، ۴/۱۵ درصد از سطوح مؤثر در تولید رواناب در منطقه مورد مطالعه با واحد زیست‌ماند جای‌گذاری شد. همچنین واحدهای زیست‌ماند در دو طرف تمام خیابان‌های منطقه قرار گرفتند و در خیابان‌های فرعی (کم‌عرض) این واحدهای زیست‌ماند رواناب ناشی از ساختمان‌های دو طرف خیابان را جمع‌آوری می‌کرد و در خیابان‌های اصلی (عریض) رواناب ناشی از همان خیابان‌ها را جمع‌آوری می‌کرد. در مجموع ۱۷۰ واحد زیست‌ماند در منطقه مورد مطالعه به کار گرفته شد.

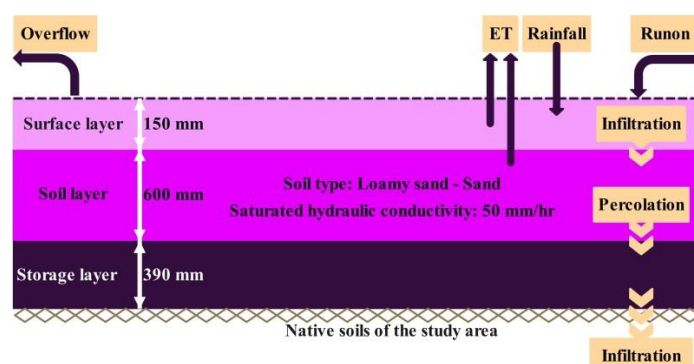


Figure 4. The bioretention cell used in the present study (PWD, 2014; Hoffmann *et al.*, 2020)

در پژوهش حاضر همچنین تأثیر هیدرولوژیکی ناشی از تغییرات در لایه‌های واحد زیست‌ماند نیز مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات در ضخامت لایه سطحی و تغییرات در هدایت هیدرولیکی اشباع لایه خاک دو موردی بود که در بررسی تغییرات لایه‌ها مورد نظر قرار گرفت. تغییر ضخامت لایه سطحی در بازه صفر تا ۴۵۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت و تغییر هدایت هیدرولیکی اشباع لایه خاک در بازه یک تا ۱۲۰ میلی‌متر بر ساعت مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان گشت ابتدا مشخصات لایه‌های واحد زیست‌ماند براساس منابع و شرایط منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. سپس تأثیر هیدرولوژیکی ناشی از تغییر در ضخامت لایه سطحی واحد زیست‌ماند (از صفر تا ۴۵۰ میلی‌متر)، با ثابت نگه‌داشتن سایر مشخصات انتخابی واحد زیست‌ماند مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تأثیر هیدرولوژیکی ناشی از تغییر در هدایت هیدرولیکی اشباع لایه خاک نیز به همین روش بررسی شد. همچنین باید بیان کرد که مقادیر تغییرات صفر تا ۴۵۰ میلی‌متر ضخامت لایه سطحی و یک تا ۱۲۰ میلی‌متر بر ساعت هدایت هیدرولیکی اشباع لایه خاک براساس مقادیر حداقل موجود و همچنین منابع انتخاب شد (PWD, 2014; Hoffmann *et al.*, 2020).

۳. نتایج و بحث

۳.۱. عملکرد واحد زیست‌ماند در کنترل رواناب و افزایش نفوذ کل حوضه آبریز

عملکرد هیدرولوژیکی به‌کارگیری واحدهای زیست‌ماند در منطقه مورد مطالعه در جدول (۱) و شکل (۵) قابل مشاهده است. همان‌طور که در جدول (۱) بیان شده است، حجم رواناب خروجی از حوضه برای شرایط قبل به‌کارگیری واحدهای زیست‌ماند برابر ۴۳۷۲ تا ۶۶۱۴ مترمکعب به‌ترتیب برای بارش با دوره‌های بازگشت دو تا ۲۰ ساله بود. پس از به‌کارگیری واحدهای زیست‌ماند حجم رواناب خروجی از حوضه کاهش ۷۵ تا ۶۴ درصدی را به‌ترتیب برای بارش با دوره‌های بازگشت دو تا ۲۰ ساله نشان داد. این نتیجه نشان‌دهنده کاهش عملکرد واحد زیست‌ماند با افزایش دوره بازگشت بارش

بود. همچنین همان‌طور که در شکل (A-۵) نشان داده شده است، به‌کارگیری واحدهای زیست‌ماند موجب کاهش قابل‌توجه حجم سیلاب (رواناب مازاد بر سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی) منطقه مورد مطالعه شد. به‌کارگیری واحدهای زیست‌ماند موجب حذف کامل سیلاب برای بارش با دوره‌های بازگشت دو و پنج ساله شد. برای بارش با دوره‌های بازگشت ۱۰ و ۲۰ ساله نیز حجم سیلاب به‌ترتیب از ۲۶۴۶ و ۳۰۳۲ مترمکعب به ۸۷ و ۲۲۶ مترمکعب کاهش یافت. همچنین با توجه به جدول (۱) برای هر دو بارش ۱۰ و ۲۰ ساله بعد از به‌کارگیری واحد زیست‌ماند تنها سه گره سیلابی در منطقه مورد مطالعه باقی ماند.

