



Coordinated Operation of Urban Storm Detention Ponds with Optimal Control of Gates Using Harmony Search Algorithm (Case Study: Drainage Network in East Watershed of Tehran)

E. Shokouhimehr¹, J. Yazdi², and S.A. Salehi Neyshabouri^{3*}

Abstract

Today, with population growth, urbanization and expanding demands of societies, water resources management has received more attention than the past decades. Urban water management is mostly conducted by controlling and directing surface runoff through reducing the peak discharge and flood volume. The construction of storm detention ponds in urban drainage systems delays the time of peak flow and reduces the peak discharge. The performance of these ponds depends on not only their dimensions and their inlet/outlet structures, but also the procedure of operating these structures. In this study, coordinated operation of detention ponds is taken into consideration at Tehran's East stormwater urban drainage system, through the gates optimal maneuver. To achieve this, harmony search algorithm (HS) was linked to the SWMM hydrological-hydraulic model to find optimal gate openings of inlet/outlet structures of ponds in order to minimize the volume of stormwater exceeding the hydraulic capacity of drainage network. The results for five extreme rainfall events at the studied catchment showed that the optimal coordinated operation of these ponds has improved the level of ponds performance in terms of network flooding compared to the current method of operation and flooding in the drainage network was reduced by 62% in average for the considered extreme rainfall events.

Keywords: Urban Flood, Storm Detention Ponds, Peak Flood Discharge, Optimal Operation, HS Algorithm, SWMM.

Received: June 27, 2020

Accepted: May 15, 2021

بهره‌برداری هماهنگ از حوضچه‌های تعدیل سیلاب شهری با کنترل بهینه دریچه‌ها با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی (مطالعه موردی: شبکه زهکشی حوضه آبریز شرق تهران)

الهام شکوهی‌مهر^۱، جعفر یزدی^۲ و سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری^{۳*}

چکیده

با رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی و افزایش نیازهای جوامع، امروزه مدیریت منابع آب بیش از گذشته مورد توجه گرفته است. مدیریت حوضه آبریز شهری با کنترل و هدایت رواناب، به منظور کاهش دبی اوج رواناب و کاهش حجم آبگرفتگی انجام می‌شود. احداث حوضچه‌های تعدیل سیلاب در سیستم‌های جمع‌آوری رواناب شهری موجب تأخیر در زمان وقوع دبی اوج و کاهش دبی اوج رواناب می‌گردد. عملکرد این حوضچه‌ها، نه تنها به ابعاد آن‌ها و سازه‌های ورودی و خروجی‌شان، بلکه به نحوه بهره‌برداری از این سازه‌ها نیز وابسته است و می‌تواند در میزان راندمان و کارایی آن‌ها در کنترل سیلاب شبکه زهکشی شهری مؤثر واقع شود. در این تحقیق، بهره‌برداری هماهنگ از حوضچه‌های تعدیل سیلاب شبکه زهکشی شرق تهران، با استخراج منحنی‌های کنترل بهینه دریچه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور از الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) در ترکیب با مدل هیدرولوژیکی-هیدرولیکی SWMM برای استخراج منحنی‌های کنترل بهینه دریچه‌های سازه‌های ورودی و خروجی حوضچه‌ها، با هدف حداقل‌سازی حجم سیلاب مازاد بر ظرفیت شبکه استفاده شده است. نتایج برای ۵ رویداد بارش بزرگ در ایستگاه باران‌سنجی نیاوران نشان می‌دهد که بهره‌برداری بهینه هماهنگ از این حوضچه‌ها باعث بهبود سطح عملکرد حوضچه‌ها در مقایسه با روش فعلی بهره‌برداری شده است، بطوریکه رویکرد پیشنهادی برای رویدادهای بزرگ بارش مورد بررسی به طور متوسط حدود ۶۲ درصد سیلاب مازاد بر ظرفیت شبکه زهکشی را کاهش داده است.

کلمات کلیدی: سیلاب شهری، حوضچه‌های تعدیل سیلاب، دبی اوج رواناب، بهره‌برداری بهینه، الگوریتم HS، مدل SWMM.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۴/۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۲/۲۵

1- M.Sc. Student of Hydraulic Structures Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor of Civil Engineering, Department of Water Resource Engineering and Management, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3- Professor of Civil Engineering, Department of Hydraulic Structures Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: Salehi@modares.ac.ir

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.1.11.2](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.1.11.2)

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی.

۳- استاد گروه سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

می‌شود (Jafari et al., 2018a; Yazdi, 2019). با توجه به هزینه‌های بالای طرح‌های کنترل سیلاب و وجود این سازه‌ها، در سال‌های اخیر موضوع بهره‌برداری از امکانات کنترل سیلاب با هدف استفاده مؤثر و کارآمد از ظرفیت آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات مختلفی به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری از این امکانات صورت گرفته است که تفاوت عمده آن‌ها در نوع مدل‌های شبیه‌سازی، بهینه‌سازی، نوع سازه کنترل سیلاب مورد بررسی و نحوه بهره‌برداری می‌باشد. در ادامه برخی از این مطالعات ارائه شده است.

(Yazdi et al., 2016) به منظور استخراج سیاست بهره‌برداری بهینه در هنگام سیل از ایستگاه‌های پمپاژ بخش مرکزی سئول در کره جنوبی، از تلفیق مدل ریاضی SWMM^۳ با الگوریتم HHS^۴ استفاده نموده و به حداقل‌سازی هزینه‌های پمپاژ و سطح آب استخر مقابل ایستگاه پمپاژ در هنگام سیل پرداخته‌اند. نتایج برای سناریوهای سیل مورد بررسی نشان داد که بکارگیری سیاست بهره‌برداری بهینه نسبت به عملکرد فعلی به طور متوسط سطح اوج آب را بدون افزایش تعداد سوئیچ‌های پمپ تا حدود ۴۰٪ کاهش می‌دهد. Garofalo et al. (2017) به مطالعه رویکرد کنترل در زمان واقعی^۵ برای بهره‌برداری بهینه از یک شبکه زهکشی شهری مجهز به سنسورها و دریچه‌های الکترونیکی قابل کنترل در شهر Cosenza واقع در کشور ایتالیا با هدف حداقل‌سازی حجم سیلاب و سرریز فاضلاب ترکیبی پرداختند. در این تحقیق، شبکه زهکشی مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز SWMM مدل‌سازی و با استفاده از الگوریتم مبتنی بر شایعات^۶ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که عملکرد بهینه با استفاده مؤثر از ظرفیت‌های ذخیره‌سازی شبکه می‌تواند به میزان قابل توجهی در کاهش سیلاب محلی و سرریز فاضلاب ترکیبی مؤثر واقع شود. از معایب این رویکرد می‌توان به طولانی بودن زمان پیاده‌سازی و اجرای روش RTC اشاره کرد. (Sahoo & Pekkatt, 2017) در تحقیقی به بررسی خطرات سیل ناشی از کاهش نفوذپذیری و سایر پارامترهای مؤثر برای شهر Guwahati در هند تحت سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ سال پرداختند و برای کاهش خطر سیلاب در منطقه مورد مطالعه، یک حوضچه تعدیل پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که با قرارگیری این حوضچه، حداکثر عمق سیلاب به میزان ۴۶/۵٪ و مساحت زیر آب رفته در شهر ۴۳٪ کاهش یافته است. از این رو بکارگیری این حوضچه‌ها را به عنوان یک اقدام مناسب برای مدیریت سیل پیشنهاد دادند. (Abou Rjeily et al., 2018) در تحقیقی، به بررسی استراتژی مدیریتی پیشگیرانه، در بهبود عملکرد سیستم زهکشی شهری پرداختند. در این راستا یک بخش مهم از سیستم زهکشی شهری در پردیس دانشگاه لیل مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. این محققین، با بکارگیری مدل شبیه‌سازی هیدرولوژیکی-

تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت و در نتیجه ساخت و سازهای پی‌درپی، افزایش سطوح نفوذناپذیر به علت توسعه شهرنشینی و همچنین وجود شبکه‌های فرسوده جمع‌آوری رواناب از جمله عواملی هستند که منجر به افزایش دبی اوج رواناب و وقوع سیلاب‌های شهری می‌شوند و خسارت‌های زیادی را به بار می‌آورند. از مهم‌ترین خسارت‌های ناشی از سیل می‌توان به تخریب پل‌ها، تخریب جاده‌ها، تخریب زمین‌های کشاورزی، تخریب چاه‌ها و قنات‌ها و تخریب بندها و سدها، تخریب منازل مسکونی، ازدیاد ناقلین، آلودگی آب، از بین رفتن محصولات و حیوانات اهلی و مهم‌تر از همه مرگ انسان‌ها اشاره کرد (Khademi & Akbari, 2014). بنابراین سیلاب تقریباً در تمام جنبه‌های زندگی انسان تأثیرگذار بوده و به ویژه در شهرها به دلیل تراکم بالای جمعیت، دارایی‌ها و تمرکز فعالیت‌های اقتصادی، این امر محسوس‌تر است. در واقع سیلاب‌های شهری می‌تواند اثرات اجتماعی و اقتصادی زیادی داشته باشند و باعث اختلال در خدمات شهری مانند حمل‌ونقل، شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب، تجهیزات الکترونیکی و خطوط ارتباطی و خسارت به سایر زیرساخت‌های شهری شوند (Zevenbergen et al., 2010). یکی از روش‌های کاربردی برای کاهش اثرات مخرب سیلاب، استفاده از روش‌های توسعه کم‌اثر^۱ می‌باشد. روش توسعه کم اثر از جمله روش‌های مدیریت سیلاب برای حفظ و یا بازگرداندن شرایط هیدرولوژیکی طبیعی یک حوضه آبریز به حالت قبل از توسعه یافتگی و کاهش اثرات منفی شهرنشینی بر محیط‌زیست آن حوضه می‌باشد. این روش که از رژیم هیدرولوژیکی حوضه طبیعی تقلید نموده و به کنترل رواناب در مبدأ می‌پردازد، مزیت‌های زیادی نسبت به روش‌های سنتی و معمول انتقال و مدیریت رواناب دارد (Coffman et al., 2000; Lee et al., 2012). یکی از این روش‌ها، استفاده از حوضچه‌های تعدیل سیلاب شهری^۲ می‌باشد که با پیروی از مکانیسم تأخیری می‌توانند سیلاب‌ها را به طور موقت ذخیره کنند و پس از تعدیل شدت سیلاب مجدداً به شبکه بازگردانند (Taheri, Behbahani & Bozorgzadeh, 1996). عملکرد این حوضچه‌ها، نه تنها به ابعاد آن‌ها و سازه‌های ورودی و خروجی‌شان، بلکه به نحوه بهره‌برداری از این سازه‌ها نیز وابسته است و می‌تواند در میزان راندمان و کارایی آن‌ها برای تعدیل سیلاب مؤثر واقع شود (Yazdi, 2019).

