

## Performance Development of Modern Methods Using Multi-Objective Optimization in Urban Runoff Control

H. Noori<sup>1</sup>, S. Farzin<sup>2\*</sup> and H. Karami<sup>3</sup>

### Abstract

In this study the Best Management Practices (BMP) and Low Impact Development (LID) were employed to optimize the management and control of urban runoff. The hydraulic and hydrological models of urban runoff were simulated by the Storm Water Management Model (SWMM) and combined with Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGAI). Three objective functions were defined as: minimizing the cost of BMP (Investment) in dollar, minimizing the runoff volume over the catchment in m<sup>3</sup>, and minimizing the pollutant load at external node. The urban catchment studied was part of the northeast of Karaj city namely Azimiyeh located in Alborz Province. In order to achieve more accuracy, the catchment was splitted into 67 sub-catchment using ArcGIS software based on the urban stream network. In this research five types of LID-BMP structures with various types and areas were defined into NSGAI. The NSGAI presented a proper combination of LID-BMP structures considering land use of the 67 sub-catchments and produced suitable solutions. Finally, seven scenarios were defined to assess the NSGAI. The results showed that by applying the solution obtained by NSGAI for the study area, the quantity and quality of flood decreased by 41% and 23%, respectively. Also, the use of LID-BMP structures in separated form, could only fulfill one of the objective functions but did not resulted in any optimal choice. The use of LID-BMP structures in combination form with appropriate area had a better performance compared to separated mode. Moreover, higher cost did not result in more efficiency, especially in the flood quantity. In addition, with reducing the amount of flood, pollution was not always reduced and depended on the type and area of the BMP.

**Keywords:** Urban Runoff Management, Multi-Objective Genetic Algorithm, SWMM, GIS, LID-BMP.

Received: August 3, 2017

Accepted: February 11, 2018

## توسعه عملکرد روش‌های نوین با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه در کنترل رواناب شهری

حامد نوری<sup>۱</sup>، سعید فرزین<sup>۲\*</sup> و حجت کرمی<sup>۳</sup>

### چکیده

در این مطالعه، با هدف بهینه‌سازی مدیریت و کنترل رواناب سیلاب در حوضه‌های آبریز شهری از روش‌های نوین مانند روش‌های بهینه‌سازی مدیریت (BMP) و روش‌های توسعه با حداقل اثرات جانبی (LID) استفاده شده است. مدل‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی توسط نرم‌افزار SWMM انجام پذیرفته است و با الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGAI) به‌عنوان مدل بهینه‌ساز تلفیق شده است. توابع هدف شامل هزینه ساخت و اجرا (سرمایه‌گذاری) و بهره‌برداری از سازه‌های روش‌های نوین (LID-BMP)، حجم سیلاب در سطح حوضه و بار آلاینده‌ها در خروجی حوضه آبریز در نظر گرفته شده است. منطقه مورد مطالعه، حوضه شهری عظیمه واقع در شهر کرج، استان البرز است. بر اساس سامانه جمع‌آوری رواناب اصلی و فرعی موجود و به‌منظور بالا بردن دقت و اعمال روش‌های نوین، حوضه در فضای نرم‌افزار ArcGIS به ۶۷ زیرحوضه تقسیم گردیده است. در این پژوهش، پنج نوع سازه با متغیرهای مساحت و نوع سازه، به الگوریتم ژنتیک معرفی شده است. الگوریتم NSGAI، متناسب با شرایط هر ۶۷ زیرحوضه از نظر نوع کاربری، ترکیبی مناسب از چندین سازه در کنار هم با مساحت‌های بهینه را به‌عنوان راه‌حل‌ها ارائه داده است. در نهایت جهت ارزیابی NSGAI، با تعریف هفت سناریو مختلف، مقایسه انجام گردیده است. نتایج حاکی از آن است که با اجرای راه‌حل ارائه شده توسط NSGAI، مقادیر کمیت و کیفیت سیلاب به ترتیب ۴۱ و ۲۳ درصد کاهش می‌یابند. همچنین مشاهده شد که اجرای سازه‌های مهار و کنترل سیلاب به‌صورت مجزا، تنها می‌تواند تأمین‌کننده یکی از اهداف باشد و انتخاب بهینه‌ای در مقابل راهکار ارائه شده توسط NSGAI نیست. ترکیب سازه‌های نوین با هم و انتخاب مساحت مناسب برای هر یک، در مقایسه با استفاده مجزا و مستقل آن‌ها عملکرد مناسب‌تری داشت. همچنین مشخص شد که به‌ویژه در بحث کیفیت سیلاب، هزینه بیشتر دلیل بر کارایی بیشتر نیست. علاوه بر این، همیشه با کاهش حجم سیلاب میزان آلودگی کاهش نمی‌یابد؛ بلکه این مسأله وابسته به نوع و مساحت LID-BMP‌ها می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** مدیریت رواناب شهری، الگوریتم ژنتیک چند هدفه، LID-BMP، GIS، SWMM

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۵/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۱۱/۲۲

1- Ph.D. Student, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. Email: [saeed.farzin@semnan.ac.ir](mailto:saeed.farzin@semnan.ac.ir)

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

\*- نویسنده مسئول  
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

## ۱- مقدمه

همه ساله در نقاط مختلف جهان در اثر وقوع سیلاب، خسارات جانی و مالی بسیاری به مردم وارد می‌گردد. تغییرات کاربری اراضی، توسعه شهرنشینی، ساخت‌وسازهای غیراصولی، از بین بردن پوشش گیاهی و توسعه اراضی غیرقابل نفوذ در مناطق شهری از جمله عوامل مهم در وقوع سیلاب شهری هستند (Jia et al., 2013). سیلاب، علاوه بر خسارات مالی و جانی، مقادیر زیادی از آلاینده‌ها همچون انواع زباله، مواد نفتی و روغنی، فلزات سنگین و مواد سمی را حمل نموده و در نهایت به تخلیه‌گاه انتقال می‌دهد (Young et al., 2011).

مطالعات رواناب شهری با هدف برنامه‌ریزی در کنترل کمیّت و کیفیت سیلاب و تخمین خسارات ناشی از آن دنبال می‌گردد (Saadatpour et al., 2016). یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان، چگونگی انتخاب ترکیب بهینه اقدامات نوین در مدیریت سیلاب است. به طوری که علاوه بر کنترل کمیّت و کیفیت سیلاب، از حجم قابل ملاحظه رواناب نیز به عنوان یک نوع منبع تأمین آب در مصارف شهری استفاده شود. اهمیت این موضوع، در مناطقی که با بحران‌های آبی روبرو هستند و به منابع جدید آب نیازمند هستند، بیش از پیش نمایان می‌گردد (Jia et al., 2015). بنابر آنچه بیان شد، مهم‌ترین هدف در مدیریت رواناب سطحی، جمع‌آوری آنها در سطح شهر و در مراحل بعدی استفاده مجدد از این رواناب‌ها و کاهش اثرات مخرب آن بر محیط زیست است (Karamouz et al., 2014). امروزه استفاده از سازه‌های نوین جهت کنترل، مهار و جمع‌آوری رواناب‌های سطحی در سطح جهان رو به افزایش است و در کشورهای پیشرفته تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شده است (Lee et al., 2012).

روش‌های نوین، کنترل‌کننده‌های هیدرولوژیکی هستند که به طور عمده مبتنی بر نفوذ و ذخیره‌سازی توزیعی در مقیاس کوچک هستند تا بتوانند حجم کلی رواناب حاصل از حوضه آبریز را کاهش دهند و کیفیت رواناب را نیز کنترل نمایند (Yaoze et al., 2016). این روش‌ها، شامل روش‌های بهینه مدیریتی<sup>۱</sup> و روش‌های توسعه با حداقل اثرات جانبی<sup>۲</sup> می‌باشد (Karami et al., 2016). از سازه‌هایی که در این روش‌ها جهت کنترل و مهار سیلاب استفاده می‌شود می‌توان به بام‌های سبز، حوضچه‌های نگهداشت آب، بشکه‌های کوچک ذخیره آب، باغچه‌های باران زاد، چاه‌های جذبی، سازه‌های ذخیره آب باران، ترانشه‌های نفوذ، روکش‌های نفوذپذیر، استخرهای نگهداشت رواناب و جوی باغچه‌ها اشاره نمود (Imani et al., 2017).

جهت رسیدن به یک برنامه‌ریزی مناسب، نیاز است که اهداف مشخص شوند و سپس راهکارهای بهینه ارائه گردند. در این راستا در دهه‌های اخیر با روند تکامل دانش بشری، الگوریتم‌های فراتکاملی مختلفی برای بهینه‌سازی مسائل مختلف تولید و توسعه پیدا کرده‌اند. از جمله می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک<sup>۳</sup>، ازدحام ذرات<sup>۴</sup>، مورچگان، زنبور عسل، اتوماتای سلولی و رقابت استعماری اشاره نمود (Moeini, 2015). تمامی این مدل‌ها با در نظر گرفتن یک یا چند هدف مشخص، به دنبال بهترین و بهینه‌ترین جواب در فضای جواب‌ها هستند. در برخی موارد نیاز به رسیدن هم‌زمان به چند هدف مطرح است. تولید الگوریتم‌های چندهدفه با توسعه و اصلاح در الگوریتم‌های تک‌هدفه امکان این امر را فراهم ساخت. در دهه اخیر تعدادی از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه مانند استراتژی تکاملی با آرشیو پارتو، الگوریتم تکاملی مبتنی بر شدت پارتو و الگوریتم ژنتیک چندهدفه پیشنهاد شده‌اند (Yaoze et al., 2016). از شناخته شده‌ترین این الگوریتم‌ها، الگوریتم ژنتیک چندهدفه نوع اول است که بعدها با توسعه و بهبود آن مخصوصاً در کاستن زمان محاسبات، الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب<sup>۵</sup> معرفی شد.

