

Research Paper

Resilience assessment of Sadra urban water distribution network based on urban crisis planning and management under earthquake

Alireza Nariman¹, Mohammad Hadi Fattahi^{2*}, Naser Talebbeydokhti³, Mohammad Sadegh Sadeghian⁴

1, Ph. D. Candidate, Civil Engineering Department, Tehran Central Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2, Assistant professor, Civil Engineering Department, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

3, Professor, Civil and Environmental Engineering, School of Engineering, Head of Environmental Research and Sustainable Development Center of Shiraz University, Shiraz, Iran.

4, Assistant professor, Civil Engineering Department, Tehran Central Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: 2021/06/21

Accepted: 2021/08/25

PP: 37-56

Use your device to scan and
read the article online



Keywords:

Resilience, urban planning,
Water distribution network,
population impact

Abstract

In this article The amount of hydraulic resilience of Sadra city water network against earthquakes with different intensities and locations and considering the physical characteristics of the network and the complete characteristics of pipes, both geometric and hydraulic, have been studied. The population index affected by the decrease in the efficiency of the urban water supply network caused by the earthquake has been studied and compared as an important criterion for different scenarios. The results of this study are 5 objectives of identifying critical pipelines, determining the resilience of Sadra water network, determining critical areas based on failure criteria, determining the population affected by pipeline failure and examining different urban areas in terms of water leakage. For this purpose, 18 scenarios with changes in earthquake intensity, earthquake center and two repair strategies with a decrease in the expected consumer demand were examined. The results showed that in earthquakes with less intensity, the northern region has the highest amount of damaged pipes, while with increasing earthquake intensity, the city center is more vulnerable. Likewise, results regarding the Todini index depicted that North is the most vulnerable region and the south is the most resilient region against earthquakes. In addition, the study of leakage diagrams from the pipeline network also confirmed that the highest rate of leakage occurs in the north of the city, as a result of which the most affected population due to earthquake damage to the water supply network is concentrated in the North.

Citation: Nariman, A R; Fattahi, M H; Talebbeydokhti, N; Sadeghian, M S(2023): **Resilience assessment of Sadra urban water distribution network based on urban crisis planning and management under earthquake**, Journal Research and Urban Planning, Vol 14, No 52, PP 37-56.

DOI: 10.30495/JUPM.2021.28279.3910

DOR: 20.1001.1.22285229.1402.14.52.13.5

* Corresponding author: Mohammad Hadi Fattahi

Address: Assistant professor, Civil Engineering Department, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

Tell:

Email: fattahi.mh@miau.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Cities are considered flexible but complex systems. They have dynamic and interconnected systems that constantly respond to internal interactions and external factors. In order to deal with climate change and natural disasters in this complex environment, there is a need for adaptation, co-management and adaptive governance. Increasing the level of resilience of the urban environment to the stresses caused by the crisis and minimizing the time of rehabilitation, as well as improving the living standards of people and in general, resilience of cities against natural and unnatural disasters are among the most important factors which should be considered in the planning and design of cities. In this paper, the hydraulic resilience of Sadra city water network against earthquakes with different intensities and epicenters and considering the physical characteristics of the network and the complete characteristics of pipes, both geometric and hydraulic, have been studied.

Methodology

In this paper, the network model was developed in EPANET and hydraulic analysis was performed, then it was used as input in WNTR (water network tool for resilience) which was coded based on Python. There are many resilience criteria including redundancy, strength, reliability, speed, compatibility and resilience for water distribution systems. Each of these criteria is different in the study of hydraulic, economic, topographic or water safety resilience. Earthquake-affected population index is an important criterion for urban planners, which in this article, as a hydraulic resilience index, are reviewed and compared for different scenarios. 18 scenarios were examined with changes in earthquake intensity (5, 5.5, 6 and 7 Richter), earthquake epicenter (north, center and south of the study area) and two repair strategies with a decrease in the expected consumer demand. After an earthquake, some pipes leak or fail, and the fragility curve is used to determine the level of damage and failure of these pipes. Pipes are divided into two parts based on the probability of failure: minor and major, and pipes with major failure level are prioritized from maximum to minimum probability of damage or leakage, respectively. Finally, the return time of the system to normal condition and the maximum affected population is determined. To investigate the failure criteria in the water distribution network, Todini index, which indicates the capacity and potential of the network in maintaining the flow rate and pressure head, and the Crowl and Louvar model are used to simulate leakage from pipes. After the earthquake, changes in this index and leakage over time were investigated for different scenarios.

Results and discussion

According to the definitions of resilience and the concept of system reversibility, there are various strategies for repairing water distribution networks. Achieving a return to normal is important for decision makers and city managers during crisis management. By examining this index, it was found that the entire network returns to normal about 11 days after the earthquake with a magnitude of 7 and for an earthquake with a magnitude of 6 according to the repair strategy and the location of the earthquake is about 5 to 7 days after the earthquake. In this paper, we are looking forward the 5 objectives of identifying critical pipelines, determining the degree of resilience, determining critical areas based on failure criteria, the relationship between resilience index and failure criteria and examining different urban areas in terms of water leakage in pipes for city planners and city managers. It was found that the entire network has the potential to maintain the flow rate and pressure head approximately 14 days after the earthquake. Examining both hydraulic resilience and failure indices, we find that the behavior of the index changes is similar for different scenarios. Also, changes in the amount of water leakage in broken pipes over time were investigated by two approaches. The first approach is

.....

to investigate the effect of earthquake intensity on changes in leakage rate and the second approach is to investigate the effect of earthquake location (north, center or south) on leakage rate. The investigation revealed that the amount of leakage from the earthquake with a magnitude of 6 and above has a large increase and we are witnessing the most leakage in the northern region. In this paper, high-risk areas, pipes with high vulnerability and densely populated areas were identified and introduced. He considered the critical numbers as pipes No. 28006, 32002, 16031, 9008, 8011, 27001, 7014 and 2042. In order to rehabilitate and rehabilitate the water network by identifying vulnerable pipes, it is recommended that these pipes be repaired or replaced to reduce the damage caused during the earthquake by rehabilitating them. Also, according to the repair strategy mentioned in the article (second case strategy), less populations are affected by earthquakes, which is a good way to deal with it. Finally, a conceptual relationship between resilience dimensions and crisis management stages is shown.

Conclusion

Investigating the resilience of the water network against earthquakes and reducing vulnerability in terms of the number of affected people and the return time of the network to normal condition is important in urban crisis management and sustainable urban development. Considering the structural and organizational dimensions of resilience (redundancy, resource ability, resilience and reversibility), in this article, the relationship between crisis management stages (prevention, preparedness, response and reconstruction) with these dimensions was identified. To express the concept of prevention of high-risk areas, highly vulnerable pipes were identified in densely populated areas. In order to have preparedness, the proper location of the network repair teams based on high-risk areas are identified. Number of repair teams could also be estimated accurately upon the results. In the reconstruction and rehabilitation phase, by identifying vulnerable pipes, it is suggested that these pipes be repaired or replaced in order to reduce the damage caused by the earthquake during the earthquake.

مقاله برگرفته از پایان‌نامه

ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع آب شهری صدرا بر اساس برنامه‌ریزی و مدیریت بحران شهری در شرایط زلزله

علیرضا نریمان^۱، محمد هادی فتاحی^{۲*}، ناصر طالب بیدختی^۳، محمد صادق صادقیان^۴

۱- دانشجوی دکتری عمران-آب، دانشکده مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران.

۳- استاد بخش عمران و محیط زیست و رئیس مرکز تحقیق و توسعه پایدار دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

۴- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

در این مقاله میزان تاب‌آوری هیدرولیکی شبکه آب شهر صدرا در برابر زلزله با شدت و محل‌های مختلف و با در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیکی شبکه و مشخصات کامل لوله‌ها اعم از هندسی و هیدرولیکی، مورد مطالعه قرار گرفته است. شاخص جمعیت متاثر از افت راندمان شبکه آبرسانی شهری ناشی از وقوع زلزله به عنوان معیاری مهم برای سناریوهای متفاوت بررسی و مقایسه شده‌اند. نتایج این پژوهش ۵ هدف شناسایی خطوط لوله بحرانی، تعیین میزان تاب‌آوری شبکه آب شهر صدرا، تعیین مناطق بحرانی بر اساس معیار شکست، تعیین جمعیت متاثر از خرابی شبکه لوله و بررسی مناطق مختلف شهری از نظر میزان نشت آب در لوله‌ها می‌باشد. به این منظور ۱۸ سناریو با تغییر در شدت زلزله، مرکز زلزله و دو استراتژی تعمیر با کاهش در میزان تقاضای مورد انتظار مصرف کننده، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در زلزله‌های با شدت کمتر منطقه شمال بیشترین میزان لوله آسیب دیده را دارد در حالیکه با افزایش شدت زلزله مرکز شهر آسیب پذیر تر است. بررسی نتایج شاخص Todini نیز نشان داد که شمال آسیب‌پذیرترین منطقه و جنوب تاب آورترین منطقه در برابر زلزله هست. بعلاوه مطالعه نمودارهای نشت از شبکه لوله نیز تایید کرد که بیشترین میزان نشت در شمال شهر اتفاق می‌افتد که به تبع آن بیشترین جمعیت متاثر از خسارات زلزله به شبکه آبرسانی در شمال متمرکز است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳

شماره صفحات: ۳۷-۵۶

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



واژه‌های کلیدی:

تاب‌آوری، برنامه‌ریزی شهری، شبکه توزیع آب، جمعیت متاثر.

استناد: نریمان، علیرضا؛ فتاحی، محمد هادی؛ طالب بیدختی، ناصر و محمد صادق صادقیان (۱۴۰۲). ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع

آب شهری صدرا بر اساس برنامه‌ریزی و مدیریت بحران شهری در شرایط زلزله، فصلنامه پژوهش و برنامه‌ریزی شهری،

سال ۱۴، شماره ۵۲، مرودشت، صص ۳۷-۵۶.

DOI: 10.30495/JUPM.2021.28279.3910

DOR: 20.1001.1.22285229.1402.14.52.13.5

* نویسنده مسئول: محمد هادی فتاحی

نشانی: استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، مرودشت، ایران.

