

چالش آب شهری و بررسی سناریوهای مدیریت رواناب‌های شهری

(مطالعه موردی: بخشی از شهر بندرعباس)

نسیم قشقایی زاده- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، پردیس قشم، دانشگاه هرمزگان، قشم، ایران
عباس مرادی* - استادیار گروه علوم جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
آرش ملکیان- دانشیار گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
ارشک حلی ساز- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
رسول مهدوی- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۴

چکیده

توسعه شهرنشینی با افزایش سطوح نفوذناپذیر و به‌طور هم‌زمان با تغییرات چرخه هیدرولوژیکی همراه است. این امر باعث می‌شود تا حجم رواناب حاصل از بارندگی زیاد شده و در نتیجه رژیم رواناب تندتر با زمان تأخیر کوتاه‌تر و دبی‌های اوج بالاتر، حاصل شود. بنابراین، خطر ایجاد سیل که یکی از پرمخاطره‌ترین بلایای طبیعی است افزایش می‌یابد. منطقه مورد مطالعه بخشی از شهر بندرعباس انتخاب شده است که به شدت در معرض رشد و توسعه‌یافتگی قرار دارد. سیستم زهکشی نامناسب و توسعه ناهمگون شهر بدون توجه به معیارهای جامع شهرسازی در دهه‌های گذشته باعث شده که حتی در اثر بارندگی با دوره بازگشت‌های کوچک نیز شاهد آب‌گرفتگی در محدوده شهری باشیم. بنابراین در این پژوهش سعی شده است تا با شبیه‌سازی نحوه عملکرد سیستم زهکشی رواناب سطحی، نقاط حساس به آب‌گرفتگی بررسی گردد و بهترین گزینه‌های عملیاتی جهت کنترل سیلاب و تأثیر آن‌ها بر کاهش حجم سیل مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار EPA-SWMM سه راهکار مدیریتی سیستم ماند بیولوژیکی، پشت‌بام سبز و جوی-باغچه در کنترل دبی جریان بررسی شد. نتایج نشان داد که راهکار مدیریتی پشت‌بام سبز، نسبت به بقیه راهکارها، با متوسط کاهش ۱۸/۸ درصدی دبی پیک و کاهش ۱۲/۵ درصدی حداکثر سرعت از عملکرد بهتری برخوردار است. از دیگر نتایج این تحقیق این است که شبکه در حالت بدون گزینه عملیاتی برای دوره بازگشت ۱۰ ساله دارای ۱۸ درصد پس‌زدگی بود که این مقدار با اجرای سناریو پشت‌بام سبز پس‌زدگی جریان به ۱ درصد شبکه کاهش یافت. بنابراین راهکار مدیریتی پشت‌بام سبز به‌عنوان بهترین راهکار در کاهش پیک و سرعت جریان در محدوده مورد مطالعه انتخاب گردید.

کلیدواژه‌ها: بهترین گزینه‌های عملیاتی، سیستم ماند بیولوژیکی، پشت‌بام سبز، جوی باغچه، سیلاب شهری

بیان مسئله

در عرصه های خشک و نیمه خشک آب از یک طرف مهمترین عامل محدود کننده توسعه پایدار بوده و از سوی دیگر سیلاب های فصلی عامل مهم تخریب و ایجاد خسارت می باشد (کمالی و همکاران، ۱۳۹۲). تغییرات جهانی از جمله توسعه اقتصادی، رشد جمعیت و مهاجرت از مناطق روستایی به مناطق شهری، و تغییرات اقلیمی، باعث شکل گیری شهرهای خاکستری بیشتر با پتانسیل بالای سیل در سراسر جهان شده است. شهرهای خاکستری^۱ عمدتاً از سطوح غیرقابل نفوذی تشکیل شده اند که در آن ها به سلامت زیست محیطی و ویژگی های هیدرولوژیکی کمتر توجه شده است. شهرهای خاکستری مقدار زیادی رواناب حاوی رسوبات، میکروارگانیسم ها، فلزات و آلودگی های شیمیایی تولید می کنند که منجر به تخریب آب ها می شوند. واکنش نوآورانه به این مسئله جهانی توسعه شهرهای سبز است که برای جبران آسیب های زیست محیطی و اکولوژیکی طراحی شده اند. شهرهای سبز از روش های "توسعه کم اثر (LID)^۲" و ابتکارات مشابه مثل بهترین راهکارهای مدیریتی (BMPs)^۳ استفاده می کنند تا به شرایط هیدرولوژیکی و ویژگی های زیست محیطی پیش از توسعه برسند (چنگ^۴، ۲۰۱۸). با توجه به این مفاهیم، در مناظر شهری، آب و کیفیت آن بوسیله ترکیبی از روش های متعارف و با اعمال روش های مدیریتی (BMP) نظیر سطوح نفوذپذیر، جوی-باغچه، بام های سبز، نوارهای گیاه کاری شده و تسهیلات نفوذ آب باران بهتر می توانند حفظ شوند (جورزاک^۵، ۲۰۱۸). در سال های اخیر، مدیریت و چگونگی رفتار با رواناب حاصل از سیلاب مناطق شهری در درجه اول تبدیل به نگرانی برای کسانی شده است که مسئول برنامه ریزی، طراحی، ساخت و نگهداری سیستم های زیربنایی شهرها هستند (چنگ، ۲۰۱۸).

ایجاد زیرساخت های شهری، به ویژه سیستم های زهکشی شهری، اثر قابل توجهی بر عملکرد هیدرولوژیکی و اکوسیستم ها بر جای می گذارند و در حالی که آب های زیرزمینی و جریان پایه کاهش می یابد اغلب باعث ایجاد رواناب مازاد و افزایش انتشار آلودگی می شوند در نتیجه آسیب پذیری این مناطق به سیل و خشکسالی افزایش یافته و مشکلات کیفیت آب مناطق اطراف رودخانه ها زیاد می شود (بردوسی^۶، ۲۰۱۲). قطع درختان، تسطیح خاک و فشردگی سطح خاک نیز باعث افزایش مقدار سیلاب می شوند (برومند نسب، ۱۳۹۰). اثرات شهرسازی بیشتر موضعی هستند اما از سایر اشکال تغییر کاربری اراضی، مشخص ترند. سطوح غیرقابل نفوذ و سیستم های مؤثر رواناب رگباری، مناطقی که ظرفیت نفوذ آن ها کم یا صفر است را زیاد کرده و انتقال جریان در کانال ها، افزایش می یابد. این امر باعث می شود تا حجم رواناب حاصل از بارندگی زیاد شده و در نتیجه رژیم رواناب تندتر با زمان تأخیر کوتاه تر و دبی های اوج بالاتر، حاصل شود (فریرس، ۲۰۱۳). اثرات نامطلوب رواناب ها و سیلاب های شهری بر زیرساخت های شهر و زندگی ساکنان آن اخیراً باعث شده است تا به منظور دستیابی به مدیریت بیشتر رواناب شهری تمایل به استفاده از سیستم های زهکشی پایدار افزایش یابد (طهماسی، ۲۰۱۸). در این راستا بهترین گزینه های عملیاتی تکنیک های طراحی هستند که برای دستیابی به شرایط مطلوب هیدرولوژیکی مناطق توسعه یافته استفاده می شوند. دامنه کاربرد LID-BMP ها بسیار گسترده است. این دامنه می تواند از شیوه هایی که در آن ها منجر به بازداشتن رواناب می شود، تا گزینه هایی که در آن ها نیاز به وجود مناطق بزرگ برای نگه داشتن رواناب بدون نفوذ و یا تبخیر و تعرق گسترش یابد. (Geosyntec Consultants, 2010).

