تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال بیست و دوم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵
Volume 22, No.1, Spring 2026 (IR-WRR)
۷۱-۸۹

تدوین سناریوهای تاب‌آور مدیریت رواناب سطحی شهری تحت عدم‌قطعیت گرفتگی در شبکه، مطالعه موردی: شبکه شرق تهران

سارا حق‌بین [۱]، نجمه مهجوری مجد [۲*]

چکیده

این مقاله چارچوبی برای طراحی سامانه تاب‌آور[۱] و استوار[۲] جمع‌آوری رواناب سطحی شهری با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت گرفتگی در گلوگاه‌های شبکه ارائه می‌دهد. بدین منظور، یک مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی چندهدفه با متغیرهای تصمیم نوع و مساحت تحت اجرای راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب[۳] توسعه داده می‌شود. اهداف این مسأله، بیشینه‌سازی تاب‌آوری اکولوژیکی، کمینه‌سازی خسارت سیلاب و کمینه‌سازی هزینه سناریوهای مدیریتی هستند. مدل‌سازی عدم‌قطعیت گرفتگی هیدرولیکی با شناسایی عوامل مؤثر بر ایجاد گرفتگی و استفاده از مفهوم منطق فازی[۴] صورت می‌گیرد. به منظور انتخاب گزینه استوار در برابر عدم‌قطعیت مربوط به گرفتگی کانال‌ها، از رویکرد تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی[۵] استفاده می‌شود. کارایی این چارچوب با به کارگیری آن در زیرحوضه شرقی سامانه جمع‌آوری رواناب سطحی شهر تهران ارزیابی می‌شود. طبق نتایج تحلیل حساسیت، دو متغیر دبی اوج سیلاب و زمان رخداد آن حساسیت زیادی به عدم‌قطعیت گرفتگی کانال‌ها دارند. از بین سناریوی نامغلوب[۶]، گزینه‌ای که تحت تأثیر بازه گسترده‌تری از عدم‌قطعیت‌ها، آستانه مطلوبیت عملکرد را تأمین نماید، به عنوان گزینه استوار انتخاب می‌شود. بر پایه نتایج، سناریوی مدیریتی استوار با هزینه ۰/۸۴ میلیون دلار می‌تواند بهبود ۳۷ درصدی تاب‌آوری را موجب شود و در صورت رخداد گرفتگی، خسارت را تا ۲۰ درصد کاهش دهد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که گرفتگی، به‌عنوان یکی از منابع مهم عدم‌قطعیت در شبکه، قادر است عملکرد سامانه را به‌طور معناداری مختل کند. بنابراین، لازم است تصمیم گیرندگان در مدیریت رواناب سطحی شهری آن را درنظر گیرند.

کلمات کلیدی: راهکارهای مبتنی بر طبیعت، بهینه‌سازی چندهدفه، عدم‌قطعیت گرفتگی، منطق فازی، مدل شبیه‌سازی رواناب.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۴/۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۲/۲

۱- دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.
*- نویسنده مسئول

Developing Resilient Urban Runoff Management Scenarios under Channel Blockage Uncertainties, Case Study of Eastern Tehran Network

S. Haghbin[1], N. Mahjoori Majd[2]*

Abstract

This paper proposes a framework for designing resilient and robust urban drainage systems while addressing uncertainty in network blockage. The study develops a multi-objective simulation-optimization model with decision variables for the type and implementation area of nature-based flood control measures. The framework pursues three key objectives: maximizing flood resilience, minimizing flood damage, and minimizing flood management costs. Hydraulic blockage uncertainty is modeled through identification of influential blockage factors and application of fuzzy logic, with an information gap decision theory (IGDT) approach employed to select robust solutions against channel blockage uncertainties. The framework's effectiveness is evaluated through its application to the eastern sub-catchment of Tehran's stormwater drainage system. Sensitivity analysis reveals that both peak flood discharge and its timing exhibit significant sensitivity to channel blockage uncertainty. The optimization-simulation model generates 50 non-dominated scenarios, from which the most robust solution—maintaining satisfactory performance across the widest range of uncertainty—is selected. Results demonstrate that the robust management scenario achieves a 37% improvement in resilience at a cost of only $0.84 million, while simultaneously reducing potential flood damage by 20% under blockage conditions. The findings indicate that blockage, as one of the key network uncertainties, can significantly disrupt system performance. Therefore, its influence should be explicitly considered by decision-makers when planning and prioritizing network improvement strategies.

Keywords: Nature Based Flood Control Practice (NBP), Multi Objective Optimization, Urban Flood Control, Fuzzy Inference System (FIS), Resilience, SWMM.

Received: June 29, 2025
Accepted: February 21, 2026

1- Ph.D., Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: Sara.haghbin@email.kntu.ac.ir
2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: mahjouri@kntu.ac.ir
*- Corresponding Author

Doi: 10.22034/iwrr.2026.531718.2906

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- مقدمه

سیل‌های شهری پدیده‌های پیچیده‌ای هستند که می‌توانند پیامدهای مستقیم و غیرمستقیم اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی به همراه داشته باشند. پژوهشگران در سال‌های اخیر تلاش نموده‌اند (Zhang et al., 2021; Sweetapple et al., 2022; Tansar et al., 2023). با وجود مطالعات و پیشرفت‌های قابل توجه در زمینه طراحی یک سامانه جمع‌آوری رواناب سطحی شهری، وجود عدم‌قطعیت‌ها موجب شده سیلاب شهری همچنان به عنوان یکی از تهدیدهای اصلی در محیط‌های شهری باقی بماند. در پژوهش‌های اخیر در زمینه مدیریت رواناب و سیلاب شهری، بررسی عدم‌قطعیت‌های پارامترهای کالیبراسیون مدل (Hashemi and Mahjouri, 2022; Wang et al., 2024; Yang et al., 2025)، عدم‌قطعیت‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی (Hassani et al., 2023; Yoo ans Ahn, 2025)، عدم‌قطعیت‌های مربوط به مسائل کیفیت آب (Assaf et al., 2024; Rong et al., 2024) مهم‌ترین موضوع‌های بررسی شده هستند. در این میان، یکی از منابع عدم‌قطعیت که به ندرت در تحلیل‌ها و محاسبات سیلاب مورد توجه بوده، گرفتگی در گلوگاه‌های شبکه است. دپارتمان حفاظت محیط‌زیست نیویورک[۷] گرفتگی در شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی شهری (UDS[8]) را به عنوان یکی از سه عامل اصلی سیلاب، در کنار اثرات تغییر اقلیم و اضافه بار فاضلاب معرفی کرده است (Agonafir & Zheng, 2026). گرفتگی در شبکه‌های UDS عمدتاً به‌دلیل انتقال و رسوب‌گذاری واریزه‌های شهری در مسیر جریان و به‌ویژه در گلوگاه‌های کانال‌ها و لوله‌ها رخ می‌دهد. این واریزه‌ها شامل شاخ و برگ درختان، مصالح ساختمانی و زباله‌های شهری هستند، که با مسدود کردن بخشی از سطح مقطع جریان، ظرفیت انتقال هیدرولیکی شبکه را کاهش داده، به افزایش خطر سیلاب منجر می‌شوند. مطالعات اولیه درباره گرفتگی در UDS عمدتاً دیدگاهی ایستا را اتخاذ کرده‌اند و گرفتگی را به صورت کامل یا نسبتی ثابت از سطح مقطع لوله یا کانال که توسط واریزه یا رسوب مسدود شده، درنظر گرفته‌اند (Despotovic et al., 2005; Mugume et al., 2015; Mohammadiun et al.,2019). هدف این مطالعات، شناسایی حساس‌ترین نقاط شبکه به گرفتگی و تحلیل عملکرد شبکه تحت آن شرایط بوده است. در ادامه، مطالعات بعدی عوامل اصلی تأثیرگذار بر درجه گرفتگی را شامل نوع و ابعاد واریزه‌ها (شناور، غیرشناور، یا واریزه‌های شهری و اندازه آن‌ها)، حجم واریزه‌ها در منبع، قابلیت حرکت واریزه‌ها، قابلیت انتقال واریزه‌ها، اثر متقابل بین واریزه‌ها و سازه (ساختار پل و کالورت) و احتمال تصادفی معرفی کردند که به طور قابل توجهی بر قابلیت پیش‌بینی رویدادهای گرفتگی تأثیر می‌گذارند (Ball et al., 2016; Ollet et al., 2017; Bekkaye & Jafari, 2023).

با وجود مطالعات متعدد در زمینه پدیده گرفتگی در شبکه‌های جمع‌آوری رواناب شهری، چالش‌های مهمی در زمینه عدم‌قطعیت‌های مؤثر بر این فرآیند همچنان پابرجاست. از جمله این چالش‌ها می‌توان به مدل‌سازی رفتار غیرخطی انباشت رسوب، کمبود داده‌های میدانی، تغییرپذیری ذاتی شرایط بهره‌برداری، محدودیت‌های محاسباتی و اتکای برخی مطالعات به روابط ساده‌شده و ثابت برای برآورد میزان گرفتگی اشاره کرد (Iqbal, 2024). با وجود این پیچیدگی‌ها، تاکنون پژوهش جامعی با هدف افزایش استواری شبکه در برابر عدم‌قطعیت‌های ناشی از گرفتگی انجام نشده است. این در حالی است که تجربه روبه‌رویی با دیگر انواع عدم‌قطعیت‌ها در سامانه‌های شهری و زیربنایی نشان می‌دهد به‌کارگیری رویکردهای بهینه‌سازی، همراه با ارزیابی و ادغام عدم‌قطعیت‌ها در فرآیند طراحی، می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای قابلیت اطمینان و استواری سامانه ایفا کند (Mugume and Butler, 2017; Eckart et al., 2018; Shafeeque et al., 2023; Hashemi and Mahjouri, 2023).

استواری یک سامانه را می‌توان به عنوان میزان توانایی آن در ارائه عملکرد مناسب در شرایط عدم‌قطعیت تعریف نمود (Mens et al., 2011). در مطالعات گذشته عدم‌قطعیت در سامانه جمع آوری سطحی، استواری یک سامانه جمع‌آوری رواناب سطحی عمدتا با استفاده از رویکردهای احتمالاتی مانند Uncertainty Estimation (Beven and Binley, 1992)، Markov Chain Monte Carlo (MCMC) (Bates and Campbell, 2001; Smith and Marshall, 2008) و Bayesian Model Averaging (BMA) (Madigan et al., 1996; Raftery et al., 1997; Ng et al., 2023) و غیراحتمالاتی (سناریوسازی) ارزیابی شده است (Kotireddy et al., 2018). یکی از روش‌های معتبر در این حوزه، تئوری تصمیم‌گیری بر مبنای شکاف اطلاعاتی (IGDT[9]) است که به‌عنوان رویکردی تحلیلی و غیراحتمالاتی برای ارزیابی استواری سناریوها در مواجهه با خلأهای اطلاعاتی، به‌ویژه هنگام کمبود شدید داده‌ها، توسعه یافته است (Ben-Haim, 2006; Ben-Haim, 2012). این تئوری با مقایسه سناریوهای مدیریتی، توانایی آن‌ها را در برآورده ساختن معیارهای عملکرد سامانه تحت طیف گسترده‌ای از عدم‌قطعیت‌های بررسی کرده و در سال‌های اخیر در بسیاری از حوزه‌های تحقیقاتی مورد توجه قرار گرفته است (Soltani et al., 2018; Ranjbar & Mahjouri, 2020; Pankaj et al., 2022). در چارچوب IGDT، تصمیم‌گیرنده تحت اثر عدم قطعیت به دنبال بیشینه کردن استواری[۱۰] یک تصمیم در

برابر شکست و همچنین کمینه کردن فرصت[11] یک تصمیم در برابر موفقیت غیرمنتظره[12] است (Ben-Haim, 2006, Mavrova-Guirguinova et al., 2023). مطالعات Ghodsi et al. (2016) و Tebyanian et al. (2017) نشان می‌دهند که به‌کارگیری روش IGDT می‌تواند در شرایطی که با کمبود داده و عدم‌قطعیت‌های گسترده روبه‌رو هستیم، نتایجی قابل‌اعتمادتر و واقع‌بینانه‌تر نسبت به رویکردهای مرسوم احتمالاتی و قطعی برای برنامه‌ریزی سیلاب شهری فراهم سازد. همچنین، بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که استفاده از راهکارهای طبیعی با ماهیتی غیرمتمرکز و کوچک‌مقیاس، در مقایسه با اقدامات سازه‌ای پرهزینه، در بسیاری از نقاط جهان از کارایی بیشتر و هزینه بسیار کمتر در روبه‌رویی با عدم‌قطعیت‌های ناشی از تغییر اقلیم و توسعه سریع شهری برخوردار است (Wang et al., 2018; Xu et al., 2020; Liu et al., 2020; Zhang et al., 2021). این دسته از راهکارها می‌توانند با رویکردی پایدار، به تحقق اهداف کلیدی مدیریت شهری از جمله کنترل سیلاب در منشاء، کاهش آلودگی رواناب، و ارتقای عملکرد اکولوژیک سامانه‌های زهکشی شهری کمک نمایند.