تلفن: ۰۹۱۷۱۰۴۰۳۰۹

مقدمه:

در سال‌های اخیر هدف آژانس‌ها و گروه‌های مرتبط با کاهش بلایا، دستیابی به جوامع مقاوم در برابر بلایا بوده است. در سال ۱۹۹۷، آژانس مدیریت اضطراری فدرال برنامه‌های کاهش‌دهنده پیش بحران را با هدف تقویت مشارکت دولتی و خصوصی آغاز نمود. این برنامه‌ها با ارزیابی خسارت و خطر، برنامه‌های آموزش جامعه و پروژه‌های کاهش تلفات زلزله آتی انجام می‌پذیرد (Bruneau et al, 2003). بالا بردن سطح انعطاف‌پذیری محیط شهری در برابر تنش‌های ناشی از بروز بحران و نیز به حداقل رساندن زمان بازتوانی، همچنین ارتقاء و بهبود بخشی سطح زندگی افراد و به طور کلی، تاب‌آور ساختن شهرها در برابر بلایای طبیعی و غیر طبیعی از جمله مهمترین عواملی است که می‌بایست در برنامه‌ریزی و طراحی شهرها مورد توجه قرار گیرد. زیرساخت‌هایی همچون شبکه‌های توزیع آب در صورت ناتوانی یا تخریب آن‌ها پس از بلایا، تأثیرات منفی زیادی بر امنیت شهری، اقتصاد و بهداشت عمومی خواهد داشت. (Uitto, 2016). اهمیت موضوع ارزیابی تاب‌آوری شبکه آب جهت افزایش آمادگی سیستم در برابر بلایای طبیعی به خصوص زلزله می‌باشد. با بررسی تاب‌آوری هیدرولیکی شبکه می‌توان نقاط و لوله‌های آسیب‌پذیر را شناسایی و قبل از وقوع بحران آن‌ها را جایگزین و یا مقاوم‌سازی نمود" اخیراً به مطالعه سیستم‌های پیچیده با استفاده از تئوری شبکه‌های پیچیده زیاد پرداخته شده است. شبکه‌های پیچیده توانایی مدلسازی رفتار شبکه آب شهری را دارد. نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق بر اساس تئوری شبکه پیچیده به تحلیل شبکه آب می‌پردازد، از این رو این نرم‌افزار قابلیت خوبی برای تحلیل موضوع تاب‌آوری خواهد داشت. و معیار هیدرولیکی آورده شده برای مطالعه تاب‌آوری شبکه آب شهری مناسب هستند.

پیشینه و مبانی نظری تحقیق:

اولین مطالعات در زمینه تاب‌آوری شبکه توزیع آب توسط Todini انجام شده است. که با استفاده از رویکردی جدید شاخصی برای معیار شکست معرفی نمود (Todini, 2000). (Shi & O'Rourke, 2008)، انواع آسیب در لوله را بررسی و مدل دقیقی از نحوه شکست لوله را برای شبکه توزیع آب شهر لس آنجلس را با کمک نرم‌افزار GIRAFFE ارائه نمود. آن‌ها گره با بیشترین هد منفی را حذف نمود ولی از آنجا که تحلیل بر مبنای تقاضا و در نرم‌افزار EPANET انجام شده بود که قابلیت نشان دادن دبی‌های واقعی را ندارد. پژوهش انجام شده توسط (Zhao et al, 2015) استراتژی‌های مختلف افزایش تاب‌آوری برای شبکه لوله شهری را مطالعه کردند. (Cimellaro et al, 2016). سه برنامه بازیابی بعد از زلزله که اولی بستن مخازن تا زمان بازسازی کامل حجم ذخیره، دومی به کارگرفتن ماکزیمم جریان در دسترس از ایستگاه پمپاژ و سومی ترکیب دو استراتژی قبل بود را ارائه نمودند. (Farahmandfar et al, 2016). بر تاب‌آوری شبکه توزیع آب در برابر زلزله متمرکز شدند و راه کارهایی همچون بازسازی لوله‌های خراب، جایگزینی لوله‌های شکننده و افزودن لوله‌های جدید ارائه نمودند. (Bahut et al, 2019). به توسعه روشی برای برنامه‌ریزی تعمیرات سیستم‌های توزیع آب از نظر خدمات پس از سانحه و خدمات ترمیم پرداختند. (Kordabadi & Najfi, 2015) با شناسایی معیارهای تأثیرگذار در وقوع زلزله و با کمک تحلیل فازی، منطقه یک شهر تهران را در برابر خطر زلزله پهنه‌بندی نمودند. (Maleki et al, 2020) به ارزیابی تاب‌آوری مناطق شهری در برابر زلزله پرداختند. آن‌ها با دو رویکرد یکی اقتصادی، اجتماعی و نهادی و دیگری کالبدی میزان تاب‌آوری را سنجش و ارزیابی نمودند.

(Gholami et al, 2021) با تهیه پرسشنامه به ارزیابی میزان تاب‌آوری محلات شهر کاشان در برابر زلزله پرداختند. سپس با کمک ابزار آماری نتایج حاصل از پرسش‌نامه‌ها را تحلیل و بررسی نمودند. آن‌ها با تعیین متغیرهای مؤثر اجتماعی و اقتصادی میزان تاب‌آوری را بررسی کردند. (Zare & Talebbeydokhti, 2018) به مطالعه تاب‌آوری شهری در برابر سیلاب پرداختند. آن‌ها رویکردی برای جمع‌آوری اطلاعات زمانی و مکانی بر سیاست سیلاب و تأثیرات دولت جهت استفاده در شبیه ساز تاب‌آوری ارائه نمودند. مطالعات آن‌ها در خصوص سیاست تاب‌آوری کلان شهر شیراز در برابر سیلاب و با تعریف بخشی از تأثیرات سازمانی انجام گردید. همچنین با یکپارچه‌سازی شرایط فیزیکی، اجتماعی و سازمانی نقشه تأثیرات سیاست و حاکمیت مرکب را با قابلیت شناسایی جمعیت متأثر از سیلاب احتمالی در کلان شهر شیراز توسعه دادند. (parizadi et al, 2019) تاب‌آوری شهر باقرشهر را در برابر مخاطرات طبیعی از منظر چهار بعد بررسی نمودند. این ابعاد هر کدام دارای شاخص‌ها و زیرشاخص‌هایی هستند.

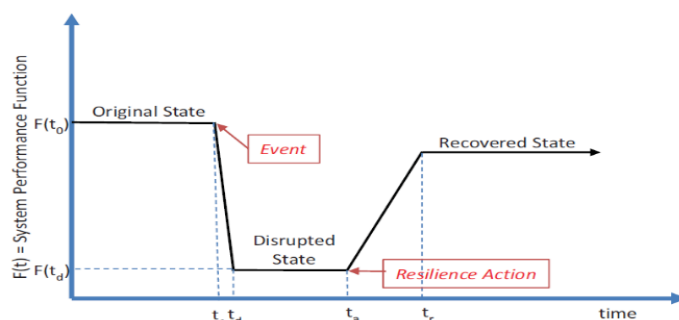
آن‌ها نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل داده‌های مورد نظر به تفکیک ابعاد چهارگانه ارائه کردند. (Asadi et al, 2019) به منظور تبیین راهبردهای یکپارچه بازآفرینی بافت فرسوده شهری براساس ابعاد تاب‌آوری در بافت فرسوده شهر کرج مطالعات براساس مطالعات کتابخان‌های -اسنادی، بررسی‌های پیمایشی و مصاحبه با مدیران و مسئولین شهری صورت گرفته شده است. (Huang & Dilkina, 2020) ویژگی‌های افزونگی سیستم‌های توزیع آب مطالعاتشان را بر بهبود عملکرد لوله‌های آسیب دیده شبکه آب شهری پس از زلزله قرار دادند. آن‌ها یک برنامه خطی عددی را برای اطمینان از دسترسی آب به مشتریان مهم در نزدیکی منابع آب شهری در شبکه توزیع آب آسیب دیده از زلزله

توسعه دادند. (Zhan et al, 2020) به مطالعه میزان تاب‌آوری شبکه توزیع آب شهری در برابر زلزله و شناسایی شاخص‌های تأثیرگذار بر آن پرداختند. آن‌ها چهار شاخص مرتبط با تاب‌آوری را بررسی کردند که یکی از این شاخص‌ها، شاخص Todini بود. (Diao, 2021) با بررسی میزان تاب‌آوری چند مقیاسی نشان داد که تأمین آب پایدار، نیازمند شبکه آب و زیر ساخت تاب‌آور می‌باشد. که احتمالاً این تاب‌آوری در کنترل متمرکز و حالت اجرا به صورت غیر متمرکز وجود دارد.

در این مقاله به ارزیابی تاب‌آوری شبکه آب شهری در برابر زلزله با در نظر گرفتن شدت‌های مختلف و استراتژی تعمیر متفاوت پرداخته می‌شود. شبکه آب شهر صدرا در ابتدا با کمک نرم‌افزار EPANET مدل‌سازی و آنالیز هیدرولیکی انجام می‌شود، سپس به عنوان اطلاعات ورودی به WNTR، که در ادامه توضیح داده خواهد شد، استفاده می‌شود. حالات خسارت مختلف برای لوله بررسی و ارائه می‌گردد و در نهایت با اعمال زلزله با شدت و محل مختلف با در نظر گرفتن شاخص تاب‌آوری، جمعیت متأثر، میزان تاب‌آوری و زمان بازگشت شبکه مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد و با شاخص شکست ارائه شده توسط Todini در سال ۲۰۰۰ و مدل نشأت ارائه شده توسط Crowl and Louvar در سال ۲۰۰۲ مقایسه و بررسی انجام می‌گردد.

تعریف تاب‌آوری

بر اساس تعاریف Klein (۲۰۰۳)، ریشه این اصطلاح را باید در کلمه لاتین "resilio" یافت که معنای ادبی "پرش به عقب" است. مفهوم تاب‌آوری در ابتدا در زمینه اکولوژی توسط Holing (۱۹۷۳) بیان شد و اظهار نمود که برای سیستم‌های اکولوژیکی تاب‌آوری "معیاری برای ماندگاری سیستم‌ها و توانایی آن‌ها در جذب تغییر و آشفتگی است. در مهندسی، تاب‌آوری به عنوان توانایی یک سیستم برای حفظ عملکردها و ساختار خود در برابر تغییرات داخلی و خارجی تعریف می‌شود (Todini, 2000). این روش همانطور که در شکل ۱ ترسیم شده مبتنی بر این مفهوم است که معیار $F(t)$ ، که با توجه به زمان متفاوت است، برای کیفیت زیرساخت‌های یک جامعه تعریف شده است. زمان رخ داد حادثه (t_e)، سیستم دچار تخریب می‌گردد و از زمان t_d تا t_a که زمان روع پاسخ سیستم برای بازگشت به حالت نرمال است، جالت تخریب تعریف می‌گردد. در زمان t_a عملکرد تاب‌آوری سیستم فعال و تا زمان t_r ادامه می‌یابد و سیستم به حالت بازبایی می‌رسد. اگر یک زمین لرزه در زمان t_e رخ دهد، می‌تواند به زیرساخت‌ها آسیب کافی برساند، به طوری که کیفیت بلافاصله کاهش می‌یابد. انتظار می‌رود که بازسازی زیرساخت‌ها با گذشت زمان اتفاق بیفتد، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، تا زمان t_r که کاملاً ترمیم شود از دست دادن مقاومت در برابر زلزله، با توجه به آن زمین لرزه خاص، می‌تواند با اندازه تخریب مورد انتظار در کیفیت (احتمال خرابی)، با گذشت زمان (یعنی زمان بهبودی) اندازه‌گیری شود. در این شکل t_e زمان شروع حادثه، t_d زمان شروع تخریب، t_a زمان شروع عملکرد سیستم برای بازبایی و ترمیم خود و در نهایت t_r زمان شروع حالت بازبایی سیستم و بازگشت به حالت اولیه می‌باشد.