در این راستا Meena & Anil (۲۰۱۸) در یک مدل هیدرولوژیکی چندین BMP را ترکیب کرده و عملکرد هر یک را در کاهش حجم رواناب ارزیابی نمودند و به این نتیجه رسیدند که در وقایع بارندگی با شدت زیاد و مدت کم، راهکارهای مدیریتی ترانشه نفوذ و بشکه ذخیره سازی باران مؤثرتر از بقیه راهکارها می باشند. Jia و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقی تحلیل و برنامه ریزی طرح توسعه شهرک پکن در چین را که سیستم پایه مدیریت رواناب آن مجموعه ای از انواع BMP ها است را مورد بررسی قرار دادند. در این پروژه با استفاده از

^۱ Gray cities

^۲ Low Impact Development

^۳ Best Management Practice

^۴ Chang

^۵ Jurczak

^۶ bardossy

قابلیت‌های مدل SWMM سعی کرده‌اند تحت سناریوهای مختلفی با توجه به دو هدف دستیابی به کنترل حداکثر رواناب و کاهش در هزینه‌ها بهینه‌سازی انجام گیرد و نتایج حاکی از آن بوده است که اصلاح سیستم مدیریت رواناب شهری می‌تواند تأثیر بسزایی در کنترل رواناب سطحی داشته باشد. Recanatesi و همکاران (۲۰۱۷) به منظور مدیریت رواناب بخشی از کلان‌شهر رم در ایتالیا به ارزیابی بهترین راهکارهای مدیریتی پرداختند. آن‌ها یکی از علل اصلی افزایش بارندگی و شدت سیلاب در حوضه‌های کوچک را که موجب آسیب اجتماعی و مالی شده، گسترش شهری می‌دانند که در دهه‌های گذشته اتفاق افتاده است. آن‌ها در این پژوهش با توجه به کاهش مناطق در معرض سیل، تأثیر مثبت بهترین راهکارهای مدیریتی (BMP) را در مقیاس شهری مورد بررسی قراردادند. آن‌ها با استفاده از یک مدل بارش رواناب و یک مدل هیدرولیکی رخدادهای بارش بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱ را که میلیون‌ها یورو خسارت به بار آورده بود را با استفاده از داده‌های با وضوح بالا در محیط GIS، تحت دو سناریو (وجود و عدم وجود بهترین راهکارهای مدیریتی) ارزیابی کردند. آن‌ها با مقایسه نقشه‌های سیل قبل و بعد از معرفی بهترین راهکارهای مدیریتی به این نتیجه رسیدند که در سناریویی که از بهترین راهکارهای مدیریتی استفاده شده بود، تا ۹۰ درصد به‌طور کامل خطر هیدرولیکی از بین رفت و در ۱۰ درصد باقیمانده در مناطقی که در معرض سیل قرار داشتند این خطر به حداقل کاهش یافت. هاشمی منفرد و همکارانش (۱۳۹۷) در تحقیقی که در شهرستان داراب انجام دادند از تکنیک‌های «بهترین راهکار مدیریتی» و «توسعه کم اثر» و راهکارهایی همچون بشکه‌های باران، ترانشه‌های نفوذ، چاه‌های جذبی، کف‌پوش‌های نفوذپذیر، باغچه‌های زیستی و همچنین مخازن نگهداشت استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از اطلاعات موجود از قبیل نقشه‌های کاربری اراضی، توپوگرافی منطقه، و آمار بارندگی و مدل‌سازی به کمک مدل SWMM5 و پس از اصلاح و به‌کارگیری روش‌های مطرح‌شده و مقایسه آن با وضعیت موجود جهت باران با دوره بازگشت ده ساله به این نتیجه رسیدند که میزان دبی اوج رواناب در زیر حوضه‌ها ۳۱ درصد و حداکثر ارتفاع آب در کانال محل خروجی به نصف تقلیل و میزان نفوذپذیری حوضه ۱۷/۵ درصد نسبت به وضع موجود افزایش داشته است و با احداث ۶ مخزن ذخیره‌سازی میزان ۶۱ هزار مترمکعب آب باران ذخیره‌سازی می‌گردد.

روش پژوهش

فرآیند شبیه‌سازی EPA-SWMM

مدل SWMM یک مدل شبیه‌سازی پویای بارش-رواناب است. این مدل مشخصه‌های بسیاری از فرآیندهای هیدرولوژیکی و کیفیت آب شامل بارش، ذوب برف، رواناب سطحی، جریان زیرسطحی، مسیر جریان، ذخیره و تصفیه جریان را شبیه‌سازی می‌کند. این مدل توسط کنسرسیومی از شرکت‌های دانشگاه فلوریدا به همراه مهندسين منابع آب در سال‌های ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۱ ارایه شده است (اردشیر، ۱۳۹۶). در این مدل شبیه‌سازی از طریق معرفی مجموعه‌ای از زیرحوضه‌ها و تعیین میزان بارش و آلودگی در هر زیرحوضه و انتخاب روش تلفات متناسب با طرح صورت می‌گیرد. نظر به اینکه مدل SWMM قابلیت مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه‌های شهری و همچنین مدل‌سازی کیفی رواناب را دارد و با توجه به این که اخیراً قابلیت مدل‌سازی LIDهای مختلف نیز در این مدل اضافه شده است می‌تواند به عنوان ابزاری مفید در راستای مدیریت کاراتر حوضه‌های شهری و حتی غیر شهری مورد استفاده قرار گیرد (اردشیر، ۱۳۹۶).

