پژوهش‌های محیط‌زیست، سال ۶، شماره ۱۱، پاییز و زمستان ۱۳۹٤، از صفحه ۵۱ تا ۶۲

توسعه مدل شبیه‌سازی– بهینه‌سازی با استفاده از بهترین راه‌کارهای مدیریتی در کنترل رواناب شهری

امیر بهروزی[۱]، مهرداد نظریها[۲]، محمدحسین نیک سخن*[۳]

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی محیطزیست، دانشکده محیطزیست، دانشگاه تهران
۲ استادیار گروه مهندسی محیطزیست، دانشکده محیطزیست، دانشگاه تهران
۳ استادیار گروه مهندسی محیطزیست، دانشکده محیطزیست، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۶/۲۳؛ تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۲/۰۹)

چکیده

در این مقاله، به منظور شبیه‌سازی کمیت و کیفیت وضعیت موجود نهر فیروزآبادی، حجم جریان و آلاینده‌های موجود در نهر از نرم‌افزارEPA SWMM و از تعدادی بهترین راه‌کارهای مدیریتی نظیر جوی‌باغچه و روسازی نفوذپذیر استفاده شده است. هدف از طراحی این نوع راه‌کارهای مدیریتی، کاهش حجم رواناب، کاهش پیک جریان، کاهش آلودگی‌های با منبع غیرمتمرکز از طریق تبخیر و تعرق، نفوذ آب و تصفیه یا عملیات بیولوژیکی و شیمیایی می‌باشد. از آنجایی که به نظر می‌رسد هر یک از این راه‌کارها به‌تنهایی قادر به بهبود قابل‌توجهی در کمیت رواناب نباشند، باید با ترکیب نمودن آن‌ها، مناسب‌ترین ترکیب که بالاترین اثربخشی را درکنترل حجم رواناب داشته باشد را به‌دست آورد. در این تحقیق، از دو مدل اصلی استفاده شده است: مدل شبیه‌سازی بارش– رواناب و مدل بهینه‌سازی. مدل SWMM شبیه‌سازی کمی و کیفی رواناب را انجام می‌دهد و مدل بهینه‌سازی MOPSO جانمایی BMPs را به منظور کاهش دبی رواناب در آن بهینه می‌کند. نتایج مدل شبیه‌سازی– بهینه‌سازی نشان می‌دهند که این راه‌کارها توانایی کاهش ۸ تا ۱۵ درصد دبی پیک خروجی از حوزه برای بارش با دوره بازگشت ۵ ساله را دارند.

کلید واژه‌ها: بهترین راه‌کارهای مدیریتی، رواناب شهری، نهر فیروزآبادی، SWMM، MOPSO

*نویسنده مسئول: Email: niksokhan@ut.ac.ir

سرآغاز

در طول دو دهه گذشته، برنامه‌های تحقیقاتی دلایل اصلی آلودگی آب در بیشتر مناطق شهری را ورود رواناب شهری به درون منابع آب ذکرکرده‌اند. برای حل مشکلات رواناب شهری باید از اقدام های اصلاحی استفاده‌کرد. این امر، با کاربرد BMPs[۱] امکان‌پذیر می‌باشد. BMPs به‌عنوان تکنولوژی‌های جدید مؤثر برای کاهش حرکت آلاینده‌ها از زمین به آب‌های سطحی یا زیرزمینی، جهت حفظ کیفیت آب با در نظر گرفتن محدودیت‌های محیطزیستی مطرح شده‌اند. در این مقاله، تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی رواناب شهری به لحاظ وجود BMPs و با استفاده از نرم‌افزار SWMM[۲] پیشنهاد شده که در این شبیه‌سازی، معیارهای کمی و کیفی رواناب شهری در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب، برآورد و مقایسه نمودن ویژگی های کمی رواناب در ترکیب های مختلف BMPs به منظور حداقل سازی دبی رواناب شهری در نهر فیروزآبادی واقع در جنوب غربی شهر تهران هدف اصلی قرار گرفته است. (Denault et al., 2006) از مدل SWMM برای بررسی آثار افزایش شدت باران بر دبی اوج طراحی و ارزیابی ظرفیت زیرساخت‌ها بر اساس سناریوهای استخراج شده استفاده‌کردند. مطالعه آن‌ها نشان داد که افزایش شدت باران کوتاه‌مدت اثر چندانی بر سیستم رودخانه میشن/ وگ[۳] ندارد، در حالی‌که نفوذناپذیری معادل آن می‌تواند آثار تخریبی بیشتری بر کیفیت نهر داشته باشد. (Temprano et al., 2006) کاربرد مدل SWMM را به منظور پیش‌بینی آلودگی در زمان بارندگی در یک حوزه آبخیز با سیستم فاضلاب مخلوط در سانتاندر[۴] اسپانیا مورد بررسی قرار داده و روند کالیبراسیون و تأیید اعتبار مدل را طی چند رخداد باران ارایه داده‌اند. (Stroschein, 2007 & Graupensperger) در مقاله ای به لزوم استفاده از GIS برای مکان‌یابی و امکان‌یابی ایجاد BMP های سازه‌ای و غیرسازه‌ای پرداختند. BMP هایی که در این تحقیق استفاده شد ترکیبی از تالاب‌ها، حوضچه‌های نفوذ وکانال‌های طبیعی موجود می‌باشد. در این تحقیق، مناطق موثر در کنترل رواناب شهری تعیین و همچنین به میزان خطرپذیری مناطق گوناگون مشخص شد. (Obropta & Kardos, 2007) در رابطه با انواع مدل‌های کمی و کیفی شبیه‌سازی رواناب مقاله‌ای تحت عنوان «مروری برمدل‌های کمی و کیفی رواناب شهری رویکردهای قطعی، غیرقطعی، ترکیبی» نوشته و به‌طور جامع‌ای به بیان خصوصیات مربوط به آن‌ها پرداخته‌اند که می‌توان به‌عنوان یک مرجع مفید در انتخاب انواع آن‌ها استفاده‌کرد. (Dong et al., 2008) کاربرد مدل SWMM را برای شبیه‌سازی هیدرولوژی رواناب و کیفیت آب به روش زیر مورد بررسی قرار دادند. یک سقف را به‌عنوان نمونه سطح نفوذناپذیر شهری در نظر گرفته و با پایش چندین رخداد بارندگی، مهم ترین پارامترهای مدل شامل ذخیره سطحی، ضریب مانینگ، حداکثر تجمیع آلودگی، ثابت نرخ تولید، میزان آبشویی مواد و توان شستشو را به‌دست آوردند. (Moglen & Mejia, 2009) به بررسی اثر توسعه شهرنشینی و کاهش مناطق نفوذناپذیر پرداخت و با توجه به یک مدل شبیه سازی رواناب و بهینه کردن کاربری اراضی، تأثیر آن بر روی کمیت و کیفیت رواناب را بررسی کردند. روش پیشنهادی بر روی بخشی از منطقه ۱۰ شهرداری تهران آزموده شده است. (ثابتی و تجریشی، ۱۳۹۰) به مدل‌سازی کمی رواناب‌های شهری و بررسی تاثیر نفوذپذیری بر دبی سیلاب در مسیل مقصودبیگ- صدر پرداختند. در نهایت سه سناریو برای کاهش دبی سیلابی تحت بارش با دوره بازگشت‌های ۵، ۱۰ و ۲۵ ساله تعریف شد که بهترین سناریو ترکیب ایجاد جوی‌باغچه و استفاده از پوشش های متخلخل برای معابر بود.