شکل ۱- بیان مفهومی تاب‌آوری و عملکرد سیستم قبل، حین و بعد از حادثه (Klise et al, 2015)

در این مقاله به ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های آب آشامیدنی در برابر زلزله پرداخته شده است. نرم‌افزار WNTR با ادغام کامل شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفیت آب، آسیب و اقدامات واکنش، و معیارهای تاب‌آوری در یک پلت فرم واحد را برآورد می‌نماید. این نرم‌افزار به عنوان یک بسته نرم‌افزاری منبع باز به نام WNTR (The Water Network Tool for Resilience) در دسترس است. چارچوب نرم‌افزار WNTR

شرح داده می‌شود و سپس یک مطالعه موردی زلزله برای نشان دادن قابلیت‌ها در WNTR ارائه می‌شود. در حالی که مطالعه موردی بر روی زلزله متمرکز است (Klise et al, 2017).

مواد و روش تحقیق:

مدل میرایی زلزله

آسیب لرزه‌ای خطوط لوله مدفون در زمین بر اثر یکی یا هر دو عامل تغییر شکل‌های کوتاه مدت بر اثر موج لرزه‌ای³ TGD و یا بلند مدت PGD⁴ زمین می‌باشد. امواج لرزه‌ای باعث تغییر شکل‌های کوتاه مدت زمین هستند در حالیکه تغییر شکل‌های بلندمدت بر اثر حرکت سطح زمین، روانگرایی، ریزش و لغزش زمین و نشست ناهمگون نسبی زمین در خاک‌های چسبنده رخ می‌دهد. بزرگی نسبی این دو تعیین‌کننده در نقش هر یک از آن‌ها در میزان آسیب وارده بر شبکه است. در بررسی‌های آسیب‌های بر اثر موج لرزه‌ای از پارامترهای جنبش لرزه‌ای⁵ PGA و PGV⁶ در آسیب‌های ناشی از جابجایی و تغییرشکل زمین از PGD استفاده می‌گردد (Toprak, S, 1998). مدل‌های میرایی PGA در WNTR عبارتند از:

$$PGA = -403.8 \times 10^{0.265M} (R + 30)^{-1.218} \quad (1)$$

که M اندازه زلزله و بدون واحد، R فاصله تا مرکز بر حسب کیلومتر، D فاصله تا کانون بر حسب کیلومتر
PGV برای محاسبه نرخ تعمیر لوله به کار می‌رود:

$$RR = 0.00187 \times PGV \quad (2)$$

$$RR = 0.00187 \times PGV^{1.173} \quad (3)$$

مدل نشت

نشت می‌تواند باعث تغییرات زیادی در هیدرولیک شبکه شود. می‌توان از WNTR برای مدل‌سازی آب از دست رفته در اثر نشت بین زمان شروع و زمانی که تیم‌های تعمیراتی عایق‌سازی نشت را با استفاده از شیرهای موجود انجام دهند، استفاده کرد. در WNTR نشت با معادله ارائه شده توسط Crowl and Louvar (2002) مدل می‌شود.

$$d^{leak} = C_d A \sqrt{2\rho P}^\alpha \quad (4)$$

که C_d ضریب تخلیه و بدون واحد، A مساحت حفره بر حسب مترمربع، ρ چگالی سیال بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب و P فشار داخل لوله بر حسب پاسکال می‌باشد. مقدار α برای نشت زیاد از لوله فلزی ۰.۵ در نظر گرفته می‌شود. ضریب تخلیه برای جریان آشفته ۰.۷۵ فرض می‌شود. مقادیر α و C_d تابع نوع جریان، جنس لوله و شکل روزنه (طولی گرد یا محیطی) است.

معیار تاب‌آوری

تاب‌آوری توانایی سیستم در به حداقل رساندن اختلال و بازگشت به عملکرد طبیعی پس از یک فاجعه است. معیارهای کمی سازمان تاب‌آوری باید عملکرد سیستم را قبل، در حین و بعد از اختلال در نظر بگیرند. معیارهای تاب‌آوری زیادی شامل افزونگی، مقاومت، قابلیت اطمینان، سرعت، سازگاری و تدبیر وجود دارد. که برای سیستم‌های توزیع آب این معیارها به چهار بخش توپوگرافی، کیفیت و امنیت آب، اقتصادی و هیدرولیکی تقسیم‌بندی می‌شوند (Klise et al, 2015). با توجه به اهمیت تعداد نفرات و جمعیت متأثر از حادثه برای مدیران شهری، در این مقاله از معیار جمعیت متأثر استفاده شده است:

$$POP = \frac{q_n}{R} \quad (5)$$

q_n میانگین حجم آب مصرفی در روز بر حسب مترمکعب بر روز در گره n در شرایط نرمال، R میانگین حجم سرانه آب مصرفی در روز بر حسب متر مکعب بر روز می‌باشد.

³ transient ground deformation

⁴ permanent ground deformation

⁵ peak ground acceleration

⁶ peak ground velocity

⁷ population impacted

$$PI_t \sum_{n \in N} pop_n \delta_{nt} \text{ و } \delta_{nt} = \begin{cases} 1 & \text{if } V_{nt} / \hat{V}_{nt} < \tau \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

که PI_t تأثیر جمعیت در زمان t ، δ_{nt} متغیر دوتایی که اگر نسبت V_{nt} به \hat{V}_{nt} کمتر از حد تعریف شده باشد (برای مثال ۸۰ درصد) عدد ۱ و در غیر اینصورت عدد صفر در نظر گرفته می‌شود. که فرمول بی بعد می‌باشد. N تعداد گره در شبکه، V_{nt} حجم آب واقعی دریافتی بر حسب متر مکعب در زمان t و در گره n ، \hat{V}_{nt} حجم آب مورد انتظار دریافتی بر حسب متر مکعب در زمان t و در گره n می‌باشد.

معیارهای شکست

در بررسی معیارهای شکست در شبکه توزیع آب دو دیدگاه وجود دارد یکی شاخص‌های مربوط به هد فشار و انرژی (Todini, 2000) و دیگری شاخص‌های مربوط به خطوط جریان می‌باشد (Tanyimboh et al, 2011). که به طور مرسوم از روش و فرمول todini برای محاسبه شاخص تاب‌آوری استفاده می‌شود که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} q_i (h_i - h^*)}{\sum_{R=1}^{n_r} Q_R H_R - \sum_{i=1}^{n_n} q_i h^*} \quad (7)$$

که n_n تعداد گره‌های تقاضا، n_r تعداد مخازن، q_i ، h_i تقاضا و هد در i امین گره، Q_R ، H_R تخلیه و هد فشار R ام منبع تأمین و h^* هد فشار طراحی شبکه می‌باشد.

استراتژی تعمیر و زمان بازسازی

گروه عملیاتی تعمیر یک لوله دچار نشت را در ۱۲ ساعت ترمیم می‌کنند بدین صورت که در ۶ ساعت اول با بستن شیر نزدیک‌ترین گره آن لوله را ایزوله کرده و سپس در ۶ ساعت دوم آن را تعمیر و شیر را مجدد باز می‌کنند. اولویت لوله‌ها برای ترمیم بر اساس حجم آب خروجی از محل نشت می‌باشد. در WNTR با تعیین حالت خسارت، لوله‌هایی که دچار نشت و یا شکست شده‌اند را به دو بخش جزئی و کلی تقسیم‌بندی می‌شوند. نحوه مدل‌سازی نشت بدین شکل است که آن لوله به دو قسمت تقسیم و یک گره جدید تعریف می‌شود. براساس دسته‌بندی حالت خسارت مساحت و دبی نشت محاسبه شده و شبیه‌سازی هیدرولیکی مبتنی بر فشار انجام می‌شود. در جدول ۴ لیست ۱۰ لوله‌ای که بیشترین احتمال خسارت را دارند و بایستی بازسازی و یا مقاوم‌سازی گردند، آورده شده است. در این مقاله ۲ استراتژی تعمیر در نظر گرفته شده است. در استراتژی اول تقاضای مورد انتظار مصرف‌کننده با شرایط نرمال می‌باشد. که در این حالت زلزله اتفاق افتاده و تقاضای مورد انتظار مصرف‌کننده تغییر نمی‌یابد. در استراتژی دوم بعد از زلزله ۴۵ درصد تقاضای مورد انتظار مصرف‌کننده کاهش می‌یابد. در این مقاله زمان بازگشت سیستم، موقعی است که سیستم بیش از ۷۵ درصد آب مورد تقاضای مصرف‌کننده بعد از وقوع زلزله را تأمین کند و کمتر از حدود ۲۰ درصد جمعیت تحت تأثیر قرار بگیرند.

نرم‌افزار تحلیل شبکه

مدل شبکه آب را می‌توان در WNTR ساخت و یا از EPANET به عنوان ورودی دریافت نمود. WNTR (Water network tools for resilience) یک بسته پایتون است که به پایتون (۲، ۷، ۳، ۴، ۳، ۵) نیاز دارد و شامل چند مجموعه وابسته منجمله NetworkX، Pandas، Matplotlib، NumPy و SciPy می‌باشد. مدل شبکه آب را می‌توان در WNTR ساخت و یا از EPANET به عنوان ورودی دریافت نمود. بسته NetworkX استفاده از روش‌های متعدد برای تجزیه و تحلیل ساختار شبکه‌های پیچیده را تسهیل می‌کند که اتصال شبکه آب را در خود ذخیره می‌کند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی و کیفیت آب به صورت داده در Pandas ذخیره می‌شوند، که امکان تجزیه و تحلیل از ویژگی‌های گره و ویژگی‌های پیوند، مانند فشار و جریان را فراهم می‌کند. WNTR شامل قابلیت‌های گرافیکی با کیفیت بالا، از جمله گرافیک شبکه و انیمیشن، با استفاده از Matplotlib است (Hunter, ۲۰۰۷). کد WNTR می‌تواند شبیه‌سازی DD (Demand-Driven) را با استفاده از شبیه‌سازی PDD (Pressure-Driven Demand) با استفاده از قابلیت مدل هیدرولیکی خود انجام دهد. رابط برنامه انعطاف‌پذیر است و به کاربران امکان می‌دهد در ساختار شبکه و عملیات خود تغییراتی ایجاد کرده و رویدادهای مخرب و اقدامات بازسازی را به آن اضافه کنند. نرم‌افزار WNTR با ادغام کامل شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفیت آب، آسیب و اقدامات واکنشی، و معیارهای تاب‌آوری بر یک اساس واحد را برآورد می‌نماید.