اگرچه کنترل بهینه اجزای سیستم‌های زهکشی شهری به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی سیستم، عدم قطعیت بارندگی و همچنین پیچیدگی و غیرخطی بودن روابط بین اجزای سیستم دشوار است (Jafari et al., 2018a)، اما بکارگیری قوانین بهره‌برداری بهینه باعث بهبود عملکرد این سیستم‌ها در هنگام بارندگی‌های شدید و سیل

هیدرولیکی SWMM و الگوریتم 6GA به بهینه‌سازی استراتژی‌های مرتبط با نحوه عملکرد سازه‌های محرک^۸ قرار گرفته روی سامانه زهکشی پرداختند. نتایج نشان داد که این نحوه عملکرد منجر به بهبود استفاده از ظرفیت ذخیره‌سازی عناصر نگهدارنده در سیستم‌های زهکشی شهری و کاهش حجم سیلاب شبکه می‌گردد. (Jafari et al. 2018b) در مطالعه‌ای به بررسی اثر نحوه عملکرد دریاچه‌های یک حوضچه تعدیل در کاهش سیل پرداخته‌اند. این محققین از مدل شبیه‌ساز SWMM و الگوریتم بهینه‌ساز HS^۹، به منظور ارزیابی عملکرد سیستم در سناریوهای مختلف استفاده نمودند. نتایج سناریوهای مختلف نشان داد که استفاده از روش کنترل در زمان واقعی ارائه شده، به میزان قابل توجهی حجم سیلاب شبکه را کاهش می‌دهد. همچنین نحوه بهره‌برداری هر دریاچه به طور قابل توجهی عملکرد کل سیستم را تحت تأثیر قرار خواهد داد. (Yazdi (2019) در تحقیقی، روشی مبتنی بر بهینه‌سازی برای مدیریت کمی سیلاب شهری در سیستم زهکشی مرکزی تهران، ارائه داده است. این رویکرد به منظور دستیابی به منحنی‌های فرمان بهینه برای بهره‌برداری از یک حوضچه تعدیل سیلاب در منطقه مورد مطالعه، الگوریتم DE^{۱۰} را با مدل شبیه‌ساز SWMM ادغام می‌کند. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند سیل شبکه را در کوچکترین و بزرگترین رویدادهای حدی بارش در طول سال‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۳ به ترتیب بیش از ۷۵٪ و ۳۰٪ و به طور متوسط ۵۵٪ کاهش دهد.

مطالعه تحقیقات محدود صورت گرفته در خصوص بهره‌برداری از حوضچه‌های تعدیل سیلاب نشان می‌دهد که نظر محققین به روش‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های زهکشی تک حوضچه‌ای معطوف شده است. تحقیق حاضر تکمیل‌کننده مطالعات قبلی در خصوص بهره‌برداری بهینه از حوضچه‌های تعدیل سیلاب شهری است که به بهره‌برداری بهینه هماهنگ از حوضچه‌های تعدیل سیلاب و بررسی میزان اثربخشی توأم آن‌ها با بکارگیری ابزارهای بهینه‌سازی و استخراج منحنی‌های فرمان بهینه دریاچه‌های ورودی و خروجی می‌پردازد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مطالعه موردی

شبکه زهکشی اصلی شهر تهران، رواناب حوضه‌های کوهستانی مشرف به تهران و حوضه‌های درون‌شهری را گردآوری و به خارج از محدوده شهر انتقال می‌دهد (Mahab Ghodss Consulting Engineers, 2011c). حجم کل رواناب حوضه آبریز تهران بزرگ، حدود ۲۵۰ میلیون مترمکعب در سال است که ۴۰ درصد آن مربوط به

حوضه‌های درون‌شهری و ۶۰ درصد آن ناشی از حوضه‌های برون‌شهری است (Mahab Ghodss Consulting Engineers, 2011b). حوضه‌های درون‌شهری تهران بر اساس زهکش‌های اصلی شهر به ۴ ناحیه (حوضه سیل برگردان شرق، حوضه سیل برگردان غرب و رودخانه کن، حوضه مرکزی و حوضه چیتگر) تقسیم‌بندی شده‌اند. حوضه‌های چهارگانه تهران تخلیه‌گاه‌های مجزا از یکدیگر دارند که این امر امکان مدل‌سازی مستقل آن‌ها را فراهم می‌سازد. در تحقیق حاضر حوضه آبریز سیل برگردان شرق تهران مورد مطالعه قرار گرفته است. این حوضه با مساحتی بالغ بر ۲۲۰ کیلومتر مربع، دارای ۸۱ زیر حوضه می‌باشد و در حدود ۲۰۵ کیلومتر شبکه زهکشی اصلی دارد. شکل ۱ زیرحوضه‌های تفکیک شده در شبکه زهکشی شرق تهران را نشان می‌دهد.

شبکه اصلی حوضه آبریز سیل برگردان شرق شامل کانال‌های اصلی ولنجک، مقصودییک (زرگنده)، دارآباد، تهرانپارس، سرخه‌حصار، ۱۷ شهرپور، شهرزاد و سیل برگردان شرق (کانال‌های باختر، منوچهری، ابوذر و باروتکوبی) می‌باشد. به استثنای کانال سرخه‌حصار که در بازه اول راستای شرقی - غربی داشته و شیب ملایمی دارد، سایر کانال‌های منتهی به سیل برگردان شرق راستای شمالی - جنوبی دارند که در جهت شیب غالب شهر امتداد دارند و همین امر موجب شده تا شیب کانال‌های حوضه مذکور تند بوده و در نتیجه سرعت جریان در آن‌ها نیز زیاد باشد. شکل ۲ کانال‌های شبکه زهکشی شرق تهران و تغییرات شیب کانال‌ها را نشان می‌دهد (Mahab Ghodss Consulting Engineers, 2011c).

کمبود ظرفیت هیدرولیکی کانال‌های اصلی حوضه سیل برگردان شرق در مقایسه با سایر حوضه‌ها، گسترده‌تر می‌باشد (Mahab Ghodss Consulting Engineers, 2011d). با توجه به مطالعات صورت گرفته توسط مهندسین مشاور مه‌اب قدس بر شبکه زهکشی شرق تهران، ۷ حوضچه تعدیل برای جبران کمبود ظرفیت شبکه و کمک به کنترل سیلاب در منطقه مذکور در نظر گرفته شده است؛ که ۶ حوضچه داخل مسیر شبکه و ۱ حوضچه خارج از مسیر شبکه خواهد بود و خروجی‌های هر حوضچه یک روزه و یک سرریز فاقد دریاچه است. همچنین هیچگونه سیاستی برای بهره‌برداری بهینه از این حوضچه‌ها لحاظ نشده است. بدین ترتیب حوضچه به محض رسیدن آب به دهانه ورودی آن فعال می‌شود و شروع به ذخیره‌سازی سیلاب می‌کند و به محض رسیدن سطح آب داخل حوضچه‌ها به تراز کف مجرای خروجی حوضچه‌ها (که یک روزه و سرریز در ترازهای متفاوت می‌باشند) جریان خارج شده و به کانال پایین دست منتقل می‌شود.

