

Quantifying Resilience of Urban Drainage Systems Based on the Hydraulic Performance Assessment

N. Binesh¹, M.H. Niksokhan², A. Sarang³

1. PhD. Student of Environmental Engineering-Water Resources,
University of Tehran, Tehran, Iran
2. Assoc. Prof., Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran
(Corresponding Author) niksokhan@ut.ac.ir
3. Assist. Prof., Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received May 2, 2017 Accepted Aug. 6, 2017)

To cite this article :

Binesh, N., Niksokhan, M.H., Sarang, A., 2018, "Quantifying resilience of urban drainage systems based on the hydraulic performance assessment." *Journal of Water and Wastewater*, 29 (5), 61- 71.
Doi: 10.22093/wwj. 2017.83872.2392 (In Persian)

Abstract

Sustainable management of Urban Drainage Systems (UDSs) is challenging since the hydraulic characteristics and pollutants discharged into catchment areas are constantly changing. Quantifying the resilience of UDSs is a crucial step towards long-term and sustainable management of these catchments in urban areas. This study was performed to evaluate the resilience of UDSs against flooding through combining hydraulic performance of stormwater drainage network with the system performance function. To conduct this performance evaluation extreme rainfall intensity values for different return year periods ranging from 2 to 100 years were used for catchment drained into the West Flood-Diversion (WFD) system in Tehran. Both hydraulic and hydrodynamic simulations were performed for these stormwater drainage system under two scenarios: with and without BMPs. To further evaluate the systems performance and resilience, additional simulation analysis was performed using one specific flooded node under extreme rainfalls with different return periods. The results showed that adding a vegetative swale to the drainage system would decrease the nodal flooding duration and the flood volume up to 15% and 47%, respectively. The results also shown that the resilience against flooding will increase from about 0.4% up to 6% under the above-mentioned conditions. From the results of this study, we can conclude that employing some types of BMP along with the existence low-impact development measures within the traditional urban drainage areas may be sufficient to increase the system resilience and sustainable control of flooding.

Keywords: Resilience, Performance Function, Urban Drainage System (UDS), Management Practices.



کمی سازی بازگشت پذیری سیستم زهکشی شهری بر اساس ارزیابی عملکرد هیدرولیکی

نگین پیش،^۱ محمدحسین نیک سخن،^۲ امین سارنگ^۳

۱- دانشجوی دکترای مهندسی محیط زیست- منابع آب، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) niksokhan@ut.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

پدیرش ۹۶۵/۱۵ دریافت ۹۶۲/۱۲

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

پیش، ن.، نیک سخن، م. ح.، سارنگ، ا.، ۱۳۹۷، "کمی سازی بازگشت پذیری سیستم زهکشی شهری بر اساس ارزیابی عملکرد هیدرولیکی"
مجله آب و فاضلاب، ۲۹ (۵)، ۷۱-۶۱. Doi: 10.22093/wwj.2017.83872.2392

چکیده

با وجود پیشرفت های قابل توجه در زمینه مدیریت پایدار سیستم های زهکشی رواناب شهری (UDSs)، این قبیل زیرساخت ها در معرض تهدید روزافزون محرک های غیر قطعی تغییرات آینده قرار دارند. کمی سازی بازگشت پذیری، گامی مهم در راستای افزایش بلندمدت پایداری مناطق شهری تحت پوشش سیستم های زهکشی رواناب است. در پژوهش حاضر از طریق ترکیب عملکرد هیدرولیکی شبکه زهکشی رواناب سطحی با تابع عملکرد سیستم، به کمی سازی بازگشت پذیری این شبکه ها در مقابله با سیل پرداخته شد. به این منظور پس از تعیین مقادیر بارش، حدی برای دوره بازگشت های مختلف، شبیه سازی هیدرولوژیکی و هیدرودینامیکی سیستم جمع آوری آب های سطحی حوضه سیل برگردان غرب در تهران با دو سناریوی وجود و عدم وجود بهترین اقدامات مدیریتی (BMP) صورت گرفت. سپس این روش برای یکی از گره های سیلابی شبکه به کار گرفته شد و میزان عملکرد و بازگشت پذیری سیستم در این گره انتخابی تحت بارش های حدی با دوره بازگشت های مختلف برآورد شد. نتایج نشان داد که با اضافه نمودن یک جوی باغچه به سیستم زهکشی شهری، مدت سیل گرفتنی در گره منتخب شبکه و حجم آبگرفتگی به ترتیب تا میزان ۱۵ و ۴۷ درصد کاهش یافته و بازگشت پذیری نسبت به سیل از ۳۷/۰ درصد تا ۸۹/۵ درصد افزایش می یابد. بنابراین وجود راهکارهای توسعه کم اثر (LID) همراه شبکه سنتی زهکشی شهری می تواند در افزایش پایداری سیستم مؤثر باشد.

واژه های کلیدی: بازگشت پذیری، تابع عملکرد، سیستم زهکشی شهری، راهکارهای مدیریتی

۱- مقدمه

تغییرات اخیر در وضعیت اقلیم و محیط زیست در سراسر جهان، افزایش فراوانی رخداد های بارش حدی را به دنبال داشته است. این مسئله در کنار عملکرد نامناسب و کمبود ظرفیت شبکه جمع آوری آب های سطحی سبب افزایش سیل و آبگرفتگی در مناطق شهری شده است (Lee and Kim, 2017). از این رو در سال های اخیر بازگشت پذیر ساختن سیستم های زهکشی رواناب شهری به عنوان رویکردی مهم در کاهش اثرات سیلاب و پیامدهای آن در شرایط غیر قطعی توسعه شهری و تغییر اقلیم آینده مورد توجه قرار گرفته است (Blockley et al., 2012, Butler and Davies, 2011, Djordjević et al., 2011, Gersonius et al., 2013)

طبق تعریف تودینی در سال ۲۰۰۰، برگشت پذیری به توانایی سیستم برای بازگشت به سرویس دهی معمول در تأمین اهداف از پیش تعیین شده، پس از وقوع شکست سیستم اطلاق می شود (Todini, 2000). به عبارت دیگر بازگشت پذیری، توانایی سیستم برای بازیابی خود، پس از وقوع شکست است. بنابراین شاخص بازگشت پذیری بر اساس دوره های که طول می کشد تا شرایط

تغییرات اخیر در وضعیت اقلیم و محیط زیست در سراسر جهان، افزایش فراوانی رخداد های بارش حدی را به دنبال داشته است. این مسئله در کنار عملکرد نامناسب و کمبود ظرفیت شبکه جمع آوری آب های سطحی سبب افزایش سیل و آبگرفتگی در مناطق شهری شده است (Lee and Kim, 2017). از این رو در سال های اخیر بازگشت پذیر ساختن سیستم های زهکشی رواناب شهری به عنوان رویکردی مهم در کاهش اثرات سیلاب و پیامدهای آن در شرایط غیر قطعی توسعه شهری و تغییر اقلیم آینده مورد توجه قرار گرفته



آسیب پذیری سیستم های زهکشی درختی و حلقه ای تحت بارش های مختلف پرداختند و شکست سازه ای ناشی از مسدود شدن لوله در این گونه شبکه ها را مورد بررسی قرار دادند (Zhang et al., 2017).

