



## Assessment of Hydraulic Resilience and Return Time of Sadra City Water Distribution Network under Earthquake

A. Nariman<sup>1</sup>, M.H. Fattahi<sup>2\*</sup>, N. Talebbeydokhti<sup>3</sup>,  
and M.S. Sadeghian<sup>4</sup>

### Abstract

Assessing the resilience of the urban water distribution system against natural disasters and unforeseen events is very important in urban management. In this paper, the amount of hydraulic resilience of Sadra water network against earthquake has been studied. Various strategies have also been defined for repairing the water distribution network. In this paper, Sadra city water network is first simulated in EPANET and then imported as input into WNTR (Water Network Tool for Resilience) code, which is programmed in Python. WNTR is developed based on the theory of complex networks and calculates the index of citizens' access to water services. In this paper, 18 scenarios were examined considering changes in earthquake intensity, earthquake center and two repair strategies with a decrease in the amount of consumer demand. Pipes are divided into two categories, general and minor damage, based on the probability of failure. Todini index is used to evaluate the failure criteria in the water distribution network. Results showed that while the increase in earthquake intensity in all areas is positively correlated with the paternal damage of the water supply network, the return time of the network to normal conditions depends on the repair strategy and change in the expected consumer demand. Meanwhile, the fractal analysis of the water supply network has been performed in order to analyze the redundancy of the network based on the fractal dimension in order to find the most vulnerable area of the network. Assessing the hydraulic resilience indices and fractal analysis depicted that the North is the most vulnerable area and South has the highest network resilience. Finally, the return time of the system to normal condition in each scenario and the number, ID and location of damaged pipes in each scenario was determined.

**Keywords:** Repair Strategy, Damage Status, WNTR, Water Service Availability.

Received: May 11, 2021

Accepted: August 25, 2021

## ارزیابی تاب‌آوری هیدرولیکی و زمان بازگشت شبکه توزیع آب شهر صدرا در برابر زلزله

علیرضا نریمان<sup>۱</sup>، محمدهادی فتاحی<sup>۲\*</sup>، ناصر طالب بیدختی<sup>۳</sup> و  
محمدصادق صادقیان<sup>۴</sup>

### چکیده

ارزیابی تاب‌آوری سیستم توزیع آب شهری در برابر بلایای طبیعی و حوادث پیش‌بینی نشده در مدیریت شهری اهمیت بسزایی دارد. در این مقاله میزان تاب‌آوری هیدرولیکی شبکه آب شهر صدرا در برابر زلزله مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین استراتژی‌های مختلفی برای تعمیر شبکه توزیع آب تعریف شده است. در این مقاله ابتدا شبکه آب شهر صدرا در EPANET شبیه‌سازی شده و سپس به عنوان ورودی در کد WNTR وارد می‌شود. WNTR بر اساس تئوری شبکه‌های پیچیده توسعه یافته و شاخص دسترسی شهروندان به خدمات آب را محاسبه می‌نماید. در این مقاله ۱۸ سناریو با تغییر در شدت زلزله (۵/۵، ۶ و ۷ ریشتر)، مرکز زلزله (شمال، مرکز و جنوب) و دو استراتژی تعمیر با کاهش در میزان تقاضای موردانتظار مصرف‌کننده (۲۵ و ۴۰ درصد کاهش)، مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی معیارهای شکست در شبکه توزیع آب در این مقاله از شاخص Todini استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد در حالی که افزایش شدت زلزله در تمامی نواحی رابطه همبستگی مثبت با آسیب‌پذیری شبکه آبرسانی دارد، زمان بازگشت شبکه به شرایط نرمال به استراتژی تعمیر و تغییر در تقاضای مورد انتظار مصرف‌کننده وابسته است. ضمناً آنالیز فراکتال شبکه آبرسانی به منظور تحلیل میزان افزونگی شبکه بر اساس محاسبه بعد فراکتال به منظور یافتن آسیب‌پذیرترین ناحیه شبکه انجام شده است. بررسی نتایج شاخص‌های هیدرولیکی تاب‌آوری و آنالیز فراکتال همگی نشان می‌دهد که شمال به عنوان آسیب‌پذیرترین ناحیه است و میزان تاب‌آوری شبکه در جنوب بیشترین است. در نهایت زمان بازگشت سیستم به حالت نرمال در هر سناریو و تعداد، شماره و محل لوله‌های آسیب دیده در هر سناریو تعیین شده است.

**کلمات کلیدی:** استراتژی تعمیر، سطح خرابی، WNTR، دسترسی به خدمات آب.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۶/۳

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. Email: fattahi.mh@gmail.com

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.

\*- Corresponding Author

DOI: [20.1001.1.17352347.1400.17.2.14.7](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.2.14.7)

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.

\*- نویسنده مسئول

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

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 (2020) با فراهم کردن ظرفیت اضافی و ایجاد اتصالات جدید در مقیاس کوچکتر به بررسی تاب‌آوری لرزه‌ای چند مقیاسی شبکه پیچیده توزیع آب و فاضلاب شهری پرداخت. (Diao (2021) با بررسی میزان تاب‌آوری چندمقیاسی 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.

آنچه در کار پژوهشگران پیشین بیشتر مورد توجه بوده است بررسی تاب‌آوری شبکه بر اساس میزان آسیب‌دیدگی شبکه لوله و به تبع آن کاهش سطح خدمات در شبکه می‌باشد. دیدگاه دیگری که در مطالعه تاب‌آوری حائز اهمیت می‌باشد ارزیابی تاب‌آوری از منظر ظرفیت بازگشت شبکه به سطح ارائه خدمات پس از وقوع بحران می‌باشد. به عبارتی دیگر نه تنها میزان آسیب‌دیدگی کمتر شبکه به عنوان برآیندی از مراحل مهندسی طراحی، کیفیت اجزاء و اجرای شبکه، شاخص تاب‌آوری شبکه را نشان می‌دهد بلکه ظرفیت شبکه آبرسانی در بازیابی راندمان و جبران کاهش فشار ناشی از آسیب‌دیدگی در نقاط بحرانی نیز جنبه دیگری از تاب‌آوری را به تصویر می‌کشد. بخشی از این ظرفیت شبکه در شکل چیدمان<sup>۱</sup> شبکه نهفته می‌باشد که افزودنی بیشتر سیستم را ایجاد می‌کند و با معیارهای غیرخطی قابل آشکارسازی است.

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. در این مقاله به ارزیابی تاب‌آوری شبکه آب شهری در برابر زلزله با در نظر گرفتن زلزله با شدت‌های مختلف و استراتژی تعمیر متفاوت پرداخته می‌شود. منطقه مورد مطالعه شهر جدید صدرا است که بخشی از کلانشهر شیراز می‌باشد. شبکه آب شهر صدرا در ابتدا با کمک نرم‌افزار EPANET مدل‌سازی و آنالیز هیدرولیکی می‌شود، سپس به عنوان اطلاعات ورودی به WNTR ارائه می‌شود. در حالی که مطالعه موردی بر روی زلزله متمرکز است 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 هیدرولیکی، در دسترس بودن سرویس آب، میزان تاب‌آوری و زمان بازگشت شبکه به شرایط نرمال به عنوان یکی از اصلی‌ترین ویژگی‌های یک شبکه تاب‌آور در برابر زلزله مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس شاخص ارائه