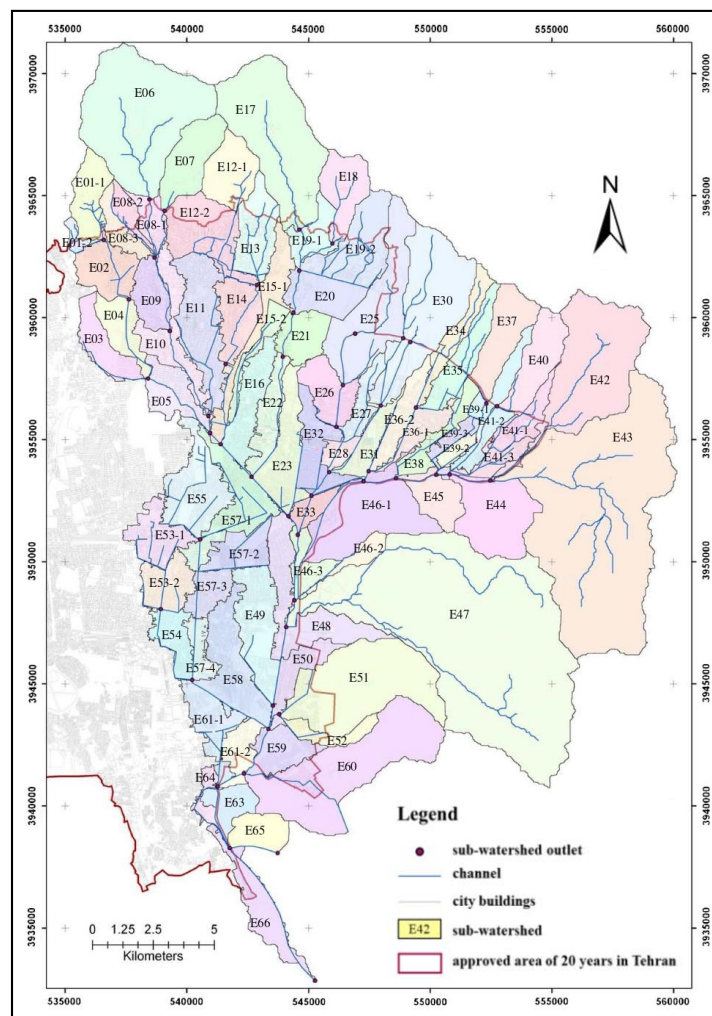


Fig. 1- Sub-watersheds of drainage network in east watershed of Tehran
شکل ۱- زیرحوضه‌های شبکه زهکشی حوضه آبریز شرق تهران (Mahab Ghodss Consulting Engineers, 2011a)

پیشنهادی، اوج جریان ورودی به مسیل سیل برگردان شرق کاهش می‌یابد، لیکن کمبود ظرفیت هیدرولیکی آن کاملاً مرتفع نمی‌گردد (Mahab Ghodss Consulting Engineers, 2011d). تحقیق حاضر با استخراج منحنی‌های کنترل بهینه دریاچه‌ها، پتانسیل روش پیشنهادی (بهره‌برداری با کنترل بهینه دریاچه‌ها) را در کاهش حجم سیلاب مازاد بر ظرفیت شبکه مورد ارزیابی قرار می‌دهد. شکل ۴ شبکه زهکشی شرق تهران و موقعیت قرارگیری حوضچه‌ها را در روش پیشنهادی، در مدل SWMM نشان می‌دهد.

۲-۲- مدل شبیه‌سازی بارش - رواناب

به منظور استخراج هیتوگراف بارش‌های بزرگ منطقه، از اطلاعات بارش‌های ثبت شده توسط ایستگاه باران‌سنجی نیاوران در بازه زمانی سال‌های ۱۳۵۲ تا ۱۳۹۲، ۵ واقعه بارش با مشخصات مندرج در جدول ۲ در نظر گرفته شده است.

به عبارتی روش فعلی، بهره‌برداری بدون کنترل است در نتیجه ممکن است زمانی که دبی اوج رواناب به محل استقرار حوضچه برسد، حوضچه قبلاً پر شده باشد و دیگر قادر به ذخیره‌سازی سیلاب نباشد. اما در روش پیشنهادی به منظور کنترل بیشتر در نحوه بهره‌برداری، حوضچه‌های موردنظر به صورت خارج از مسیر شبکه در نظر گرفته شده‌اند که در این حالت علاوه بر خروجی‌های دریاچه‌دار، برای ایجاد ارتباط بین حوضچه و شبکه، دهانه ورودی حوضچه‌ها نیز به یک روزنه دریاچه‌دار، مجهز شده است و بهره‌برداری با کنترل بهینه دریاچه‌ها انجام می‌شود. شکل ۳ حوضچه‌های موردنظر را به طور شماتیک و جدول ۱ حجم و موقعیت مکانی این حوضچه‌ها را در شبکه زهکشی شرق تهران نشان می‌دهد.

نتایج تحلیل هیدرولیکی شبکه اصلی آب‌های سطحی تهران نشان می‌دهد که با احداث حوضچه‌های تعدیل سیلاب در مکان‌های

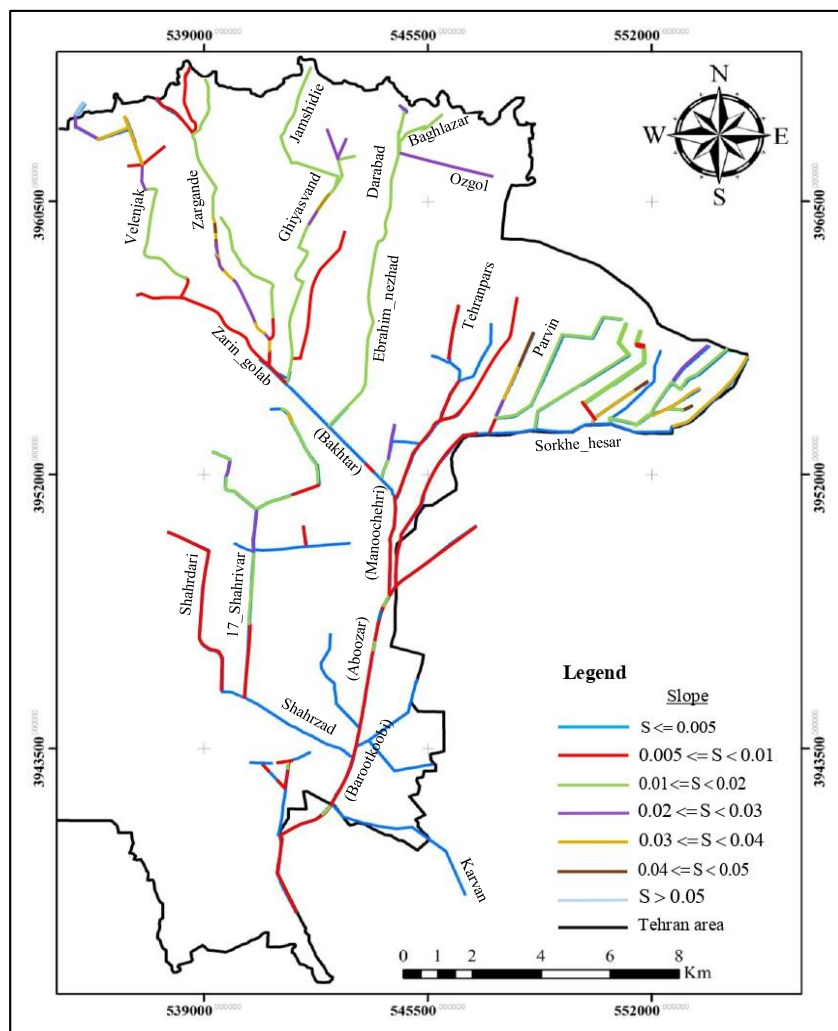


Fig. 2- Longitudinal slope of eastern drainage network channels

شکل ۲- شیب طولی کانال‌های شبکه زهکشی شرق (Mahab Ghodss Consulting Engineers, 2011c)

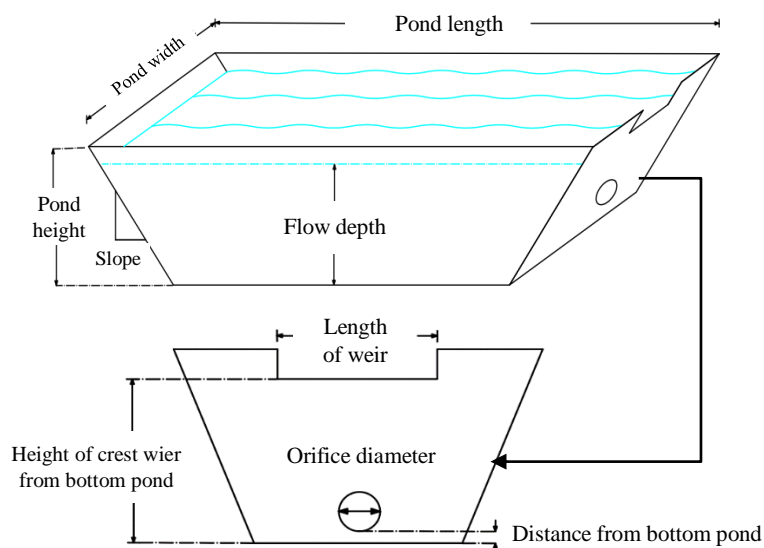


Fig. 3- Schematic of storm detention ponds

شکل ۳- طرح شماتیک حوضچه‌های تعدیل سیلاب

تحقیقات منابع آب ایران، سال هفدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰

Volume 17, No. 1, Spring 2021 (IR-WRR)

Table 1- Volume and Location of the ponds in east drainage network of Tehran

جدول ۱- حجم و موقعیت مکانی حوضچه‌ها در شبکه زهکشی شرق تهران

(Mahab Ghodss Consulting Engineers, 2011d)

Name of Ponds	Volume (m ³)	Location of the pond
Darabad	140000	West side of Darabad coastal park
Baghlazar	41000	East side of Oshan boulevard
Ozgol	55000	Basij boulevard on the north side of Army boulevard
Tehranpars 1	45000	Omid town and the east side of Omid Town boulevard
Tehranpars 2	110000	North side of Pars town
Lashgarak	145000	Southeastern side of Babaei highway and Lashgarak street intersection
Sorkheh hesar	335000	East side of the Aerospace organization located on Sorkheh hesar highway