در مدل، هر زیرحوضه به شکل یک مخزن غیرخطی فرض می‌شود که در این روش عمق رواناب حاصل از بارش (y) پس از کسر عمق چالاب (yp) و میزان تبخیر و نفوذ محاسبه می‌گردد. در مخزن غیر خطی روابط پیوستگی (رابطه‌های ۱ و ۲) و مانینگ برقرار می‌باشد. این روابط به شرح زیر بسط داده شده‌اند:

$$\frac{dv}{dt} = A \cdot \frac{dy}{dt} = A \cdot i = Q \quad (۱)$$

$$V = A \cdot y \quad (۲)$$

که در آن V حجم آب در زیرحوضه (M^3)، A سطح حوضه آبریز (M^2) است. همچنین معادله مانینگ برای مخزن به صورت زیر می باشد:

$$Q = \frac{W}{n} (y - y_p)^{5/3} S^{1/2}$$

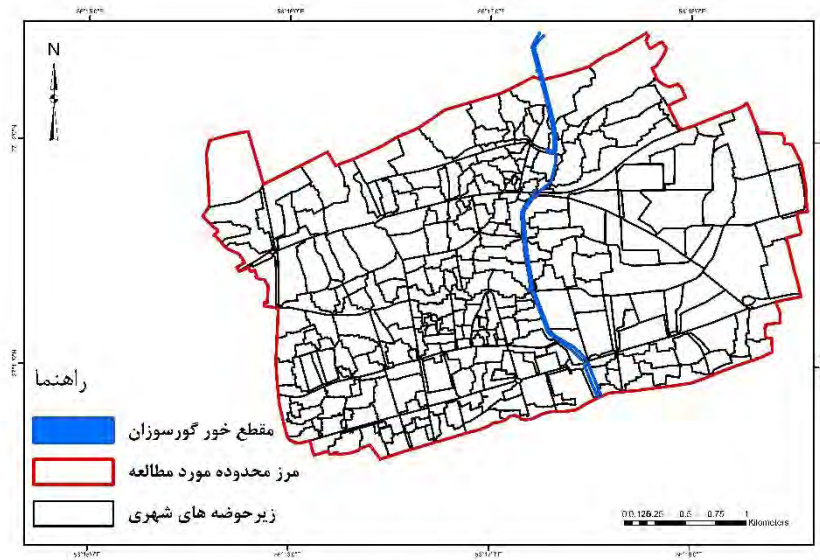
که در آن W پهنای متوسط زیرحوضه (m)، n ضریب زبری مانینگ زیر حوضه، y_p عمق رواناب (m)، S شیب متوسط زیرحوضه (m/m) می باشد. از ترکیب رابطه پیوستگی و مانینگ در مخزن غیر خطی رابطه (۳) یک رابطه دیفرانسیل غیرخطی حاصل می شود.

$$\frac{y_2 - y_1}{\Delta t} = i - \frac{1.49WS^{1/2}}{A.n} [y_1 + 0.5 * (y_2 - y_1) - y_p]^{5/3}$$

که در آن، Δt گام زمانی و y_1 عمق در ابتدای گام زمانی است (Rossman, 2005: 56).

داده‌های مورد نیاز مدل

به منظور تجزیه و تحلیل اطلاعات هیدرولوژیکی داده ها، با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) منطقه، در نرم افزار ArcGIS، شیب و جهت شیب محاسبه و مرز زیرحوضه های منطقه مورد مطالعه تعیین شد. سپس با استفاده از نقشه کاربری اراضی شهری (با تفکیک ساختمان ها، خیابان ها، بلوارها، فضای سبز) در هر زیرحوضه مساحت قسمت های نفوذناپذیر محاسبه و از طریق بازدیدهای میدانی تصحیح گردید. برای تعیین پارامتر زبری کانالها نیز علاوه بر راهنمای مدل از بازدید های میدانی متعدد و بهره گیری از نظر کارشناسان مجرب استفاده شد و مقدار این پارامتر در هر کانال بر اساس شرایط همان بازه مشخص، تعیین شد. به منظور تعیین حداکثر پتانسیل ذخیره (S) از منحنی بی بعد (CN) استفاده شده است. از این رو بر اساس گروه های هیدرولوژیکی خاک یک شماره منحنی برای انواع مختلف کاربری اراضی در حوضه های شهری داده شده است (winz, 2011). مشخصات اتصالات و محل ورود رواناب هر زیرحوضه به سیستم زهکشی رواناب، ابعاد و مقطع عرضی ابتدا از طریق بازدید میدانی تعیین و مشخصات فیزیوگرافی اتصالات با استفاده از نرم افزار ArcGIS محاسبه شد. همچنین بعضی از پارامترهای اتصالات مانند رقم کف، طول و عرض جغرافیایی، حداکثر عمق اتصال و انتقال دهنده مانند طول، فاصله از کف، به وسیله نرم افزار ArcGIS محاسبه شدند. در نهایت در منطقه مورد مطالعه ۳۳۷ زیرحوضه، ۴۹۸ گره و ۴۹۲ کانال مشخص گردید. در شکل شماره ۲ نقشه شماتیک منطقه مورد مطالعه و زیرحوضه های شهری تفکیک شده نشان داده شده است. در شهر بندرعباس ایستگاه هیدرومتری وجود ندارد بنابراین میزان دبی رواناب بوسیله دستگاه مولینه اندازه گیری شد. در مجموع در پنج واقعه بارندگی، مقادیر دبی با استفاده از دستگاه مولینه تا زمان اتمام دبی خروجی اندازه گیری شد. جهت سناریو سازی مناسب، ابتدا بایستی میزان تاثیر پارامترهای مختلف در به کارگیری BMP ها سنجیده شود بنابراین به منظور تحلیل حساسیت در این مطالعه میزان تاثیرگذاری سه پارامتر شیب کانال، ضریب زبری کانال و درصد نفوذناپذیری بر روی نتایج مدل بررسی شدند. پس از آماده سازی داده های بارندگی مربوط به ایستگاه سینوپتیک بندرعباس متعلق به اداره هواشناسی، داده های مذکور به همراه سایر اندازه گیریهای انجام شده در منطقه مورد مطالعه به مدل SWMM وارد شد و مقادیر دبی شبیه سازی شده به دست آمد. سپس مقادیر شبیه سازی شده توسط مدل با مقادیر اندازه گیری شده مورد مقایسه قرار گرفت. در این مطالعه به منظور محاسبه نفوذ، افت و روندیابی به ترتیب از روشهای SCS، هیزن ویلیامز و موج دینامیکی استفاده شده است.



شکل ۱. نقشه شماتیک منطقه مورد مطالعه و زیرحوضه های شهری

واسنجی مدل

هدف از واسنجی حداقل کردن اختلاف بین خروجی پیش بینی شده و مشاهده شده است و این کار ممکن است به وسیله اندازه گیری دقیق پارامترها و یا روش های بهینه سازی انجام شود (Geberemariam, 2015). به منظور واسنجی مدل، در خروجی حوضه شهری مورد مطالعه برای هر رگبار، به کمک مولینه سرعت و توسط اشل ارتفاع رواناب اندازه گیری گردید. مشخصات رویدادهای بارندگی مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. در این مطالعه از سه واقعه نمونه برداری شده برای واسنجی و از دو واقعه برای اعتبارسنجی مدل استفاده شده است.

