

عملکرد واحدهای زیست‌ماند در بازیابی چرخه هیدرولوژیک حوضه‌های متراکم شهری

میلاذ مه‌ری^۱، سید مهدی هاشمی شاهدانی^{۱*}، سامان جوادی^۱ و مریم موحدی‌نیا^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۲۴)

چکیده

شهرسازی سریع مسئول افزایش سطوح نفوذناپذیر و تولید رواناب بیشتر در حوضه‌های شهری است. حجم رواناب بیشتر در حوضه‌های شهری منجر به افزایش خطر سیل می‌شود. توسعه کم‌اثر (LID) از جمله روش‌های مدیریت رواناب است. واحد زیست‌ماند (BRC) یکی از روش‌های LID مبتنی بر نفوذ است که امکان بازیابی چرخه هیدرولوژیک قبل از توسعه را فراهم می‌کند. با این حال، عملکرد جامع هیدرولوژیک BRC می‌تواند بسته به محیط‌های مختلف شهری متفاوت باشد. در پژوهش حاضر، عملکرد هیدرولوژیک BRC از نظر کاهش رواناب و سیلاب در یک منطقه شهری متراکم در شرق تهران، ایران، مورد بررسی قرار گرفته است. مدل SWMM در ارزیابی عملکرد BRC استفاده شد. نتایج نشان داد که برای بارندگی با دوره‌های بازگشت ۲ تا ۵۰ ساله، BRC به ترتیب موجب نفوذ ۱۵/۲ تا ۲۷/۵ درصدی بارندگی در منطقه مورد مطالعه شد. همچنین برای بارندگی با دوره‌های بازگشت ۲ تا ۵۰ ساله، BRC موجب کاهش حجم کل رواناب به ترتیب به مقدار ۷۶/۲ تا ۷۰/۲ درصد و دبی اوج به مقدار ۶۵/۹ تا ۳۶/۴ درصد شد. پژوهش حاضر نشان می‌دهد که BRC می‌تواند با کاهش رواناب و افزایش نفوذ به بازیابی چرخه هیدرولوژیک طبیعی حوضه‌های شهری کمک کند.

واژه‌های کلیدی: سیلاب شهری، توسعه کم‌اثر، واحد زیست‌ماند، SWMM

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. گروه مهندسی آب، شرکت مهندسی مشاور پیشگامان پارسه، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

مقدمه

شهرسازی با افزایش سطوح نفوذناپذیر و ایجاد نیاز به سیستم‌های زهکشی کارآمد، حوضه طبیعی را به شدت تغییر می‌دهد. چنین تغییراتی در پوشش زمین منجر به واکنش سریع‌تر هیدرولوژیک به رگبارها می‌شود (۷). یکی از موضوعات مورد بررسی در شهرسازی، مسئله وقوع سیلاب و آب‌گرفتگی ناشی از بارندگی‌های شدید است (۶). جلوگیری از جاری شدن سیل ناشی از این وقایع شدید غیرقابل پیش‌بینی باران در مناطق شهری به دلیل فقدان سیستم‌های زهکشی کافی، به یک مسئله مهم تبدیل شده است (۴). تأثیر شهرسازی بر رواناب مستقیم در منطقه شهری شنیانگ (Shenyang) واقع در شمال شرقی چین نشان داد که رواناب قوی‌ترین همبستگی را با بارندگی (۵۲/۱ درصد) و پس از آن با نسبت نفوذناپذیری سطح زمین (۲۷/۳ درصد) دارد (۱۳). طبق ارزیابی تغییر کاربری اراضی بین سال‌های ۱۹۶۶ تا ۲۰۰۹ در حومه غربی شهر بمبئی هند، زمین‌های شهری شده از ۱۶/۶ درصد به ۴۴/۱ درصد افزایش یافت که سبب تشدید دبی اوج از ۲/۶ درصد تا ۲۰/۹ درصد به ترتیب برای بارش با دوره‌های بازگشت ۲۰۰ تا ۲ ساله در این دوره ۴۳ ساله شد (۲۷). افزایش پوشش نفوذناپذیر موجب ایجاد سیلاب خواهد شد. ایوبی ایوبلو و همکاران (۱) به تهیه نقشه ریسک سیلاب در بخشی از شهر شیراز پرداختند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که ۳۴ درصد از منطقه مورد مطالعه آن‌ها دارای خطر سیلاب زیاد و بسیار زیاد است.

برای کاهش تأثیر شهرسازی در چرخه هیدرولوژیک مناطق شهری، روش‌های LID (Low Impact Development) با هدف مدیریت کمیت و کیفیت رواناب سطحی توسعه و ترویج داده شده است که عملکردهای هیدرولوژیک پیش از توسعه شهری را بازیابی می‌کند (۲۲). عملکرد روش‌های LID در کاهش سیلاب در حوضه آبریز شهری در نانجینگ (Nanjing)، چین نشان داد که به‌کارگیری LID می‌تواند ۲ تا ۱۷ درصد کل مناطق سیلابی را کاهش دهد (۹). بررسی‌ها در

شرق ملبورن، استرالیا نشان داد که LID توانایی کاهش وسعت سیل تا ۹۱ درصد و مدت زمان جاری شدن سیل را تا ۷۹ درصد دارد (۲۱). همچنین کاربرد LID در شنتژن (Shenzhen)، جنوب چین نشان داد که روش‌های LID می‌توانند به‌طور مؤثری سیلاب شهری را کاهش دهند به طوری که بیشترین عمق سیلاب و متوسط محدوده سیلابی به ترتیب تا ۲۹ درصد و ۵۵ درصد کاهش یافت (۲۶).

واحد زیست‌ماند (Bio-Retention Cell: BRC) از جمله روش‌های LID است که به دلیل توانایی آن در کاهش حجم رواناب به یک اقدام کنترل رواناب سطحی محبوب تبدیل شده است (۲۵). هانت و همکاران (۱۱) BRC واقع در یک محیط شهری را از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ در شارلوت، کارولینای شمالی بررسی کردند. پژوهش آن‌ها نشان داد که دبی اوج جریان خروجی BRC کمینه ۹۶/۵ درصد کمتر از اوج جریان ورودی بود. وینستون و همکاران (۲۵) سه BRC ساخته شده در خاک با نفوذپذیری کم در شمال شرقی اوهایو را بررسی کردند. گنجایش ناحیه ذخیره‌سازی داخلی آب در BRC اجازه داد که برخلاف وجود خاک‌های فشرده زیرین، این سه BRC بتوانند رواناب را ۵۹، ۴۲ و ۳۶ درصد کاهش دهند. دی ماسدو و همکاران (۳) به ارزیابی عملکرد یک BRC در منطقه‌ای با آب و هوایی نیمه‌گرمسیری (سائو کارلوس، برزیل) در طول یک سال هیدرولوژیک کامل پرداختند. نتایج نشان داد که BRC به‌طور متوسط ۶۵ درصد از حجم رواناب را در طول یک سال هیدرولوژیک حفظ کرده است. با این حال، این بازده بین فصول خشک و بارانی متغیر است، با مقدار بیشتری در فصل خشک (۷۳ درصد) و مقدار کمتری برای فصل بارانی (۶۱ درصد). محمود و همکاران (۱۴) به ارزیابی در مقیاس میدانی BRC پرداختند و عملکرد آن را در یک دوره زمانی ۱۳ ماهه با روسازی آسفالت سنتی در مک‌آلن تگزاس، مقایسه کردند. نتایج نشان داد که حجم رواناب BRC به‌طور متوسط ۸۲ درصد کمتر از کل حجم رواناب روسازی آسفالت سنتی بود.