با توجه به اهمیت موضوع، تاکنون مطالعات چندی توسط محققین مختلف انجام شده است؛ (Lai et al., 2007) طرح جانمایی و انتخاب LID-BMPها (روش‌های بهینه مدیریتی و روش‌های توسعه با حداقل اثرات جانبی) را توسط SUSTAIN<sup>۶</sup> بررسی نمودند. در این تحقیق، میزان کمیّت و کیفیت رواناب در حوضه‌های شهری با هدف کنترل آلودگی و سیلاب مورد بررسی قرار گرفت. (Abi Aad et al., 2010) به مطالعه تأثیر باغچه‌های باران زاد و بشکه‌های ذخیره آب در کنترل رواناب‌های شهری با استفاده از مدل‌سازی در فضای SWMM<sup>۷</sup> پرداختند. نتایج نشان داد، باغچه باران زاد در کنترل رواناب شهری در مقایسه با دیگر LID-BMPها عملکرد بهتری داشته است. (Iqbal et al., 2011) در حوضه آبریز شهری در شرق استرالیا به بررسی انتقال آلاینده‌ها در رواناب شهری و تأثیر BMPها در کاهش این آلاینده‌ها پرداختند و مدلی معرفی نمودند که میزان تجمعی آلودگی در خروجی حوضه را نشان می‌داد. (Jia et al., 2012) یک روش با ترکیب شبیه‌ساز SWMM به همراه سیستم پشتیبانی در تصمیم‌گیری<sup>۸</sup>، با دو هدف حداقل نمودن هزینه و حداکثر نمودن سود را در استفاده از LID-BMPها پیشنهاد نمودند. (Oraei et al., 2012) با تعریف دو تابع هدف، به بررسی تأثیر عملکرد روش‌های نوین به‌طور مجزا در کنترل رواناب‌های سطحی با استفاده از الگوریتم NSGAI<sup>۹</sup> پرداختند. نتایج نشان داد که راه‌حل‌های ارائه شده توسط الگوریتم مذکور در میزان مساحت سازه‌ها، تأثیر به‌سزایی

MOPSO، کمیت سیلاب شهرک گلستان واقع در منطقه ۲۲ شهر تهران را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان کاهش بار  $BOD_5$  و TSS و همچنین کاهش هزینه‌های اقتصادی اجرا، نگهداری و بهره‌برداری از LID-BMPها را بررسی کردند. بر اساس نتایج، بکارگیری LID-BMPها در سطح حوضه شهری مورد مطالعه، سبب کاهش ۲۰ درصدی در بار آلودگی نسبت به گزینه عدم بکارگیری این تکنیکها گردید. Yaoze et al. (2016) در حوضه آبریز شهری کروکدکریک واقع در ایالات متحده، به منظور کاهش بار آلودگی و کاهش رواناب، اجرای بهینه BMPها را با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز AMALGAM بررسی نمودند. نتایج نشان داد که با انتخاب BMP مناسب می‌توان مقادیر بار آلاینده‌ها و حجم رواناب را با صرف هزینه‌های کم کاهش داد.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، بایستی بیان داشت که عملکرد سازه‌های نوین کنترل کمیت و کیفیت سیلاب در حوضه‌های آبریز، اغلب به صورت مجزا و بدون استفاده ترکیبی از سازه‌ها بررسی شده‌اند؛ در حالی که ترکیب انواع سازه‌ها در کنار هم می‌تواند راه‌حل‌های مناسبی را به همراه داشته باشد. در تعریف توابع هدف نیز می‌توان موارد دیگری را با توجه به شرایط در نظر گرفت. هدف از پژوهش حاضر، توسعه عملکرد روش‌های نوین به کمک الگوریتم ژنتیک چندهدفه به منظور کنترل رواناب شهری می‌باشد. به عنوان دو تابع هدف کیفیت و کمیت سیلاب، بار آلودگی مواد جامد معلق (TSS) به همراه حجم آب‌گرفتگی در سطح حوضه آبریز در نظر گرفته شده‌اند. تابع هدف سوم نیز شامل هزینه‌های ساخت، اجرا و بهره‌برداری می‌باشد. همچنین، تولید و انتشار آلودگی سربی با توجه به توابع هدف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. الگوریتم بهینه‌ساز به نحوی استفاده شده است که بتواند در زیر حوضه‌ها، با ترکیب پنج نوع از سازه‌های کنترل سیلاب در کنار هم و تعیین مساحت مورد نیاز هر نوع، به یک ترکیب مناسب جهت کنترل کیفیت و کمیت رواناب خروجی حوضه آبریز با هزینه بهینه دست یابد.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق پس از تهیه داده‌های مورد نیاز، جهت مدل‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی از نرم‌افزار SWMM استفاده شده است. مکان‌های مناسب جهت اجرای LID-BMPها در منطقه با توجه به نوع کاربری در سطح حوضه با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS مورد بررسی و شناسایی قرار گرفت. نهایتاً، پنج نوع LID-BMP در حوضه مطالعاتی شامل حوضچه‌های نگهداشت آب<sup>۱</sup>، باغچه‌های باران زاد<sup>۱۱</sup>، ترانشه‌های نفوذ<sup>۱۲</sup>، روکش‌های نفوذپذیر<sup>۱۳</sup> و جوی باغچه‌ها<sup>۱۴</sup> انتخاب شده است. در ادامه، پس از تعریف توابع هدف و متغیرهای

در کمیت و کیفیت سیلاب دارد. در پژوهش انجام شده توسط Karamouz et al. (2013) در حوضه آبریز شمالی شهر تهران، مدل بهینه استفاده از روش‌های نوین با استفاده از الگوریتم NSGAI ارائه گشت. در این تحقیق سه تابع هدف شامل خطرپذیری‌های آب‌گرفتگی و آلودگی رواناب ناشی از سیلاب به همراه خسارت سیلاب و هزینه اجرا BMPها در نظر گرفته شد. انتخاب LID-BMPها در این تحقیق توسط الگوریتم بهینه‌ساز به صورت یک سازه برای هر زیرحوضه صورت پذیرفت. نهایتاً جواب‌های بهینه در قالب جبهه پارتو تهیه شد و میزان حجم سیلاب محاسبه شد.

Jia et al. (2015) با ایجاد ساختاری از سازه‌های نوین، کنترل سیلاب در یک حوضه آبریز واقع در کشور چین را با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه بررسی کردند. ایشان در پژوهش خود دو سناریو را مورد ارزیابی قرار دادند؛ یکی در حالت حوضه بدون اجرای سازه و دیگری حوضه با اجرای سازه‌های BMP. Badiezhadeh et al. (2015) استفاده از شبیه‌ساز SWMM، ابعاد بهینه شبکه زهکشی رواناب سطحی شهر گرگان در استان گلستان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل SWMM دقت مورد نیاز را برای شبیه‌سازی رواناب شهری دارد و از این مدل می‌توان برای طرح‌های مدیریت رواناب شهری و طراحی شبکه جمع‌آوری و دفع آب‌های سطحی استفاده نمود. Modugno et al. (2015) در حوضه آبریز شهری پاگلیا واقع در جنوب ایتالیا میزان انتقال آلودگی مواد جامد معلق (TSS) را با استفاده از شبیه‌سازی در فضای SWMM بررسی کردند. نتایج نشان داد که در ۳۰ درصد اولیه از آلودگی انتقال یافته حاصل از Washoff، ۶۰ درصد آن شامل مواد TSS است. Baek et al. (2015) در شهر فوشان واقع در استان گوانگ‌دانگ در چین، راهکاری نوین را در طراحی ابعاد نوعی LID بر اساس روش MFF<sup>9</sup>، در فضای نرم‌افزار SWMM معرفی نمودند.

Karami et al. (2016). مدیریت خطرپذیری سیلاب شهری با هدف کاهش آب‌گرفتگی و تخلیه آلاینده‌ها در آب‌های پذیرنده را با به‌کارگیری سازه‌های نوین (LID-BMP) و تأسیسات متداول (کانال‌ها) کنترل سیلاب در شهرک گلستان واقع در جنوب تهران مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که به‌کارگیری ترکیب بهینه هر دو رویکرد متداول و نوین، منجر به کاهش قابل ملاحظه و مؤثر خطرپذیری آب‌گرفتگی و تخلیه آلاینده‌ها در آب‌های پذیرنده می‌گردد. با توجه به نتایج رویه بهینه نیز مشخص شد که کنترل بهینه خطرپذیری آب‌گرفتگی، رابطه معکوس با میزان کنترل بهینه تخلیه آلاینده‌ها در آب‌های پذیرنده دارد. Saadatpour et al. (2016 a,b) در دو تحقیق جداگانه با استفاده از نرم‌افزار SWMM و الگوریتم

شبیه‌سازی استفاده شده است. در تحقیق حاضر جهت تحلیل مدل‌سازی هیدرولوژیکی، با توجه به دوره طراحی ۵ ساله کانیوها و شبکه فرعی جمع‌آوری آبهای سطحی، دوره بازگشت مطابق با دوره طراحی این سازه‌ها انتخاب گردیده است (Oraei et al., 2012). برای استخراج مقادیر بارندگی از گام زمانی ۵ ثانیه و نرم‌افزار SSA<sup>۱۷</sup> استفاده شده است. در این نرم‌افزار، جهت تعیین رگبار طرح، ابتدا مقدار شدت بارش ۶ ساعته با دوره بازگشت ۵ ساله از IDF تهیه شده از منطقه، قرائت و سپس با استفاده از الگوی بارندگی SCS-6 hr، الگوی بارش ۶ ساعته منطقه تهیه شده است.