مطالعه موردی

منطقه مورد مطالعه شهر صدرا واقع در استان فارس که در پایان سال ۱۳۹۸ با داشتن ۱۲۲۲۲۶ نفر جمعیت، چهارمین شهر پرجمعیت استان فارس به شمار می‌رود. این شهر دارای مساحت ۲۲۴۸ هکتار می‌باشد. شبکه آب شهری صدرا از ۲۹۵۲ گره اتصالی، ۳۳۳۳ عدد لوله، ۳۷ مخزن و ۲۲ پمپ تشکیل شده است. مناطق مسکونی شهر جدید صدرا به دو فاز یک و دو تقسیم شده‌است که فاز یک در قسمت شرق و فاز دو در قسمت غرب قرار گرفته‌است. که در مختصات ۸.۲۹ درجه شمالی ۴.۵۲ درجه شرقی قرار گرفته است. در شکل ۲ موقعیت جغرافیایی شهر صدرا و انطباق شبکه آبرسانی شهری بر تصویر ماهواره‌ای شهر صدرا آورده شده است.



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی شهر صدرا و انطباق شبکه آبرسانی شهری بر تصویر ماهواره‌ای شهر صدرا

بحث و ارائه یافته‌ها:

در این مقاله به دنبال ۵ هدف شناسایی خطوط لوله بحرانی، تعیین میزان تاب‌آوری، تعیین مناطق بحرانی بر اساس معیار شکست، ارتباط شاخص تاب‌آوری و معیار شکست و بررسی مناطق مختلف شهری از نظر میزان نشت آب در لوله‌ها، جهت برنامه ریزان و مدیران شهری هستیم. عناوین مختلفی چون خطر، تهدید، اغتشاش، اختلال، رویداد، فاجعه و استرس‌زا برای توصیف عوامل نامطلوب یک سیستم استفاده می‌شود. که در شبکه آب معمولاً از عنوان خطر که دارای سه بخش بحران طبیعی (برای مثال زلزله)، شرایط غیر نرمال در مرحله بهره‌برداری (برای مثال شکست لوله) و افزایش اندازه شبکه و تقاضای مصرف‌کننده (منجر به عدم تأمین به موقع و متناسب با شبکه) می‌باشد، استفاده می‌شود (Liu W & Song Z, 2020). در این مقاله رفتار شبکه آب شهری با اعمال ۳ زلزله (به عنوان بحران طبیعی) با شدت‌های مختلف ۵، ۶ و ۷ ریشتر و مرکز زلزله در شمال، مرکز و جنوب مورد بررسی قرار گرفت. آمار خرابی و شکست لوله، برای هر زلزله در جدول ۱ آمده است. در جدول ۲ لیست ۱۰ لوله با بیشترین احتمال شکست برای زلزله‌های مختلف و مرکز زلزله متفاوت آمده است. همچنین ۱۸ سناریو به منظور بررسی شبکه آب شهر صدرا با وقوع زلزله با مرکز و شدت‌های مختلف و همزمان با سه استراتژی تعمیر متفاوت به شرح جدول ۳ در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ استراتژی تعمیر دو حالت در نظر گرفته شده است. استراتژی تعمیر اول بیانگر این است که تقاضای مورد انتظار مصرف‌کننده همانند شرایط نرمال و عادی است و هیچ گونه تغییری در برداشت از شبکه وجود ندارد. در استراتژی تعمیر دوم ۴۵ درصد تقاضای مورد انتظار مصرف‌کننده کاهش می‌یابد که در این حالت با توجه به شکست برخی از لوله‌ها سعی بر تأمین آب مورد نیاز تمامی مصرف‌کننده‌ها می‌باشد. با توجه به تعداد تیم‌های تعمیر و مدت زمان مورد نیاز برای رسیدن به محل حادثه (لوله‌های دچار نشت یا شکست)، تعمیر هر لوله دچار حادثه در این مقاله ۱۲ ساعت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است یک حادثه به منزله یک شکست یا یک نشت می‌باشد و بعضی از لوله‌ها دچار چند حادثه همزمان می‌گردند. که نحوه مدلسازی با جدا کردن آن لوله به ۲ یا چند بخش و ایجاد گره جدید و بستن شیر متصل به لوله به مدت ۱۲ ساعت و سپس باز کردن شیر مذکور انجام می‌شود.

جدول ۱: شماره ۱۰ لوله با بیشترین احتمال شکست برای زلزله‌های متفاوت (از نظر شدت و مرکز)

مرکز زلزله	شدت زلزله (ریشتر)	شماره لوله
شمال	۵.۵	۳۷۰۰۱ و ۳۰۰۵ و ۸۰۴۹ و ۳۹۰۰۴ و ۷۰۰۳ و ۲۸۰۰۶ و ۱۰۴۳ و ۷۰۱۸ و ۱۶۰۲۷ و ۱۰۴۲
مرکز	۵.۵	۱۶۰۳۸ و ۲۰۴۲ و ۸۰۴۹ و ۱۰۲۲ و ۱۶۰۳۱ و ۲۸۰۰۶ و ۱۰۴۳ و ۷۰۱۸ و ۱۶۰۲۷ و ۱۰۴۲
جنوب	۵.۵	۲۸۰۰۶ و ۱۰۴۳ و ۷۰۱۸ و ۱۶۰۲۷ و ۱۰۴۲ و ۲۸۰۰۶ و ۱۰۴۳ و ۷۰۱۸ و ۱۶۰۲۷ و ۱۰۴۲ و ۳۹۰۰۴ و ۷۰۰۳ و ۲۰۴۲ و ۸۰۴۹ و ۱۰۲۲ و ۱۶۰۳۱ و ۲۸۰۰۶ و ۱۰۴۳ و ۷۰۱۸ و ۱۶۰۲۷ و ۱۰۴۲
شمال	۶	۱۴۰۱۲ و ۱۶۰۲۷ و ۷۰۱۸ و ۳۰۰۵ و ۱۰۲۲ و ۱۰۴۳ و ۱۰۴۲ و ۱۶۰۳۱ و ۲۰۴۲ و ۱۶۰۳۱ و ۲۰۴۲ و ۷۰۰۱
مرکز	۶	۱۴۰۱۰ و ۳۰۰۵ و ۷۰۱۸ و ۱۰۲۲ و ۱۶۰۲۷ و ۱۰۴۳ و ۱۰۴۲ و ۱۶۰۳۱ و ۲۰۴۲ و ۱۶۰۳۱ و ۲۰۴۲ و ۷۰۰۱
جنوب	۶	۷۰۱۴ و ۴۰۰۸ و ۱۰۴۲ و ۱۶۰۲۷ و ۷۰۱۸ و ۱۴۰۱۰ و ۳۰۰۵ و ۱۰۴۳ و ۲۰۴۲ و ۷۰۰۱
شمال	۷	۷۰۱۴ و ۳۰۰۳۹ و ۲۷۰۰۱ و ۸۰۱۱ و ۳۹۰۰۴ و ۹۰۰۸ و ۱۶۰۳۱ و ۳۲۰۰۲ و ۳۶۰۰۴ و ۲۸۰۰۶
مرکز	۷	۳۲۰۰۲ و ۲۰۴۲ و ۸۰۴۹ و ۹۰۰۸ و ۸۰۱۱ و ۳۹۰۰۴ و ۲۷۰۰۱ و ۲۸۰۰۶ و ۱۶۰۳۱
جنوب	۷	۸۰۴۶ و ۷۰۱۴ و ۸۰۱۱ و ۳۰۰۶ و ۹۰۰۸ و ۲۷۰۰۱ و ۲۸۰۰۶ و ۱۶۰۳۱ و ۳۲۰۰۲ و ۳۹۰۰۴

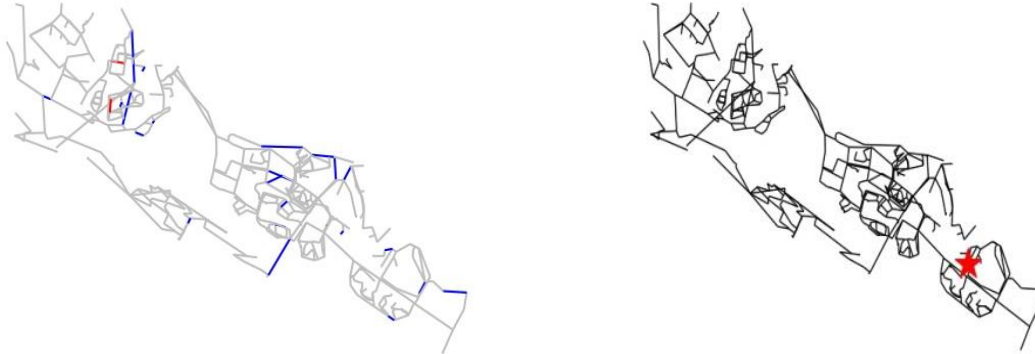
جدول ۳: سناریوها شامل شدت زلزله، مرکز زلزله و استراتژی تعمیر متفاوت

سناریو	مکان	شدت	استراتژی تعمیر یا تغییرات در تقاضای مورد انتظار
۱	شمال	۵.۵	بدون تغییر
۲	شمال	۵.۵	۴۵ درصد کاهش
۳	مرکز	۵.۵	بدون تغییر
۴	مرکز	۵.۵	۴۵ درصد کاهش
۵	جنوب	۵.۵	بدون تغییر
۶	جنوب	۵.۵	۴۵ درصد کاهش
۷	شمال	۶	بدون تغییر
۸	شمال	۶	۴۵ درصد کاهش
۹	مرکز	۶	بدون تغییر
۱۰	مرکز	۶	۴۵ درصد کاهش
۱۱	جنوب	۶	بدون تغییر
۱۲	جنوب	۶	۴۵ درصد کاهش
۱۳	شمال	۷	بدون تغییر
۱۴	شمال	۷	۴۵ درصد کاهش
۱۵	مرکز	۷	بدون تغییر
۱۶	مرکز	۷	۴۵ درصد کاهش
۱۷	جنوب	۷	بدون تغییر
۱۸	جنوب	۷	۴۵ درصد کاهش