جدول ۱. خصوصیات بارش های استفاده شده جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWMM

اعتبارسنجی		واسنجی	
ارتفاع بارش (میلی متر)	مدت تداوم (ساعت)	ارتفاع بارش (میلی متر)	مدت تداوم (ساعت)
۲۴,۱	۹	۲۴,۵	۱۷
۳۳,۲	۲	۱۱۱,۵	۱۵
		۲۵,۶	۱۰

به منظور بررسی میزان اختلاف مقادیر شبیه سازی و مشاهده ای از ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NS) استفاده شده است که توسط رابطه زیر محاسبه می شود:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \{y_i - x_i\}^2}{\sum_{i=1}^n \{x_i - \bar{x}\}^2}$$

که در آن، x_i مقدار داده اندازه گیری شده، y_i مقادیر شبیه سازی شده و \bar{x} میانگین داده های اندازه گیری شده است.

تحلیل حساسیت

در آنالیز حساسیت میزان تأثیرگذاری پارامترها بر روی نتایج مدل مورد ارزیابی قرار می گیرد. در این مطالعه میزان تأثیرگذاری سه پارامتر شیب کانال، ضریب زبری کانال و درصد نفوذناپذیری بر روی نتایج مدل بررسی شدند. مطابق با جدول شماره ۲ بدیهی است که با

افزایش شیب، میزان دبی پیک افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای مورد بررسی نشان داد که درصد نفوذناپذیری بیشترین حساسیت را در پیک رواناب خروجی ایجاد می‌کند.

جدول ۲. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت اجرای مدل

شماره	پارامتر	بخش	مقدار اولیه	محدوده تغییرات	میزان تغییرات دبی پیک خروجی (درصد)
۱	شیب زیر حوضه	زیرحوضه	شیب طبیعی زمین	۱۰٪ افزایش	+ ۱/۷
				۱۰٪ کاهش	- ۲/۶
				۲۰٪ افزایش	+ ۲/۶
				۲۰٪ کاهش	- ۵/۲
				۳۰٪ افزایش	+ ۴/۳
				۳۰٪ کاهش	- ۷/۸
۲	ضریب زبری	مناطق نفوذ پذیر	میزان برآوردی با توجه به کاربری اراضی و گزارشات موجود و گوگل ارت	۱۰٪ افزایش	- ۱/۰۲
				۱۰٪ کاهش	+ ۱/۱
				۲۰٪ افزایش	- ۲/۲
				۲۰٪ کاهش	+ ۲/۵
				۳۰٪ افزایش	- ۴/۳
				۳۰٪ کاهش	+ ۳/۱
۳	درصد نفوذناپذیری	حوضه	میزان برآوردی با توجه به کاربری اراضی و گزارشات موجود و گوگل ارت	۱۰٪ افزایش	+ ۷/۸
				۱۰٪ کاهش	- ۳/۷
				۲۰٪ افزایش	+ ۱۴/۸
				۲۰٪ کاهش	- ۱۳
				۳۰٪ افزایش	+ ۲۱/۷
				۳۰٪ کاهش	- ۲۲/۲

صحت سنجی مدل با پارامتر دوره بازگشت

بدلیل ماهیت تصادفی آمار و اطلاعات بارندگی، این بارندگی‌ها در هر سال ثابت نبوده و تغییر می‌یابند، بنابراین پارامتر دوره بازگشت برای این اطلاعات در نظر گرفته می‌شود، به عبارت دیگر دوره بازگشت احتمال وقوع بارندگی را نمایش می‌دهد، طبق نشریه مبنای و ضوابط طراحی شبکه‌های فاضلاب و آبهای سطحی، دوره‌های بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ ساله برای طراحی شبکه آب-سطحی و رواناب‌های شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد (استاندارد صنعت آب و آبفا، ۱۳۹۵). در این مطالعه بعد از کالیبره نمودن مدل با رویدادهای بارندگی مورد استفاده در جدول ۲، مدل را برای دوره بازگشت ۲-۵-۱۰ ساله آماده نموده و صحت سنجی می‌نماییم.

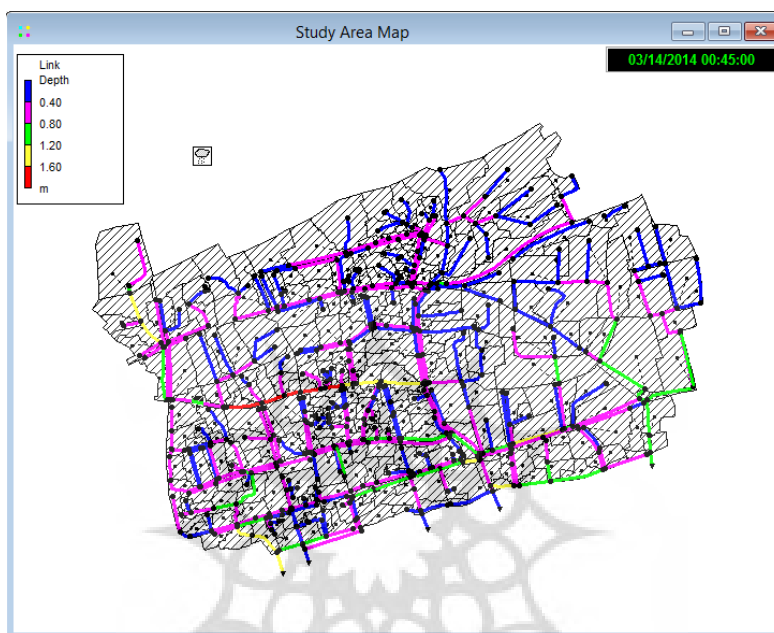
همانطور که گفته شد در محدوده مورد مطالعه ایستگاه هیدرومتری وجود ندارد، به‌منظور صحت سنجی، دبی اوج هیدروگراف خروجی مدل SWMM با دبی اوج محاسبه شده به روش استدلالی، مقایسه شده است و نتایج حاصل در جدول شماره ۳ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از هر دو روش به یکدیگر نزدیک می‌باشد.

جدول ۳. مقایسه نتایج مدل SWMM و روش استدلالی

مجموع دبی اوج خروجی ها با دوره بازگشت	روش استدلالی متر مکعب بر ثانیه	مدل SWMM متر مکعب بر ثانیه	میانگین خطای نسبی (MRE)	خطای (RMSE)
۲ ساله	۲۲/۲	۲۷/۲۲	٪ ۱۸/۴	۳/۵
۵ ساله	۲۸/۰۳	۳۳/۸	٪ ۱۷	۴
۱۰ ساله	۳۴/۲۵	۳۹/۵۹	٪ ۱۳/۵	۳/۷۷

خروجی مدل

پس از ورود داده‌ها و انجام مراحل ذکر شده مدل بارش رواناب حوضه‌های شهری پردازش و مدل برای دوره بازگشت مختلف اجرا شده و جداول و هیدروگراف‌های رواناب خروجی از حوضه‌های مختلف استخراج شده است. با توجه به شکل شماره ۳ در حوضه شهری مورد مطالعه در دوره بازگشت ۱۰ ساله پس زدگی جریان به رنگ زرد، سبز و قرمز مشاهده می‌شود و حدود ۱۸ درصد از کل شبکه است. با توجه به توسعه شهری و امکانپذیر نبودن توسعه شبکه جمع‌آوری آبهای سطحی استفاده از BMP را امری ضروری در کاهش سیلاب شهری می‌نماید.