مواد و روش‌ها

در این بخش به بررسی اجمالی تئوری‌های نرم‌افزار EPA SWMM و الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات (MOPSO)[۵] و سپس به روش پژوهش پرداخته می‌شود.

• معرفی مدل شبیه‌سازی بارش رواناب EPA SWMM VERSION 5.0

در این تحقیق، از نسخه ۵ نرم‌افزار EPA SWMM به‌منظور شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفی رواناب استفاده شده است. در شبیه‌سازی پارامترهای نفوذ منطقه از روش هورتون و به‌منظور شبیه‌سازی کیفی افزایش تدریجی آلاینده[۶] از تابع توانی و برای شستشوی مواد[۷] از تابع نمایی استفاده شده است. مدل هورتون، یک مدل تجربی است و شکل معمول آن زمانی کاربرد دارد که شدت بارندگی از شدت نفوذ بیشتر باشد ولی شکل توسعه یافته آن در EPA SWMM این نقص را بر طرف کرده است (فلاح‌تفتی و شریفی، ۱۳۸۴).

تابع تشکیل یا تجمع آلاینده برای یک کاربری معلوم، مقداری را مشخص می‌کند که یک آلاینده بر روی سطح زمین در طول دوره آب و هوای خشک اضافه شده و در زمان وقوع رواناب برای آبشویی در دسترس است. آبشویی عبارت از: فرایند فرسایش، حرکت و یا انحلال آلاینده از سطح زیرحوزه در طول دوره آب و هوای مرطوب می‌باشد (Department of Civil and Environmental Engineering, 2009)

این مدل مشخصه‌های بسیاری از فرایندهای هیدرولوژی و کیفیت آب شامل بارش، ذوب برف، رواناب سطحی، جریان زیرسطحی، مسیر جریان و تصفیه جریان را شبیه‌سازی می‌کند. همچنین این مدل قادر است غلظت جامدات معلق، نیترات و فسفات و دیگر آلاینده‌های موجود در رواناب را در طول مسیر پیش‌بینی نماید (شم‌آبادی و تجریشی، ۱۳۸۶).

- **بررسی اجمالی الگوریتم MOPSO**

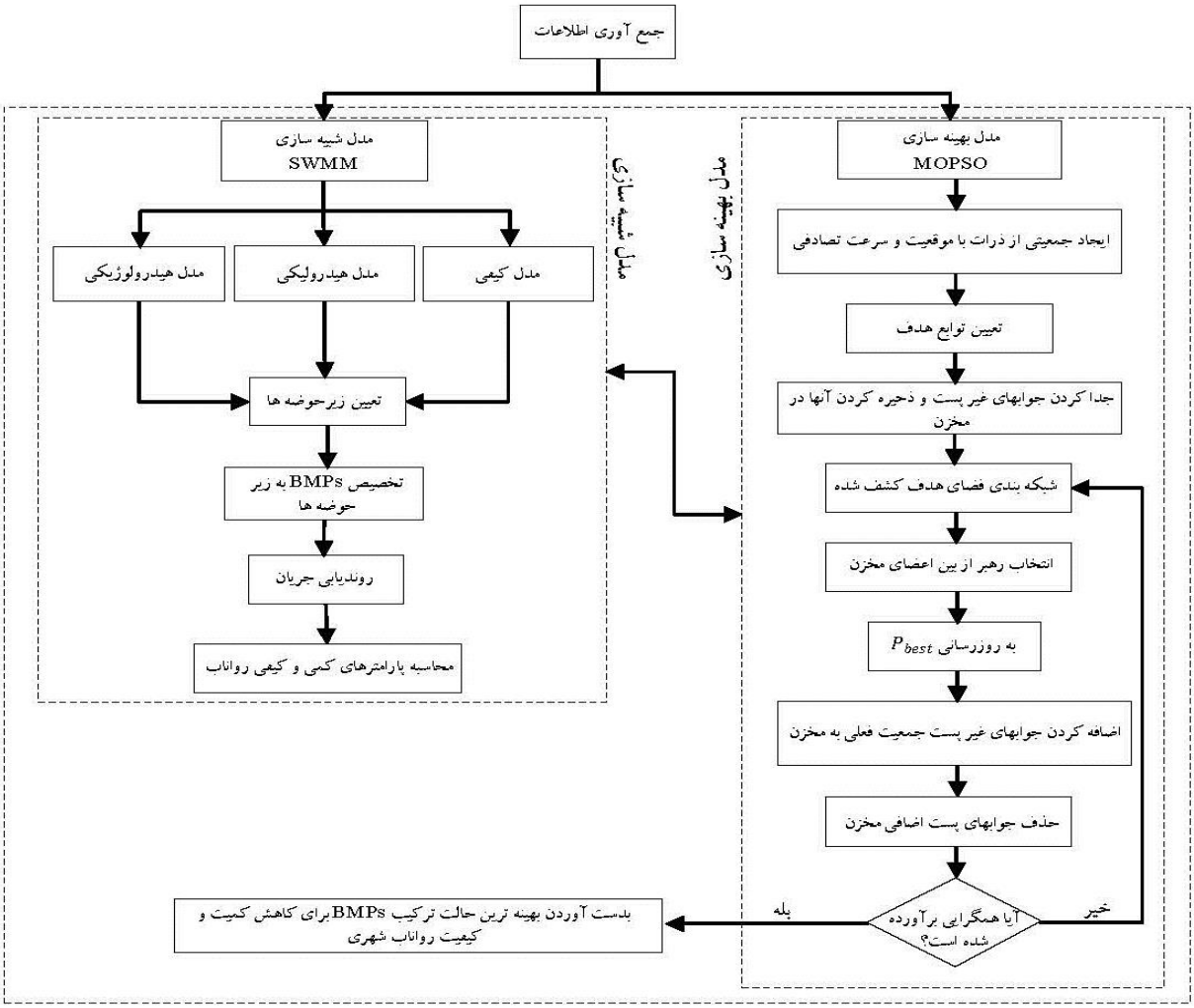
الگوریتم MOPSO به‌عنوان الگوریتم انتخابی، توانایی حل مسایل با ابعاد بزرگ و تعداد متغیرهای زیاد را داراست. از سوی دیگر، مسایل مورد توجه در مدیریت منابع آب از مسایلی هستند که اغلب دارای تعداد متغیرهای زیاد هستند و بهینه‌سازی توابع هدف غیرخطی که در بعضی موارد در تضادی با یکدیگر نیز هستند، در آن‌ها مطرح است. MOPSO نیز با ایجاد یک جمعیت تصادفی از افراد شروع می‌شود که در این جا به‌عنوان یک گروه از ذره‌ها خوانده می‌شوند. مانند آن چه که در همه الگوریتم‌های تکاملی وجود دارد، هر ذره در گروه، مجموعه مختلف از پارامترهای نامشخص است که باید مقادیر بهینه آن‌ها تعیین شود. در واقع هر ذره یک نقطه از فضای راه حل را ارایه می‌دهد.