تعیین حالات خسارت

A B

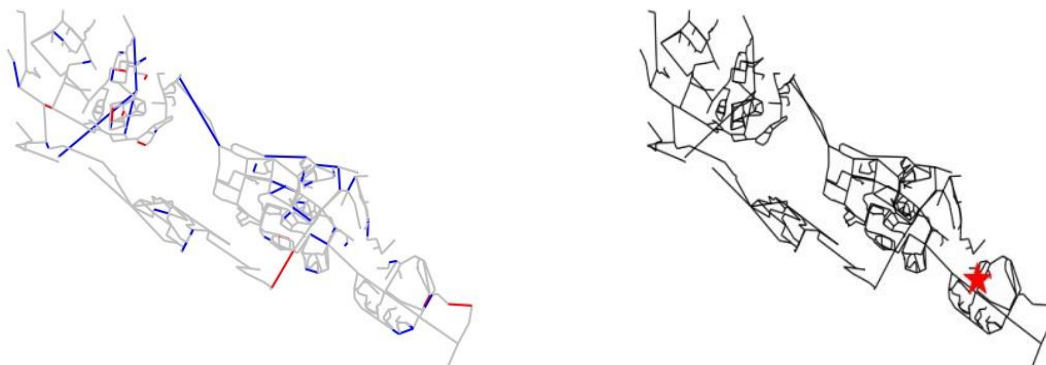
Damage States (blue = minor, red = major)



شکل ۳- (A) محل لوله‌های آسیب‌پذیر و خسارت دیده برای سناریو ۶ و (B) محل مرکز زلزله اتفاق افتاده

A B

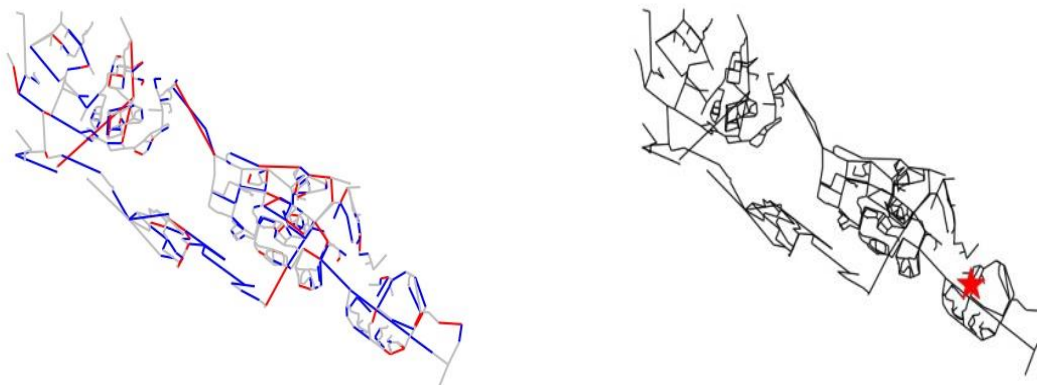
Damage States (blue = minor, red = major)



شکل ۴- (A) محل لوله‌های آسیب‌پذیر و خسارت دیده برای سناریو ۱۲ و (B) محل مرکز زلزله اتفاق افتاده

A B

Damage States (blue = minor, red = major)



شکل ۵- (A) محل لوله‌های آسیب‌پذیر و خسارت دیده برای سناریو ۱۸ و (B) محل مرکز زلزله اتفاق افتاده

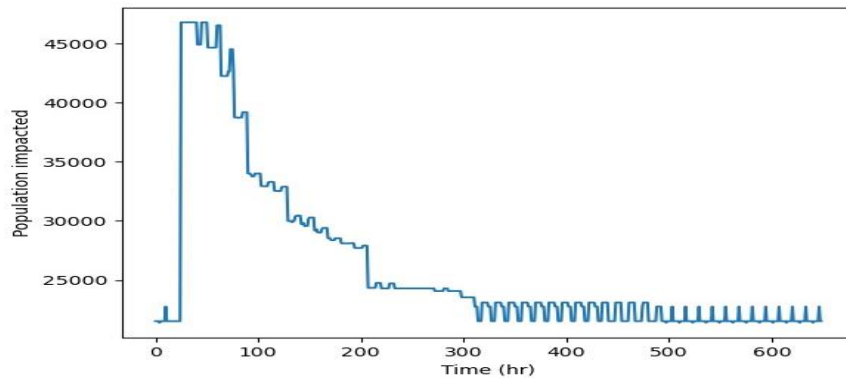
شکل ۳ نشان‌دهنده محل وقوع زلزله و حالات خسارت سناریوی ۶ که محل وقوع زلزله در جنوب شهر صدرا و شدت زلزله ۵.۵ ریشتر می‌باشد در این سناریو استراتژی تعمیر حالت دوم در نظر گرفته شده است. شکل ۴ نشان‌دهنده محل وقوع زلزله و حالات خسارت سناریوی ۱۲ و شکل ۵ نشان‌دهنده محل وقوع زلزله و حالات خسارت سناریوی ۱۸ می‌باشد. خطوط آبی رنگ در سه شکل بالا نشان‌دهنده لوله‌های با احتمال خسارت ضعیف و خطوط قرمز رنگ لوله‌های با احتمال خسارت زیاد می‌باشد که با افزایش شدت زلزله تعداد لوله‌های با خسارت زیاد نسبت به لوله‌های با احتمال خسارت ضعیف به صورت چشمگیر روند افزایشی دارند. پس از وقوع زلزله همانطور که قبلاً بیان شد از شاخص تاب‌آوری هیدرولیکی، جمعیت متأثر^۸ جهت بررسی رفتار و میزان تاب‌آوری شبکه توزیع آب استفاده می‌شود.

تعیین میزان تاب‌آوری

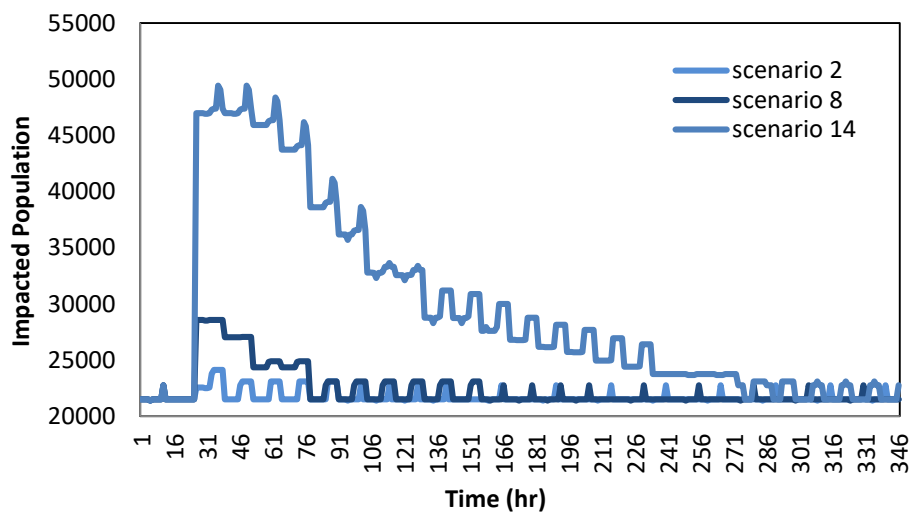
با توجه به اهمیت امنیت شهری، شاخص جمعیت متأثر از زلزله جهت تعیین میزان تاب‌آوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت تعیین میزان تاب‌آوری و به دست آوردن زمان بازگشت شبکه به حالت نرمال دیدگاه‌های متفاوتی وجود دارد که در این مقاله دیدگاه بدین صورت است که بایستی حداکثر ۲۰ درصد از مصرف‌کننده‌ها دچار عدم تأمین اولیه با دو استراتژی بدون تغییر در تأمین آب مورد انتظار و ۴۵ درصد کاهش در تأمین آب مورد انتظار شوند. شکل ۶ نتایج ۳۰ شبیه‌سازی برای شدت زلزله ۷ ریشتر و محل زلزله مرکز و استراتژی تعمیر حالت ۲ را نشان می‌دهند که برای هر شبیه‌سازی، لوله‌های مختلف آسیب دیده در شبکه که در منحنی شکنندگی تعیین می‌شوند را اولویت‌بندی کرده و با توجه به اولویت‌بندی لوله‌ها برای ترمیم نشد و بر اساس زمان مورد نیاز برای تعمیر و بازسازی توسط تیم‌های تعمیر، همانطور که قبلاً بیان شد، ترمیم و بازسازی انجام می‌گردد. این شکل‌ها جمعیت متأثر در طول زمان را نشان می‌دهد، که نمایانگر نفرت متأثر از عدم تأمین آب است که در واقع برای کل شبکه ارائه شده است. برای زلزله ۵.۵ ریشتر و محل زلزله در مرکز و استراتژی تعمیر ۲ (سناریو ۴) جمعیت متأثر از ۲۹۰۰۰ تا ۳۱۰۰۰ با وقوع زلزله افزایش می‌یابد و ۱ روز پس از زلزله به سطح ۲۹۰۰۰ نفر بر می‌گردد. برای زلزله ۶ ریشتر، محل زلزله در مرکز و استراتژی تعمیر ۲ (سناریو ۱۰) جمعیت متأثر زمان وقوع زلزله ۳۹۰۰۰ نفر بوده و ۱ روز پس از زلزله به ۳۶۰۰۰ نفر و ۲ روز پس از زلزله به ۳۰۰۰۰ نفر کاهش می‌یابد و زمان بازگشت به حالت نرمال ۱۶۰ ساعت می‌باشد. برای زلزله ۷ ریشتر و سناریو ۱۶ پس از زلزله، جمعیت متأثر به بیش از ۷۰۰۰۰ نفر می‌رسد، ۲ روز پس از زلزله روند کاهشی است به طوری که ۳ روز پس از زلزله به حدود ۵۵۰۰۰ نفر، ۷ روز پس از زلزله به ۳۵۰۰۰ نفر و در نهایت پس از گذشت حدوداً ۱۱ روز از زلزله شرایط به حالت نرمال بر می‌گردد (شکل ۶). خلاصه نتایج سناریوهای دیگر در جدول ۴ آمده است. در این جدول زمان بازگشت سیستم به حالت نرمال و بیشترین جمعیت بر حسب ساعت با دیدگاه بیان شده در قبل آمده است. با بررسی داده‌ها متوجه می‌شویم شدت زلزله بیشترین تأثیرگذاری را در خسارت و خرابی لوله دارد. زمانی که زلزله در مرکز منطقه مورد مطالعه اتفاق می‌افتد تعداد لوله‌های دچار شکست بیشتر و بازگشت سیستم به حالت نرمال حدوداً ۵ درصد بیشتر از زمانی است که مرکز زلزله در شمال و یا جنوب باشد. با بررسی جدول ۴، زمان بازگشت سیستم نسبت به تغییرات استراتژی تعمیر بدین صورت است که در استراتژی تعمیر حالت ۲ بیشترین زمان بازگشت سیستم به حالت نرمال نسبت به حالت دیگر را دارد. با مقایسه شاخص جمعیت متأثر نسبت به زمان برای سه زلزله با شدت ۵.۵ ریشتر، ۶ ریشتر و ۷ ریشتر و مرکز زلزله هر سه در شمال و استراتژی تعمیر یکسان با ۴۵ درصد کاهش تقاضای مورد انتظار مصرف‌کننده متوجه می‌شویم مدت زمان بازگشت سیستم به حالت نرمال و نمودار جمعیت متأثر در زلزله ۵ ریشتر (سناریو ۲) و ۶ ریشتر (سناریو ۸) تا حدودی شبیه به هم بوده و سیستم خیلی سریع به سمت بهبودی می‌رود در حالیکه در زلزله ۷ ریشتر (سناریو ۱۴) دارای تغییرات زیادی است و سیستم به صورت تدریجی به سطح نرمال می‌رسد. با مقایسه شاخص جمعیت متأثر نسبت به زمان برای سه زلزله با شدت ۵/۵ ریشتر (سناریو ۲)، ۶ ریشتر (سناریو ۸)، و ۷ ریشتر (سناریو ۱۴) و مرکز زلزله هر سه در شمال و استراتژی تعمیر یکسان با ۴۵ درصد کاهش تقاضای مورد انتظار متوجه می‌شویم که رفتار سناریو ۲ و سناریو ۸ شبیه به هم بوده و در سناریوی ۲ حدوداً ۲۵۰۰۰ نفر متأثر از زلزله می‌باشند. در سناریو ۸ جمعیت متأثر بیشتر و حدود ۳۰۰۰۰ نفر در ۷ ساعت پس از وقوع زلزله که به تدریج روند کاهشی می‌باشد و دو روز پس از وقوع زلزله به ۲۵۰۰۰ نفر می‌رسد در حالیکه در سناریو ۱۴، هفت ساعت پس از وقوع زلزله بیش از ۶۰۰۰۰ نفر متأثر از زلزله هستند و به صورت تدریجی این تعداد کاهش می‌یابد بدین گونه که ۳۷ ساعت پس از وقوع زلزله به حدود ۵۷۰۰۰ نفر کاهش می‌یابد. پس از گذشت ۶۷ ساعت از وقوع زلزله جمعیت متأثر به ۴۰۰۰۰ نفر کاهش می‌یابد و در نهایت پس از گذشت حدوداً ۲۶۰ ساعت سیستم به حالت نرمال خود بر می‌گردد. (شکل ۷). همچنین با مقایسه شاخص جمعیت متأثر نسبت به زمان برای ۳ زلزله با شدت یکسان ۷ ریشتر و استراتژی تعمیر حالت ۲ و مراکز زلزله متفاوت (در شمال، مرکز و جنوب) رفتار هر سه سناریو ۸، ۱۰ و ۱۲ تقریباً