مختلفی که بررسی می‌کنند، می‌توانند عملکرد متفاوتی داشته باشند (۱۷). یکی از مدل‌های که توانایی تحلیل هیدرولوژیک مناطق شهری را دارد، مدل SWMM است. در پژوهش حاضر در راستای ارزیابی کارایی BRC، مدل‌سازی آب سطحی با استفاده از مدل SWMM صورت گرفت. پژوهش‌های گذشته عملکرد مناسب SWMM را در مدل‌سازی حوضه آبریز شهری نشان داده‌اند. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به (۱۸) اشاره کرد. در پژوهش گفته شده مدل SWMM را در بررسی کمی و کیفی رواناب شهری استفاده کردند. این مدل با موفقیت توانست مدل‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیک حوضه آبریز را انجام دهد.

به‌طور خلاصه ارزیابی عملکرد BRC که در این مطالعه صورت گرفت عبارت‌اند از (۱) نحوه کاهش حجم کل رواناب و افزایش حجم کل نفوذ، (۲) نحوه کاهش و تأخیر در دبی اوج رواناب خروجی و (۳) چگونگی کاهش نقاط سیلابی در محدوده شهری مورد مطالعه.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل بخش‌هایی از منطقه ۱۳ در شرق تهران واقع شده است و در حدود ۶۵ هکتار گسترش یافته است. منطقه مورد مطالعه توسط مناطق مسکونی و تجاری اشغال شده است (شکل ۱). دلایل اصلی انتخاب این منطقه عبارت‌اند از (۱) تراکم بودن بافت مسکونی و تجاری منطقه، (۲) معضلات فراوان آب‌گرفتگی پس از هر بارش که سبب نارضایتی شدید ساکنین این منطقه شده است و (۳) انجام مطالعات مشابه در این منطقه که امکان بررسی و تحلیل نتایج راهکارهای پیشنهادی در این مطالعه را فراهم می‌سازد.

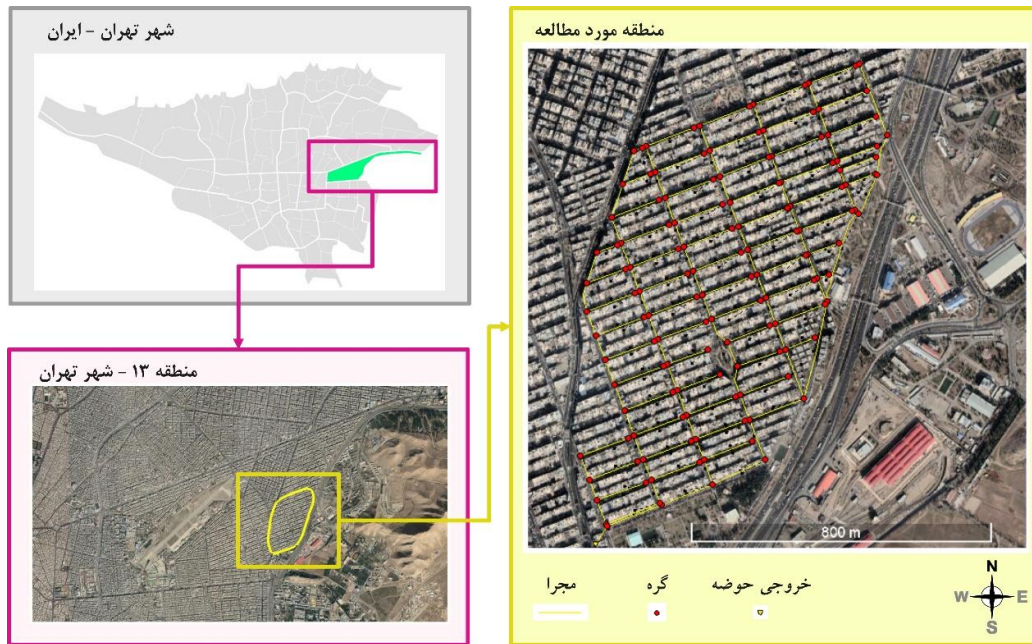
محاسبات رواناب سطحی

گام‌های انجام‌شده در ارزیابی عملکرد BRC در پژوهش حاضر در قالب روندنا شکل ۲ ارائه شده است. در پژوهش حاضر از

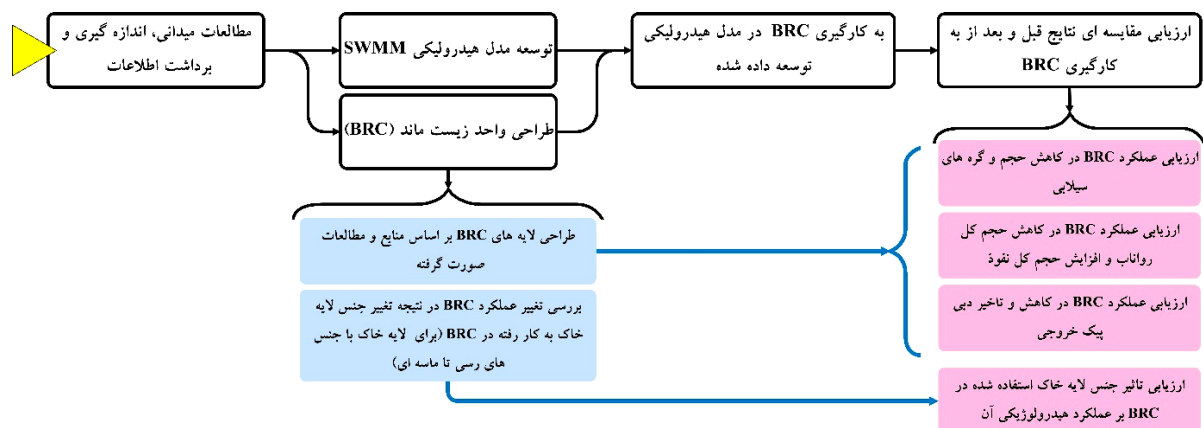
حجم رواناب نگه داشته شده در BRC با توجه به اینکه BRC از مجموعه روش‌های LID مبتنی بر نفوذ است، موجب تقویت نفوذ شده و به تغذیه آب زیرزمینی کمک می‌کند (۵). در مطالعه‌ای عملکرد روش‌های LID مختلف در شهر لندن، واقع در انتاریو (Ontario) بررسی شد. نشان داده شد که با به‌کارگیری LID سقف سبز، جوی باغچه، روسازی متخلخل، واحد زیست‌ماند و ترانشه نفوذ، مقدار نفوذ بارش در منطقه مورد مطالعه به ترتیب در حدود ۳۲، ۴۵، ۴۴، ۶۲ و ۷۵ درصد خواهد بود. این در حالی است که بدون به‌کارگیری هیچ‌یک از روش‌های LID در منطقه، سهم نفوذ از بارندگی برای محدوده مدنظر کمتر از ۳۰ درصد بود (۱۲). بارسچ (۲) در پژوهشی چندین سناریو شامل LID در منطقه مورد مطالعه یک حوضه شهری واقع در ورشو (Warsaw) لهستان را بررسی کرد. نتایج نشان داد که در شرایط پژوهش که در آن ۵۷/۶ درصد از محدوده مورد مطالعه شهری شده است برای یک بارش معین عمق کل نفوذ برابر ۶/۲ میلی‌متر بود. این در حالی بود که مؤثرترین سناریو LID موجب افزایش نفوذ تا ۱۳/۸ میلی‌متر شد. این به معنی افزایش حدود ۱۲۲ درصدی مقدار نفوذ نسبت به حالت بدون LID منطقه مورد مطالعه بود.