اساس کار این روش بر مبنای استفاده از یک آرشیو برای ذخیره‌ی جواب‌های غیرپست و استفاده از شبکه سازگارشونده برای انتخاب بهینه مطلق[۸] است. در الگوریتم مذکور، جواب‌های غیرپست در یک آرشیو خارجی ذخیره می‌شوند. هدف از استفاده از این آرشیو، حفظ یک سابقه تاریخی از جواب‌های غیرپست است که در نسل‌های مختلف پیدا شده‌اند. در شروع کار الگوریتم که آرشیو خالی است اعضای جمعیت بر اساس یک مقایسه تک به تک نسبت به هم سنجیده می‌شوند و آن جوابی که بر همه غلبه داشت به‌عنوان اولین جواب غیرپست وارد آرشیو می‌شود. در مرحله بعد، چنان‌چه جواب غیرپستی بخواهد وارد آرشیو شود باید با جواب موجود در آرشیو مقایسه شود. اگر بر آن غلبه داشت وارد می‌شود وگرنه رد می‌شود و در مراحل بعدی چنان‌چه جوابی که می‌خواهد وارد شود. بر برخی جواب‌ها غلبه داشته باشد آن‌ها را از آرشیو حذف می‌کند و جای آن‌ها را می‌گیرد. در صورتی که جواب جدیدی که می‌خواهد وارد آرشیو شود، بر هیچ یک از جواب‌های داخل آرشیو غلبه نداشته باشد و توسط هیچ یک از آن‌ها نیز مغلوب نشود، به شرط پر نبودن آرشیو وارد آن می‌شود. در صورت پر بودن آرشیو با استفاده از فرایند شبکه سازگارشونده یکی از جواب‌های داخل آرشیو حذف شده و جواب جدید جای آن را می‌گیرد. بیشتر نسخه‌های MOPSO از آرشیو خارجی با اندازه محدود استفاده می‌کنند. دلیل محدود کردن ظرفیت آرشیو خارجی کنترل پیچیدگی محاسباتی است. به عبارت دیگر، هر چه ظرفیت آرشیو خارجی بیشتر باشد فرایند یافتن بهینه مطلق مشکل‌تر خواهد بود. بنابراین، ناگزیر از کنترل ظرفیت آرشیو خارجی هستیم. شایان ذکر است که ذرات به سوی نواحی نامتراکم‌تر حرکت می‌کنند. بنابراین، از آن جواب غیرپستی که مقدار فاصله ازدحام بیشتری دارد استفاده می‌کنیم. در آرشیو خارجی جواب‌های غیرپست را بر اساس فاصله ازدحام و به صورت نزولی مرتب می‌نماییم. آن‌گاه در هر مرحله از چند جواب بالای آرشیو یکی را به طور تصادفی انتخاب کرده و به‌عنوان بهینه مطلق در نظر می‌گیریم. این ترتیب نزولی در آرشیو خارجی در جای دیگر نیز به یاری ما می‌آید و آن هنگامی است که آرشیو پر باشد. در چنین مواقعی، می‌توان از جواب‌های غیرپست پایین آرشیو یکی را به صورت تصادفی انتخاب نمود و جواب غیرپست جدید را که در تکرار جدید پیدا شده است، جایگزین آن کرد.

روش پژوهش

در این بخش، به بررسی و تشریح مراحل صورت گرفته جهت شبیه سازی کمی و کیفی و بهینه سازی کمی رواناب شهری توسط BMPهای مورد استفاده در این مطالعه پرداخته شده است. بدین منظور، روند مدلسازی کمی و کیفی و در راستای آن اطلاعات ورودی به نرم‌افزار SWMM مورد بررسی قرارگرفته است. ساختار کلی مراحل انجام‌کار در شکل (۱) نمایش داده شده است.

در این مقاله، ۳ سناریو برای شبیه‌سازی هیدرولیکی کمیت و کیفیت رواناب‌ها در نظر گرفته شده است. این سناریوها به شرح زیر است:



شکل (۱): ساختارکلی روش انجام‌کار

- ✓ سناریو اول: خیابان ها و معابر به شکل موجود بوده و در هیچ یک BMP استفاده نشده است.
- ✓ سناریو دوم: در نیمی از خیابان‌های اصلی همه زیر حوزه ها جوی‌باغچه استفاده شده است.
- ✓ سناریو سوم: در نیمی از خیابان‌های اصلی همه زیر حوزه ها روسازی نفوذپذیر استفاده شده است.

ویژگی‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی رواناب شهری و مشخصات کیفی جامدات معلق کل، نیتروژن‌کل و فسفرکل بدون وجود BMPs و در حضور آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار SWMM مدل شدند. دوره بازگشت بارندگی جهت طراحی در این تحقیق ۵ ساله در نظر گرفته شده است. روابط شدت- مدت- فراوانی[۹] بارندگی بر اساس طرح جامع با دوره بازگشت ۵ ساله به شرح زیر است:

$$I = 168.7\ T^{-0.646} \quad (۱)$$

I شدت بارش بر حسب میلی‌متر بر ساعت

T دوره بازگشت بارندگی بر حسب سال

لازم به ذکر است مدت تداوم بارندگی ۱۵ دقیقه در نظر گرفته شده است.

داده‌های ورودی به مدل SWMM

• مطالعات هواشناسی

پس از بررسی مشخصات کلیه ایستگاه‌های سینوپتیکی استان تهران جهت بررسی پارامترهای هواشناسی منطقه ۱۰ تهران، از آمار ایستگاه سینوپتیک فرودگاه مهرآباد به ارتفاع ۱۱۹۰/۸ از سطح دریاهای آزاد طی سال‌های ۱۹۵۱ الی ۲۰۰۵ میلادی استفاده شده است. نزدیک‌ترین ایستگاه‌های سینوپتیکی نزدیک

به منطقه طرح، ایستگاه فرودگاه مهرآباد می‌باشد. این در حالی است که رقوم ارتفاعی منطقه طرح از ۱۱۲۷ الی ۱۲۰۷ متر می‌باشد. بنابراین، ایستگاه سینوپتیکی مهرآباد نزدیک‌ترین ایستگاه به محدوده مورد مطالعه می‌باشد و از لحاظ ارتفاعی نیز بیشترین همگنی با این منطقه را دارد.

- **مشخصات ورودی به زیرحوزه‌ها**

زیرحوزه ها، مساحت هایی از حوزه هیدرولوژیکی مورد نظر هستند که از نظر ویژگی‌های فیزیوگرافی مانند: شیب، نوع خاک و در نتیجه میزان نفوذ و همچنین نقطه خروجی به آبراهه مورد بررسی، مشابه هستند. درصد نفوذناپذیری، مقدار ضریب مانینگ برای سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر و مقدار افت بعلت ذخیره[۱۰] برای سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر از مشخصات ورودی به زیرحوزه‌ها هستند که برخی از آن‌ها در جدول (۱)، آمده است.