## ۲-۲- مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولوژیکی

جهت مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولوژیکی از شبیه‌ساز مدیریت، تحلیل و طراحی مرتبط با رواناب‌های سطحی در حوضه‌های شهری به نام SWMM محصول اداره حفاظت از محیط زیست امریکا<sup>۱۸</sup> استفاده شده است (Elliot, 2014). همچنین به منظور تعیین مقادیر نفوذ، با توجه به داده‌های تهیه شده از سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری کرج و همخوانی این داده‌ها با روش هورتن، از این روش استفاده شده است.

تصمیم‌گیری، از الگوریتم فراتکاملی بهینه‌ساز ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGAII) جهت بهینه‌سازی در ترکیب نوع و مساحت LID-BMPها استفاده شده است. شکل ۱ ساختار کلی مراحل انجام این پژوهش را نشان می‌دهد.

## ۲-۱- جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های تهیه شده مربوط به مشخصات حوضه شهری شامل داده‌های هیدرولوژیکی و هیدرولوژیکی است. در بحث مربوط به مشخصات توپوگرافی حوضه، شیب منطقه با توجه به مدل رقومی ارتفاع<sup>۱۵</sup> منطقه تهیه شده است. همچنین کاربری اراضی حوضه مطابق شکل ۲ از نقشه‌های سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری کرج (فاوا) با دقت بالا تهیه شده است (Fava, 2016).

داده‌های هیدرولوژیکی که شامل شبکه فرعی و اصلی با ابعاد آن‌ها است، توسط بازدیدهای آماری اندازه‌گیری شده و با جزئیات بسیار دقیق به صورت پایگاه داده‌ای در نرم‌افزار ArcGIS ثبت گردیده است. داده‌های هیدرولوژیکی منحنی شدت-مدت-فراوانی بارش<sup>۱۶</sup> نیز با توجه به داده‌های بارش طی دوره‌های آماری موجود، تهیه و در

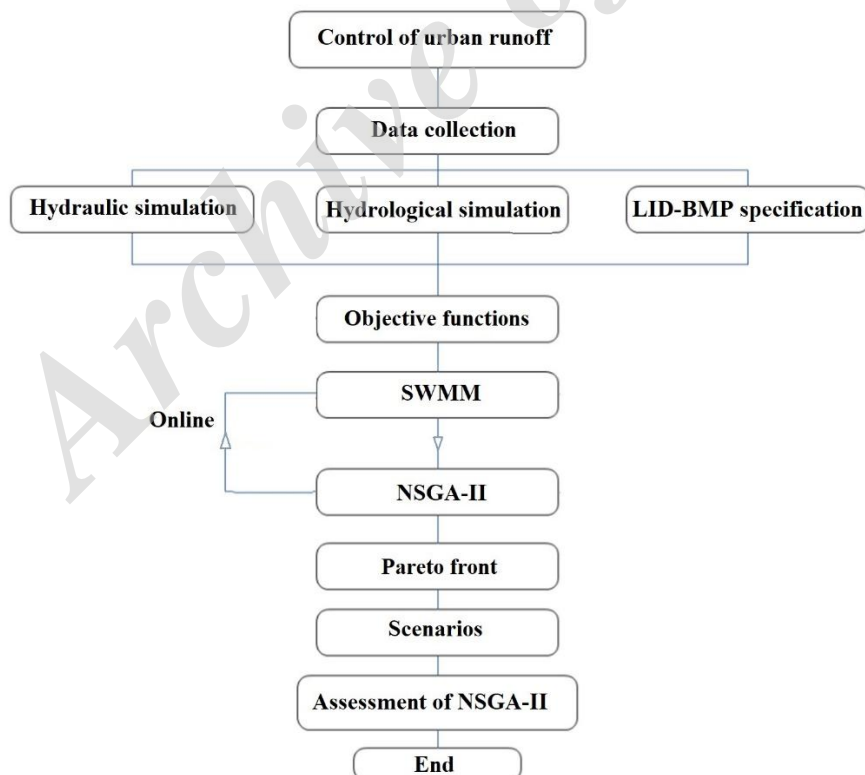
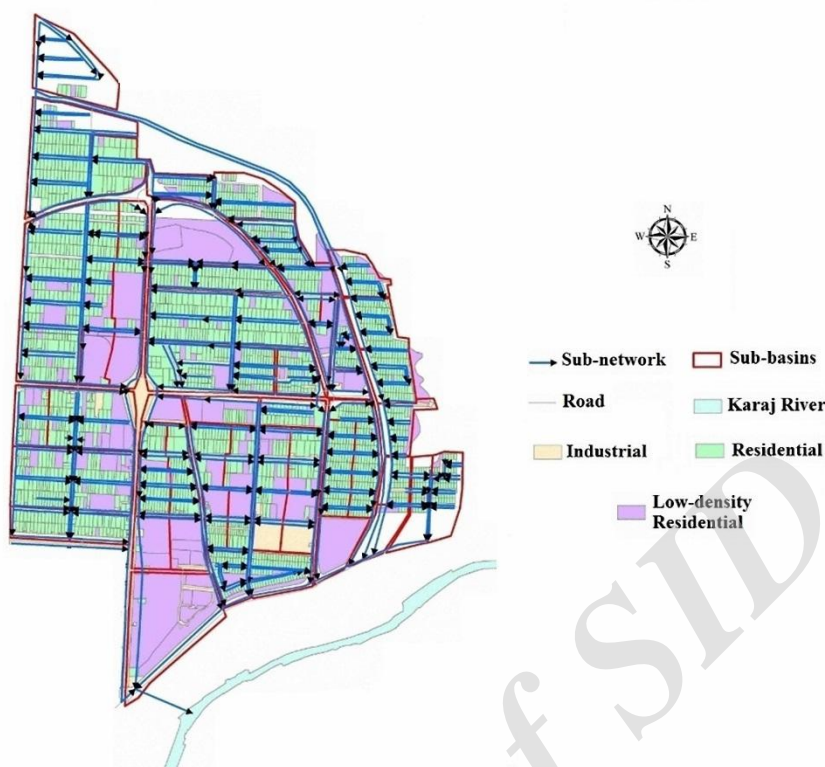


Fig. 1- The optimization process in the present study

شکل ۱- روند مراحل بهینه‌سازی مطالعه حاضر



85

Fig. 2- Land use and sub-network presentation in GIS (Fava, 2016)

شکل ۲- نقشه کاربری اراضی حوضه همراه با شبکه‌های فرعی در فضای GIS (Fava, 2016)

که در آن  $B$  میزان آلودگی تجمعی برحسب کیلوگرم در واحد سطح،  $C_1$  و  $C_2$  ثابت‌های معادله که با توجه به کاربری اراضی تعیین می‌شوند (جدول ۱) و  $t$  متوسط تعداد روزهایی در حوضه است که از آخرین بارندگی می‌گذرد.

در مدل دوم نیز جهت تخمین میزان بار آلودگی انتقال یافته طی بارندگی، از تابع‌نمایی طبق رابطه ۲ استفاده شده است:

$$W = C_1 q C_2 B \quad (2)$$

که در آن  $W$  بار آلودگی انتقال یافته برحسب کیلوگرم بر واحد سطح در هر ساعت،  $C_1$  و  $C_2$  ثابت‌های معادله که با توجه به کاربری اراضی تعیین می‌شوند (جدول ۲) و  $q$  شدت رواناب به میلی‌متر در ساعت است.