بررسی مطالعات صورت‌گرفته نشان داد که به‌کارگیری BRC به‌عنوان یک اقدام در کنترل رواناب سطحی در مناطق شهری عملکرد قابل‌قبولی داشته است. به‌منظور تکمیل خلأ مطالعاتی در این زمینه، مطالعه حاضر برای اولین بار اقدام به ارزیابی جامعی از به‌کارگیری BRC در بازیابی چرخه هیدرولوژیکی مناطق شهری با بافت بسیار تراکم کرده است. برای این منظور پس از بررسی لایه‌بندی BRC و طراحی لایه‌های آن، اقدام به ارزیابی کارایی BRC در کاهش رواناب و میزان آب‌گرفتگی ناشی از سیلاب شهری و همچنین افزایش نفوذ در یک منطقه تراکم شهری کرده است.

در بررسی‌های آب سطحی، مدل‌های هیدرولوژیک ابزار مناسبی به‌شمار می‌روند. این مدل‌ها بسته به شرایط محیطی



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و توزیع سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی در SWMM



شکل ۲. روندنمای کلی پژوهش

در سطح زیرحوضه همانند یک جریان یکنواخت داخل یک کانال مستطیلی رفتار می‌کند (کانالی که عرض آن برابر عرض زیرحوضه است). بنابراین SWMM با این فرض از معادله مانینگ برای بیان دبی رواناب زیرحوضه استفاده می‌کند به طوری که معادله مانینگ به صورت زیر در SWMM استفاده می‌شود (۱۹):

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

که در این معادله n ضریب زبری سطح زیرحوضه مدنظر است

مدلسازی رواناب سطحی SWMM در بررسی عملکردهای هیدرولوژیک پیش و پس از به‌کارگیری BRC استفاده شد. SWMM مدل بارش-روانابی است که امکان مدلسازی اجزای هیدرولیکی و هیدرولوژیک یک حوضه آبریز را فراهم می‌کند (۲۳). در بررسی تأثیر به‌کارگیری BRC بر رواناب سطحی، منطقه مورد مطالعه به ۲۳۵ زیرحوضه تقسیم شد.

محاسبه رواناب سطحی در زیرحوضه‌های تعریف‌شده در SWMM، به صورتی است که SWMM فرض می‌کند که جریان

لایه سطحی: عمق توصیه‌شده برای این لایه بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر است. مقادیر عمق ۳۰۰ میلی‌متر و بیشتر از این مقدار می‌تواند در ساخت BRC استفاده شود اما به‌کارگیری عمق‌های زیاد برای این لایه محدودیت‌هایی از جمله (۱) ایمنی در برابر سقوط افراد به داخل BRC، (۲) منظر شهری نامطلوب ناشی از عمق زیاد لایه سطحی BRC و (۳) جلوگیری از رسیدن نور به گیاهان داخل BRC (۸) دارد. در پژوهش حاضر عمق لایه سطحی برابر ۲۰۰ میلی‌متر انتخاب شد که علاوه بر تطابق با محیط شهری منطقه مورد مطالعه، موجب حذف محدودیت‌های عمق زیاد لایه سطحی BRC خواهد شد.

لایه خاک: این لایه باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که علاوه بر حمایت از رشد گیاهی، دارای هدایت هیدرولیکی اشباع زیادی باشد (۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر بر ساعت (۸)) تا رواناب جمع‌آوری شده در لایه سطحی را با شدت بیشتری در خود نفوذ دهد. ضخامت لایه خاک بستگی به وجود و عدم وجود زهکش داخل BRC دارد. بدون وجود زهکش، BRC مبتنی بر نفوذ خواهد بود بنابراین لایه خاک باید تأمین‌کننده فضای کافی برای نفوذ باشد (در کمترین حالت ۶۰۰ میلی‌متر ضخامت) (۸). در پژوهش حاضر BRC مبتنی بر نفوذ بررسی شد.

لایه ذخیره‌سازی: این لایه با هدف ایجاد فضای بیشتر برای ذخیره‌سازی رواناب در BRC به‌کار می‌رود. جنس این لایه از نوع درشت‌دانه است (شن و ماسه) (۸). ضخامت این لایه در پژوهش حاضر به‌گونه‌ای انتخاب شد که حجم کافی برای ذخیره‌کردن رواناب جمع‌آوری شده را در BRC در نتیجه بارش با دوره بازگشت ۲ ساله داشته باشد.

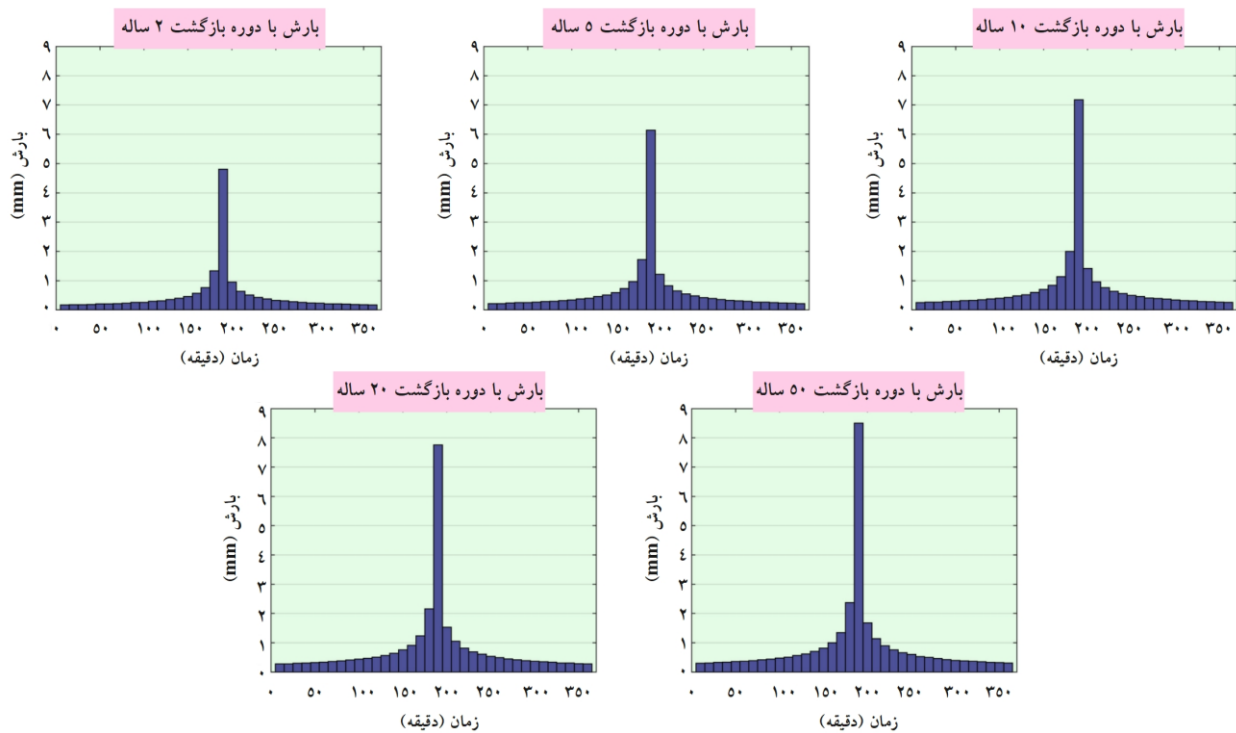
تغییر جنس لایه خاک BRC و تأثیر آن بر عملکرد هیدرولوژیک BRC