در پاسخ به چالش‌های ذکر شده، این تحقیق به دنبال پاسخ به سه هدف: ۱) لحاظ نمودن گرفتگی به عنوان یکی از منابع عدم‌قطعیت در گلوگاه‌های شبکه برای نخستین بار، ۲) کمی سازی گرفتگی بر پایه عوامل ایجاد کننده آن و با استفاده از نظرات خبرگان و اصول تئوری فازی و در نهایت ۳) ارزیابی استواری شبکه در برابر این عدم‌قطعیت بر مبنای روش IGDT بوده است. در این راستا، از راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب به‌عنوان ابزاری برای بازطراحی و بهبود عملکرد شبکه بهره‌گیری می‌شود. کارایی این چارچوب در مطالعه موردی سامانه زهکشی شرق تهران ارزیابی می‌شود. ساختار این مقاله به این صورت است: در بخش بعد، جزئیات متدولوژی پیشنهادی ارائه می‌شود. در ادامه، به معرفی منطقه مطالعاتی پرداخته می‌شود. سپس، نتایج به دست آمده از پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی در منطقه مطالعاتی، ارائه و تحلیل می‌شود. در پایان، مهم‌ترین دستاوردها و پیشنهادها برای ادامه پژوهش ارائه می‌شوند.

۲- رویکرد پیشنهادی

گام‌های اصلی رویکرد پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. این گام‌ها شامل جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها، توسعه یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی رواناب‌های سطحی شهری، طراحی یک ساختار فازی برای کمی‌سازی عدم‌قطعیت گرفتگی در گلوگاه‌ها، مدل‌سازی گرفتگی در گلوگاه‌ها با استفاده از سیستم استنتاج فازی[13] (FIS) و برش آلفا ($\alpha - cut$)، و ارزیابی استواری سناریوهای مدیریت رواناب‌های سطحی شهری با استفاده از نظریه تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی (IGDT) است. در ادامه، جزئیات هر گام متدولوژی پیشنهادی تشریح می‌شود.

۲-۱- جمع‌آوری داده‌ها

در نخستین گام، داده‌ها و اطلاعات لازم، هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، فیزیوگرافی، ویژگی‌های زیرحوضه‌ها و راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب جمع‌آوری می‌شوند. اطلاعات هیدرولوژیکی شامل سری تاریخی بارش‌های ساعتی ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی حوضه مطالعاتی است. اطلاعات هیدرولیکی شامل وضعیت کنونی شبکه جمع‌آوری رواناب‌های سطحی شهری، جانمایی، ابعاد، شیب، ضریب زبری و اندازه کانال‌ها و اجزاء مختلف شبکه است. این اطلاعات به منظور شبیه‌سازی مدل بارش- رواناب در حوضه مطالعاتی، شبیه‌سازی گرفتگی هیدرولیکی و جانمایی راهکارهای کنترل سیلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. ویژگی‌های زیرحوضه‌ها شامل نقشه‌های کاربری اراضی زیرحوضه‌ها، نقشه‌های توپوگرافی، شیب، خاک‌شناسی، ضریب نفوذپذیری، درصد سطوح نفوذناپذیر و زمان تمرکز زیرحوضه‌ها هستند.

۲-۲- تلفیق و اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

در این مقاله، چارچوبی به منظور ارائه یک الگوی بهینه به منظور مدیریت سیلاب شهری تدوین می‌شود. هسته اصلی این چارچوب شامل تلفیق مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی- هیدرولوژیکی رواناب سطحی شهری EPA SWMM[14] و مدل بهینه‌سازی الگوریتم فراتکاملی ژنتیک چندهدفه NSGAII[15] (Deb et al., 2002) است. مدل SWMM یک مدل رایگان، کاربردوست[16] و توانا برای مدل‌سازی و ارزیابی مؤثر بودن راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب است (Rossman and Huber, 2016, Wang et al., 2024). مدل EPA SWMM یک مدل گسسته شده در زمان است که از اصل بقای جرم و مومنتوم برای مدل‌سازی رفتار سیستم استفاده می‌کند. به منظور تلفیق متغیرهای مؤثر این مدل در فرآیند بهینه‌سازی عملکرد شبکه، گام‌های زیر برداشته شده است.

نخست، زیرحوضه‌های مناسب برای اجرای راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب بر پایه ویژگی‌های فیزیولوژیکی زیرحوضه‌ها (مانند شیب، کاربری اراضی، درصد سطوح نفوذناپذیر و جنس خاک)، ارتباط هیدرولیکی بین زیرحوضه‌ها و سهم هر یک در تولید سیلاب، با هدف افزایش تاب‌آوری در برابر سیلاب انتخاب می‌شوند. بیشینه مساحت قابل اجرای هر زیرحوضه با استفاده از نرم‌افزار ArcMap

تعیین می‌شود. سپس، نوع راهکارهای نامزد برای این زیرحوضه‌ها بر پایه پیشنهادهای مطالعات پیشین (Ghodsi et al., 2020; Zarei, 2021) تعیین می‌شود. در رویکرد پیشنهادی، ابتدا جمعیتی اولیه از ترکیب‌های مختلف راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب و مساحت‌های تحت پوشش هر راهکار در هر زیرحوضه به‌عنوان متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌سازی (در قالب مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها) تعریف می‌شود. سپس، هر کروموزوم توسط مدل شبیه‌سازی ارزیابی شده، مقادیر توابع هدف برای آن محاسبه می‌شود. بر پایه مقدار تابع هدف، کروموزوم‌های برتر از روش فرایندهای انتخاب (Selection)، تزویج (Crossover) و جهش (Mutation) برای تشکیل نسل بعدی برگزیده می‌شوند. این چرخه ارزیابی و تکامل تا زمانی تکرار می‌شود که معیارهای توقف الگوریتم برآورده شود و مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه به دست آید.

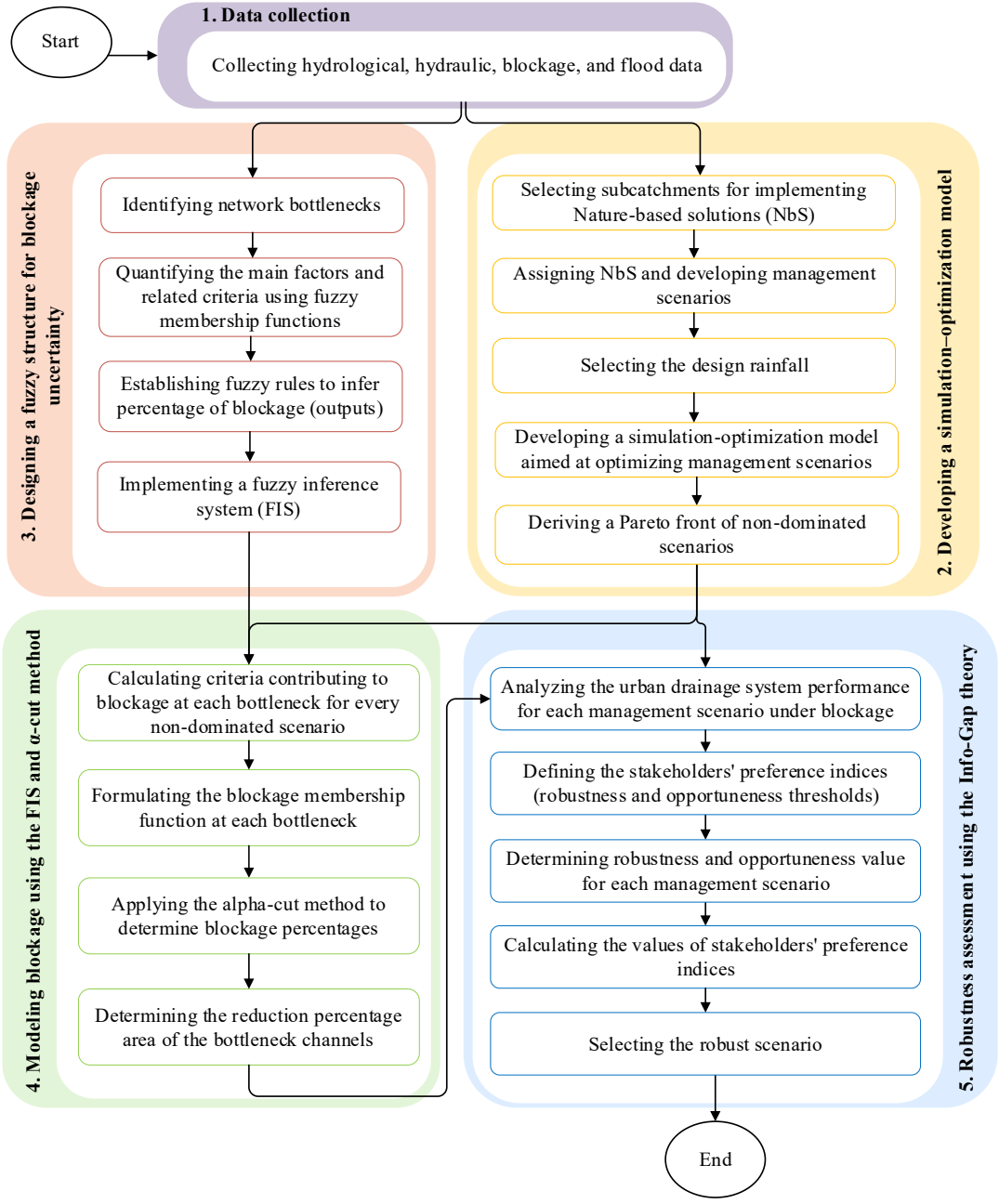


Fig. 1- Flowchart of the proposed methodology

شکل ۱- روند مراحل متدولوژی چارچوب پیشنهادی

مسأله بهینه‌سازی عملکرد شبکه، دارای سه تابع هدف بیشینه‌سازی تاب‌آوری، کمینه‌سازی هزینه اجرای راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب (شامل آماده‌سازی زمین، خاک‌برداری، خرید مصالح و اجرا) و کمینه‌سازی خسارت سیلاب است (روابط ۱-۳).

$$f_{1j} = Res_j \quad (۱)$$

$$f_{2j} = \sum_{z=1}^{Z} Dl_{zj} \quad (۲)$$

$$f_{3j} = \sum_{i=1}^{I} C_{ij} \quad (۳)$$

در روابط بالا، Res_j تاب‌آوری سامانه جمع‌آوری رواناب‌های سطحی شهری تحت سناریوی مدیریتی j، Dl_{zj} خسارت ناشی از سیلاب[۱۷] تحت سناریوی مدیریتی j و C_{ij} هزینه اجرای هر واحد از راهکارها در زیرحوضه i تحت سناریوی مدیریتی j است. تابع هدف هزینه را می‌توان به صورت رابطه ۴ بسط داد.