این پژوهشگران شاخصی به منظور اندازه گیری آسیب پذیری سیستم زهکشی، پیش و پس از اعمال اقدامات تطبیقی معرفی نمودند. نتایج حاصل نشان می دهد که شبکه های درختی درصد بیشتری از لوله های با شرایط هیدرولیکی بحرانی را نسبت به سیستم های حلقوی به خود اختصاص می دهند؛ بنابراین آسیب پذیری سیستم های درختی به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از شبکه های حلقوی است. آنها همچنین نتیجه گرفتند که شاخص آسیب پذیری برای سیستم های درختی پس از اعمال راهکارهای تطبیقی و تبدیل آنها به شبکه های حلقوی کاهش می یابد.

از جمله راهکارهایی که امروزه برای افزایش بازگشت پذیری سیستم های جمع آوری آب های سطحی در شهرها مورد توجه است، به کارگیری بهترین اقدامات مدیریتی^۱ برای کنترل کیفیت و کمیت رواناب در کنار شبکه جمع آوری آب های سطحی است (Jia et al., 2012). پژوهشگران بسیاری، BMP را در نمونه های موردی به کار گرفته شده در پژوهش های خود لحاظ نموده اند تا تأثیر آن را بر کاهش حجم رواناب و دبی پیک رواناب سطحی ناشی از بارش مورد بررسی قرار دهند

(Åstebøl et al., 2004, Villarreal et al., 2004, Chang and Liou, 2010, Stovin, 2010, Pyke et al., 2011, Jia et al., 2012) نتایج این پژوهش ها اغلب گویای تأثیر قابل ملاحظه این قبیل اقدامات مدیریتی بوده است.

در پژوهش های کمی به بررسی عملکرد و بازگشت پذیری شبکه زهکشی شهری در مواجهه با بارش های حداکثر حوضه پرداخته شده است. از آنجا که زیرساخت های زهکشی شهری برای دوره بازگشت های مشخصی طراحی می شوند، در شرایط وقوع بارش های حدی و در مواجهه با پدیده هایی چون تغییر اقلیم و توسعه شهری دچار کاهش عملکرد خواهند شد. بنابراین لازم است کمی سازی بازگشت پذیری این سیستم ها در مواجهه با بارش های حداکثر مد نظر قرار گیرد. بر این اساس پژوهش حاضر به برآورد بازگشت پذیری سیستم جمع آوری آب های سطحی و بررسی عملکرد آن در رویارویی با رخداد های بارش حدی با دوره

نامطلوب سیستم طی شود، تعیین می شود (Nazif, 2010). در پژوهش حاضر، بازگشت پذیری به طور ویژه به صورت "توانایی سیستم زهکشی برای به حداقل رساندن حجم و مدت سیلاب ناشی از وقوع بارش های حداکثر در نظر گرفته شد (Mugume et al., 2014).

منظور از سیل نیز حجم رواناب مازاد بر ظرفیت شبکه جمع آوری آب های سطحی است که از مجاری سیستم به اطراف سرریز می کند.

در دهه های اخیر پیشرفت های قابل توجهی در رابطه با درک مفهوم بازگشت پذیری و کمی سازی آن در سیستم های مختلف آب شهری صورت گرفته است (Jung et al., 2013, Lansey, 2012). تعداد پژوهش های انجام شده در زمینه توسعه روش های مناسب ارزیابی و کمی سازی بازگشت پذیری در زیرساخت های زهکشی رواناب شهری بسیار اندک است؛ که البته در سال های اخیر بیشتر مورد توجه پژوهشگران واقع شده است. در پژوهشی در سال ۲۰۰۴ شاخص هایی با هدف تعریف بازگشت پذیری سیستم های مدیریت ریسک سیلاب پیشنهاد شد (De Bruijn, 2004). شاخص های ارائه شده سه جنبه از مفهوم بازگشت پذیری شامل: دامنه واکنش، روند افزایش واکنش با افزایش شدت امواج سیل، و نرخ بازتوانی را پوشش می دهد. در پژوهش مذکور پس از اعمال شاخص های پیشنهادی بر سیستم های فرضی ساده مشخص شد که ترکیبی از این شاخص ها می تواند در دستیابی به یک دید کلی از بازگشت پذیری سیستم های مدیریت ریسک سیلاب مؤثر باشد.

پژوهش انجام شده توسط موگام و همکاران در سال ۲۰۱۴ بیانگر آن است که با افزایش دوره بازگشت بارش، مدت سیل گرفتگی در مناطق مسکونی انگلستان افزایش یافته و به تبع آن، کاهش بیشتری در عملکرد زیرساخت زهکشی رواناب شهری مشاهده شده است (Mugume et al., 2014). این پژوهشگران همچنین نشان دادند که منحنی کاهش عملکرد سیستم زهکشی برای دوره بازگشت های طولانی بارش مانند ۵۰ و ۱۰۰ ساله، تغییر نموده و بر یکدیگر منطبق است. در پژوهشی در سال ۲۰۱۴ جعبه ابزاری به منظور کمی سازی مفهوم بازگشت پذیری در سیستم های مدیریت ریسک زهکشی شهری ارائه شد (Tahmasebi Birgani, 2014).

ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ به تحلیل و مقایسه

^۱ Best Management Practices (BMPs)



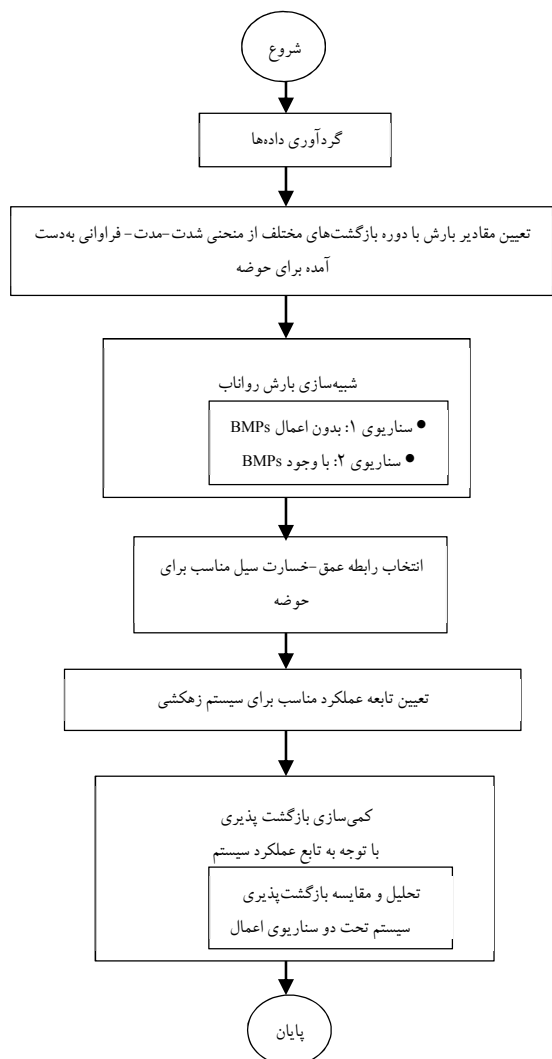


Fig. 1. Flowchart used for quantifying resilience of urban drainage network in Tehran

شکل ۱- فلوچارت کمّی‌سازی بازگشت پذیری شبکه زهکشی شهری

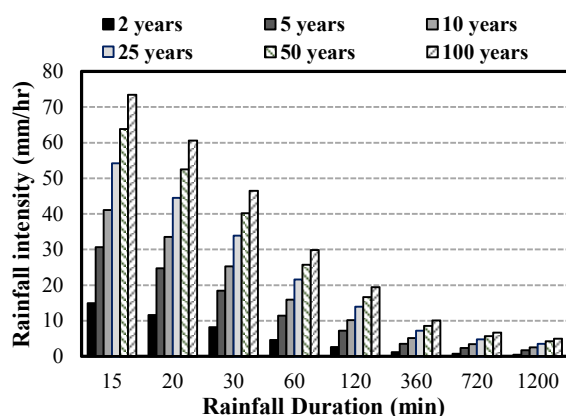


Fig. 2. Rainfall events intensity under defined rainfall duration based on different rainfall return year periods

شکل ۲- وقایع بارش حدی با دوره‌بازگشت‌های ۲ تا ۱۰۰ سال بر اساس بارش‌های مشاهده شده حوضه

بازگشت‌های مختلف می‌پردازد. در روش ارائه شده، عملکرد شبکه زهکشی شهری بر پایه شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی و هیدرولوژیکی و با به‌کارگیری منحنی عمق-خسارت سیل و تابع عملکرد زیرساخت زهکشی رواناب در دو حالت وجود و عدم وجود BMP اندازه‌گیری شد تا در نهایت بتوان بازگشت پذیری این سیستم را در مقابل سیل کمّی‌سازی نمود.

۲- مواد و روش‌ها

گام‌های کمّی‌سازی بازگشت‌پذیری شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی و روش به‌کار گرفته شده در پژوهش حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است. در ادامه پس از تشریح مراحل مختلف کار در زیربخش‌هایی جداگانه، به معرفی اجمالی نمونه مورد مطالعه پرداخته می‌شود.

۲-۱- داده‌های بارش حدی ورودی به مدل

همانگونه که ذکر شد، هدف از پژوهش حاضر برآورد عملکرد و بازگشت‌پذیری سیستم زهکشی تحت وقایع بارش حداکثر بود. به‌منظور در نظر گرفتن اثرات روند رو به رشد از توسعه شهری و تغییرات اقلیمی بر افزایش شدت وقایع بارش حدی، لازم است عملکرد سیستم تحت بارش‌های شدیدتر و با دوره بازگشت‌های بزرگ‌تر نیز مورد بررسی و آزمون قرار گیرد. به این منظور نمودارهای شدت-مدت-فراوانی با استفاده از وقایع بارش حداکثر روزانه حوضه (ثبت شده در سازمان هواشناسی کشور) طی دوره ۳۰ ساله ۱۹۷۱-۲۰۰۰ برای دوره بازگشت‌های مختلف (۲ تا ۱۰۰ سال) به دست آمد (شکل ۲).

۲-۲- شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه

نسخه ۵ نرم افزار SWMM به‌منظور شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرودینامیکی حوضه به‌کار گرفته شد. SWMM مدلی فیزیکی برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرودینامیکی با گام زمانی گسسته است که می‌تواند برای شبیه‌سازی تک رخداد و پیوسته کمّیت و کیفیت رواناب در مناطق شهری مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش، شبیه‌سازی کمّیت رواناب در شبکه‌ای مرکب از کانال‌های روباز و روبسته با شکل‌های مستطیلی و نعل‌اسبی دارای



افزایش عملکرد آن به لحاظ کاهش سرعت رواناب و نیز حذف آلاینده‌ها و بهبود کیفیت رواناب می‌شود.

۲-۳- توابع عمق-خسارت و عملکرد سیستم

به دلیل عدم وجود داده‌های ثبت شده خسارت ناشی از سیل در محدوده مورد مطالعه به ازای اعماق مختلف آبگرفتگی، از منحنی عمق-خسارت توسعه داده شده توسط تجربی و ملک محمدی در سال ۲۰۰۹ برای مناطق مسکونی ایران (ساختمان‌های یک طبقه با و بدون زیرزمین) استفاده شد و با برازش خطی به نقاط ثبت شده در این منحنی (با این فرض که تغییرات به صورت خطی باشد)، معادله درصد خسارت بر حسب عمق آبگرفتگی، به صورت زیر به دست آمد (Tajrishi and Malek Mohammadi, 2009)

$$D_x = 15.369x + 7.1764 \quad (1)$$

که در آن

x عمق آبگرفتگی (متر) و D_x درصد خسارت ناشی از سیل به ازای عمق x است. لازم به ذکر است که مقدار خسارت حاصله به ازای عمق صفر سیلاب در معادله فوق، مربوط به ساختمان‌های دارای زیرزمین و طبقات زیر همکف می‌باشد.