Table 1. The hydrological impact of bioretention cell on catchment area

Scenario	Return period (year)	Runoff volume (m ³)	Infiltration volume (m ³)	Flooded node (No.)	Peak time (min)
Before applying bioretention	2	4372	438.6	14	204.5
	5	5439	561.7	36	203.3
	10	6201	656.6	57	202.5
	20	6614	710.5	68	201.7
After applying bioretention	2	1064	1939.4	0	219.7
	5	1578	3062.4	0	216.7
	10	2126	3786.2	3	216.7
	20	2379	4198.5	3	214.7

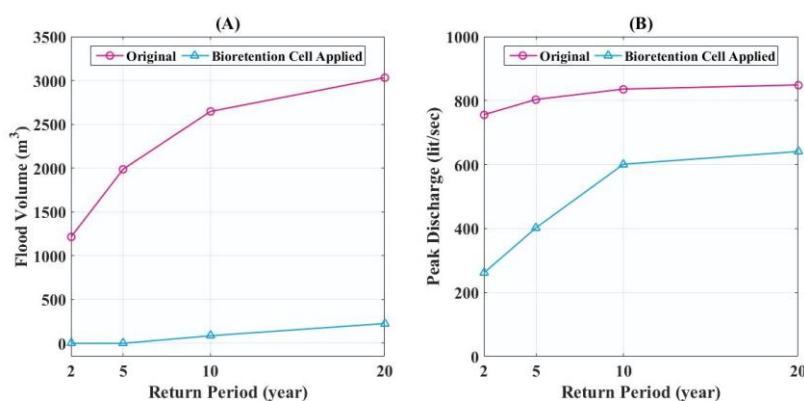


Figure 5. The hydrological impact of bioretention cell on flood volume and peak discharge

نتیجه نگهداشت رواناب و سیلاب توسط واحد زیست‌ماند می‌تواند افزایش مقدار نفوذ باشد. مقدار نفوذ از دیگر پارامترهای مورد بررسی در کل حوضه مورد مطالعه بود. همان‌طور که در جدول (۱) قابل مشاهده است به‌کارگیری واحد زیست‌ماند موجب افزایش حجم نفوذ ۱۵۰۰ تا ۳۴۸۸ مترمکعبی در منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب برای بارش با دوره‌های بازگشت دو تا ۲۰ ساله شد. این نتیجه نشان داد که با افزایش دوره بازگشت بارش و در نتیجه افزایش عمق بارش، مقدار افزایش نفوذ روند صعودی دارد.

از جمله مؤلفه‌های رواناب خروجی از منطقه مورد مطالعه جریان اوج است که در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفت. مقدار کاهش در اوج رواناب خروجی از حوضه منطقه مورد مطالعه پس از به‌کارگیری واحد زیست‌ماند در شکل (B-۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نیز قابل مشاهده است، واحد زیست‌ماند موجب کاهش ۶۵ تا ۲۵ درصدی اوج رواناب خروجی از حوضه به‌ترتیب برای بارش با دوره‌های بازگشت دو تا ۲۰ ساله شد. این نتیجه نشان‌دهنده روند کاهشی عملکرد واحد زیست‌ماند در کاهش اوج رواناب با بزرگ‌تر شدن بارش می‌باشد. همان‌طور که در جدول (۱) قابل مشاهده است زمان رسیدن دبی اوج نیز پس از به‌کارگیری واحد زیست‌ماند دچار تأخیر شد. همانند اوج رواناب، تأخیر در دبی اوج نیز با افزایش دوره

بازگشت روند نزولی داشت. در پژوهش دیگری نیز این روندهای نزولی در کاهش و تأخیر دبی اوج مشاهده شد. در پژوهش که Huang et al. (2018) در تایوان انجام دادند نشان دادند که برای بارش با دوره‌های بازگشت دو تا ۲۰۰ ساله، واحد زیست‌ماند می‌تواند موجب کاهش دبی اوج ۲۹/۸ تا ۵/۸ درصدی شود. این روند نزولی عملکرد واحد زیست‌ماند با افزایش دوره بازگشت بارش در پژوهش حاضر نیز مشاهده شد. Huang et al. (2018) همچنین همانند پژوهش حاضر نشان دادند که واحد زیست‌ماند در تأخیر دبی اوج نیز با بزرگ‌تر شدن بارش عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهد.