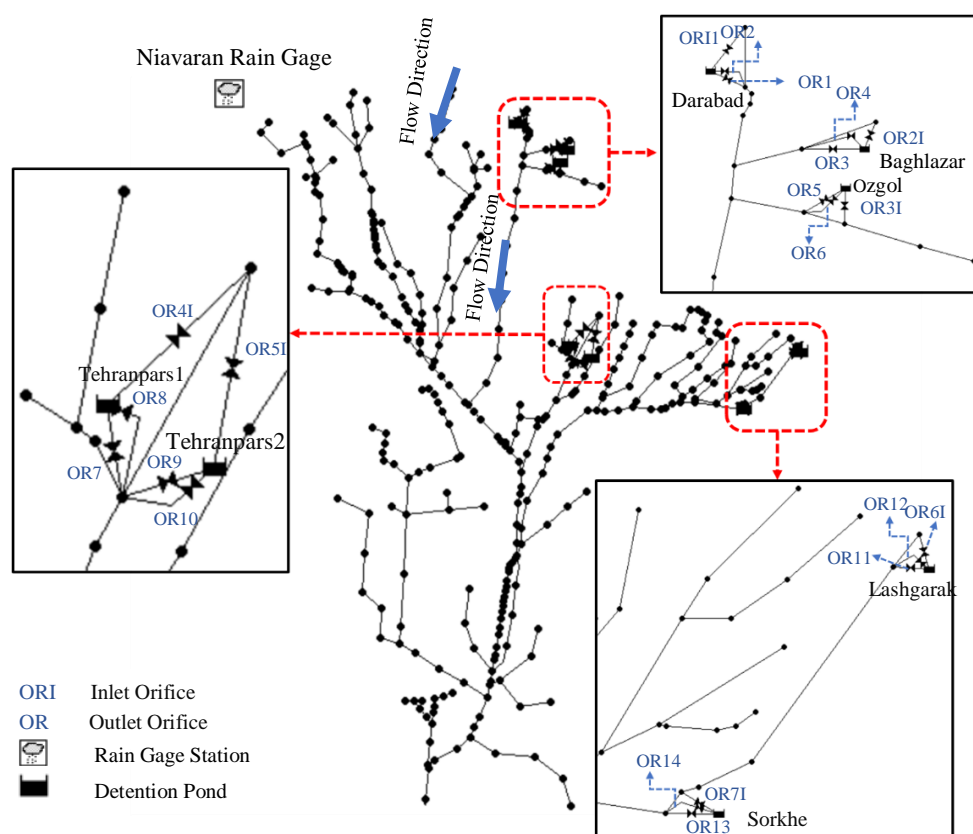


Fig. 4- East drainage network of Tehran in EPA-SWMM environment

شکل ۴- شبکه زهکشی شرق تهران در محیط EPA-SWMM

Table 2- The characteristics of the largest selected rainfall events in the study area

جدول ۲- مشخصات بزرگترین رویدادهای بارش منتخب در منطقه مورد مطالعه

Event No.	Start Date	Start Time	End Date	End time	Duration (min)	Depth (mm)
1	12/18/1985	18:30	12/19/1985	19:10	1480	39.67
2	02/20/1975	22:50	02/22/1975	1:25	1595	45.15
3	03/02/1996	8:20	03/03/1996	7:20	1380	45.81
4	12/22/1975	6:40	12/23/1975	13:15	1835	56.19
5	10/28/2011	17:30	10/29/2011	15:35	1325	61.5

همچنین برای شبیه‌سازی و برآورد رواناب در منطقه مورد مطالعه از مدل هیدرولوژیکی- هیدرولیکی EPA-SWMM استفاده شده است. بدین منظور از روش عدد منحنی ارائه شده توسط اداره حفاظت از خاک ایالات متحده، برای محاسبه تلفات نفوذ استفاده گردیده و از روش موج دینامیکی برای روندیابی جریان در کانال‌ها استفاده شده است؛ که معادلات حاکم بر روندیابی جریان (معادلات سنت-نانت) را که مطابق روابط ۱ و ۲ می‌باشند (Chaudhry, 2008)، بطور کامل حل می‌کند:

$$\frac{\partial Q}{\partial x_{st}} + \frac{\partial A}{\partial T} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial T} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x_{st}} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y_{st}}{\partial x_{st}} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2)$$

در این روابط Q دبی جریان، A سطح مقطع، g شتاب گرانش، S_0 شیب کانال، S_f شیب خط گردادیان انرژی، x_{st} و y_{st} بترتیب راستای حرکت و راستای عمود بر حرکت جریان و T زمان می‌باشند (Chaudhry, 2008).

۳-۲- فرمول‌بندی مسأله بهینه‌سازی

مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری هماهنگ از حوضچه‌های تعدیل سیلاب مورد مطالعه، که در آن هدف تنها حداقل‌سازی حجم سیلاب مازاد بر ظرفیت شبکه بر اساس نحوه بهره‌برداری از حوضچه‌ها می‌باشد، یک مدل بهینه‌سازی تک‌هدفه است. بنابراین به منظور بهینه‌سازی تابع هدف مسأله حاضر (رابطه ۳) تحت قیود ذکر شده در روابط ۴ تا ۸، فرمول‌بندی کلی مسأله به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Min } V_{IT} = \sum_{i=1}^N V_{f,i} \quad (3)$$

$$0 \leq H_{t,D} \leq H_{\max,D} \quad (4)$$

$$GO_{K,D,t} = \begin{cases} 0 & \text{if } H_t \leq B_{K,D} \\ \in \{0, 0.1, 0.2, \dots, 1\} & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$H_{t,D} = f(GO_{K,D,t}, Q_{in,t-1,D}, H_{t-1,D}) \quad (6)$$

$$h_{i,D} \in \{h_1, h_2, \dots, h_d = H_{\max,D}\} \quad (7)$$

$$V_{f,i} = f(R, H_{t,D}, \dots) \quad (8)$$

در این روابط V_{IT} حجم کل سیلاب مازاد بر ظرفیت شبکه سیلاب‌برو در هر واقعه بارش، N تعداد کل گره‌های شبکه، $V_{f,i}$ حجم بیرون‌زدگی آب در هر یک از گره‌های شبکه، H_{\max} بیشترین عمق مجاز آب در حوضچه، D اندیس شمارنده حوضچه، k اندیس شمارنده دریاچه‌ها، $H_{t,D}$ عمق آب در حوضچه D ام در زمان t ، $GO_{K,D,t}$ مقدار بازشدگی دریاچه k ام در حوضچه D ام در زمان t ، H_t عمق آب در حوضچه D ام یا گره بالادست حوضچه در زمان t ، $B_{K,D}$ تراز کف دریاچه k ام در حوضچه D ام، $Q_{in,t-1,D}$ دبی جریان ورودی به حوضچه

D ام در زمان $t-1$ ، $H_{t-1,D}$ ارتفاع آب حوضچه D ام در زمان $t-1$ ، $h_{i,D}$ بیانگر تأمین گام سطح آب گسسته‌سازی شده در حوضچه D ام و R معرف هیتوگراف یک واقعه بارش می‌باشد. رابطه ۸ به معادلات دیفرانسیلی حاکم بر فیزیک مسأله اشاره دارد، که این قید بطور ضمنی توسط مدل شبیه‌سازی بارش- رواناب کنترل خواهد شد.

همچنین، متغیرهای تصمیم مسأله میزان بازشدگی دریاچه‌های ورودی و خروجی هستند که با توجه به تراز سطح آب در حوضچه‌ها و گره قبل از هر یک از حوضچه‌ها تعیین می‌شوند. بدین منظور با توجه به حداکثر عمق مجاز آب در حوضچه‌ها و گره قبل از هر یک از حوضچه‌ها گام‌های سطح آب با فواصل ۱۰ سانتی‌متر گسسته‌سازی شده است؛ به طوری که به ازای هر ۱۰ سانتی‌متر افزایش تراز سطح آب در گره‌های مذکور و حوضچه‌ها، بترتیب باید میزان بازشدگی دریاچه‌ی ورودی و دریاچه‌های خروجی حوضچه‌ها با استفاده از مدل بهینه‌سازی تعیین شوند.

به عنوان مثال حداکثر عمق مجاز آب در گره قبل از حوضچه دارآباد ۴۵۰ سانتی‌متر و تراز کف روزنه ورودی به حوضچه ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد، بنابراین ۴۴ متغیر تصمیم حوضچه دارآباد مربوط به دریاچه ورودی است. از طرفی حداکثر عمق مجاز آب در حوضچه دارآباد ۴۰۰ سانتی‌متر و تراز کف روزنه و سرریز خروجی به ترتیب ۱۰ و ۳۵۰ سانتی‌متر می‌باشند، در نتیجه ۴۴ متغیر تصمیم نیز مربوط به دریاچه‌های خروجی است و در مجموع حوضچه دارآباد دارای ۸۸ متغیر تصمیم خواهد بود. برای ۶ حوضچه دیگر نیز به همین صورت متغیرهای تصمیم تعیین گردیده است. در مطالعه حاضر که شامل ۷ حوضچه، ۷ دریاچه ورودی و ۱۴ دریاچه خروجی می‌باشد تعداد کل متغیرهای تصمیم ۴۴۳ عدد برآورد شده است.