زیرساخت‌هایی همچون شبکه‌های توزیع آب، آنقدر حیاتی هستند که آسیب یا تخریب آنها پس از بلایای طبیعی و یا حوادث پیش‌بینی نشده، تأثیرات منفی زیادی بر امنیت شهری، اقتصاد و بهداشت عمومی خواهد داشت. مفهوم تاب‌آوری به صورت مرسوم در تحقیقات زمینه‌های متفاوتی از زیست محیطی تا علوم مواد، مهندسی، روانشناسی، جامعه‌شناسی و اقتصاد مورد استفاده قرار می‌گیرد (Bruneau et al., 2003; Zare and Talebbeydokhti, 2018). تاب‌آوری را می‌توان به عنوان توانایی سیستم در کاهش وقوع شوک، در صورت بروز توانایی جذب شوک و بازیابی سریع پس از شوک (بازگشت به عملکرد طبیعی) تعریف کرد. به طور خاص‌تر، سیستم تاب‌آور سیستمی است که موارد زیر را نشان می‌دهد: (۱) کاهش احتمال شکست؛ (۲) کاهش عواقب ناشی از شکست‌ها و (۳) کاهش زمان بازیابی و بازسازی سیستم به سطح عملکرد طبیعی (Bruneau et al., 2003). در سالهای اخیر، مطالعات تاب‌آوری در دو دیدگاه از جمله ارزیابی تاب‌آوری و شبیه‌سازی استراتژی‌های بازیابی مبتنی بر تاب‌آوری متمرکز شده اند (Lie et al., 2003). اولین مطالعات در زمینه تاب‌آوری شبکه توزیع آب توسط Todini انجام شده است (Todini, 2000). تودینی از یک رویکرد ابتکاری برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه آب شهری استفاده کرد. تاب‌آوری شبکه توزیع آب در برابر بلایای طبیعی و خصوصاً زلزله از جنبه‌های مختلفی توسط محققان مورد ارزیابی قرار گرفته است. Zhao et al. (2015) به ارزیابی تاب‌آوری شبکه آب شهری در برابر زلزله پرداختند. آنها استراتژی‌های مختلف افزایش تاب‌آوری برای شبکه لوله شهری را مطالعه کردند. (Farahmandfar et al. (2017) بر مقاومت شبکه توزیع آب در برابر زلزله متمرکز شدند و راه‌کارهایی مانند تعمیر لوله‌های شکسته، جایگزینی لوله‌های شکننده و افزودن لوله‌های جدید را ارائه دادند. (Di Nardo et al. (2017) برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع آب در برابر بحران‌های منجر به خرابی لوله شامل زلزله، رویکرد جدیدی را به کار گرفتند که تئوری شبکه پیچیده و ویژگی‌های فراکتال شبکه لوله را بهم پیوند می‌داد. (Klise et al. (2017) همچنین از نظریه شبکه پیچیده در یک چارچوب نرم‌افزاری برای ارزیابی مقاومت شبکه توزیع آب شهری در برابر زلزله استفاده کردند. (Bafut et al. (2019) مدل ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای برای شبکه توزیع آب را با تمرکز بر مقایسه توالی‌های بازیابی لوله‌های مختلف ارائه داده است. (Taoan Huang and Bistra Dilkina (2020) مطالعاتشان را بر بهبود عملکرد لوله‌های آسیب‌دیده 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

در پاسخ به تغییرات<sup>۴</sup> و افزونگی<sup>۵</sup> افزونگی و ویژگی بسیار مهمی برای تاب‌آوری است، زیرا نشان دهنده توانایی استفاده از منابع جایگزین است، در صورتی که منابع اصلی کافی نیستند یا از بین می‌روند.

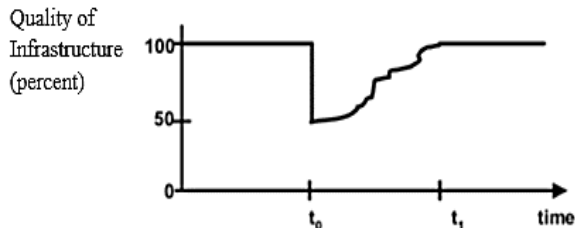


Fig. 1- Conceptual expression of seismic resilience (Bruneau et al., 2003)

شکل ۱- بیان مفهومی تاب‌آوری لرزه‌ای (Bruneau et al., 2003)

اگر سیستم تاب‌آور باشد، بدون در نظر گرفتن واقعه شدید، حداقل یک سناریو برای امکان بازیابی وجود دارد. اگر این شرط توسط سیستم برآورده نشود، می‌توان تغییراتی را در سیستم ایجاد کرد، مانند اجزای تکثیر برای ارائه گزینه‌های جایگزین در صورت خرابی می‌باشد. منبع‌پذیری، که هم منابع فعلی توسعه‌یافته برای افزایش قدرت یک مرکز و هم منابع جدید را برای پشتیبانی از پاسخگویی به یک رویداد و بازیابی سیستم مشخص می‌کند. توانمندی "توانایی شناسایی مشکلات، تعیین اولویت‌ها و بسیج منابع در صورت وجود شرایطی است که تهدیدی برای برهم زدن برخی از عناصر، سیستم یا واحد تجزیه و تحلیل دیگر است". تغییر در منابع و افزونگی بر شکل و شیب منحنی بازگشت و زمان بازگشت سیستم به حالت نرمال تأثیر می‌گذارد. همچنین، بر سرعت و استحکام تأثیر می‌گذارد. از طریق افزونگی و منبع‌پذیری (به عنوان شاخص تاب‌آوری) است که می‌توان سرعت و مقاومت (حد تاب‌آوری) یک سیستم را بهبود بخشید (Bruneau et al., 2003). در این تحقیق از مفهوم افزونگی و منبع‌پذیری در ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع آب شهری و در قالب شاخص‌های هیدرولیکی تاب‌آوری و بعد فراکتال چیدمان شبکه استفاده شده است.

## ۲-۲- مدل سازی

مدل شبکه آب را می‌توان در WNTR ساخت و یا از EPANET به عنوان ورودی دریافت نمود. WNTR<sup>۶</sup> یک بسته پایتون است که به پایتون (۲/۷، ۳/۴ یا 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

شده توسط Todini (2000) معرفی و با شاخص تاب‌آوری هیدرولیکی مقایسه و بحث می‌شود. در این مطالعه همچنین تلاش داریم تا با بهره جستن از یک رویکرد غیر خطی مبتنی بر آنالیز فراکتال چیدمان شبکه، به رابطه درونی ما بین تاب‌آوری شبکه و چیدمان شبکه آبرسانی شهری بپردازیم. فراکتالیته شبکه به عنوان شاخص افزونگی در شبکه لوله شهری ظرفیت سیستم آبرسانی را در برابر تغییرات مخرب همچون زلزله و همچنین توانایی شبکه در بازیابی پس از بحران را نشان می‌دهد که رویکرد نوینی در بررسی تاب‌آوری شبکه قلمداد می‌گردد. نهایتاً بعد فراکتال چیدمان شبکه به عنوان نماد افزونگی شبکه با شاخص Todini مقایسه گردیده و اثربخشی کاربرد آن در ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع آب شهری نشان داده شده است.