در بحث روندیابی سیل نیز روش امواج دینامیکی به کار گرفته شده است. در شبیه‌ساز SWMM جهت مدل‌سازی انتقال آلودگی، دو مدل که مکمل یکدیگرند پیشنهاد شده است (Jia et al., 2012). مدل اول که Buildup نام دارد، متشکل از تعدادی توابع به‌منظور محاسبه مقدار آلودگی تولیدی تجمعی در سطح حوضه در روزهای غیر بارانی<sup>۱۹</sup> است. مدل دوم با عنوان Washoff، متشکل از چندین تابع است که طی روزهای بارندگی<sup>۲۰</sup> میزان انتقال آلودگی تولید شده توسط رواناب در سطح حوضه را مدل‌سازی می‌نماید (Modugno et al., 2015). در این تحقیق جهت تخمین آلودگی تجمعی، از تابع اشباع مطابق رابطه ۱ استفاده شده است:

$$B = \frac{C_1 t}{C_2 + t} \quad (1)$$

Table 1- Used parameters for TSS and Pb pollutants in each landuse (first model) (Huber and Dickinson, 1992)

جدول ۱- پارامترهای مورد استفاده برای آلودگی‌های TSS و Pb در هر کاربری (مدل اول)

Buildup Parameters	Low-Density Residential		High-Density Residential		Industrial		Undeveloped	
	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$
TSS	20.00	0.660	50.00	2.060	130.00	6.150	40.00	1.330
Lead (Pb)	10.00	0.014	21	0.038	50.00	0.140	8.00	0.013

**Table 2- Used parameters for TSS and Pb pollutants in each landuse (second model) (Huber and Dickinson, 1992)**

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده برای آلودگی های TSS و Pb در هر کاربری (مدل دوم)

Washoff Parameters	Low-Density Residential		High-Density Residential		Industrial		Undeveloped	
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
TSS	0.40	2.00	0.70	2.20	0.3	2.5	0.1	1.70
Lead (Pb)	0.02	1.80	0.30	1.80	0.40	2.00	0.09	1.5

۳- کمینه سازی بار آلاینده ها در نقطه خروجی (ورود به رودخانه کرج) بر حسب کیلوگرم (رابطه ۶):

$$\text{Minimize Pollutant Load} = Z_3 = \min \sum_{i=1}^{67} (\text{TSS}_i + \text{Pb}_i) \quad (6)$$

که در آن:

$$\text{TSS}_i = \sum_j^5 \text{TSS} (f \{ \text{SWMM}(A_j) \}_i), \quad (7)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, 67$$

متغیرهای تصمیم گیری جهت بهینه سازی نیز، نوع و مساحت هر یک از سازه های LID-BMP معرفی شده اند. قید لحاظ شده در انتخاب مساحت سازه های نوین عبارت است از:

$$0 < \left( \sum_{j=1}^5 A_j \right)_i \leq 0.2 \times A_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 67 \quad (8)$$

در روابط ۳ تا ۸،  $Z_1$  کمینه سازی هزینه ساخت و اجرا و بهره برداری سازه های نوین به دلار،  $Z_2$  کمینه سازی حجم آب گرفتگی در سطح حوضه به دلار،  $Z_3$  کمینه سازی بار آلاینده (مواد جامد معلق) به کیلوگرم،  $i$  شماره زیر حوضه ها،  $Z$  نوع سازه های نوین (در این مطالعه برابر پنج)،  $k$  تعداد گره های دچار آب گرفتگی در هر زیر حوضه،  $BC_{ij}$  هزینه سرمایه گذاری سازه های نوین نوع  $Z$  ام در زیر حوضه  $A$  به دلار،  $BE_{ij}$  هزینه بهره برداری از سازه های نوین نوع  $Z$  ام در زیر حوضه  $A$  به دلار،  $\nabla_i$  حجم سیلاب در زیر حوضه  $A$  به مترمکعب،  $\text{TSS}_i$  مجموع آلاینده های معلق در زیر حوضه  $A$  به کیلوگرم،  $A_j$  مساحت سازه نوین

### ۳-۲- معرفی توابع هدف

توابع هدف در نظر گرفته شده در این مطالعه عبارتند از:

۱- کمینه سازی هزینه ساخت و اجرا (سرمایه گذاری) و بهره برداری روش های نوین بر حسب دلار (در متن مقاله به طور اختصار هزینه کلی ساخت آمده است) (رابطه ۳).

$$\text{Minimize BMP Cost} = Z_1 = \min \left( \sum_{i=1}^{67} \left( \sum_{j=1}^5 (BC_{ij} + BE_{ij}) \right) \right) \quad (3)$$

روابط مربوط به هزینه های BMP-LIDها از کشورهای اروپایی به دست آمده اند و شامل هزینه زمین نمی باشند (Strecker et al., 2010). از این معادلات به دلیل اینکه روابط و اطلاعات مناسب و معینی در داخل کشور وجود نداشت، به عنوان معیار هزینه کلی استفاده شده است (جدول ۳).

۲- کمینه سازی حجم آب گرفتگی در سطح حوضه بر حسب مترمکعب (رابطه ۴):

$$\text{Minimize Flood Volume} = Z_2 = \min \sum_{i=1}^{67} (\nabla_i) \quad (4)$$

که در آن:

$$\nabla_i = \sum_k^{nf} \sum_j^5 \nabla_k (f \{ \text{SWMM}(A_j) \}_i), \quad (5)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, 67$$

**Table 3- The cost of investment and operation of BMPs in Dollar (Strecker et al., 2010)**

جدول ۳- هزینه سرمایه گذاری و بهره برداری سازه های نوین به دلار

BMP Type	Investment Cost	Operation Cost
Bio-retention	$BC_{\text{Bio-retention}} = 0.093 \times (2-3) \times A_i$	$BE_{\text{Bio-retention}} = (5-7)\% \times BC_{\text{Bio-retention}}$
Rain-garden	$BC_{\text{Rain-garden}} = 1.44 \times V_i^{0.69}$	$BE_{\text{Rain-garden}} = (5-10)\% \times BC_{\text{Rain-garden}}$
Infiltration-trench	$BC_{\text{Infiltration-trench}} = 1.83 \times V_i^{0.63}$	$BE_{\text{Infiltration-trench}} = (5-20)\% \times BC_{\text{Infiltration-trench}}$
Permeable-pavement	$BC_{\text{Permeable-pavement}} = 0.093 \times (3-4) \times A_i$	$BE_{\text{Permeable-pavement}} = (5-20)\% \times BC_{\text{Permeable-pavement}}$
Vegetation-swale	$BC_{\text{Vegetation-swale}} = 0.093 \times (0.25-0.5) \times A_i$	$BE_{\text{Vegetation-swale}} = (5-7)\% \times BC_{\text{Vegetation-swale}}$



می‌تواند از لحاظ زیست محیطی مخاطراتی را برای منطقه و پایین‌دست رودخانه که مصارف کشاورزی و غیرشرب دارند، ایجاد نماید. مساحت حوضه آبریز بیش از ۲۷۰ هکتار است. جهت بالا بردن دقت و صحت نتایج، بر اساس شبکه آبراهه‌های اصلی و فرعی و نقشه پستی و بلندی منطقه، حوضه به ۶۷ زیرحوضه تفکیک شده است. حداکثر و حداقل تراز ارتفاعی به ترتیب برابر با ۱۵۰۴ و ۱۴۰۰ متر از سطح آب‌های آزاد و متوسط شیب حوضه آبریز برابر با ۱۲ درصد است.

#### ۴- نتایج و بحث

سه تابع هدف با متغیرهای تصمیم شامل نوع سازه و مساحت اشغال‌شده توسط BMPها در سطح حوضه، به الگوریتم ژنتیک چندهدفه معرفی شد. شکل ۴ جبهه پارتو خروجی از الگوریتم را بعد از همگرا شدن به تصویر کشیده شده است. در این شکل جبهه پارتو از ۱۰۰ جواب بهینه با توجه به نوع هدف در ۱۵۰ تکرار و زمان نزدیک به ۱۸ ساعت تولید شده است. سیستم استفاده‌شده دارای مشخصات CPU= Corei3 و Ram=6G است. هر یک از راه‌حل‌های موجود در رویه، به‌عنوان جواب‌هایی نامغلوب محسوب می‌شوند که توسط هیچ جواب دیگری مغلوب نمی‌شوند و در تأمین اهداف موردنظر مناسب‌ترین راه‌حل در نوع خود می‌باشند.

در شکل ۵، توابع هدف با یکدیگر و با برخی فاکتورهای دیگر در فضای دویعدی نمایش داده شده است. در شکل (۵-ا)، میزان آلودگی برحسب حجم آب‌گرفتنی در سطح حوضه نشان داده شده است.

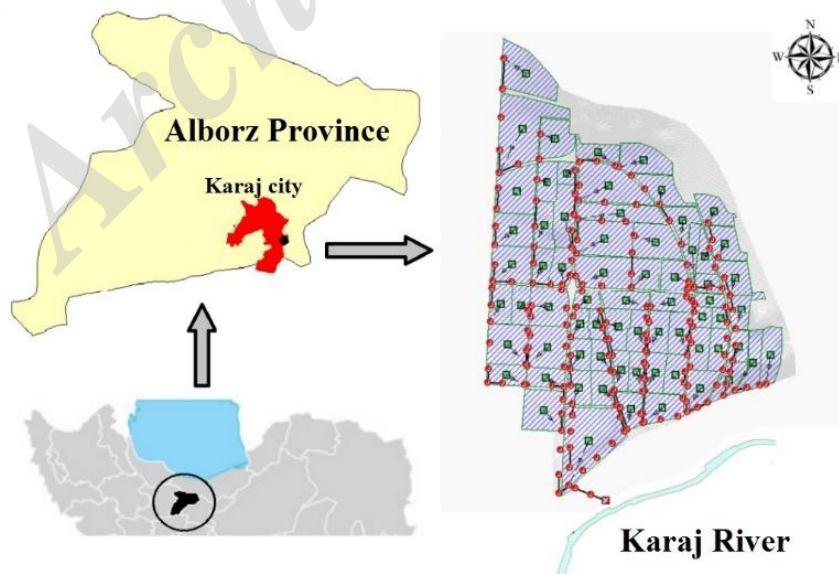


Fig. 3- The location of the study area and its sub-basins (Fava, 2016)

شکل ۳- موقعیت منطقه مورد مطالعه همراه با نمایش زیر حوضه‌ها

نوع ژام به مترمربع،  $V_j$  حجم سازه نوین نوع ژام به مترمکعب،  $A_i$  مساحت زیر حوضه  $A_m$  به مترمربع،  $\forall_k$  حجم آب‌گرفتنی در گره  $k$  ام به مترمکعب و  $f\{SWMM(A_j)\}_i$  نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مدل SWMM بر اساس مساحت انتخاب‌شده برای سازه نوین ژام در زیر حوضه  $A_m$  می‌باشد.

