



Hazard Management of Inundation and Pollutants in Urban Floods Using Optimal Conventional and Novel Strategies

M. Karami¹, A. Ardeshir^{2*} and K. Behzadian

Abstract

Urbanisation by decreasing in pervious areas would result in increase in the risk of flood inundation and cause more discharge of pollutants into receiving water bodies. This paper presents the management of urban flood hazard in terms of inundation and pollutants discharge into receiving water bodies using a combination of the conventional and novel techniques. Conventional techniques include increasing the dimension of conduits as well as decreasing their roughness. Novel techniques on the other hand include bio-retention systems, pervious pavements, infiltration trenches, and detention ponds in urban drainage networks. In this study the multi-objective optimization model is developed using multi-objective genetic algorithm coupled with a simulation model of urban drainage system using SWMM software. The objectives are to minimize the economic cost, the inundation flood hazard, and the expected pollution reaching the receiving waters. Pollution control consider pollutants of TSS, TN, and TP. The suggested methodology was applied to a case study for the urban drainage system of Golestan city in Tehran Province. Results indicated that applying the optimal methods can considerably decrease the expected flood and pollutants. Results of Pareto front showed that indirect relation exists between the solutions of optimal control of expected inundation and the optimal control of expected pollutants in receiving water bodies.

Keywords: Flood management, Urban drainage networks, Hazard, Optimisation.

Received: February 28, 2015

Accepted: July 8, 2015

مدیریت خطرپذیری آبگرفتگی و آلودگی ناشی از سیلاب شهری با استفاده از راهکارهای بهینه متداول و نوین

مژگان کرمی^۱، عبدالله اردشیر^{۲*} و کوروش بهزادیان^۳

چکیده

توسعه شهرنشینی و در نتیجه کاهش سطوح نفوذناپذیری سبب افزایش خطرپذیری سیلاب و آلودگی بیشتر آب‌های پذیرنده می‌شود. این مقاله مدیریت خطرپذیری سیلاب شهری را با هدف کاهش آبگرفتگی و تخلیه آلاینده‌ها در آب‌های پذیرنده با به‌کارگیری دو روش‌های متداول و نوین ارائه می‌نماید. روش‌های متداول شامل افزایش ابعاد کانال‌های شبکه، کاهش ضریب زبری آن‌ها و روش‌های نوین شامل اجرای سیستم ماند بیولوژیکی، روسازی نفوذپذیر، ترانشه‌های نفوذ و حوضچه‌های نگهداشت در شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی می‌باشد. مدل بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه توسعه‌یافته که با مدل شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی توسط نرم‌افزار SWMM ترکیب می‌شود. اهداف مدل بهینه‌سازی حداقل نمودن سه معیار هزینه اقتصادی، خطرپذیری آبگرفتگی سیلاب و آلودگی محتمل آب‌های پذیرنده است. در کنترل بار آلودگی، آلاینده‌های TSS، TN و TP مدنظر قرار گرفت. کاربرد روش پیشنهادی بر روی مطالعه موردی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شهر گلستان تشریح شد. نتایج نشان می‌دهد بکارگیری ترکیب بهینه هر دو رویکرد متداول و نوین، منجر به کاهش قابل‌ملاحظه و مؤثر خطرپذیری آبگرفتگی و تخلیه آلاینده‌ها در آب‌های پذیرنده می‌شود. نتایج رویه بهینه نشان می‌دهد کنترل بهینه خطرپذیری آبگرفتگی رابطه معکوس با میزان کنترل بهینه تخلیه آلاینده‌ها در آب‌های پذیرنده دارد.

کلمات کلیدی: مدیریت سیلاب، شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شهری، خطرپذیری، بهینه‌سازی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۱۲/۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۴/۱۷

1- MSc graduate, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Iran.

2- Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Iran. ardeshir@aut.ac.ir

3-Assistant Professor, University of West London, St Mary's Road, London, United Kingdom

*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۲- دانشیار دانشکده عمران و محیط‌زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر، خیابان حافظ، تهران

۳- دانشیار دانشگاه لندن غرب، خیابان سنت مری، لندن، انگلستان

*- نویسنده مسئول

توسعه شهرنشینی به واسطه قطع درختان و تخریب پوشش گیاهی و ایجاد سطوح نفوذناپذیر، علاوه بر کاهش نفوذپذیری منطقه و عدم تغذیه مناسب آب‌های زیرزمینی باعث افزایش دبی پیک سیلاب و ایجاد جریان‌های سیلابی شدید و همچنین کاهش کیفیت منابع آب می‌شود (خداشناس و تاجبخش، ۱۳۸۶). توسعه شهرها و به تبع آن تبدیل زمین‌های طبیعی به مناطق مسکونی باعث تغییر در چرخه هیدرولوژیکی طبیعی منطقه می‌شود (NYDEC, 2010). افزایش سطوح نفوذناپذیر به صورت قابل توجهی هیدرولوژی پیش از توسعه شهرها را تغییر داده و حداکثر جریان و حجم رواناب سطحی در محیط‌های شهری در مقایسه با محیط‌های توسعه نیافته طبیعی افزایش می‌یابد (Coffman, 1999). همچنین از آنجایی که رواناب سطحی حاصله در محیط‌های توسعه یافته نمی‌تواند به جریان‌های زیرسطحی بیوندد در نتیجه سطح جریان پایه نیز کاهش می‌یابد. بنابراین اقدامات کنترلی برای کاهش حجم رواناب و تغذیه آب‌های زیرزمینی امری ضروری است (Bitting, 2006).

به کارگیری بهترین شیوه‌های مدیریتی (BMPs)، راهکاری نوین برای کنترل حجم و کاهش خطر سیلاب در عین افزایش نفوذپذیری آب‌های زیرزمینی می‌باشند. مفهوم بهترین شیوه‌های مدیریتی (BMP) در محیط‌های شهری شامل گستره وسیعی از تکنولوژی‌ها و فعالیت‌ها می‌شود که باعث کم کردن اثرات توسعه شهری حوضه آبریز بر رژیم جریان می‌گردد (خداشناس و تاجبخش، ۱۳۸۶). BMPها استراتژی برای کنترل حجم و حذف آلودگی‌های مشخص از رواناب سیلاب می‌باشند، بدین معنی که BMPها نه تنها جریان کل و پیک رواناب را کاهش می‌دهند، بلکه کیفیت رواناب را نیز بهبود داده و مانع از آلوده شدن پیکره آب‌های پذیرنده این رواناب‌ها می‌شود. بدین ترتیب آلودگی‌های جذب شده در BMPها از طریق تبخیر و تعرق، نفوذ آب و تصفیه یا عملیات بیولوژیکی و شیمیایی از بین می‌رود. یکی از امتیازات عمده این شیوه مدیریت نوین نسبت به دیدگاه متداول مدیریت آب‌های سطحی، انعطاف‌پذیری آن‌ها می‌باشد. در برنامه‌ریزی و مدیریت سنتی (متداول) کنترل سیلاب به طور معمول هدف اصلی جمع‌آوری و دور نمودن هر چه سریع‌تر سیلاب از مناطق شهری در نظر گرفته می‌شود. در این نوع رویکرد سیلاب معمولاً از طریق اجرای طرح‌های سازه‌های وسیع از مناطق شهری دور می‌شود. نتیجه این نوع رویکرد، علاوه بر ایجاد پدیده‌هایی چون فرسایش خاک، افزایش بار آلودگی آب‌های پذیرنده، باعث افزایش هزینه‌ها و تشعشع گازهای گلخانه‌ای با توجه به حجم عظیم فعالیت‌های عمرانی خواهد شد (Shaver et al., 2007).