## ۲- تئوری

### ۲-۱- تعریف تاب‌آوری

بر اساس تعاریف Klein et al. (2003)، 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 Holling (1973) 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 و تخریب آرام در صورت لزوم تعریف می‌شود (Todini, 2000). این روش همانطور که در شکل ۱ ترسیم شده مبتنی بر این مفهوم است که معیار  $Q(t)$ ، که با توجه به زمان متفاوت است، برای کیفیت زیرساخت‌های یک جامعه تعریف شده است. به طور خاص، عملکرد می‌تواند از محدوده صفر تا ۱۰۰ باشد، جایی که ۱۰۰ درصد به معنای عدم تخریب خدمات و عدد صفر به معنای عدم دسترسی سرویس است. اگر یک زمین‌لرزه در زمان  $t$  رخ دهد، می‌تواند به زیرساخت‌ها آسیب کافی برساند. انتظار می‌رود که بازسازی زیرساخت‌ها با گذشت زمان اتفاق بیفتد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، تا زمان  $t_1$  که کاملاً ترمیم شود (با کیفیت ۱۰۰٪ نشان داده شده است) از دست دادن مقاومت در برابر زلزله،  $R$ ، با توجه به آن زمین‌لرزه خاص، می‌تواند با اندازه تخریب مورد انتظار در کیفیت (احتمال خرابی)، با گذشت زمان (یعنی زمان بهبودی) اندازه‌گیری شود.

$$R = \int_{t_0}^1 [100 - Q(t)] dt \quad (1)$$

ارزیابی تاب‌آوری در هر سیستمی از چهار بعد تشکیل شده است: توانمندی یا کاردانی سیستم<sup>۲</sup>، منبع‌پذیری یا سازگاری<sup>۳</sup>، سرعت سیستم

بر اساس تئوری شبکه پیچیده به تحلیل شبکه آب می‌پردازد، از این رو این نرم‌افزار قابلیت خوبی برای تحلیل موضوع تاب‌آوری خواهد داشت. برای بررسی عدم قطعیت مرتبط با مدل‌سازی بلایای احتمالی، می‌توان از تکنیک‌های مونت کارلو برای شبیه‌سازی‌های متعدد یا نتایج یک سناریوی معین استفاده کرد. WNTR این قابلیت را دارد که اجازه دهد ویژگی‌های یک سناریوی فاجعه از توزیع‌های آماری ترسیم شود. منحنی‌های شکنندگی احتمال موقعیت و شدت اختلال را فراهم می‌کند. مدت زمان اختلال را می‌توان از توزیع‌های آماری نیز بدست آورد. توزیع‌ها می‌توانند تابعی از خصوصیات مولفه‌ها (به عنوان مثال، سن لوله، مواد یا نوع اتصال)، تغییر محیط (به عنوان مثال، PGA، PVG یا RR) یا منابع موجود (به عنوان مثال، تعداد خدمه تعمیر موجود) باشند. WNTR با بسیاری از توزیع‌های آماری و روش‌های انتخاب تصادفی سازگار است که می‌تواند برای شبیه‌سازی تصادفی استفاده شود. WNTR همچنین شامل توانایی توقف موقت در شبیه‌سازی هیدرولیکی، تغییر عملیات شبکه و سپس راه‌اندازی مجدد شبیه‌سازی است. مدل شبکه آب و نتایج شبیه‌سازی نیز می‌تواند در پرونده‌ها ذخیره شده و برای تجزیه و تحلیل آینده بارگیری شود. این ویژگی‌ها هنگام ارزیابی برنامه‌های عملیاتی مختلف و هنگام شبیه‌سازی دوره‌های طولانی با وضوح زمانی متفاوت مفید هستند. از ابزارهای استاندارد پایتون نیز می‌توان برای اجرای شبیه‌سازی به صورت موازی استفاده کرد.

### ۲-۳- مدل میرایی زلزله

آسیب لرزه‌ای خطوط لوله مدفون در زمین بر اثر یکی یا هر دو عامل تغییر شکل‌های کوتاه مدت بر اثر موج لرزه‌ای TGD<sup>۹</sup> و یا بلند مدت PGD<sup>۱۰</sup> 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 تعیین کننده در نقش هر یک از آنها در میزان آسیب وارده بر شبکه است. در بررسی‌های آسیب‌های بر اثر موج لرزه‌ای از پارامترهای جنبش لرزه‌ای PGA<sup>۱۱</sup> و PGV<sup>۱۲</sup> و در آسیب‌های ناشی از جابجایی و تغییر شکل زمین از PGD استفاده می‌گردد (Toprak, 1998). آسیب‌های وارد بر زیرساخت‌ها با PGA و PGV ارتباط دارد. آسیب پمپ و مخزن اغلب با استفاده از PGA تخمین زده می‌شود، در حالی که PGV اغلب برای تخمین میزان تعمیر در لوله‌ها استفاده می‌شود. میزان تعمیر به عنوان تعداد تعمیرات مورد نیاز در هر کیلومتر لوله تعریف می‌شود. برای در نظر گرفتن تنوع در مواد لوله و نوع خاک می‌توان از فاکتورهای تصحیح

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, 2007). کد WNTR می‌تواند شبیه‌سازی DD<sup>۱۳</sup> را با استفاده از شبیه‌ساز PDD<sup>۱۴</sup> 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 بازایی 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 (Klise et al., 2017). به منظور تجزیه و تحلیل عملکرد شبکه توزیع آب در برابر زلزله چهار مرحله باید انجام شود: (۱) مدل‌سازی خطر زلزله، (۲) مدل‌سازی هیدرولیکی آسیب لرزه‌ای، (۳) آنالیز هیدرولیکی شبکه آب آسیب دیده و (۴) کمی‌سازی عملکرد هیدرولیکی شبکه توزیع آب بایستی انجام پذیرد (Mani et al., 2013).

مشابه EPANET، کنترل‌های شبکه در WNTR شامل زمان‌بندی و قوانین مشروط حاکم بر نحوه عملکرد شبکه می‌باشد. در EPANET، از این کنترل‌ها می‌توان برای تغییر وضعیت پیوند (باز، بسته یا فعال) یا تنظیمات (سرعت پمپ یا تنظیم شیر کنترل) استفاده کرد، WNTR کنترل‌های موجود در EPANET را گسترش می‌دهد تا شامل طیف گسترده‌ای از وضعیت و تنظیمات مولفه باشد. همچنین می‌توان از کنترل‌های مبتنی بر زمان و شرطی برای شروع و جلوگیری از نشتی و قطعی برق یا متوقف کردن شبیه‌سازی هیدرولیکی استفاده کرد. هنگام تغییر کنترل‌ها، می‌توان شبیه‌سازی‌های هیدرولیک را متوقف کرد و سپس می‌توان دوباره شبیه‌سازی را شروع کرد.

اخیراً به مطالعه سیستم‌های پیچیده با استفاده از تئوری شبکه‌های پیچیده زیاد پرداخته شده است (Bellingeri et al., 2014). با مشخص بودن گره‌ها و پیوندهای میان آنها، ماتریسی به نام ماتریس مجاورت بایستی تشکیل گردد که در واقع معرف شبکه (گراف) مسأله است. ماتریس مجاورت را می‌توان مدلی از ارتباطات واقعی دانست. با تشکیل ماتریس مجاورت، می‌توان از نظریات علم شبکه‌های پیچیده استفاده نمود و تحلیل‌های بیشمار بر روی آن صورت داد. WNTR

می‌شود. منحنی شکنندگی برای منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ آمده است. حالات خسارت<sup>۱۳</sup> و آسیب‌دیدگی به دو قسمت آسیب کلی و جزئی تقسیم‌بندی می‌شود. که آسیب کلی بیانگر لوله‌های با ریسک شکست و خرابی بالاتری هستند. درحالت آسیب‌دیدگی جزئی منجر به نشست جزئی می‌شود و قطر نشت از توزیع یکنواخت با حداقل ۰/۰۱ متر و حداکثر ۰/۰۵ متر حاصل می‌شود. درحالت آسیب‌دیدگی کلی قطر نشت از ۰/۰۵ متر و حداکثر ۰/۱۵ متر می‌باشد. منحنی شکنندگی شامل هر دو این مقادیر است: PGV یا RR مقدار محور x را تعیین می‌کند در حالی که متغیر تصادفی مقدار محور y را تعیین می‌کند. نقطه تلاقی این مقادیر، وضعیت آسیب را برای یک مؤلفه خاص برای تحقق واحد تعیین می‌کند. برای هر سناریو و شبیه‌سازی مقادیر PGA، PGV و RR از فرمول‌های ۲ تا ۶ محاسبه می‌شود. سپس وضعیت خسارت برای هر مؤلفه به صورت تصادفی و بر اساس PGA یا RR محاسبه و تعیین می‌گردد.