مطالعات دیگری نیز در ارزیابی عملکرد واحد زیست‌ماند در شهر تهران صورت گرفته است. مطالعه‌ای در محدوده شهری متراکم شهر تهران توسط Mani et al. (2019) انجام شد. آن‌ها از دو روش توسعه کم‌اثر روسازی متخلخل و واحد زیست‌ماند در منطقه مورد مطالعه خود استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که به‌کارگیری همزمان این دو روش توسعه کم‌اثر می‌تواند موجب کاهش ۲۰/۸ درصدی حجم رواناب برای بارش با دوره بازگشت ۲۵ ساله گردد. از جمله دلایلی که سبب کم‌بودن نتیجه Mani et al. (2019) نسبت به پژوهش حاضر بود، انتخاب بارش بزرگ‌تر برای پژوهش آن‌ها بود. همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد عملکرد کاهش رواناب ناشی از به‌کارگیری روش‌هایی توسعه کم‌اثر (واحد زیست‌ماند) با بزرگ‌تر شدن بارش روند نزولی دارد. تفاوت نتایج پژوهش Mani et al. (2019) و مطالعه حاضر همچنین می‌تواند ناشی از فشرده‌تر بودن پوشش گیاهی لایه سطحی واحد زیست‌ماند آن‌ها نسبت به پژوهش حاضر باشد. فشرده‌تر بودن پوشش گیاهی لایه سطحی می‌تواند موجب کاهش حجم در دسترس برای لایه سطحی شود. همچنین باید توجه داشت که در مطالعه حاضر و پژوهش Mani et al. (2019) ضخامت لایه سطحی یکسان بوده و برابر ۱۵۰ میلی‌متر بود.

در پژوهشی دیگر، Movahedinia et al. (2019) نیز واحد زیست‌ماند را در شرق شهر تهران بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد واحد زیست‌ماند موجب حذف کامل سیلاب برای بارش با دوره بازگشت دو ساله می‌شود. با این حال، واحد زیست‌ماند در بارش با دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ ساله عملکرد ضعیف‌تری داشت و به‌ترتیب موجب کاهش سیلاب ۷۴ و ۵۲ درصد شد. با این وجود در پژوهش حاضر با به‌کارگیری واحد زیست‌ماند سیلاب برای بارش با دوره بازگشت‌های دو و پنج ساله کاملاً حذف شد و در بارش با دوره بازگشت ۱۰ ساله نیز سیلاب بیش از ۹۰ درصد کاهش داشت. لایه خاک در واحد زیست‌ماند پژوهش Movahedinia et al. (2019) دارای هدایت هیدرولیکی اشباع کم‌تری نسبت به پژوهش حاضر بود. این تفاوت نشان‌دهنده اهمیت طراحی مناسب واحد زیست‌ماند براساس نوع خاک‌های زیرین منطقه مورد مطالعه است. در مدل‌سازی واحد زیست‌ماند پژوهش حاضر مشخصات لایه خاک واحد زیست‌ماند با توجه به نوع خاک‌های زیرین منطقه (شنی و ماسه‌ای) انتخاب شد و همچنین از هدایت هیدرولیکی اشباع بالایی برخوردار بود.

۲.۳. بررسی تأثیر هیدرولوژیکی مقدار مساحت زهکشی شده به هر یک از واحدهای زیست‌ماند

همان‌طور که قبلاً گفته شد در پژوهش حاضر ۱۷۰ واحد زیست‌ماند در دو طرف خیابان‌های منطقه مورد مطالعه قرار گرفت. به هر یک از واحدهای زیست‌ماند یک زیرحوضه متصل بود و رواناب تولیدشده در هر زیرحوضه به واحد زیست‌ماند مختص همان زیرحوضه منتقل می‌شد. سپس واحد زیست‌ماند تمام یا قسمتی از این رواناب را در خود نگهداشته و در مدت زمانی مناسب این رواناب نگهداشته شده در خاک‌های طبیعی منطقه نفوذ می‌کرد. شکل (۶) عملکرد کاهش رواناب در هر یک از واحدهای زیست‌ماند را نشان می‌دهد. محور عمودی این شکل درصد کاهش رواناب ورودی به هر یک از ۱۷۰ واحد زیست‌ماند در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. محور افقی نیز نسبت مساحت زیرحوضه به مساحت واحد زیست‌ماند مختص خود آن زیرحوضه را نشان می‌دهد. هرچه مقدار در محور افقی بیش‌تر باشد نشان‌دهنده ورود رواناب بیش‌تری به واحد زیست‌ماند موردنظر است. همان‌طور که از شکل (۶-A) قابل مشاهده است برای بارش با

دوره بازگشت دو ساله، واحد زیست‌ماند ۱۰۰ درصد رواناب تولیدی از زیرحوضه‌هایی که تا حدود ۲۲ برابر بزرگ‌تر از واحد زیست‌ماند مختص خود بودند را نگهداشت. با بزرگ‌تر شدن زیرحوضه‌هایی که به واحد زیست‌ماند مختص خود زهکشی می‌شدند (نسبت مساحت بیش‌تر از ۲۲ برابر)، عملکرد نگهداشت رواناب در واحدهای زیست‌ماند کاهش یافت و بنابراین روند نزولی نمودارها ایجاد شد. مقدار بهینه نسبت مساحت زیرحوضه به مساحت واحد زیست‌ماند در بارش با دوره بازگشت دو ساله برابر ۲۲ بود و این نقطه بیش‌ترین مساحت زیرحوضه‌ای است که می‌تواند به واحد زیست‌ماند متصل شود بدون این‌که عملکرد نگهداشت رواناب واحد زیست‌ماند کاهش یابد. این نقاط بهینه برای بارش با دوره‌های بازگشت پنج، ۱۰ و ۲۰ ساله به‌ترتیب برابر حدود ۱۷/۵، ۱۵ و ۱۴ بود.