تابع عملکرد سیستم در مقابله با سیل و آبگرفتگی به صورت معادله ۲ در نظر گرفته شد (Mugume et al., 2014). توابع عملکرد زیرساخت زهکشی شهری عملکرد کلی یک سیستم زهکشی را به عمق سیل ارتباط می‌دهند. این نوع توابع در واقع مدل‌های ریاضی هستند که یک ویژگی مورد نظر از عملکرد سیستم را به عددی در محدوده صفر تا ۱ مرتبط می‌کند. شاخص یک نشان‌دهنده عملکرد کامل و شاخص صفر مربوط به کمترین سطح از عملکرد سیستم است (Cardoso et al., 2004, Gharaibeh et al., 2006).

$$u(x) = 1 - \frac{D_x}{D_{max}} \quad (2)$$

که D_{max} بیشترین خسارت سیل است که به ازای عمق بیشینه آبگرفتگی اتفاق می‌افتد که این عمق بر اساس پژوهش‌های پیشین ۳ متر در نظر گرفته شد. بر اساس این تابع، بهترین سطح عملکرد سیستم هنگامی اتفاق می‌افتد که عمق آبگرفتگی برابر با صفر باشد ($x=0$)، که در این حالت مقدار عملکرد زیرساخت زهکشی شهری $u(x) = 1$ در نظر گرفته می‌شود. کمترین سطح عملکرد سیستم نیز

عرض ۱/۴ تا ۳۰ متر و ارتفاع ۱/۴ تا ۶ متر مد نظر قرار گرفت. پیکربندی سیستم در مدل SWMM شامل ۷۳ گره به غیر از گره خروجی، و ۷۴ کانال زهکشی است. طول کانال‌های زهکش و ارتفاع گره‌های شبکه از روی نقشه DEM حوضه که از مهندسی مشاور یکم دریافت شده بود، به دست آمد (Yekom Consulting Engineers, 2009) با توجه به دسترسی به اطلاعات شماره منحنی زیرحوضه‌ها، فرایند نفوذ با استفاده از روش شماره منحنی^۱ صورت گرفت و روندیابی جریان با روش موج دینامیکی (حل معادلات کامل سنت‌ونانت) انجام شد، زیرا این نوع روندیابی می‌تواند انواع رژیم‌های مختلف جریان چون برگشت آب، سرریز از سیستم، جریان معکوس، و ایجاد حوضچه‌های سطحی را نیز در نظر بگیرد (Rossman, 2010).

از آنجا که بارش‌های شمال تهران معمولاً ۶ یا ۷ ساعته هستند (Nazif, 2010)، در این پژوهش از الگوی توزیع زمانی بارش ۶ ساعته به کار گرفته شده توسط شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس (Mahab-e-Ghods Consulting Engineers, 2011) به منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه استفاده شد. در این پژوهش فرض شده است که خصوصیات زمانی وقایع بارش حدی در شرایط اقلیمی آینده بدون تغییر باقی بماند (Mugume et al., 2013). گام زمانی بارش، ۳۰ دقیقه‌ای و گام زمانی رواناب خروجی، ۱ ساعته انتخاب شد. مدت زمان شبیه‌سازی نیز ۳ روز در نظر گرفته شد.

شبیه‌سازی تحت دو سناریوی (۱) شرایط موجود سیستم و (۲) اضافه نمودن یک BMP به سیستم صورت گرفت. جوی باغچه‌ای با شیب طولی نزدیک به ۱ متر و شیب جانبی ۳ متر، که دارای ضریب زبری ۰/۱ بوده و حدود ۵۰ درصد از سطح آن دارای پوشش گیاهی است، به عنوان BMP در زیرحوضه‌ها اعمال شد تا تأثیر آن بر بهبود وضعیت سیل گرهی مورد بررسی قرار گیرد. وجود پوشش گیاهی در جوی باغچه سبب بهبود نفوذ آب باران به داخل خاک شده و در افزایش بازگشت پذیری سیستم زهکشی مؤثر است. نوع گیاهان مورد استفاده در جوی باغچه عمدتاً متناسب با پوشش گیاهی منطقه مورد نظر انتخاب می‌شود.

بنابر نظر پژوهشگران دانشگاه سن دیه‌گو، استفاده از گیاهان بومی منطقه در این نوع BMP به جای انواع علف‌کاری، سبب

¹ Curve Number (CN)



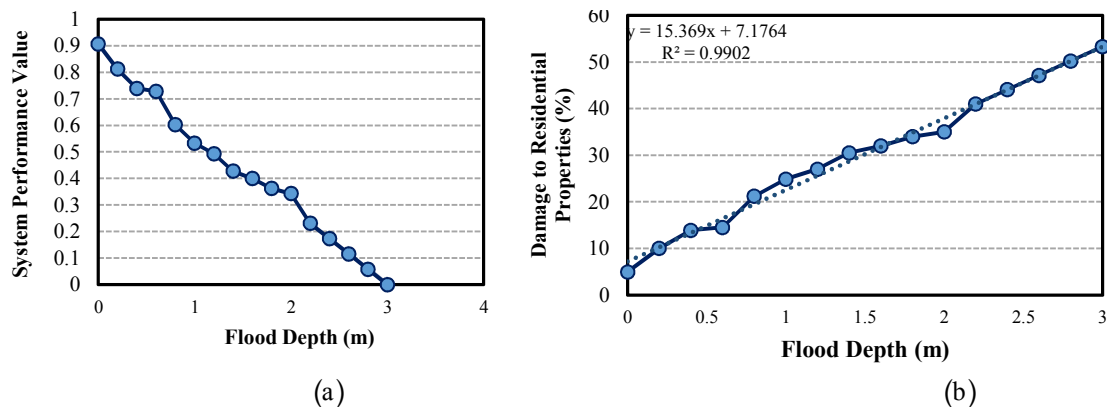


Fig. 3. The curve of system performance value and damage to residential properties against different urban flooding depths for residential areas of Tehran, Iran (a) System performance function values curve, and (b) Damage to residential properties curve

شکل ۳-ا) منحنی عمق-خسارت مناطق مسکونی ایران و خط برازش داده شده به آن (b) مقادیر تابع عملکرد سیستم به ازای اعماق مختلف سیل شهری

سیستم بیشتر است. به همین ترتیب ناحیه زیر منحنی عملکرد سیستم، نشان دهنده میزان بازگشت پذیری آن است. بنابراین پس از برآورد تابع عملکرد سیستم زهکشی در هر گام زمانی به ازای اعماق مختلف سیل (x_i)، بازگشت پذیری سیستم (Res) را می توان از معادله زیر کمی سازی نمود (Mugume et al., 2014)

$$Res = \frac{1}{t_n} \int_{t_0}^{t_n} u(t) dt \quad (3)$$

که t_0 زمان شروع شبیه سازی و t_n کل زمان سپری شده در انتهای شبیه سازی است. $u(t)$ مقدار تابع عملکرد زیرساخت زهکشی شهری در گام های زمانی با فواصل ۱ ساعته است.