- **معرفی بهترین راه‌کارهای مدیریتی**

در این بخش، به توصیف مشخصات دو نوع از بهترین راه‌کارهای مدیریتی توسط نرم‌افزار SWMM پرداخته می‌شود.

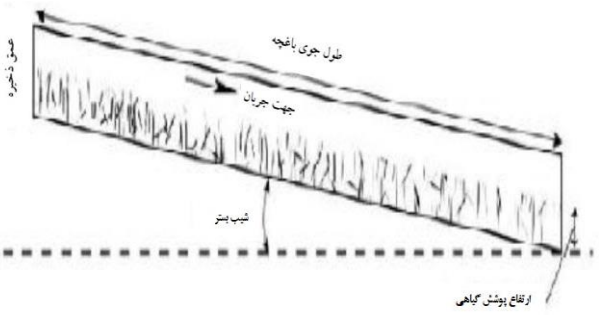
جوی‌باغچه (Swale)

جوی‌باغچه یا آبراهه گیاه‌کاری شده،کانال خاکی عریض و کم‌عمقی است که برای جلوگیری از فرسایش و مقابله با سیل،گیاه‌کاری شده است. شیب کم آن، نفوذپذیری را افزایش می‌دهد و بخش زیادی از آلودگی آب نیز زدوده می‌شود. (کاظمی و تجریشی، ۱۳۹۰)

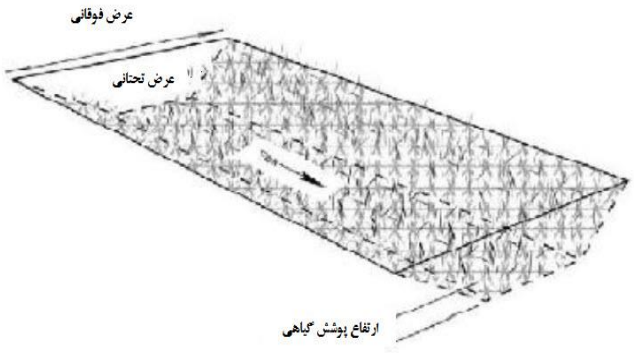
در اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی چند پارامتر (نیترات، فسفرکل، کدورت و TSS) عملکرد جوی‌باغچه خوب ارزیابی شده است. (قنبری و تجریشی، ۱۳۹۰) مقطع طولی و دید سه بعدی جوی‌باغچه فرض شده در نرم‌افزار SWMM در شکل‌های (۲ و۳) نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات کلیه زیرحوزه‌ها

نام زیرحوزه‌ها	S11 تا S70
درصد نفوذناپذیری	۹۰
ضریب مانینگ سطح نفوذناپذیر	۰/۰۱
ضریب مانینگ سطح نفوذپذیر	۰/۱
افت به علت ذخیره (سطوح نفوذناپذیر)	۱/۵
افت به علت ذخیره (سطوح نفوذپذیر)	۴
کاربری غالب	مسکونی با تراکم بالا
معادله نفوذ	هورتون



شکل (۲) : مقطع طولی جوی‌باغچه فرضی



شکل (۳): دید سه بعدی جوی‌باغچه فرضی

داده‌های مورد نیاز برای مدل کردن جوی‌باغچه در نرم‌افزار SWMM شامل این موارد است:

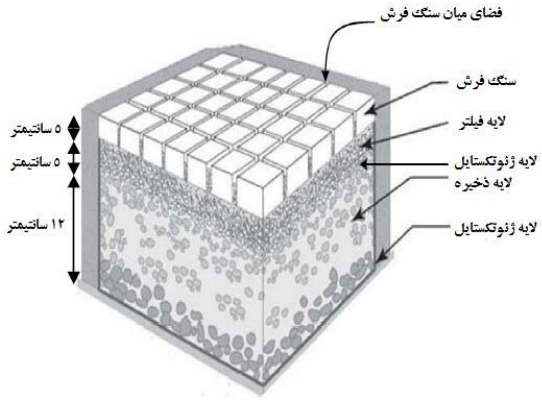
- عمق ذخیره (میلی‌متر): در جوی‌باغچه، عمق ذخیره همان ارتفاع مقطع ذوزنقه‌ای شکل است که در این تحقیق ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.
- شیب طولی بستر (بر حسب درصد): بر اساس شیب خیابان ۱/۲٪ در نظر گرفته شده است.
- عرض سطح کانال ذوزنقه‌ای (متر): عرض سطح جوی باغچه‌ها بر اساس فضای موجود برای اجرای آنها برابر ۱/۵ متر در حاشیه خیابان‌های اصلی در نظر گرفته شده است.
- شیب جانبی جوی‌باغچه: به‌منظور عملکرد مناسب جوی‌باغچه شیب جانبی ۳:۱ در نظر گرفته شده که با توجه به آن

عرض‌کف جوی باغچه ۱/۵ متری برابر با ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد.

- طول جوی‌باغچه (متر): طول جوی‌باغچه بر اساس طول خیابان‌های اصلی هر زیرحوزه تعیین می‌شود.

روسازی‌های نفوذپذیر (Porous Pavements)

این نوع روسازی‌ها هنگامی که بر روی سطح زمین قرار می‌گیرند، یک فضای خالی بین آن‌ها به وضوح قابل رویت می‌باشد که آب می‌تواند از میان آن‌ها نفوذ کند. این فضاهای باز در حدود ۸ تا ۲۰ درصد از مساحت کل سطح هستند که به طور معمول با شن پر می‌شود. کل روسازی از یک لایه فیلتر ۳۸ تا ۷۶ میلی‌متری و یک لایه ذخیره و یک لایه سنگ‌فرش تشکیل شده است. سرعت نفوذپذیری در خاک زیر لایه ذخیره باید به‌گونه‌ای باشد تا این که تمام رواناب جمع شده در لایه ذخیره بعد از ۲۴ تا ۴۸ ساعت تخلیه شود. (Collins, 2007) در شکل (۴)، نمایی از لایه‌های مختلف روسازی نفوذپذیر نشان داده شده است.