#### ۴-۲- الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب

اساس این روش همانند الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک ساده است ولی در نحوه مرتب‌سازی و انتخاب والدین بر اساس مرتب‌سازی نامغلوب عمل می‌کند. بدین صورت که پاسخ‌های نامغلوب را از پاسخ‌های مغلوب در مجموعه‌های مجزا از هم جدا می‌کند که به جبهه پارتو<sup>۲۱</sup> معروف است. بدین صورت رتبه و کیفیت هر پاسخ نسبت به پاسخ دیگر مشخص می‌شود. همچنین عامل ثانویه دیگر دخیل در انتخاب اعضا نسبت به اعضای دیگر فاصله ازدحامی<sup>۲۲</sup> است که نمایانگر سطح پوشش پاسخ عضو می‌باشد. هر چه فاصله ازدحامی بیشتر باشد، احتمال انتخاب شدن عضو بیشتر است (Mazandaranizadeh, 2016). در تحقیق حاضر جهت اجرای الگوریتم، از ۱۰۰ جمعیت اولیه (والد) همراه با ۱۵۰ نسل (تکرار) با نرخ جهش ۰/۰۵ استفاده شده است.

#### ۳- منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی، واقع در شمال شرقی شهر کرج در استان البرز بوده که از جهت شمال به دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز و از جنوب به رودخانه کرج منتهی می‌شود. رواناب حاصل از حوضه در نقطه انتهایی به این رودخانه سرازیر می‌شود (شکل ۳). آلودگی ناشی از این رواناب‌ها

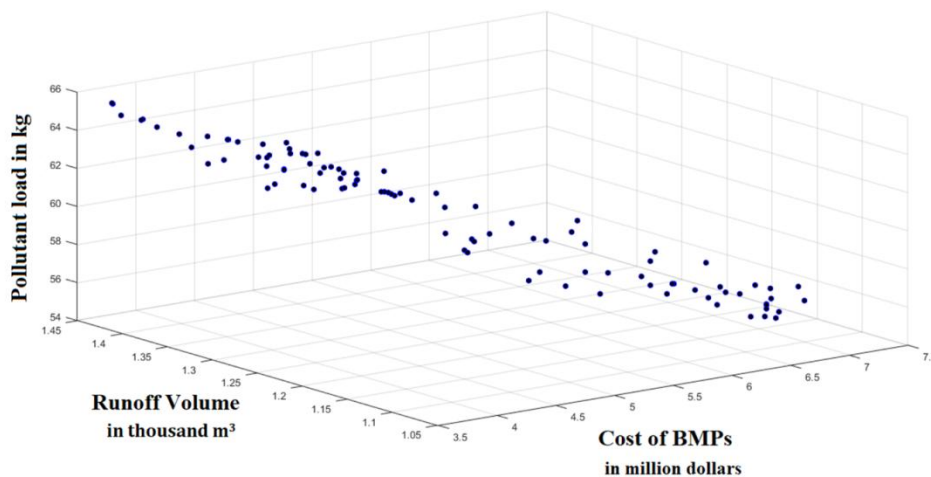


Fig. 4- The Pareto front related to the three objective functions

شکل ۴- جبهه پارتو مربوط به سه تابع هدف

شکل ۶ عامل‌های دیگری را جهت مقایسه با تابع هدف هزینه نشان می‌دهد. شکل (a-۶) مقادیر آلودگی TSS را نسبت به هزینه نمایش می‌دهد. همچنین برای ارزیابی LID-BMP در دفع دیگر آلودگی‌ها، رابطه میزان آلودگی سربی (Pb<sub>i</sub>) با هزینه کلی در شکل (b-۶) آورده شده است. در این شکل، رابطه عکس آلودگی با هزینه به خوبی نمایش داده شده است. در مورد آلودگی سربی که به صورت پراکنده رابطه عکس با هزینه دارد، می‌توان این پراکندگی را مربوط به تأثیر نوع BMP‌های حوضه در دفع و مهار این آلودگی دانست. در اشکال (c,d-۶)، رابطه بین دبی خروجی با هزینه کلی ساخت BMP نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که همیشه با کاهش حجم سیلاب، میزان آلودگی کاهش نمی‌یابد. بلکه نوع و مساحت BMP‌ها می‌تواند این مقدار را تحت تأثیر قرار دهد. شکل (b-۵) این مطلب را بیان می‌نماید که جهت کاهش آلاینده (مواد جامد معلق) در خروجی حوضه (لحظه ورود به رودخانه) و کاهش حجم آب‌گرفتگی، هزینه افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به روند مقادیر حجم آب‌گرفتگی و دبی خروجی از حوضه در شکل (c-۵)، رابطه‌ای مستقیم بین دبی خروجی و حجم سیلاب دیده می‌شود.

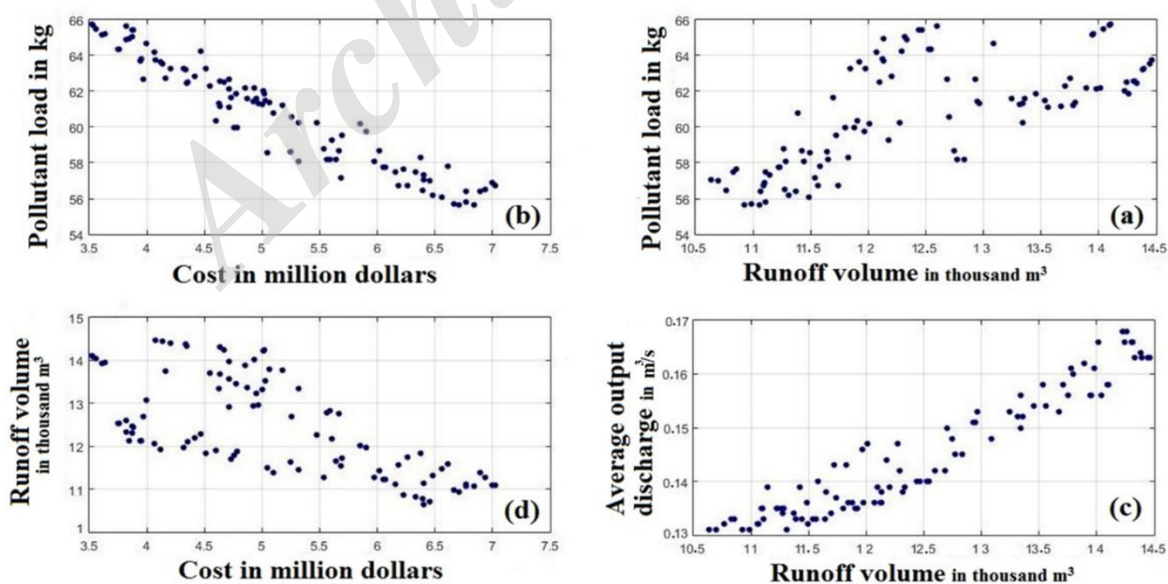


Fig. 5- Two-dimensional comparison of objective functions

شکل ۵- مقایسه دو بعدی توابع هدف



مشاهده نمی‌شود. توجه این مسأله می‌تواند مربوط به توان کنترل و مهار BMPها باشد. به‌عنوان مثال، ترکیبی از BMPها در سطح حوضه قادر به کنترل و مهار آلودگی سربی است ولی در عین حال در کنترل و کاهش سیلاب ناتوان بوده است.

مزیت استفاده از نمودارهای فوق و راه‌حل‌های جبهه پارتو در این است که با توجه به نوع هدف و رویکرد مدیریتی، انتخاب‌های بهینه‌ای را نسبت به دیگر گزینه‌ها و راه‌حل‌های مغلوب خارج از جبهه پارتو در اختیار متخصصان قرار می‌دهد. بنابراین، می‌توان تصمیم‌گیری مناسب‌تری را با توجه به شرایط موجود انجام داد.

با توجه به شکل (۶-۲)، در محدوده هزینه ساخت ۴ تا ۵/۵ میلیون دلار، میانگین دبی خروجی به ازای هزینه مشخص، دارای مقادیری متفاوت است. تأثیر نوع سازه BMP اجرا شده در مقادیر این فاکتور نیز قابل مشاهده است. به‌طور کلی با توجه به شرایط و نوع BMPها، رابطه‌ای عکس در مقادیر دبی خروجی از حوضه و هزینه کلی ساخت حاکم است.