⁸ Population impacted

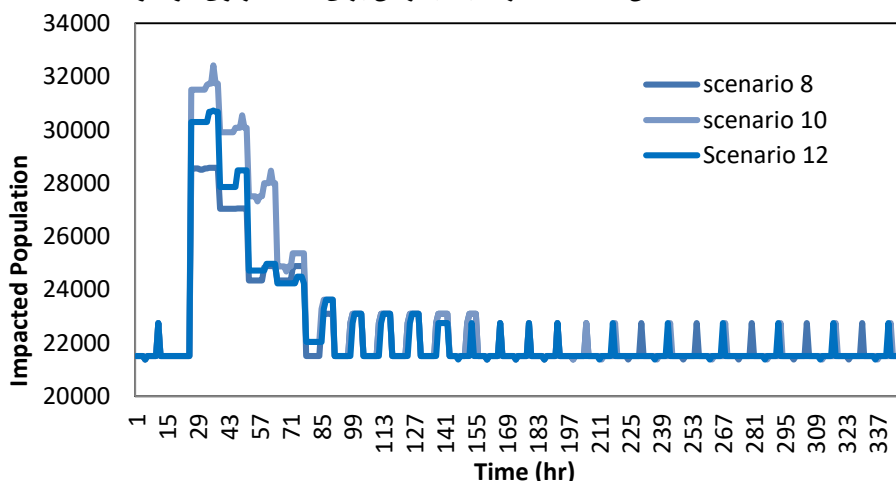
مشابه به هم بوده صرفاً سناریو ۱۲ جمعیت متأثر در یک روز پس از وقوع زلزله تا ۳ روز پس از وقوع زلزله نسبت به سناریو ۱۰ و ۱۲ حدوداً ۵ الی ۱۰ درصد کمتر می‌باشد بدین گونه که یک روز پس از وقوع زلزله سناریو ۸ و ۱۰ جمعیت متأثر حدوداً ۶۰۰۰ نفر بوده که این روند به صورت تدریجی کاهش می‌یابد و ۶۴ ساعت پس از وقوع زلزله حدود ۵۰۰۰ نفر، ۸۰ ساعت پس از وقوع زلزله به حدود ۴۰۰۰ نفر کاهش می‌یابد و این روند کاهشی تا حدود ۲۶۰ ساعت پس از وقوع زلزله که سیستم به حالت نرمال خود برگردد ادامه می‌یابد (شکل ۸).



شکل ۶- تغییرات بیشترین جمعیت نسبت به زمان برای سناریو ۱۶



شکل ۷- مقایسه شاخص جمعیت متأثر نسبت به زمان برای سه سناریوی ۲ و ۸ و ۱۴



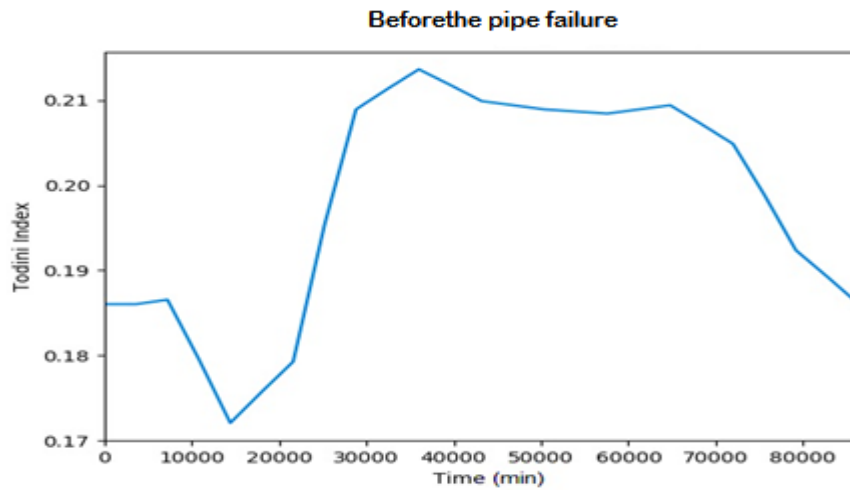
شکل ۸- مقایسه شاخص جمعیت متأثر نسبت به زمان برای سه سناریو ۸ و ۱۰ و ۱۲

جدول ۳: خلاصه زمان بازیابی و بیشترین جمعیت بر حسب ساعت برای تمام سناریوها

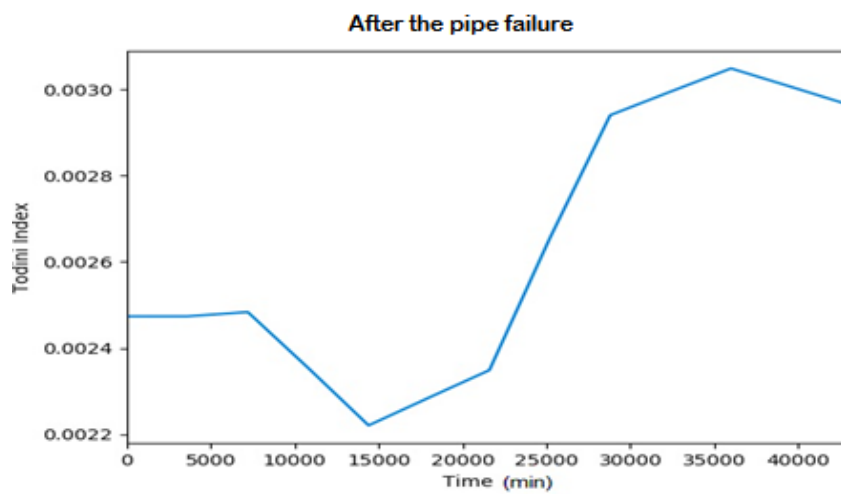
مرکز زلزله	شدت زلزله (ریشتر)	استراتژی تعمیر (حالت ۲، ۱)	زمان بازیابی (ساعت)	بیشترین جمعیت
شمال	۵.۵	۱	۱۰۰	۳۱۰۰۰
		۲	۱۲۵	۲۴۱۲۹
	۶	۱	۱۵۰	۳۹۷۱۱
		۲	۱۹۰	۲۸۵۷۴
	۷	۱	۲۷۰	۷۳۸۵۶
		۲	۲۹۵	۴۹۴۳۰
مرکز	۵.۵	۱	۱۲۰	۳۱۳۹۹
		۲	۱۳۰	۲۴۰۸۷
	۶	۱	۲۱۰	۴۵۱۲۶
		۲	۲۱۷	۳۲۴۲۱
	۷	۱	۳۰۰	۸۰۸۶۳
		۲	۳۱۰	۴۶۸۱۹
جنوب	۵.۵	۱	۱۲۰	۳۰۲۸۵
		۲	۱۲۵	۲۳۹۵۲
	۶	۱	۱۵۰	۴۴۳۰۴
		۲	۱۶۵	۳۰۷۳۲
	۷	۱	۲۸۰	۷۴۱۴۱
		۲	۳۰۰	۴۴۸۸۸

بررسی معیار شکست

همانطور که قبلاً گفته شد از شاخص Todini جهت بررسی معیار شکست استفاده می‌شود شبکه توزیع آب واقع در مناطق مختلف شهر از نظر معیار شکست بعد از وقوع زلزله مورد بررسی قرار می‌گیرند. در شکل ۱۰ و ۱۱ این شاخص برای سناریو ۷ در حالت قبل و بعد از رخ داد زلزله آمده است. در جدول ۵ شاخص Todini در حالت قبل از وقوع زلزله و در جدول ۶ خلاصه نتایج شاخص Todini برای سناریوهای ۱ تا ۱۸ آورده شده است. لازم به توضیح است که سناریوهای زوج به دلیل تشابه با سناریوی قبل از خود در جدول نیامده است. قبل از وقوع زلزله شاخص Todini پس از یک روز اصلاح می‌شود، در حالیکه پس از وقوع زلزله حدوداً ۳ روز طول می‌کشد که شاخص Todini اصلاح شود. ماکزیمم و مینیمم مقدار Todini قبل و بعد از شکست با هم تفاوت دارد. این اختلاف نشان می‌دهد که در صورت وقوع زلزله شبکه آب شهر صدرا پتانسیل پایینی در حفظ دبی و هد فشار دارد. بیشترین مقدار در زمان تقریبی ۳۵۰۰۰ دقیقه و کمترین مقدار شاخص Todini در زمان ۱۵۰۰۰ دقیقه قبل و پس از وقوع زلزله می‌باشد.



