Iranian Hydraulic Association
Journal of Hydraulics

Research Article
https://doi.org/10.30482/jhyd.2021.281587.1520

Global Resilience Analysis in Urban Wastewater Collection Networks (Case Study: Valiasr Town, Torbat Heydariyeh)

Behnaz Kamali [1], Alinaghi Ziaei [2*], Ali Asghar Beheshti[3], Raziyeh Farmani[4]

1- Ph.D. student in Hydraulic structures, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
2- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
3- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
4- Associate Professor, Department of Engineering, University of Exeter, Exeter, UK.

* **an-ziaei@um.ac.ir**

Received: 18 April 2021, Accepted: 24 June 2021 J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Resilience analysis of urban infrastructures such as sewerage systems due to different stressors is too crucial. Failure in these infrastructures may lead to economic, social, health and environmental consequences. The structural resilience of system can be analyzed in all failure levels based on the Global Resilience Analysis (GRA) method. To perform GRA under different scenarios of pipe collapse and blockage, it is required to evaluate the performance of the system in all possible link failure combinations which could take long time in real sewerage networks.

Resilience is defined as an evaluation system performance in exceptional conditions (Mugume and Butler 2016). Various conditions threaten sewer networks which some of them are unknown. Each event might have several different consequences or different events can lead to the same end states (Johnson et al. 2011). Accordingly, traditional risk analysis is not appropriate to investigate sewer networks, because it emphasizes on defining and evaluating the probability of an event besides its consequences. Therefore, the middle state analysis method is used to evaluate the system performance based on consequences caused by different and unknown threats. In this approach, the consequences of the events are investigated regardless of their type to represent all the potential modes of failure (Butler et al. 2014).

Johnson (2011) presented a method for the global vulnerability analysis (GVA) of technical infrastructures and used it for an empirical analysis of the electrical distribution systems. Mugume et al. (2015) introduced GRA in urban drainage network based on the middle state approach .In GRA, network performance is evaluated from zero to 100 percent failure levels and then the resilience is determined for different levels. This method has four steps. Firstly, the failure mode needs to be identified. In the second step, the system stress associated with the failure mode and the simulation manner are identified. Then, the system corresponding strain is detected and determined how to measure it. And finally, the failure mode strains are simulated under increasing stress magnitude up to 100 percent of maximum stress (Mugume et al., 2015).

Mugume et al. (2015) used the sequential random link selections method for sewer networks in order to overcome GRA's computational challenges. Diao et al. (2016) proposed a semi

random selection method for GRA and applied it to water distribution systems. In their method, at each stress magnitude a fixed number of failure scenarios are generated randomly and $\mathbf{2}\lfloor \boldsymbol{c} - (\boldsymbol{c_f} - \mathbf{1}) \rfloor$ number of failure scenarios are generated in a targeted manner, where $\boldsymbol{c}$ and $\boldsymbol{c_f}$ are total and failed components, respectively. Atashi et al (2020a) also used the same selection method as Diao et al. (2016) to determine the total number of scenarios in order to evaluate the resilience of water distribution systems based on location of isolation valves. In Diao et al. (2016), the total number of scenarios is directly related to the number of network links but Mugume et al. (2015) used a convergence analysis method to determine the required number of scenarios. This method is more generalizable to use in each network, because the effect of hydraulic properties is considered to determine the required number of scenarios. They showed that for an urban drainage system (UDS), by considering a sufficient number of random failure sequences the deviation percentage of GRA results are not significant, in all failure level. It means that, for one failure level if a sufficient number of scenarios are selected randomly, the average resilience for them is approximately equal to the average resilience of all scenarios of the failure level. So, to analyze global resilience with less time and computational cost it is necessary to use a scenario selection method which discover the extreme scenarios in different failure levels to obtain more accurate GRA results.

Methodology: In this study, a scenario selection method is introduced based on the roulette wheel to estimate GRA results without simulation all possible scenarios. In the proposed method, scenarios which lead to the minimum and maximum resilience at each failure level are identified as strategical scenarios and participated in generating (selecting) scenarios of the next failure level. In each failure level, the probability of a scenario being strategic is estimated by a Multi-Criteria Decision Making (MCDM) (Mardani et al., 2015). The scenarios with the highest probabilities are selected to generate roulette wheel. Finally, scenarios of the next failure level are generated by selecting candidates from roulette wheel and adding a random link to the selected candidates.

Results and Discussion: The results of the simulations in the case study show that the minimum, mean and maximum resilience values was estimated by the proposed method with RMSE less than 0.025 and 0.022 compared with simulating all possible scenarios, respectively. Also, the proposed method has been able to perform better than the random selection method in predicting the scenarios of the extreme points of the global resilience function.

Conclusion: In this article, a simple and rapid approach was presented for investigating structural resilience in sewer networks based on GRA. To properly cover the large space of failure scenarios that is a challenge in the real networks, a selection method is proposed based on the roulette wheel to identify the most strategical combination of failed pipes in each failure level.

Keywords: Real Sewage Network, Scenario Reduction Method, Roulette Wheel, Multi-Criteria Decision, Strategic Scenarios.

© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.

This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

انجمن هیدرولیک ایران
نشریه هیدرولیک

مقاله پژوهشی
https://doi.org/10.30482/jhyd.2021.281587.1520

تحلیل تاب‌آوری جامع در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری (مطالعه موردی: شهرک ولیعصر شهرستان تربت حیدریه)

بهناز کمالی [۱]، علی نقی ضیائی [۲*]، علی اصغر بهشتی [۳]، راضیه فرمانی [۴]

۱- دانشجوی دکترای سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.
۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.
۳- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.
۴- دانشیار، گروه مهندسی، دانشکده مهندسی، دانشگاه اکستر، انگلستان.

[*] **an-ziaei@um.ac.ir**

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۳ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: ارزیابی تاب‌آوری شبکه‌های فاضلاب شهری در مقابل تهدیدها همواره به عنوان یکی از مسائل اساسی در طراحی و بررسی عملکرد این زیرساخت مطرح است. ناکارآمدی در این شبکه‌ها می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری در بخش‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و سلامتی به همراه داشته باشد. اما از آنجاییکه بخشی از این تهدیدها ماهیتی نامشخص و یا تاثیراتی غیرقابل پیش‌بینی دارند، روش تحلیل تاب‌آوری جامع می‌تواند معیار خوبی برای ارزیابی این شبکه‌ها باشد. اما مهمترین چالش در پیاده‌سازی این روش، پیچیدگی زمانی بالای آن در شبکه‌های شهری به دلیل بالا بودن تعداد لوله‌ها است. در این پژوهش، یک روش انتخاب سناریو مبتنی بر گردونه شانس و تصمیم‌گیری چندمعیاره جهت تخمین نتایج تحلیل تاب‌آوری جامع در شبکه‌های فاضلاب شهری بدون نیاز به شبیه‌سازی تمام سناریوهای ممکن، ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها در شبکه مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقادیر کمینه، میانگین و بیشینه تابع تاب‌آوری جامع در سطوح شکست با استفاده از روش پیشنهادی، به ترتیب با مقادیر جذر میانگین مربعات خطای ۰/۰۳۳، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۰۲ تخمین زده شده است. همچنین، روش پیشنهادی توانسته است عملکرد مناسب‌تری نسبت به روش انتخاب تصادفی در پیش‌بینی سناریوهای تشکیل‌دهنده نقاط اکسترمم تابع تاب‌آوری جامع داشته باشد.