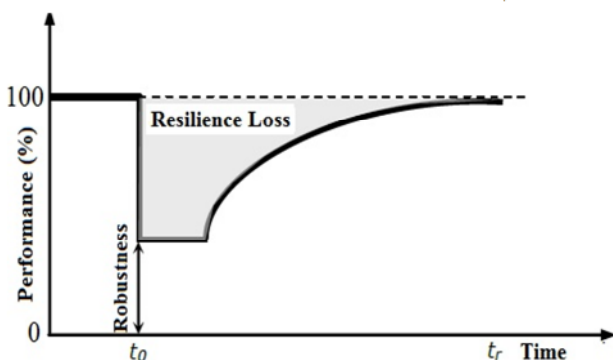


Fig. 4. Schematic diagram of resilience concept
شکل ۴- شماتیک از مفهوم بازگشت پذیری

۲-۵- معرفی محدوده مورد مطالعه

متدلوژی فوق الذکر بر روی شبکه زهکشی حوضه سیل برگردان غرب واقع در شهر تهران، با مساحت تحت پوشش ۱۴۲/۶۳

به ازای عمق مساوی یا بیشتر از ۳ متر رخ می دهد (Mugume et al., 2014) که مقدار عملکرد زیرساخت زهکشی برای آن صفر است. شکل ۳-ا) منحنی عمق-خسارت مورد استفاده برای مناطق مسکونی کشور ایران و شکل ۳-ب) تابع عملکرد سیستم زهکشی را بر اساس منحنی عمق خسارت مذکور و معادله ۲ نشان می دهد. با توجه به این شکل مشاهده می شود که عملکرد سیستم زهکشی با افزایش عمق سیل همبستگی منفی دارد. به طوری که سیلابی با عمق بیش از ۶۰ سانتی متر، عملکرد سیستم زهکشی را بیش از ۳۰ درصد کاهش می دهد.

۲-۴- کمی سازی بازگشت پذیری سیستم زهکشی شهری

مفهوم بازگشت پذیری را می توان با توجه به شکل ۴ این گونه توضیح داد که ایجاد اختلال در سیستم در اثر یک واقعه حداکثر در زمان t_0 ، سبب کاهشی در عملکرد سیستم به میزان (۱۰۰) منهای مقدار صلابت^۱ سیستم) می شود (Valizadeh et al., 2016). با شروع بازتوانی سیستم، عملکرد به تدریج بازیابی می شود تا در زمان t_r به سطح عملکرد نرمال خود برگردد. ناحیه فوقانی منحنی تشکیل شده در این فرایند در دوره زمانی مورد نظر، میزان عدم بازگشت پذیر بودن سیستم را نشان می دهد (Bocchini et al., 2013). هر چه مساحت این ناحیه کوچک تر باشد، بازگشت پذیری

¹ Robustness



۵۰، و ۱۰۰ ساله به ترتیب تعداد ۶، ۷، و ۱۱ گره دچار آبگرفتگی شد. در پژوهش حاضر به منظور تحلیل نتایج شبیه سازی، گره ۴۹ به عنوان نمونه انتخاب شد که موقعیت آن در شکل ۵ نمایش داده شده است. دلیل انتخاب این گره، حجم نسبتاً زیاد آبگرفتگی در محل آن، و نیز مشترک بودن این گره در میان گره های سیل گرفته برای تمام دوره بازگشت های مورد بررسی بود.

شکل ۶ مدت زمان شکست سیستم و حجم رواناب سرریز شده از شبکه را برای دو سناریوی وجود و عدم وجود BMP نشان می دهد. براساس این شکل می توان گفت که در مجموع اضافه کردن یک جوی باغچه به سیستم زهکشی حوضه مورد بررسی، متوسط مدت زمان سیل گرهی را به میزان ۱۵ درصد و حجم سیل را بین ۴ تا ۴۷ درصد کاهش می دهد.

شکل ۷ نمودار متوسط عمق سیل را نسبت به زمان برای هر دو سناریوی وجود و عدم وجود جوی باغچه در سیستم زهکشی نشان می دهد. بر اساس این شکل ملاحظه می شود که حداکثر عمق سیلاب برای تمام دوره بازگشت های مورد بررسی در حدود ۵ ساعت پس از آغاز بارندگی به وقوع می پیوندد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که اضافه نمودن یک جوی باغچه به هر زیرحوضه

کیلومتر مربع به کار گرفته شد. این حوضه خود دربرگیرنده سه زیرحوضه درکه، فرحزاد، و حصارک (وسک) بوده و در مختصات جغرافیایی بین ۳۰-۴۸-۳۵ تا ۴۹-۵۲-۳۵ عرض شمالی و ۱۳-۵۱-۱۹ تا ۲۹-۲۲-۵۱ طول شرقی واقع است. حوضه سیل برگردان غرب از دو بخش شهری و کوهستانی تشکیل شده که رواناب حاصل از بخش کوهستانی نیز در رواناب ورودی به شبکه زهکشی شهری مشارکت می نماید و لازم است در مدل سازی ها لحاظ شود، که با توجه به قابلیت نرم افزار SWMM مدل سازی انواع مختلف کانال های طبیعی و مصنوعی، هر دو بخش شهری و برون شهری در این نرم افزار شبیه سازی شد. شکل ۵ نمایی از بخش های شهری و کوهستانی حوضه و شبکه زهکشی آن را در محیط نرم افزار SWMM نشان می دهد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج شبیه سازی هیدرولوژیکی و هیدرودینامیکی

نتایج حاصل از شبیه سازی بارش-رواناب نشان داد که در شرایط موجود سیستم (سناریوی اول)، برای دوره بازگشت های بارش ۲، ۵، و ۱۰ ساله، تعداد ۵ گره از شبکه و برای دوره بازگشت های ۲۵،