از بین لایه خاک و لایه ذخیره‌سازی به‌کار رفته در BRC، لایه خاک امکان داشتن ریزدانه را دارد که می‌تواند شدت نفوذ سطحی را در BRC تحت تأثیر قرار دهد. بسته به مصالح مورد استفاده در لایه خاک، مشخصات و عملکرد هیدرولوژیک BRC

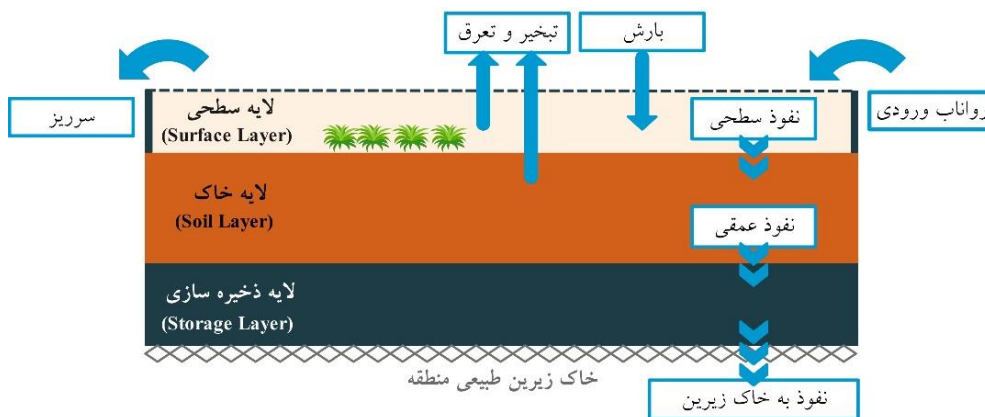
و S شیب متوسط زیرحوضه است (m/m)، A یک مقطع مستطیلی شکل است که به‌عنوان مقطع یک کانال با عرض W (یعنی عرض زیر حوضه) و ارتفاع d (یعنی مقدار ارتفاع آب موجود در زیرحوضه که قابل جاری شدن است) عمل می‌کند. R نیز شعاع هیدرولیکی مقطع A خواهد بود. در معادله بالا A و R به ترتیب برحسب مترمربع و متر هستند. پارامترهای S، n و W به‌عنوان پارامترهای ورودی در ویرایشگر زیرحوضه SWMM وارد می‌شود و d در نتیجه مدل‌سازی بارش - رواناب زیر حوضه حاصل می‌شود. ورودی داده‌های بارش به مدل در این پژوهش شامل بارش ۶ ساعته با دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ سال بود که از منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی (IDF) منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش بلوک‌های متناوب استخراج شدند. روش بلوک‌های متناوب یک راه ساده برای ایجاد بارش طراحی از منحنی IDF است. بارش طراحی که توسط این روش تولید می‌شود، عمق بارندگی را در N بازه زمانی متوالی (Δt) در طول کل مدت بارندگی ($T_{rain\ duration} = N \times \Delta t$) مشخص می‌کند. در پژوهش حاضر مقدار تجمعی عمق بارش‌ها برای بارش با دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ سال به ترتیب برابر ۱۷/۱۴، ۲۱/۹۲، ۲۵/۵۹، ۲۷/۶۸ و ۳۰/۳۱ میلی‌متر بود. هایتوگراف‌های بارش در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند.

به‌کارگیری روش توسعه کم‌اثر واحد زیست‌ماند (BRC)

از نظر مفهومی، یک BRC را می‌توان با تعدادی لایه افقی، مطابق شکل ۴ نشان داد. این لایه‌ها شامل لایه سطحی (پوشش گیاهی و فضای تجمع رواناب گرفته شده از مناطق دیگر)، لایه خاک و لایه ذخیره‌سازی است. در پژوهش حاضر BRC در دو طرف تمام خیابان‌های منطقه شهری مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۵) و در مجموع با توجه به محدودیت‌های مکانی منطقه مورد مطالعه، ۴/۱۵ درصد از سطوح مؤثر در تولید رواناب منطقه با BRC جای‌گذاری شد. در ادامه لایه‌های BRC پژوهش حاضر توضیح داده می‌شوند.



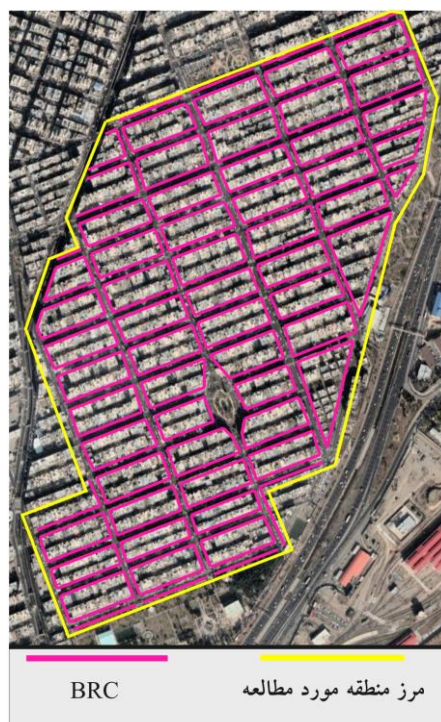
شکل ۳. هایتوگراف‌های بارش



شکل ۴. یک BRC معمول (۲۰)

قابل پیش‌بینی خواهد بود. لایه‌های خاک مورد استفاده به‌عنوان لایه خاک BRC به‌ترتیب کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع (۱۹)، شامل خاک‌های ماسه‌ای (Sand)، ماسه لومی (Loamy Sand)، لوم ماسه‌ای (Sandy Loam)، لومی (Loam)، لوم رسی ماسه‌ای (Sandy Clay Loam)، لوم رسی (Clay Loam)، رس ماسه‌ای (Sandy Clay) و رسی (Clay) بود.

تغییر خواهد کرد. در پژوهش حاضر علاوه بر طرح BRC مطرح شده در قسمت قبل، عملکرد هیدرولوژیک BRC در کاهش رواناب برای لایه خاک با جنس‌های مختلف، بررسی شد. این درحالی بود که سایر مشخصات BRC همانند طرح BRC بخش قبل بوده و بدون تغییر باقی ماند. بنابراین در صورت به‌کارگیری لایه خاک با جنس متفاوت، پاسخ هیدرولوژیک BRC تا حدودی