شکل ۹- مقایسه شاخص Todini برای سناریو ۷، برای قبل از وقوع زلزله



شکل ۱۰- مقایسه شاخص Todini برای سناریو ۷، برای بعد از وقوع زلزله

جدول ۴: مقادیر کمترین، میانگین و بیشترین شاخص Todini قبل از وقوع زلزله برای تمام سناریوها

Minimum	mean	maximum
۱۷۲ .۰	۱۹۷ .۰	۲۱۳ .۰

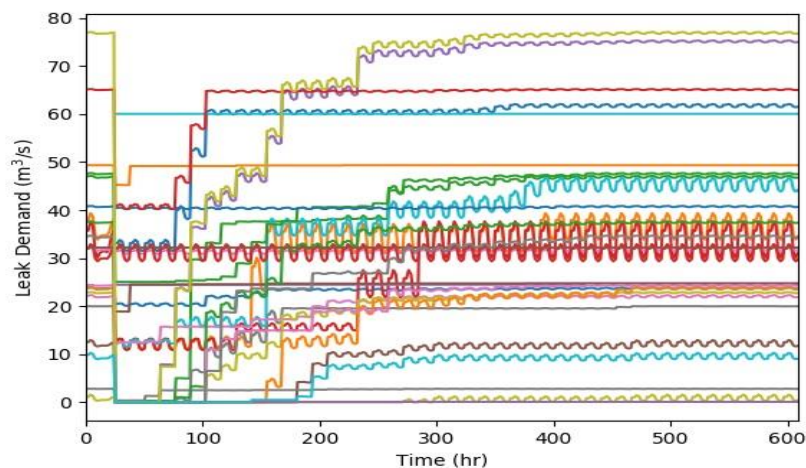
جدول ۵: مقادیر کمترین، میانگین و بیشترین شاخص Todini بعد از وقوع زلزله برای تمام سناریوها

سناریو	مقادیر شاخص Todini	
	Min.	Max.
۱	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۹۸
	۰/۰۰۹۸	۰/۰۱۱۴
	۰/۰۱۱۴	۰/۰۱۱۴
۳	۰/۰۰۹۱۴	۰/۰۱۰۹
	۰/۰۱۰۹	۰/۰۱۲۶
	۰/۰۱۲۶	۰/۰۱۲۶
۵	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۸۶
	۰/۰۱۸۶	۰/۰۲۱۶
	۰/۰۲۱۶	۰/۰۲۱۶
۷	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۲۶
	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۲۶
	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۳۰

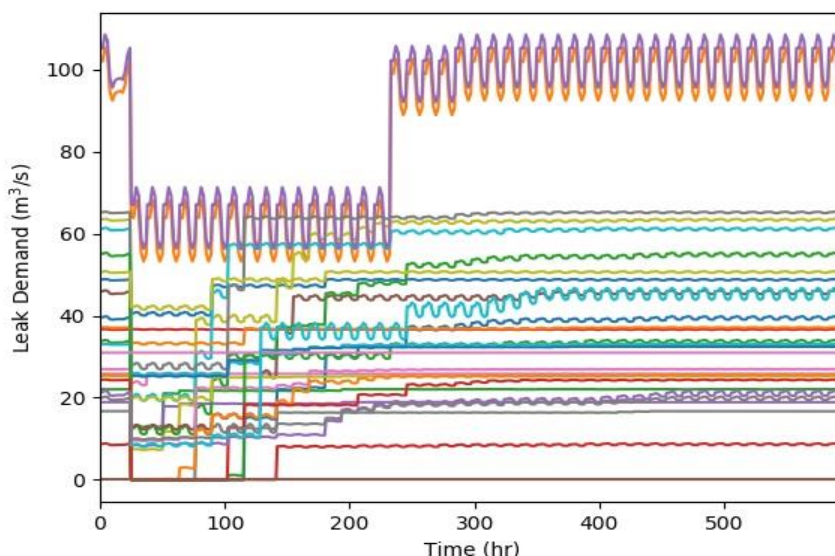
۹	Min.	۰/۰۰۱۹۸
	mean	۰/۰۰۲۳
	Max.	۰/۰۰۲۷
۱۱	Min.	۰/۰۰۲۵
	mean	۰/۰۰۳۰
	Max.	۰/۰۰۳۵
۱۳	Min.	۰/۰۰۴۸
	mean	۰/۰۰۰۵۸
	Max.	۰/۰۰۰۶۸
۱۵	Min.	۰/۰۰۰۴۴
	mean	۰/۰۰۰۵۴
	Max.	۰/۰۰۰۶۳۲
۱۷	Min.	۰/۰۰۰۴۷
	mean	۰/۰۰۰۵۵
	Max.	۰/۰۰۰۶۳۵

بررسی میزان نشت لوله‌ها

با شناسایی لوله‌هایی که احتمال نشت در زمان وقوع زلزله بالایی دارند، مدیران شهری می‌توانند با مقاوم‌سازی و تعمیر این لوله‌ها آمادگی لازم جهت کاهش ریسک خسارت را داشته باشند. با بررسی میزان نشت آب از لوله‌های آسیب‌پذیر و دچار شکست متوجه می‌شویم برای زلزله ۵ ریشتر که در شمال شهر به وقوع پیوسته حدوداً ۱ روز پس از زلزله نشت تمام شده، برای زلزله ۶ ریشتر حدوداً ۲ روز پس از زلزله و برای زلزله با شدت ۷ ریشتر حدوداً ۷ الی ۹ روز پس از زلزله میزان نشت از لوله‌ها تمام شده است. (شکل ۱۱ و ۱۲) همچنین با بررسی اثر محل وقوع زلزله (در شمال، مرکز و جنوب شهر) بر روی میزان نشتی متوجه می‌شویم زمانیکه محل وقوع زلزله در شمال می‌باشد مدت زمان اتمام میزان نشتی و مقدار دبی بیشتر می‌باشد و پس از آن محل زلزله در جنوب تأثیرپذیری بیشتری دارد.



شکل ۱۱- تغییرات نشت آب نسبت به زمان در لوله‌های دچار شکست و برای سناریو ۱۴



شکل ۱۲- تغییرات نشت آب نسبت به زمان در لوله‌های دچار شکست و برای سناریو ۱۸

انطباق نتایج تاب‌آوری شبکه آب شهری صدرا بر گام‌های چرخه مدیریت بحران

از آنجا که تاب‌آوری شهر و جامعه پدیده‌ای پیچیده، غیر قطعی، پویا از نظر ساختار و ماهیتی نامشخص است. میزان تاب‌آوری تحت تأثیر عوامل اقتصادی، اجتماعی، مکانی و فیزیکی متعددی قرار دارد. برنامه‌ریزی آن طیف وسیعی از ذینفعان و در کل بر جوامع مختلف شهری و ساکنان شهر تأثیر می‌گذارد (Jabareen, ۲۰۱۳). بر اساس بررسی (Hollnagel, 2014) مهندسی تاب‌آوری دارای چهار معیار زیر می‌باشد: اول توانایی پرداختن به واقعیت با دانستن آنچه اتفاق افتاده است. یعنی نحوه پیش‌بینی تحولات، تهدیدها و فرصت‌ها، مانند تغییرات بالقوه، به نتایج احتمالی با دانستن اینکه چه انتظاری می‌توان داشت. یعنی نحوه پیش‌بینی تحولات، تهدیدها و فرصت‌ها، مانند تغییرات بالقوه، اختلالات، فشارها و پیامدهای آن‌ها. سوم توانایی پرداختن به امر واقعی با دانستن اینکه چه کاری باید انجام دهید. که در حقیقت نحوه پاسخگویی به اختلالات و آشفتگی‌های منظم و نامنظم می‌باشد. و چهارم توانایی پرداختن به موارد مهم با دانستن اینکه به دنبال چه چیزی باشید. و نحوه نظارت بر اینکه چه چیزی ممکن است در کوتاه مدت به تهدید یا خطر تبدیل شود را بیان می‌کند. در ۴ مرحله مدیریت بحران شامل این توانایی‌ها می‌باشد که بیانگر ارتباط بین تاب‌آوری و مدیریت بحران می‌باشد. همچنین این توانایی‌ها بیانگر چهار بعد متشکله تاب‌آوری (افزونگی، مقاومت، منع‌پذیری و برگشت‌پذیری) می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های جمعیتی شهرها از منظر پراکندگی، زیر ساختی همچون شبکه توزیع آب در بخش‌هایی از شهر متراکم‌تر می‌باشد. لذا بررسی تاب‌آوری شبکه آب در برابر زلزله و کاهش آسیب‌پذیری از منظر تعداد افراد متأثر و زمان بازگشت شبکه به حالت عادی در مدیریت بحران شهری موضوع مهمی است. تاب‌آور کردن شهر را می‌توان گامی مؤثر در توسعه پایدار شهری تلقی نمود. رویکرد این مقاله شناسایی آسیب‌پذیری شبکه آب واقع در مناطق مختلف شهری با بررسی میزان جمعیت متأثر از زلزله، معیار شکست و میزان نشت از لوله‌ها می‌باشد که با نگاهی جدید در مدیریت و برنامه‌ریزی شهری به بررسی تأثیر وقوع زلزله و زمان بازگشت شبکه آب شهری به حالت نرمال می‌پردازد. با توجه به چهار مرحله مدیریت بحران، در مرحله اول (پیشگیری)، در این مقاله مناطق پر خطر، لوله‌های با آسیب‌پذیری بالا و نواحی پر جمعیت شناسایی و معرفی شدند. در مرحله دوم (آمادگی)، مکان‌یابی مناسب استقرار تیم‌های تعمیر شبکه آب بر اساس مناطق پر خطر (استقرار تیم بیشتر در شمال و مرکز) راهکار خوبی می‌باشد که می‌تواند در زمان وقوع زلزله راندمان تیم‌های تعمیر را حداکثر و زمان بازگشت شبکه به حالت نرمال را کوتاه‌تر کند. در مرحله سوم (مقابله)، تعداد تیم‌های تعمیر بایستی به گونه‌ای دیده شود که شریان‌های حیاتی را زودتر تعمیر نمایند. با توجه به استراتژی تعمیر گفته شده در مقاله (استراتژی حالت دوم) جمعیت کمتری تحت تأثیر زلزله قرار می‌گیرند که راه کار مناسبی جهت مقابله می‌باشد. در مرحله چهارم (بازسازی و بازتوانی)، با شناسایی لوله‌های آسیب‌پذیر پیشنهاد می‌گردد این لوله‌ها تعمیر و یا جایگزین شوند تا با مقاومت‌سازی آسیب‌های وارده در زمان وقوع زلزله کاهش یابند. نتایج این تحقیق با دو مقاله ارائه شده توسط klise et al, 2017, klise et al, 2015 مقایسه شد. در هر دو مقاله از شاخص todini جهت ارزیابی معیار شکست استفاده شده است. در مقاله سال ۲۰۱۵ از نرم‌افزار wntr به دلیل قابلیت زیاد در مدل‌سازی شبکه پیچیده و استفاده از

روش هیدرولیکی مبتنی بر تقاضای فشار استفاده و نتایج این تحقیق با مقاله ایشان هم از نظر زمان بازگشت شبکه به حالت نرمال و هم مفهوم جمعیت متأثر، منطبق می‌باشد.