#### ۲-۵- تحلیل فراکتال شبکه توزیع آب

فراکتال‌ها اشیاء و یا فرآیندهایی هستند که در مقیاس‌های مکانی و یا زمانی متعددی، شکل ظاهری و یا رفتار یکسانی از خود بروز می‌دهند. این چنین اشیاء و یا فرآیندهایی دارای چنان پیچیدگی‌هایی در مقیاس‌های بسیار کوچک هستند که هندسه اقلیدسی قادر به تفسیر آن نمی‌باشد. هر فراکتال می‌تواند به بخش‌هایی تقسیم شود که هر بخش شبیه جسم اصلی می‌باشد.

در نرخ تعمیر استفاده کرد. مدل‌های میرایی PGA در WNTR عبارتند از:

$$PGA = -403.8 \times 10^{0.265M} (R+30)^{-1.218} \quad (2)$$

که M اندازه زلزله و بدون واحد، R فاصله تا مرکز بر حسب کیلومتر هستند.

$$PGV = 10^{0.848+0.775M+1.834(R+17)} \quad (3) \text{ برای سنگها}$$

$$PGV = 10^{0.285+0.711M-1.85(R+17)} \quad (4) \text{ برای خاکها}$$

PGV برای محاسبه نرخ تعمیر لوله به کار می‌رود:

$$RR = 0.00187 \times PGV \quad (5)$$

$$RR = 0.00187 \times PGV^{1.173} \quad (6)$$

برای در نظر گرفتن مشخصات خاک و لوله ضربی در نرخ تعمیر ضرب می‌شود که تابعی از جنس و قطر لوله، توپوگرافی و پتانسیل روانگرایی است. همچنین، روابط دیگری توسط Jeon و O'Rourke در سالهای ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ ارائه شده که در جدول ۱ آمده است. نتایج حداکثر شتاب زمین، حداکثر سرعت زمین و نرخ تعمیرات لوله برای زلزله با مرکز و شدت‌های متفاوت برای منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ آمده است.

#### ۲-۴- منحنی‌های شکنندگی

منحنی‌های شکنندگی، احتمال بیش از حد آسیب دیدن را به عنوان تابعی از تغییر محیط تعریف می‌کنند. منحنی شکنندگی معمولاً برای پیش‌بینی آسیب شبکه پس از زلزله ناشی از حرکت زمین استفاده

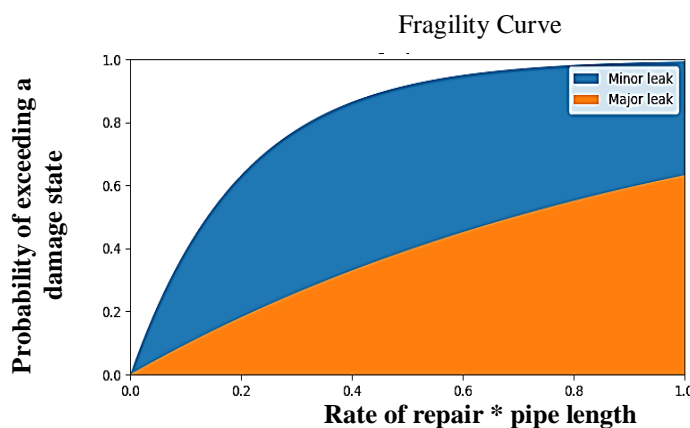


Fig. 2- Fragility curve of Sadra city (study area)  
شکل ۲- منحنی شکنندگی شهر صدرا (منطقه مورد مطالعه)

Table 1- Repair rate per unit distance (O'Rourke and Jeon, 1999 and 2000)

جدول ۱- روابط میزان تعمیرات در واحد کیلومتر (Jeon & O'Rourke, 1999, 2000)

Pipe material	Flexible pipe (Steel)	Brittle pipe (cast iron)
Excluding diameter	$RR = e^{(1.84 \cdot \ln(PGV) - 9.40)}$	$RR = e^{(1.21 \cdot \ln(PGV) - 6.12)}$
Including diameter	$RR = 0.004 * (PGV/D_p^{0.468})^{1.378}$	$RR = 0.036 * (PGV/D_p^{1.021})^{0.989}$



(Dinardo et al., 2017). در این پژوهش با تحلیل فراکتال مبتنی بر تصویر شبکه آبرسانی شهر صدرا نسبت به محاسبه بعد فراکتال در مناطق شمال، جنوب و مرکز شبکه که منطبق بر مراکز زلزله تعریف شده در سناریوهای پیشنهادی می‌باشد اقدام نمودیم. بر اساس تعریف، ظرفیت شبکه در تنظیم تغییرات فشار شبکه در جهت کاهش یا افزایش به گونه‌ای که در راندمان شبکه تغییرات معنادار رخ ندهد را می‌توان تاب‌آوری شبکه آبرسانی شهری در مواجهه با تغییرات فشار نامید. این ویژگی با شاخص Todini که در ادامه ذکر خواهد شد مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مقاله نتایج حاصل از آنالیز فراکتال شبکه به عنوان معیار مؤثر در افزونگی سیستم با نتایج حاصل از معیار شکست Todini مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرد.

### ۲-۶- شبیه‌سازی هیدرولیکی تقاضا مبتنی بر فشار

WNTR شبیه‌سازی هیدرولیکی را بر اساس فرمول Wngner et al. (1988) انجام می‌دهد:

$$d = \begin{cases} 0 & P \leq P_0 \\ D_f \sqrt{\frac{P - P_0}{P_f - P_0}} & P_0 < P < P_f \\ D_f & P \geq P_f \end{cases} \quad (8)$$

که  $d$  تقاضای واقعی داده شده به مصرف‌کننده بر حسب متر مکعب بر ثانیه،  $D_f$  تقاضای مورد انتظار مصرف‌کننده بر حسب متر مکعب بر ثانیه،  $P$  فشار بر حسب پاسکال،  $P_f$  فشار بالا جهت دریافت تقاضای مورد انتظار مصرف‌کننده بر حسب پاسکال و  $P_0$  فشار پایین که مصرف‌کننده هیچ آبی دریافت نمی‌کند بر حسب پاسکال می‌باشند.