خطرپذیری سیلاب یا آبگرفتگی محتمل از مجموع حاصل ضرب احتمال وقوع یک رخداد سیلاب در شدت اثر آن به دست می‌آید. احتمال وقوع رخداد سیلاب که در نتیجه احتمال وقوع بارندگی حاصل می‌شود به صورت یک متغیر تصادفی است که همواره وجود دارد ولی اثرات آن با مدیریت بهتر سیلاب، می‌تواند کاهش پیدا کند. خطرپذیری‌های قابل بررسی در این مقاله مرتبط با کمیت و کیفیت رواناب ناشی از سیلاب است. (Jiang et al., 2009) خطرپذیری‌های سیلاب را شناسایی و عوامل مؤثر در جهت کاهش آن در منطقه در جهت کاهش خسارت‌های اقتصادی ارائه نمودند. (Abi Aad et al., 2010) روش جدیدی برای مدل‌سازی باغچه‌های باران^۲ و بشکه‌های آب باران^۳ با استفاده از نرم‌افزار SWMM^۴ پیشنهاد دادند و اثر تجمی استفاده از BMPها در سطح حوضه را ارزیابی نمودند. (Lee et al., 2010) نیز با استفاده از مدل SWMM، صرفه اقتصادی BMPها را بررسی کردند تا به چگونگی نوع و مکان و اندازه آن‌ها، پاسخ دهند. نتایج آن‌ها نشان داد از بین سه نوع BMP شامل روسازی‌های نفوذپذیر، حوضچه‌های نگهداشت، بام‌های سبز، مؤثرترین وسیله برای کنترل رواناب روسازی‌های نفوذپذیر می‌باشند. (Young et al., 2011) روشی بر اساس استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)^۵ برای تعیین BMPها ارائه دادند که در آن مقدار کاهش رواناب در هر سناریو به وسیله شبیه‌سازی سیستم زهکشی حوضه تعیین می‌شود. (Eichenwal and McGarity, 2010) با استفاده از نرم‌افزار SWMM، بهترین نوع و موقعیت BMPها و پروژه‌های LID بر اساس به حداکثر رساندن کاهش حجم و بارهای رسوبی با حداقل هزینه تعیین نمودند. (Jia et al., 2012) ساختار یکپارچه‌ای را برای برنامه‌ریزی توسعه شهری پیرامون LID-BMPها به وسیله ترکیب SWMM و سیستم پشتیبانی در تصمیم‌گیری (DSS)^۶ پیشنهاد نمودند که در آن از یک مدل بهینه‌سازی BMP برای حداقل نمودن هزینه و حداکثر نمودن سود استفاده می‌شد. (Oraei et al., 2012) با استفاده از SWMM، مدلی را با هدف کاهش حجم و آلاینده‌های سیلاب و با کمترین هزینه بر اساس نوع BMPها در کاربری‌های مختلف زمین پیشنهاد دادند. (Karamouz and Nazif, 2013) مدل بهینه‌سازی استفاده از BMPها را با هدف افزایش اطمینان‌پذیری سیلاب و کاهش خسارت سیلاب و هزینه در سیستم زهکشی شهری پیشنهاد دادند. بر اساس بررسی نویسندگان مقاله، در مدل‌های بهینه‌سازی استفاده از BMPها در تحقیقات گذشته تاکنون هر دو هدف کاهش خطرپذیری آبگرفتگی سیلاب و آلودگی رواناب سیلاب به صورت همزمان مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در این مقاله، به کارگیری BMPها با هدف همزمان هر دو تابع هدف خطرپذیری‌های آبگرفتگی و آلودگی رواناب ناشی از سیلاب به همراه

خسارت سیلاب و هزینه اجرای BMPها ارائه می‌شود. بدین ترتیب از ساختار یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه که با مدل شبیه‌سازی SWMM ترکیب می‌شود جهت دستیابی به این اهداف استفاده می‌شود. در ادامه، روش تحقیق شامل مدل بهینه‌سازی و شبیه‌سازی ارائه و سپس با معرفی مطالعه موردی، نتایج بحث شده و جمع‌بندی یافته‌های کلیدی و پیشنهادها در پایان ارائه می‌شود.

۲- روش تحقیق

مدیریت سیلاب شهری در این مقاله مطابق روند نمای پیشنهادی شکل ۱ در دو بخش اصلی ارائه می‌شود: (۱) بخش اول تهیه مدل شبیه‌سازی شبکه زهکشی آب سطحی شامل جمع‌آوری داده و تعیین بارش‌های موردنظر و در نهایت مدل وضعیت موجود شبکه با استفاده از نرم‌افزار SWMM؛ (۲) بخش دوم تهیه مدل بهینه‌سازی شامل تعیین اهداف و متغیرهای تصمیم، انتخاب الگوریتم تکاملی بهینه‌سازی برای ارزیابی عملکرد مدل شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شهری و تعیین مکان‌یابی بهینه BMPها. در ادامه جزئیات بیشتر این دو بخش ارائه می‌شود.

۲-۱- مدل‌سازی شبیه‌سازی

در مدل شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی از مدل بارش- رواناب به‌عنوان فرآیندهای هیدرولوژیکی و از روند یابی دینامیکی جریان به‌عنوان مدل‌سازی هیدرولیکی در نرم‌افزار SWMM استفاده شده است. در روند یابی جریان، موج دینامیکی با توجه به دقت بالای آن و استفاده از معادلات یک‌بعدی سن و نان انتخاب شده است. برای مدل‌سازی نفوذ آب در خاک از روش هورتون با توجه به سادگی و نیاز به داده‌های کم و دقت قابل‌قبول استفاده شده است. دیگر داده‌های موردنیاز برای شبیه‌سازی کمی و آلودگی وضعیت موجود شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی که در این مطالعه استفاده گردید عبارت است از مشخصات منطقه مورد مطالعه شامل ویژگی‌های آب و هوایی بارش، کاربری اراضی (مسکونی با تراکم بالا، مسکونی با تراکم پایین، تجاری)، مشخصات سطوح حوضه (نظیر شیب، مساحت، نفوذپذیری) و مشخصات آلاینده‌های TSS، TN، TP که به‌عنوان داده ورودی در نرم‌افزار SWMM مورد استفاده قرار گرفت.

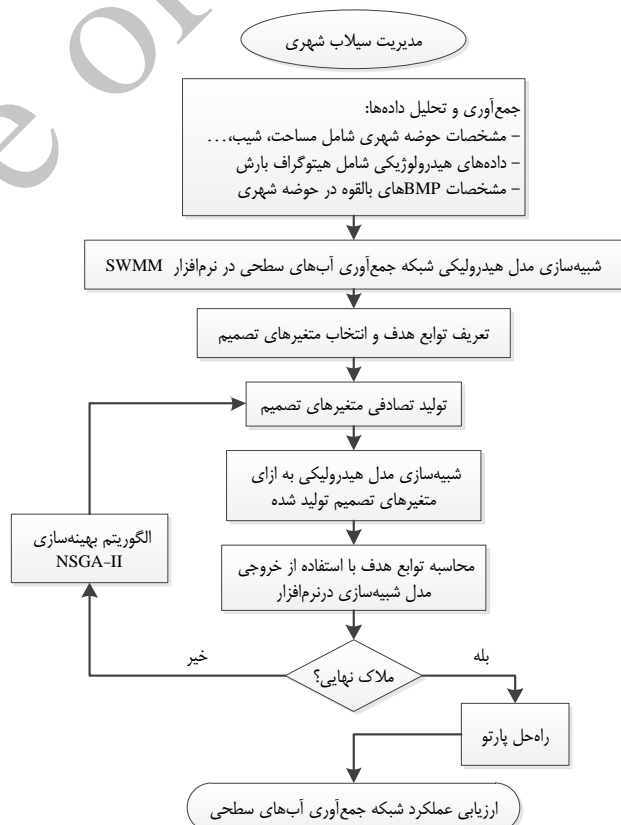
۲-۲- مدل بهینه‌سازی

از بین روش‌های مورد استفاده برای بهبود عملکرد سیستم زهکشی در مقابله با سیلاب مخصوصاً BMPها، انتخاب بهترین مجموعه از این روش‌ها در این مقاله با استفاده از مدل بهینه‌سازی تعیین می‌شود. با توجه به وجود اهداف متفاوت برای انتخاب بهترین مجموعه، مدل بهینه‌سازی چندهدفه در این مقاله شامل سه هدف ذیل انتخاب می‌گردد:

- به حداقل رساندن خطرپذیری آبرفتگی سیلاب شهری
 - به حداقل رساندن تخلیه آلاینده‌های سیلاب در آب‌های پذیرنده
 - به حداقل رساندن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری BMPها
- نحوه فرمول‌بندی هر یک از توابع هدف در مدل بهینه‌سازی در ادامه با جزئیات ارائه می‌شود. پس از فرمول‌بندی توابع هدف و تعیین کروموزوم‌ها، مدل بهینه‌سازی توسط الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II حل می‌شود (Deb et al., 2002).

● تابع هدف خطرپذیری محتمل آبرفتگی سیلاب

خطرپذیری محتمل آبرفتگی سیلاب شهری بر اساس خطرپذیری آبرفتگی معابر شهری ناشی از بارندگی که در نتیجه منجر به مختل شدن خدمات شهری خواهد شد تعریف می‌شود. در این نوع خطرپذیری متغیر تصادفی، بارش در حوضه مورد مطالعه می‌باشد که بر اساس احتمال وقوع بارندگی‌های مختلف و شدت اثر حاصل از آن به‌صورت میزان آبرفتگی حاصل از سرریز شدن آب در کانال‌های



شکل ۱- روندنمای مراحل مطالعاتی و مدل پیشنهادی

جمع‌آوری رواناب‌های سطحی است (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۴). بدین ترتیب خطرپذیری آبگرفتگی (کمی) با استفاده از معادله (۱) به‌دست می‌آید:

$$RF = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot P_i \quad (1)$$

که C_{ij} = شدت اثر سیلاب در گره ij در مقابل بارش i ، P_i = احتمال وقوع بارش i ، m = تعداد کل بارش‌ها با دوره بازگشت‌های مختلف و n = تعداد کل گره‌های پایش در شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی است.