کلید واژگان: شبکه واقعی فاضلاب، روش کاهش سناریو، گردونه شانس، تصمیم‌گیری چندمعیاره، سناریوهای استراتژیک.

۱- مقدمه

سامانه‌های فاضلاب یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های شهری هستند. شبکه فاضلاب شهری وظیفه گردآوری فاضلاب و انتقال آن به تصفیه‌خانه را برعهده دارد (Anbari and Tabesh, 2015). توسعه شهرنشینی باعث افزایش خطر بالازدگی فاضلاب و آلودگی بیشتر در سامانه‌های گردآوری رواناب سطحی می‌شود. همچنین، شبکه فاضلاب به علت مدفون بودن اجزا در زیر زمین، نسبت به تغییرپذیری‌های زمینیِ گذرا، رانش، زلزله و تغییر شکل دائمی زمین آسیب‌پذیر است (Sweetapple et al., 2018). سامانه‌های فاضلاب و رواناب سطحی، در سراسر جهان دارای مسئله‌هایی مانند ظرفیت نامناسب، شکست‌های ساختاری و خرابی لوله‌ها هستند که منجر به آسیب‌های ساختاری همچون نشت فاضلاب، اختلال‌های ترافیکی، فرسایش خیابان، آلودگی آب‌های محلی و ... می‌شوند (Juan-García et al., 2017).

عملکرد نامناسب سامانه‌های فاضلاب می‌تواند به شدت بر روی تاب‌آوری جامعه تاثیرگذار باشد (Tabesh et al., 2016). جلوگیری از این اختلال‌های عملکردی وابسته به برنامه بهره‌برداری و نگهداری این زیرساخت است که با شناخت نقطه‌های بحرانی، می‌توان با انجام بازرسی‌های مبتنی بر وضعیت سامانه، عملکرد آن را به میزان قابل توجهی افزایش داده و تاب‌آوری سامانه را بهبود بخشید (Juan-García et al., 2017). مفهوم تاب‌آوری در سال ۱۹۷۰ میلادی در آغاز در حوزه محیط‌زیست معرفی شد و به ظرفیت یک زیست‌بوم برای زنده ماندن، سازگاری و رشد، در زمانِ تغییرپذیری‌های پیش‌بینی

شده، اطلاق شد. سامانه‌ها باید برای رویارویی با عدم‌قطعیت‌ها در آینده، تاب‌آور باشند (Juan-García et al., 2017). تعیین معیاری برای اندازه‌گیری واقعی این تاب‌آوری چالشی است که همواره در بررسی و ارزیابی‌های پژوهشگران مطرح بوده است. Johnson (2011) برای نخستین بار، یک روش برای تحلیل آسیب‌پذیری جامع[1] زیرساخت‌های سامانه‌های توزیع برق ارائه داد. پس از آن، Mugume et al. (2015) تحلیل تاب‌آوری جامع[2] (GRA) را برای بررسی تاب‌آوری شبکه‌های گردآوری رواناب شهری معرفی کردند. در این روش، عملکرد شبکه از صفر تا صد درصد سطح ناکارآمدی (شکست) ارزیابی می‌شود. این روش، در چهار مرحله پیاده‌سازی شده است (Mugume, 2015)؛

۱) در آغاز نوع ناکارآمدی شناسایی می‌شود. بررسی انسداد در شبکه‌های فاضلاب به علت هرگونه تهدید، در دسته‌ی شکست‌های ساختاری قرار می‌گیرد (Butler et al., 2016).

۲) آن‌گاه نوع تهدید متناظر با ناکارآمدی تعیین شده و روشی برای شبیه‌سازی آن مشخص می‌شود. (برای شبیه‌سازی انسداد Mugume et al. (2016) از دو روش کاهش قطر لوله‌ی مورد نظر و یا افزایش ضریب زبری لوله‌ی تحت تنش استفاده کردند)

۳) آسیب ناشی از ناکارآمدی و روشی برای اندازه‌گیری آن تعیین می‌شود.

۴) ناکارآمدی مورد بررسی تحت بزرگی تنش تا ۱۰۰ درصد بیشینه تهدید شبیه‌سازی می‌شود. بنابراین، در آغاز همه‌ی اجزای مورد تنش (برای مثال لوله‌ها) به صورت تکی دچار شکست شده و در سطح‌های بالاتر به شمار اجزای مورد شکست اضافه خواهد شد تا اینکه همه‌ی اجزا همزمان (۱۰۰٪ ناکارآمدی) شکسته شوند.

از آنجا که روش GRA، شبکه را در همه‌ی سطح‌های خرابی بررسی می‌کند، نسبت به هر روش دیگری که این جامعیت را ندارد، نتایج قابل اطمینان‌تری را ارائه می‌دهد (Davis et al., 2013). اما شبیه‌سازی همه‌ی سناریوهای ممکن از نظر محاسبه‌ای پرهزینه و زمان‌بر است.

Mugume et al. (2015) برای غلبه بر چالش‌های محاسبه‌ای GRA از روش انتخاب تصادفی متوالی برای شبکه‌های گردآوری رواناب استفاده کردند. Diao et al. (2016) یک روش انتخاب نیمه‌تصادفی برای GRA پیشنهاد و آن را در سامانه‌های توزیع آب اعمال کردند. در روش آن‌ها در هر سطح تنش، شمار ثابتی از سناریوهای شکست به طور تصادفی و به شمار $\lfloor N - 2 \rfloor (N_f - 1) \rfloor$ سناریو به صورت هدفمند، تولید می‌شود، در حالی که N و N_f به ترتیب شمار کل لوله‌های شبکه و شمار لوله‌های ناکارآمد در هر سطح هستند. Atashi et al. (2020b) نیز از روش انتخابی همانند Diao et al. (2016) برای تعیین شمار کل سناریوها به منظور ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های توزیع آب برمبنای محل قرارگیری شیرهای جداسازی استفاده کردند. در روش Diao et al. (2016)، شمار کل سناریوها به طور مستقیم با شمار لوله‌های شبکه ارتباط دارد. اما Mugume et al. (2015) از روش تحلیل همگرایی برای تعیین شمار سناریوهای مورد نیاز استفاده کردند. این روش برای استفاده در هر شبکه قابل تعمیم است، زیرا تأثیر ویژگی‌های هیدرولیکی برای تعیین شمار سناریوهای مورد نیاز در نظر گرفته می‌شود. اگرچه، روش تحلیل همگرایی برای تعیین شمار کافی انتخاب تصادفی سناریوها استفاده می‌شود، اما بهبود روش انتخاب نیز می‌تواند در افزایش دقت نتایج موثر بوده و نتایجی ایجاد کند که به تاب‌آوری جامع محاسبه شده بر مبنای شبیه‌سازی همه‌ی سناریوهای ممکن، نزدیکتر باشد. بر همین اساس، در این پژوهش یک روش انتخاب سناریوی مبتنی بر گردونه شانس[3] برای ارزیابی تاب‌آوری جامع ارائه شده است که در آن سناریوهای منتخب در هر سطح شکست، بر مبنای امتیازبندی سناریوهای سطح شکست پیشین تولید می‌شود. فرآیند امتیازدهی در روش پیشنهادی با استفاده از یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره[4] (MCDM) صورت می‌پذیرد. آن‌گاه روش پیشنهادی در شبکه شهرک ولیعصر تربت‌حیدریه آزمون شود.