### ۳- روش انجام

مدل شبکه توزیع آب منطقه مورد مطالعه (شهر صدرا) در نرم‌افزار Epanet مدل‌سازی و کالیبره می‌شود. سپس زلزله با سه مؤلفه مشخص شدت، عمق از سطح زمین و فاصله تا مرکز زلزله<sup>۱۴</sup> به مدل اعمال می‌گردد. ماکزیمم شتاب و سرعت زمین و همچنین نرخ تعمیر لوله محاسبه می‌شود. منحنی شکنندگی جهت تعیین احتمالات خسارت ترسیم می‌شوند. با تعریف مدل نشت، لوله‌های دچار نشت و شکستگی بر اساس بیشترین احتمال آسیب‌پذیری اولویت‌بندی می‌شوند. همزمان ۱۸ سناریو بر اساس شدت، محل وقوع زلزله و استراتژی تعمیر و همچنین شاخص تاب‌آوری هیدرولیکی، WSA<sup>۱۵</sup>، تعریف می‌شوند. با در نظر گرفتن تعداد تیم‌های تعمیر و مدت زمان مورد نیاز برای تعمیر، لوله‌های اولویت‌بندی شده، تعمیر و ترمیم برای تمام سناریوها انجام می‌شود. سپس WSA و حالات خرابی برای هر سناریو به عنوان فایل‌های خروجی گرفته می‌شوند که با تحلیل نتایج

بسیاری از پدیده‌ها و فرایندهای طبیعی مبتنی بر الگوهای فراکتال می‌باشند. فراکتال‌ها از نگاه ریاضیاتی اجسامی هستند که رفتار یک معادله را به تصویر می‌کشند و از این نظر دارای ویژگی‌های زیر هستند: ۱- هر جسم فراکتال از قطعاتی تشکیل یافته که هر قطعه کاملاً نماینده شکل و ویژگی‌های کل جسم است. به این خاصیت خودمتشابهی گفته می‌شود؛ ۲- فراکتال‌ها دارای ابعاد صحیح نیستند و بُعد آن‌ها به صورت کسری بیان می‌شود؛ ۳- این اجسام توسط یک فرآیند تکراری ساخته می‌شوند و می‌توان برای آن‌ها یک تابع بازگشتی در نظر گرفت که  $n$  بار تکرار می‌شود. واژه فراکتال توسط Mandelbrot (1967) برای توصیف اشیاء هندسی پیچیده که درجه بالایی از خودتشابهی دارند ابداع شد. یک فراکتال، شکل هندسی چند پاره یا ناهموار است که می‌تواند به بخش‌هایی تقسیم شود که هر کدام از آنها یک کپی تعدیل‌یافته از لحاظ اندازه، از کل شکل می‌باشد. در تئوری فراکتال، خاصیت خود شباهت را می‌توان با بعد فراکتال که نمادی از میزان پیچیدگی سیستم در مقیاس‌های متداولاً کوچک شونده می‌توان بیان کرد. به تعبیر دیگر درجه‌ای که شیئی توان پر کردن فضای اقلیدسی که در آن واقع شده است را دارد (Sagan, 1994). بر این اساس بعد فراکتال چیدمان یک شبکه لوله آب شهری که بیانگر پیچیدگی شبکه و اتصالات متعدد آن است، تفسیری از میزان تاب‌آوری شبکه را به همراه دارد (Dinardo, 2017). روشهای متعددی برای محاسبه بعد فراکتال پدیده‌ها وجود دارد. از متداول‌ترین روشها خصوصاً در محاسبه بعد فراکتال سیگنال‌های دو بعدی (تصاویر)، روش شمارش جعبه‌ای می‌باشد. در این روش مجموعه نقاط روی یک منحنی یا یک سطح با مربعاتی (همان جعبه‌ها) به طول ضلع  $\varepsilon$  پوشانده می‌شود. در واقع کل فضای موردنظر با استفاده از این روش شبکه‌بندی می‌گردد. تعداد مربعاتی که هر قسمت از منحنی مورد نظر را پوشش می‌دهند محاسبه می‌شود. این کار برای مربعات با طول اضلاع مختلف تکرار می‌شود. حد نهایی این قسمت زمانی است که  $\varepsilon$  به صفر میل کند. در این صورت با استفاده از رابطه  $N \cdot \varepsilon^d = L$ ، طول محاسبه شده به طول واقعی بسیار نزدیک می‌گردد. مقدار بعد فراکتالی با استفاده از این روش به صورت تئوری با استفاده از رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log \frac{1}{\varepsilon}} \quad (7)$$

$D$ : بعد فراکتالی،  $N$ : تعداد مربعات که شامل قسمتی از جسم فراکتالی مورد نظر می‌باشد.

تئوری فراکتال به منظور تحلیل هندسه شبکه لوله آب شهری در راستای یافتن الگوهای خود شباهت در توزیع فضایی المان‌های شبکه (لوله‌ها و گره‌ها) مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزونگی حاصل از افزایش فراکتالیت سیستم باعث افزایش تاب‌آوری شبکه لوله‌ها می‌گردد

طراحی شبکه می‌باشد. شاخص دوم (شاخص Bridge)، بیان‌کننده توانایی شبکه در حفظ اتصالات در شبکه می‌باشد و به شکل زیر قابل کمی‌سازی هست:

$$B_r = \frac{m_d}{m} \quad (11)$$

که  $m$  تعداد کل لوله‌هاست و  $m_d$  تعداد شکست‌هایی که منجر به عدم اتصال در شبکه می‌شود. در این مقاله شاخص Todini جهت بررسی معیار شکست به کار گرفته شده است.

#### ۵- استراتژی تعمیر و زمان بازسازی

(2003) Bruneau et al. چهار نوع تاب‌آوری اجتماعی، اقتصادی، سازمانی و فنی را در نظر گرفتند. 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 آسیب‌دیده سیستم باشد. 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 آسیب کلی و جزئی 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 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 تامین کند. 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.

زمان بازگشت سیستم و تغییرات WSA مورد بحث و بررسی قرار گرفته و لوله‌های با احتمال بالای شکست تعیین می‌گردد. برای بررسی معیارهای شکست در شبکه توزیع آب در این مقاله از شاخص Todini که بیانگر ظرفیت و پتانسیل شبکه در نگهداشت دبی و هد فشار می‌باشد، استفاده شده است. پس از وقوع زلزله تغییرات این شاخص نسبت به زمان برای سناریوهای مختلف بررسی می‌شود. با بررسی هر دو شاخص تاب‌آوری هیدرولیکی و شکست رفتار تغییرات شاخص‌ها برای سناریوهای متفاوت با هم مقایسه می‌شود.

#### ۴- معیارهای ارزیابی تاب‌آوری

##### ۴-۱- معیار تاب‌آوری هیدرولیکی

تاب‌آوری توانایی سیستم در به حداقل رساندن اختلال و بازگشت به عملکرد طبیعی پس از یک فاجعه است. معیارهای کمی‌ساز میزان 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). در این مقاله از معیارهای قابلیت ارائه خدمات آب<sup>۱۵</sup> استفاده شده است:

$$WSA_t = \left( \sum_{n \in N} V_{nt} \right) / \left( \sum_{n \in N} \bar{V}_{nt} \right) \quad (9)$$

که فرمول بی‌بعد می‌باشد.  $N$  تعداد گره در شبکه،  $V_{nt}$  حجم آب واقعی دریافتی بر حسب متر مکعب در زمان  $t$  و در گره  $n$   $\bar{V}_{nt}$  حجم آب مورد انتظار دریافتی بر حسب متر مکعب در زمان  $t$  و در گره  $n$  می‌باشد که  $WSA$  وابسته به تقاضای آب مورد انتظار و متأثر از رفتار مصرف‌کننده پس از وقوع بحران می‌باشد.