برای مدیریت آبگرفتگی سیلاب شهری، تمرکز بر هیدرولوژی رخدادهای شدید با دوره بازگشت‌های بالا است درحالی‌که ارزیابی کیفی آب و میزان آلاینده‌ها، نیاز به جریان‌های رواناب‌های شهری با رخدادهای سیلاب کوچک‌تر و متناوب‌تر (دوره بازگشت‌های پایین) می‌باشد که سهم بیشتری در شستشو و انتقال آلاینده‌ها به آب‌های پذیرنده دارند (سلیمانی، ۱۳۹۲). در این مقاله جهت محاسبه خطرپذیری‌ها، هم از جنبه کیفی آب و هم از جنبه کمی آبگرفتگی، رخدادهای بارش با دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۱۰۰ ساله در نظر گرفته شده است که نمایشگر انواع دوره‌های بازگشت باشد. با در اختیار داشتن دوره بازگشت بارش (T)، احتمال وقوع هر رخداد (P) مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$P = \frac{1}{T} \quad (2)$$

شدت اثر سیلاب معمولاً به‌صورت میزان خسارت ناشی از سیلاب ارائه می‌شود. خسارت سیلاب نیز رابطه مستقیم با میزان بزرگی سیلاب و سرعت سیلاب در سطح شهر دارد. با توجه به این‌که منطقه مورد مطالعه تقریباً هموار و دارای شیب اندک است، از اثرات سرعت جاری‌شدن رواناب صرف‌نظر شده است. بنابراین در این تحقیق به‌عنوان جایگزین خسارت سیلاب، حجم آب‌گرفتگی حاصل از سرریزی جریان آب در گره‌ها به‌عنوان شدت اثر خطرپذیری آبگرفتگی سیلاب در نظر گرفته می‌شود که این میزان از نتایج مدل شبیه‌سازی سیلاب در نرم‌افزار SWMM به‌دست می‌آید.

• تابع هدف آلودگی محتمل سیلاب

پیامدهای آلاینده‌های سیلاب در حوضه در پی یک رخداد بارندگی با میزان بار آلاینده‌ها در نقاط خروجی از حوضه و تخلیه به آب‌های پذیرنده نسبت مستقیم دارد. بنابراین آلودگی محتمل سیلاب شهری به‌صورت خطرپذیری ناشی از تخلیه آلاینده‌ها در نقاط انتهایی شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی به آب‌های پذیرنده قابل محاسبه می‌باشد (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۴). محاسبه آلودگی محتمل ناشی از

سیلاب مشابه خطرپذیری آبگرفتگی مطابق با رابطه (۳) از حاصل ضرب احتمال وقوع و شدت اثر محاسبه می‌شود:

$$RP = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n A_{ik} \cdot P_i \quad (3)$$

که A_{ik} = شدت اثر آلودگی برابر مجموع میزان بار آلاینده‌های موردنظر در خروجی k ام در مقابل بارش i ام، P_i = احتمال وقوع بارش i ام، m = تعداد کل بارش‌ها با دوره بازگشت‌های مختلف و n = تعداد کل خروجی‌ها در شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی است. شدت اثر آلودگی محتمل سیلاب شهری معمولاً به‌صورت میزان خسارت حاصل از آلاینده‌ها در اثر وقوع سیلاب محاسبه می‌شود. این خسارت با میزان بار آلاینده‌های سیلاب شهری ورودی به آب‌های پذیرنده رابطه مستقیم دارد. از آنجایی‌که حجم سیلاب غلظت آلاینده‌ها را تحت تأثیر قرار دهد برای بررسی شدت اثر آلودگی محتمل سیلاب از مقدار بار آلاینده تخلیه‌شده در نقاط تخلیه به آب‌های پذیرنده برحسب کیلوگرم استفاده می‌شود. این میزان آلاینده‌ها بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در نرم‌افزار SWMM محاسبه می‌شود.

• تابع هدف مجموع کل هزینه‌ها

اصلی‌ترین محدودیت توسعه مدیریت سیلاب شهری، معمولاً هزینه‌های بالا سرمایه‌گذاری و نگهداری تکنیک‌های BMPها در کنترل سیلاب است. بنابراین مجموع هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری به‌عنوان یکی از اهداف سه‌گانه مدیریت سیلاب شهری باید در نظر گرفته شود چراکه تغییر در میزان سرمایه‌گذاری در جهت کنترل و کاهش سیلاب تأثیرات زیادی در میزان خطرپذیری‌های آبگرفتگی و آلودگی سیلاب خواهد داشت.

برای برآورد هزینه‌های راهکارهای مورد بررسی در این مقاله از نتایج مطالعات محققین دیگر استفاده شده است (Karamouz and Nazif, 2013 Strecker et al., 2010). تخمین هزینه BMPها، اغلب به دلایلی شامل کمبود اطلاعات درست و دقیق ساخت، تنوع در محل‌های ساخت، تفاوت منطقه‌ای و شهری در طراحی مشکل است (Strecker et al., 2010). هزینه سازه‌های کنترل رواناب شامل هزینه طراحی، ساخت و عملیات احتمالی و هزینه نگهداری می‌شود. در اینجا مجموع هزینه‌های دوره عمر می‌تواند به‌عنوان شاخص انتخاب برای ارزیابی انواع BMPها استفاده شود. ترکیبی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و نگهداری در درازمدت، کل هزینه چرخه عمر را پیش‌بینی می‌کند که نماینده بهتری برای هزینه‌های پیاده‌سازی BMP است. هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های اولیه اجرای BMPها هستند. مطابق با توصیه‌های EPA، هزینه‌های سرمایه‌گذاری با معادلاتی بر اساس

اندازه یا حجم BMP به صورت رابطه (۴) می‌تواند تخمین زده شود (USEPA, 2004):

$$C = aP^b \quad (4)$$

که C = هزینه سرمایه‌گذاری برآورد شده، P = متغیرهای تعیین‌کننده (حجم، مساحت یا جریان) و a, b = متغیرهای آماری تعیین‌شده از تجزیه و تحلیل رگرسیون می‌باشند. جدول ۱، معادلات رگرسیون هزینه‌های سرمایه‌گذاری (به استثنای هزینه زمین) را برای انواع BMPها نشان می‌دهد (Strecker et al., 2010). همچنین هزینه تغییر در ابعاد و ضریب مانینگ کانال‌ها به عنوان توسعه راهکار سنتی برای مدیریت سیلاب شهری به صورت ارائه شده در جدول ۲ می‌باشد (Karamouz and Nazif, 2013). هزینه‌های سالانه نگهداری BMPها به صورت درصدی از هزینه ساخت در جدول ۳ و جدول ۴ آورده شده است (Strecker et al., 2010). این هزینه‌ها که به صورت سالانه در کل دوره عمر مفید BMP می‌باشد. در این مقاله به صورت هزینه اولیه بر اساس ارزش حاضر و نرخ بهره تبدیل شده و با جمع با هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه کل BMP را تشکیل می‌دهد.

● متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم استفاده شده عبارت است از مشخصات راهکارهای مدیریتی کنترل سیلاب شامل شیوه‌های مدیریتی سنتی (مرسوم) و نوین. متغیرهای روش مرسوم کنترل سیلاب عبارت است از افزایش ظرفیت انتقال کانال‌های روباز موجود از طریق کاهش ضریب مانینگ کانال‌ها و افزایش سطح مقطع آن‌ها. روش‌های نوین شامل به‌کارگیری انواع BMPها (با هدف کاهش حجم رواناب و کاهش آلودگی) به صورت حوضچه نگهداشت، روسازی نفوذپذیر، ترانشه نفوذ و سیستم ماند بیولوژیکی است. به‌طور کلی با توجه به شرایط منطقه، مقدار فضا و تجهیزات در دسترس، در این مقاله از چهار نوع BMP سازهای استفاده شده است، توصیف این BMPها به‌طور مختصر در اینجا تشریح می‌شود.

سیستم ماند بیولوژیکی^۷: در کاهش جریان و حجم رواناب، بهبود کیفیت آب و مشارکت در زیباسازی یک منطقه بسیار مفید هستند و معمولاً در طول جاده‌ها، در چمنزارها، در قسمت‌هایی از پارکینگ‌های وسیع، استفاده می‌شوند و نیازمند جدول‌کشی و کانال‌کشی برای هدایت جریان آب هستند. همچنین ممکن است به یک سیستم زهکشی زیرزمینی که نفوذپذیری خاک در آن محدود است نیاز داشته باشد. این تأسیسات در تمامی مجموعه‌ها قابل استفاده هستند اما در نواحی به علت محدودیت فضا، به‌سختی و

با مشکل قابل اجرا هستند.

حوضچه نگهداشت مرطوب^۸: باعث توقف پیک سیلاب شده و نرخ حداکثر تخلیه را تحت تأثیر قرار می‌دهند اگرچه که ممکن است حجم رواناب را کاهش ندهد. همچنین باعث ایجاد زیبایی محیط‌زیست می‌شوند و در بسیاری از شرایط همانند مناطق مسکونی، تجاری و صنعتی می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند.