همان‌طور که نتایج قبلی نشان داد بار آلودگی با حجم سیلاب رابطه مستقیم دارد. در شکل ۷ نیز، مقادیر آلودگی‌های سربی و مواد جامد معلق نسبت به حجم آب‌گرفتنی آورده شده است. در مقایسه بین مقادیر بار آلودگی سربی نسبت مقادیر حجم سیلاب، رابطه خاصی

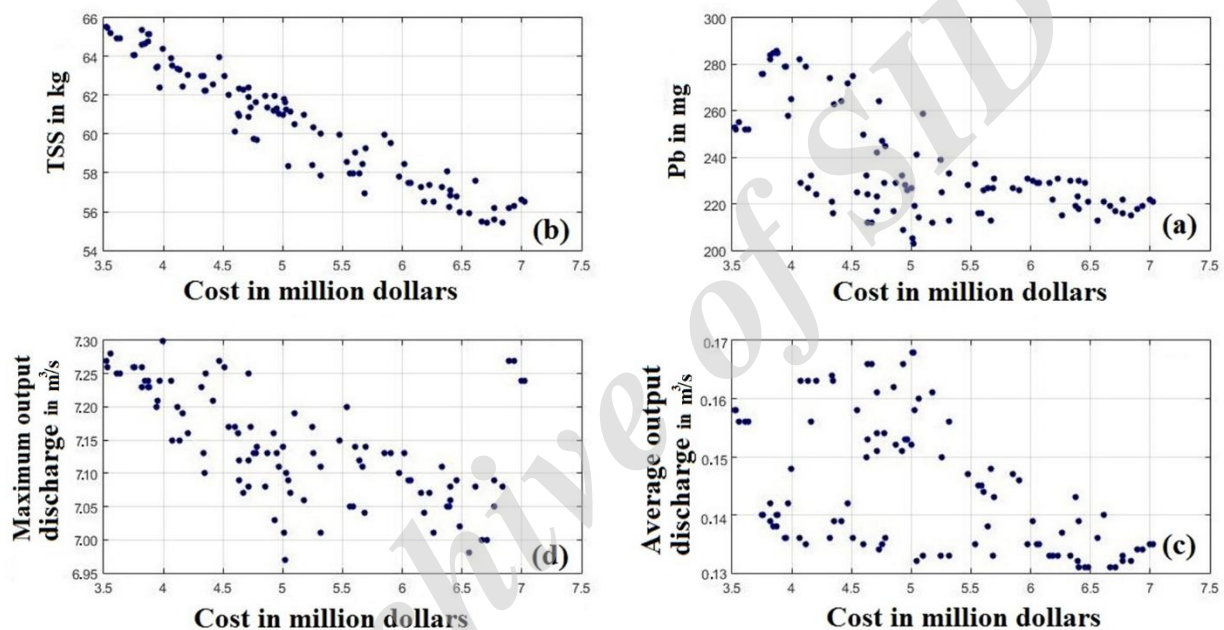


Fig. 6- Two-dimensional comparison of quantity and quality of flood versus the cost of implementation  
شکل ۶- مقایسه دو بعدی کمیت و کیفیت سیلاب با هزینه اجرا

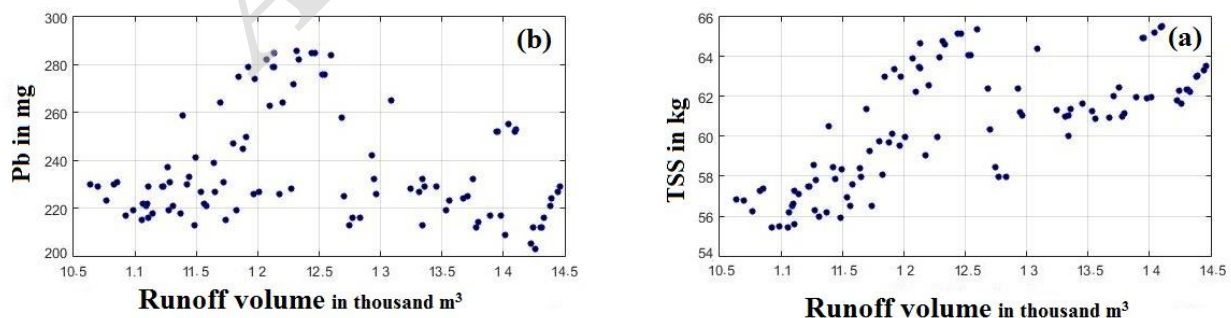


Fig. 7- Two-dimensional comparison of quantity and quality of flood  
شکل ۷- مقایسه دو بعدی فاکتورهای کیفیت و کمیت سیلاب

جداگانه و مستقل در سطح حوضه مورد بررسی قرار گرفته است. در مجموع، هفت سناریو به صورت ذیل تعریف شده است.

- ۱- حوضه بدون وجود هیچ سازه کنترل کننده (حالت پایه)
- ۲- اختصاص ۲۰ درصد مساحت هر یک از ۶۷ زیر حوضه به اجرای حوضچه‌های نگهداشت (BR)
- ۳- اختصاص ۲۰ درصد مساحت هر یک از ۶۷ زیر حوضه به اجرای باغچه‌های باران زاد (RG)
- ۴- اختصاص ۲۰ درصد مساحت هر یک از ۶۷ زیر حوضه به اجرای ترانشه‌های نفوذ (IT)
- ۵- اختصاص ۲۰ درصد مساحت هر یک از ۶۷ زیر حوضه به اجرای روکش‌های نفوذپذیر (PP)
- ۶- اختصاص ۲۰ درصد مساحت هر یک از ۶۷ زیر حوضه به اجرای جوی باغچه‌ها (SW)
- ۷- انتخاب یک جواب از جبهه پارتو

در واقع سناریو هفتم برای سنجش راه‌حل‌های ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه، که مربوطه به عملکرد ترکیب پنج نوع LID-BMP در کنار هم در سطح حوضه است، تعریف شده است. فاکتورهای مقایسه شده شامل هزینه کلی ساخت BMP، حجم سیلاب در سطح حوضه، بار آلودگی در خروجی حوضه و درصد مساحت BMPها است (جدول ۴).

نتایج به دست آمده از جدول ۴، میزان کمی و کیفی سیلاب و هزینه کلی ساخت را برای هفت سناریو نشان می‌دهد. در ردیف اول که بدون اجرای BMP در سطح حوضه است، مقادیر کمی و کیفی سیلاب در بیشترین مقدار خود قرار دارند.

شکل ۸ رابطه میان حجم آب‌گرفتنی و هزینه کلی BMPها را بر اساس میزان سطح اشغال شده آنها در سطح حوضه نشان می‌دهد. سطح اشغال شده BMPها در این شکل به صورت دایره‌هایی با شعاع‌های مختلف نشان داده شده است. منظور از  $p$ ، درصد سطح اشغال شده است. هرچه اندازه شعاع بزرگ‌تر باشد، حاکی از سطح اشغال بالا توسط BMPها می‌باشد.

با توجه به شکل ۸، دو راه‌حل مشخص شده با شماره‌های ۱ و ۲، از نظر دامنه مساحتی برابر بوده ولی عملکرد آنها کاملاً متفاوت است. بدین صورت که در راه‌حل شماره ۲ با صرف هزینه‌ای تقریباً ۱/۵ برابر راه‌حل شماره ۱، میزان حجم آب‌گرفتنی در حدود ۲۲ درصد کاهش یافته است. همچنین با مقایسه راه‌حل‌های شماره ۱ و ۳، مشاهده می‌شود که با هزینه و سطح اشغال شده کمتر (راه‌حل ۳)، می‌توان به میزان حجم آب‌گرفتنی تقریباً برابر با راه‌حل شماره ۱ رسید. اما این لزوماً به معنای برتری راه‌حل شماره ۳ نسبت به ۱ نمی‌باشد و می‌بایست اهداف دیگر نیز مورد بررسی قرار گیرند.

#### ۴-۱- ارزیابی عملکرد الگوریتم چندهدفه

بعد از تولید راه‌حل‌ها توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه، نیاز به ارزیابی آنها است. بدین منظور یکی از جواب‌ها از جبهه پارتو تولید شده از الگوریتم، انتخاب شده و با تعریف سناریوهایی مربوط به حالت پایه و اجرای LID-BMPها، عملکرد الگوریتم NSGAIII مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به استفاده از پنج نوع LID-BMP در حوضه مطالعاتی، عملکرد هر یک از این سازه‌ها در قالب پنج سناریو به‌طور

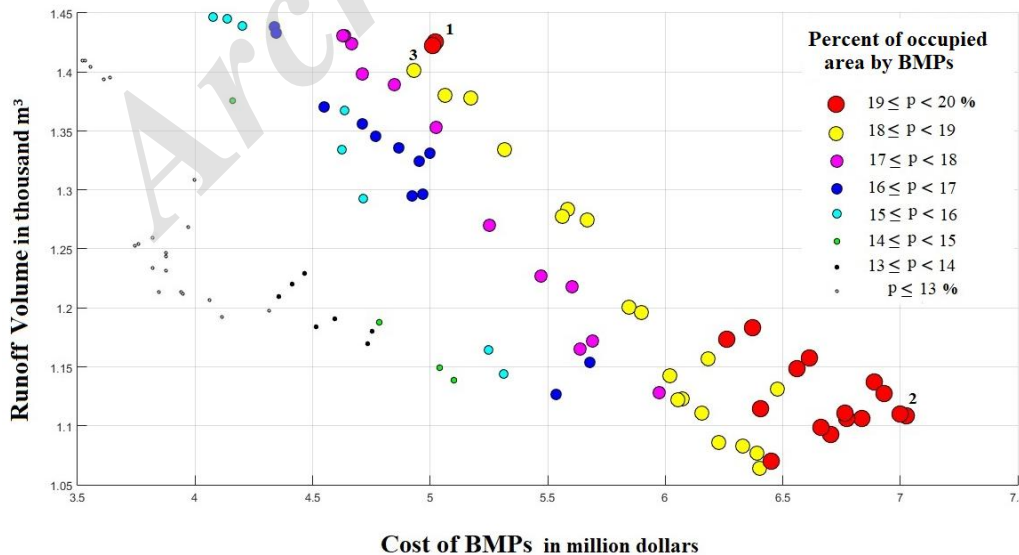


Fig. 8- Comparison of runoff volume and cost of BMPs based on the occupied area by BMPs

شکل ۸- مقایسه حجم آب‌گرفتنی و هزینه BMPها بر اساس سطح اشغال شده توسط BMPها

**Table 4- The results of the comparison factors among seven scenarios**

جدول ۴- نتایج فاکتورهای مقایسه در بین هفت راهکار تعریف شده

Rows	Scenarios	Cost of BMPs (million \$)	Flood volume (m <sup>3</sup> )	TSS load (kg)	Pb load (mg)	Area of BMPs (%)
1	Non-BMP	0	14158	76.67	367	0
2	Bio-retention	5.7684	12700	57	223	20
3	Rain-garden	5.7440	12104	60	223	20
4	Infiltration-trench	5.3018	13853	60.4	223	20
5	Permeable-pavement	6.4282	10922	58.87	218	20
6	Vegetative-swale	5.0000	14104	63.7	222	20
7	NSGAI	4.7140	12930	59.12	219	16

بهترین عملکرد را در حذف آلاینده‌ها دارند ولی از نظر هزینه اجرا، هر دو این سازه‌ها پرهزینه و در دو جایگاه آخر قرار گرفته‌اند. از نظر عملکرد در مهار کمیت سیلاب، روکش نفوذپذیر (سناریو ۵) در جایگاه اول است.