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^{K} X_{ik} \times C_k \quad (۴)$$

که در آن، C_k هزینه اجرای هر واحد از راهکار نوع k و X_{ik} نشان‌دهنده متغیرهای تصمیم مسئله است و بیانگر سطحی از زیرحوضه i است که به راهکار نوع k اختصاص داده می‌شود. همچنین، به منظور برآورد خسارت سیلاب از تابع خسارت- حجم سیلاب توسعه داده شده توسط Ghaffari (2024)، استفاده می‌شود (رابطه ۵).

$$Y = 69.33Ln\,(x) - 807.0 \quad (۵)$$

که در آن، x نشان‌دهنده حجم سیلاب و Y خسارت محاسبه شده در هر سناریوی مدیریتی است. ارزیابی کمی تاب‌آوری سامانه جمع‌آوری رواناب سطحی شهری در برابر سیلاب با استفاده از اصول تاب‌آوری ارائه شده در Haghbin and Mahjouri (2023) تعریف می‌شوند. توضیحات اصول تاب‌آوری در پیوست ۱ ارائه شده است. محدودیت مسأله بهینه‌سازی به صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود:

$$lA_{ik} \le X_{ik} \le UA_{ik} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad , \forall k = 1, 2, \dots, K \quad (۶)$$

که در آن، lA_{ik} و UA_{ik} به ترتیب، مساحت کمینه و بیشینه سطوح اجرای راهکار نوع k در زیرحوضه i (مترمربع) است.

۲-۳- طراحی یک ساختار فازی برای کمی‌سازی عدم‌قطعیت گرفتگی در گلوگاه‌ها

طراحی ساختار فازی برای کمی‌سازی عدم‌قطعیت گرفتگی گلوگاه‌های شبکه UDS و تخمین میزان تأثیر عدم‌قطعیت گرفتگی بر عملکرد هر یک از سناریوهای مدیریتی شامل چند گام به شرح زیر است:

۱) در گام اول، عدم‌قطعیت گرفتگی در هر گلوگاه بر مبنای سه عامل اصلی ارائه شده در گزارش‌های بارش- رواناب استرالیا[۱۸] (Weeks and Rigby, 2016) به صورت حجم واریزه، قابلیت حرکت واریزه و قابلیت جابه‌جایی واریزه تعریف می‌شود. حجم واریزه مربوط به منبع یا منشاء واریزه در بالادست نقاط گلوگاهی است. قابلیت حرکت واریزه، عامل جابه‌جایی واریزه از محل اولیه خود به سمت کانال‌های جمع‌آوری رواناب شهری است. قابلیت جابه‌جایی واریزه، توانایی حمل واریزه در کانال تا رسیدن به نقطه گلوگاهی است؛

۲) در گام دوم با استناد به مطالعات گذشته (Weeks and Rigby, 2016, Zarei, 2021) و بر پایه قضاوت مهندسی و با مشورت با کارشناسان با استفاده از پرسشنامه، عوامل مؤثر بر سه فاکتور اصلی حجم واریزه، قابلیت حرکت واریزه و قابلیت انتقال واریزه شناسایی می‌شود. برای نمونه، قابلیت جابه‌جایی واریزه به طور معمول به شیب حوضه و عمق جریان ورقه‌ای رواناب تشکیل شده در زیرحوضه بالادست نقطه گلوگاهی وابسته است. قابلیت جابه‌جایی واریزه، وابسته به دو عامل عمق جریان در کانال و میزان سطح عبوری یا بازشدگی دهانه کانال است (Weeks and Rigby, 2016, Zarei, 2021)؛

۳) در گام سوم، عوامل به دست آمده از گام قبل به سه مقدار کیفی به صورت کم، متوسط و زیاد تقسیم‌بندی می‌شوند. هر مقدار کیفی با یک عدد فازی $\tilde{A}$ و تابع عضویت مربوط ($\mu_{\tilde{A}}$) نمایش داده می‌شود (Zimmermann, 1991). تابع عضویت و بازه تغییرات هر عدد فازی (مثلثی، ذوزنقه‌ای، سهمی شکل و غیره) بر پایه قضاوت مهندسی و نظرات کارشناسی انتخاب می‌شود. در این مقاله، اعداد فازی مثلثی و ذوزنقه‌ای به عنوان متداول‌ترین اعداد برای کمی‌سازی متغیرهای کیفی به کار گرفته شده‌اند (Zimmermann, 1991)؛

۴) در این گام، از ترکیب توابع فازی تشکیل شده در گام پیش، بر مبنای قوانین فازی تبیین شده "اگر-آنگاه" و سیستم استنتاج فازی ممدانی (Mamdani & Asilian, 1975)، توابع عضویت فازی عوامل اصلی

ایجادکننده گرفتگی (حجم واریزه، قابلیت حرکت واریزه و قابلیت جابه‌جایی واریزه) تشکیل می‌شوند؛

۵) با جمع اعداد فازی نشان‌دهنده عوامل اصلی ایجادکننده گرفتگی، درصد گرفتگی در هر گلوگاه به صورت یک عدد فازی به دست می‌آید.

۲-۴- مدل‌سازی گرفتگی در گلوگاها با استفاده از سیستم استنتاج فازی و مفهوم برش آلفا

از آنجا که محاسبه شاخص‌های انسداد برای همه گزینه‌های مدیریتی نامزد پیچیدگی محاسبات را به شدت افزایش می‌دهد، در این مقاله، به منظور کاهش زمان هزینه اجرای مدل، ارزیابی گرفتگی در نقاط گلوگاهی شبکه بر روی گزینه‌های مدیریتی نامغلوب یا غیرپست روی جبهه پارتو انجام می‌شود. به عبارتی، در این گام، سناریوهای مدیریتی نامغلوب به عنوان گزینه‌های تصمیم درنظر گرفته می‌شوند. به منظور ارزیابی تأثیر عدم‌قطعیت گرفتگی بر عملکرد شبکه، محاسبه وضعیت شاخص‌های اصلی ایجادکننده گرفتگی با اجرای مدل شبیه‌سازی برای هر گزینه مدیریتی انجام می‌شوند. با استفاده از این مقادیر، که ورودی‌ها در مدل‌سازی فازی گرفتگی در نقاط گلوگاهی هستند، تابع عضویت درصد گرفتگی در هر گلوگاه بر پایه قوانین فازی محاسبه می‌شود. تابع عضویت گرفتگی تحت برش‌های آلفای مختلف قرار می‌گیرد (مانند شکل ۲) هدف این روش تبدیل ریاضیات فازی به حساب فاصله‌ای برای درنظر گرفتن عدم‌قطعیت گرفتگی در شبیه‌سازی است. در صورتی که μ نشان‌دهنده تابع عضویت فازی گرفتگی در یک گلوگاه باشد، برش آلفا با رسم یک خط افقی موازی با محور x از نقطه $(0,\alpha)$، تابع گرفتگی را به صورت فاصله حسابی بین دو نقطه تقاطع نشان می‌دهد (رابطه ۷). در این حالت، درصدهای گرفتگی‌ای که مقادیر عضویتی بیش از مقدار آلفا دارند، در این بازه قرار می‌گیرند و درصدهای گرفتگی‌ای که مقادیر عضویتی کمتر از آلفا دارند، خارج از بازه قرار می‌گیرند (شکل ۲).

$$[\mu]_\alpha = \begin{cases} [a+\alpha(m-a), b-\alpha(b-m)], & if \quad 0<\alpha\leq 1 \\ [a,b] & if\ \alpha = 0 \end{cases} \qquad (۷)$$

در این رابطه، m درصد گرفتگی در مقدار مرکزی تابع $(\alpha = 1)$، a و b ابتدا و انتهای تابع و μ_α بازه درصد گرفتگی به دست آمده از برش α است. هرچه درجه عضویت برش آلفا به عدد یک نزدیک‌تر باشد، بازه به دست آمده کوچک‌تر است.

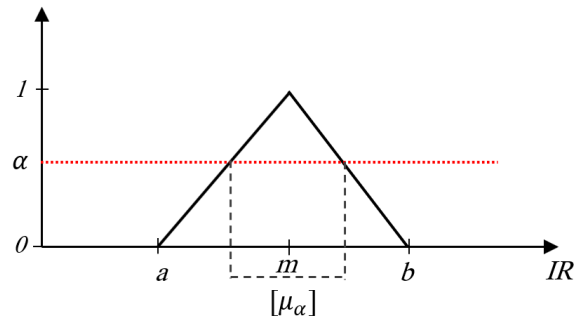


Fig. 2- An interval resulting from an α-cut on a fuzzy membership function

شکل ۲- یک برش آلفا بر روی یک تابع عضویت فازی

۲-۵- ارزیابی استواری سناریوهای مدیریت رواناب‌های سطحی شهری

در این مقاله، به دنبال یافتن تصمیم‌هایی که در برابر عدم‌قطعیت‌های استوار باشند، از نظریه تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی استفاده می‌شود. استواری در این روش بر پایه یک آستانه قابل قبول عملکرد سامانه، توسط تصمیم‌گیرنده تعریف می‌شود و در ادامه، مطلوبیت تصمیم‌های مختلف بر پایه فاصله تا این آستانه، مقایسه و ارزیابی می‌شود (Ben-Haim, 2006). تصمیمی که بتواند تحت تأثیر عدم‌قطعیت‌های موجود، مقدار آستانه را تأمین کند، به عنوان تصمیم استوار انتخاب می‌شود. چهار ورودی اساسی برای تحلیل شکاف اطلاعاتی عبارتند از:

- متغیر غیرقطعی u که برای آن یک مقدار اسمی $\tilde{u}$ وجود دارد. در این مقاله، متغیرهای غیرقطعی همان پارامترهای مدل‌سازی گرفتگی مانند حجم واریزه، قابلیت حرکت واریزه و قابلیت جابه‌جایی واریزه هستند؛
- فضای تصمیم Q، شامل تعدادی سناریوی مدیریتی q (متغیرهای تصمیم)، یا مجموعه‌ای از انتخاب‌های جایگزین طراحی $(q\in Q)$ در دسترس مدیران است. در اینجا، فضای تصمیم سناریوهای نامغلوب به دست آمده از مدل شبیه‌سای- بهینه‌سازی در گام پیش هستند؛
- تابع عملکرد[۱۹] (یا پاداش) $R(q,u)$ به صورت تابعی از متغیرهای تصمیم q و عدم‌قطعیت u است. تابع عملکرد به صورت تاب‌آوری و خسارت ناشی از سیلاب پخش شده در سطح شهر در نظر گرفته می‌شود؛
- r_c یک مقدار کمینه از عملکرد شبکه (که به آن مقدار بحرانی یا آستانه شکست گفته می‌شود) است که به صورت درصدی از توابع هدف درنظر گرفته می‌شود.