##### ۴-۲- معیارهای شکست

در بررسی معیارهای شکست در شبکه توزیع آب دو دیدگاه وجود دارد یکی شاخص‌های مربوط به هد فشار و انرژی (Todini, 2000; Prasad and Park, 2004) و دیگری شاخص‌های مربوط به خطوط جریان می‌باشد (Tanyimboh et al., 2011) که شاخص اول بیان‌کننده توانایی شبکه در حفظ مازاد فشار در شبکه می‌باشد و به دلیل در نظر گرفتن هد فشاری از روش و فرمول Todini برای محاسبه شاخص تاب‌آوری استفاده می‌شود که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} q_i (h_i - h^*)}{\sum_{R=1}^{n_r} Q_R H_R - \sum_{i=1}^{n_n} q_i h^*} \quad (10)$$

که  $n_n$  تعداد گره‌های تقاضا،  $n_r$  تعداد مخازن،  $q_i$  و  $h_i$  تقاضا و هد در  $i$  امین گره،  $Q_R$  و  $H_R$  تخلیه و هد فشار  $R$  ام منبع تامین و  $h^*$  هد فشار

۶- 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 شده است که فاز یک در قسمت شرق و فاز دو در قسمت غرب قرار گرفته است که در مختصات ۲۹/۸ درجه شمالی ۵۲/۴ درجه شرقی قرار گرفته است. در شکل ۳ شبکه توزیع آب شهری و در شکل ۴ نمایی از شهر صدرا آورده شده است.

۷- بحث و نتایج

عناوین مختلفی چون خطر، تهدید، اغتشاش، اختلال، رویداد، فاجعه و استرس‌زا برای توصیف عوامل نامطلوب یک سیستم استفاده می‌شود. 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 تامین به موقع و متناسب با شبکه) می‌باشد، استفاده می‌شود (Liu and Song, 2020). در این مقاله رفتار شبکه آب شهری با اعمال ۳ زلزله (به عنوان بحران طبیعی) با شدت‌های مختلف ۵/۵، 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 ۳ آمده است.

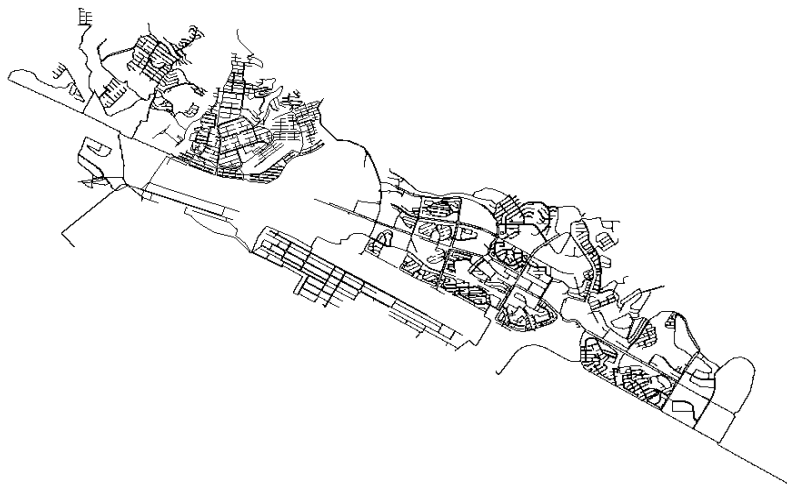


Fig. 3- Sadra city water pipelines  
شکل ۳- خطوط لوله آب شهر صدرا



Fig. 4- Location of Sadra city  
شکل ۴- موقعیت شهر صدرا



۹ نتایج ۳۰ شبیه‌سازی برای شدت زلزله ۵/۵، ۶ و ۷ ریشتر و مرکز 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.

شکل ۹ میزان در دسترس بودن خدمات آب برای شبکه را در طول زمان نشان می‌دهد، که نمایانگر نسبت تقاضای مشتری است که در واقع برای کل شبکه ارائه شده است. 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 حداقل ۷۵ درصد از تقاضای آب مورد انتظار مصرف‌کننده تأمین شود. یک روز پس از زلزله، میزان در دسترس بودن سرویس آب برای زلزله ۵/۵ ریشتر از حدود ۰/۶۵ درصد تا بیش از ۰/۸۰ متفاوت می‌باشد، که نشان‌دهنده دامنه بالقوه نتایج برای همان سناریو است.

همچنین ۱۸ سناریو به منظور بررسی شبکه آب شهر صدرا با وقوع زلزله با مرکز و شدت‌های مختلف و همزمان با دو استراتژی تعمیر متفاوت به شرح جدول ۴ در نظر گرفته شده است.

شکل ۵ نشان‌دهنده محل وقوع زلزله و حالات خسارت سناریوی ۴ که محل وقوع زلزله در مرکز شهر صدرا و شدت زلزله ۵/۵ ریشتر می‌باشد در این سناریو استراتژی تعمیر حالت دوم در نظر گرفته شده است. شکل ۶ نشان‌دهنده محل وقوع زلزله و حالات خسارت سناریوی ۱۰ و شکل ۷ نشان‌دهنده محل وقوع زلزله و حالات خسارت سناریوی ۱۶ 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. تغییرات ماکزیمم شتاب زمین برای زلزله با شدت ۶ ریشتر در شکل ۸ آمده است. پس از وقوع زلزله همانطور که قبلاً بیان شد از شاخص تاب‌آوری هیدرولیکی، WSA، جهت بررسی رفتار و میزان تاب‌آوری شبکه توزیع آب استفاده می‌شود. شکل

Table 2- Maximum ground acceleration, maximum ground velocity and pipe repair rate for earthquakes with different epicenters and intensities

جدول ۲- حداکثر شتاب زمین، حداکثر سرعت زمین و نرخ تعمیرات لوله برای زلزله با مرکز و شدت‌های متفاوت

RR (per m)	Average PGV(m/s)	Average PGA (g)	Epicenter	Intensity (Richter)
3e -5	0.13	0.11	north	5.5
3e -5	0.14	0.11	center	5.5
3e -5	0.13	0.11	south	5.5
8e -5	0.33	0.18	north	6
8e -5	0.33	0.18	center	6
7e -5	0.29	0.17	south	6
0.0004	1.67	0.47	north	7
0.00043	1.79	0.49	center	7
0.00039	1.6	0.46	south	7

Table 3- Number of damaged pipes for earthquakes with different intensities and locations

جدول ۳- تعداد لوله‌های دچار شکست برای زلزله و محل مختلف

Epicenter	Intensity (Richter)	Number of damaged pipes
north	5.5	32
center	5.5	30
south	5.5	27
north	6	60
center	6	62
south	6	55
north	7	218
center	7	232
south	7	212

Table 4- Scenarios including earthquake intensity, earthquake center and different repair strategies

جدول ۴- سناریوها شامل شدت زلزله، مرکز زلزله و استراتژی تعمیر متفاوت

Scenario	Epicenter	Earthquake intensity (Richter)	Repair strategy with changes in expected demand (%)
1	North	5.5	Unchanged
2	North	5.5	45% decrease
3	Center	5.5	Unchanged
4	Center	5.5	45% decrease
5	South	5.5	Unchanged
6	South	5.5	45% decrease
7	North	6	Unchanged
8	North	6	45% decrease
9	Center	6	Unchanged
10	Center	6	45% decrease
11	South	6	Unchanged
12	South	6	45% decrease
13	North	7	Unchanged
14	North	7	45% decrease
15	Center	7	Unchanged
16	Center	7	45% decrease
17	South	7	Unchanged
18	South	7	45% decrease