۲- مواد و روش‌ها

همان‌طور که در تعریف تحلیل جامع تاب‌آوری بیان شد، شبکه فاضلاب مورد بررسی باید در همه‌ی سطح‌های شکست ارزیابی

[1] Global vulnerability analysis (GVA)
[2] Global resilience analysis (GRA)
[3] Roulette wheel
[4] Multi-criteria decision making (MCDM)

شد. برای این منظور نیاز است همه‌ی ترکیب‌های ممکن شکست در هر سطح، شبیه‌سازی شود. بنابراین، اگر در یک شبکه شمار لوله‌ها N باشد، در هر سطح شکست باید شمار $C(N,r)=\frac{N!}{r!(N-r)!}$ شبیه سازی صورت گیرد که r بیانگر شمار لوله‌های شکسته شده در سطح شکست r است. بنابراین، شمار کل شبیه‌سازی‌های مورد نیاز برابر است با:

$$F(N)=\sum_{r=1}^{n}\frac{N!}{r!\,(N-r)!} \qquad (1)$$

که شبیه‌سازی این شمار سناریو حتی برای شبکه‌های شهری کوچک نیز از نظر زمانی ناممکن است و می‌تواند چند سال به طول بیانجامد. بنابراین، در مسئله تحلیل تاب‌آوری جامع نیز مانند بسیاری از مسائل بهینه‌سازی که با فضای جستجوی بزرگی روبرو هستند، به بهره‌گیری از روش انتخاب سناریو برای کاهش شمار شبیه‌سازی‌ها نیاز است.

در این پژوهش، روشی ارائه شده است تا با استفاده از آن بتوان بدون شبیه‌سازیِ همه ی سناریوهای ممکن و با انتخاب هدفمند شمار محدودی از سناریوها، نتایجی حاصل شود که به نتایج تحلیل تاب‌آوری جامع نزدیک‌تر باشد. از آنجایی‌که به طور معمول تاب‌آوری در یک شبکه فاضلاب بر مبنای یک تابع محاسبه می‌شود، می‌توان سناریوهای ممکن را به دو مجموعه تقسیم کرد. مجموعه اول سناریوهایی هستند که به ازای آن‌ها میزان‌های اکسترمم تابع تاب‌آوری در هر سطح شکست ایجاد می‌شود. اما مجموعه دوم، سناریوهایی هستند که در هر سطح شکست، میزان تاب‌آوری به ازای آن‌ها میزان های همانند است. Mugume et al. (2015) با انجام یک روش تحلیل همگرایی، نشان داده‌اند که برای یک شبکه فاضلاب شهری با ۸۱ لوله، در صورت انتخاب دست کم ۲۰۰ سناریو به صورت تصادفی در هر سطح شکست، میزان درصد انحراف میزان ناچیزی می‌شود. این بدان معنی است که برمبنای نتایج حاصل از تحلیل همگرایی، اگر ما در هر سطح شکست شمار مناسبی از سناریوها را بصورت تصادفی انتخاب کنیم، میانگین تاب‌آوری به ازای این سناریوها بسیار نزدیک به حالتی است که شمار بیشتری از سناریوها بصورت تصادفی انتخاب شوند. پس می توان با انتخاب شماری مناسب از سناریوها بصورت تصادفی، مجموعه دوم از سناریوها را در فرآیند تحلیل تاب آوری جامع پوشش داد. بنابراین برای دست یافتن به نتایجی نزدیک به نتایج تاب‌آوری جامعِ حاصل از شبیه‌سازی همه‌ی سناریوهای ممکن، نیاز است روشی اتخاذ شود که با استفاده از آن به سناریوهایی دست یافت که در مجموعه اول قرار دارند، یعنی سناریوهایی که در هر سطح شکست تاب‌آوری کمینه و بیشینه را ایجاد می‌کنند.

در این پژوهش یک روش انتخاب سناریو چند معیاره مبتنی بر گردونه شانس ارائه شده است که هدف آن یافتن سناریوهایی است که به ازای آن ها میزان‌های اکسترمم تابع تاب‌آوری در هر سطح شکست، حاصل شود. بر همین مبنا روش پیشنهادی بدین صورت عمل می‌کند که سناریوهای شبیه‌سازی شده در هر سطح شکست از نظر چند معیار مورد ارزیابی قرار می‌گیرند تا احتمال اینکه این سناریو پس از اضافه شدن یک لوله شکسته شده دیگر به آن، بتواند یکی از نقطه ها اکسترمم تابع تاب‌آوری در سطح شکست بعدی را تشکیل دهد، برآورد شود. پس از مشخص شدن این احتمال برای سناریوهای آن سطح شکست، شماری از سناریوها که بیشترین میزان احتمال را به خود اختصاص داده‌اند، وارد فرآیند تولید سناریوهای سطح شکست بعدی می‌شوند. در این پژوهش به سناریوهایی که انتخاب می‌شوند تا در ایجاد سناریوهای سطح بعدی شرکت نمایند، سناریوهای راهبردی گفته می شود. این روند برای همه ی سطح‌های شکست طی می شود تا در نهایت تحلیل تاب‌آوری جامع بر مبنای سناریوهای انتخاب شده، صورت پذیرد.

۲-۱- انتخاب سناریوهای راهبردی

در روش پیشنهادی انتخاب سناریوها، سناریوهای راهبردی در هر سطح شکست در فرآیند انتخاب سناریوهای سطح شکست بعدی، شرکت داده می‌شوند. روش گردونه شانس یک عامل انتخابگر است که اغلب در الگوریتم‌های ژنتیک و تکاملی استفاده شود. در این روش به هر یک از گزینه‌ها در یک نسل جمعیتی، یک قطاع از یک دایره تخصیص داده می شود که اندازه آن قطاع برمبنای تابع ارزیاب[1] گردونه شانس تعیین می‌شود. سپس، به صورت تصادفی انتخاب‌هایی از گردونه شانس صورت می‌گیرد تا بوسیله آن‌ها جمعیت نسل بعدی ایجاد شود. در این روش، هر گزینه‌ای که بخش بیشتری از دایره را به خود اختصاص دهد، شانس بیشتری برای تولید نسل بعدی دارد. بنابراین، نیاز است

[1] Fitness function

سناریوها در یک سطح شکست توسط تابع ارزیاب، بررسی شوند تا میزان شانس آن‌ها برای حضور در فرآیند انتخاب و تولید سناریوهای سطح شکست بعدی مشخص شود. از آنجایی که در روش پیشنهادی، هدف یافتن سناریوهای تشکیل دهنده نقطه‌های اکسترمم تابع تاب آوری در هر سطح شکست است، بنابراین تابع ارزیاب گردونه شانس باید به نوعی تعریف شود که در هر سطح شکست، امتیاز بیشتری به سناریوهایی بدهد که می‌توانند در سطح‌های بعدی شکست، نقطه‌های اکسترمم تابع تاب‌آوری را تشکیل دهند.