جدول ۱- هزینه‌های سرمایه‌گذاری BMPها
(Strecker et al., 2010)

نوع BMP	هزینه سرمایه‌گذاری پایه (دلار)
حوضچه نگهداشت	$C = 24.5V^{0.71}$
ترانشه‌های نفوذ	$C = 173V^{0.63}$
سیستم‌های ماند بیولوژیکی	$C = (2-3)A$
روسازی نفوذپذیر	$C = (3-4)A$

– هزینه‌ها در دسامبر 2002 محاسبه شده‌اند و شامل هزینه زمین نمی‌شوند.
– واحد V (حجم BMP) فوت مکعب و A (مساحت BMP) فوت مربع

جدول ۲- هزینه کانال‌ها (Karamouz and Nazif, 2013)

نوع BMP	هزینه‌ها (دلار)
تغییرات ضریب مانینگ کانال	$C = \Delta n \times 27 \times L$
تغییرات سطح مقطع کانال	$C = \Delta A \times 270 \times L$

Δn = تغییر ضریب مانینگ کانال و ΔA = تغییر سطح مقطع کانال و L = طول کانال؛ کلیه واحدها متریک است.

جدول ۳- هزینه نگهداری سالانه BMPها
(Strecker et al., 2010)

نوع BMP	هزینه سالانه نگهداری (درصدی از هزینه‌های ساخت)
حوضچه نگهداشت تر	3% - 6%
ترانشه‌های نفوذ	5% - 20%
سیستم‌های ماند بیولوژیکی	5% - 7%

جدول ۴- هزینه‌های نگهداری کانال‌ها
(Karamouz and Nazif, 2013)

نوع BMP	هزینه سالانه نگهداری (درصدی از هزینه ساخت)
تغییرات ضریب مانینگ کانال	5%
تغییرات سطح مقطع کانال	0.5%

ترانسه نفوذ: برای کنترل حجم رواناب از طریق نفوذ استفاده می‌شود و آب‌های زیرزمینی و نفوذ آب به زمین را تقویت می‌کنند، حجم رواناب حداکثر را کاهش می‌دهند و کیفیت آب را بهبود می‌بخشند.

روسازی نفوذپذیر^۱: علاوه بر بهبود کیفیت آب، باعث کاهش حداکثر دبی در یک مکان شده و باعث تغذیه آب‌های زیرزمینی کاهش آب‌های راکد در جاده‌ها و اماکن دیگر می‌شوند. در نهایت کاهش نفوذپذیری با استفاده از این روش، زمان تمرکز را افزایش می‌دهد و بنابراین جریان‌های محلی و خسارت به سیستم‌های زهکشی را کاهش می‌دهد.

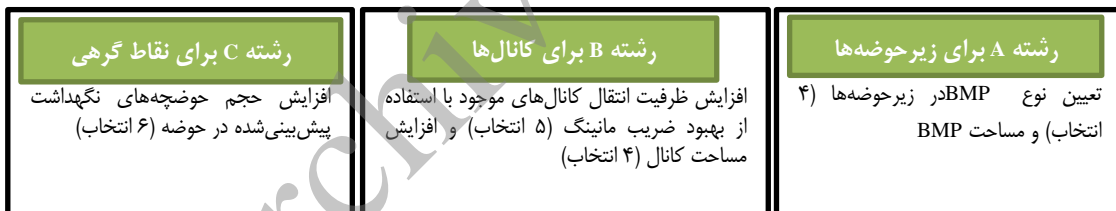
محدودیت‌های اجرایی آن‌ها در مناطق شهری در این مقاله مطابق مشخصات آن‌ها در جدول ۵، انجام می‌شود که بدین ترتیب برای BMP‌های بکار گرفته شده در نقاط گرهی، کانال‌ها و زیرحوضه‌ها به ترتیب ۱، ۲ و ۳ متغیر تصمیم می‌باشد. بدین ترتیب، جزئیات کدگذاری ژنتیکی (متغیر تصمیم) هر کروموزوم‌ها (جواب) مطابق شکل ۳ می‌باشد. کدگذاری عدد صحیح برای متغیرهای تصمیم مساحت حوضچه‌های نگهداشت، نوع BMP‌ها و عدد حقیقی برای متغیرهای تصمیم ابعاد و ضریب مانینگ کانال و مساحت BMP‌ها استفاده شده است. موقعیت حوضچه‌های نگهداشت در این مقاله از پیش تعریف شده است (سلیمانی، ۱۳۹۲)

بدین ترتیب ساختار کروموزوم‌های مورداستفاده (متغیرهای تصمیم) که در شکل ۲ نشان داده شده است از ۳ بخش اصلی تشکیل شده‌اند: زیرحوضه‌ها^۱، کانال‌ها^۲، نقاط گرهی^۳. با توجه به ساختار کروموزوم و مؤلفه‌های سیستم زهکشی، طول کروموزوم^۴ (CL) برابر خواهد بود با:

$$CL = n_s \times BMP_s + n_L \times BMP_L + n_p \times BMP_p \quad (5)$$

که n_s ، n_L ، n_p به ترتیب تعداد زیرحوضه‌ها، کانال‌ها، حوضچه‌ها و BMP_s ، BMP_L ، BMP_p به ترتیب تعداد نوع متغیر تصمیم در BMP به کار گرفته شده برای زیرحوضه‌ها، کانال‌ها و حوضچه‌ها می‌باشند. نوع متغیر تصمیم BMP بر اساس مشخصات و

مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی تهیه‌شده با نرم‌افزار SWMM، با مدل بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک چندهدفه که در محیط متلب آماده شده، در قالب یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز ادغام شده و با یکدیگر ارتباط برقرار می‌نمایند. به بیان دقیق‌تر، متغیرهای تصمیم هر جواب مربوط به مدل بهینه‌سازی به مدل شبیه‌سازی وارد شده و تنظیم می‌شود. با اجرای مدل شبیه‌سازی، نتایج شبیه‌سازی برای تعیین توابع هدف مدل بهینه‌سازی و رتبه‌بندی جواب‌های الگوریتم بهینه‌سازی استفاده می‌شود. این روند تا زمانی که ملاک نهایی مدل بهینه‌سازی برقرار گردد (شکل ۱)، تکرار می‌گردد و در نهایت رویه بهینه پارتو که مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه می‌باشد، ایجاد می‌شود.



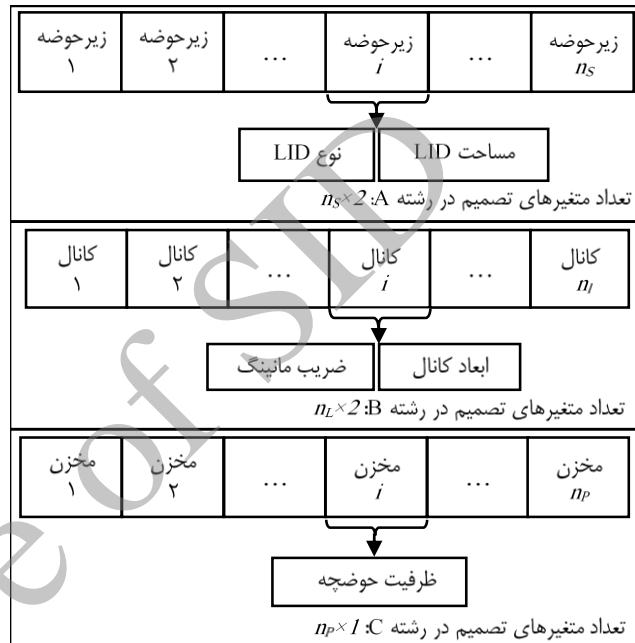
شکل ۲- ساختار کروموزوم (متغیرهای تصمیم) در مدل بهینه‌سازی

جدول ۵- مشخصات و محدودیت‌های BMP‌های استفاده شده

مؤلفه سیستم زهکشی	هدف از اجرای BMP	تغییرات ممکن	گزینه‌های قابل انتخاب
زیرحوضه‌ها	کاهش حجم رواناب تولیدشده با افزایش ظرفیت نفوذ	به‌کارگیری روسازی نفوذپذیر، ترانسه نفوذ، سیستم ماند بیولوژیکی و درصد مساحت BMP آن در زیرحوضه	نوع BMP شامل یکی از ۴ گزینه روسازی نفوذپذیر، ترانسه نفوذ، سیستم ماند بیولوژیکی و درصد مساحت BMP بین ۱۰٪-۲۰٪ زیرحوضه
کانال‌ها	افزایش ظرفیت انتقال کانال‌های موجود	افزایش عرض کانال بهبود ضریب مانینگ	تغییر عرض کانال‌های موجود به عرض ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ سانتی‌متر کاهش ضریب مانینگ کانال‌ها ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ درصد وضعیت موجود
نقاط گرهی	افزایش ظرفیت نگهداشت	ساخت حوضچه‌های نگهداشت	ساخت حوضچه نگهداشت با ارتفاع ۲ متر و مساحت ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰ مترمربع

۳- مطالعه موردی و تنظیمات مدل شبیه‌سازی

مدل پیشنهادی بر روی مطالعه شبکه جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی شهر گلستان که واقع در جنوب استان تهران می‌باشد تشریح می‌شود (شکل ۴). ارتفاع متوسط شهر گلستان ۱۰۴۶.۳۰ متر از سطح دریا و اختلاف ارتفاع بین بلندترین و پست‌ترین نقاط ۲۷.۱۹ متر تعیین گردیده است. جهت کلی شیب محدوده مطالعاتی از نواحی شمالی به محدوده‌های جنوبی است و متوسط مقدار شیب سطح شهر بین ۰.۵ تا ۳ درصد می‌باشد.