در بین سناریوها به استثناء سناریو هفتم، سازه جوی باغچه (سناریو ۶) از نظر هزینه اجرا در رتبه اول و کم هزینه‌ترین سازه نوین می‌باشد. در مهار آلودگی سربی نیز عملکرد خوبی داشته است و عملکرد اصلی این سازه محسوب می‌شود. ولی در بحث کنترل آلودگی مواد جامد معلق و حجم سیلاب، در جایگاه آخر رتبه‌بندی قرار گرفته و عملکرد ضعیفی را از خود به نمایش گذاشته است.

با توجه به مباحث بالا، راه‌حل ارائه شده حاصل از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (سناریو ۷) به خوبی توانسته است در برآورده نمودن توابع هدف، تعادلی مناسب برقرار نماید و در عین حال مساحتی کمتر در سطح حوضه نسبت به دیگر سناریوها اشغال کند.

در ادامه، مقایسه راهکارهای ارائه شده نسبت به توابع هدف هزینه، حجم آب‌گرفتنی و بار آلودگی در شکل ۹ نشان داده شده است. این شکل به شناسایی و مقایسه عملکرد هر یک از توابع هدف در راهکارهای مختلف کمک می‌کند. حلقه بیرونی این شش ضلعی، حد ایده‌آل بوده و حلقه درونی، حد غیر ایده‌آل و رأس‌های آن، هریک از شش راهکار را به استثنای راهکار اول (پایه) نشان می‌دهد. راهکارها با عملکرد مناسب در سطوح بالاتر قرار دارند و به حالت ایده‌آل نزدیک‌ترند. راهکارهای با عملکرد پایین به مرکز شکل نزدیک‌تر هستند و در وضعیت غیرایده‌آل قرار دارند. بر اساس شکل مشخص است که در سناریو مربوط به راه‌حل NSGAI، هر سه تابع هدف به‌طور هم‌زمان در سطوح بالا قرار دارند. در جایگاه‌های بعدی می‌توان به Infiltration-trench و Permeable-pavement اشاره کرد.

در بین سناریوها با توجه به درصد مساحت BMP اجراشده در حوضه، مقادیر فاکتورهای مقایسه در جواب به‌دست‌آمده از الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک چندهدفه (سناریو ۷)، نسبت به دیگر سناریوها از نظر تأمین و ارضاء هم‌زمان توابع هدف، عملکرد بهتری داشته است. به عبارت دیگر، در اجرای سازه‌های کنترل و مهار سیلاب به‌صورت ترکیبی با مساحت اشغال شده ۱۶ درصد از سطح حوضه در مقابل اجرای ۲۰ درصدی از یک سازه مستقل در سطح حوضه (سناریوهای ۲ تا ۶)، مقادیر فاکتورهای مقایسه مربوط به سناریو هفتم نسبت به دیگر سناریوها در مجموع مناسب‌تر و بهتر است. به‌طور مثال در مقایسه راهکار هفتم (NSGAI) با راهکار پنجم می‌توان گفت که راهکار هفتم با صرف هزینه ۲۷ درصد کمتر از راهکار پنجم (استفاده تنها از Permeable-pavement) دارای مقادیری تقریباً برابر با عملکرد راهکار پنجم در کنترل و مهار کمیت و کیفیت سیلاب است. همچنین نسبت به حالت سناریو پایه، با اجرای راهکار هفتم مقادیر کمیت و کیفیت سیلاب به ترتیب به میزان ۴۱ و ۲۳ درصد کاهش می‌یابند. سازه باغچه باران زاد (سناریو ۳) از نظر هزینه اجرا در رتبه‌های آخر رده‌بندی قرار گرفته و جزو سازه‌های پرهزینه است. با توجه به صرف این هزینه، این سازه در کنترل و مهار حجم آب‌گرفتنی بعد از سازه روکش نفوذپذیر در جایگاه دوم قرار گرفته است و عملکرد اصلی این سازه در کنترل سیلاب است. همچنین در بحث کنترل کیفیت رواناب عملکرد قابل قبولی نسبت به دیگر سناریوها نداشته و در رده‌های میانی رتبه‌بندی قرار دارد.

سناریو مربوط به ترانشه نفوذ (سناریو ۴) با توجه به دیگر نتایج، چه در بحث کنترل کمیت و چه در بحث کنترل کیفیت رواناب عملکرد قابل قبولی نداشته است و به‌تنهایی گزینه مناسبی برای مهار و کنترل سیلاب نمی‌تواند باشد. تنها مزیت سناریو چهارم، هزینه اجرای این سازه نسبت به سناریوهای ردیف‌های دو تا پنج می‌باشد. سناریو مربوط به سازه‌های حوضچه نگهداشت و روکش نفوذپذیر (سناریو ۲ و ۵)

—Pollutant Load —Runoff Volume —BMP Cost —Non Ideal —Ideal

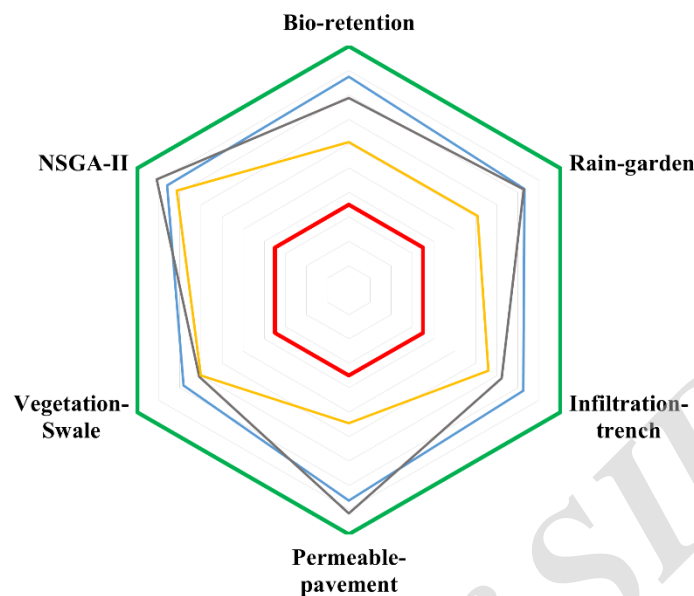


Fig. 9- Compression of scenarios based on BMP cost, runoff volume and pollutant load  
 شکل ۹- مقایسه راهکارهای ارائه شده نسبت به توابع هدف هزینه، حجم آب گرفتگی و بار آلودگی

#### ۲-۴- ارزیابی عملکرد

مساحت اشغال شده توسط سازه‌ها را در سطح هر زیرحوضه و نهایتاً در تمام سطح حوضه مشخص نماید.

در این مطالعه، کنترل کمی و کیفی سیلاب با استفاده از ترکیب سازه‌های روش‌های نوین توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه در سطح حوضه آبریز شهری عظیمه واقع در شهر کرج بررسی شد. سه تابع هدف شامل هزینه کلی ساخت و اجرا و بهره‌برداری سازه‌های روش‌های نوین، میزان حجم آب‌گرفتگی در سطح حوضه و میزان بار آلاینده‌ها در خروجی حوضه در نظر گرفته شد. مدل SWMM برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی و الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک چندهدفه (NSGAI) برای بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از نتایج مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی جهت ترکیب پنج نوع سازه BMP با در نظر گرفتن مساحت‌های بهینه آن‌ها در هر زیر حوضه به منظور رسیدن به جواب‌های بهینه و تشکیل جبهه پارتو استفاده شد. در استفاده از الگوریتم NSGAI، تعداد جمعیت اولیه ۱۰۰ و نسل‌ها برابر با ۱۵۰ انتخاب شد. خروجی الگوریتم شامل ۱۰۰ جواب بهینه است که این راه‌حل‌ها جبهه پارتو را با توجه به سه تابع هدف تشکیل می‌دهند. هر یک از این راه‌حل‌ها در جبهه پارتو با توجه به نوع رویکرد و اهداف می‌تواند بهترین عملکرد را از خود نشان دهد. مجموعه تشکیل شده از ارتباط بین الگوریتم ژنتیک چندهدفه و شبیه‌ساز SWMM این قابلیت را دارد که با استفاده از هر پنج نوع سازه BMP در کنار هم و با توجه به وضعیت کاربری اراضی منطقه، نوع سازه و

هفت سناریو جهت ارزیابی عملکرد NSGAI تعریف شد. نتایج نشان داد:

۱- استفاده از یک نوع BMP نسبت به ترکیب آن‌ها در سطح حوضه، می‌تواند تنها در یکی از توابع هدف مناسب باشد و در هدف‌های دیگر عملکرد مناسبی ندارد. به‌طور مثال در مقایسه راهکار الگوریتم بهینه ساز با راهکار پنجم از نظر کنترل و مهار کمیّت و کیفیت سیلاب، این سناریو با صرف هزینه ۲۷ درصد کمتر از راهکار پنجم، عملکرد تقریباً یکسانی داشته است.