شکل ۲. خروجی مدل در دوره بازگشت ۱۰ ساله

انتخاب BMP ها

آبرفت در محدوده شهر بندرعباس نشان می‌دهد که این شهر بر روی رسوبات ساحلی ریزدانه رسی، ماسه ای و سیلتی بنا شده است. میزان نفوذپذیری کلی این رسوبات در بستر شهر با توجه به نتایج آزمایشات موردی موجود، بین 10^{-3} تا 10^{-4} متر بر ثانیه است که بیانگر نفوذپذیری متوسط تا کم این لایه هاست. همچنین با توجه به اشباع بودن لایه های زیرین در نوار ساحلی سطح آب زیرزمینی شور بالا می‌باشد بنابراین LID هایی که سفره آب زیرزمینی را تغذیه می‌کنند نمی‌توانند کارایی زیادی داشته باشند. از طرفی خصوصیات آب و هوایی منطقه نیز در انتخاب LID تأثیرگذار می‌باشد مناطقی که پتانسیل تبخیر و تعرق در آن‌ها بیشتر از میزان بارش است مناطق مناسبی برای LID های نفوذپذیر هستند. در چنین مناطقی خاک به سرعت رطوبت خود را از دست می‌دهد و در هنگام بارندگی می‌تواند سهم بیشتری از بارش را جذب کند (مهندسين مشاور پديدآب سپاهان، ۱۳۹۴).

با توجه به مطالب عنوان شده از بین BMP های موجود، با توجه به شرایط توسعه شهری منطقه، سه گزینه پشت بام سبز، سلول ماند بیولوژیکی و جوی باغچه برای این مطالعه انتخاب گردید که طبق توصیه راهنمای مدل SWMM مشخصات آن‌ها در جدول شماره ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. مشخصات BMPهای منتخب (Rossman, 2005)

لایه	پارامتر	واحد	سلول ماند بیولوژیکی	پشت بام سبز	جوی باغچه
سطح	ارتفاع	mm	۲۰۰	۲۰۰	۴۰۰
	حجم گیاه	-	۰/۱	۰/۱	۰/۱
	زبری سطح	-	۰/۴	۰/۱۵	۰/۸
	شیب سطح	%	۰/۵	۱	۰/۵
خاک	ضخامت	mm	۱۵۰	۳۰۰	-
	تخلخل	-	۰/۵	۰/۵	-
	ظرفیت مزرعه	-	۰/۲	۰/۲	-
	نقطه پژمردگی	-	۰/۱	۰/۱	-
	هدایت هیدرولیکی K	mm/h	۰/۵	۰/۵	-
	شیب هدایت هیدرولیکی	%	۱۰	۱۰	-
	مکش	mm	۳/۵	۳/۵	-
	ضخامت	mm	۶۰۰	-	-
ذخیره	Void ratio	-	۰/۷۵	-	-
	نرخ نفوذ	mm/h	۰/۵	-	-

تعریف سناریوها و شبیه سازی آن‌ها

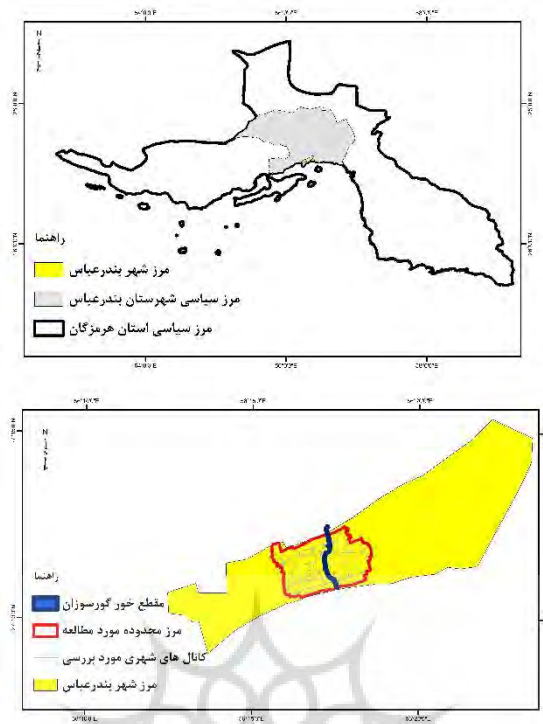
در این تحقیق بعد از مدل‌سازی شبکه جمع آوری آبهای سطحی، واسنجی و تحلیل حساسیت و در نهایت انتخاب BMPها، ۴ سناریو با رگبار ۶ ساعته، با دوره بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ ساله جهت تحلیل کمی در نظر گرفته شده است. جدول شماره ۵ خصوصیات سناریوها را نشان می‌دهد.

جدول ۵. مشخصات سناریوهای بکار رفته در منطقه مورد مطالعه

شماره سناریو	توضیحات
۱	شبیه سازی بدون بکارگیری BMP
۲	شبیه سازی با لحاظ نمودن سلول ماند بیولوژیکی
۳	شبیه سازی با لحاظ نمودن پشت بام سبز
۴	شبیه سازی با لحاظ نمودن جوی باغچه

محدوده مورد مطالعه

شهر بندرعباس در منتهی الیه جنوب خاوری رشته کوه زاگرس و حد فاصل بین حاشیه جنوبی ارتفاعات و خلیج فارس واقع شده است. این منطقه دارای آب و هوای گرم و خشک، متوسط بارندگی سالانه ۱۸۱/۲ میلی‌متر و میانگین دما ۲۷ درجه سانتیگراد می‌باشد. محدوده مورد مطالعه حوضه آبریز خور (مسیل) گور سوزان در محدوده شهری بندرعباس به طول حدود ۴ کیلومتر را شامل می‌شود که از محل تصفیه خانه فاضلاب شهر بندرعباس واقع در شمال شهر آغاز شده و تقریباً از میانه های شهر عبور کرده و به دریا می‌ریزد. این خور در اغلب ایام سال خشک بوده و فقط در مواقع بارندگی و سیلابی رواناب‌های سطحی حوضه بالادست و بخشی از حوضه شهری را به سمت دریا زهکش می‌نماید. در شکل ۳ موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان هرمزگان و در شهر بندرعباس و شمای کلی منطقه نشان داده شده است.