همان‌طور که گفته شد در قسمت افقی نمودارها (قبل نقطه بهینه) تمامی رواناب‌های ورودی به واحد زیست‌ماند نگهداشته می‌شوند. بعد از نقطه بهینه عملکرد واحد زیست‌ماند به‌دلیل افزایش ورودی رواناب با افزایش مساحت زهکشی‌شده، شروع به کاهش کرد. پژوهش‌های گذشته همانند Davis (2008) و Davis *et al.* (2012) نیز نشان داده‌اند که واحدهای زیست‌ماند مشابه پژوهش حاضر تا یک اندازه معین از رواناب را در خود نگه می‌دارند و رواناب‌های بزرگ‌تر موجب سرریز کردن واحد زیست‌ماند خواهند شد.

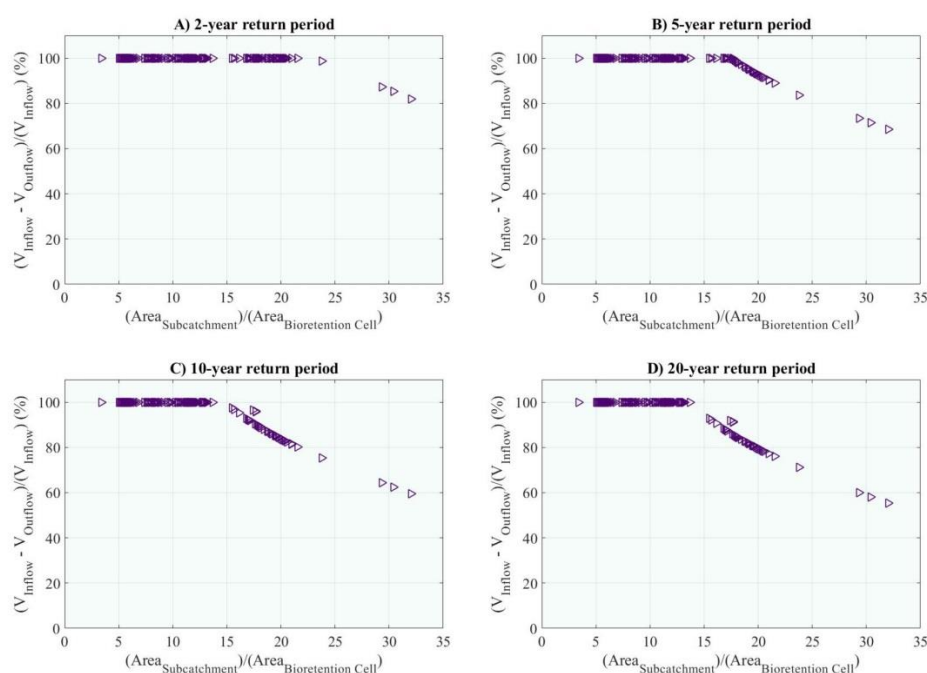


Figure 6. Bioretention cell runoff reduction performance change due to the change in the subcatchment area which is draining to the bioretention cell (V stands for volume)

شکل (۷) نیز ساختاری همانند شکل (۶) دارد. با این تفاوت که محور عمودی نشان‌دهنده درصد تبدیل رواناب ورودی واحد زیست‌ماند به نفوذ است. مطابق این شکل زمانی مقدار نفوذ در هر یک از واحدهای زیست‌ماند حداکثر است که نسبت مساحت زیرحوضه به مساحت واحد زیست‌ماند برابر حدود ۲۴، ۱۷/۵، ۱۶ و ۱۴ به‌ترتیب برای بارش با دوره‌های بازگشت دو، پنج، ۱۰ و ۲۰ ساله باشد. این نقاط بیانگر نقاط بهینه‌ای است که مقدار نفوذ در هر یک از واحدهای زیست‌ماند به حداکثر خود نزدیک می‌شود.