شکل (۴): نمایی از لایه‌های مختلف روسازی نفوذپذیر (Smith, 2006)

داده‌های مورد نیاز برای مدل کردن روسازی‌های نفوذپذیر در نرم‌افزار شامل این موارد است:

- عمق ذخیره سطحی (میلی‌متر): این پارامتر برابر صفر در نظر گرفته شده است.
- شیب سطحی (بر حسب درصد): بر اساس شیب خیابان ۱/۲ ٪ می‌باشد.
- ضخامت روسازی سنگ‌فرشی (میلی‌متر): ضخامت این نوع روسازی ۵۰ میلی‌متر می‌باشد.
- ضریب سطحی نفوذناپذیر: مقدار این پارامتر ۰/۸۲ فرض شده است. (Smith, 2006)
- ارتفاع لایه ذخیره (میلی‌متر): ارتفاع این لایه برای تحمل بار هیدرولیکی ۳۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. (Smith, 2006)
- نسبت حفره‌ها به بخش جامد: از آنجایی که فضاهای باز درحدود ۸ تا ۲۰ درصد از مساحت کل سطح هستند در ا ین مقاله مقدار این پارامتر ۰/۲ فرض شده است. (Collins, 2007)
- سرعت نفوذپذیری (میلی‌متر برساعت): سرعت نفوذپذیری طراحی، ۷۵ میلی‌متر برساعت به‌عنوان پایه طراحی برای عمر مفید ۲۰ ساله روسازی در نظر گرفته می‌شود. (Smith, 2006)
- سرعت نفوذپذیری خاک پایه (میلی‌متر برساعت): مینیمم سرعت نفوذپذیری مورد نیاز برای این نوع روسازی‌ها ۱۳ میلی‌متر برساعت می‌باشد. (Smith, 2006)
- فاکتور گرفتگی: این فاکتور به‌تدریج منجر به گرفتگی منافذ و کاهش نفوذپذیری روسازی می‌شود و از رابطه زیر به‌دست می‌آید: (Rossman, 2010)

$$\text{Clogging Factor} = Yclog * Pa * CR * (1 + VR) * (1 - ISF) / (T * VR) \qquad (۲)$$

در این‌جا:

Yclog تعداد سال‌هایی که روسازی پس از شبیه‌سازی دچار گرفتگی می‌شود که در این مقاله ۱۰ سال فرض شده است.

Pa میزان بارش سالیانه که برابر ۲۶۰ میلی‌متر یا ۱۰/۲۴ اینچ در ایستگاه مهرآباد تهران می‌باشد.

CR نسبت مساحت نفوذناپذیر به مساحت روسازی نفوذپذیر که برابر ۳ در نظر گرفته شده است. (Iowa Stormwater Management Manual, 2009)

VR نسبت حفره‌ها به بخش جامد که ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

ISF ضریب سطحی نفوذناپذیر برابر ۰/۸۲ می‌باشد.

T ضخامت لایه روسازی ۵۰ میلی‌متر یا ۱/۹۷ اینچ می‌باشد.

مقدار فاکتور گرفتگی بر اساس مقادیر ذکر شده، ۱۶۸ می‌باشد.

- **مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی کمی**

براساس آن چه که قبلا توضیح داده شد، به نظر می‌رسد هر یک

از راه‌کارهای شبیه‌سازی شده در بخش قبلی به‌تنهایی قادر به بهبود قابل توجهی در کمیت رواناب نباشند. در نتیجه، با ترکیب نمودن آن‌ها باید، مناسب‌ترین ترکیب که بالاترین اثربخشی را درکنترل حجم رواناب داشته باشد را به‌دست آورد. در این بخش، با استفاده از توابع بهینه سازی به بررسی ترکیب BMP های متفاوت برای تعیین مناسب ترین سیستم کنترل کمی رواناب منطقه ده شهرداری تهران پرداخته شده است. بدین منظور باید بین الگوریتم بهینه‌سازی و نرم‌افزار شبیه‌سازی ارتباطی برقرار کرد تا با استفاده از اجرای نرم‌افزار SWMM، برازش[۱۱] متغیرهای تصمیم در محیط نرم‌افزار Matlab توسط الگوریتم بهینه‌سازی پیاده شده صورت پذیرد.

پس از ایجاد ارتباط بین الگوریتم بهینه‌سازی و نرم‌افزار شبیه سازی براساس آن چه که در بخش قبلی بیان شد، الگوریتم بهینه‌سازی MOPSO وظیفه یافتن جواب‌های غیرپست که همان مقادیر بهینه توابع هدف هستند را برعهده دارد. توابع هدف در نظرگرفته شده به منظور یافتن مناسب ترین ترکیب BMP ها برای کاهش دبی پیک یا دبی متوسط عبارتند از:

$$\text{Cost Function 1}=\text{Min } N_{BMP} \quad (۳)$$

$$\text{Cost Function 2}=\text{Min } Q_{p.out} \quad (۴)$$

N_{BMP} تعداد بهترین راه‌کارهای مدیریتی بهینه شده در زیرحوزه‌ها و $Q_{p.out}$ دبی پیک خروجی از حوزه (مترمکعب بر ثانیه)

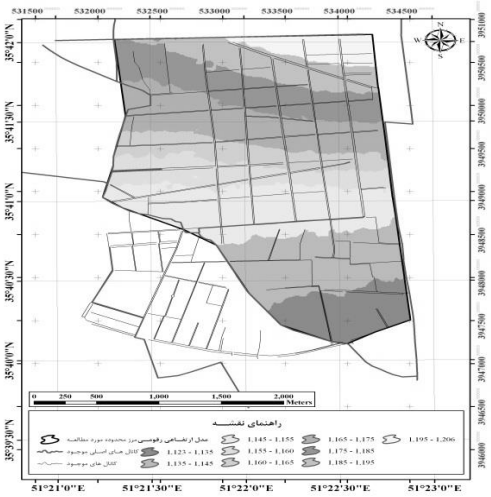
هدف مساله، به حداقل رساندن مقادیر توابع هزینه می‌باشد یعنی پاسخ‌هایی که منجر به کاهش توابع هزینه[۱۲] می‌شوند پاسخ‌های بهینه‌تری می‌باشند و از امتیاز بالاتری برخوردارند. در این مساله مساحت‌های هر دو نوع BMP مورد استفاده در هر یک از زیرحوزه‌ها به صورت ماتریس به الگوریتم بهینه‌سازی اضافه شدند. متغیرهای تصمیم وجود و یا عدم وجود این راه‌کارها در هر یک از زیرحوزه‌ها می‌باشند. از آن جایی‌که تعداد زیرحوزه‌های مدل شده در نرم‌افزار شبیه‌سازی ۶۰ می‌باشد، پس تعداد متغیرهای تصمیم نیز ۶۰ است. سپس با استفاده از حلقه[۱۳] if متغیرهای تصمیم کدگذاری شدند. در نهایت الگوریتم بهینه‌سازی منحنی تعامل بین‌گزینه های مختلف تعداد BMPs و میزان کاهش دبی پیک را به ما ارایه می‌دهد و با استفاده از دستور fscanf می‌توان تعداد BMP ها و دبی پیک محاسبه شده به ازاء هرکدام از اعضای مخزن را چاپ کرد.

منطقه مورد مطالعه

• منطقه ده شهرداری تهران

منطقه ۱۰ شهرداری تهران که از شمال به خیابان آزادی، از شرق به بزرگراه نواب، از جنوب به خیابان قزوین و از غرب به خیابان شهیدان و هرمزان و پادگان جی محدود می‌شود، مساحتی معادل ۸۰۷ هکتار دارد و کوچکترین منطقه از حیث مساحت به‌شمار می‌آید. شیب عمومی منطقه طرح از سمت شمال به جنوب و از سمت شرق به غرب می‌باشد. شیب شمال- جنوب منطقه حدود ۱/۲٪ بوده و شیب شرق به غرب منطقه کمتر از یک درصد می باشد. در شکل (۵) تصویر ماهواره‌ای منطقه ۱۰ شهرداری تهران و در شکل (۶) مدل رقومی ارتفاعی محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.