شکل ۳ تصویری ساده از تعریف و مفهوم یک شکاف اطلاعاتی (تفاوت مقدار واقعی u و مقدار تخمینی $\tilde{u}$) را برای یک متغیر نشان می‌دهد

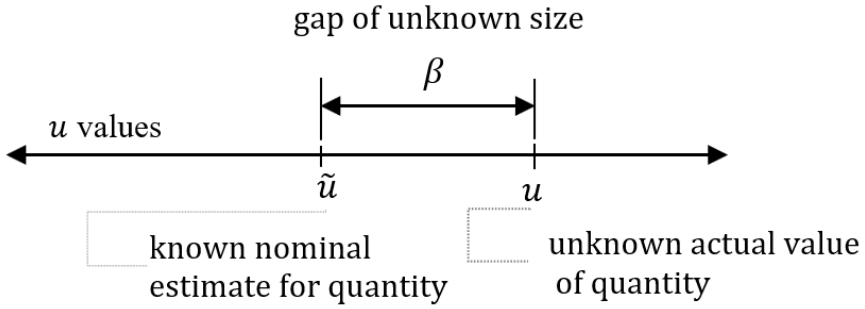


Fig. 3- Simple representation of Info-Gap uncertainty (Duncan et al., 2008)
شکل ۳- نمایش عدم‌قطعیت در رویکرد شکاف اطلاعاتی (Duncan et al., 2008)

تابع عدم‌قطعیت u، به صورت خانواده‌ای از مجموعه‌های تودرتو در بازه‌ای به مرکزیت مقدار اسمی $\tilde{u}$ نشان داده می‌شود. اندازه هر مجموعه (عرض هر یک از اعضا) به طور تدریجی به سمت خارج از مقدار اسمی و در یک فاصله $\beta > 0$ گسترش می‌یابد. بر این اساس، عدم‌قطعیت در u با استفاده از یک فاصله محدود به صورت رابطه ۸ نشان داده می‌شود.

$$\mathcal{U}(\beta, \tilde{u}) = \{u: |u - \tilde{u}| \leq \beta\}, \quad \beta \geq 0 \qquad (۸)$$

هنگامی که مقادیر بزرگتر $R(q, u)$ مطلوب باشد، آستانه بحرانی r_c به صورت رابطه ۹ و زمانی که مقادیر کمتر تابع عملکرد مطلوب است، آستانه بحرانی به صورت رابطه۱۰ تعریف می‌شود:

$$R(q, u) \geq r_c \qquad (۹)$$

$$R(q, u) \leq r_c \qquad (۱۰)$$

از آنجا که در این مقاله بیش از یک تابع عملکرد (تابع پاداش) وجود دارد، به ازای هر تابع عملکرد، یک مقدار بحرانی (r_c) منحصر به فرد تعریف می‌شود. همچنین، مجموعه‌های غیرقطعی β بر مبنای برش‌های آلفا بر روی تابع عضویت گرفتگی در هر گلوگاه تعیین می‌شوند. اگر در یک سناریوی مدیریتی، به ازای برش آلفا با یک درجه عضویت مشخص، آستانه استواری تأمین نشود، بالطبع به ازای مقادیر آلفا با درجه عضویت کمتر از آن نیز آستانه استواری تأمین نخواهد شد. اگر در سناریویی، به ازای برش آلفا با درجه عضویت کوچکتر، جواب‌ها در محدوده r_c معین قرار گیرند، آن سناریو استوار رضایت‌بخش محسوب می‌شود.

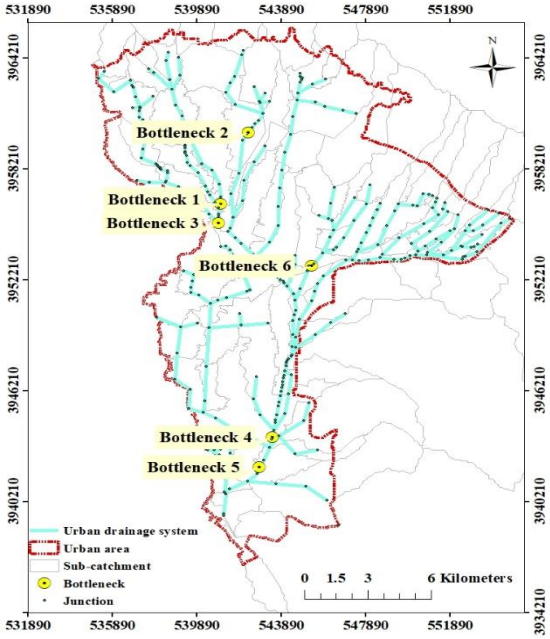
۳- مطالعه موردی

شهر تهران، پایتخت و پرجمعیت‌ترین شهر ایران، با جمعیتی حدود ۹/۷ میلیون نفر، و با ارتفاعی بین ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ متر از سطح دریا، در کوهپایه‌های جنوبی رشته کوه البرز واقع شده است. میانگین بارش سالانه تهران بین ۲۰۰ میلیمتر در جنوب تا ۵۰۰ میلیمتر در شمال شهر در نوسان است. به طوری که بارش با دوره بازگشت ۵۰ سال در ارتفاع ۹۰۰ متری، ۱۹۷ میلیمتر و در ارتفاع ۱۸۰۰ متری ۳۵۰ میلیمتر است (Tehran Atlas, 2011; TETCO, 2011). شهر تهران در چهار دهه گذشته، دستخوش سیلاب‌های مختلفی بوده است. در سال ۱۳۶۶، یکی از مخرب‌ترین سیلاب‌ها در این منطقه با بیش از ۳۰۰ کشته رخ داد. همچنین، سیلاب‌های دیگری در سال‌های ۱۳۷۱، ۱۳۷۴، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۴ رخ دادند که موجب پخش سیلاب در سطح شهر و ایجاد خسارت به ساختمان‌ها و خسارات جانی شدند. رشد جمعیت، توسعه بی‌رویه شهری، تغییر کاربری اراضی و در نتیجه، افزایش سطوح نفوذناپذیر موجب افزایش حجم رواناب‌های سطحی شهری شده است (TETCO, 2011; Yazdi, 2018; Dolatshahi et al., 2023). محدودیت‌های هیدرولیکی سامانه جمع‌آوری رواناب سطحی شهری به کمبود ظرفیت خلاصه نمی‌شود، بلکه مشکلاتی مانند گرفتگی ناشی از واریزه‌های شهری در گلوگاه‌های شبکه اصلی- که عمدتاً ناشی از پل‌ها و کالورت‌های نامناسب است- به عنوان یکی از معضلات جدی شبکه شمرده می‌شوند.

شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی شهری تهران را می‌توان به چهار زیرحوضه (شمالی، مرکزی، شرقی و غربی) با خروجی مستقل تفکیک کرد (TETCO, 2011). زیرحوضه شرقی با نام سیل برگردان شرق بحرانی‌ترین زیرحوضه شهر تهران است که

بخش‌های عمده‌ای را از شمال شرق، شرق و جنوب شرق زهکشی می‌نماید. بازدیدهای میدانی از سازه‌های پل و کالورت احداث شده بر روی سیل‌برگردان شرق نشان می‌دهد که تعداد شش پل نامناسب در این شبکه وجود دارد که ضخامت عرشه آن‌ها موجب کاهش سطح مقطع عبور جریان و کاهش ظرفیت هیدرولیکی کانال یا مسیل می‌شود (Mohammadiun, 2018). از این رو، متدولوژی پیشنهادی در زیرحوضه شرقی تهران به کار گرفته و ارزیابی می‌شود. مساحت سیل برگردان شرق تهران در حدود ۵۱۸ کیلومتر مربع به تفکیک ۲۹۸ کیلومتر مربع حوضه کوهستانی و ۲۲۰ کیلومتر مربع حوضه درون شهری است. طول شبکه اصلی در زیرحوضه شرق حدود ۲۰۵ کیلومتر است. سیل‌برگردان شرق تهران شامل ۸۱ زیرحوضه شهری است و بیشترین محدوده شهری را به خود اختصاص داده است. شکل ۴ زیرحوضه شرقی (سیل برگردان شرق) تهران و شبکه آبراهه جمع‌آوری رواناب سطحی شهری آن را نشان می‌دهد. در شش محل از کالورت‌های شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی شهری به دلیل ایجاد پل بر روی شبکه، کانال‌های موجود با کاهش سطح مقطع و کمبود ظرفیت هیدرولیکی روبه‌رو شده‌اند. این نقاط دارای سابقه گرفتگی و ایجاد سیلاب در شبکه هستند و به عنوان نقاط گلوگاهی شبکه معرفی شده‌اند (TETCO, 2011). شکل ۴ موقعیت نقاط شناسایی شده نقاط گلوگاهی را نشان می‌دهد.

(a)



(b)

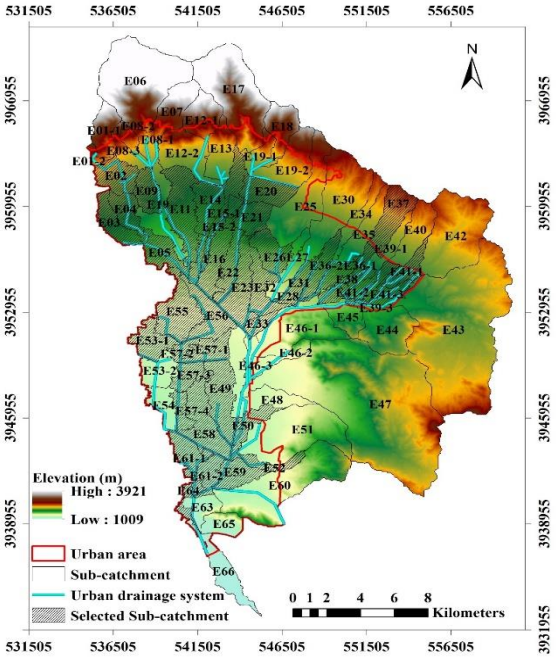


Fig. 4- a) Tehran's eastern urban runoff drainage network and the location of its bottlenecks, b) Sub-basin locations and elevations

شکل ۴- الف- شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی شهری شرق تهران و موقعیت گلوگاه‌ها در شبکه، ب- تغییرات تراز و موقعیت زیرحوضه‌ها

۴- نتایج و تحلیل آن‌ها

در این بخش، نتایج به‌کارگیری متدولوژی پیشنهادی در حوضه مطالعاتی ارائه و درباره آن بحث می‌شود. به منظور شبیه‌سازی بارش- رواناب از مدل کالیبره شده SWMM و داده‌های شبیه‌سازی بارش- رواناب مطالعات پیشین (Mohammadiun, 2019; Haghbin and Mahjouri, 2025) استفاده شد و مدل با دوره بازگشت بارندگی طراحی ۵۰ سال و زمان تمرکز حوضه ۹۰ دقیقه اجرا شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با مطالعات گذشته (Yazdi, 2018) نشان داد که حجم سیلاب خروجی حدود ۳/۵ میلیون مترمکعب برآورد شده که نشان‌دهنده ۵ درصد اختلاف با مقادیر گزارش‌شده است. همچنین، انطباق الگوی مکانی نقاط سیلابی با گزارش‌های موجود بیانگر توانایی مدل در بازتولید رفتار واقعی شبکه است (TETCO, 2011; Zarei, 2021). این نتایج، دقت و اعتبار مدل را برای استفاده در مراحل بعدی تحلیل و بهینه‌سازی تأیید می‌نماید. زیرحوضه‌های مناسب برای اجرای راهکارهای طبیعی بر پایه ویژگی زیرحوضه‌ها (شامل: شیب،