همان‌طور که در نمودارهای شکل (۷) مشاهده می‌شود، این نمودارها از دو قسمت صعودی و نزولی تشکیل شده‌اند. نقاط حداکثر این نمودارها همان نقاط بهینه از نظر مقدار نفوذ هستند و واحد زیست‌ماند در این نقاط بیش‌ترین نفوذ را ایجاد می‌کند. اما در قسمت صعودی نمودار که قبل از نقطه بهینه قرار دارد با افزایش مساحت زهکشی شده به واحد زیست‌ماند و در نتیجه افزایش رواناب ورودی به آن، سهم تبخیر از رواناب جمع‌آوری شده در داخل واحد زیست‌ماند کاهش می‌یابد و این روند تا نقطه بهینه ادامه می‌یابد. بعد از نقطه بهینه با توجه به این که رواناب ورودی افزایش می‌یابد، ظرفیت واحد زیست‌ماند پر شده و مازاد رواناب از واحد زیست‌ماند خارج می‌شود و به نفوذ تبدیل نمی‌گردد. هرچه رواناب بیش‌تری به صورت مازاد از واحد زیست‌ماند خارج شود سهم نفوذ از رواناب ورودی کم‌تر خواهد بود که موجب روند نزولی نمودارها بعد از نقطه بهینه (حداکثر نفوذ) می‌شود.

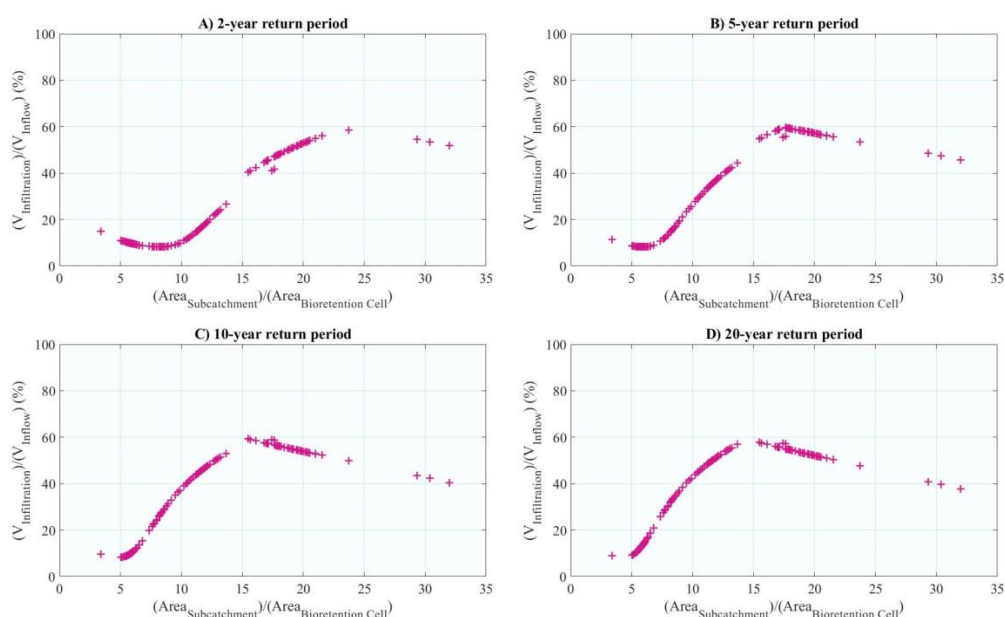


Figure 7. Bioretention cell infiltration performance change due to the change in the subcatchment area which is draining to the bioretention cell (V stands for volume)

۳.۳. تأثیر مشخصات فنی لایه‌های واحد زیست‌ماند بر عملکرد هیدرولوژیکی آن

شکل (۸) تأثیر تغییر ضخامت لایه سطحی واحد زیست‌ماند در حجم رواناب خروجی از حوضه و همچنین حجم نفوذ در کل منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۸-۸) نشان داده شده است با افزایش ضخامت لایه سطحی واحد زیست‌ماند مقدار رواناب خروجی از حوضه مورد مطالعه روند نزولی دارد. بنابراین، افزایش ضخامت لایه سطحی موجب ظرفیت نگهداشت رواناب زیاده‌تر در واحد زیست‌ماند شده است. با این حال، از حدود ضخامت ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر به بعد، افزایش ضخامت لایه سطحی تأثیر بسیار کمی در کاهش رواناب داشته است. این تأثیر کم می‌تواند ناشی از کافی بودن ضخامت حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متری برای ذخیره کردن رواناب ناشی از بارش‌های پژوهش حاضر باشد. در صورت انتخاب بارش‌های بزرگ‌تر ظرفیت بیش‌تری برای نگهداشت رواناب مورد نیاز خواهد بود. همچنین باید گفت که رواناب‌های نشان داده شده در شکل (۸-۸) برای بارش‌های مختلف کم‌تر از رواناب‌های خروجی از حوضه در حالت بدون واحد زیست‌ماند است که پیش‌تر در جدول (۱) نشان داده شده بود.