شکل (۵): تصویر ماهواره‌ای منطقه ده



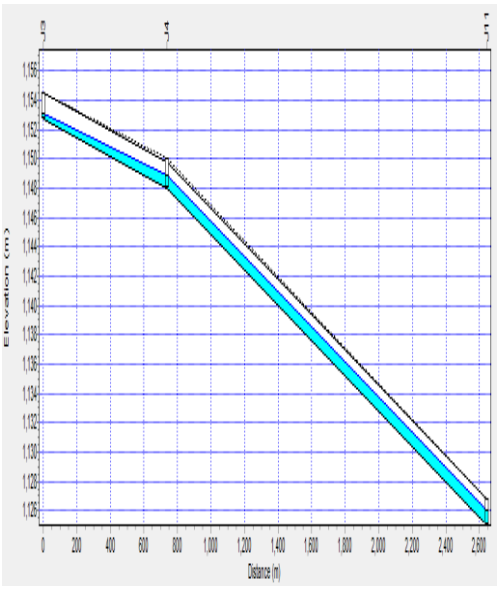
شکل (۶): DEM محدوده مورد مطالعه

- **نهر فیروزآبادی**

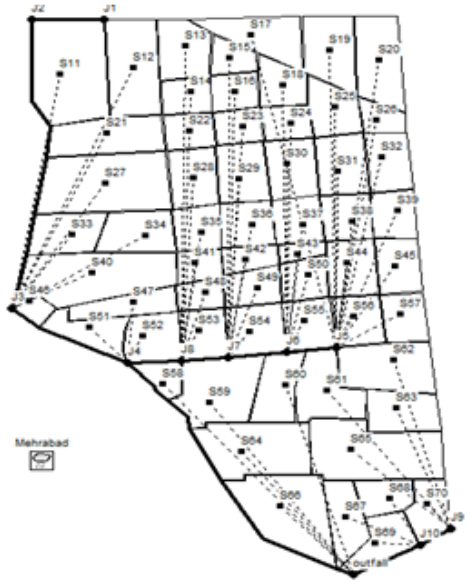
جهت مدلسازی نهر فیروزآبادی از نتایج مطالعات پیشین بهره گرفته شده است. بر اساس این مطالعات، شیب‌کانال در محل اتصال نهر فیروزآبادی و کانال قلقلی ثابت و یکنواخت به سمت پایین‌دست بوده و ابعاد آن ۱/۷۵ متر در ۲/۶ متر و به‌صورت طاق ضربی آجری و دیواره‌ها و کف بتنی می‌باشد. بر اساس حوزه‌بندی‌های صورت گرفته در بخش مطالعات هیدرولوژیکی، این زهکش منطقه‌ای به وسعت ۱۱۴۱ هکتار را زهکشی می‌نماید. بر اساس محاسبه‌های انجام شده در حد فاصل خیابان مالک‌اشتر تا خیابان کمیل سرعت آب در نهر فیروزآبادی برابر ۴/۹۴ متر بر ثانیه و درصد پرشدگی آن برابر ۸۸/۶٪ می‌باشد. بدین‌معنی که این کانال ظرفیت لازم جهت انتقال رواناب محاسبه شده را دارا می‌باشد. البته در پایین‌دست به دلیل افزایش زمان تمرکز این مقدار از رواناب فروکش کرده و دبی آن کمتر خواهد شد. ریز محاسبه‌های هیدرولیکی مربوط به نهر فیروزآبادی در جدول (۲) و پروفیل تراز آب در حد فاصل خیابان مالک‌اشتر تا خیابان قزوین در شکل (۷) نشان داده شده است. نتایج مدل‌سازی، توانایی هر یک از سناریوها را در کاهش میزان حجم رواناب و حذف غلظت جامدات معلق‌کل، نیتروژن‌کل و فسفرکل نشان می‌دهند. حوزه‌بندی انجام شده در نرم‌افزار EPA SWMM در شکل (۸)، نمایش داده شده است. کاربری غالب در این محدوده مسکونی بوده و۵۷ درصد سطح منطقه را به خود اختصاص داده است. سطحی معادل ۲۰۳ هکتار یا ۲۵ درصد منطقه به معابر و دسترسی‌ها و مابقی سطح منطقه یعنی ۱۸ درصد به سایر کاربری‌ها اعم از فضای سبز و خدمات و صنایع و کارگاه‌ها اختصاص دارد.

جدول (۲): ریز محاسبات هیدرولیکی مربوط به نهر فیروزآبادی

محدوده	مقطع کانال	جنس کانال	طول کانال (متر)	شیب کانال (متر بر کیلومتر)	سرعت آب در کانال (متر بر ثانیه)	درصد پرشدگی کانال (درصد)	ضریب مانینگ
حد فاصل خیابان مالک اشتر تا خیابان کمیل (J3-J4)	مستطیلی روبسته	بتنی	۷۳۸	۸/۸	۴/۹۴	۸۸/۶	۰/۰۱۴
حد فاصل خیابان کمیل به پایین دست (J4-Outfall)	مستطیلی روبسته	بتنی	۱۹۰۵	۸/۸	۴/۹۷	۸۹/۳	۰/۰۱۴



شکل (۶): پروفیل تراز آب بین گره‌های (J3-Outfall)



شکل (۷): نمایش زیرحوزه‌ها در نرم‌افزار EPA SWMM در نرم‌افزار EPA SWMM

یافته‌ها

در این بخش، به بررسی نتایج مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی و تاثیر هر کدام از سناریوها در دوره بازگشت ۵ ساله بر روی کمیت و کیفیت رواناب پرداخته شده است (جدول‌های ۳ و ۴).

• اثر شبیه‌سازی سناریوهای مختلف بر روی کمیت و کیفیت رواناب

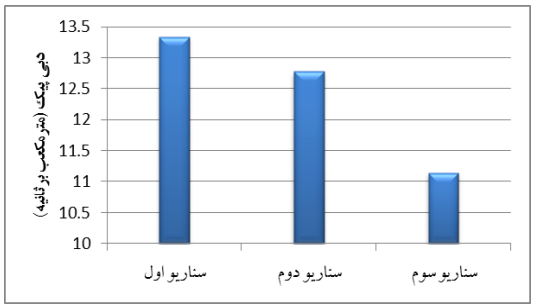
در این بخش، تاثیر وجود جوی باغچه‌ها و روسازی‌های نفوذپذیر مدل شده در بخش قبلی بر میزان کاهش دبی پیک و کیفیت آب منطقه برای بارش با دوره بازگشت ۵ ساله در قالب جدول‌ها و نمودارهای زیر نشان داده شده است.