کاربری، درصد سطوح نفوذناپذیری، جنس خاک) انتخاب شد. در نهایت، ۴۵ زیرحوضه شناسایی و انتخاب شدند. انواع راهکارهای طبیعی برای این منطقه مطالعاتی بر مبنای پیشنهادهای مطالعات پیشین (Zarandi, 2013; Zarei, 2021, Ghaffari et al., 2025) انتخاب شد. در نهایت، روسازی‌های نفوذپذیر[۲۰]، ترانشه‌های نفوذ یا کانال‌های نفوذ آب[۲۱]، جوی‌های پوشیده از چمن (جوی‌باغچه)[۲۲]، حوضچه‌های زیستی نگهدارنده آب[۲۳] و مخازن آب باران[۲۴] به عنوان راهکارهای قابل اجرا در زیرحوضه‌های منطقه مطالعاتی انتخاب شد (Kamali, 2010; Ghanbari, 2011; Kamali et al., 2017; Hashemi et al., 2020; Haghbin and Mahjouri, 2023). در مجموع، ۲۵۵ متغیر تصمیم بهینه‌سازی شامل مساحت ۵ نوع راهکار در ۴۵ زیرحوضه منتخب به عنوان متغیرهای تصمیم بهینه‌سازی درنظر گرفته شدند. الگوریتم NSGA-II با کدگذاری عدد صحیح، و تعداد شرکت‌کنندگان در مسابقه[۲۵] برابر با ۱۰، احتمال تزویج[۲۶] برابر با ۰/۸ و احتمال جهش[۲۷] ۰/۱، پیاده‌سازی شد. همچنین، معیار توقف برای NSGA-II رسیدن به حداکثر تعداد نسل برابر با ۱۰۰۰ درنظر گرفته شد. ۵۰ سناریوی نامغلوب در شکل ۵ نشان داده شده است، به‌طوری که راهکار شماره ۱ و شماره ۵۰، به ترتیب، نشان‌دهنده سناریوهای مدیریتی با بیشترین و کمترین سطح زیر پوشش راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب هستند. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، با افزایش به کارگیری راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب در شبکه، میزان تاب‌آوری افزایش و خسارت سیلاب کاهش می‌یابد. همچنین، هزینه اجرای سناریوهای مدیریتی در مقایسه با میزان خسارت سیلاب بسیار کمتر است و در جبهه پارتوی نامغلوب به دست آمده، میزان بهبود در تابع هدف تاب‌آوری بین ۷/۸ و ۴۶/۸ درصد و میزان کاهش خسارت سیلاب بین ۲/۶ و ۸۳/۸ میلیون دلار است. میزان سرمایه لازم برای اجرای سناریوهای مدیریتی بین ۰/۵ تا ۵ میلیون دلار محاسبه شده است.

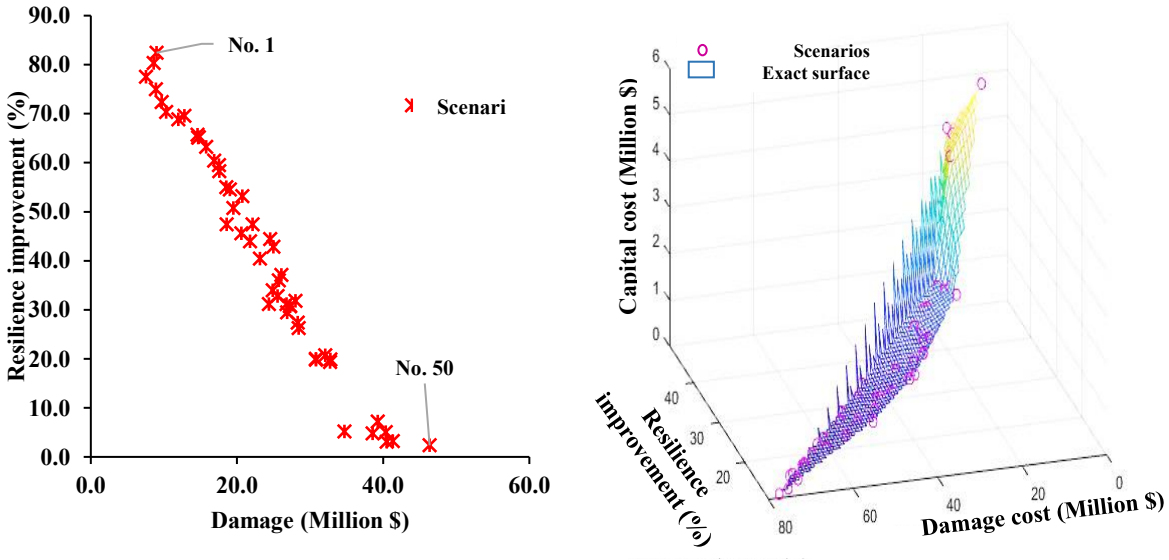


Fig- 5- Pareto front derived from the simulation-optimization model

شکل ۵- جبهه پارتو به دست آمده از مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی سامانه جمع‌آوری رواناب‌های سطحی شهری

در این مقاله، تعیین عوامل ایجادکننده گرفتگی و قواعد فازی به دلیل کمبود داده‌های تجربی قابل اعتماد در مورد گلوگاه‌ها (پل‌ها یا محل‌های دارای کاهش مقطع) بر پایه قضاوت متخصصان تعریف شد. بدین منظور، یک پرسشنامه ساختاریافته تهیه و به متخصصان منابع آب، پژوهشگران و گرودارن[۲۸] شرکت‌های مهندسی، دانشگاه‌ها و شهرداری تهران ارائه شد. به منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده، مقایسه‌ی کمی با ابزار ARR Blockage Calculation Tool (Weeks and Rigby, 2016) انجام شد. این ابزار که بخشی از دستورالعمل‌های ملی سیلاب در استرالیا است، میزان گرفتگی سازه‌های هیدرولیکی را با امتیازدهی به ویژگی‌های خاص هر محل، مانند نوع واریزه و نوع شبکه‌ی ورودی، برآورد می‌کند و در نبود داده‌های تجربی، یک روش معتبر و قابل تکرار برای مقایسه و اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، ارائه می‌دهد. نتایج مقایسه میزان گرفتگی شبیه‌سازی شده با خروجی ابزار ARR،

عملکرد قابل قبولی را نشان داد (NSE = 0.8; RMSE = 10%) که بیانگر قابلیت کاربرد مدل در شرایط واقعی است. در نهایت، به منظور گنجاندن درجه فازی گرفتگی در مدل شبیه‌سازی، چهار برش آلفا در چهار سطح از توابع عضویت ($\alpha =$ 0.0, 0.3, 0.6, 1.0) به کار رفت. نمونه‌ای از درصد گرفتگی در شش گلوگاه شبکه به صورت عدد فازی و بازه‌های گسسته شده با استفاده از برش آلفا در سناریوی بدون اجرای راهکارهای توسعه کم‌اثر (سناریوی پایه) در جدول ۱ نشان داده شده است.

Table 1- Blockage value intervals derived using α-cut method for the blockage membership functions at each bottleneck (base scenario)

جدول ۱- عدد فازی مربوط به درصد گرفتگی و بازه‌های به دست آمده آنها به روش برش آلفا (که بر روی تابع عضویت درجه گرفتگی در هر گلوگاه برای سناریوی پایه اعمال شد)

Bottleneck	Fuzzified blockage*	Blockage interval at**			
		$\alpha = 0.0$	$\alpha = 0.3$	$\alpha = 0.6$	$\alpha = 1.0$
$\widetilde{B}_1$=	(40,55,70)	[40,70]	[45,65]	[49,61]	[55]
$\widetilde{B}_2$=	(60,75,90)	[60,90]	[65,85]	[69,81]	[75]
$\widetilde{B}_3$=	(40,55,70)	[40,70]	[45,65]	[49,61]	[55]
$\widetilde{B}_4$=	(10,25,40)	[10,40]	[15,35]	[19,31]	[25]
$\widetilde{B}_5$=	(0,15,30)	[0,30]	[5,25]	[9,21]	[15]
$\widetilde{B}_6$=	(30,45,60)	[30,60]	[35,55]	[39,51]	[45]

* Numbers represent a triangular fuzzy value in the form of (a, b, c), where *a* is the lower bound (minimum possible value), *b* is the maximum membership value, and *c* is the upper bound (maximum possible value) of the fuzzy membership function

** Each value in columns 3 to 5 represents the left and right endpoints of an α-cut interval for the triangular fuzzy number, (The interval includes all values with a membership degree ≥ α)

به ازای هر سناریوی مدیریتی، سطح مقطع مؤثر کانال در شش گلوگاه، بر پایه درصد گرفتگی متناظر با ابتدا و انتهای بازه‌ی هر برش آلفا (در مجموع هفت حالت گرفتگی)، در مدل شبیه‌سازی رواناب شهری SWMM اصلاح شد و عملکرد سامانه، شامل تاب‌آوری و خسارت سیلاب تحت این شرایط مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین ترتیب، هر سناریوی مدیریتی در برابر ۳۵۰ حالت عدم‌قطعیت (هفت سطح گرفتگی گلوگاه‌ها برای هر یک از ۵۰ سناریوی مدیریتی) تحلیل شد. تغییرات مقادیر توابع هدفِ تاب‌آوری و خسارت در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد تأثیر عدم‌قطعیت گرفتگی بر سناریوهای مدیریتی لزوماً منفی نبوده و حتی در بعضی از سناریوها تاب‌آوری را بهبود داده است (سناریوهای ۱۵ تا۵۰). این در حالی است که خسارت سیلاب و حجم ناشی از سیلاب همواره به صورت صعودی در حال افزایش است (شکل ۷). به طور کلی تأثیر عدم‌قطعیت گرفتگی بر عملکرد شبکه از دو منظر مشهود است: ۱) افزایش بازه تغییرات تاب‌آوری و خسارت با افزایش مساحت راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب، ۲) کاهش میزان تاب‌آوری و افزایش میزان خسارت با کاهش مساحت راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب.

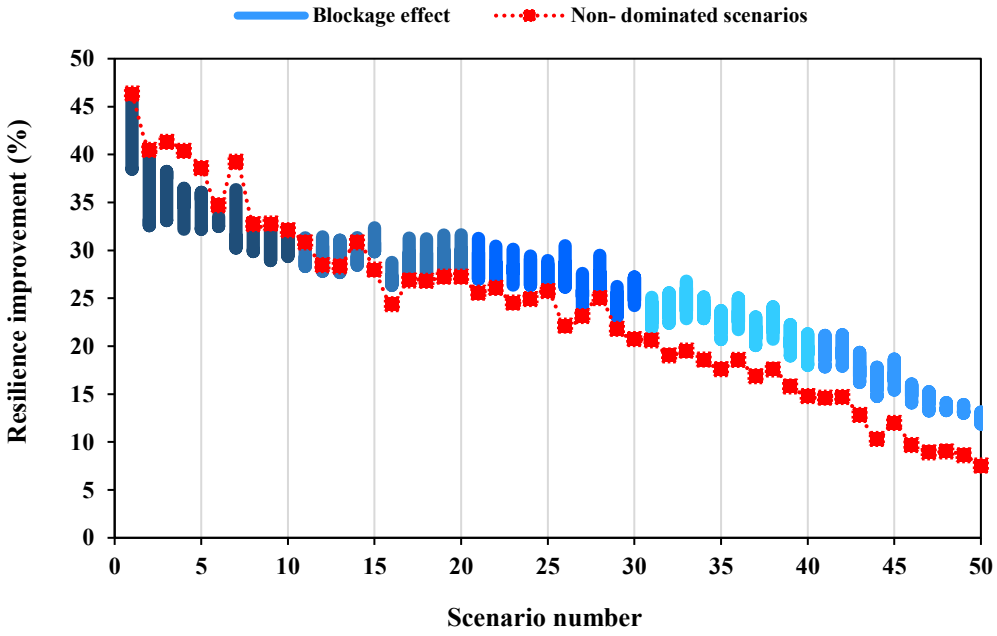


Fig. 6- Resilience improvement percentages across non-dominated scenarios (red dots) under blockage uncertainty (blue intervals)

شکل ۶- تغییر درصد بهبود تاب‌آوری در سناریوهای نامغلوب (نقاط قرمز) تحت تأثیر عدم‌قطعیت گرفتگی (بازه‌های آبی)