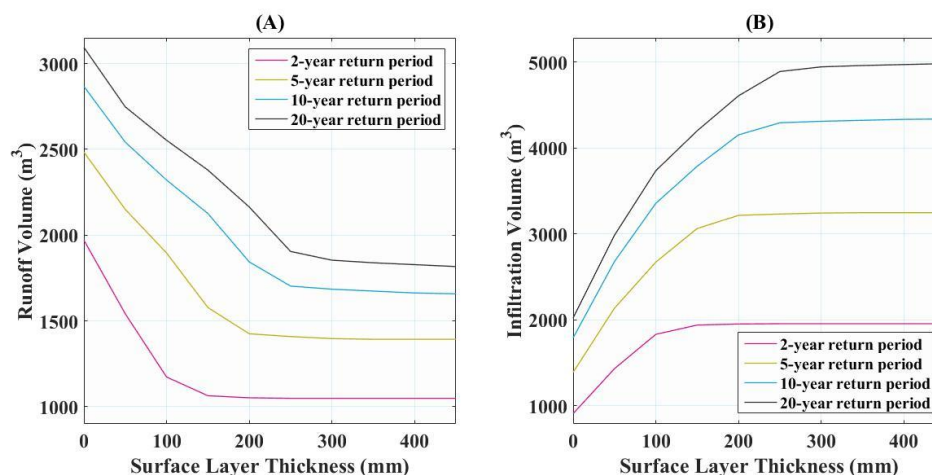


Figure 8. The impact of changes in the surface layer thickness of the bioretention cell on its hydrological performance

شکل (۸-ب) مقدار نفوذ ایجادشده در منطقه مورد مطالعه بعد از نگهداشت رواناب در واحد زیست ماند را نشان می‌دهد. در این نمودارها نیز همانند شکل (۸-ا) از حدود ضخامت ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر، نمودارها حالت تقریباً افقی به خود گرفته‌اند. این مورد نیز همانند نمودارهای شکل (۸-ا) ناشی از کافی بودن ضخامت حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متری برای گرفتن رواناب بارش‌های پژوهش حاضر می‌باشد. بنابراین چون حداکثر رواناب ممکن در حدود ضخامت ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر لایه سطحی واحد زیست ماند نگهداشته شده است، حداکثر مقدار نفوذ نیز در همین حدود ضخامت رخ داده است. همچنین باید گفت که مقادیر نفوذ نشان داده شده در شکل (۸-ب) برای بارش‌های مختلف بیش‌تر از نفوذهای ایجادشده در حالت بدون واحد زیست ماند منطقه مورد مطالعه است که پیش‌تر در جدول (۱) نشان داده شده بود.

جدول (۲) تأثیر تغییر هدایت هیدرولیکی اشباع لایه خاک واحد زیست ماند در عملکرد هیدرولوژیکی آن در سطح حوضه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول قابل مشاهده است با افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع لایه خاک، واحد زیست ماند درصد بیش‌تری از رواناب خروجی از حوضه را کاهش می‌دهد. همچنین عملکردی مشابه در کاهش حجم سیلاب و کاهش دبی اوج نیز مشاهده شد که در جدول (۲) نشان داده شده است. نتایج پژوهش Gülbaz and Kazezyılmaz-Alhan (2017) همانند پژوهش حاضر نشان داد که که انواع مختلف خاک به کار گرفته شده در واحد زیست ماند (تحت بارش‌های مختلف) تأثیر قابل توجهی بر عملکرد هیدرولوژیکی واحد زیست ماند دارد. این نکته قابل ذکر است که انواع مختلف خاک‌ها دارای هدایت هیدرولیکی اشباع مختلفی هستند.

عملکرد هیدرولوژیکی واحد زیست ماند با افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع لایه خاک روند صعودی دارد. این روند صعودی ناشی از آن است که لایه خاک در مقادیر بالای هدایت هیدرولیکی اشباع، سریع‌تر رواناب گرفته شده را در خود نفوذ می‌دهد و موجب کاهش بیش‌تر رواناب، سیلاب و اوج رواناب خروجی از حوضه می‌شود. این موضوع به‌ویژه زمانی که واحد زیست ماند دچار رسوب‌گذاری و گرفتگی منافذ لایه خاک می‌شود، اهمیت پیدا می‌کند. همان‌طور که در مطالعه Roy-Poirier et al. (2010) بیان شده است، هدایت هیدرولیکی لایه خاک پس از ساخت واحدهای زیست ماند دچار کاهش می‌شود. جدول (۲) می‌تواند راهنمای مناسبی برای تعیین عملکرد واحد زیست ماندی باشد که دچار گرفتگی است و هدایت هیدرولیکی اشباع آن مقادیر مختلفی می‌تواند داشته باشد.