تابع ارزیاب می‌تواند همان تابع تاب‌آوری باشد. اگرچه تابع اندازه‌گیری تاب‌آوری می‌تواند تابعی از چند معیار باشد، اما انتخاب مناسبی برای امتیاز بندی سناریوها بر مبنای چند معیار نیست. فرض کنید تابع اندازه‌گیری تاب‌آوری به صورت زیر باشد:

$$Res = 1 - \frac{V_f}{V_T} \times \frac{t_f}{t_T} \qquad (2)$$

که در آن، V_T و V_f به ترتیب حجم کل ورودی فاضلاب به شبکه و حجم بالازدگی فاضلاب و t_T و t_f به ترتیب زمان کل انسداد لوله‌ها و زمان ناکارآمدی شبکه است. در این صورت دو سناریو می توانند دارای یک میزان تاب‌آوری باشند اما عملکرد آن‌ها از نظر دو عامل حجم بالازدگی و زمان ناکارآمدی بصورت جداگانه، با هم متفاوت باشد. یعنی یک سناریو دارای حجم بیشتر بالازدگی و زمان کمتر ناکارآمدی باشد اما دیگری دارای حجم بالازدگی کمتر اما زمان ناکارآمدی بیشتری باشد. در این صورت اگر تابع تاب‌آوری به عنوان تابع امتیازدهی استفاده شود، به هر دوی این سناریوها یک امتیاز یکسان می دهد. مسئله دیگر این است که اگر تابع تاب‌آوری به عنوان تابع ارزیاب انتخاب شود عملکرد هر سناریو به دور از عملکرد دیگر سناریوها ارزیابی می‌شود که این مساله نیز می‌تواند باعث انتخاب نادرستی شود. در مسئله‌هایی که عملکرد یک گزینه‌ها بر مبنای چند معیار امتیاز دهی می‌شود، بررسی عملکرد آن‌ها از نظر معیارها به صورت جداگانه مهم است چون معیارها خود می‌توانند وزن‌های مختلفی داشته باشند. به عنوان مثال، معیاری که در آن رفتار سناریوها همانند باشد، باید وزن کمتری در امتیازدهی داشته باشد و برعکس معیاری که طبق آن سناریوها رفتارهای متفاوتی دارند، باید وزن و تاثیر بیشتری در امتیازدهی داشته باشد. دلیل این موضوع این است که در مسائل تصمیم گیری چند معیاره، هرچه میزان تنوع در مقادیر یک معیار بیشتر باشد، میزان اطلاعات حاصل از بررسی آن معیار نیز بیشتر است. این در واقع همان مفهوم آنتروپی در نظریه اطلاعات است که بیانگر یک میزان عددی از میزان اطلاعات موجود در یک متغیر است. بر همین اساس، در این پژوهش، به جای تعریف یک تابع از معیارها به عنوان تابع ارزیاب گردونه شانس، یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بر پایه آنتروپی شانون[1] (Shannon, 1948) برای امتیازدهی به سناریوها را پیشنهاد می‌شود که در آن آغاز برای وزن‌دهی به معیارها از روش آنتروپی شانون استفاده می‌شود و آن‌گاه برای امتیازدهی به سناریوها، از روش تاپسیس[2] (Hwang et al., 1993) استفاده خواهد شد.

بر مبنای همین دیدگاه، با فرض اینکه شمار S سناریو برای سطح شکست $i-1$ توسط روش پیشنهادی انتخاب شده است و بر مبنای تحلیل آن‌ها قصد انتخاب S سناریو برای سطح شکست i را داریم، روش پیشنهادی برای انتخاب این شمار سناریو از بین همه‌ی سناریوهای ممکن در سطح شکست i، در ۳ مرحله اجرا می شود که در ادامه آورده شده است.

۲-۱-۱- وزن دهی معیارها

در این مرحله بر مبنای سناریوهای انتخاب شده برای سطح شکست $i-1$، با استفاده از روش آنتروپی شانون معیارهای انتخاب شده برای امتیازدهی سناریوها وزن‌دهی می‌شوند. برای این منظور، درآغاز میزان هر معیار به ازای هر سناریو مشخص شده و ماتریس سناریو-معیار که در آن سناریوها سطرها و معیارها ستون‌های ماتریس را تشکیل می‌دهند، تولید می‌شود. سپس، این ماتریس بر مبنای میزان‌های هر ستون نرمال می‌شود. اگر مقادیر درایه‌های ماتریس نرمال‌شده با q_{ij} نشان داده شود، میزان آنتروپی هر معیار از فرمول زیر بدست می‌آید (Shannon, 1948):

$$E_j = -k \sum_{i=1}^{S} q_{ij} \times \ln q_{ij}\,, j = 1, \dots, m \qquad (3)$$

که در آن $\boldsymbol{k}$ یک ضریب ثابت و $\boldsymbol{m}$ شمار معیارها است. در مرحله بعد فاصله هر معیار از آنتروپی آن و در نهایت وزن هر معیار بدست می‌آید.

[1] Shannon entropy

[2] TOPSIS

۲-۱-۲- امتیازدهی سناریوها

با توجه به اینکه در امتیازدهی سناریوها چند معیار دخالت دارند بنابراین نیاز است تا از یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شود. در این روش عنصرها بر مبنای میزان نزدیکی یا همانندی به راه‌حل مطلوب (منفی یا مثبت) امتیازدهی می‌شوند. از برتری‌های این روش این است که معیارها می‌توانند ماهیت مثبت یا منفی داشته باشند. به عنوان مثال حجم بالازدگی فاضلاب در شبکه‌های فاضلاب ماهیت منفی دارد اما زمان ناکارآمدی می‌تواند ماهیت مثبت داشته باشد. به این دلیل که برای دو سناریو با حجم بالازدگی فاضلاب همانند، سناریویی بحرانی‌تر است که در آن حجم بالازدگی در بازه زمانی کوتاه‌تری ایجاد شده باشد. زیرا با توجه به زمان مورد نیاز برای تعمیر و رفع تهدید پیشامد کرده، بازه زمانی کوتاه بالازدگی، در حجم همانند، معیاری برای شکست است. بنابراین هرچه میزان زمان ناکارآمدی بیشتر باشد، آن سناریو به راه‌حل مثبت مطلوب نزدیک‌تر است و هرچه حجم بالازدگی فاضلاب بیشتر باشد آن سناریو به راه‌حل منفی مطلوب نزدیک‌تر است. از دیگر برتری-های این روش نبود محدودیت در شمار معیارها و سرعت بالای آن در امتیازدهی است. نکته مهم دیگر آن است که خروجی این روشِ تصمیم‌گیری، یک میزان کمی است که می‌تواند بصورت مستقیم برای ایجاد و تقسیم‌بندی قطاع در روش گردونه شانس استفاده شوند.

در روش تاپسیس، پس از ساخت ماتریس سناریو-معیار و نرمال‌سازی میزان‌های، با استفاده از وزن‌های به دست آمده در روش شانون ماتریس نرمال‌شده و وزن‌دار را بدست می‌آید.