شکل ۵. محل جای‌گذاری BRC در منطقه مورد مطالعه

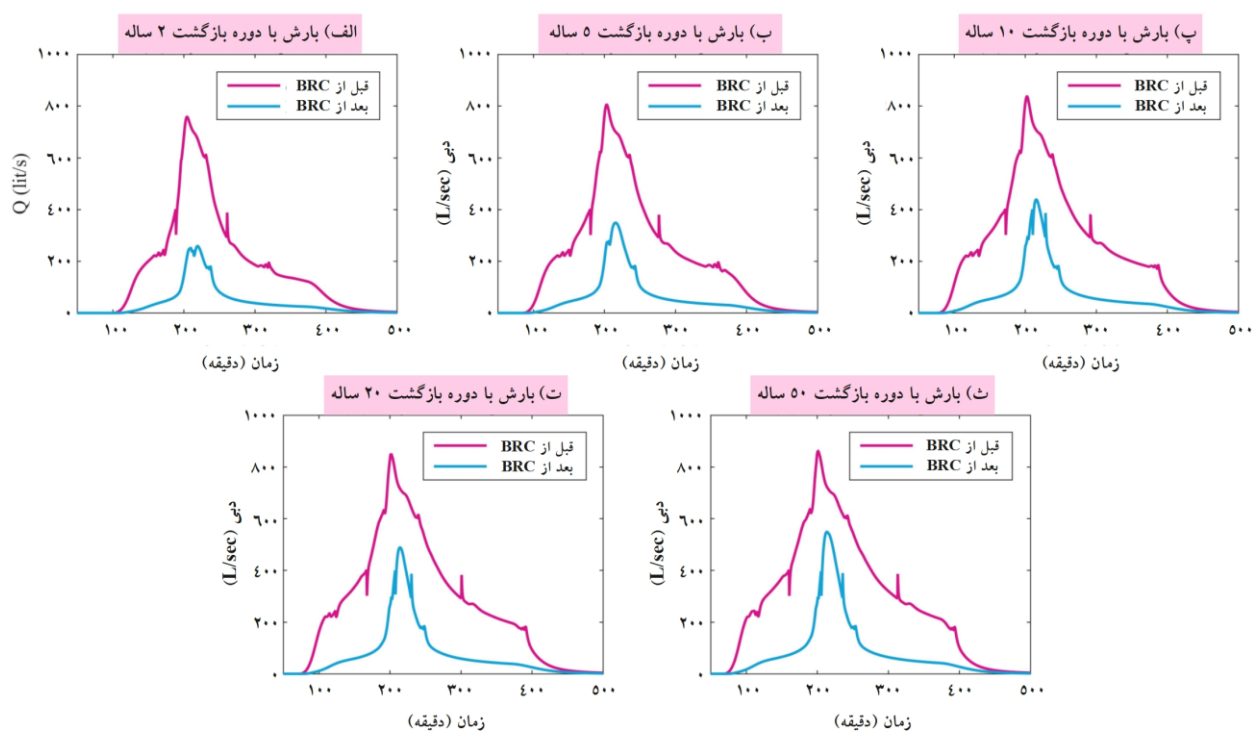
نتایج و بحث

عملکرد BRC در کنترل رواناب خروجی حوضه

شکل ۶ هیدروگراف‌های خروجی از نقطه تخلیه منطقه مورد مطالعه، برای بارش با دوره‌های بازگشت مختلف، برای قبل و بعد از به‌کارگیری BRC را نشان می‌دهد. شکل ۶-الف نشان‌دهنده هیدروگراف رواناب خروجی برای قبل (رنگ بنفش) و بعد از (رنگ آبی) به‌کارگیری BRC و برای بارش با دوره بازگشت ۲ ساله است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، کاهش قابل‌توجه برابر با ۶۵/۹ درصد در اوج رواناب خروجی از منطقه بعد از به‌کارگیری BRC رخ داده است. همان‌طور که در شکل‌های ۶-الف تا ۶-ج نیز قابل‌دیدن است، کاهش در دبی اوج ناشی از به‌کارگیری BRC، با افزایش دوره بازگشت، کمتر می‌شود به‌طوری‌که برای بارش با دوره‌های بازگشت ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ ساله، کاهش دبی اوج رواناب به‌ترتیب برابر با ۵۶/۷، ۴۷/۶، ۴۲/۵ و ۳۶/۴ درصد بود. این نتایج، مطابق

انتظار نشان‌دهنده روند نزولی عملکرد BRC در کاهش دبی اوج رواناب با افزایش دوره بازگشت بارش است. BRC همچنین موجب تأخیر در دبی اوج رواناب خروجی از منطقه شد. با وجود این، در راستای تحقق افزایش تأخیر اوج رواناب، به‌کارگیری BRC عملکرد ضعیف‌تری در مقایسه با کاهش دبی اوج نشان داد. بر اساس نتایج به‌دست آمده بیشترین مقدار تأخیر به‌دست آمده برابر با تأخیر ۱۳/۹ درصد در زمان رخ دادن دبی اوج برای بارش با دوره بازگشت ۲ ساله بود و برای بارش با دوره‌های بازگشت ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ ساله، تأخیر در زمان رخ دادن دبی اوج به‌ترتیب برابر با ۱۰/۳، ۱۰/۱، ۹/۴ و ۹/۲ درصد به‌دست آمد. این تأخیر برای دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ ساله به‌ترتیب برابر ۱۴/۸، ۱۲/۵، ۱۳، ۱۲/۳ و ۱۲/۵ دقیقه بود.

پژوهش‌های دیگری نیز در بررسی عملکرد BRC در کاهش و تأخیر اوج رواناب صورت گرفته است. مطالعه مانعی و همکاران (۱۵) در محدوده شهری مтраکم شهر تهران که شامل



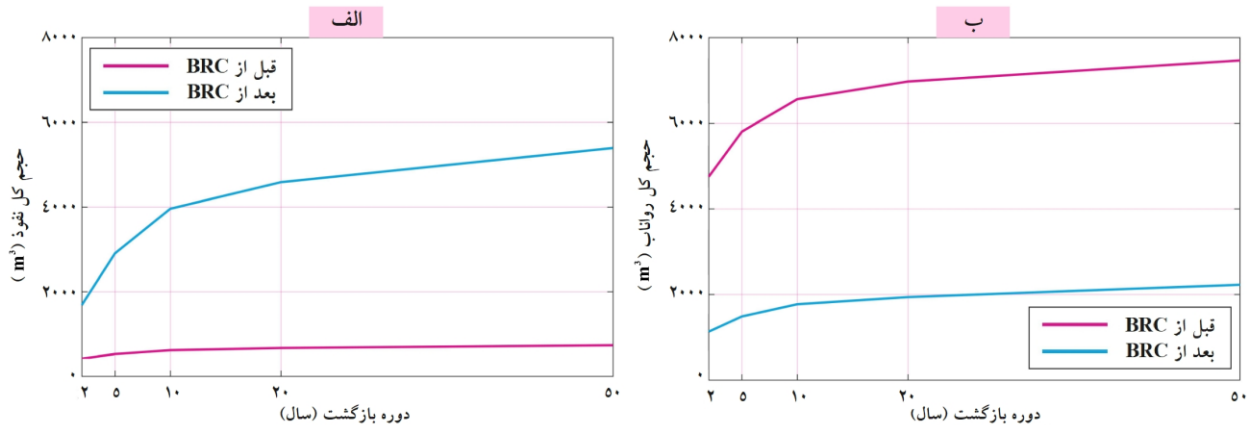
شکل ۶. هیدروگراف‌های خروجی از منطقه برای قبل و بعد از به‌کارگیری BRC

BRC در کاهش دبی اوج رواناب با افزایش دوره بازگشت بارش را نشان داد. همچنین بررسی تأخیر در دبی اوج در پژوهش هوانگ و همکاران (۱۰) نشان‌دهنده تأخیر ۲۰ تا ۱۲/۵ درصدی با افزایش دوره بازگشت بارش از ۵ تا ۲۰۰ سال بود که این روند نزولی نیز در پژوهش حاضر دیده شد.