Table 2. Changes in the soil layer saturated hydraulic conductivity of the bioretention cell and its impact on the bioretention cell hydrological performance

Hydrological Impact	Return period (year)	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)				
		1	10	30	70	120
Runoff volume reduction (%)	2	50.5	67.3	75.3	75.9	76
	5	40	55.4	66.7	73.7	74.1
	10	36.1	50.8	60.2	69.4	72.4
	20	34.8	48.6	58	66.7	70.6
Peak discharge reduction (%)	2	31.7	59.4	64.9	66.4	66.5
	5	17.6	24.1	40.9	55.6	56.5
	10	13	18.7	25.7	37.7	46.7
	20	10.7	16.3	22.6	29.8	38.3
Flood volume reduction (%)	2	99.8	100	100	100	100
	5	81.4	93.9	100	100	100
	10	65.9	83.2	93.7	99.7	100
	20	58.2	77	89.2	97.5	99.8

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر واحدهای زیست‌ماند همانند مخازنی کوچک در دو طرف تمام خیابان‌های منطقه مورد مطالعه قرار گرفت و رواناب ناشی از ساختمان‌های دو طرف خیابان و همچنین خیابان‌های بزرگ را دریافت کرد. به کارگیری واحد زیست‌ماند موجب کاهش حجم رواناب و حجم سیلاب شد و همچنین موجب افزایش حجم نفوذ برای کل منطقه مورد مطالعه گشت. واحد زیست‌ماند همچنین موجب کاهش ۶۵ تا ۲۵ درصدی دبی اوج رواناب خروجی از منطقه به ترتیب برای بارش با دوره‌های بازگشت دو تا ۲۰ ساله شد. این نتایج نشان داد که واحد زیست‌ماند امکان بازیابی چرخه هیدرولوژیکی طبیعی در مناطق شهری را دارد.

در پژوهش حاضر ۱۷۰ واحد زیست‌ماند در منطقه مورد مطالعه جای‌گذاری شد. بررسی مساحت بهینه زهکشی‌شده به واحدهای زیست‌ماند نشان داد که برای به حداکثر رساندن عملکرد واحد زیست‌ماند از لحاظ کاهش رواناب، مساحت زهکشی‌شده به واحدهای زیست‌ماند باید ۲۲ تا ۱۴ برابر مساحت خود واحد زیست‌ماند به ترتیب برای بارش با دوره‌های بازگشت دو تا ۲۰ ساله باشد. در راستای بهینه‌کردن مقدار نفوذ نیز مساحت زهکشی‌شده به واحدهای زیست‌ماند باید ۲۴ تا ۱۴ برابر مساحت خود واحد زیست‌ماند به ترتیب برای همان بارش‌ها باشد.

در پژوهش حاضر عملکرد هیدرولوژیکی واحد زیست‌ماند تحت تأثیر تغییرات فنی در لایه سطحی و لایه خاک آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت لایه سطحی واحد زیست‌ماند، امکان نگهداشت رواناب بیش‌تر و ایجاد نفوذ بیش‌تر وجود دارد. با این حال، از حدود ضخامت ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متری، افزایش ضخامت لایه سطحی تأثیر بسیار کمی در افزایش نگهداشت رواناب و افزایش نفوذ داشت. در مطالعه حاضر تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع در لایه خاک و تأثیر آن بر عملکرد هیدرولوژیکی واحد زیست‌ماند نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع لایه خاک امکان افزایش عملکرد واحد زیست‌ماند از لحاظ کاهش رواناب و سیلاب (رواناب مازاد بر سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی) و همچنین افزایش نفوذ وجود دارد.

۵. پیشنهادها

در پژوهش حاضر بررسی‌ها برای وقایع بارندگی منفرد بود. بنابراین در صورت وجود بارش‌های متوالی امکان تغییر در عملکرد واحدهای زیست‌ماند به کار گرفته شده وجود داشت. بارش پیشین موجب پرشدن ذخیره آب واحد زیست‌ماند شده و در نتیجه امکان خروج رواناب بیش‌تر از واحد زیست‌ماند را ایجاد می‌کند. این امر می‌تواند تحریک‌کننده تولید سیلاب بیش‌تر در منطقه باشد. بنابراین پژوهش‌های بیش‌تر در زمینه وجود بارش‌های متوالی لازم خواهد بود.

از دیگر موضوعاتی که می‌تواند عملکرد واحد زیست‌ماند را بیش‌تر مشخص کند بررسی طولانی‌مدت این روش توسعه کم‌اثر است. در صورت بررسی با وجود داده‌های بارش واقعی برای یک یا چند سال هیدرولوژیکی کامل، امکان نمایان‌ساختن عملکرد طولانی‌مدت واحدهای زیست‌ماند فراهم خواهد گشت.