در حل مسأله بهره‌برداری از حوضچه‌های تعدیل سیلاب، حد پایین متغیرهای تصمیم مسأله که میزان بازشدگی دریاچه‌ها هستند، معادل صفر و حد بالای آن‌ها معادل یک در نظر گرفته شده است. در این حالت هر مؤلفه (متغیر تصمیم) می‌تواند یک مقدار گسسته از مجموعه مقادیر $\{0, 0.1, 0.2, \dots, 1\}$ را اختیار کند که مقادیر صفر و یک بترتیب نشان‌دهنده دریاچه کاملاً بسته و کاملاً باز است. به عنوان مثال اگر تعدادی از مؤلفه‌های یک بردار حل مقادیر $0.1, 0.4, 0.6, 1$ را اختیار کنند، این مقادیر به ترتیب بیانگر ۱۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ درصد بازشدگی دریاچه خواهند بود که رابطه ۵ نیز بیانگر همین موضوع (میزان بازشدگی دریاچه‌ها برحسب درصد) است. شرط اول این رابطه نشان می‌دهد که چنانچه عمق آب کمتر از تراز کف دریاچه باشد، دریاچه

کاملاً بسته است و در غیر اینصورت می‌تواند مقادیر ۰ تا ۱ را که معادل صفر تا ۱۰۰ درصد بازشدگی در پیچه هستند، اتخاذ کند.

پس از تعیین ساختار مسأله بهینه‌سازی موردنظر، انتخاب الگوریتم مناسب برای حل مدل بهینه‌سازی مطرح می‌شود که در تحقیق حاضر از الگوریتم جستجوی هارمونی استفاده شده است. این الگوریتم تاکنون در حل مسائل مختلفی توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن با سایر الگوریتم‌ها مقایسه شده است (Ayvaz, 2009; Yazdi et al., 2015; Yazdi et al., 2017).

۴-۲- الگوریتم بهینه‌سازی

الگوریتم جستجوی هارمونی یک روش جستجوی تصادفی است که در مقایسه با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری الزامات ریاضی کمتری دارد و می‌توان آن را در مسائل مختلف مهندسی بکار گرفت. همچنین به روزرسانی شدن حافظه اولیه در پایان هر تکرار الگوریتم، موجب افزایش فضای جستجو و در نتیجه دستیابی به پاسخ‌های بهتر گردیده است. شکل ۵ روند حل الگوریتم جستجوی هارمونی را نشان می‌دهد.

در واقع، این الگوریتم ابتدا مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم را که میزان بازشدگی هر یک از در پیچه‌ها می‌باشند، بصورت تصادفی تولید نموده و با فراخوانی تابع هدف، مدل شبیه‌ساز از آن‌ها برای حل معادلات هیدرولیکی سیستم و محاسبه حجم سیلاب گره بهره می‌گیرد. بنابراین مدل شبیه‌ساز به ازای هر هارمونی توسط الگوریتم بهینه‌ساز فراخوانی می‌گردد و الگوریتم بهینه‌ساز تابع هدف حجم سیلاب مزاد بر ظرفیت شبکه را با استفاده از نتایج مدل شبیه‌ساز محاسبه و ذخیره می‌کند. پس از آن مجدداً مجموعه دیگری از متغیرهای تصمیم را تولید کرده و با فراخوانی تابع هدف در اختیار مدل شبیه‌ساز قرار می‌دهد. بطور مشابه تابع هدف محاسبه و قیدها کنترل می‌شود و الگوریتم بهینه‌سازی با مرتب‌سازی میزان بازشدگی در پیچه‌ها بر اساس معیار کمینه‌سازی حجم کل سیلاب مزاد بر ظرفیت شبکه و همچنین برش جمعیت به اندازه حافظه هارمونی، مقادیر متغیرهای تصمیم در حافظه هارمونی را به‌روزرسانی می‌کند. این روند تولید مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم، محاسبه تابع هدف مسأله و به‌روزرسانی حافظه هارمونی، تکرار و تا رسیدن به معیار خاتمه که ارزیابی تابع هدف به تعداد تکرار مشخص می‌باشد، ادامه می‌یابد.

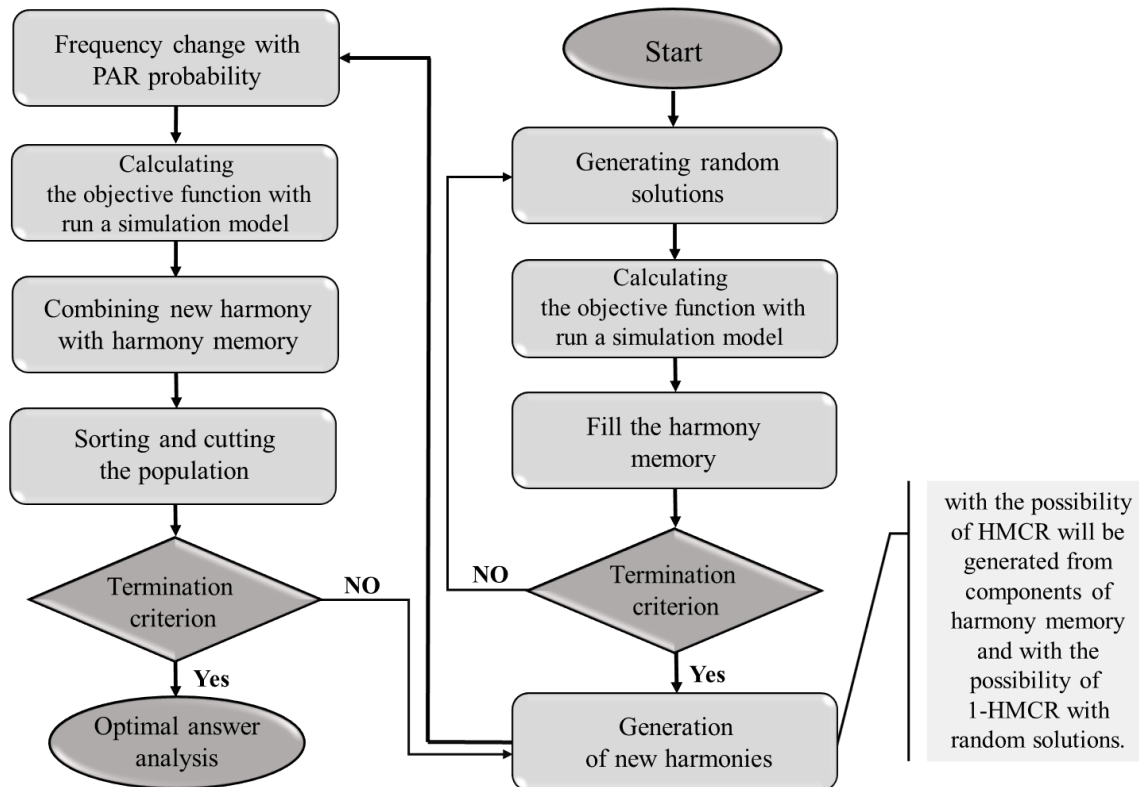


Fig. 5- Flowchart of Harmony Search algorithm

شکل ۵- فلوجارت الگوریتم جستجوی هارمونی

۳- نتایج و بحث

مدل بهینه‌ساز حجم کل سیلاب مزاد بر ظرفیت شبکه را محاسبه می‌کند. پس از همگرایی الگوریتم جستجوی هارمونی که شکل ۶ نمودار همگرایی جواب‌ها را نشان می‌دهد، مجموعه‌ای از راه‌حل‌هایی را خواهیم داشت که به ازای آن نحوه کنترل دریچه‌ها، عملکرد بهینه حوضچه‌ها رقم خواهد خورد. به عنوان نمونه، برای اولین رویداد بارش منحنی کنترل بهینه دریچه‌ها ترسیم شده است. شکل ۷ الف، درصد بازشدگی دریچه‌ی ورودی به حوضچه دارآباد را به ازای هر ۱۰ سانتی‌متر افزایش عمق آب در گره بالادست آن و شکل ۷ ب، درصد بازشدگی دریچه‌های خروجی حوضچه دارآباد را به ازای هر ۱۰ سانتی‌متر افزایش عمق آب در حوضچه نشان می‌دهد. برای سایر دریچه‌ها و سایر رویدادهای بارش نیز منحنی‌های کنترل بهینه دریچه‌ها به منظور بهره‌برداری بهینه هماهنگ از حوضچه‌ها استخراج شده و قابل ترسیم است.

با تنظیم پارامترهای الگوریتم بر اساس مقادیر جدول ۳، که با توجه به سابقه تحقیق و بر مبنای تحلیل حساسیت روی مسائل پنج مارک انتخاب شده‌اند، مدل بهینه‌ساز برای هر رویداد بارش بطور جداگانه به وسیله کامپیوتری با پردازنده Intel® Core™ i7-5930K CPU @ 3.50GHz اجرا شده و برای هر یک حدود ۴ روز زمان برده است تا بهره‌برداری هماهنگ از حوضچه‌های مورد بررسی با کنترل بهینه دریچه‌ها، در هر رویداد بارش حاصل شود.