در مرحله بعدی، اگر معیاری ماهیت مثبت داشت، به ترتیب بیشترین و کمترین میزان آن بیانگر راه‌حل مثبت مطلوب و راه-حل منفی مطلوب است و اگر معیاری ماهیت منفی داشت، به ترتیب کمترین و بیشترین میزان آن بیانگر راه‌حل مثبت مطلوب و راه‌حل منفی مطلوب است. در مرحله پایانی، امتیاز هر سناریو محاسبه می‌شود (Hwang et al., 1993).

۲-۱-۳- تعیین سناریوهای راهبردی

در این پژوهش برای انتخاب سناریوهایی که در فرآیند تولید سناریوهای سطح شکست بعدی شرکت داده شوند، استفاده از روش گردونه شانس پیشنهاد شده است. برای این منظور پس از امتیازبندی S سناریوی موجود در سطح شکست $i-1$، شمار $k_f \times S$ سناریو با کمترین امتیاز و $k_f \times S$ سناریو با بیشترین امتیاز برای تولید و تقسیم‌بندی قطاع‌های گردونه شانس به عنوان سناریوهای راهبردی انتخاب می‌شوند. ضریب k_f یک میزان در بازه بین صفر تا یک است که به صورت دلخواه تعیین می‌شود.

۲-۲- تولید سناریوهای سطح شکست

در این مرحله از میان همه‌ی سناریوهای ممکن در سطح شکست i، هدف، تولید شمار S سناریو برای ارزیابی تاب‌آوری در این سطح شکست، است. برای این منظور بر مبنای سناریوهای راهبردی در سطح شکست $i-1$ و امتیازهای آن‌ها، اندازه قطاع‌های گردونه شانس در این مرحله مشخص می‌شوند. لازم به یادآوری است سناریوها با کمترین امتیاز پس از انتخاب شدن، با امتیاز $1-p_i$در فرآیند تولید گردونه شانس شرکت داده می‌شوند. چون به همان اندازه‌ای که سناریوهای نزدیک به راه حل مثبت مطلوب، ما را به یافتن سناریوهای تشکیل‌دهنده نقطه‌ها بیشینه تابع تاب‌آوری در سطح شکست بعدی راهنمایی نمایند، سناریوهای نزدیک به راه حل منفی مطلوب می‌توانند ما را به سناریوهای تشکیل‌دهنده نقطه‌های کمینه تابع تاب‌آوری در سطح‌های بعدی، راهنمایی نمایند.

سپس، شمار S انتخاب از گردونه شانس به صورت تصادفی صورت می‌پذیرد. شانس انتخاب هر سناریوی راهبردی برای شرکت در تولید سناریوهای سطح شکست i متناسب با اندازه قطاع مربوطه است. با توجه به اینکه سناریوها انتخاب شده مربوط به سطح شکست $i-1$ بوده، هر کدام ترکیبی از $i-1$ لوله به عنوان لوله‌های شکسته شده هستند. بنابراین، نیاز است به هر کدام از این سناریوها یک لوله به ترکیبِ $i-1$ لوله ای مورد نظر اضافه شود. این فرآیند با انتخاب تصادفی یک لوله از میان مجموعه لوله‌های ناموجود در آن ترکیب، انجام می گیرد. لازم به یادآوری است این فرآیند شامل انتخاب از گردونه شانس و انتخاب تصادفی یک لوله برای اضافه شدن به ترکیب مورد نظر، تا جایی تکرار می شود که شمار S ترکیب i لوله ای غیر تکراری تولید شود.

۲-۳- تولید سناریوهای سطح شکست

در این مرحله با شبیه‌سازی S سناریوی ایجاد شده در مرحله پیش و برمبنای فرمول تاب‌آوری از پیش تعیین شده، میزان تاب‌آوری به ازای هر سناریو محاسبه شده و سپس با تعیین میزان‌های کمینه، میانگین و بیشینه تاب‌آوری در سطح شکست i، تحلیل تاب‌آوری در این سطح شکست پایان می‌پذیرد. با تکرار مرحله‌های یاد شده برای همه ی سطح های شکست، برآورد تاب‌آوری جامع برای شبکه فاضلاب برمبنای روش پیشنهادی در این پژوهش، انجام می‌پذیرد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- منطقه مورد بررسی

شهرک ولیعصر (عج) شهرکی مسکونی در شهرستان تربت حیدریه استان خراسان رضوی است. شبکه فاضلاب این شهرک دارای ۱۰۰۵ لوله‌ی فاضلاب و ۹۹۹ چاهک بازرسی (گره در شبکه شبیه‌سازی شده) است، که برای ۴۲۰۰۰ نفر طراحی شده است. عمر این شبکه حدود ۱۲ سال است و جنس لوله های آن پلی‌اتیلن می‌باشد. همچنین، در این شبکه سرانه فاضلاب ۱۶۹.۶ لیتر بر روز، برآورد شده است. فاضلاب ورودی به هر چاهک بازرسی با توجه به نقشه تراکم جمعیت موجود و با استفاده از روش منحنی تیسن[1] محاسبه شد و همچنین به عنوان الگوی فاضلاب روزانه تولید فاضلاب از الگویی که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، استفاده شد. برای شبیه‌سازی انسداد (ناکارآمدی)

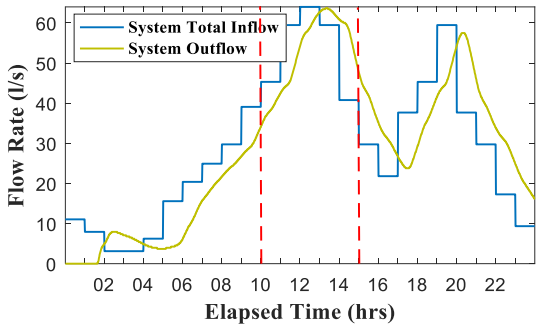

Fig. 1 Sewage inflow and outflow diagram of the network (red dashed line indicates failure time interval)

شکل ۱ نمودار فاضلاب ورودی و خروجی شبکه (خط‌چین قرمز محدوده زمانی ناکارآمدی را نشان می‌دهد)

محدوده اوج منحنی الگوی مصرف که در بین ساعت‌های ۱۰ الی ۱۵ رخ داده است، انتخاب شد. برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی، آزمایش‌های صورت گرفته به دو بخش تقسیم شد که در ادامه با جزئیات بیان شده است. همچنین همه ی آزمایش‌ها با استفاده از شبیه‌سازی شبکه فاضلاب موردنظر در نرم‌افزار EPA-SWMM، کد متن باز آن و با استفاده از یک سامانه رایانه با ویژگی‌های پردازنده Intel(R) Core ™ i7-9750H CPU @ 2.60 GHz با حافظه موقت 8GB انجام شده است.