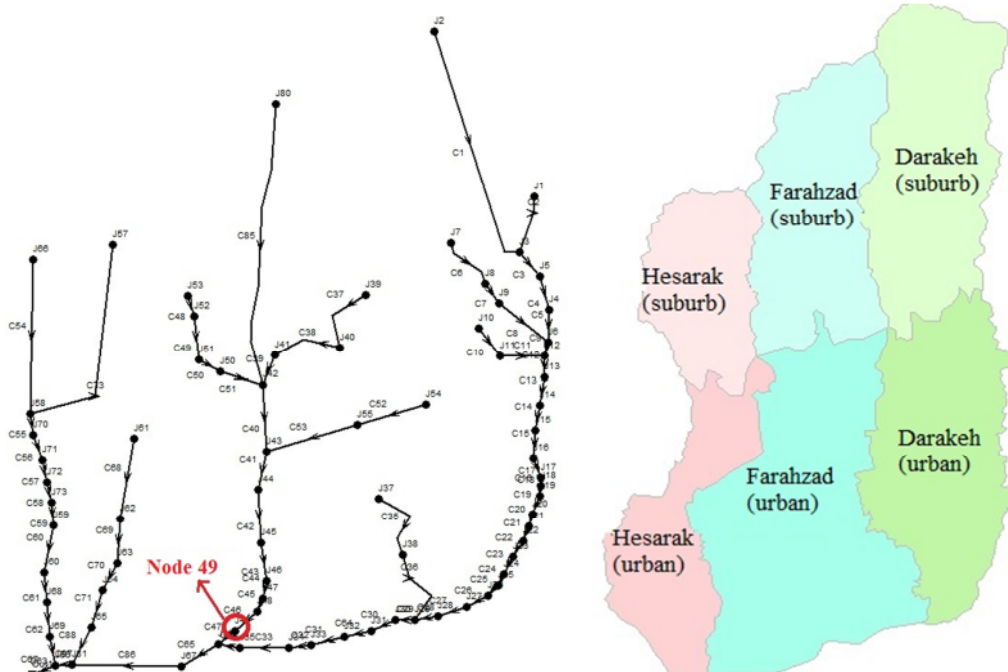


Fig. 5. Flood-Diversion catchment for Western watershed areas of Tehran (scale: 1/200000) and the location of nodes and links used in SWMM model (Source: Authors)

شکل ۵- حوضه سیل برگردان غرب (مقیاس ۱/۲۰۰۰۰۰) و گره ها و مسیل ها/کانال های زهکشی مدل شده در SWMM (مأخذ: پژوهشگران)



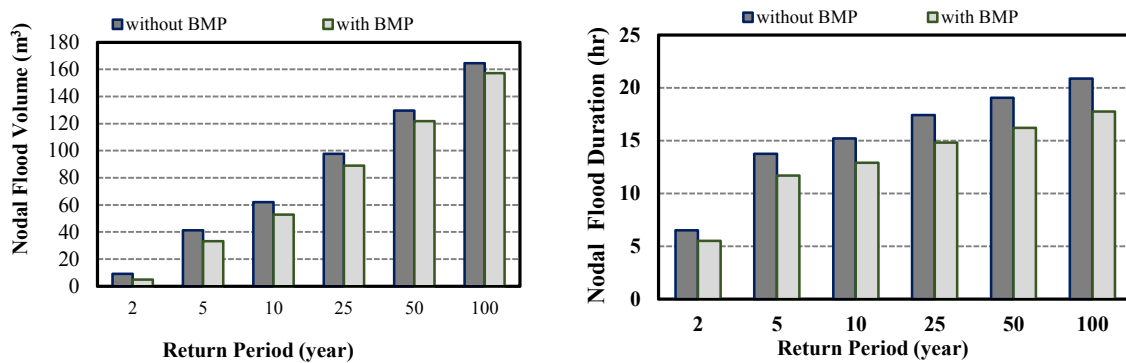


Fig. 6. Flood duration and flood total volume for extreme events under different return periods (2-100 years) for conditions with and without BMPs

شکل ۶- مدت آب‌گرفتگی و حجم کل سیل برای وقایع بارش حداکثر در دوره‌بازگشت‌های مختلف در دو حالت وجود و عدم وجود BMP

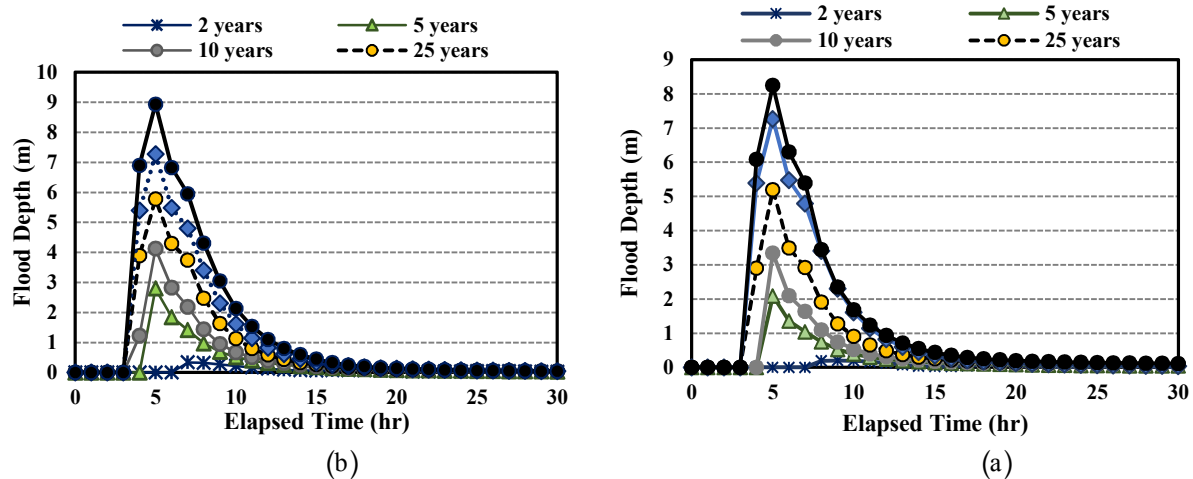


Fig. 7. Depth of nodal flooding for urban drainage system at node No.49: (a) without BMPs, and b) with BMPs

شکل ۷- عمق سیل گرهی برای سیستم زهکشی شهری الف) بدون BMP، و ب) با وجود BMP

بر اساس عملکرد محاسبه شده برای شبکه زهکشی، مقدار بازگشت‌پذیری سیستم نیز به‌دست آمد که در جدول ۱ ارائه شده است.