در هر تکرار مدل بهینه‌ساز ۵۰۰ هارمونی با N مؤلفه (تعداد متغیرهای تصمیم) تولید کرده و در اختیار مدل شبیه‌ساز قرار می‌دهد. مدل شبیه‌ساز نیز به ازای هر هارمونی اجرا می‌شود و با توجه به نتایج آن،

Table 3- Algorithm parameter values
جدول ۳- مقادیر پارامترهای الگوریتم (Yazdi et al., 2017)

Maximum Iteration	Pop.Size	HMS	HMCR	PAR	FW
100	500	500	0.98	0.4	×0.02 variable range

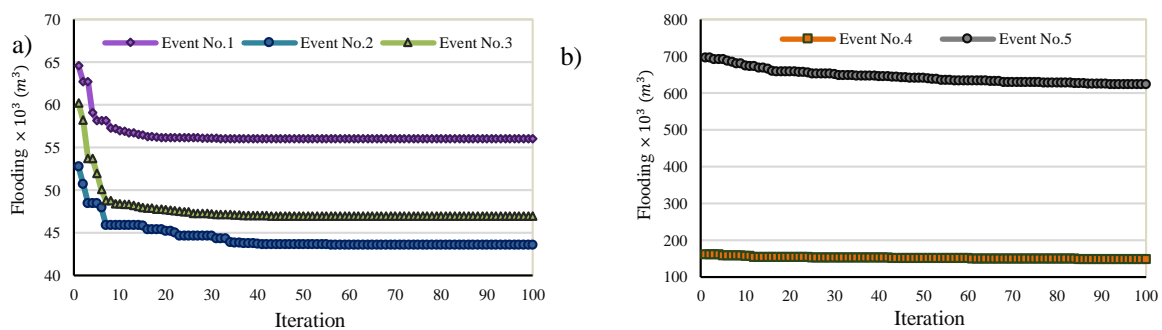


Fig. 6- Convergence diagrams of optimization model responses in rainfall events, a) 1 to 3, b) 4 & 5
شکل ۶- نمودارهای همگرایی پاسخ‌های مدل بهینه‌سازی در رویدادهای بارش الف) ۱ تا ۳، ب) ۴ و ۵

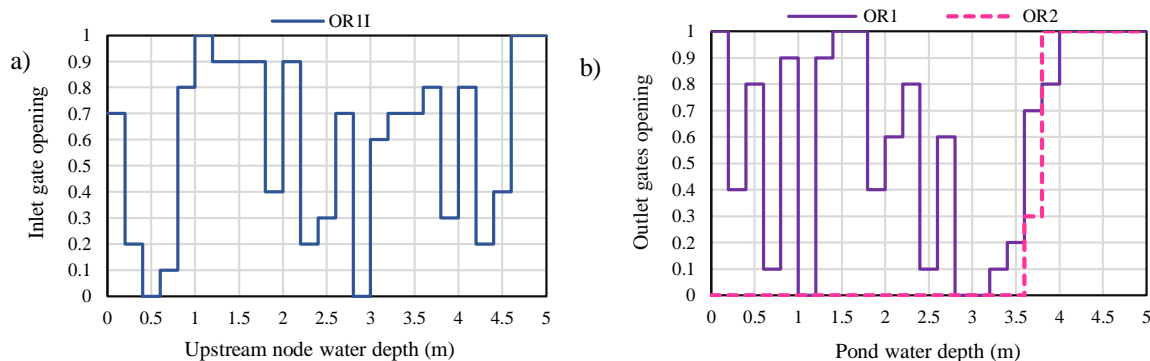


Fig. 7- Optimal control curves of Darabad pond gates, a) inlet gate, b) outlet gates
شکل ۷- منحنی‌های کنترل بهینه دریچه‌های حوضچه دارآباد الف) دریچه ورودی، ب) دریچه‌های خروجی

به منظور مشخص نمودن نقاطی از شبکه که دارای کمبود ظرفیت هیدرولیکی هستند و مقایسه حجم سیلاب گره در دو روش فعلی و پیشنهادی، شکل ۹ ارائه شده است. این شکل برای رویدادهای بارش مورد مطالعه، نقاط دارای کمبود ظرفیت هیدرولیکی و حجم بیرون زدگی آب در آن نقاط را در روش بهره‌برداری بدون کنترل (روش فعلی) و بهره‌برداری با کنترل بهینه دریاچه‌ها (روش پیشنهادی) مقایسه نموده است.

همانطور که ملاحظه می‌گردد، در تمام رویدادهای بارش مورد مطالعه تعداد نقاط دارای کمبود ظرفیت و همچنین حجم بیرون زدگی آب در آن نقاط در روش پیشنهادی نسبت به روش فعلی بهره‌برداری کاهش یافته است. به عنوان مثال در دومین رویداد بارش در شرایط بهره‌برداری به روش فعلی در گره Lashkarak_01، ۱۲۳۸۷۱ مترمکعب و در حوضچه Tehranpars2، ۳۱۳۵۲ مترمکعب بیرون زدگی آب رخ داده، که در روش پیشنهادی این مقادیر بترتیب به ۲۵۶۰۴ مترمکعب و صفر رسیده است. به عبارتی در گره‌های مذکور بترتیب ۷۹/۳٪ و ۱۰۰٪ حجم سیلاب گره کاهش یافته است. برای سایر رویدادهای بارش نیز به همین صورت می‌توان در شکل بالا حجم سیلاب را در گره‌هایی از شبکه که دارای کمبود ظرفیت هیدرولیکی هستند در دو روش فعلی و پیشنهادی مقایسه نمود. همچنین برای درک بهتر عملکرد حوضچه‌ها در روش پیشنهادی هیدروگراف جریان قبل و بعد از حوضچه استخراج شده است. شکل ۱۰ برای کوچکترین و بزرگترین بارش مورد مطالعه که به ترتیب رویدادهای ۱ و ۵ هستند، هیدروگراف ورودی و خروجی حوضچه‌های ازگل و لشگرک (که در شکل ۴ مشخص شده‌اند) را به عنوان نمونه نشان می‌دهد.

نمودارهای ترسیم شده در شکل بالا عملکرد صحیح حوضچه‌ها را در روش پیشنهادی با مقایسه هیدروگراف جریان قبل و بعد از حوضچه به خوبی نشان داده است.

همچنین، در جدول ۴ حجم سیلاب مازاد بر ظرفیت هیدرولیکی شبکه زهکشی در روش بهره‌برداری با کنترل بهینه دریاچه‌ها (روش پیشنهادی) با روش بهره‌برداری بدون کنترل (روش فعلی) مقایسه شده و میزان اثربخشی رویکرد پیشنهادی در بهبود عملکرد حوضچه‌ها برآورد گردیده است.

همانطور که از جدول استنباط می‌شود، روش پیشنهادی نسبت به روش فعلی تا حد مناسبی حجم سیلاب مازاد بر ظرفیت هیدرولیکی شبکه زهکشی را کاهش می‌دهد. بطوریکه در سومین رویداد بارش با مقدار ۷۹٪ بیشترین تأثیر در کاهش حجم سیلاب مازاد بر ظرفیت شبکه مشاهده شده است و در رویداد ۵ که بزرگترین رویداد در بارش‌های ثبت شده در سال‌های ۱۳۵۲ تا ۱۳۹۲ بوده است، این روش توانسته ۳۷٪ حجم سیلاب مازاد بر ظرفیت شبکه را نسبت به روش فعلی بهره‌برداری کاهش دهد. در واقع رویداد بارش ۵ با داشتن عمقی معادل ۶۱/۵ میلی‌متر بدلیل عدم وجود ظرفیت هیدرولیکی شبکه حداقل اثربخشی این روش را در بین رویدادهای بارش مورد مطالعه به خود اختصاص داده است. چنانچه ظرفیت نگهداشت شبکه اجازه ذخیره‌سازی حجم بیشتری را می‌داد و یا بارش به گونه‌ای بود که به شبکه فرصت ایجاد ظرفیت هیدرولیکی داده می‌شد، این روش در بارشی با همین عمق نیز می‌توانست بیش از این مؤثر واقع شود. برای درک بهتر این موضوع می‌توان به رویدادهای بارش ۲ و ۳ اشاره کرد که گرچه هر دو دارای عمقی در حدود ۴۵ میلی‌متر هستند اما در سری زمانی رویداد بارش ۳، بارش چندین بار حدود ۴۰ دقیقه و کمتر از زمان تمرکز حوضه قطع شده است، بنابراین در شبکه فرصت ایجاد ظرفیت هیدرولیکی به وجود آمده است. در نتیجه، رویداد ۳ نسبت به رویداد ۲ بهتر توانسته در روش بهره‌برداری با کنترل بهینه دریاچه‌ها (روش پیشنهادی) حجم سیلاب مازاد بر ظرفیت شبکه را کاهش دهد. شکل ۸ هیتوگراف این دو رویداد بارش را نشان می‌دهد.

Table 4- Comparison of stormwater exceeded the hydraulic capacity of drainage network for the operation methods with optimal control of valves and the operation without control

جدول ۴- مقایسه حجم سیلاب مازاد بر ظرفیت هیدرولیکی شبکه زهکشی در روش‌های بهره‌برداری با کنترل بهینه

Number of Event	Duration (min)	Depth (mm)	دریاچه‌ها و بهره‌برداری بدون کنترل		Reduction (%)
			Without Control (m ³)	Optimal Control (m ³)	
1	1480	39.67	130615	56021	57
2	1595	45.15	173200	43584	75
3	1380	45.81	220509	46925	79
4	1835	56.19	392112	147199	62
5	1325	61.5	1012879	622999	37