شکل ۳. موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان هرمزگان و در شهرستان بندرعباس و شمای کلی منطقه

یافته های پژوهش

نتایج بدست آمده از شبیه سازی پنج واقعه بارندگی در جدول شماره ۶ آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود ضریب کارایی نش-ساتکلیف بین مقادیر ۰/۶۳ تا ۰/۹۳ قرار می گیرد.

جدول ۶. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWMM

اعتبارسنجی		واسنجی	
NAS	تاریخ وقوع	NAS	تاریخ وقوع
۰,۷۶	۱۳۹۲/۱۰/۱۷	۰,۶۹	۱۳۹۲/۱۰/۳۰
۰,۸۳	۱۳۹۴/۱۰/۱۳	۰,۹۳	۱۳۹۲/۱۲/۲۳
		۰,۶۳	۱۳۹۴/۱۰/۴

با توجه به نتایج مدل در دوره بازگشت ۱۰ ساله، مناطقی که دچار پس زدگی جریان بودند برای LID انتخاب شدند همچنین جهت ارزیابی دقیق LIDها مساحت اشغالی هر زیر حوضه مساوی انتخاب شد.

سناریو اول: این سناریو ویژگی های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی رواناب شهری را بدون وجود BMP ها ارایه می دهد. پیک رواناب کل شبکه آبهای سطحی در این سناریو به عنوان مبنا جهت مقایسه با دیگر سناریوها مورد استفاده قرار می گیرد. در جدول شماره ۷ میزان دبی پیک همه خروجی ها برای دوره بازگشت های ۲، ۵ و ۱۰ سال ارائه شده است. میزان دبی پیک در خروجی حوضه بدون استفاده از راهکار مدیریتی برای دوره بازگشت های ۲، ۵ و ۱۰ سال به ترتیب برابر با ۲۷/۲۲، ۳۳/۸ و ۳۹/۵۹ مترمکعب بر ثانیه می باشد.

جدول ۷. رواناب همه خروجی ها برای دوره بازگشت های ۲، ۵ و ۱۰ ساله در سناریو اول

دوره بازگشت	خروجی ۱	خروجی ۲	خروجی ۳	خروجی ۴	خروجی ۵	جمع
دبی ۲ سال	۴/۰۹	۱۶/۸۵	۱/۰۲	۱/۰۲	۴/۲۴	۲۷/۲۲
(مترمکعب بر ثانیه) ۵ سال	۵/۱۱	۲۱/۳	۱/۲	۱/۲۷	۴/۹۲	۳۳/۸
۱۰ سال	۶/۰۶	۲۵/۳۳	۱/۳۷	۱/۴۵	۵/۳۸	۳۹/۵۹

سناریو دوم: در این سناریو شبیه سازی کمی با لحاظ نمودن سلول ماند بیولوژیکی انجام شده است. جدول شماره ۸ میزان دبی پیک را در همه خروجی ها ارائه می دهد. میزان دبی برای همه خروجی ها با استفاده از راهکار مدیریتی سلول ماند بیولوژیکی برای دوره بازگشت های ۲، ۵ و ۱۰ سال به ترتیب برابر با ۲۳/۲۹، ۲۸/۵۴ و ۳۳/۱۷ مترمکعب بر ثانیه می باشد که نسبت به سناریو بدون استفاده از راهکار مدیریتی میزان دبی در حدود ۱۴ تا ۱۶ درصد کاهش داشته است.

جدول ۸. رواناب همه خروجی ها برای دوره بازگشت های ۲، ۵ و ۱۰ ساله در سناریو دوم

دوره بازگشت (سال)	خروجی ۱	خروجی ۲	خروجی ۳	خروجی ۴	خروجی ۵	جمع	دبی (مترمکعب بر ثانیه)
۲	۲/۵۶	۱۵/۶۸	۰/۶۶	۰/۶۵	۳/۷۴	۲۳/۲۹	
۵	۳/۱۵	۱۹/۶۳	۰/۷۲	۰/۸۱	۴/۲۳	۲۸/۵۴	
۱۰	۳/۷۲	۲۳/۱۹	۰/۷۹	۰/۹۶	۴/۵۱	۳۳/۱۷	

سناریو سوم: در این سناریو شبیه سازی کمی با لحاظ نمودن پشت بام سبز به عنوان بهترین راهکار مدیریتی (BMP) لحاظ شده است (جدول شماره ۹). دبی خروجی با استفاده از راهکار مدیریتی پشت بام سبز برای دوره بازگشت های ۲، ۵ و ۱۰ سال به ترتیب برابر با ۲۲/۳۷، ۲۷/۵۷ و ۳۲/۱۳ مترمکعب بر ثانیه می باشد که نسبت به سناریو بدون استفاده از راهکار مدیریتی میزان دبی در حدود ۱۸ تا ۱۹ درصد کاهش داشته است.

جدول ۹. رواناب همه خروجی ها برای دوره بازگشت های ۲، ۵ و ۱۰ ساله در سناریو سوم

دوره بازگشت	خروجی ۱	خروجی ۲	خروجی ۳	خروجی ۴	خروجی ۵	جمع
دبی ۲ سال	۲/۱۹	۱۵/۵۴	۰/۶۱	۰/۶۱	۳/۴۲	۲۲/۳۷
(مترمکعب بر ثانیه) ۵ سال	۲/۷۱	۱۹/۵۲	۰/۶۷	۰/۷۵	۳/۹۲	۲۷/۵۷
۱۰ سال	۳/۱۸	۲۳/۱	۰/۷۳	۰/۸۹	۴/۲۳	۳۲/۱۳

سناریو چهارم: در این سناریو شبیه سازی کمی با لحاظ نمودن بهترین راهکار مدیریتی جوی باغچه انجام شده است (جدول شماره ۱۰). دبی خروجی با استفاده از این راهکار مدیریتی برای دوره بازگشت های ۲، ۵ و ۱۰ سال به ترتیب برابر با ۲۴/۶۴، ۳۰/۲۲ و ۳۵/۱۲ مترمکعب بر ثانیه می باشد که نسبت به سناریو بدون استفاده از راهکار مدیریتی میزان دبی در حدود ۹ تا ۱۱ درصد کاهش داشته است.