۳-۲- مقایسه نتایج تاب‌آوری جامع برآورد زده شده برمبنای روش پیشنهادی با نتایج تاب‌آوری جامع واقعی

در بخش اول، شبکه مورد بررسی به ۲۰ منطقه اصلی تقسیم شد و در هر یک از منطقه‌ها، لوله‌ی خروجی از منطقه به عنوان گزینه‌های انسداد انتخاب شد. شکل (۲) منطقه های مشخص شده و لوله‌های گزینه‌ها را نشان می‌دهد. هدف از انتخاب این شمار از لوله‌ها از میان ۱۰۰۵ لوله موجود در شبکه، فراهم سازی امکان شبیه سازی همه‌ی سناریوهای ممکن، از جنبه پیچیدگی زمانی بود. در واقع، در این حالت تحلیل تاب آوری جامع دارای ۲۰ سطح شکست می شود و شمار کل سناریوهای ممکن در همه‌ی سطح های شکست در مجموع برابر با ۱۰۴۸۵۷۵ عدد است که شبیه‌سازی آن‌ها از نظر زمانی قابل انجام است. بنابراین، با شبیه‌سازی همه‌ی سناریوهای ناکارآمدی ممکن و همچنین شبیه‌سازی سناریوهای محدود اما انتخاب شده بر مبنای روش پیشنهادی، امکان مقایسه تاب‌آوری برآورد زده شده برمبنای نتایج روش پیشنهادی با نتایج واقعی تاب‌آوری جامع وجود دارد. لازم به یادآوری است، همه ی ۱۰۰۵ لوله در شبیه‌سازی صورت گرفته با کد متن باز EPA-SWMM شرکت داشته‌اند اما ناکارآمدی تنها در لوله‌های انتخاب شده، اعمال شده است.

برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی، در این بخش از آزمایش‌ها میزان فراسنجه S یعنی شمار سناریوهای انتخاب شده در هر سطح شکست برابر با عدد ۱۰۰ و میزان فراسنجه k_f برابر با میزان ۰/۱ تعیین شده است. یعنی، در هر سطح شکست تنها شمار ۱۰۰ سناریو با استفاده از روش پیشنهادی از میان همه‌ی سناریوهای ممکن انتخاب شده و پس از شبیه‌سازی آن‌ها و

[1] Thiessen

Fig. 2 Zoning of sewage network of Valiasr town (red circles indicate selected pipes in each area)

شکل ۲ تقسیم شبکه فاضلاب شهرک ولیعصر به بیست منطقه (دایره‌های قرمز لوله‌های منتخب در هر منطقه را نشان می‌دهند)

امتیازدهی آن‌ها توسط روش تصمیم‌گیری چند معیاره پیشنهادی، شمار ۱۰ سناریو با کمترین امتیاز و ۱۰ سناریو با بیشترین امتیاز، مشخص شده تا بوسیله آن‌ها گردونه شانس ایجاد و سپس ۱۰۰ سناریوی منتخبِ سطح شکست بعدی تولید شوند. بنابراین، نتایج تحلیل تاب آوری جامع برآورد شده با استفاده از روش پیشنهادی انتخاب سناریو، تنها با استفاده از شبیه‌سازی ۲۰۰۰ سناریو (به ازای ۲۰ سطح شکست) صورت گرفته است. تاب‌آوری جامع واقعی بدست آمده از شبیه سازی همه‌ی سناریوهای ممکن و همچنین تاب آوری جامع برآوردزده شده برمبنای نتایج شبیه‌سازی حاصل از سناریوهای انتخاب شده توسط روش پیشنهادی در شکل (۳) آمده است. برای محاسبه تاب آوری هر سناریو از رابطه (۲) استفاده شده است. بر مبنای نتایج مقایسه به دست آمده، روش پیشنهادی توانسته است کمینه، میانگین و بیشینه تاب‌آوری جامع را به ترتیب با مقادیر جذر میانگین مربعات خطای[1] ۰/۰۳۳، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۰۲ در مقایسه با نتایج واقعی تاب‌آوری جامع، برآورد کند که نشان‌دهنده عملکرد مناسب آن در برآورد با استفاده از شبیه‌سازی شمار محدودی از سناریوها است. در واقع می‌توان گفت، عملکرد روش پیشنهادی در انتخاب سناریوهای راهبردی قابل قبول بوده است.

۳-۳- مقایسه نتایج تاب‌آوری جامع برآورد شده برمبنای روش پیشنهادی با نتایج تاب‌آوری جامع برآورد شده برمبنای روش انتخاب تصادفی

در بخش دوم آزمایش، نتایج تاب‌آوری جامع برآورد شده برمبنای روش پیشنهادی با نتایج تاب‌آوری جامع به دست آمده از روش انتخاب تصادفی که توسط Mugume پیشنهاد شده است، مقایسه شده است.

برای این منظور، از میان ۱۰۰۵ لوله موجود در شبکه مورد بررسی، شمار ۲۷۵ عدد از لوله‌های حیاتی شامل خط انتقال اصلی، جمع‌کننده (کلکتور) و مجراهای خیابان‌های اصلی برمبنای یک داوری مهندسی استخراج شدند تا برای تحلیل تاب‌آوری جامع در فرآیند ساخت سناریو شرکت داده شوند. بنابراین، تحلیل تاب‌آوری جامع در این حالت دارای ۲۷۵ سطح شکست است. با این احتساب، شمار کل سناریوهای ممکن برای تحلیل تاب آوری جامع حدود ۶/۰۷e ۸۲ است که شبیه سازی این شمار سناریو با استفاده از رایانه استفاده شده، حدود **9 *e* + 75** سال به طول می‌انجامد و عملاً ناممکن است. بنابراین، برای ارزیابی روش پیشنهادی، نتایج به دست آمده از آن را با نتایج بدست آمده از روش انتخاب تصادفی، مقایسه شده است.

همان‌طور که در پیش بیان شد، Mugume et al. (2015)، برای تعیین شمار مناسب انتخاب سناریو در هر سطح شکست یک روش تحلیل همگرایی را معرفی و استفاده کرده‌اند. بنابراین، نیاز است در گام اول با استفاده از روش تحلیل همگرایی معرفی شده، شمار مناسب سناریوها در سطح‌های شکست در شبکه مورد بررسی، مشخص شود .

ابتدا در هر سطح شکست ۵ سناریو به صورت تصادفی انتخاب و شبیه‌سازی شد. (۵ × ۲۷۵ سناریو ناکارآمدی)، سپس در هر

[1] RMSE

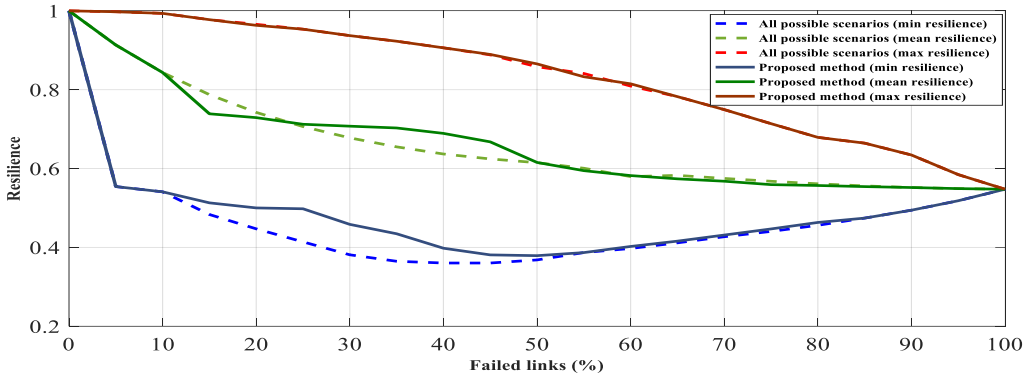

Fig. 3 Comparison of GRA results obtained from simulation in the proposed method and simulation of all scenarios