عملکرد BRC در حجم کل رواناب، سیلاب و نفوذ

نتایج بررسی تأثیر به‌کارگیری BRC در کاهش حجم کل رواناب و افزایش نفوذ برای هر یک از بارش‌ها در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۷-الف قابل دیدن است پس از به‌کارگیری BRC، مقدار بارندگی که به نفوذ تبدیل شده است، به‌صورت قابل توجهی افزایش یافته است. مقدار نفوذ بعد از به‌کارگیری BRC برای بارش با دوره‌های بازگشت ۲ تا ۵۰ ساله به‌ترتیب ۴/۱ تا ۷/۴ برابر شد. مقدار سهم نفوذ از بارش قبل از به‌کارگیری BRC برای تمام بارش‌ها کمتر از ۴ درصد بود. بعد از به‌کارگیری BRC سهم نفوذ از بارش برای

به‌کارگیری BRC و روسازی متخلخل بود، منجر به کاهش ۲۲ درصدی دبی اوج خروجی از منطقه و تأخیر ۱۰ درصدی در زمان رسیدن دبی اوج به خروجی حوضه شد. زیرحوضه‌های این پژوهش شامل ۰/۱ تا ۳ درصد BRC و ۰/۱ تا ۷/۳ درصد روسازی متخلخل بود. مقادیر کاهش دبی اوج پژوهش حاضر به‌مراتب بیشتر از مقادیر کاهش دبی اوج پژوهش مانی و همکاران (۱۵) بود، ولی نتایج تأخیر در زمان رسیدن دبی اوج، مقادیر تقریباً برابری داشتند. در دیگر پژوهش انجام‌شده در حوضه متراکم شهری توسط ترین و چویی (۲۴) به‌کارگیری BRC، موجب کاهش ۵۰ درصد دبی اوج شد که نتایج حاصل شده مشابه نتایج پژوهش حاضر است. با این حال ۵ درصد از حوضه مورد مطالعه ترین و چویی (۲۴) با BRC جایگزین شده بود. پژوهش هوانگ و همکاران (۱۰) در تایپه، تایوان نیز که شامل به‌کارگیری BRC می‌شد، کاهش دبی اوج ۲۹/۸ تا ۵/۸ درصدی برای بارش با دوره بازگشت ۵ تا ۲۰۰ ساله را نشان داد که همانند پژوهش حاضر روند نزولی عملکرد



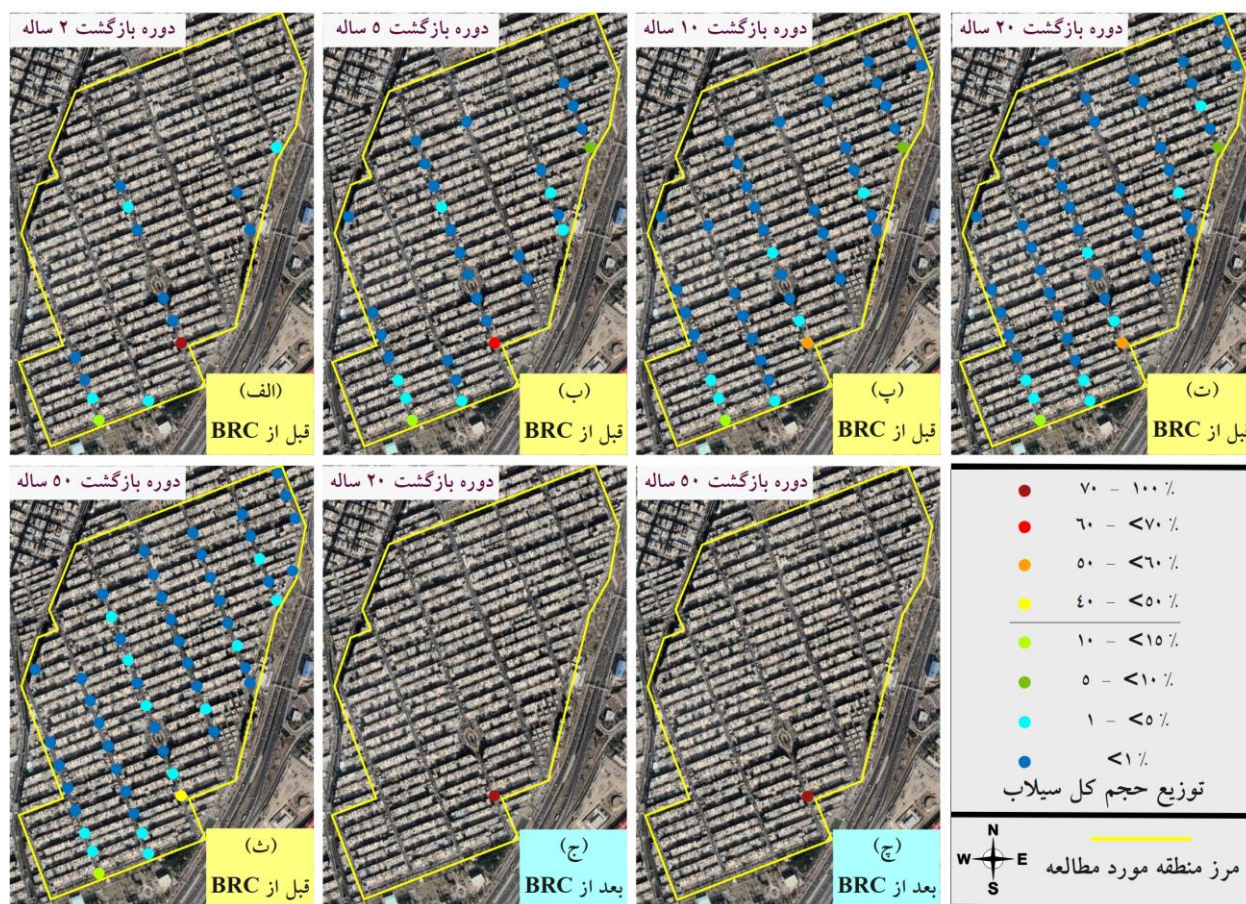
شکل ۷. تاثیر به کارگیری BRC در حجم کل رواناب و نفوذ. (الف) تغییرات حجم کل نفوذ ناشی از به کارگیری BRC، (ب) تغییرات حجم کل رواناب ناشی از به کارگیری BRC.

بارش با دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ ساله به ترتیب ۱۵/۲، ۲۰/۵، ۲۳/۹، ۲۵/۶ و ۲۷/۵ درصد شد. همان‌طور که در شکل ۷-ب دیده می‌شود مقدار کل حجم رواناب خروجی از حوضه منطقه مورد مطالعه پس از به کارگیری BRC به طور قابل توجهی کاهش یافته است. درصد این کاهش حجم رواناب برای بارش با دوره‌های بازگشت ۲ تا ۵۰ ساله به ترتیب برابر با ۷۶/۲ تا ۷۰/۲ درصد بود. سیلاب (به عنوان رواناب مازاد بر ظرفیت سیستم زهکشی منطقه) پس از به کارگیری BRC برای بارش با دوره‌های بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ ساله به طور کامل حذف شد و برای بارش با دوره‌های بازگشت ۲۰ و ۵۰ ساله حجم سیلاب ۹۹/۸ و ۹۹/۳ درصد کاهش یافت. شکل ۸ (الف تا ث) توزیع حجم سیلاب در منطقه مورد مطالعه برای بارش با دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ ساله قبل از به کارگیری BRC را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۸ (B-۱ و B-۲) تنها محدوده سیلابی برای بارش با دوره‌های بازگشت ۲۰ و ۵۰ ساله را بعد از به کارگیری BRC نشان می‌دهد.

پژوهش‌های دیگری نیز در بررسی عملکرد BRC در شهر تهران صورت گرفته است. در پژوهش مانی و همکاران (۱۵) که در محدوده شهری متراکم شهر تهران انجام شد و شامل به کارگیری BRC و روسازی متخلخل بود، کاهش

بارش با دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ ساله به ترتیب ۱۵/۲، ۲۰/۵، ۲۳/۹، ۲۵/۶ و ۲۷/۵ درصد شد.