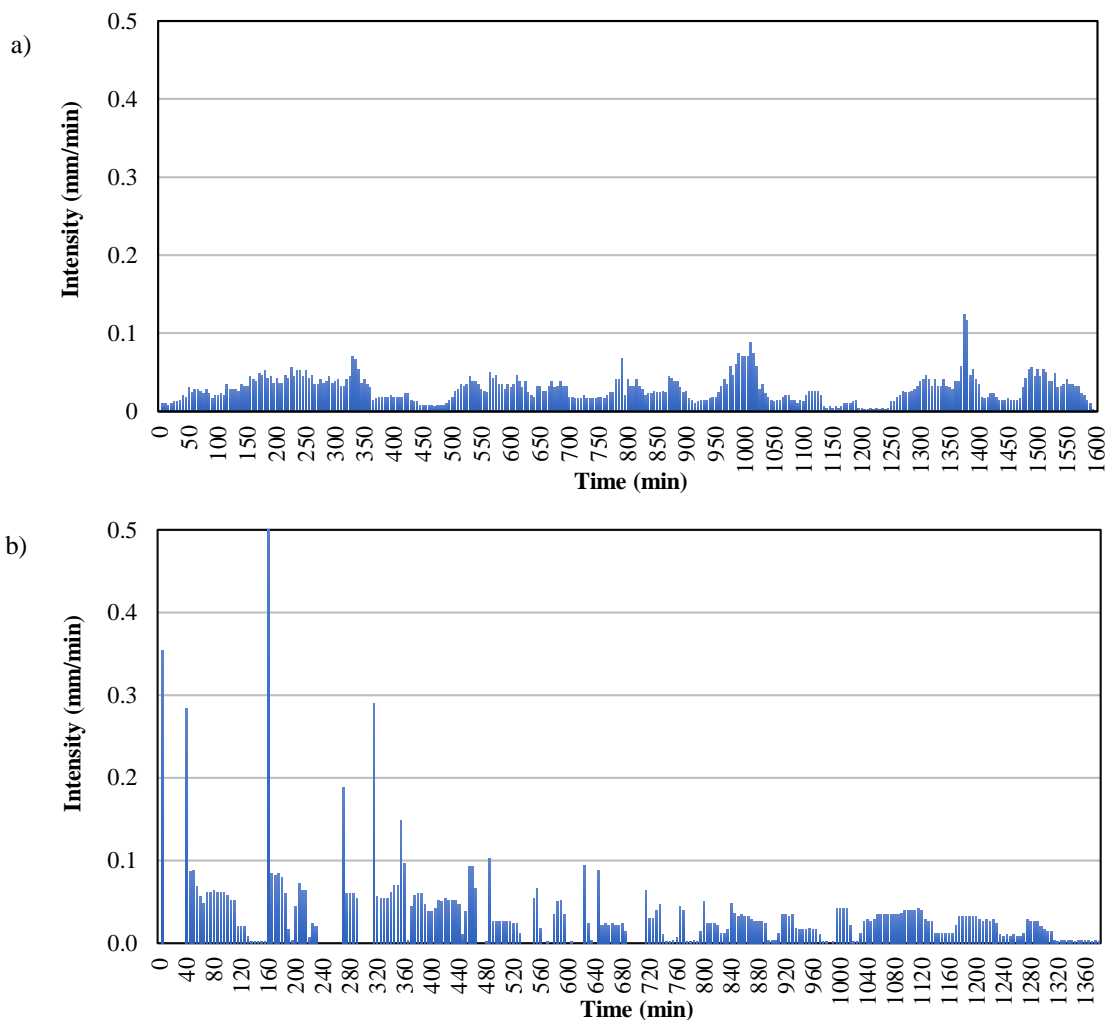


Fig. 8- Hyetograph of rainfall events a) 2, b) 3
 شکل ۸- هیئوگراف رویدادهای بارش الف) ۲، ب) ۳

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، از الگوریتم HS در ترکیب با مدل هیدرولیکی- هیدرولوژیکی SWMM برای استخراج منحنی‌های کنترل بهینه دریاچه‌ها به منظور بهره‌برداری هماهنگ از حوضچه‌های تعدیل سیلاب شبکه زهکشی شرق تهران در هنگام وقوع بارش‌های حدی استفاده شده است.

هدف از پژوهش حاضر این است که پتانسیل‌سنجی شود با روش غیرسازه‌ای بهره‌برداری تا چه اندازه می‌توان سیل گرفتگی را کاهش داد، به همین دلیل هیدروگراف ورودی معلوم فرض شده و عدم قطعیت بارش لحاظ نشده است.

همانطور که ملاحظه می‌گردد در حوضچه ازگل اختلاف کمتری بین هیدروگراف ورودی و خروجی نسبت به حوضچه لشگرک در رویداد بارش مشابه مشاهده می‌شود، زیرا در اطراف این حوضچه، شبکه ظرفیت کافی برای کنترل سیلاب شبکه را داشته است بنابراین لزومی بر استفاده بیشتر از ظرفیت این حوضچه نبوده است، در حالی که در حوضچه لشگرک به دلیل اینکه قبل از حوضچه بیرون‌زدگی آب در شبکه رخ داده است (حجم بیرون‌زدگی آب در گره Lashkarak_01 به عنوان گره قبل از حوضچه‌ی لشگرک در شکل ۹ نشان داده شده است) بنابراین شبکه دچار کمبود ظرفیت بوده و از ظرفیت حوضچه بیشتر استفاده شده است. از طرفی در هر یک از حوضچه‌ها، در رویداد ۵ که بارش بزرگ‌تری رخ داده است، این اختلاف بیشتر شده و به عبارتی در رویداد ۵ نسبت به رویداد ۱ از ظرفیت حوضچه بیشتر استفاده شده است. در نتیجه، با بکارگیری این روش می‌توان از ظرفیت شبکه بدرستی بهره گرفت.

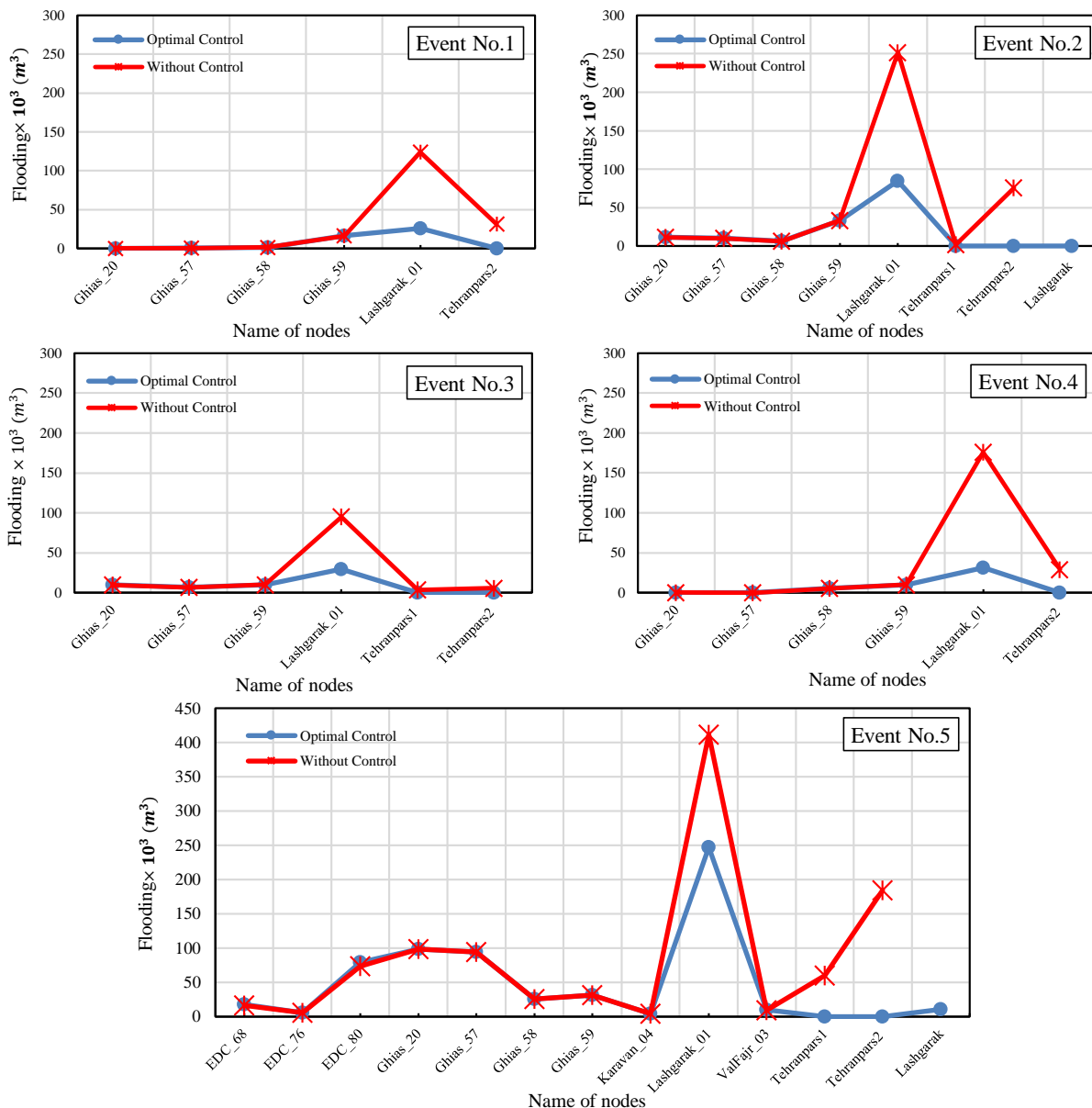


Fig. 9- Comparison of water outflow volume in nodes with lack of hydraulic capacity

شکل ۹- مقایسه حجم بیرون‌زدگی آب در نقاط دارای کمبود ظرفیت هیدرولیکی

شدت‌های مختلف توجیه می‌کند. بنابراین با بکارگیری این روش، بدون تغییر اساسی در زیرساخت‌های موجود و صرف هزینه‌های هنگفت، می‌توان عملکرد حوضچه‌ها در مقابل سیلاب شبکه را افزایش داد. همچنین با توجه به اینکه کنترل بارش‌های بزرگ اهمیت بیشتری نسبت به بارش‌های کوچک‌تر از حیث سیل و خسارت‌های سیلاب دارد، برای کنترل بیشتر و مدیریت دریاچه‌ها بهتر است حوضچه‌ها به