شکل ۳- ساختار کدگذاری کروموزوم‌ها برای زیرحوضه‌ها، کانال‌ها، نقاط گرهی

منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی^{۱۵} ایستگاه باران‌سنجی مهرآباد به‌عنوان مبنای داده‌های جوی زیرحوضه این شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی در نظر گرفته شد. بررسی این منحنی‌ها توسط نویسندگان نشان داد بارش‌های با تداوم ۶ ساعت بحرانی‌ترین میزان بارش در بین منحنی‌های این ایستگاه‌ها را دارد. بنابراین برای ارزیابی خطرپذیری‌های کمی و کیفی، بارش‌های ۲، ۱۰، ۱۰۰ سال با تداوم ۶ ساعت در این ایستگاه مدنظر قرار گرفت. شدت این سه بارش از منحنی شدت-مدت-فراوانی ایستگاه مهرآباد در جدول ۶ استخراج شده است. برای توزیع زمانی شدت بارش از روش ین^{۱۶} و چاو^{۱۷} استفاده گردید (Prodanovic and Simonovic, 2004).

برای مدل‌سازی منطقه، حوضه مورد مطالعه باید به حوضه‌های کوچک‌تر تقسیم شود. با استفاده از نقشه رقومی ۱:۲۰۰۰ منطقه

مورد مطالعه که سازمان نقشه‌برداری کشور در سال ۱۳۸۰ تهیه نموده است، تقسیم‌بندی زیرحوضه‌ها با در نظر گرفتن توپوگرافی، مشخصات کاربری زمین، شبکه جمع‌آوری و محل خروجی رواناب انجام شد (شکل ۵). رواناب این زیرحوضه‌ها به دو نهر شادچای و سیاه‌آب تخلیه می‌شود، خروجی این دو نهر به‌عنوان محل تخلیه به آب‌های پذیرنده مدنظر قرار می‌گیرد. روشی که برای تقسیم‌بندی زیرحوضه‌ها بکار گرفته شده است بر اساس شیب خیابان‌ها و مسیر حرکت رواناب می‌باشد. به دو دلیل این روش تقسیم‌بندی صورت می‌گیرد: رواناب موجود یک زیرحوضه بعد از جریان یافتن در طول زیرحوضه وارد کانال شود. رواناب موجود در زیرحوضه باید از نقاط خروجی زیرحوضه خارج شود. بدین ترتیب، شبکه موجود به ۳۳ زیرحوضه تقسیم شده است. طرح کلی شبکه و زیرحوضه‌های مورد مطالعه در نرم‌افزار SWMM به همراه دو نهر شادچای و سیاه‌آب و محل تخلیه رواناب شبکه در شکل ۵ نشان داده شده است.

بر اساس مقادیر توصیه‌شده در نرم‌افزار SWMM و شرایط موجود در مطالعه موردی، ضریب مانپنگ برای سطوح نفوذپذیر زیرحوضه‌ها ۰.۱ و برای سطوح نفوذناپذیر و کانال‌های بتنی موجود در حوضه ۰.۱۴ پیشنهاد شده است (Rossman, 2010).

جدول ۶- شدت بارندگی‌های موردنظر برحسب میلی‌متر بر ساعت

تداوم بارش (ساعت)	دوره بازگشت		
	سال ۱۰	سال ۱۰۰	سال ۱۰۰۰
۶	۱.۹۴	۳.۰۴۲	۵.۹۴



شکل ۴- موقعیت منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه استان تهران

استفاده نشده بود انجام شد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری جریان در مجاری انتقال شبکه فقط در دو نقطه خروجی حوضه نهرهای شادچای و سیاه‌آب در دسترس بود، فرآیند کالیبراسیون و صحت‌سنجی آن‌ها صرفاً با توجه به این نقاط انجام شد.

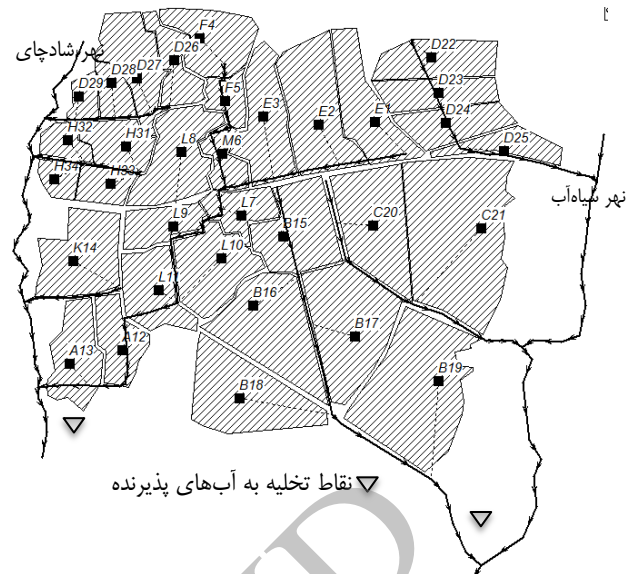
پارامترهای کیفی آب که لازم است در فرآیند کالیبراسیون مدل تنظیم شوند عبارت‌اند از میزان ضرایب ثابت حداکثر تجمع میزان آلاینده‌ها و ثابت نیمه اشباع برای تابع شبیه‌سازی تجمع آلاینده‌ها (Build-up) و ضرایب شستشو و توان شستشو در تابع نمای شبیه‌سازی شستشوی آلاینده (wash-off) (Rossman, 2010). از آنجایی که داده‌های مشاهداتی متغیرهای کیفی آب (نظیر بار آلودگی آلاینده‌های مورد تحلیل) برای شبکه جمع‌آوری آب در زمان بارندگی در این مطالعه موردی در دسترس نبود، در اینجا میزان این ضرایب براساس مقادیر پیشنهادی غلظت استاندارد کیفی آب‌های سطحی برای آلاینده‌های TSS، TN و TP مطابق استاندارد سازمان محیط‌زیست آمریکا (EPA, 2010) در نظر گرفته شده است (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۴). سلطانی (۱۳۸۸) نشان داد که ضرایب پیشنهادی برای معادلات توابع تجمع و شستشوی آلاینده‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده در تهران با تقریب نسبتاً خوبی مطابقت دارد.

۴- تنظیمات مدل بهینه‌سازی

در الگوریتم بهینه‌سازی فرض می‌شود که در هر یک از ۳۳ زیرحوضه موجود در شبکه، اجرای فقط یک نوع BMP از بین BMP‌های موجود امکان‌پذیر است. تعداد ۹۴ کانال در شبکه به‌عنوان مجاری بالقوه، امکان تغییر ابعاد و ضریب مانینگ دارند. در نقاط گرهی فرض می‌شود ۶ مخزن نصب شده باشد که حجم آن‌ها می‌تواند تغییر نماید. در کلیه این متغیرهای تصمیم، عدم اجرای آن‌ها نیز در نظر گرفته شده است. طبق معادله (۵) طول کروموزوم‌ها برابر است با:

$$۲۶۰ = ۱ \times ۶ + ۲ \times ۹۴ + ۲ \times ۳۳ = \text{طول کروموزوم}$$

تنظیمات الگوریتم تکاملی NSGA-II با استفاده از چندین اجرای آزمایشی با نسل‌های اولیه تصادفی روی مدل پیشنهادی تعیین گردید به‌گونه‌ای که سریع‌ترین همگرایی برای یافتن جواب‌های بهینه حاصل گردد. بر این اساس اندازه جمعیت هر نسل ۵۰ کروموزوم، عملگر جهش با احتمال ۰.۱ و عملگر جابجایی (تزیوج) دونقطه‌ای با احتمال ۰.۸ انتخاب شده است. همچنین پس از تعدادی اجرای مدل بهینه‌سازی مشخص گردید که اجرای الگوریتم بهینه‌سازی با حداکثر تعداد نسل ۴۰۰ برای رسیدن به همگرایی کافی می‌باشد.