مطابق این جدول، محدوده بازگشت‌پذیری سیستم زهکشی شهری در حالت عدم وجود BMP از ۹۶ درصد (دوره بازگشت ۲ سال) تا ۷۲/۶۱ درصد (دوره بازگشت ۱۰۰ سال) تغییر می‌کند. اضافه نمودن جوی‌باغچه به سیستم، بازگشت‌پذیری آن را در محدوده ۹۶/۳۷ درصد (دوره بازگشت ۲ سال) تا ۷۸/۵۰ درصد (دوره بازگشت ۱۰۰ سال) قرار می‌دهد. بنابراین بازگشت‌پذیری سیستم به میزان ۰/۳۷ تا ۵/۸۹ درصد افزایش می‌یابد و به این ترتیب با وجود BMP در زیرحوضه‌ها، سیستم به لحاظ عملکرد هیدرولیکی در مدت زمان کمتری به وضعیت اولیه‌اش باز می‌گردد.

سبب کاهش قابل ملاحظه عمق سیلاب شده و زمان رسیدن به اوج سیل را نیز به میزان اندکی به تأخیر می‌اندازد.

۳-۲- برآورد عملکرد و بازگشت‌پذیری سیستم زهکشی

مقدار عملکرد سیستم $U(t)$ براساس اینکه در هر گام زمانی چه عمقی از آب‌گرفتگی ایجاد می‌شود، تحت دو سناریوی مورد بررسی بر اساس معادله ۲ به‌دست آمد که نتایج در شکل ۸ قابل مشاهده است.

ملاحظه می‌شود که وجود یک BMP در کنار شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی در حوضه، برای تمام دوره‌بازگشت‌های مورد بررسی سبب بهبود عملکرد سیستم شده و تعداد نقاط شکست سیستم را کاهش داده است.



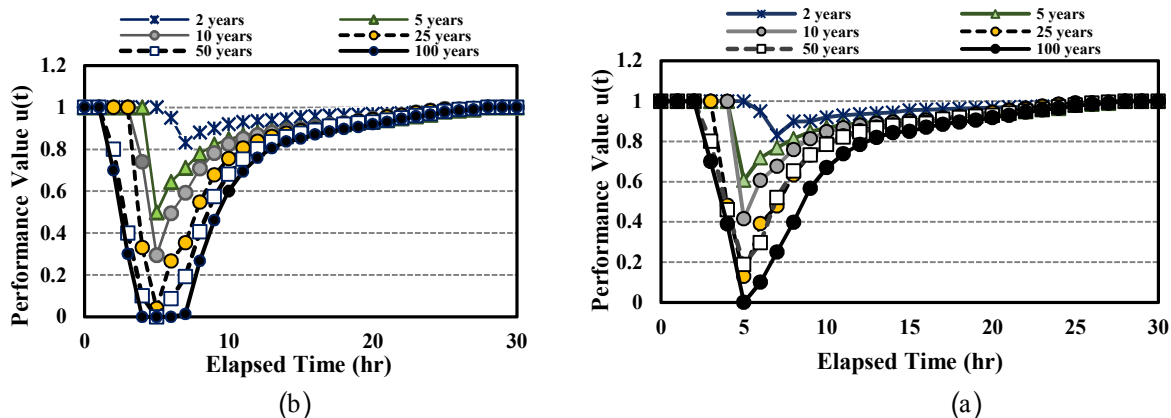


Fig. 8. System performance curves for urban drainage system at node No.49: (a) without BMPs, and b) with BMPs
 شکل ۸- منحنی های عملکرد سیستم زهکشی شهری (a) بدون BMP، و (b) با وجود BMP

جدول ۱- بازگشت پذیری سیستم در گره مورد نظر برای دوره بازگشت های مختلف

Table 1. System resilience at given node for different return periods

| | Return Period (yr) | | | | | |
|---|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 2 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| System resilience percent (without BMP) | 96 | 90.67 | 88 | 82.89 | 76.53 | 72.61 |
| System resilience percent (with BMP) | 96.37 | 92 | 90.46 | 85.21 | 84.16 | 78.50 |
| System resilience increasing (%) | 0.37 | 1.33 | 2.46 | 2.32 | 7.63 | 5.89 |

۴- نتیجه گیری

کاهش حجم و دبی اوج رواناب لازم است در رابطه با تعداد و موقعیت قرارگیری BMPها در حوضه، بهینه سازی صورت گیرد. همچنین اجرای BMPهای مناسب در زیرحوضه بالا دست (مناطق برون شهری حوضه) نیز می تواند در بهبود عملکرد و ارتقاء بازگشت پذیری سیستم مؤثر باشد.

در مجموع بازگشت پذیری سیستم زهکشی رواناب در گره مورد بررسی در حوضه سیل برگردان غرب مناسب برآورد شد. البته در این پژوهش بازگشت پذیری و عملکرد سیستم تنها در یک گره سیلابی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور برآورد بازگشت پذیری کل سیستم لازم است تمام گره های سیل گرفته در شبکه مورد تحلیل و بررسی قرار گیرند که لازم است این امر در مطالعات آتی بررسی شود. همچنین با توجه به اینکه بازگشت پذیری خود دربرگیرنده عوامل متعددی چون صلابت و نرخ بازیابی سیستم است، پیشنهاد می شود در پژوهش های آینده، توسعه شاخص های عملکرد مجزایی برای هر یک از این عوامل مورد توجه قرار گیرد و تأثیر حالات مختلف شکست سیستم بر بازگشت پذیری سیستم زهکشی شهری ارزیابی شود.

این پژوهش با هدف کمی سازی بازگشت پذیری شبکه زهکشی شهری و بررسی تأثیر وجود BMPها بر بهبود بازگشت پذیری سیستم انجام شد و به این منظور از رابطه عمق- خسارت سیل در نواحی مسکونی و تابع عملکرد زیرساخت زهکشی شهری استفاده شد و نهایتاً بازگشت پذیری سیستم زهکشی با اعمال مقادیر عملکرد محاسبه شده بر اساس نتایج شبیه سازی در مدل SWMM به دست آمد. نتایج نشان داد که وجود BMPها در کنار شبکه سنتی جمع آوری آب های سطحی بر افزایش بازگشت پذیری سیستم مؤثر است که این تأثیر در دوره بازگشت های طولانی بارش به خوبی قابل تشخیص است، این معنا که با افزایش شدت بارش های حدی، که می تواند ناشی از تغییرات اقلیمی و مانند آن باشد، وجود راهکارهای توسعه کم اثر می تواند در کاهش حجم سیل و آبرفتگی در مناطق شهری مؤثر واقع شود. با این حال معرفی BMP به مدل به طور کامل سیل گرهی را حذف نمی کند. این امر می تواند به تعداد و نوع BMPهای مورد استفاده، جانمایی آنها در حوضه، پیکربندی شبکه زهکشی و مصالح مورد استفاده در ساخت BMPها و سایر ویژگی های آنها نسبت داده شود. به منظور حصول بهترین نتیجه در