شکل ۳ مقایسه نتایج GRA بدست آمده ازشبیه سازی به روش پیشنهادی و شبیه سازی همه‌ی سناریوهای ممکن

سطح، ۱۰ سناریو تصادفی انتخاب و شبیه‌سازی شد (۱۰ × ۲۷۵ سناریو ناکارآمدی) و به همین ترتیب ۲۵ (۶۸۷۵ سناریو ناکارآمدی)، ۵۰ (۱۳۷۵۰ سناریو ناکارآمدی)، ۱۰۰ (۲۷۵۰۰ سناریو ناکارآمدی)، ۲۰۰ (۵۵۰۰۰ سناریو ناکارآمدی)، ۵۰۰ (۱۳۷۵۰۰ سناریو ناکارآمدی) و ۱۰۰۰ (۲۷۵۰۰۰ سناریو ناکارآمدی) سناریو به صورت تصادفی در هر مرحله انتخاب و شبیه‌سازی شد تا در کل ۸ مجموعه تحلیل با شمار متفاوت سناریو در سطح‌های ناکارآمدی ایجاد شود. سپس میانگین حجم کل بالازدگی فاضلاب در هر سطح شکست برای همه‌ی مجموعه‌های تصادفی به دست آمد. درصد انحراف معیار بین هر دو مجموعه متوالی برمبنای میزان میانگینِ محاسبه شده، تعیین شد. شکل (۴) نتایج تحلیل همگرایی برای مجموعه‌های بیان شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، اولین همگرایی ایجاد شده بین دو مجموعه متوالی ۵۰ و ۱۰۰ سناریو در هر سطح شکست، رخ داده است. بیشینه میزان درصد انحراف به ازای این دو مجموعه برابر با ۸/۵۳ درصد است. همچنین، در سه مجموعه متوالی بعدی با شمار سناریوی بیشتر، بیشترین درصد انحراف به ترتیب به مقادیر ۶/۹۶، ۵/۵۴ و ۴/۸۱ درصد کاهش یافته است.

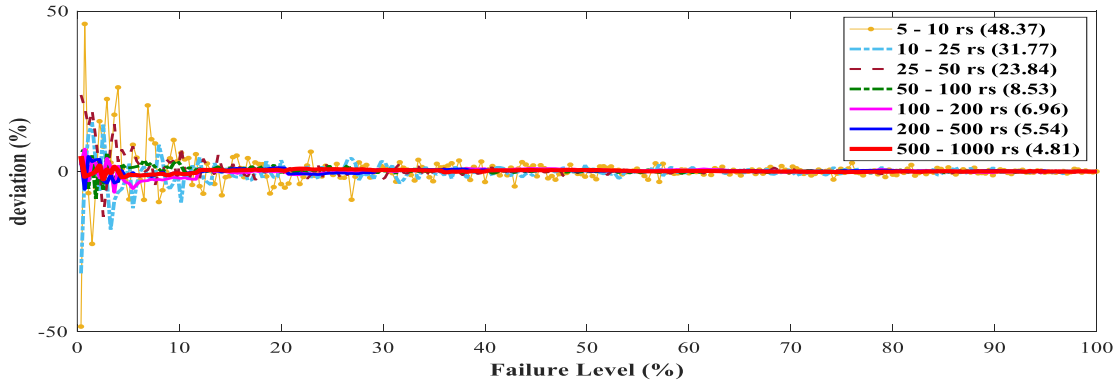

Fig. 4 Results of GRA convergence analysis using random scenarios

شکل ۴ نتایج تحلیل همگرایی GRA با استفاده از سناریوهای تصادفی

با توجه به میزان درصد انحراف به دست آمده برای مجموعه متوالی آخر که زیر ۵ درصد است، شمار ۱۰۰۰ سناریو در هر سطح شکست کافی به نظر می‌رسد. بنابراین، با انتخاب ۱۰۰۰ سناریو بصورت تصادفی و شبیه سازی آن‌ها، فرآیند برآورد تاب‌آوری جامع بر مبنای روش معرفی شده توسط Mugume et al. (2015) انجام شد که نتایج آن در شکل (۵) آمده است.

در مرحله بعد، روش پیشنهادی در این پژوهش برای برآورد تاب‌آوری جامع مورد ارزیابی قرار گرفت. برای مقایسه عادلانه، با توجه به نتایج به دست آمده در تحلیل همگرایی، میزان فراسنجه S یعنی شمار سناریوهای انتخاب شده در هر سطح شکست در

روش پیشنهادی نیز برابر با ۱۰۰۰ درنظر گرفته شد. همچنین، مانند بخش اول آزمایش، میزان فراسنجه k_f در این بخش نیز همان میزان ۰/۱ درنظر گرفته شد. بنابراین، در هر سطح شکست شمار ۱۰۰۰ سناریو با استفاده از روش پیشنهادی از میان همه‌ی سناریوهای ممکن، انتخاب شده و پس از شبیه‌سازی و امتیازدهی آن‌ها توسط روش تصمیم‌گیری چند معیاره پیشنهادی، شمار ۱۰۰ سناریو با کمترین امتیاز و ۱۰۰ سناریو با بیشترین امتیاز، مشخص شده تا بوسیله آن‌ها گردونه شانس ایجاد و سپس ۱۰۰۰ سناریوی منتخب سطح شکست بعدی تولید شوند. در شکل (۵) نتایج تاب‌آوری جامع بدست آمده از به کارگیری روش پیشنهادی، آورده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تحلیل تاب‌آوری جامع شبکه مورد بررسی با استفاده از روش پیشنهادی بر مبنای روش تصمیم گیری چند معیاره و گردونه شانس، در مقایسه با روش انتخاب تصادفی توانسته است بازه کمینه تا بیشینه تاب‌آوری در همه ی سطح‌های شکست را در بازه بزرگ-تری برآورد بزند که این بدین معناست که نتایج تاب‌آوری جامع برآورد شده توسط روش پیشنهادی در این پژوهش، نسبت به روش مورد استفاده دیگر، به نتایج تاب‌آوری جامع واقعی حاصل از شبیه سازی همه ی سناریوهای ممکن، نزدیکتر است. این در حالی است که توسط Mugume et al. (2015) بیان شده است که پس از تحلیل همگرایی و مشخص شدن شمار مناسب سناریوهای منتخب در هر سطح شکست، می‌توان انتظار داشت نتایج تاب آوری جامع حاصل از انتخاب تصادفی سناریوها به نتایج تاب آوری جامع واقعی نزدیک است. همچنین، همان طور که مشخص است روش پیشنهادی در این پژوهش توانسته است یک افت شدید در کمینه و میانگین تاب آوری در سطح‌های شکست ۶۰٪ به بعد را در شبکه مورد بررسی نمایان سازد که در روش مورد استفاده دیگر چنین موضوعی دیده نمی‌شود. نمایان شدن این افت شدید در سطح‌های شکست ۶۰٪ به بعد خود می تواند به تنهایی حاوی اطلاعات مهمی در مورد تاب آوری شبکه مورد بررسی در هنگام بروز بحران باشد.