جدول (۳): نتایج مدل‌سازی کمی با دوره بازگشت ۵ ساله در سناریوهای مختلف

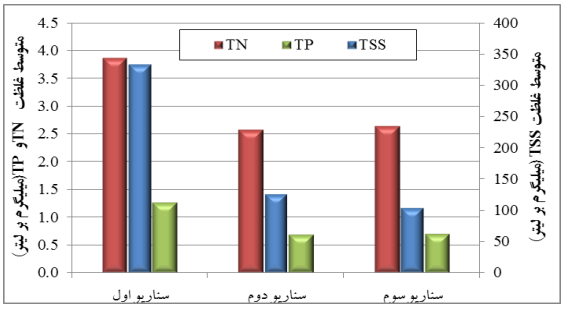
شماره گره	گره‌های منتهی به گره مذکور	حجم رواناب برای سناریو اول (متر مکعب)	دبی متوسط برای سناریو اول (متر مکعب بر ثانیه)	حجم رواناب برای سناریو دوم (متر مکعب)	دبی متوسط برای سناریو دوم (متر مکعب بر ثانیه)	حجم رواناب برای سناریو سوم (متر مکعب)	دبی متوسط برای سناریو سوم (متر مکعب بر ثانیه)
J1	-	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
J2	J1	۲۳	۰/۰۰۱۱	۲۳	۰/۰۰۱۱	۲۳	۰/۰۰۱۱
J3	J2	۷۶۶۷	۰/۳۵۴۹	۷۶۵۹	۰/۳۵۴۶	۷۱۱۹	۰/۳۲۹۶
J4	J3،J8	۲۶۱۶۱	۱/۲۱۱۲	۲۶۱۵۹	۱/۲۱۱۱	۲۳۳۸۰	۱/۰۸۲۴
J5	-	۷۱۸۳	۰/۳۳۲۵	۷۱۸۰	۰/۳۳۲۴	۶۰۸۴	۰/۲۸۱۲
J6	J5	۱۰۰۹۸	۰/۴۶۷۵	۱۰۰۹۴	۰/۴۶۷۳	۸۶۹۳	۰/۴۰۲۵
J7	J6	۱۳۵۲۶	۰/۶۲۶۲	۱۳۵۲۳	۰/۶۲۶۱	۱۱۷۹۹	۰/۵۴۶۳
J8	J7	۱۶۹۴۷	۰/۷۸۴۶	۱۶۹۴۲	۰/۷۸۴۳	۱۴۹۶۷	۰/۶۹۲۹
J9	-	۴۰۱۸	۰/۱۸۶۰	۴۰۱۶	۰/۱۸۵۹	۳۷۱۶	۰/۱۷۲۰
J10	J9	۵۴۴۹	۰/۲۵۲۳	۵۴۴۵	۰/۲۵۲۱	۴۸۵۹	۰/۲۲۴۹
Outfall	J4،J10	۳۶۱۵۸	۱/۶۷۴۰	۳۶۱۲۲	۱/۶۷۲۳	۳۲۵۳۶	۱/۵۰۶۳
شماره گره	گره‌های منتهی به گره مذکور	حجم رواناب برای سناریو اول (متر مکعب)	دبی پیک برای سناریو اول (متر مکعب بر ثانیه)	حجم رواناب برای سناریو دوم (متر مکعب)	دبی پیک برای سناریو دوم (متر مکعب بر ثانیه)	حجم رواناب برای سناریو سوم (متر مکعب)	دبی پیک برای سناریو سوم (متر مکعب بر ثانیه)
Outfall	J4،J10	۳۶۱۵۸	۱۳/۳۳۵	۳۶۱۲۲	۱۲/۷۸۱	۳۲۵۳۶	۱۱/۱۳۹

جدول (۴): نتایج مدلسازی کیفیت آب در نقطه خروجی از حوزه در سناریوهای مختلف

سناریو	متوسط غلظت TSS (میلی گرم بر لیتر)	متوسط غلظت TN (میلی گرم بر لیتر)	متوسط غلظت TP (میلی گرم بر لیتر)
اول	۳۳۳/۵۹	۳/۸۸	۱/۲۷
دوم	۱۲۶/۴۴	۲/۵۹	۰/۶۹
سوم	۱۰۴/۳۱	۲/۶۵	۰/۷۱



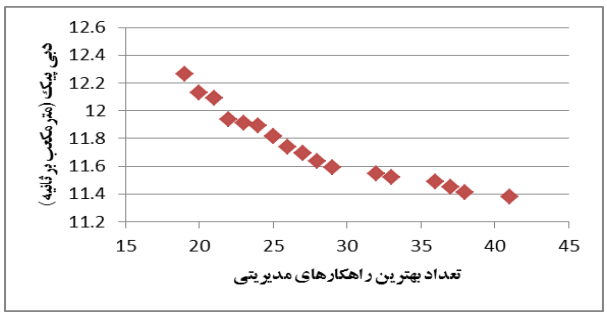
شکل (۸): مقایسه دبی پیک در نقطه خروجی از حوزه برای سناریوهای متفاوت



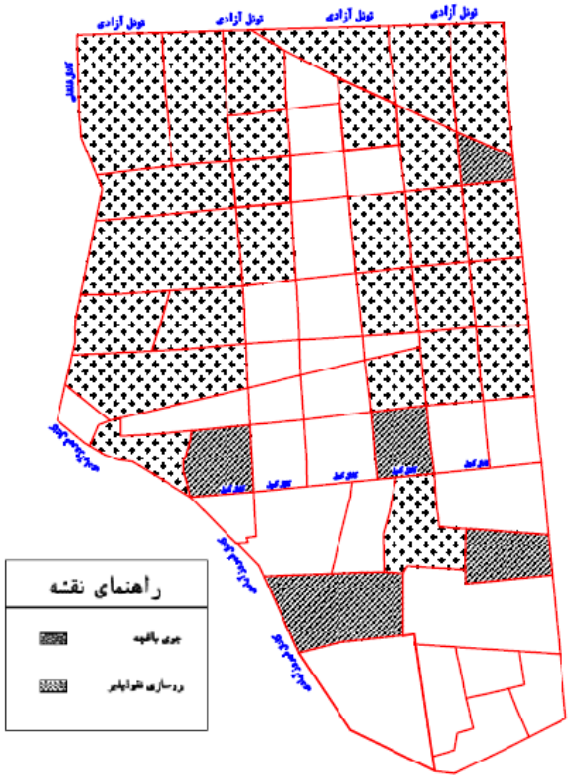
شکل (۹): مقایسه متوسط غلظت آلاینده‌ها در نقطه خروجی از حوزه

- **اثر مدل بهینه‌سازی در سناریوهای مختلف بر روی کمیت رواناب**

پس از اجرای مدل بهینه سازی، جانمایی BMPs در سطح ناحیه به‌منظور کاهش دبی پیک خروجی از حوزه برای بارش با دوره بازگشت ۵ ساله به‌دست آمد. منحنی تعامل بین گزینه های مختلف تعداد BMPs و میزان کاهش دبی پیک و همچنین برای نمونه، ترکیب ۳۲ تایی BMP ها برای بارندگی با دوره بازگشت ۵ سال در شکل‌های (۱۱ و ۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): منحنی تعامل بین‌گزینه‌های مختلف تعداد BMPs و میزان کاهش دبی پیک