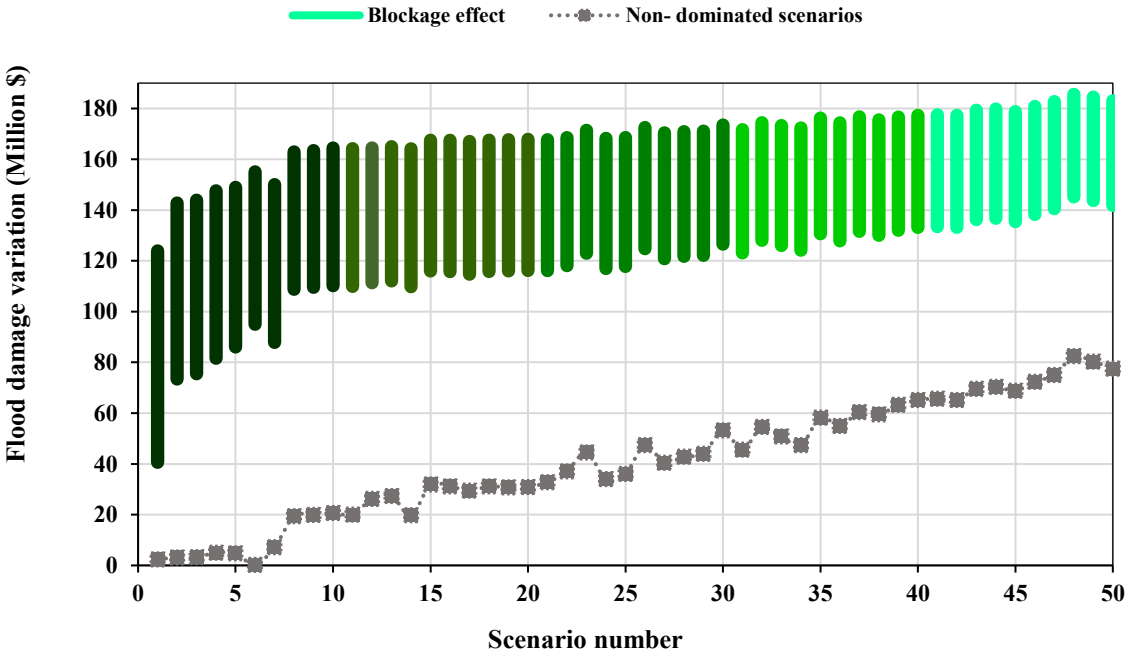


Fig. 7- Flood damage increases across non-dominated scenarios (gray dots) due to blockage uncertainty (green intervals)

شکل ۷- افزایش خسارت سیلاب سناریوهای نامغلوب (نقاط طوسی) تحت تأثیر عدم‌قطعیت گرفتگی (بازه‌های سبز)

بررسی نتایج به کارگیری اصول تاب‌آوری در این مقاله نشان می‌دهد هنگام ایجاد گرفتگی در گلوگاه‌ها، سیلاب در شبکه عمدتاً بالادست نقاط گلوگاهی شکل می‌گیرد و بروز سیلاب از دیگر نقاط و زیرحوضه‌های پایین‌دست حذف می‌شود. در نتیجه، تعداد نقاط

سیلابی کاهش می‌یابد. این درحالی است که دبی اوج سیلاب در گلوگاه‌های دچار گرفتگی افزایش می‌یابد و بنابراین، تاب‌آوری در مناطق سیلابی کمتر می‌شود. بر پایه نتایج به دست آمده (شکل ۶)، با کاهش سطوح اجرای راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب (از سناریوی مدیریتی ۱ به سمت ۵۰)، تأثیر مثبت کاهش نقاط سیلابی بر تاب‌آوری شبکه بر تأثیر منفی افزایش دبی اوج و کاهش زمان اوج غلبه نموده، تاب‌آوری شبکه افزایش یافته است. در شکل ۸، بازه تغییرات دبی اوج سیلاب و زمان رخداد آن تحت تأثیر درجات مختلف گرفتگی در نقاط گلوگاهی (عدم‌قطعیت گرفتگی)، برای سناریوهای مدیریتی بهینه نشان داده شده است (نقاط قرمز نشان‌دهنده عملکرد سناریوهای بهینه در شرایط بدون در نظر گرفتن عدم‌قطعیت هستند). یافته‌ها نشان می‌دهد، کاهش سطوح اجرای راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب در سناریوهای مدیریتی، موجب کاهش ظرفیت شبکه برای مقابله با عدم‌قطعیت‌های مربوط به گرفتگی می‌شود. به طوری که با بروز درجات مختلف گرفتگی، میزان دبی اوج و زمان اوج نقاط سیلابی شبکه به سطح پیش از اجرای این راهکارها یا پایین‌تر از آن کاهش می‌یابد. این در حالی است که سناریوهای مدیریتی با سطح اجرای بیشتر راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب، در اثر بروز درجات مختلف گرفتگی، همچنان دبی اوج و زمان اوج نقاط سیلابی نسبت به شرایط پیش از اجرای راهکارها بهبود داشته است. در نتیجه، دبی اوج سیلاب و زمان رخداد آن، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تاب‌آوری شبکه در شرایط گرفتگی با شدت‌های مختلف هستند. سناریوهای مدیریتی ۴۳ تا ۵۰ به دلیل عدم بهره‌گیری کافی از راهکاری طبیعی کنترل سیلاب، در برابر بروز درجات گرفتگی عملکرد ضعیفی داشته‌اند؛ به گونه‌ای که در این سناریوها، شبکه با حجم سه برابری از سیلاب روبه‌رو می‌شود و از این رو، این سناریوهای مدیریتی گزینه‌های مناسبی برای مدیریت پایدار شبکه محسوب نمی‌شوند.

با توجه ثابت بودن هزینه سناریوهای بهینه‌سازی و عدم تغییر آن‌ها در برابر عدم قطعیت‌های مختلف، تابع عملکرد (پاداش) در روش اینفوگپ بیشینه‌سازی اصول تاب‌آوری و کمینه‌سازی خسارت سیلاب در نظر گرفته شده است. بازه عدم‌قطعیت یا به عبارتی، افق عدم‌قطعیت (β) درجات مختلف گرفتگی به دست آمده از آلفا کات هستند. مقدار بحرانی توابع هدف (r_c) در چند سطح و به صورت ۰/۱ تا ۰/۸ مقادیر هدف سناریوهای تصمیم نامغلوب درنظر گرفته شده است. یعنی برای هر سناریو در شرایط عدم‌قطعیت‌های مختلف لازم است حداقل ۱۰ درصد تا ۸۰ درصد تابع هدف اولیه تأمین شود. در شکل ۹ نتایج به دست آمده از روش اینوگپ شامل مقادیر پاداش هر تصمیم بر مبنای بازه‌های مختلف آستانه شکست توابع هدف نشان داده شده است. در نهایت، سناریوی مدیریتی شماره ۱۵ با بیشترین پاداش در سطوح مختلف مقادیر بحرانی به عنوان تصمیم استوار به دست آمد. گزینه استوار با هزینه ۰/۸۴ میلیون دلار، خسارت حدود ۶۳ میلیون دلار، دارای ۳۷ درصد بهبود در تابع هدف تاب‌آوری در برابر سیلاب بوده که نسبت به دیگر سناریوها در برابر عدم‌قطعیت گرفتگی سطح عملکرد استوارتری را نشان می‌دهد. شکل ۱۰، نسبت مساحت هر راهکار به مساحت کل راهکارهای مورد استفاده در گزینه استوار و سناریوهای مدیریتی ۱ (بیشترین سطح راهکار) و ۵۰ (کمترین سطح راهکار) را نشان می‌دهد. بیشترین مساحت اجرای راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب در سناریوی مدیریتی استوار به جوی‌های پوشیده از چمن (۶۱ درصد کل راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب مورد استفاده) و سپس، به ترتیب، به روسازی‌های نفوذپذیر و ترانشه‌های نفوذ اختصاص دارد. همچنین، دو راهکار حوضچه‌های زیستی نگهدارنده آب و مخازن آب باران کمترین مساحت اجرا را به خود اختصاص داده‌اند.

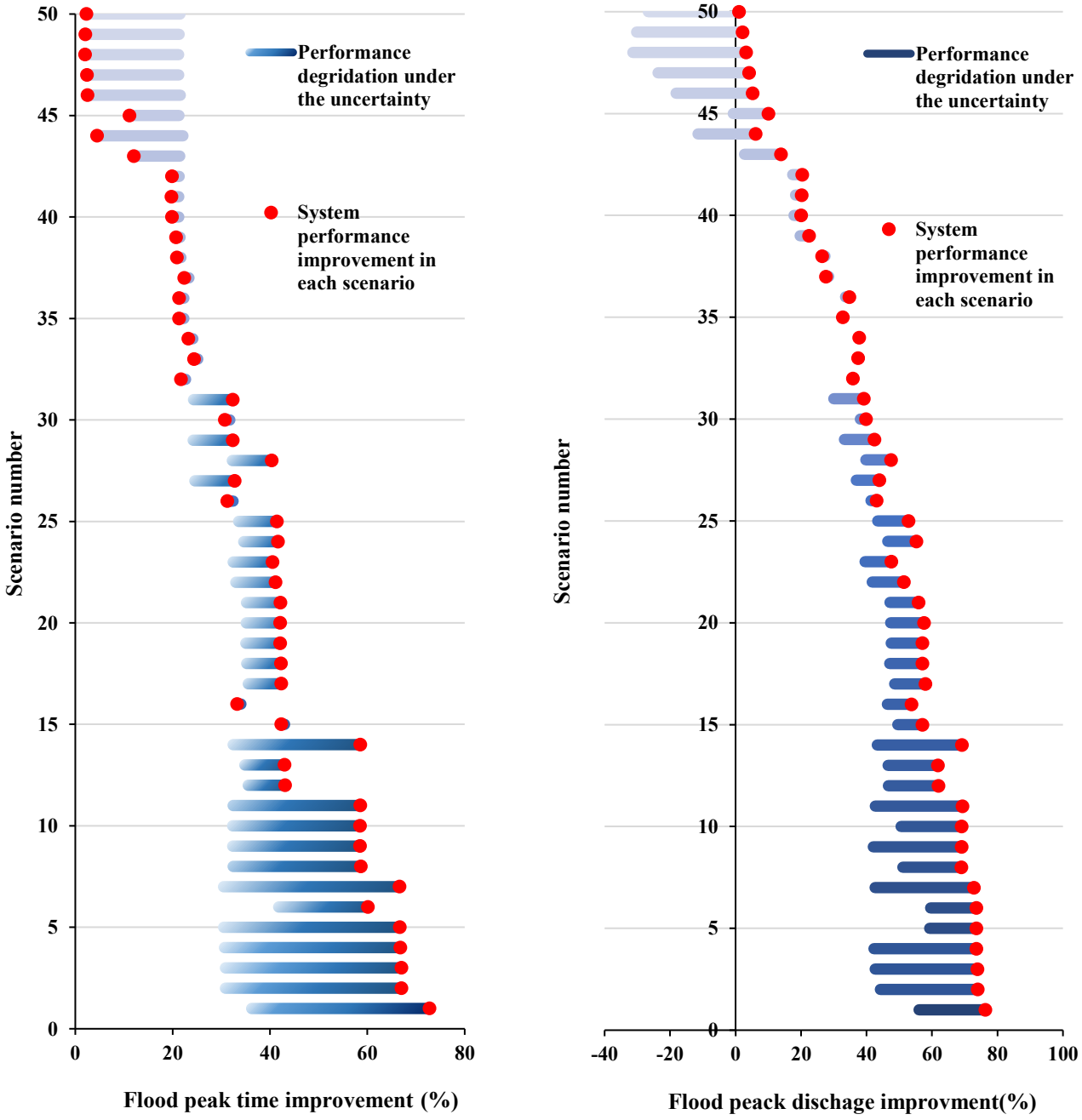


Fig. 8- Impact of network blockage uncertainty on flood peak discharge and timing across different management scenarios