شکل ۵- موقعیت زیرحوضه‌ها و کانال‌های زهکشی شهر گلستان در نرم‌افزار SWMM

همچنین، برای مدل‌سازی نفوذ، روش هورتون به کار گرفته شده است. مطابق با ویژگی‌های منطقه، ضرایب معادله هورتون با توجه به مقادیر پیشنهادی نرم‌افزار SWMM استفاده شده است (Rossman, 2010). در نزدیکی حوضه رباط‌کریم ضریب هدایت هیدرولیکی خاک برابر ۴۴ میلی‌متر در ساعت می‌باشد (حفیظی و پاشاخانو، ۱۳۸۵). آلاینده‌های مدل‌سازی شده در این مقاله شامل سه آلاینده TSS، TP، TN می‌باشند. به‌منظور شبیه‌سازی کیفی انباشت آلاینده‌ها^{۱۹} از روش تابع اشباع و برای شستشوی مواد^{۱۹} از روش تابع نمایی در SWMM استفاده شده است.

پس از ساخت مدل شبیه‌سازی SWMM، کالیبراسیون پارامترهای مدل شامل متغیرهای کمی مدل با استفاده از مقایسه داده‌های مشاهداتی و محاسباتی برای دو هیدروگراف خروجی‌های حوضه آبریز شهری برای هایتوگراف یک بارندگی تاریخی موجود به روش سعی و خطا انجام گردید. در این رویکرد در یک فرآیند تکراری، پارامترهای کالیبراسیون به نحوی تغییر داده می‌شود که اختلاف بین هیدروگراف‌های خروجی مدل محاسباتی و هیدروگراف‌های مشاهداتی به حداقل برسد. در فرآیند کالیبراسیون فقط تعداد محدودی از پارامترهای مدل با بیشترین عدم قطعیت تنظیم گردید. پارامترهایی هیدرولیکی آب مورد استفاده برای کالیبراسیون در این مدل عبارت‌اند از میزان ضرایب زبری مجاری جمع‌آوری و انتقال آب‌های سطحی و میزان ضرایب نفوذپذیری زیرحوضه‌های مدل‌سازی و رطوبت اولیه خاک. صحت سنجی عملکرد کالیبراسیون مدل با استفاده از یکی از بارش‌هایی که در فرآیند کالیبراسیون

۵- نتایج و بحث

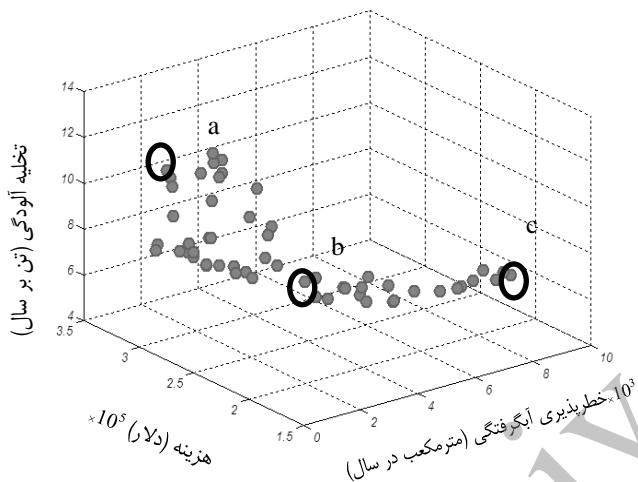
پس از انجام تنظیمات مدل بهینه‌سازی، الگوریتم با چندین نسل اولیه متفاوت اجرا گردید و در نهایت بهترین جواب انتخاب شد. همچنین بزرگی فضای جواب مسئله بهینه‌سازی برابر است:

$$[3 \times 10^{11}] \cong [33 \times \binom{4}{1}] \times [33 \times \binom{12}{1}] \times [94 \times \binom{5}{1}] \times [94 \times \binom{4}{1}] \times [6 \times \binom{6}{1}]$$

با توجه به چنین فضای بزرگ جواب مسئله، دستیابی به جواب بهینه کلی برای روش‌های بهینه‌سازی تضمین نمی‌شود و جواب‌ها به‌عنوان جواب نزدیک به بهینه تلقی شوند. همچنین مقایسه این فضای بسیار بزرگ جواب‌های امکان‌پذیر (قابل‌شمارش) با تعداد کل مجموعه جواب‌های بررسی‌شده در روش الگوریتم ژنتیک ($50 \times 400 = 20000$) برای دستیابی به جواب نزدیک به بهینه، قابلیت بالای روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک را در دستیابی به جواب‌های بهینه نشان می‌دهد. شکل ۶ یک نمونه از رویه بهینه پارتو و جواب نزدیک به بهینه نسبت به سه تابع هدف ذکرشده برای مدل بهینه‌سازی چندهدفه سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی گلستان را نشان می‌دهد. برای هر نقطه روی رویه بهینه پارتو مجموعه راهکارهای پیشنهادی متشکل از BMPها وجود دارد که خطرپذیری آبگرفتگی، آلودگی محتمل و هزینه کل مشخصی را ایجاد می‌نماید. تصمیم‌گیرنده می‌تواند هر یک از نقاط روی این رویه را بر اساس محدودیت‌های خطرپذیری آبگرفتگی، آلودگی یا اقتصادی به‌عنوان یک جواب برتر جهت راهکارهای مدیریت سیلاب انتخاب نماید. در این رویه بهینه، محدوده خطرپذیری آبگرفتگی سیلاب بین ۲۲۰ مترمکعب و ۹۰۱ هزار مترمکعب در سال، بازه آلودگی محتمل آلاینده‌ها از ۵.۷ تا ۱۳.۸ تن در سال و هزینه اجرای راهکارها بین ۱۹۵ و ۳۰۷ هزار دلار تغییر می‌نماید. درحالی‌که خطرپذیری آبگرفتگی سیلاب در وضعیت موجود (بدون استفاده از رویکردهای بهینه نوین و متداول) در شبکه برابر ۷۰۰۶ هزار مترمکعب در سال و آلودگی محتمل آن آبگرفتگی برابر ۸.۵ تن در سال است. بنابراین در صورتی که هدف صرفاً کاهش خطرپذیری آبگرفتگی با همین میزان خطرپذیری آلاینده‌ها باشد، امکان کاهش سیلاب محتمل تا حد ۵۰۰ مترمکعب وجود دارد (شکل ۸). در صورتی که هدف کاهش آلودگی محتمل در عین حفظ میزان خطرپذیری آبگرفتگی باشد، امکان کاهش آلودگی محتمل تا حد ۶.۵ تن در سال وجود دارد.

شکل ۷ رویه بهینه پارتو را نسبت به دو هدف نشان می‌دهد که در آن‌ها، هدف سوم (خطرپذیری آبگرفتگی) با افزایش شعاع دایره‌ها افزایش می‌یابد. با بررسی آماری جواب‌های رویه بهینه پارتو نسبت به دو هدف هزینه کل و آلودگی محتمل، می‌توان آن‌ها را مطابق شکل ۷ در سه گروه قرار داد: ۱- گروه اول جواب‌هایی که دارای

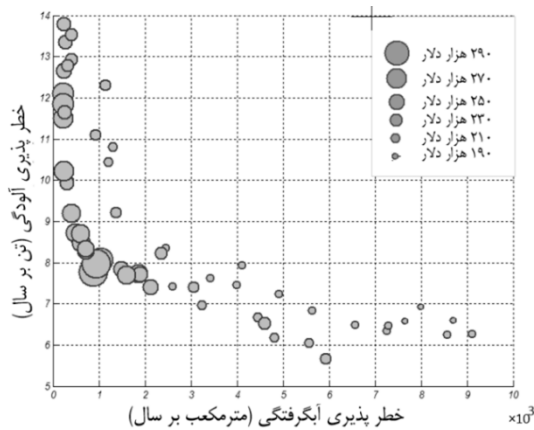
آلودگی محتمل بالا اما خطرپذیری آبگرفتگی قابل قبول و هزینه‌ی اجرای راهکارها پایین دارند. ۲- گروه دوم جواب‌هایی که خطرپذیری آلاینده و هزینه‌ی اجرای پایین اما خطرپذیری آبگرفتگی بالا دارند. ۳- گروه سوم نیز شامل جواب‌هایی است که به نسبت گروه اول آلودگی محتمل کمتر و نسبت به گروه دوم هزینه کمتری دارند و از نظر آبگرفتگی میزان خطرپذیری قابل‌قبولی را می‌پذیرند. در شرایطی که هیچ‌گونه شرایط محدودیت‌کننده برای تصمیم‌گیری وجود نداشته باشد، جواب‌های گروه سوم برای انتخاب نهایی پیشنهاد می‌شود چراکه جواب‌های این گروه آلودگی محتمل یا آبگرفتگی کمتری نسبت به گروه‌های اول و دوم دارد در عین اینکه به‌طور همزمان دستیابی به خطرپذیری‌های آبگرفتگی و آلاینده و هزینه اقتصادی پایین امکان‌پذیر نیست.