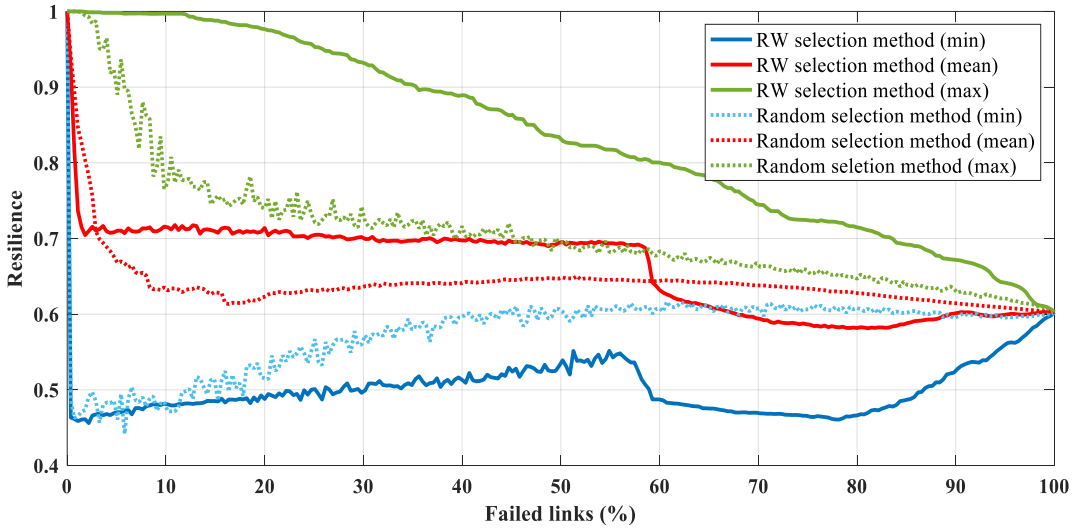

Fig. 5 Comparison of GRA results generated using the proposed method and random selection method

شکل ۵ مقایسه نتایج GRA تولید شده با استفاده از روش پیشنهادی و روش انتخاب تصادفی

نکته دیگر در مقایسه نتایج این دو روش آن است که به طور معمول انتظار می‌رود میانگین تاب آوری در شبکه های فاضلاب با پیشرفت سطح‌های شکست، تابعی نزولی باشد. اما بر خلاف نتایج به دست آمده توسط روش پیشنهادی که میانگین نمودار تاب آوری جامع در آن نزولی است، میانگین نمودار تاب آوری جامع بدست آمده از روش انتخاب تصادفی، در بازه حدود ۲۰٪ تا ۵۰٪ روندی صعودی را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک روش انتخاب سناریو مبتنی بر گردونه شانس برای ارزیابی تاب‌آوری جامع در شبکه‌های فاضلاب شهری ارائه شد. در این روش، سناریوهای منتخب در هر سطح شکست

توسط یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره امتیازدهی می‌شوند تا با شناسایی سناریوهای راهبردی و شرکت آن‌ها در انتخاب سناریوهای سطح شکست بعدی، تحلیل تاب‌آوری در شبکه‌های شهری که شبیه سازی همه ی سناریوهای ممکن در آن‌ها، فرآیندی نا ممکن از نظر زمان محاسبه‌ای است، صورت پذیرد. نتایج نشان می‌دهد که این روش توانسته است مقادیر بیشینه، میانگین و کمینه تاب‌آوری را در شبکه مورد بررسی با دقت مناسبی برآورد کند و نسبت به روش انتخاب سناریو تصادفی، نتایجی ارائه دهد که به نتایج واقعی نزدیک‌تر است.

۵- فهرست نشانه‌ها

شمار کل لوله‌ها	N
سطح شکست	r
شمار شبیه‌سازی های مورد نیاز	F(N)
شمار لوله‌های ناکارآمد	N_f
حجم کل ورودی فاضلاب شبکه	$V_T(m^3)$
حجم بالازدگی فاضلاب	$V_f\ (m^3)$
زمان کل انسداد لوله‌ها	$t_T(s)$
زمان ناکارآمدی شبکه	$t_f(s)$
تاب‌آوری	Res
شمار سناریوهای هر سطح شکست	S
شمارنده سطح شکست	i
درصد مولد	k_f
ضریب ثابت	k
شمار معیارهای مورد بررسی	m
میزان‌های درایه‌های ماتریس نرمال‌شده	q_{ij}
میزان آنتروپی	E_j

۶- منبع‌ها

Anbari, M. and Tabesh, M. (2016). Failure event probability calculation in wastewater collection systems using the basysian network. Water and Wastewater, 27(103),48-61. (in Persian)

Atashi, M., Ziaei, A.N., Khodashenas, S.R. and Farmani, R. (2020a). Impact of isolation valves location on resilience of water distribution systems. Urban Water Journal, 17(6), 1-8.

Atashi, M., Khodashenas, S.R., Ziaei, A.N. and Farmani, R. (2020b). Resilience Analysis Under Simultaneous Failure of Pipes in Water Distribution Network (Case Study in One of the Cities of Khorasan Razavi). J. of Hydraulics, 15(3), 93-105. (in Persian)

Butler, D., Farmani, R., Fu, G., Ward, S., Diao, K. and Astaraie Imani, M. (2014) A New Approach to Urban Water Management: Safe and Sure. Procedia Engineering, 89(1), 347-354.

Butler, D., Ward, S., Sweetapple, C., Astaraie Imani, M., Diao, K., Farmani, R. and Fu, G. (2016). Reliable, resilient and sustainable water management: The Safe & SuRe approach. Global Challenges, 1(1), 63-77.

Davis, P., Sullivan, E., Marlow, D. and Marney, D. (2013). A selection framework for infrastructure condition monitoring technologies in water and wastewater networks. Expert Systems With Applications, 40(6), 1947-1958.

Diao, K., Sweetapple, C., Farmani, R., Fu, G., Ward, S. and Butler, D. (2016). Global resilience analysis of water distribution systems. Water Research, 106(1), 383-393.

Hwang, C.L., Lai, Y.J. and Liu, T.Y. (1993). A new approach for multiple objective decision making. Computers & Operations Research, 20(8), 889-899.

Johansson, J., Hassel, H. and Cedergren, A. (2011). Vulnerability analysis of interdependent critical infrastructures: case study of the Swedish railway system. International J. of critical infrastructures, 7(4), 289-316.

Juan-Garcia, P., Butler, D., Comas, J., Darch, G., Sweetapple, C., Thornton, A. and Corominas, L. (2017). Resilience theory incorporated into urban wastewater systems management. State of the art. Water Research, 115(1), 149-161.

Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K., Khalifah, Z., Zakwan, N. and Valipour, A. (2015). Multiple criteria decision-making techniques and their applications–a review of the literature from 2000 to 2014. Economic research-ekonomska istraživanja, 28(1), 516-571.

Mugume, S.N. and Butler, D. (2016). 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. and Butler, D., (2015). A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems. Water Res. 81(1), 15–26.

Sweetapple, C., Astaraie-Imani, M. and Butler, D. (2018). Design and operation of urban wastewater systems considering reliability, risk and resilience. Water Research, 147(1), 1-12.

Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communication. The Bell System Technical Journal, 27(3), 379-423.

Tabesh, M., Badali Bavani, E., Asgarian, M. and Rouzbahani, A. (2015). An algorithm for risk analysis and management of wastewater treatment plants, Iran-water resources research, 10(31), 53-65. (in Persian)