شکل ۸- تأثیر عدم‌قطعیت گرفتگی در شبکه بر عملکرد سناریوهای مدیریتی از نظر دبی اوج سیلاب و زمان رخداد آن (نقاط قرمز نشان‌دهنده عملکرد سناریوهای بهینه در شرایط بدون درنظر گرفتن عدم‌قطعیت هستند)

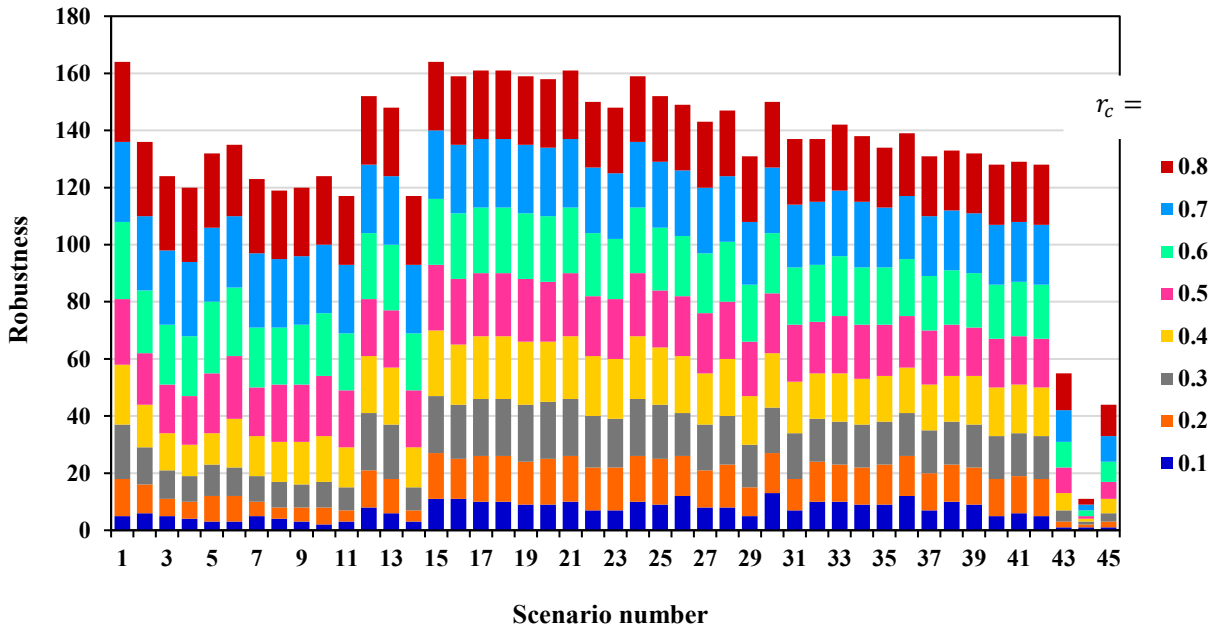
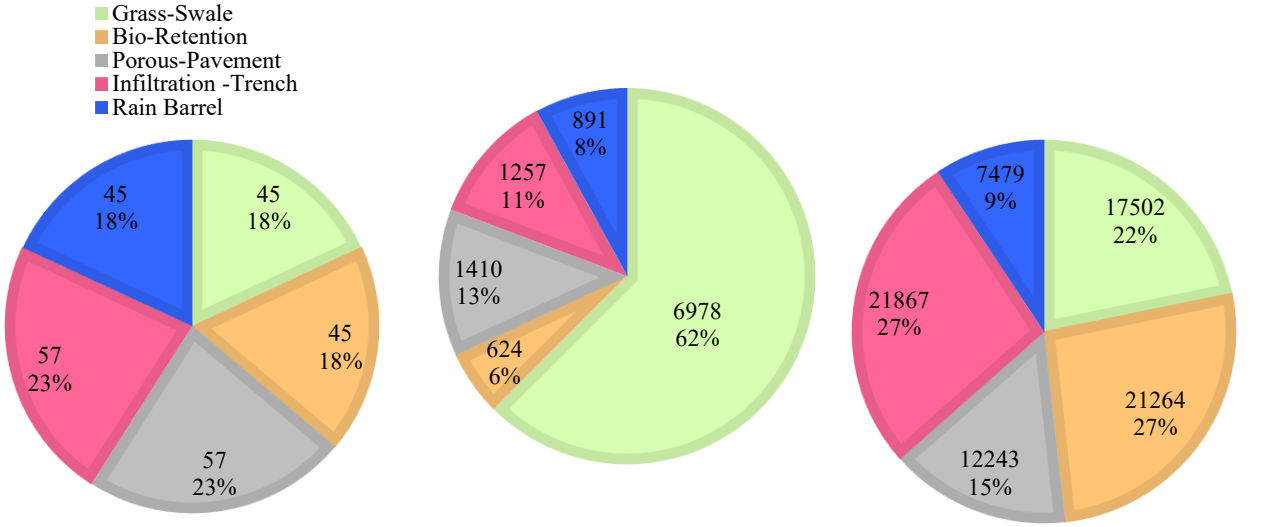


Fig. 9- Robustness evaluation of scenarios across varying failure thresholds of objective functions

شکل ۹- ارزیابی استواری سناریوها در برابر بازه‌های مختلف آستانه شکست توابع هدف



Scenario 50

Implemented NBP: 249×100 m²

Scenario 15

Implemented NBP: 11160×100 m²

Scenario 1

Implemented NBP: 80355×100 m²

Fig. 10- Coverage area and percentage distribution of implemented areas for each nature-based flood control practice (NBP) across non-dominated Scenarios 1, 15, and 50

شکل ۱۰- درصد مساحت و مساحت تحت اجرای هر راهکار به کل راهکارهای موجود در سناریوهای نامغلوب ۱ و ۱۵ و ۵۰

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک چارچوب برای طراحی سامانه جمع‌آوری رواناب سطحی شهری تاب‌آور و استوار با به کارگیری اصول تاب‌آوری اکولوژیکی (Haghbin & Mahjouri, 2023) و با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت گرفتگی در گلوگاه‌های شبکه ارائه شده است. برای انتخاب سناریوهای تاب‌آور مدیریت سیلاب، از نتایج یک مدل چندهدفه بهینه‌سازی NSGAII با مدل شبیه‌سازی SWMM تلفیق شد (Haghbin & Mahjouri, 2025). بر پایه ویژگی‌های

منطقه مطالعاتی، پنج نوع راهکار طبیعی کنترل سیلاب شامل روسازی‌های نفوذپذیر، ترانشه‌های نفوذ یا کانال‌های نفوذ آب، جوی‌های پوشیده از چمن (جوی‌باغچه‌ها)، حوضچه‌های زیستی نگهدارنده آب و مخازن آب باران انتخاب شدند. مدل‌سازی عدم‌قطعیت گرفتگی هیدرولیکی با شناسایی عوامل اصلی ایجادکننده گرفتگی و استفاده از مفهوم منطق فازی صورت گرفت. به منظور انتخاب گزینه استوار در برابر عدم‌قطعیت گرفتگی از نظریه تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی IGDT استفاده شد. این چارچوب در مطالعه موردی شرق تهران ارزیابی شد. نتایج به دست آمده نشان داد:

- تأثیر عدم‌قطعیت گرفتگی بر تابع هدف خسارت و تاب‌آوری یکسان نیست و حساسیت تابع هدف خسارت بیشتر از تاب‌آوری است؛
- گرفتگی در گلوگاه‌ها موجب می‌شود سیلاب عمدتاً به نقاط گلوگاهی معطوف شود و از دیگر نقاط و زیرحوضه‌های پایین‌دست گلوگاه‌ها حذف شود، در نتیجه، تعداد نقاط سیلابی کاهش و تاب‌آوری آن بخش از شبکه افزایش یابد؛
- مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر تاب‌آوری و خسارت در هنگام رخداد گرفتگی، دبی اوج سیلاب و زمان رخداد آن در گلوگاه‌های دچار گرفتگی است؛
- به‌طور کلی، سناریوهای مدیریتی‌ای که در آن‌ها راهکارهای طبیعی کنترل سیلاب به‌صورت گسترده‌تری اجرا شده‌اند، در برابر درجات مختلف گرفتگی تاب‌آوری بهتری دارند؛
- استفاده از نظریه فازی برای کمی‌سازی گرفتگی و نظریه تصمیم‌گیری IGDT به منظور ارزیابی استواری در برابر عدم‌قطعیت گرفتگی می‌تواند ترکیب مناسبی در برآورده کردن معیارهای عملکرد سیستم باشد.

چارچوب ارائه شده در این مقاله دارای محدودیت‌هایی است، که یکی از آنها استفاده از توابع خسارت موجود در مطالعات پیشین به جای توسعه تابع محلی مختص منطقه مطالعاتی، به دلیل عدم دسترسی به داده‌های تاریخی خسارت سیلاب و نقشه‌های دقیق کاربری اراضی محلی بود. در بخش مدل‌سازی هیدرولیکی نیز، به دلیل عدم دسترسی به داده‌های زمانی از فرآیندهای انتقال واریزه‌های شهری، از یک رویکرد ایستای مبتنی بر منطق فازی به جای مدل‌سازی پویای گرفتگی استفاده شد. اگرچه این روش ساده‌تر است، اما با بهره‌گیری از مجموعه‌های فازی و برش‌های آلفا، امکان نمایش محاسباتی کارآمدی از عدم‌قطعیت را فراهم کرد و سناریوهای محتمل گرفتگی را پوشش داد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد چارچوب پیشنهادی، ابزار ارزشمندی برای شناسایی نقاط حساس و آسیب‌پذیر شبکه در برابر گرفتگی و نیز برآورد میزان تأثیر عدم‌قطعیت‌های مرتبط با پدیده گرفتگی فراهم می‌آورد. این قابلیت، به تصمیم‌گیرندگان امکان می‌دهد تا بر پایه یک تصویر واقع‌بینانه از رفتار شبکه تحت شرایط بحرانی، اولویت سرمایه‌گذاری را در بهسازی، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه اجزای شبکه تعیین کنند. برتری اصلی این رویکرد در آن است که با درنظرگرفتن صریح عدم‌قطعیت‌های ذاتی گرفتگی، در مقابل مدل‌های قطعی مرسوم، برآوردی قابل‌اتکاتر از عملکرد واقعی شبکه ارائه می‌دهد. این ویژگی، زمینه‌ساز طراحی برنامه‌های اثربخش پایش، کنترل و مدیریت گرفتگی و در نهایت، کاهش ریسک بروز سیلاب‌های ناگهانی است. علاوه بر این، چارچوب ارائه‌شده از انعطاف‌پذیری مناسبی برخوردار بوده، می‌تواند برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه در برابر دیگر عدم‌قطعیت‌ها از جمله تغییرات اقلیمی، توسعه‌های آینده شهری، تغییرات کاربری زمین یا افزایش بار هیدرولوژیکی نیز به‌کار گرفته شود. این قابلیت نشان‌دهنده پتانسیل روش پیشنهادی برای برنامه‌ریزی زیرساختی شهرهای تاب‌آور و تصمیم‌سازی در شرایط آینده‌نگر است.

در نهایت، با توجه به این که گرفتگی به عنوان یکی از اصلی‌ترین متغیرهای دارای عدم‌قطعیت شبکه شناخته شده است، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، بررسی‌های عمیق‌تری درباره مدل‌سازی دینامیکی گرفتگی در شبکه ارائه شود. همچنین، برای تقویت جنبه‌های سیاست‌گذاری این پژوهش، مطالعات آینده باید ادغام اقدامات غیرسازه‌ای را در چارچوب بهینه‌سازی بررسی کنند. برای مثال، پژوهش‌های آینده می‌توانند نشان دهند که چگونه یک برنامه نگهداری پیشگیرانه از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر از اجرای برخی اقدامات سازه‌ای است، یا این‌که چگونه یک سیستم هشدار زودهنگام می‌تواند زیرساخت‌های فیزیکی را تقویت نماید. علاوه بر این، در پژوهش‌های آینده، می‌توان سناریوهای مدیریتی را بر پایه فازبندی زمانی اجرا نیز مورد ارزیابی قرار داد.