۲- از مقایسه بین راهکارهای تعریف‌شده، راهکار الگوریتم بهینه‌ساز که یکی از جواب‌های انتخاب‌شده از جبهه پارتو است، برای هر یک از سه تابع هدف به‌طور هم‌زمان، مقادیر مناسبی حاصل گردید. درحالی‌که میزان مساحت اشغال شده توسط سازه‌ها در سطح حوضه مقداری کمتر از ۲۰ درصد حوضه بوده است. با اجرای این راهکار مقادیر کمیّت و کیفیت سیلاب به ترتیب به میزان ۴۱ و ۲۳ درصد کاهش یافته است. ۳- لزوماً با کاهش حجم سیلاب، میزان آلودگی کاهش نمی‌یابد. بلکه نوع و مساحت BMPها می‌تواند این مقدار را تحت تأثیر قرار دهد.

- 5- None-dominate Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II)
- 6- System for Urban Stormwater Treatment and Analysis
- 7- Storm Water Management Model
- 8- Decision Support Systems (DSS)
- 9- Mass First Flush
- 10- Bio-Retention
- 11- Rain-Garden
- 12- Infiltration-Trench
- 13- Permeable-Pavement
- 14- Vegetative-Swale
- 15- Digital Elevation Model
- 16- Intensity Duration Frequency (IDF)
- 17- Storm and Sanitary Autodesk
- 18- Environmental Protection Agency (EPA)
- 19- Dry Weather
- 20- Wet Weather
- 21- Pareto Front
- 22- Crowding Distance (CD)

#### ۶- مراجع

- 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
- Badiezadeh S, Bahremand A, Dehghani A, Noura N (2015) Urban flood management by simulation of surface runoff using SWMM model in Gorgan city. *Journal of Water and Soil Conservation* 22(4):156-170 (In Persian)
- Baek S, Dongho C, Jaewoon J, Hyungjin L, Hyuk L, Kwangsik Y, Kyunghwa C (2015) Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area in Korea. *Journal of Water Research* 1:1-10
- Elliot A (2014) Model for preliminary catchment scale planning of urban storm water quality controls. *Journal of Environmental Management* 52:273-288
- Huber W, Dickinson R (1992) Stormwater management model, version 4. Environmental research laboratory, office of research and development. US environmental protection agency, Athens, GA, 789p
- Imani S, Delavar M, Niksokhan M (2017) Simulation and assessment of management practices for reduction of nutrients discharge to the Zrebar lake using SWAT model. *Iran-Water Resources Research* 13(1):69-87 (In Persian)
- FAVA (2016) Information technology and communication organization of Karaj municipality
- Iqbal H, Imteaz M (2011) Application of buildup and washoff models for an east-Australian catchment.

۴- در مورد آلودگی سربی، نوع، خصوصیات و ترکیب BMPها در دفع و مهار این نوع آلودگی تأثیر بسزایی داشته است. به طوری که نمی توان انتظار داشت که با صرف هزینه اضافی و انتخاب ترکیب های مختلف از انواع BMPها با سطح اشغال بیشتر، این آلودگی کاهش پیدا کند.

با توجه به مقایسه سناریوهای مختلف و نتایج حاصل، استفاده از الگوریتم چندهدفه می تواند برای مدیران در انتخاب بهترین رویکرد و تصمیم گیری مناسب مفید واقع شود و هزینه های کمتری را در پی داشته باشد.

#### ۵- خلاصه و جمع بندی

در تحقیق حاضر پس از معرفی ۶۷ زیرحوضه در شبیه ساز SWMM، برای تمامی زیرحوضه ها توسط الگوریتم بهینه ساز NSGAI به صورت رویه پارتو، ترکیبی از LID-BMPها همراه با نوع سازه و مساحت اشغال شده آن به دست آمد. انتخاب ترکیب سازه ها بر اساس کاربری مربوط به هر زیرحوضه صورت پذیرفت. ارزیابی عملکرد راه حل های ارائه شده توسط الگوریتم، در مقابل استفاده مجزا هر یک از LID-BMPها در قالب راهکارهایی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که لزوماً مساحت بیشتر LID-BMPها، دلیل بر کارایی، دفع و کنترل بیشتر کمیت و کیفیت سیلاب نمی باشد و این دو همیشه رابطه مستقیمی با هم ندارند. با اجرای نمونه راه حل حاصل از نتایج رویه پارتو، با پیاده سازی LID-BMPها در فضایی حدود ۱۶ درصد مساحت حوضه، میزان کمیت و کیفیت سیلاب به ترتیب ۴۱ و ۲۳ درصد کاهش داشت.

در ادامه پژوهش حاضر و به منظور انجام تحقیقات بیشتر در آینده، پیشنهادهایی به شرح ذیل ارائه می شود:

- تعیین جانمایی LID-BMPهای ترکیبی،
- اعمال هزینه زمین به مجموع هزینه های اقتصادی که شامل هزینه ساخت، اجرا و بهره برداری است،
- استفاده از مخازن و استخرها در حوضه آبریز جهت تأخیر در روند سیلاب و شبیه سازی آنها در کنار دیگر سازه ها،
- اتخاذ تدابیری به منظور کاهش زمان اجرای الگوریتم های بهینه ساز.

#### پی نوشت ها

- 1- Best Management Practices (BMP)
- 2- Low Impact Development (LID)
- 3- Genetic Algorithm (GA)
- 4- Particle Swarm Optimization (PSO)

- and environmental approach. *Iran-Water Resources Research* 12(3):142-152 (In Persian)
- Modugno M, Gioia A, Gorgoglione A, Iacobellis V, Forgia G, Piccinni A, Ranieri E (2015) Buildup/washoff monitoring and assessment for sustainable management of first flush in an urban area. *Journal of Sustainability* 7:5050-5070
- Moeini R (2015) Performance evaluation of the ant colony optimization algorithm for the optimal operation of a multi-reservoir system: comparing four algorithms. *Iran-Water Resources Research* 11(2):29-46 (In Persian)
- Oraei Zare S, Saghafian B, Shamsai A (2012) Multi-objective optimization for combined quality-quantity urban runoff control. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences* 16:4531-4542
- Saadatpour M, Delkhosh F, Khalili R (2016 a) Simulation and optimization of management solutions in improving the quality of runoff with regard to economic considerations. (1251P-NWWCE), 14-15 February, University of Tehran, Iran (In Persian)
- Saadatpour M, Khalili R (2016 b) Optimization of low-impact development techniques based on economic considerations for improving runoff quality. 15-16 November, University of Tehran, Iran (In Persian)
- Strecker E, Sheffield A, Cristina C, Leisenring M (2010) Stormwater BMP guidance tool. Geosyntec consultants Press, USA, 142p
- Yaoze L, Raj C, Vincent F, Indrajeet C, Laura C, Bernard A (2016) Optimal selection and placement of BMPs and LID practices with a rainfall-runoff model. *Journal of Environmental Modelling & Software* 80:281-296
- 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
- International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering 5(3):200-211
- Jia H, Yao H, Yu S (2013) Advances in LID-BMPs research and practice for urban runoff control in China. *Journal Environmental Science and Engineering* 7(5):709-720
- Jia H, Lu Y, Yu S, Chen Y (2012) Planning of LID-BMPs for urban runoff control: the case of Beijing Olympic village. *Journal of Separation and Purification Technology* 8(4):112-119
- Jia, H, Yao H, Tang Y, Yu S, Field R, Tafuri A (2015) LID-BMPs planning for urban runoff control: the case study in China. *Journal of Environmental Management* 149:65-76
- Karami M, Ardeshir A, Behzadian K (2016) Hazard management of inundation and pollutants in urban floods using optimal conventional and novel strategies. *Iran-Water Resources Research* 11(3):100-112 (In Persian)
- Karamouz M, ASCE F, Nazif S (2013) Reliability-based flood management in urban watersheds considering climate change impacts. *Journal of Water Resource Planning Management* 120:520-523
- Karamouz M, Nazif S, Zahmatkesh Z (2014) Self-organizing gaussian-based downscaling of climate data for simulation of urban drainage systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 139(2):98-112
- Lai F, Dai T, Zhen J, Riverson J, Alvi K, Shoemaker L (2007) Sustain an EPA BMP process and placement tool for urban watersheds. *Proceedings of the Water Environment Federation, USA*, 946-968
- Lee J, Selvakumar A, Alvi K, Riverson J, Zhen J, Shoemaker L, Lai F (2012) A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices. *Journal of Environmental Modelling & Software* 37:6-18
- Mazandaranzadeh H (2016) Drainage system design by NSGA-II multi-objective algorithm using economic