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها:

چهار نوع تاب‌آوری اجتماعی، اقتصادی، سازمانی و فنی را می‌توان در نظر گرفت. تاب‌آوری سازمانی مربوط به توانایی سازمان‌ها برای مدیریت سیستم است. به عنوان مثال، اقدامات انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سازمانی می‌تواند شامل چگونگی عملکرد واحدهای اضطراری، سرعت تعویض سریع قطعات یدکی، سرعت دسترسی خدمه تعمیر به اجزای آسیب دیده سیستم و غیره باشد (Bruneau, 2003). این مقاله به ارزیابی تاب‌آوری شبکه آب شهری در برابر زلزله با در نظر گرفتن زلزله با شدت‌های مختلف و استراتژی تعمیر متفاوت پرداخته شد. که با محاسبه پارامترهای PGA و PGV و R. R حالات خسارت مختلف برای لوله بررسی و ارائه گردید. با تقسیم‌بندی لوله‌ها به دو بخش با احتمالات خسارت ضعیف و زیاد و ترمیم این لوله‌ها با در نظر گرفتن شرایط واقعی منجمله زمان رسیدن تیم تعمیر و مدت زمان تعمیر لوله‌های دچار حادثه، شاخص تاب‌آوری هیدرولیکی، جمعیت متأثر، ترسیم و با بحث و بررسی، میزان تاب‌آوری و زمان بازگشت شبکه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. با افزایش شدت زلزله شاخص Todini در شمال بیشتر می‌شود و این یعنی پتانسیل و ظرفیت شبکه در شمال شهر صدرا در نگهداشت دبی و هد فشاری رفتار بهتری دارد. در حالی که در رخ داد زلزله با شدت پایین‌تر این رفتار ضعیف‌تر می‌باشد. با افزایش شدت زلزله در هر ۳ منطقه شمال، مرکز و جنوب شاخص Todini کاهش می‌یابد و کلاً شبکه توزیع آب رفتار و پتانسیل خوبی در نگهداشت دبی و هد فشار ندارد، که به ترتیب شبکه در جنوب پتانسیل بالاتری نسبت به مرکز و شمال دارد. و در کل شبکه توزیع آب در شمال شهر دارای ضعف بیشتری می‌باشد. استراتژی تعمیر با دو دیدگاه قابل ارزیابی و بررسی است. دیدگاه اول از منظر زمان بازگشت به نرمال و دومی از منظر جمعیت متأثر می‌باشد. در دیدگاه اول زمان بازگشت به حالت نرمال کمتر و در دیدگاه دوم کمترین جمعیت متأثر بهترین کارآمدی را دارد. با بررسی نتایج، با دیدگاه اول استراتژی تعمیر حالت اول و با دیدگاه دوم استراتژی تعمیر حالت دوم بهترین کارآمدی را دارند. بحرانی‌ترین حالت با در نظر گرفتن شاخص جمعیت متأثر برای زلزله ۷ ریشتر و مرکز زلزله مرکز و استراتژی تعمیر حالت ۱ با جمعیت متأثر ۸۰۸۶۳ نفر می‌باشد. در مرکز زلزله شمال، برای زلزله ۵.۵ ریشتر کمترین زمان بازگشت به نرمال ۱۲۵ ساعت و کمترین جمعیت متأثر ۲۴۱۲۹ نفر، برای زلزله ۶ ریشتر کمترین زمان بازگشت ۱۹۰ ساعت و کمترین جمعیت متأثر ۲۸۵۷۴ نفر و برای زلزله ۷ ریشتر کمترین زمان بازگشت به نرمال ۲۹۵ ساعت و کمترین جمعیت متأثر ۴۹۴۳۰ نفر می‌باشد. در زلزله در ناحیه مرکز، برای زلزله ۵.۵ ریشتر کمترین زمان بازگشت به نرمال ۱۳۰ ساعت و کمترین جمعیت متأثر ۲۴۰۸۷ نفر، برای زلزله ۶ ریشتر کمترین زمان بازگشت ۲۱۷ ساعت و کمترین جمعیت متأثر ۳۲۴۲۱ نفر و برای زلزله ۷ ریشتر کمترین زمان بازگشت به نرمال ۳۱۰ ساعت و کمترین جمعیت متأثر ۴۲۸۱۹ نفر می‌باشد. در مرکز زلزله جنوب، برای زلزله ۵.۵ ریشتر کمترین زمان بازگشت به نرمال ۱۲۵ ساعت و کمترین جمعیت متأثر ۲۳۹۵۲ نفر، برای زلزله ۶ ریشتر کمترین زمان بازگشت ۱۶۵ ساعت و کمترین جمعیت متأثر ۳۰۷۳۲ نفر و برای زلزله ۷ ریشتر کمترین زمان بازگشت به نرمال ۳۰۰ ساعت و کمترین جمعیت متأثر ۴۴۸۸۸ نفر می‌باشد. با بررسی دقیق‌تر جدول ۴ و همچنین بررسی نمودارهای تغییرات میزان نشت نسبت به زمان و فهمیدن میزان تأثیرگذاری شدت و محل وقوع زلزله می‌توان لوله‌های بحرانی را لوله‌های شماره ۲۸۰۰۶ و ۳۲۰۰۲ و ۱۶۰۳۱ و ۹۰۰۸ و ۸۰۱۱ و ۲۷۰۰۱ و ۷۰۱۴ و ۲۰۴۲ در نظر گرفت که با مقاومت‌سازی و یا جایگزینی این لوله‌ها با لوله‌های جدید با استفاده از لوله با جنس با دوام‌تر استفاده از لوله با قطر بیشتر میزان آسیب‌پذیری را کاهش داد. در نهایت با شناسایی خطوط لوله و مناطق بحرانی شبکه توزیع آب شهری در برابر زلزله برنامه ریزان شهری می‌توانند در راستای افزایش امنیت شهر و رسیدن به هدف شهر تاب‌آور گامی مؤثر بردارند.

ملاحظات اخلاقی:

پیروی از اصول اخلاق پژوهش: در مطالعه حاضر فرم‌های رضایت نامه آگاهانه توسط تمامی آزمودنی‌ها تکمیل شد.

حامی مالی: هزینه‌های مطالعه حاضر توسط نویسندگان مقاله تأمین شد.

تعارض منافع: بنابر اظهار نویسندگان مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References:

1. Asadi azizabadi, M. , ziari, K. , Vatankhahi, M. Explaining resilience Strategies for urban worn out texture (Case Study: urban worn out texture of Karaj). , 2020; 10(39): 33-50
2. Bałut A, Brodziak R, Byłka J, Zakrzewski P. Ranking approach to scheduling repairs of a water distribution system for the post-disaster response and restoration service. *Water*. 2019;11(8): 1591.
3. Bruneau M, Chang SE, Eguchi RT, Lee GC, O'Rourke TD, Reinhorn AM, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake spectra*. 2003;19(4): 733-52.
4. Cimellaro G, Tinebra A, Renschler C, Fragiadakis M. New resilience index for urban water distribution networks. *Journal of Structural Engineering*. 2016;142(8): C4015014.
5. Farahmandfar Z, Piratla KR, Andrus RD. Resilience evaluation of water supply networks against seismic hazards. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2017;8(1): 04016014.
6. Gholami Bimaragh, Y. , heidary, R. , vahideh Berahman, V. , Abolfazl Dehghan Jazi, A. , osoli, H. Measurement, and Evaluation of Spatial Resilience of Earthquake Central Districts of Kashan. , 2021; 12(44): 123-140.
7. Holling CS. Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*. 1973;4(1): 1-23.
8. Grossel S. Chemical process safety: fundamentals with applications, (2002)-By Daniel A. Crowl and Joseph F. Louvar, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, pp. 642, \$94. 50. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2002;6(15): 565-6.
9. Hunter JD. Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in science & engineering*. 2007;9(03): 90-5.
10. Jabareen Y. Planning the resilient city: Concepts and strategies for coping with climate change and environmental risk. *Cities*. 2013;31: 220-9.
11. Klein Richard J, Nicholls Robert J. Thomalla Frank (2003),“. Resilience to natural hazards: How useful is this concept. 35-45.
12. Klise KA, Bynum M, Moriarty D, Murray R. A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study. *Environmental modelling & software*. 2017;95: 420-31.
13. Klise KA, Murray R, Walker LTN. Systems measures of water distribution system resilience. Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2015.
14. Kordabadi M, Najafi E. Evaluating earthquake risk using the AHP-FUZZY hybrid model in urban security(case study District one of Tehran. *Journal Research and Urban Planning*,6(20),2015,17-34
15. Liu W, Song Z, Ouyang M, Li J. Recovery-based seismic resilience enhancement strategies of water distribution networks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020;203: 107088.
16. Liu W, Song Z. Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020;193: 106617.
17. Maleki, S. , Razavii, S. , Ramazanpour Asadieh, K. Measurement and Evaluation of Resilience to Earthquake Urban Areas (Case Study: Western District of Izeh City). 2020;
18. Parizadi, T. , shaikholeslami, A. , karimi razakani, A. (2019). 'Analysis of the state of urban resilience against natural hazards (Case Study: Baqer-shahr City)',10(37), pp. 41-54.

19. Shi P, O'Rourke T. Seismic response modeling of water supply systems. Mceer-08-0016, 352. 2008
20. Todini E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. Urban water. 2000;2(2): 115-22.
21. Toprak S. Earthquake effects on buried lifeline systems: Cornell University; 1998.
22. Uitto JI. Environmental hazards, climate change and disaster risk reduction: JK Mitchell's relevance to the global sustainable development agenda. Journal of Extreme Events. 2016;3(02): 1671006.
23. Zare N, Talebbeydokhti N. Policies and governance impact maps of floods on metropolitan Shiraz (the first step toward resilience modeling of the city). International journal of disaster risk reduction. 2018;28: 298-317.
24. Zhao X, Chen Z, Gong H. Effects comparison of different resilience enhancing strategies for municipal water distribution network: A multidimensional approach. Mathematical Problems in Engineering. 2015;2015.