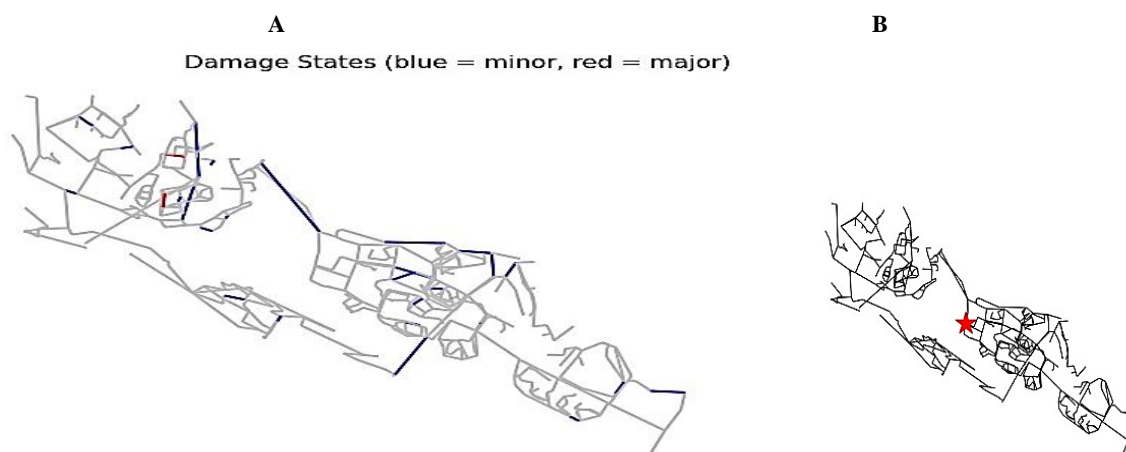


Fig. 5- Location of A) vulnerable and damaged pipes for Scenario 4 and B) Epicenter  
شکل ۵- A) محل لوله‌های آسیب‌پذیر و خسارت دیده برای سناریو ۴ و B) محل مرکز زلزله

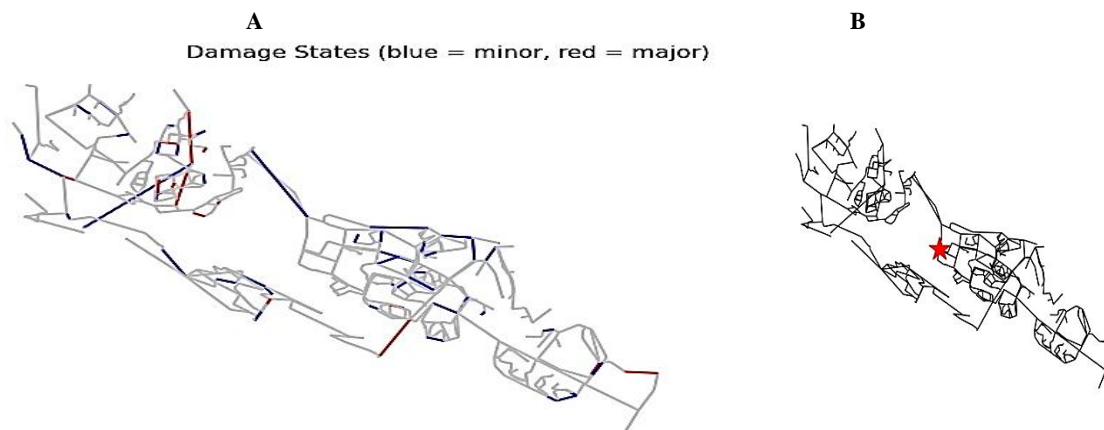


Fig. 6- Location of A) vulnerable and damaged pipes for Scenario 10 and B) Epicenter  
شکل ۶- A) محل لوله‌های آسیب‌پذیر و خسارت‌دیده برای سناریو ۱۰ و B) محل مرکز زلزله

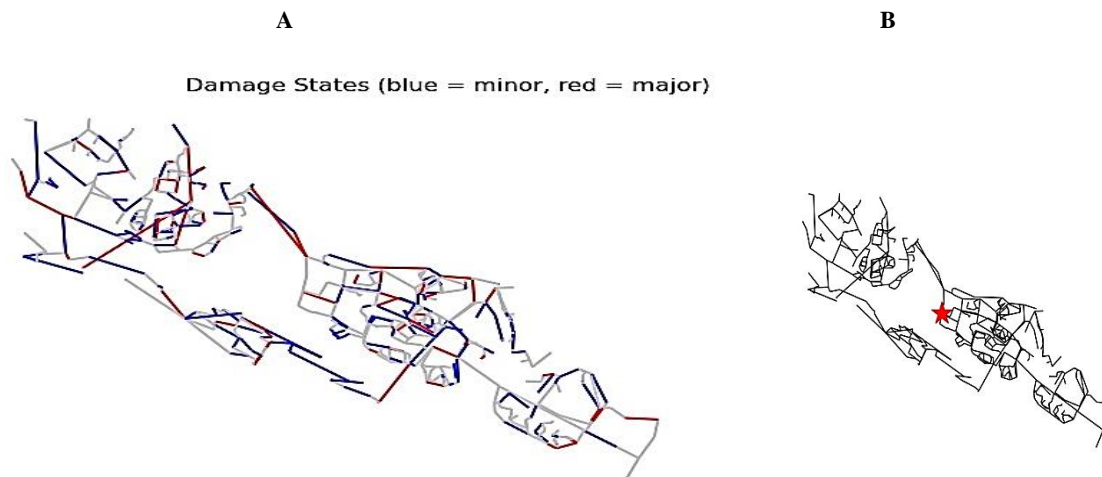


Fig. 7- Location of A) vulnerable and damaged pipes for Scenario 16 and B) Epicenter  
 شکل ۷- (A) محل لوله‌های آسیب‌پذیر و خسارت‌دیده برای سناریو ۱۶ و (B) محل مرکز زلزله

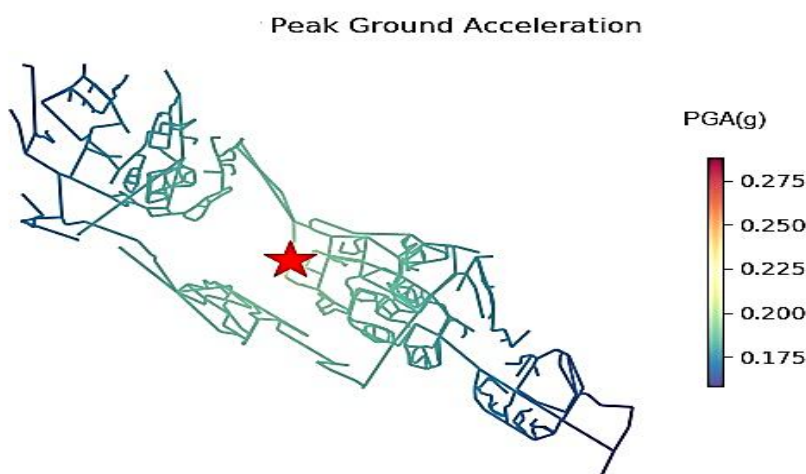


Fig. 8- Maximum ground acceleration changes for Scenario 10  
 شکل ۸- (A) تغییرات ماکزیمم شتاب زمین برای سناریو ۱۰