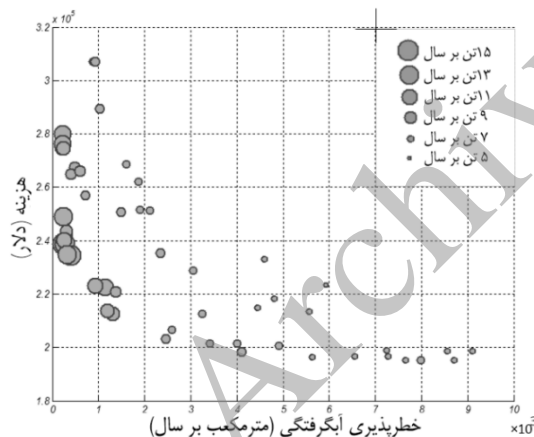
شکل ۶- رویه بهینه پارتو مدل بهینه‌سازی نسبت به سه تابع هدف

بررسی شکل ۸ نشان می‌دهد که خطرپذیری آبگرفتگی با آلودگی محتمل در شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی رابطه عکس با یکدیگر دارد (هزینه اجرای راهکارها با افزایش شعاع دایره‌ها افزایش می‌یابد). به عبارتی، در صورت انتخاب جوابی با دستیابی به کمترین میزان خطرپذیری آبگرفتگی سیلاب، مقدار آلاینده‌های تخلیه‌شده به آب‌های پذیرنده به حداکثر میزان ممکن خواهد رسید. دلیل این امر این موضوع می‌تواند باشد که با اجرای راهکارهای کنترل سیلاب برای کاهش میزان آبگرفتگی گره‌ها، آلاینده به سمت خروجی حوضه انتقال داده می‌شوند و مقدار بار آلاینده‌ها در نقاط خروجی و در نتیجه آلودگی محتمل افزایش می‌یابد. این در حالی است که در جواب‌های با حجم آبگرفتگی قابل توجه در گره‌ها، عمدتاً با اجرای BMPها به‌وسیله راهکارهای ارائه شده در سطح حوضه نیز از بین

افزایش می‌یابد. متغیرهای تصمیم جواب (c) نشان می‌دهد که BMPها با مساحت بالا در نظر گرفته شده‌اند، به همین دلیل آلودگی محتمل کمتر و خطرپذیری آبگرفتگی بیشتر است. جواب (b) مربوط به حالتی است که هم از ابعاد کانال و هم از BMPها به صورت بهینه استفاده شده است، که هم می‌تواند تا حدی خطر آبگرفتگی و خطر آلودگی را کنترل نماید.



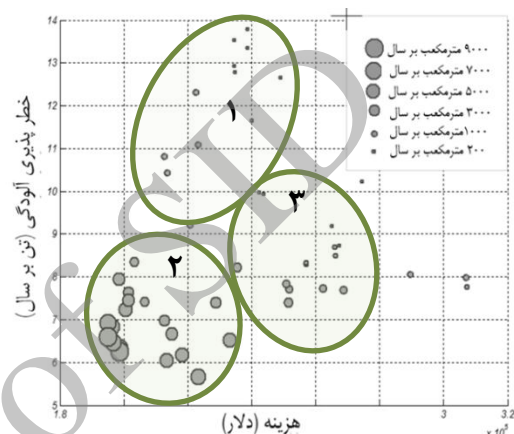
شکل ۸- رویه بهینه پارتو نسبت به دو هدف خطرپذیری کمی و کیفی



شکل ۹- رویه بهینه پارتو نسبت به دو هدف خطرپذیری کمی و هزینه

به منظور ارزیابی بهتر عملکرد جواب‌های مدل بهینه‌سازی ارائه شده، در اینجا یکی از جواب‌های رویه پارتو در این قسمت با دو راهکار پیشنهادی بدون بهینه‌سازی مقایسه می‌شود و درصد تغییرات (بهبود) خطرپذیری آبگرفتگی و آلودگی محتمل نسبت به وضعیت موجود شبکه (بدون در نظر گرفتن راهکارها) بررسی می‌گردد. جواب بهینه‌سازی با توجه به اینکه در محدوده‌ای که هم خطرپذیری آبگرفتگی و هم آلودگی محتمل و هم هزینه قابل‌قبولی نسبت به

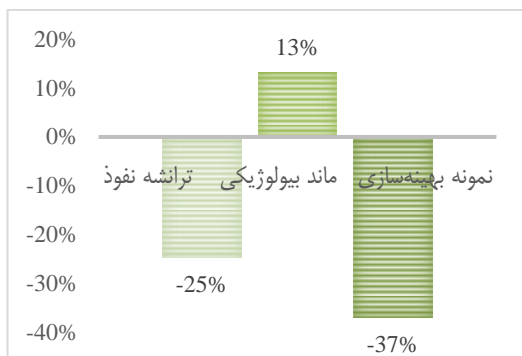
می‌روند که در نتیجه بار آلاینده‌ها در خروجی حوضه کم می‌گردد و در هر صورت به سمت تخلیه‌کننده‌ها کمتر می‌روند. در راهکارهای سنتی کنترل سیلاب، توجه به بهبود خطرپذیری آبگرفتگی، افزایش بار آلاینده‌ها در نقاط خروجی را در پی خواهد داشت و در راهکارهای نوین، BMPها عملکرد کیفی را در حوضه بهبود می‌بخشند، اما خطرپذیری آبگرفتگی را افزایش خواهند داد. بنابراین، برای مدیریت کمی و کیفی سیلاب استفاده تلفیقی از هر دو راهکار توصیه می‌شود تا بتوان در کنار کاهش خطرپذیری آبگرفتگی، میزان تخلیه‌ها در آب‌های پذیرنده نیز کنترل شود.



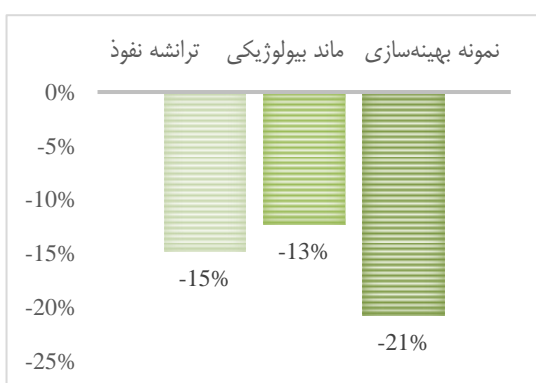
شکل ۷- رویه بهینه پارتو نسبت به دو هدف هزینه و کیفی

بررسی شکل ۹ نشان می‌دهد با افزایش هزینه اجرای راهکارها، به صورت مستقیم باعث کاهش خطرپذیری آبگرفتگی سیلاب می‌شود (آلودگی محتمل با افزایش شعاع دایره‌ها افزایش می‌یابد). بنابراین زمانی که به حداقل رساندن خطرپذیری کمی سیلاب مورد توجه باشد، لازم است هزینه بسیار بالایی برای آن صرف شود. دلیل این امر آن است که برای راهکارهای پیشنهاد شده نظیر BMPها و حوضچه‌های نگهداشت و همچنین روش‌های سنتی در ابعاد بزرگ‌تر هزینه بیشتری باید انجام شود. هزینه این BMPها نیز با مساحت و حجم اجرای آن‌ها رابطه مستقیم دارد. برای کاهش حجم هم نیاز به تغییر در عرض کانال‌ها و همچنین استفاده از BMPها در مساحت و حجم بیشتر خواهد بود.

در جدول ۷ سه نمونه a، b و c از نقاط بهینه بر روی منحنی پارتو (شکل ۶) با هم مقایسه شده‌اند. جواب (a) بیشینه هزینه را دارا می‌باشد، در متغیرهای تصمیم این جواب، ابعاد حداکثر کانال‌های موجود افزایش داده شده است، به این دلیل خطرپذیری آبگرفتگی به حداقل مقدار ممکن رسیده است. همچنین به علت افزایش حجم سیلاب، مقدار بار آلاینده که توسط سیلاب به نقاط خروجی می‌رسد،



شکل ۱۰- تغییرات خطرپذیری آبگرفتگی به ازای راهکارهای مختلف



شکل ۱۱- تغییرات آلودگی محتمل به ازای راهکارهای مختلف

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روشی برای تعیین ترکیب بهینه استفاده از BMPها و افزایش ابعاد کانال به منظور استفاده بهینه از راهکارهای مدیریتی معرفی شد. روش مذکور از نتایج مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی برای مکان‌یابی BMPها به منظور کنترل آبگرفتگی و آلودگی رواناب ناشی از سیلاب استفاده می‌کند. مدل SWMM برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی و الگوریتم NSGA-II برای بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور نشان دادن کاربرد روش ارائه شده، این الگوریتم روی زیرحوضه شهری گلستان واقع در استان تهران انجام شد. خروجی الگوریتم با در نظر گرفتن کاهش خطرپذیری‌های آبگرفتگی و آلودگی و هزینه اجرای BMPها، نوع و مساحت BMPهای بهینه برای هر زیرحوضه و مساحت کانال‌های موجود می‌باشد. الگوریتم ارائه شده نشان می‌دهد که روند به‌کارگیری BMPها در هر مکان از شبکه را در سطح یک شهر به نحو چشمگیری میزان خطرپذیری‌های آبگرفتگی و آلاینده‌ها را بهبود می‌بخشد. بر اساس تحلیل انجام‌شده، یافته‌های اساسی ذیل به‌دست آمده است:

بقیه جواب‌های رویه بهینه دارد انتخاب می‌گردد. راهکارهای پیشنهادی مورد بررسی عبارت‌اند از:

جدول ۷- مقایسه توابع هدف سه نمونه از نقاط حدی رویه

	بهینه پارتو		
	آلودگی محتمل (تن در سال)	هزینه (دلار)	خطرپذیری آبگرفتگی (مترمکعب در سال)
a	۱۲۱۱۳.۴	۲۷۹۹۲۰	۰.۲۱۳۹۱
b	۷۴۰۸۸۲	۲۲۸۷۶۸.۷	۳۰۰۵۲۸۶
c	۶۲۷۰۶۱	۱۹۸۶۲۹.۱	۹.۱۰۳۳۵

۱- سیستم ماند بیولوژیکی: در این راهکار فرض می‌گردد اجرای سیستم ماند بیولوژیکی در ۲۰٪ مساحت ۳۳ زیرحوضه صورت گیرد.
۲- ترانشه نفوذ: در این راهکار نیز فرض می‌شود در وضعیت موجود شبکه، ترانشه نفوذ در ۲۰٪ مساحت ۳۳ زیرحوضه اجرا گردد.

درصد تغییرات خطرپذیری آبگرفتگی (کمی) نسبت به وضعیت موجود شبکه برای سه روش منتخب در شکل ۱۰ ارائه شده است که در آن علامت منفی نشان‌دهنده کاهش خطرپذیری آبگرفتگی سیلاب می‌باشد. اجرای راهکارهای پیشنهادی، میزان خطرپذیری آبگرفتگی را نسبت به وضعیت فعلی شبکه کاهش می‌دهد، اما همان‌طور که مشاهده می‌گردد با اجرای بهینه BMPها که به‌صورت ترکیبی از راهکارهای مدیریتی می‌باشد، خطرپذیری آبگرفتگی نسبت به راهکارهای پیشنهادی مورد بررسی به میزان بیشتری کاهش یافته است.

آلودگی محتمل از مجموع بار آلاینده‌های TSS، TN و TP به آب‌های پذیرنده شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی به‌دست می‌آید. مقادیر آلودگی محتمل به ازای راهکارهای مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. روسازی نفوذپذیر، سیستم ماند بیولوژیکی و ترانشه نفوذ با هدف کاهش بار آلاینده‌ها اجرا می‌گردند. نتایج نیز کاهش آلودگی محتمل را برای راهکارهای اجرای BMPها به‌صورت جداگانه نشان می‌دهد. بیشترین مقدار کاهش آلودگی محتمل در شرایط بهینه‌سازی مشاهده می‌شود (۲۱٪) که نشان می‌دهد تلفیقی از این راهکارها با هم، بهترین عملکرد را در کاهش آلودگی محتمل خواهند داشت.

خداشناس س، تاجبخش م (۱۳۸۶) بهره‌گیری از روش‌های نوین کنترل سیلاب شهری برای استفاده بهینه در منابع آب. مجموعه مقالات کنفرانس ملی توسعه منابع آب، زاهدان، ایران، ۱۰-۱۱ اسفند.

سلیمانی م (۱۳۹۲) ارزیابی و اولویت‌بندی خطرپذیری‌های ساخت و بهره‌برداری یک شبکه جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی شهری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امیرکبیر، تهران.

سلیمانی م، بهزادیان ک، اردشیر ع (۱۳۹۴) ارزیابی راهکارهای اصلاح شبکه زهکشی آب‌های سطحی شهری بر اساس معیارهای مبتنی بر ریسک. مجله آب و فاضلاب، در حال چاپ تابستان ۱۳۹۴.

سلطانی م (۱۳۸۸) مدل‌سازی کیفی نهرهای درون‌شهری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف، تهران

Abi Aad M, Suidan M, Shuster W (2010) Modeling techniques of best management practices: rain barrels and rain gardens using EPA SWMM-5. *Journal of Hydrologic Engineering* 15:434-443.

Bitting J (2006) A methodology and evaluation tool for comparing post-construction storm water best management practises. M.Sc. Thesis, Cambridge University .

Coffman L (1999) Low-impact development design strategies, an integrated design approach. Washington D.C: U.S. Environmental Protection Agency.

Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T (2002) A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on* 6(2): 182-197.

Eichenwald Z, McGarity A (2010) Watershed-based optimal stormwater management: part 2—hydrologic modeling of LID/BMP sites on little crum creek in suburban philadelphia. *World Environmental and Water Resources Congress* 2010: 2522-2530.

Jia H, Lu Y, Yu S, Chen Y (2012) Planning of LID-BMPs for urban runoff control: the case of beijing olympic village. *Separation and Purification Technology* 84:112-119.

Jiang W, Deng L, Chen L (2009) Risk assessment and validation of flood disaster based on fuzzy mathematics. *Progress in Natural Science* 19:1419-1425.

Karamouz M, Nazif S (2013) Reliability-based flood management in urban watersheds considering

۱- کنترل بهینه میزان خطرپذیری آبگرفتگی رابطه معکوس با میزان کنترل بهینه آلودگی محتمل آلاینده در نقاط خروجی و آب‌های پذیرنده دارد.

۲- برای دستیابی به بهترین جواب باید لازم است از ترکیب هر دو راهکار سنتی و نوین استفاده گردد تا هر دو خطرپذیری آبگرفتگی و آلودگی به میزان قابل‌قبولی کاهش یابند.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی به‌کاررفته برای استفاده ترکیبی از راهکارها، می‌تواند میزان هر دو خطرپذیری آبگرفتگی و آلودگی را نسبت به روش‌های غیر بهینه‌سازی به میزان قابل‌توجهی بهبود دهد.

۴- نظر به انعطاف‌پذیری ساختار الگوریتم معرفی‌شده، می‌توان از این رویکرد در پروژه‌های با اهداف متفاوت برای مدیریت جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی شهری استفاده نمود.

۷- قدردانی

در آماده‌سازی مدل شبیه‌سازی این مطالعه موردی، از همکاری صمیمانه کارشناسان پژوهشکده محیط‌زیست دانشگاه امیرکبیر خصوصاً آقایان مهندس مجتبی عابدی و مهدی سرایی به‌صورت ویژه قدردانی می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Best Management Practices
- 2- Rain Garden
- 3- Rain Barrels
- 4- Storm Water Management Model
- 5- Geographic Information System
- 6- Decision Support System
- 7- Bio-retention
- 8- Wet Pond
- 9- Infiltration Trench
- 10- Porous Pavement
- 11- Sub-basins
- 12- Links
- 13- Junctions
- 14- Chromosome length
- 15- Intensity-Duration-Frequency (IDF)
- 16- Yen
- 17- Chow
- 18- Build-up
- 19- Wash-off

۸- مراجع

حفیظی م، پاشاخانلو ف (۱۳۸۵) ضریب آبگذری از داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در دشت تهران. *مجله فیزیک زمین و فضا*، شماره ۳۲: ۱۳-۲۱.

- Rossman L.A (2010) Storm water management model. User's manual. version 5.0, United States Environmental Protection Agency.
- Shaver E, Horner R, Skupien J (2007) Fundamentals of urban runoff management: technical and institutional issues. North American Lake Management Society.
- Strecker E, Sheffield A, Cristina C, Leisenring M (2010) Stormwater BMP guidance tool. New Orleans.
- USEPA (2004) The use of best management practices (BMPs) in urban watersheds. EPA-600-R-04-184. Office of Research and Development, Washington, D.C. 20460.
- Young K, Dymond R, Kibler D (2011) Development of an Improved approach for selecting storm-water best management practices. Journal of Water Resources Planning and Management 137:268-275.
- climate change impacts. Journal of Water Resources Planning and Management 139:520-533.
- Lee k, Kim H, Pak G (2010) Cost-effectiveness analysis of stormwater best management practices (BMPs) in urban watersheds. Desalination and Water Treatment 19:92-96.
- NYDEC (2010) New York state stormwater management design manual. New York: Center for Watershed Protection.
- Oraei S, Saghafian B, Shamsai A (2012) Multi-objective optimization for combined quality–quantity urban runoff control. Hydrology and Earth System Sciences 16:4531-4542.
- Prodanovic P, P. Simonovic S (2004) Generation of synthetic design storms for the upper thames river basin. Water Resources Research Report no. 049, Facility for intelligent decision support, Department of Civil and Environmental Engineering, London, Ontario, Canada, 20 pages.

Archive of SID