پی‌نوشت‌ها

1- Resilient
2- Robust
3- Nature-Based Flood Control Practices
4- Fuzzy Logic
5- Info-Gap
6- Non-Dominated

7- New York City Department of Environmental Protection
8- Urban Drainage System
9- Information Gap Decision Theory
10- Robustness
11- Opportuneness
12- Windfall Reward
13- Fuzzy Inference Systems (FIS)
14- Environmental Protection Agency’s Storm Water Management Model
15- Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II
16- User Friendly
17- Overflow
18- Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation
19- Performance Model
20- Porous Pavements
21- Infiltration Trenches
22- Grass Swales
23- Bio-Retention Cells
24- Rain Barrels
25- Tournament Size
26- Crossover Rate
27- Mutation Rate
28- Stakeholders

۶- منابع

Agonafir C, Zheng T (2026) Structured exploration of machine learning model complexity for spatio-temporal forecasting of urban flooding. Urban Water Journal 23(3):380-407

Assaf M N, Manenti S, Creaco E, Giudicianni C, Tamellini L, Todeschini S (2024) New optimization strategies for SWMM modeling of stormwater quality applications in urban area. Journal of Environmental Management 361:121244

Ball J E, Babister M K, Nathan R, Weeks W, Weinmann P E, Retallick M, Testoni I, (2016) Australian rainfall and runoff: A guide to flood estimation. © Commonwealth of Australia (Geoscience Australia)

Bates B C, Campbell E P (2001) A Markov chain Monte Carlo scheme for parameter estimation and inference in conceptual rainfall-runoff modeling. Water Resources Research 37(4):937-947

Bekkaye J, Jafari N (2023) Flood waste debris quantification and comparison based on the removal and disposal operation: A post-disaster study of Beaumont, Texas Following Hurricane Harvey. Natural Hazards Review 24(4):05023008

Ben-Haim Y (2006) Info-Gap decision theory: Decisions under severe uncertainty. Elsevier, London, UK

Ben-Haim Y (2012) Why risk analysis is difficult, and some thoughts on how to proceed. Risk Analysis: An International Journal 32(10):1638-1646

Beven K, Binley A (1992) The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes 6(3):279-298

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

Despotovic J, Plavsic J, Stefanovic N, Pavlovic D (2005) Inefficiency of storm water inlets as a source of urban floods. Water Science and Technology 51(2):139-145

Dolatshahi M, Kerachian R (2023) A resilience-based robustness evaluation framework for sustainable urban flood management under uncertainty. Environmental Science and Pollution Research 30(60):126195-126213

Duncan S J (2008) Including severe uncertainty into environmentally benign life cycle design using information-gap decision theory. Georgia Institute of Technology

Eckart K, McPhee Z, Bolisetti T (2018) Multiobjective optimization of low impact development stormwater controls. Journal of Hydrology 562:564-576

Ghaffari H, (2024) Uncertainty-based urban runoff management with emphasis on flood damage estimation. M.Sc. Thesis, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology (in Persian)

Ghaffari H, Haghbin S, Mahjouri N (2025) Redesigning urban drainage systems under uncertainty: A robust multi-objective approach for data-sparse catchments. Natural Hazards 121(15):17965-17990

Ghanbari M (2011) Determining the performance of the native gardens of Tehran city in order to remove surface runoff pollutants. M.Sc. Thesis, Civil Engineering Faculty, Sharif University of Technology (in Persian)

Ghodsi S H, Kerachian R, Estalaki S M, Nikoo M R, Zahmatkesh Z (2016) Developing a stochastic conflict resolution model for urban runoff quality management: Application of info-gap and bargaining theories. Journal of Hydrology 533:200-212

Ghodsi S H, Zahmatkesh Z, Goharian E, Kerachian R, Zhu Z (2020) Optimal design of low impact development practices in response to climate change. Journal of Hydrology 580:124266

Haghbin S, Mahjouri N (2023) Quantifying and improving flood resilience of urban drainage systems based on socio-ecological criteria. Journal of Environmental Management 339:117799

Haghbin S, Mahjouri N (2025) Deep uncertainty-based design of urban drainage systems considering network blockage and resilience criteria. Results in Engineering 29:108578

Hashemi M S G Z, Tajrishy M, Jalilvan E (2020) The impact of pavement permeability on time of concentration in a small urban watershed with a semi-arid climate. Water Resources Management 34(9):2969-2988

Hashemi M, Mahjouri N (2022) Global sensitivity analysis-based design of low impact development practices for urban runoff management under uncertainty. Water Resources Management 36(9):2953-2972

Hassani M R, Niksokhan M H, Janbehsarayi S F M, Nikoo M R (2023) Multi-objective robust decision-making for LIDs implementation under

climatic change. Journal of Hydrology 617:128954

Iqbal U, Riaz M Z B (2024) Blockage at cross-drainage hydraulic structures–Advances, challenges and opportunities. Heliyon 10(16)

Kamali B (2010) Investigating the performance of permeable pavement in removing pollutants from surface runoff. M.Sc. Thesis, Civil Engineering Faculty, Sharif University of Technology (In Persian)

Kamali M, Delkash M, Tajrishy M (2017) Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff. Journal of Environmental Management 187:43-53

Kotireddy R, Hoes P J, Hensen J L (2018) A methodology for performance robustness assessment of low-energy buildings using scenario analysis. Applied Energy 15(212):428-442

Liu W, Song Z (2020) Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks. Reliability Engineering & System Safety 193:106617

Madigan D, Andersson S A, Perlman M D, Volinsky C T (1996) Bayesian model averaging and model selection for Markov equivalence classes of acyclic digraphs. Communications in Statistics-Theory and Methods 25(11):2493-2519

Mamdani E H, Assilian S (1975) An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man-Machine Studies *7*(1):1-13

Mavrova-Guirguinova M, Mancheva J, Pencheva D (2023) Decision analysis for robust long-term flood management: Uncertainty exploration using probabilistic approach and information-gap decision theory. International Information and Engineering Technology Association 18(1):117-124

Mens M J, Klijn F, De Bruijn K M, Van Beek E (2011) The meaning of system robustness for flood risk management. Environmental Science & Policy 14(8):1121-1131

Mohammadiun S (2019) Design and rehabilitation of urban stormwater drainage systems using a resilient approach. Ph.D. Thesis, Civil Engineering Faculty, Tarbiat Modares University (In Persian)

Mugume S N, Butler D (2017) Evaluation of functional resilience in urban drainage and flood management systems using a global analysis approach. Urban Water Journal 14(7):727-736

Mugume S N, Gomez D E, Fu G, Farmani R, Butler D (2015) A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems. Water Research 81:15-26

Ng J Y, Fazlollahi S, Dechesne M, Soyeux E, Galelli S (2023) Robust optimal design of urban drainage systems: A data-driven approach. Advances in Water Resources 171:104335

Ollett P, Syme B, Ryan P (2017) Australian rainfall and runoff guidance on blockage of hydraulic structures: Numerical implementation and three case studies. Journal of Hydrology New Zealand 56(2):109-122

Pankaj B S, Jaykrishnan G, Ostfeld A (2022) Optimizing water quality treatment levels for water distribution systems under mixing uncertainty at junctions. Journal of Water Resources Planning and Management 148(5):04022013

Raftery A E, Madigan D, Hoeting J A (1997) Bayesian model averaging for linear regression models. Journal of the American Statistical Association 92(437):179-191

Ranjbar, A., Mahjouri, N. (2020). Multi-objective freshwater management in coastal aquifers under uncertainty in hydraulic parameters. Natural Resources Research 29(4):2347-2368

Rong Q, Liu Q, Yue W, Xu C, Su M (2024) Optimal design of low impact development at a community scale considering urban non-point source pollution management under uncertainty. Journal of Cleaner Production 434:139934

Rossman L, Huber W (2016) Storm Water Management Model reference manual. USEPA Office of Research and Development. Washington DC, EPA, 353p

Shafeeque M, Luo Y, Arshad A, Muhammad S, Ashraf M, Pham Q B (2023) Assessment of climate change impacts on glacio-hydrological processes and their variations within critical zone. Natural Hazards 115(3):2721-2748

Smith T J, Marshall L A (2008) Bayesian methods in hydrologic modeling: A study of recent advancements in Markov chain Monte Carlo techniques. Water Resources Research 44(12)

Soltani M, Kerachian R, Nikoo M R, Noory H (2018) Planning for agricultural return flow allocation: Application of info-gap decision theory and a nonlinear CVaR-based optimization model. Environmental Science and Pollution Research 25(25):25115-25129

Sweetapple C, Fu G, Farmani R, Butler D (2022) General resilience: Conceptual formulation and quantitative assessment for intervention development in the urban wastewater system. Water Research 211:118108

Tansar H, Duan H F, Mark O (2023) A multi-objective decision-making framework for implementing green-grey infrastructures to enhance urban drainage system resilience. Journal of Hydrology 620:129381

Tebyanian N, Fischbach J, Lempert R, Knopman D, Wu H, Iulo L, Keller K (2023) Rhodium-SWMM: An open-source tool for green infrastructure placement under deep uncertainty. Environmental Modelling & Software 163:105671

Tehran Atlas (2011) Atlas of Tehran Metropolis; Municipality of Tehran. website: http://atlas.tehran.ir/ (last access: 3 October 2024)

Tehran Engineering and Technical Consulting Organization (TETCO) (2011) Tehran stormwater management master plan report. Technical and Development Deputy of Tehran Municipality (In Persian)

Wang Q, Zhou Q, Lei X, Savić D A (2018) Comparison of multiobjective optimization methods applied to urban drainage adaptation problems. Journal of Water Resources Planning and Management 144(11):04018070

Wang T, Zhang L, Zhai J, Wang L, Zhao Y, Liu K (2024) Automatic calibration of SWMM parameters based on multi-objective optimisation model. Journal of Hydroinformatics 26(3):683-706

Weeks W, Rigby T (2016) Blockage of hydraulic structures. Australian rainfall & runoff-A guide to flood estimation

Xu H, Ma C, Xu K, Lian J, Long Y (2020) Staged optimization of urban drainage systems considering climate change and hydrological model uncertainty. Journal of Hydrology 587:124959

Yang Z, Liu J, Feng Y, Wang J, Wang H, Li C (2025) An intelligent SWMM calibration method and identification of urban runoff generation patterns. Frontiers in Environmental Science 13:1582306

Yazdi J (2018) Improving urban drainage systems resiliency against unexpected Blockages: A Probabilistic approach. Water Resources Management 32(14):4561-4573

Yoo S, Ahn K H (2025) Exploring event-based calibration approaches for semi-distributed urban hydrologic models in data scarce urban watersheds under climate change. Journal of Hydrology 660:133498

Zadeh L A (1965) Fuzzy sets. Information and Control 8(3):338-353

Zarandi A (2013) Selection the optimum combination of best management practices (BMPs) with economic considerations in improving the quality of urban runoff in Tehran Ph.D. Thesis, Civil Engineering Faculty, Kharazmi University (in Persian)

Zarei M (2021) Optimization of low impact development strategies for urban flood management with emphasis on the blockage problem M.Sc. Thesis, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology (in Persian)

Zhang X, Wang K, Wang T (2021) SWMM-based assessment of the improvement of hydrodynamic conditions of urban water system connectivity. Water Resources Management 35(13):4519-4534

Zimmermann W, Cunningham S (1991) Visualization in Teaching and Learning Mathematics. Mathematical Association of America