شکل (۱۱): منحنی تعامل بین‌گزینه‌های مختلف تعداد BMPs و میزان کاهش دبی پیک

بحث و نتیجه‌گیری

پس از تحلیل نتایج شبیه‌سازی، مشخص شد که روسازی های نفوذپذیر در قیاس با جوی‌باغچه‌ها از کارایی بیشتری در کاهش دبی پیک و متوسط غلظت TSS خروجی از حوزه در بارش با دوره بازگشت ۵ ساله برخوردارند. لازم به ذکر است، با افزایش دوره بازگشت بارندگی از توانایی روسازی های نفوذپذیر درکاهش حجم رواناب و میزان دبی پیک کاسته می شود. نتایج جدول‌های (۳ و ۴)، نشان می دهند روسازی های نفوذپذیر توانایی کاهش۱۶

درصدی (۲/۲ مترمکعب برثانیه) دبی پیک را دارند در حالی‌که جوی‌باغچه‌ها تاثیر بسیار ناچیزی در کاهش دبی پیک دارند. همچنین، نتایج حاصل شده نشان می دهند به کار بردن جوی‌باغچه و روسازی نفوذپذیر به ترتیب باعث کاهش ۶۲ درصدی و ۶۹ درصدی جامدات معلق کل شده در حالیکه هر دو نوع BMP قادر به کاهش ۳۳ درصدی نیتروژن‌کل و ۴۵ درصدی فسفرکل در متوسط غلظت آلاینده‌ها می‌شوند. نتایج مشابهی در مقاله (سلطانی و تجریشی، ۱۳۸۷) به دست آمده که نشان می‌دهد با افزایش سطح و گستردگی بکارگیری جوی باغچه، تغییر قابل توجهی در کاهش میانگین غلظت آلاینده‌هایی نظیر نیتروژن‌کل و فسفرکل و دبی رواناب روی نمی‌دهد. اما، بارهای سالانه خروجی از حوزه کاهش می‌یابند. از آنجایی که به نظر می‌رسید هر یک از این راه‌کارها به تنهایی قادر به بهبودکمیت رواناب نباشند، تصمیم برآن شد تا با ترکیب نمودن آن‌ها، مناسب‌ترین ترکیب‌که بالاترین اثربخشی را درکنترل حجم رواناب داشته باشد را به‌دست آورد. نتایج مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی و منحنی تعامل ترسیم شده بین ابعاد گزینه های مختلف بهترین راه کارها و کاهش دبی پیک، توانایی روش پیشنهادی در برآورد ویژگی‌های کمی رواناب با وجود ترکیب‌های مختلف BMPs را نشان می‌دهند. پس از اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، جانمایی BMPs در سطح ناحیه به منظور کاهش دبی پیک خروجی از حوزه برای بارش با دوره بازگشت ۵ ساله به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهند که به‌کارگیری ترکیب ۳۲ تایی BMP ها منجر به کاهش ۱/۷۸۹ مترمکعب برثانیه در دبی اوج می‌شود.

یادداشت‌ها

1. Best Management Practices
2. Storm Water Management Modeling
3. Mission / Wagg
4. Santander
5. Multi Objective Particle Swarm Optimization
6. Build up
7. Wash off
8. Global Best
9. Intensity-Duration-Frequency
10. Depression Storage
11. Fitness
12. Cost Functions
13. Loop

فهرست منابع

ثابتی، ا. و تجریشی، م. ۱۳۹۰. مدل‌سازی‌کمی رواناب‌های شهری و بررسی تاثیر نفوذپذیری بر دبی سیلاب در مسیل مقصودبیگ- صدر، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- گرایش محیطزیست، دانشگاه صنعتی شریف.

سلطانی، م. و تجریشی، م. ۱۳۸۷. مدل‌سازی کیفی نهرهای درون شهری با بهره‌گیری از روش‌های مدیریتی بهبود کیفیت رواناب در نهر ولنجک، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- گرایش محیطزیست، دانشگاه صنعتی شریف.

شم‌آبادی، ع. و تجریشی، م. ۱۳۸۶. مدلسازی کیفی دریاچه‌های درون شهری به‌کمک GIS، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- گرایش محیطزیست، دانشگاه صنعتی شریف.

فلاح تفتی، ا. و شریفی، م. ب. ۱۳۸۴. شبیه‌سازی شبکه زهکشی رواناب‌های سطحی منطقه آب و برق مشهد با استفاده از مدل تلفیقی Mike SWMM و GIS، پایان نامه کارشناسی ارشد عمران- گرایش مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

قنبری عدیوی، م. و تجریشی، م. ۱۳۹۰. بررسی عملکرد جوی‌باغچه‌های بومی شهر تهران به منظور طراحی جهت حذف آلاینده های رواناب سطحی، پایان نامه کارشناسی ارشد عمران- گرایش محیطزیست، دانشگاه صنعتی شریف.

کاظمی پرکوهی، ف. و تجریشی، م. ۱۳۹۰. خصوصیات ذرات موجود در رواناب شهر تهران، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- گرایش محیطزیست، دانشگاه صنعتی شریف.

کمالی، م. و تجریشی، م. ۱۳۹۰. بررسی عملکرد روسازی نفوذپذیر در حذف آلاینده از رواناب سطحی، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

Collins, K. A. 2007. A field evaluation of four types of permeable pavement with respect to water quality improvement and flood control, Published by the Graduate School of North Carolina State University.

Denault, C.; Millar, R.G.; & Lence, B.J. 2006. Assessment of Possible Impact of Climate Change in an Urban Catchment, Journal of the American Water Resources Association, Vol. 42(3), pp. 685–697.

Department of Civil and Environmental Engineering. 2009. Storm Water Management Model Applications Manual, EPA/600/R-09/077, U.S. Environmental Protection Agency, Fort Collins, CO.

Dong, X.; Du, P.F.; Li, Z.Y. & Wang, H.C. 2008. Parameter Identification and Validation of SWMM in Simulation of Impervious Urban Land Surface Runoff, Huan Jing Ke Xue, Vol. 29(6), pp. 1495-1501.

Graupensperger, T. A. & Stroschein, T. A. 2007. Stormwater BMPs Water Quality Maintenance and Protection State Route 202, GTS Technologies.

Iowa Stormwater Management Manual. 2009. Department of Natural Resources.

Moglen, G. E. & Mejia, A. L. 2009. Spatial Patterns of Urban Development from Optimization of Flood Peaks and Imperviousness-based Measures, Journal of hydrologic engineering.

Obropta, C. C. & Kardos, J. S. 2007. Review of Urban Stormwater Quality Models: Deterministic Stochastic and Hybrid Approaches, JAWRA Journal of the American Water Resources Association 43: 1508–1523. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2007.00124x

Rossman, L. 2010. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0., EPA/600/R-05/040, U.S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH.

Smith, D. R. 2006. Permeable interlocking concrete pavements: Selection, Design, Construction, Maintenance., Third Edition, Washington, DC.

Temprano, J.; Arango, O.; Cagiao, J.; Suarez, J. & Tejero, I. 2006. Stormwater Quality Calibration by SWMM: A Case Study in Northern Spain, Vol. 32, No 1, pp. 55-63.