پژوهش مانی و همکاران (۱۵) شامل ۱ تا ۳ درصد BRC و ۱/۰ تا ۳ درصد BRC و پژوهش حاضر منطقه مورد مطالعه شامل ۴/۱۵ درصد BRC بود و کاهش حجم رواناب به مراتب بیشتری را نسبت به پژوهش مانی و همکاران (۱۵) ایجاد کرد. این تفاوت می‌تواند ناشی از ارتفاع لایه اول BRC (لایه سطحی) باشد. در پژوهش مانی و همکاران (۱۵) ارتفاع لایه سطحی ۱۵۰ میلی‌متر بود این در حالی است که در پژوهش حاضر این ارتفاع برابر ۲۰۰ میلی‌متر بود و به مراتب امکان نگر داشت رواناب بیشتری نسبت به پژوهش مانی و همکاران (۱۵) داشت. همچنین پژوهش موحدی نیا و همکاران (۱۶) در شرق تهران ایران، برای سناریو ترکیبی BRC و بشکه باران کاهش ۱۰۰ تا ۹۷ درصدی در حجم سیلاب برای بارش با دوره بازگشت ۲ تا ۱۰ ساله را نشان داد. با وجود این در پژوهش حاضر سیلاب برای بارش با دوره‌های بازگشت ۲ تا ۱۰ ساله به طور کامل حذف شد. این تفاوت حاکی از لزوم طراحی مناسب BRC بر اساس شرایط خاک‌های زیرین منطقه مورد مطالعه است. در پژوهش حاضر مشخصات لایه خاک BRC به صورتی انتخاب شد که منطبق به خاک‌های زیرین منطقه مورد مطالعه بود که



شکل ۸. توزیع حجم سیلاب در منطقه مورد مطالعه برای قبل و بعد از به کارگیری BRC

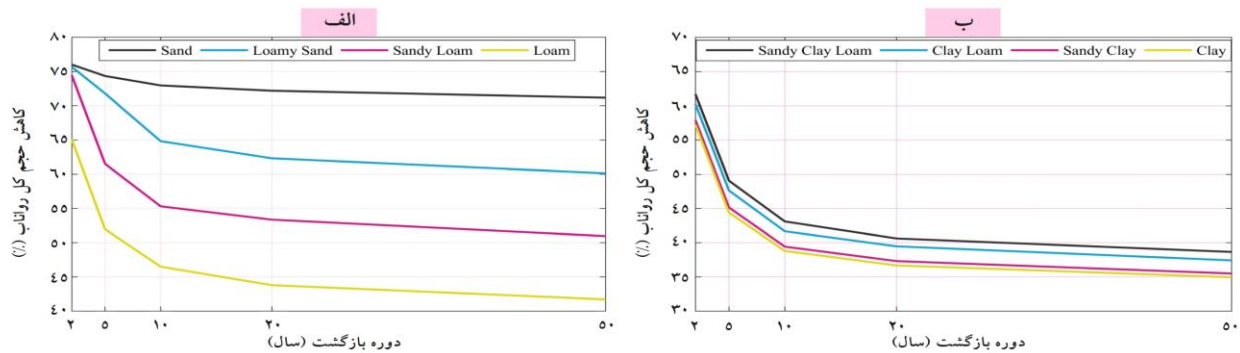
این موضوع نشان‌دهنده آن است که در بارش با دوره‌های بازگشت بیشتر نوع خاک استفاده شده در لایه خاک BRC، عملکرد BRC را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد و برعکس در بارش با دوره‌های بازگشت کمتر جنس خاک استفاده شده در BRC اهمیت کمتری دارد و عملکرد کلی BRC را کمتر تحت تأثیر می‌گذارد.

نمودار شکل ۹ امکان انتخاب نوع لایه خاک BRC برای درصد معینی از کاهش حجم رواناب که در طراحی‌های شهری مورد نیاز است را فراهم می‌کند. همچنین اگر منابع قرضه مورد استفاده در ساخت لایه خاک BRC دارای جنس مشخصی از خاک باشد، امکان تعیین میزان تأثیر این جنس خاک در عملکرد نهایی BRC فراهم می‌شود و برنامه‌ریزی‌های مورد نیاز در به‌کارگیری BRC مؤثرتر خواهد بود.

شامل نوع خاک شنی و ماسه‌ای بود و دارای هدایت هیدرولیکی اشباع زیادی بود.

تأثیر جنس لایه خاک BRC بر عملکرد هیدرولوژیک آن

شکل ۹ درصد کاهش حجم کل رواناب در نتیجه استفاده از لایه‌های خاک مختلف در BRC را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود با افزایش دوره بازگشت بارش، عملکرد در تمامی نوع خاک‌ها کاهش می‌یابد. با افزایش دوره بازگشت بارش اختلاف عملکرد بین نوع خاک‌های استفاده شده در BRC افزایش می‌یابد به طوری که در بارش با دوره بازگشت ۲ ساله درصد کاهش حجم کل رواناب برای تمامی نوع خاک‌ها بین ۵۷ تا ۷۶ درصد بود در حالی که در بارش با دوره بازگشت ۵۰ ساله این درصد بین ۳۴ تا ۷۱ درصد بود.



شکل ۹. عملکرد BRC در کاهش حجم کل رواناب برای لایه‌های خاک مختلف استفاده‌شده در BRC

وجود دارد می‌تواند موجب افزایش عملکرد BRC شود.

لازم به توضیح است که پژوهش حاضر بر اساس بارش منفرد انجام و نتایج آن بدون در نظر گرفتن وجود بارش‌های پیشین بیان شد. با این حال در فضای واقعی امکان رخ دادن بارش‌های متوالی وجود دارد که با مرطوب کردن سطح و خاک‌های حوضه مورد مطالعه، امکان کاهش عملکرد BRC را خواهد داشت. به‌صورتی که بارش پیشین امکان کاهش ظرفیت نفوذ، پر کردن ذخیره چالابی، پر کردن ذخیره آب BRC و همچنین ایجاد جریان پایه را در آبراهه‌های شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شهری دارد که تمام این موارد تشدید کننده تولید رواناب و ایجاد سیلاب در حوضه مورد مطالعه خواهند بود. بنابراین پژوهش‌های بیشتری در آینده برای بررسی تأثیر وجود بارش‌های متوالی (و نه تک رخداد) در عملکرد BRC نیاز است تا مدیران توسعه شهری اطلاعات کامل‌تری در تصمیم‌گیری برای به‌کارگیری BRC در اختیار داشته باشند.

نتیجه‌گیری

قرارگیری BRC در دو طرف هر خیابان امکان نگره‌داشت رواناب حاصل از ساختمان‌های دو طرف خیابان را در پژوهش حاضر فراهم کرد. عملکرد BRC در هیدروگراف خروجی از نقطه تخلیه منطقه مورد مطالعه کاهش ۷۶/۲ تا ۷۰/۲ درصدی در حجم کل رواناب برای بارش با دوره‌های بازگشت ۲ تا ۵۰ ساله را نشان داد. در کنترل سیلاب شهری نیز نتایج قابل‌قبولی حاصل شد به‌صورتی که به‌کارگیری BRC موجب حذف کامل سیلاب برای بارش با دوره‌های بازگشت ۲ تا ۱۰ ساله شد.