نتایج حاصل از روش بهره‌برداری با کنترل بهینه دریاچه‌ها (روش پیشنهادی) در مقایسه با روش بهره‌برداری بدون کنترل (روش فعلی) برای رویدادهای بزرگ بارش مورد بررسی نشان داد که روش پیشنهادی به طور متوسط حدود ۶۲ درصد حجم سیلاب مازاد بر شبکه را کاهش می‌دهد و روش پیشنهادی را برای بهره‌برداری مؤثر از ظرفیت‌های نگهداشت شهری در طیف گسترده‌ای از سیل با اندازه و

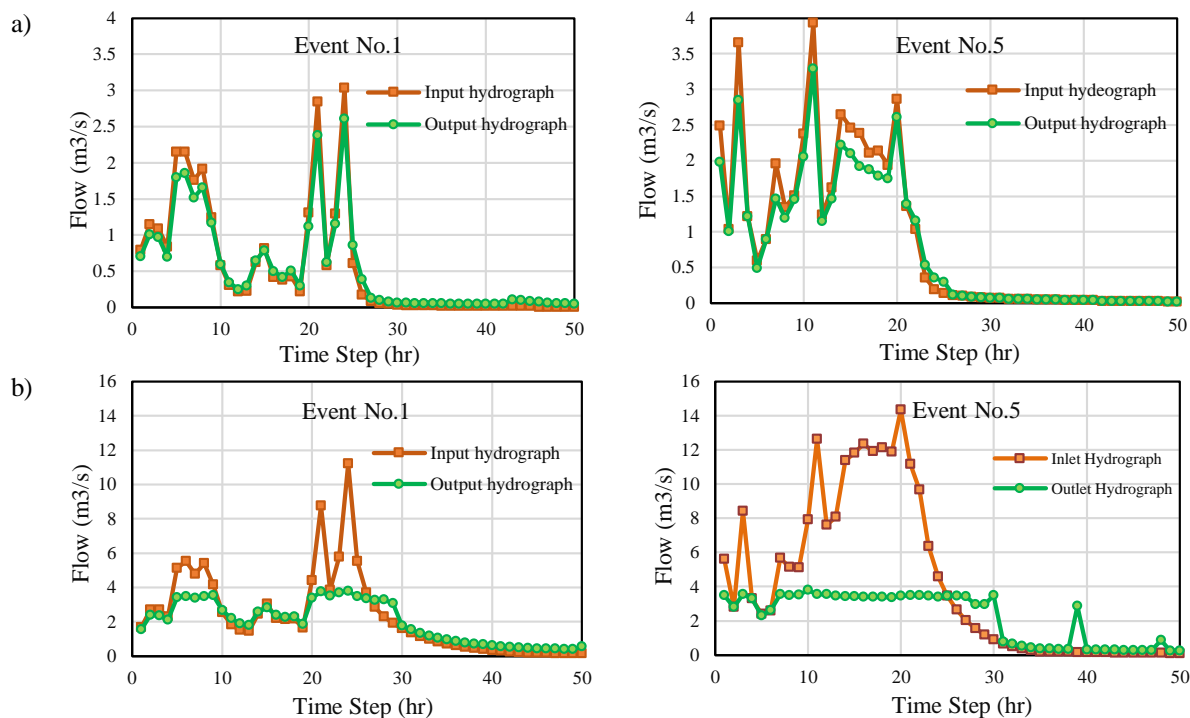


Fig. 10- Evaluation of inlet and outlet hydrographs of a) Azgol and b) Lashgarak ponds in events 1 & 5
 شکل ۱۰- ارزیابی هیدروگراف ورودی و خروجی حوضچه‌های الف) ازگل و ب) لشگرک در رویدادهای ۱ و ۵

حوضچه بستگی دارد، مورد بررسی قرار نگرفته است. در تحقیقات آتی می‌توان با وارد نمودن تابع هدف کیفی، این هدف را در تعامل با هدف حداقل‌سازی حجم سیلاب مازاد بر ظرفیت شبکه قرار داد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Low Impact Development
- 2- Urban Storm Detention Ponds
- 3- Storm Water Management Model
- 4- Hybrid Harmony Search
- 5- Real Time Control (RTC)
- 6- Gossip-Based Algorithm
- 7- Genetic Algorithm
- 8- Actuators
- 9- Harmony Search Algorithm
- 10- Differential Evolution Algorithm

۵- مراجع

- Abou Rjeily Y, Abbas O, Sadek M, Shahrouf I and Hage Chehade F (2018) Model predictive control for optimising the operation of urban drainage systems. *Journal of Hydrology* 566:558-565
- Ayvaz MT (2009) Application of harmony search algorithm to the solution of groundwater management models. *Advances in Water Resources* 32(6):916-924

صورت خارج از مسیر شبکه در نظر گرفته شوند تا انحراف آب به داخل حوضچه در زمان و شرایطی صورت گیرد که بیشترین تأثیر را در کاهش شدت بار هیدرولوژیک منطقه داشته باشد. از طرفی در میان ۵ رویداد بارش مورد بررسی، روش بهره‌برداری با کنترل بهینه دریاچه‌ها در سومین رویداد بارش با مقدار ۷۹ درصد بیشترین میزان اثربخشی را در کاهش حجم سیلاب مازاد بر ظرفیت شبکه داشته است که با مقایسه هیتوگراف این بارش با بارشی مشابه از نظر عمق بارش، مشخص شد که در رویداد بارش ۳، بارش چندین بار به مدت زمانی کمتر از زمان تمرکز حوضه قطع شده است، بنابراین در شبکه فرصت ایجاد ظرفیت هیدرولیکی به وجود آمده است. از این رو روش پیشنهادی در سومین رویداد بارش، بهتر توانسته حجم سیلاب مازاد بر ظرفیت شبکه را کاهش دهد.

شایان ذکر است که میزان بهبود قابل توجه عملکرد سامانه با استفاده از رویکرد توسعه داده شده، صرفاً بر اساس تغییر رویه بهره‌برداری از این زیرساخت‌ها و بدون اضافه کردن هزینه‌های ساخت تأسیسات جدید بوده است که این مهم، توجه به روش‌های غیرسازه‌ای مدیریت سیلاب را برجسته می‌سازد.

در تحقیق حاضر معیارهای کیفی سیلاب نظیر کنترل آلودگی رواناب و عملکرد حوضچه‌ها از جنبه کیفی که مستقیماً به زمان ماند آب در

- waters, volume 4, Hydraulic analysis report and evaluation of network capacity, part two. Technical Report (In Persian)
- Mahab Ghods Consulting Engineering Company (2011d) Development and improvement of the network and explain the options. Volume 6, Main Network Strengthening Report and Other Options, part one. Technical Report (In Persian)
- Sahoo SN and Pekkatt S (2017) Detention ponds for managing flood risk due to increased imperviousness: Case study in an urbanizing catchment of India. *Natural Hazards Review* 19(1):1-11
- Taheri Behbahani MT and Bozorgzadeh M (1996) Urban Floods. Publications of the Research Center and Urban Planning and Architecture of Iran, 536p (In Persian)
- Yazdi J (2019) Optimal operation of urban storm detention ponds for flood management. *Water Resources Management* 33(6):2109–2121
- Yazdi J, Choi HS, and Kim JH (2016) A methodology for optimal operation of pumping stations in urban drainage systems. *Journal of Hydro-Environment Research* 11:101–112
- Yazdi J, Sadollah A, Lee EH, Yoo DG, and Kim JH (2015) Application of multi-objective evolutionary algorithms for the rehabilitation of storm sewer pipe networks: Comparison of MOEAs. *Journal of Flood Risk Management, Wiley Online Library* 10(3):326–338
- Yazdi J, Yoo DG, and Kim JH (2017) Comparative study of multi-objective evolutionary algorithms for hydraulic rehabilitation of urban drainage networks. *Urban Water Journal* 14(5):483–492
- Zevenbergen C, Cashman A, Evelpidou N, Pasche E, Garvin S, and Ashley R (2010) Urban flood management. CRC Press, 338p
- Coffman L, Clar M, and Weinstein N (2000) Low impact development management strategies for wet weather flow (WWF) control. Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000: Building Partnerships
- Garofalo G, Giordano A, Piro P, Spezzano G and Vinci A (2017) A distributed real-time approach for mitigating CSO and flooding in urban drainage systems. *Journal of Network and Computer Applications* 78:30-42
- Chaudhry M H (2008) Open-channel flow. Second Edition, Springer, 528p
- Jafari F, Mousavi SJ, Yazdi J, and Kim JH (2018a) Real-time operation of pumping systems for urban flood mitigation: Single-period vs. multi-period optimization. *Water Resources Management* 32(14):4643–4660
- Jafari F, Mousavi SJ, Yazdi J, and Kim JH (2018b) Investigating the role of gate operation in real-time flood control of urban drainage systems. *Advances in Intelligent Systems and Computing* 741:39–48
- Khademi F, Akbari M (2014) Flood control methods; Structural measures. 2th National Conference on Flood Management and Engineering with an Approach to Urban Floods, Iran (In Persian)
- Lee J, Hyun K, Choi J, Yoon Y, and Geronimo FKF (2012) Flood reduction analysis on watershed of LID design demonstration district using SWMM5. *Desalination and Water Treatment, Taylor & Francis* 38(1–3):255–261
- Mahab Ghods Consulting Engineering Company (2011a) Basic studies, volume 2, hydrological report and sedimentation of urban areas, part three. Technical Report (In Persian)
- Mahab Ghods Consulting Engineering Company (2011b) Summary of studies report. Volume 11, Technical Report (In Persian)
- Mahab Ghods Consulting Engineering Company (2011c) Investigation of the main network of surface