جدول ۱۰. رواناب همه خروجی ها برای دوره بازگشت های ۲، ۵ و ۱۰ ساله در سناریو چهارم

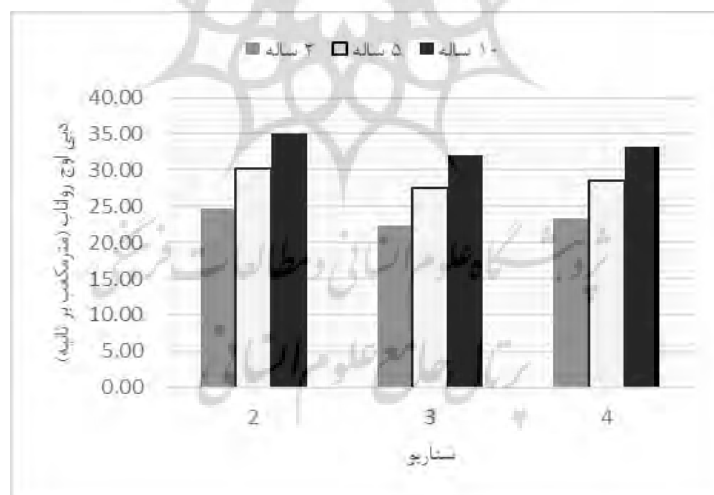
دوره بازگشت	خروجی ۱	خروجی ۲	خروجی ۳	خروجی ۴	خروجی ۵	جمع
دبی ۲ سال	۳/۴۶	۱۵/۹۸	۰/۶۶	۰/۷۴	۲/۸	۲۴/۶۴
(مترمکعب بر ثانیه) ۵ سال	۴/۲۷	۲۰/۰۱	۰/۷۳	۰/۹۱	۴/۳	۳۰/۲۲
۱۰ سال	۰/۰۵	۶۲/۲۳	۰/۷۹	۱/۰۸	۴/۶	۳۵/۱۲

تحلیل یافته‌های پژوهش

در خصوص واسنجی مدل، مقادیر بدست آمده برای ضریب نش-ساتکلیف اگر در بازه $0.65 < NS < 0.75$ باشد نشان دهنده شبیه سازی خوب و $NS > 0.75$ نشان دهنده شبیه سازی خیلی خوب مدل بارش رواناب است (زندى دره غریبی، ۱۳۹۶). با توجه به جدول شماره ۶ (ضریب NS بین ۰.۶۳ تا ۰.۹۳) انطباق قابل ملاحظه ای بین رواناب شبیه سازی شده و مشاهده ای وجود دارد. جدول شماره ۱۱ درصد تغییرات رواناب خروجی کل حوضه را در سناریوهای مختلف نشان می دهد. شکل ۴ نیز دبی خروجی کل شبکه را نشان می دهد. در این شکل ها ۲ ساله ها با هم، ۵ ساله ها با هم و ۱۰ ساله ها نیز باهم مقایسه شده‌اند. سناریو اول بدون راهکار مدیریتی است. و در میان آن‌ها پشت بام سبز بهترین راهکار و عملکرد را دارد. همانطور که در شکل های شماره ۳ و ۶ مشخص است شبکه در حالت بدون BMP برای دوره بازگشت ۱۰ ساله دارای ۱۸ درصد پس زدگی بود که این مقدار با اجرای سناریو پشت بام سبز پس زدگی جریان به ۱ درصد شبکه کاهش یافت. دد شکل های شماره ۵ و ۶ پس زدگی جریان به رنگ سبز برای دوره بازگشت ۱۰ ساله با اجرای سناریوهای سلول ماند بیولوژیکی و پشت بام سبز نشان داده شده است. با توجه به اینکه غالباً دوره بازگشت ۱۰ ساله برای طراحی شبکه جمع آوری آبهای سطحی استفاده می گردد علاوه بر بررسی پیک جریان، حداکثر سرعت نیز برای این دوره بازگشت بررسی شد که نتایج آن در جدول شماره ۱۲ آورده شده است.

جدول ۱۱. درصد تغییرات رواناب کل شبکه در سناریو ها

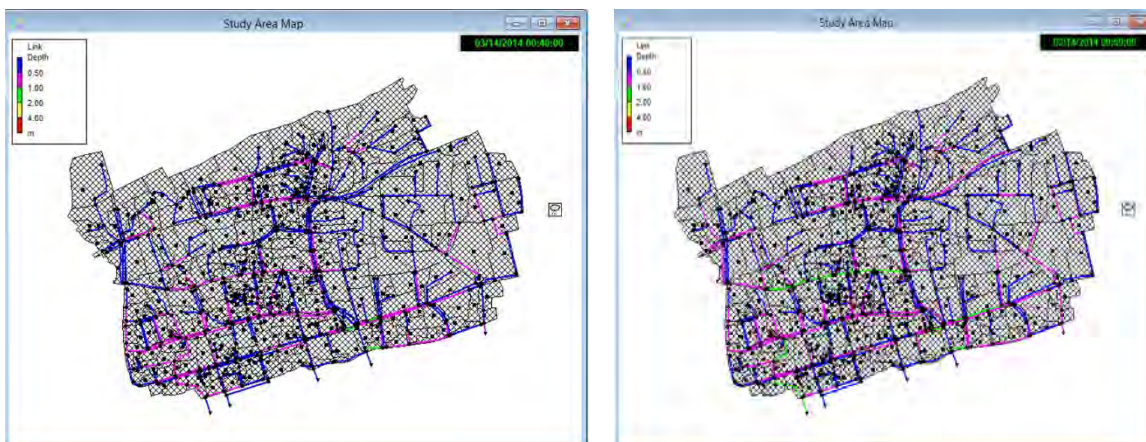
سناریو	نوع BMP	درصد کاهش پیک رواناب در دوره بازگشت		
		۲ ساله	۵ ساله	۱۰ ساله
۲	سلول ماند بیولوژیکی	-۱۴/۴۴	-۱۵/۵۶	-۱۶/۲۰
۳	پشت بام سبز	-۱۷/۸۰	-۱۸/۴۰	-۱۸/۸۰
۴	جوی باغچه	-۹/۴۸	-۱۰/۶۰	-۱۱/۳



شکل ۴. نمودار دبی اوج خروجی از کل شبکه در دوره بازگشت های مختلف

جدول ۱۲. درصد تغییرات حداکثر سرعت جریان با دوره بازگشت ۱۰ ساله در سناریو ها

سناریو اول (بدون BMP)	سناریو اول درصد کاهش	سناریو دوم درصد کاهش	سناریو سوم درصد کاهش	سناریو اول	سناریو اول (بدون BMP)	سناریو اول	سناریو اول
دبی (CMS)	۳۹/۵۹	۳۳/۱۷	۱۶/۲	۳۳/۱۷	۳۹/۵۹	۳۳/۱۷	۳۹/۵۹
حداکثر سرعت (M/S)	۳/۶	۳/۲	۱۱	۳/۲	۳/۶	۳/۲	۳/۶



شکل ۶. پس زدگی جریان به رنگ سبز برای دوره بازگشت ۱۰ ساله با اجرای سناریو پشت بام سبز

شکل ۵. پس زدگی جریان به رنگ سبز برای دوره بازگشت ۱۰ ساله با اجرای سناریو سلول ماند بیولوژیکی

نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور کنترل بهتر حجم سیلاب سه راهکار مدیریتی سلول ماند بیولوژیکی، پشت بام سبز و جوی باغچه در بخشی از حوضه آبریز شهر بندرعباس بررسی شد. برای این کار از مدل EPA-SWMM استفاده گردید. نتایج حاصل از واسنجی نشان داد که مدل SWMM دقت مورد نیاز برای شبیه سازی رواناب شهری را دارد و می توان از این مدل برای طرح های مدیریت رواناب شهری و طراحی شبکه زهکشی رواناب شهری در منطقه مورد مطالعه استفاده نمود. آنالیز حساسیت سه پارامتر شیب حوضه، ضریب زبری و درصد نفوذ ناپذیری نیز نشان داد که درصد نفوذ ناپذیری بیشترین حساسیت را در پیک رواناب خروجی پدید می آورد. نتایج حاصل از صحت سنجی مدل در دوره بازگشت های ۲، ۵ و ۱۰ ساله نشان داد که دبی اوج هیدروگراف خروجی حوضه با دبی اوج حاصل از روش استدلالی در دوره بازگشت های مختلف به هم نزدیک می باشد. با توجه به اینکه غالباً دوره بازگشت ۱۰ ساله برای طراحی شبکه جمع آوری آبهای سطحی استفاده می گردد نتایج نشان داد که در این دوره بازگشت راهکار مدیریتی پشت بام سبز با کاهش ۱۸/۸ درصدی دبی پیک و کاهش ۱۲/۵ درصدی حداکثر سرعت بهترین کارایی را دارد. همچنین نتایج نشان داد که در همه راهکارهای مورد بررسی با افزایش دوره بازگشت، درصد کاهش پیک رواناب نیز افزایش می یابد. از دیگر نتایج این تحقیق این است که شبکه در حالت بدون BMP برای دوره بازگشت ۱۰ ساله دارای ۱۸ درصد پس زدگی بود که این مقدار با اجرای سناریو پشت بام سبز پس زدگی جریان به ۱ درصد کل شبکه کاهش یافت. بنابراین راهکار مدیریتی پشت بام سبز به عنوان بهترین راهکار در کاهش پیک و سرعت جریان در محدوده مورد مطالعه انتخاب گردید.

منابع و مأخذ

- استاندارد صنعت آب و آفا. (۱۳۹۵). مبانی و ضوابط طراحی شبکه های آبهای سطحی و فاضلاب شهری، ضابطه شماره ۱۱۸، ۱۶۲ صفحه.
- اردشیر، عبدالله. (۱۳۹۶). مدیریت سیستم جمع آوری آب های سطحی و کنترل سیلاب شهری. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران).
- برومند نسب، سعید، جلالوند. علی. (۱۳۹۰). هیدرولوژی هیدرولیک و کیفیت رواناب در حوضه های شهری. انتشارات اهواز: دانشگاه شهید چمران.
- زندی دره غریبی، فاطمه، خورسندی کوهانستانی. زهره، مزین. ملیحه، آرمان. نسیم. (۱۳۹۶). بررسی کارایی مدل های بارش رواناب GR2M و GR4J در شبیه سازی جریان حوزه آبخیز دره تخت. مهندسی و مدیریت آبخیز. ۹ (۳)، ۳۶۰-۳۷۰.

- کمالی، کورش، اسلامی. علیرضا، جلالی. نادر، مصطفایی. اباذر، جلال الدینی. محمد صادق، غیاثی. نجفعلی، سیدی. ابراهیم. (۱۳۹۲). مبنای پخش سیلاب در آبخوان. تهران: انتشارات آبخیز پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.
- مهندسین مشاور پدیدآب سپاهان. (۱۳۹۴). *مطالعات مرحله اول تامین و بازچرخانی آب در خور گور سوزان، ویژگی های زمین شناسی و زمین ریخت شناسی.*
- هاشمی منفرد، آرمان، عزیزیان، غلامرضا، درخشان، پژمان، رئیس پور، جلیل. (۱۳۹۷). بررسی کفایت سیستم زهکشی موجود در مناطق شهری جهت عبور سیلاب و امکان اصلاح آن به کمک مدل SWMM ۵ (مطالعه موردی: شهرستان داراب). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵، ۲۲۱-۲۳۸.
- Barbosa, A. E., Fernandes, J. N., & David, L. M. (2012). Key issues for sustainable urban stormwater management. *Water research*, 46(20), 6787-6798.
- Braud, I., Fletcher, T. D., & Andrieu, H. (2013). Hydrology of peri-urban catchments: Processes and modelling. *Journal of Hydrology*, 485, p-1.
- Chang, N. B., Lu, J. W., Chui, T. F. M., & Hartshorn, N. (2018). Global policy analysis of low impact development for stormwater management in urban regions. *Land Use Policy*, 70, 368-383.
- Fryirs, K. A., & Brierley, G. J. (2012). *Geomorphic analysis of river systems: an approach to reading the landscape*. John Wiley & Sons.
- Geberemariam, T.K. (2015). Urban Drainage Infrastructure Design Model Calibration and Output Uncertainty Minimization, Are Model Users Pursuing Accuracy and Model Calibration? *Inter. J. Sci. Engin. Res. (IJSER)*. 3(11). 2347-3878.
- Geosyntec Consultants. (2010). Stormwater BMP Guidance Tool- A Stormwater Best Management Practices Guide for Orleans and Jefferson Parishes, Prepared for Bayou Land and Louisiana, 142 pp.
- Jia, H., Lu, Y., Shaw, L. Y., & Chen, Y. (2012). Planning of LID-BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village. *Separation and Purification Technology*, 84, 112-119.
- Jurczak, T., Wagner, I., Kaczowski, Z., Szklarek, S., & Zalewski, M. (2018). Hybrid system for the purification of street stormwater runoff supplying urban recreation reservoirs. *Ecological Engineering*, 110, 67-77.
- Meena, Y. R., & Gupta, A. K. (2018). Spatial BMP approach for mitigating the urban flooding in Bengaluru city, Karnataka, India. *Spatial Information Research*, 1-10.
- Birgani, Y. T., & Yazdandoost, F. (2018). An Integrated Framework to Evaluate Resilient-Sustainable Urban Drainage Management Plans Using a Combined-adaptive MCDM Technique. *Water Resources Management*, 32(8), 2817-2835.
- Recanatesi, F., Petroselli, A., Ripa, M. N., & Leone, A. (2017). Assessment of stormwater runoff management practices and BMPs under soil sealing: a study case in a peri-urban watershed of the metropolitan area of Rome (Italy). *Journal of environmental management*, 201, 6-18.
- Rossman, L.A. (2005). *Storm Water Management Model user manual*. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research & Development United States Environmental Protection Agency.
- Winz, I., Brierley, G., & Trowsdale, S. (2011). Dominant perspectives and the shape of urban stormwater futures. *Urban Water Journal*, 8(6), 337-349.