۶. پی‌نوشت‌ها

1. Low impact development (LID)
2. Guangdong
3. Tianjin
4. Bioretention cell (BRC)
5. University of Maryland
6. Storm water management model (SWMM)
7. Intensity-duration-frequency

۷. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸. منابع

- Chen, Y., Zhou, H., Zhang, H., Du, G., & Zhou, J. (2015). Urban flood risk warning under rapid urbanization. *Environmental research*, 139, 3-10.
- Davis, A. P. (2008). Field performance of bioretention: Hydrology impacts. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(2), 90-95.
- Davis, A. P., Traver, R. G., Hunt, W. F., Lee, R., Brown, R. A., & Olszewski, J. M. (2012). Hydrologic performance of bioretention storm-water control measures. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(5), 604-614.
- de Macedo, M. B., do Lago, C. A. F., & Mendiondo, E. M. (2019). Stormwater volume reduction and water quality improvement by bioretention: Potentials and challenges for water security in a subtropical catchment. *Science of the Total Environment*, 647, 923-931.
- DeBusk, K., & Wynn, T. (2011). Storm-water bioretention for runoff quality and quantity mitigation. *Journal of Environmental Engineering*, 137(9), 800-808.
- Eckart, K., McPhee, Z., & Bolisetti, T. (2017). Performance and implementation of low impact development—A review. *Science of the Total Environment*, 607, 413-432.
- Feng, B., Zhang, Y., & Bourke, R. (2021). Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models. *Natural Hazards*, 106(1).
- Gülbaz, S., & Kazezyilmaz-Alhan, C. M. (2017). Experimental investigation on hydrologic performance of LID with rainfall-watershed-bioretention system. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(1), D4016003.
- Hoffmann, G., Gardner, L., Espie, M., & Dunbar, J. (2020). *Stormwater Management Guidebook* (2nd ed.). Department of Energy and Environment.
- Huang, C.-L., Hsu, N.-S., Liu, H.-J., & Huang, Y.-H. (2018). Optimization of low impact development layout designs for megacity flood mitigation. *Journal of hydrology*, 564, 542-558.
- Hunt, W., Smith, J., Jadlocki, S., Hathaway, J., & Eubanks, P. (2008). Pollutant removal and peak flow mitigation by a bioretention cell in urban Charlotte, NC. *Journal of Environmental Engineering*, 134(5), 403-408.
- Luo, P., Luo, M., Li, F., Qi, X., Huo, A., Wang, Z., He, B., Takara, K., Nover, D., & Wang, Y. (2022). Urban flood numerical simulation: Research, methods and future perspectives. *Environmental modelling & software*, 156, 105478.
- Mani, M., Bozorg-Haddad, O., & Loáiciga, H. A. (2019). A new framework for the optimal management of urban runoff with low-impact development stormwater control measures considering service-performance reduction. *Journal of Hydroinformatics*, 21(5), 727-744.

- Movahedinia, M., Samani, J. M. V., Barakhasi, F., Taghvaeian, S., & Stepanian, R. (2019). Simulating the effects of low impact development approaches on urban flooding: a case study from Tehran, Iran. *Water Science and Technology*, 80(8), 1591-1600.
- PWD, C. o. P. (2014). *Stormwater Management Guidance Manual* (Version 2.1 ed.). Philadelphia Water Department.
- Rossman, L., & Huber, W. (2016a). *SWMM Reference Manual Volume I—Hydrology*. United States Environmental Protection Agency.
- Rossman, L., & Huber, W. (2016b). *SWMM Reference Manual Volume III—Water Quality* United States Environmental Protection Agency.
- Roy-Poirier, A., Champagne, P., & Filion, Y. (2010). Review of bioretention system research and design: past, present, and future. *Journal of Environmental Engineering*, 136(9), 878-889.
- Shuster, W. D., Bonta, J., Thurston, H., Warnemuende, E., & Smith, D. (2005). Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. *Urban Water Journal*, 2(4), 263-275.
- Swathi, V., Raju, K. S., & Singh, A. P. (2018). Application of storm water management model to an urban catchment. In *Hydrologic Modeling* (pp. 175-184). Springer.
- Willard, L., Wynn-Thompson, T., Krometis, L., Neher, T., & Badgley, B. (2017). Does it pay to be mature? Evaluation of bioretention cell performance seven years postconstruction. *Journal of Environmental Engineering*, 143(9), 04017041.
- Yang, B., Zhang, T., Li, J., Feng, P., & Miao, Y. (2023). Optimal designs of LID based on LID experiments and SWMM for a small-scale community in Tianjin, north China. *Journal of environmental management*, 334, 117442.
- Yang, Y., & Chui, T. F. M. (2018). Optimizing surface and contributing areas of bioretention cells for stormwater runoff quality and quantity management. *Journal of environmental management*, 206, 1090-1103.
- Yin, D., Evans, B., Wang, Q., Chen, Z., Jia, H., Chen, A. S., & Fu, G. (2020). Integrated 1D and 2D model for better assessing runoff quantity control of low impact development facilities on community scale. *Science of the Total Environment*, 720, 137630.
- Zhu, Z., Chen, Z., Chen, X., & Yu, G. (2019). An assessment of the hydrologic effectiveness of low impact development (LID) practices for managing runoff with different objectives. *Journal of environmental management*, 231, 504-514.
- Zhuang, Q., Li, M., & Lu, Z. (2023). Assessing runoff control of low impact development in Hong Kong's dense community with reliable SWMM setup and calibration. *Journal of environmental management*, 345, 118599.