References

- Åstebøl, S. O., Hvitved-Jacobsen, T. & Simonsen, Ø. 2004. Sustainable stormwater management at Fornebu— from an airport to an industrial & residential area of the city of Oslo, Norway. *Journal of Science of the Total Environment*, 334–335(0), 239-249.
- Blockley, D., Agarwal, J. & Godfrey, P. 2012. Infrastructure resilience for high-impact low-chance risks. in: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Civil Engineering Special Issue* 165, Issue CE6. ICE. Publishing, 3-19.
- Butler, D. & Davies, J.W. 2011. *Urban drainage*, 3rd Ed., Spon Press, Taylor & Francis Group, London & New York.
- Bocchini, P., Frangopol, D. M., Ummenhofer, T. & Zinke, T. 2013. Resilience and sustainability of civil infrastructure: Toward a unified approach. *Journal of Infrastructure Systems*, 20(2), Article ID: 04014004.
- Chang, C.L. & Liou, T.Y. 2010. The placement strategies of structural best management practices for different moving rainstorms. *Journal of Environmental Monitoring and Assessment*, 166(1-4), 495-502.
- Cardoso, M., Coelho, S., Matos, R. & Alegre, H. 2004. Performance assessment of water supply & wastewater systems. *Urban Water Journal*, 1, 55-67.
- De Bruijn, K. M. 2004. Resilience indicators for flood risk management systems of lowland rivers. *International Journal of River Basin Management*, 2(3), 199-210.
- Djordjević, S., Butler, D., Gourbesville, P., Mark, O. & Pasche, E. 2011. New policies to deal with climate change & other drivers impacting on resilience to flooding in urban areas: The CORFU approach. *Journal of Environmental Science and Policy*, 14, 864-873.
- Gersonius, B., Ashley, R., Pathirana, A. & Zevenbergen, C. 2013. Climate change uncertainty: Building flexibility into water & flood risk infrastructure. *Journal of Climate Change*, 116, 411-423.
- Gharaibeh, N.G., Asce, M., Chiu, Y. & Gurian, P.L. 2006. Decision methodology for allocating funds across transportation infrastructure assets. *Journal of Infrastructure Systems*, 12, 1-9.
- Jia, H., Lu, Y., Yu, Sh. & Chen, Y. 2012. Planning of LID–BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village. *Journal of Separation and Purification Technology*, 84 (9), 112-119.
- Jung, D., Kang, D., Kim, J.H. & Lansey, K. 2013. Robustness-based design of water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(11), 10.1016/(ASCE) WR. 1943-5452.000421.
- Kim, B., Kim, Y., Sanders, B.F., Famiglietti, J.S. & Han, K. 2013. Calibration of stormwater management model using flood extent data. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 167, 17-29.
- Lansey, K. 2012. Sustainable, robust, resilient, water distribution systems. *14th Water Distribution Systems Analysis Conference*, Engineers Australia, pp. 1-18.
- Lee, E.H. & Kim, J.H. 2017. Design & operation of decentralized reservoirs in urban drainage systems. *Journal of Water*, 9 (4), 246. doi: 10.3390/w9040246.
- Mahab-e-Ghods & Poyry Group Consulting Engineers. 2011. *Comprehensive Plan of Tehran's surface water management, Volume III: Basis & regulations of surface water network design & type maps*, Technical & Development department of Tehran Municipality & Tehran Technical-Engineering Consulting Agency (In Persian).



- Mugume, S., Gomez, D. & Butler, D. 2013. Statistical methods for climate change impact assessment on urban rainfall extremes for cities in tropical developing countries – A review. In: Butler, D., Chen, A.S., Djordjevic, S., Hammond, M.J. (Eds.), *International Conference on Flood Resilience: Experiences in Asia & Europe*, University of Exeter, Exeter, United Kingdom.
- Mugume, S., Gomez, D. & Butler, D. 2014. Quantifying the resilience of urban drainage systems using a hydraulic performance assessment approach. *13th International Conference on Urban Drainage*, Sarawak, Malaysia.
- Nazif, S. 2010. Developing an algorithm for the assessment of climate change impact on urban water cycle. PhD Thesis, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian).
- Pyke, C., Warren, M. P., Johnson, T., LaGro Jr, J., Scharfenberg, J., Groth, P., et al. 2011. Assessment of low impact development for managing stormwater with changing precipitation due to climate change. *Journal of Landscape Urban Planning*, 103(2), 166-173.
- Rossman, L.A. 2010. *Storm water management model user's manual, version 5.0.*, Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research & Development, USEPA.
- Stovin, V. 2010. The potential of green roofs to manage Urban Stormwater. *Water and Environment Journal*, 24(3), 192-199.
- Tahmasebi Birgani, Y. 2014. Sustainable management of urban drainage based on resilient risk management. PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering, Khajeh Nasireddin-e-Tousi University of Technology, Tehran, Iran (In Persian).
- Tajrishi, M. & Malekmohammadi, B. 2009. Suitable method to accomplish flood insurance program for crisis management in flood condition of urban areas. *Proceedings of the 2nd International Conference on Integrated National Disaster Management*, Tehran, Iran, 1-18.
- Todini, E. 2000. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2), 115-122.
- Valizadeh, N., Zorn, C.R. & Shamseldin, A.Y. 2016. Evaluating the technical resilience of stormwater systems to flooding. *Stormwater Conferenc*, Australia.
- Villarreal, E. L., Semadeni-Davies, A. & Bengtsson, L. 2004. Inner city stormwater control using a combination of best management practices. *Journal of Ecological Engineering*, 22(4-5), 279-298.
- Yekom Consulting Engineers. 2009. *A project on (quantitative & qualitative) rehabilitation of surface waters in southern Tehran*, Volume III Tehran, Iran. (In Persian).
- Zhang, C., Wang, Y., Li, Y. & Ding, W. 2017. Vulnerability analysis of urban drainage systems: Tree vs. loop Networks. *Journal of Sustainability*, doi: 10.3390/su9030397.