در پژوهش حاضر ضخامت لایه سطحی BRC ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد تا امکان سقوط افراد به داخل BRC کم باشد. این ضخامت ۲۰۰ میلی‌متری همانند مخزنی کوچک در دو طرف تمام خیابان‌های منطقه عمل کرد و منجر به کاهش دبی اوج و تأخیر آن شد. همچنین کاهش حجم رواناب، سیلاب و نیز افزایش نفوذ را به ارمغان آورد. با وجود این افزایش ضخامت لایه سطحی BRC در محیط‌هایی که امکان افزایش ضخامت این لایه

منابع مورد استفاده

1. Ayoubi Ayoublu, S., M. Vafakhah and H. R. Pourghasemi. 2022. Flood Risk Assessment using Multi-Criteria Decision-Making Models (MCDM) and Data Mining Methods (Case Study: Shiraz District 4). *Journal of Water and Soil Science* 26(3): 247-265 (in Farsi).
2. Barszcz, M. P. 2015. Influence of applying infiltration and retention objects to the rainwater runoff on a plot and catchment scale—case study of Służewiecki Stream subcatchment in Warsaw. *Polish Journal of Environmental Studies* 24(1): 57-65.
3. de Macedo, M. B., C. A. F. do Lago, E. M. Mendiondo and M. H. Giacomoni. 2019. Bioretention performance under different rainfall regimes in subtropical conditions: A case study in Sao Carlos, Brazil. *Journal of Environmental Management* 248: 109266.

4. Duan, W., B. He, D. Nover, J. Fan, G. Yang, W. Chen, H. Meng and C. Liu. 2016. Floods and associated socioeconomic damages in China over the last century. *Natural Hazards* 82: 401-413.
5. Eckart, K., Z. McPhee and T. Bolisetti. 2017. Performance and implementation of low impact development—A review. *Science of the Total Environment* 607: 413-432.
6. Esmaili, S. A. R. and A. Mosaedi. 2022. Study of the effect of crossover structures and roughness coefficient on depth and flood plain of the urban watercourses (Case study: Zarkesh watercourse, Mashhad). *Journal of Water and Soil Science* 26(1): 223-237 (In Farsi).
7. Guan, M., N. Sillanpää and H. Koivusalo. 2015. Modelling and assessment of hydrological changes in a developing urban catchment. *Hydrological Processes* 29: 2880-2894.
8. Hoffmann, G., L. Gardner, M. Espie and J. Dunbar. 2020. Stormwater Best Management Practices (BMPs). PP. 31-264. In :G. Brown, S. Drew and S. Schwechten (Eds.), *Stormwater Management Guidebook*, Department of Energy and Environment, District of Columbia.
9. Hu, M., T. Sayama, X. Zhang, K. Tanaka, K. Takara and H. Yang. 2017. Evaluation of low impact development approach for mitigating flood inundation at a watershed scale in China. *Journal of Environmental Management* 193: 430-438.
10. Huang, C. L., N. S. Hsu, H. J. Liu and Y. H. Huang. 2018. Optimization of low impact development layout designs for megacity flood mitigation. *Journal of Hydrology* 564: 542-558.
11. Hunt, W., J. Smith, S. Jadlocki, J. Hathaway and P. Eubanks. 2008. Pollutant removal and peak flow mitigation by a bioretention cell in urban Charlotte, NC. *Journal of Environmental Engineering* 134: 403-408.
12. Joksimovic, D. and Z. Alam. 2014. Cost efficiency of low impact development (LID) stormwater management practices. *Procedia Engineering* 89: 734-741.
13. Li, C., M. Liu, Y. Hu, T. Shi, X. Qu and M. T. Walter. 2018. Effects of urbanization on direct runoff characteristics in urban functional zones. *Science of the Total Environment* 643: 301-311.
14. Mahmoud, A., T. Alam, M. Y. A. Rahman, A. Sanchez, J. Guerrero and K. D. Jones. 2019. Evaluation of field-scale stormwater bioretention structure flow and pollutant load reductions in a semi-arid coastal climate. *Ecological Engineering* 142: 100007.
15. Mani, M., O. Bozorg-Haddad and H. A. Loáiciga. 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: 727-744.
16. Movahedinia, M., J. M. V. Samani, F. Barakhasi, S. Taghvaeian and R. Stepanian. 2019. Simulating the effects of low impact development approaches on urban flooding: a case study from Tehran, Iran. *Water Science and Technology* 80: 1591-1600.
17. Nasiri, S., H. Ansari and A. N. Ziaei. 2022. Investigation of integrated modeling of surface water- ground water using SWAT- MODFLOW model. *Journal of Water and Soil Science* 26(1): 101-115 (In Farsi).
18. Noori Khaje Balagh, H. and F. Mousavi. 2021. Effects of climate change on quantity and quality of urban runoff in a part of Karaj watershed based on RCP scenarios. *Journal of Water and Soil Science* 25(3): 59-78 (In Farsi).
19. Rossman, L. and W. Huber. 2016. Surface runoff and infiltration. PP. 51-127. In : U. S. EPA., *SWMM Reference Manual Volume I—Hydrology*, United States Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, D.C.
20. Rossman, L. and W. Huber. 2016. *SWMM Reference Manual Volume III—Water Quality*. PP. 97-140. In :Chapter 6-Low Impact Development Controls, United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
21. Schubert, J. E., M. J. Burns, T. D. Fletcher and B. F. Sanders. 2017. A framework for the case-specific assessment of Green Infrastructure in mitigating urban flood hazards. *Advances in Water Resources* 108: 55-68.
22. Stovin, V., G. Vesuviano and H. Kasmin. 2012. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology* 414: 148-161.
23. Swathi, V., K. S. Raju and A. P. Singh. 2018. Application of storm water management model to an urban catchment. *Hydrologic Modeling* 81: 175-184.
24. Trinh, D. and T. Chui. 2013. Assessing the hydrologic restoration of an urbanized area via an integrated distributed hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 4789-4801.
25. Winston, R. J., J. D. Dorsey and W. F. Hunt. 2016. Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three bioretention cells in clay soils in northeast Ohio. *Science of the Total Environment* 553: 83-95.
26. Wu, J., R. Yang and J. Song. 2018. Effectiveness of low-impact development for urban inundation risk mitigation under different scenarios: a case study in Shenzhen, China. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18: 2525-2536.
27. Zope, P., T. Eldho and V. Jothiprakash. 2017. Hydrological impacts of land use–land cover change and detention basins on urban flood hazard: a case study of Poisar River basin, Mumbai, India. *Natural Hazards* 87: 1267-1283.

Bio-Retention Cells Performance in Restoring the Hydrologic Cycle of Highly Urbanized Catchments

M. Mehri¹, S. M. Hashemi Shahedani^{1*}, S. Javadi¹ and M. Movahedinia²

(Received: May 13-2022 ; Accepted: July 15-2023)

Abstract

Rapid urbanization is responsible for impervious area increases and more runoff generation in urbanized catchments. Higher runoff volume in urbanized catchments leads to higher flood risk. One of the methods of runoff management is low impact development (LID). Bio-retention cell (BRC) is one of the infiltration-based LID practices that allows restoring the pre-development hydrologic cycle. However, the overall hydrologic performance of BRCs can vary depending on different urban environments. In this study, the hydrologic performance of BRC in terms of runoff and flood reduction was investigated in a highly urbanized area in the east of Tehran, Iran. The SWMM model was used to evaluate the performance of BRC. The results showed that BRC for rainfall with a return period of 2 to 50 years reduced the total runoff volume by 76.2% to 70.2% and the peak discharge by 65.9% to 36.4%, respectively. Also, for rainfall with a return period of 2 to 50 years, BRC resulted in 15.2% to 27.5% infiltration of rainfall in the study area, respectively. This study demonstrates that BRC can help restore the natural hydrologic cycle of urbanized catchments by reducing runoff and increasing infiltration.

Keywords: Urban flood, Low impact development, Bio-retention cell, SWMM

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Department of Water Resources Management, Pishgaman Parseh Consultant Engineering Company, Tehran, Iran.

*: Corresponding author, Email: mehdi.hashemy@ut.ac.ir