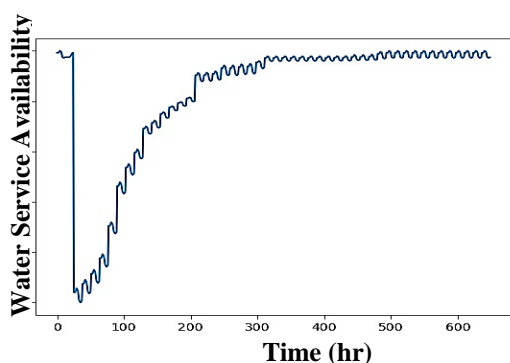


Fig. 9- Changes in Water Service Availability over time for Scenario 16

شکل ۹- تغییرات Water Service Availability نسبت به زمان برای سناریو ۱۶

مقدار متوسط به کمترین میزان ۶۰٪ رسید و در حدود ۴ روز پس از زلزله شبکه به کار عادی خود بر می‌گردد. با رخ داد زلزله ۶ ریشتر ۱ روز پس از زلزله سطح خدمات آب به ۳۵ درصد و ۲ روز پس از زلزله به ۷۵ درصد سطح دسترسی خدمات آب می‌رسد. در این سناریو زمان بازگشت به حالت نرمال حدوداً ۷ روز پس از زلزله می‌باشد. برای زلزله ۷ ریشتر و سناریو ۱۶ پس از گذشت حدوداً ۱۲ روز از زلزله شرایط به حالت نرمال بر می‌گردد. ظرفیت دسترسی بودن خدمات آب در سناریو ۱۶ به طور گسترده‌ای تغییر می‌کند و به آرامی در طی ۸ روز شبیه‌سازی بهبود می‌یابد. در این سناریو پس از گذشت ۵ روز از زلزله میزان دسترسی بودن خدمات آب حدود ۷۰ درصد و ۷ روز پس از زلزله حدود به ۸۰ درصد می‌رسد (شکل ۹).

سپس به طور چشمگیری ۱ روز پس از زلزله افزایش یافته و به سطح ۶۵ درصد و ۵۶ ساعت پس از زلزله به ۸۵ درصد می‌رسد، که نهایتاً حدود ۷ روز پس از زلزله به سطح نرمال بر می‌گردد. در سناریو ۱۴ خدمات تا ۱ روز پس از زلزله بسیار پایین است و از روز دوم به سطح ۱۰ درصد می‌رسد. ۶۷ ساعت پس از زلزله به صورت تدریجی به سطح ۳۵ درصد می‌رسد و این روند افزایشی به صورت تدریجی ادامه داشته و ۱۰۰ ساعت پس از زلزله به سطح ۶۵ درصد و در نهایت ۳۳۰ ساعت پس از زلزله به سطح نرمال بر می‌گردد (شکل ۱۰). جهت بررسی میزان تأثیرگذاری مرکز زلزله سه سناریو ۱۴، ۱۶ و ۱۸ را با هم مقایسه نمودیم و شاخص دسترسی خدمات آب نسبت به زمان با شدت یکسان ۷ ریشتر و استراتژی تعمیر یکسان با ۴۵ درصد کاهش در تقاضا مورد انتظار مصرف‌کننده مطابق شکل ۱۱ دارای رفتار کاملاً مشابهی هستند بدین‌گونه که ۷ ساعت پس از وقوع زلزله سطح خدمات بسیار پایین می‌باشد و پس از آن با روندی تدریجی رو به افزایش می‌باشد. پس از گذشت ۳۶ ساعت از زمان وقوع زلزله شاخص دسترسی خدمات آب برای هر ۳ سناریو به سطح تقریبی ۲۰ درصد می‌رسد. پس از گذشت ۶۷ ساعت از وقوع زلزله این شاخص به سطح تقریبی ۴۰ الی ۴۵ درصد رسیده و پس از گذشت زمان تقریباً ۲۶۰ الی ۲۸۰ ساعت سیستم به حالت نرمال خود باز می‌گردد (شکل ۱۱).

همانطور که قبلاً گفته شد از شاخص Todini جهت بررسی معیار شکست استفاده می‌شود. در شکل ۱۲ این شاخص برای سناریو ۱۲ در حالت قبل و بعد از رخ داد زلزله آمده است.

خلاصه نتایج سناریوهای دیگر در جدول ۵ آمده است. در این جدول زمان بازگشت سیستم به حالت نرمال (Recovery Time) 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 شمال منطقه مورد مطالعه اتفاق می‌افتد تعداد لوله‌های دچار شکست بیشتر و بازگشت سیستم به حالت نرمال حدوداً ۵ درصد بیشتر از زمانی است که محل زلزله در مرکز و یا جنوب باشد. با بررسی جدول ۵، 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 دسترسی خدمات آب 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 رفتار نمودار میزان دسترسی خدمات آب در زلزله ۵/۵ ریشتر (سناریو ۲) و ۶ ریشتر (سناریو ۸) تا حدودی شبیه به هم بوده و سیستم خیلی سریع به سمت بهبودی می‌رود در حالی که در زلزله ۷ ریشتر (سناریو ۱۴) دارای تغییرات زیادی است و سیستم به صورت تدریجی به سطح نرمال می‌رسد. در سناریو ۲ سطح خدمات ۷ ساعت پس از زلزله به ۶۰ درصد و در بازه ۴۵ تا ۶۰ درصد می‌ماند، پس از ۳۶ ساعت از زمان زلزله سطح خدمات افزایش یافته و در بازه ۵۵ تا ۹۰ درصد متغیر می‌باشد که در نهایت پس از گذشت ۴ روز از زمان زلزله به سطح نرمال می‌رسد. در سناریو ۸ خدمات ۷ ساعت پس از زلزله به ۳۰ درصد رسیده و تا ۱ روز پس از زلزله تقریباً در همین سطح می‌ماند،

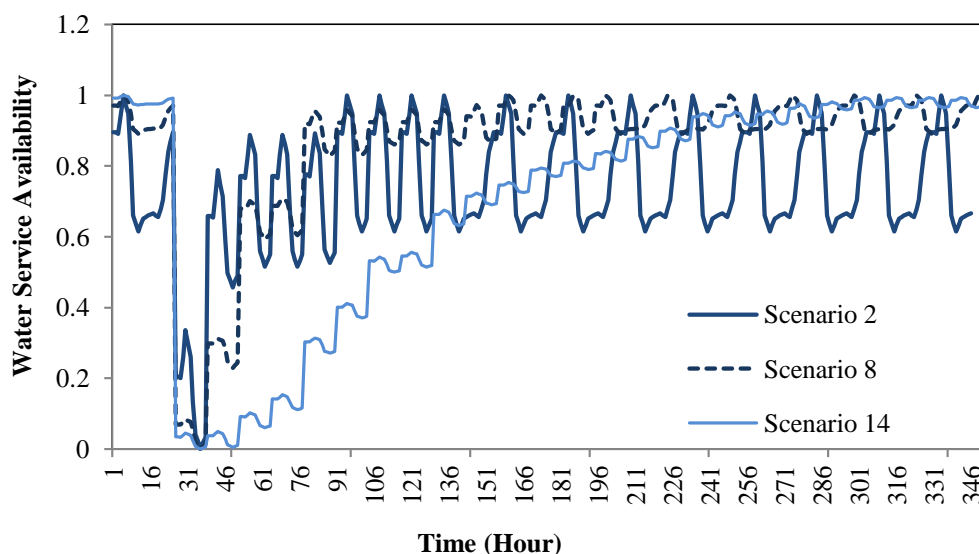


Fig. 10- Comparison of water service availability index over time for scenarios 2, 8 and 14

شکل ۱۰- مقایسه شاخص دسترسی خدمات آب نسبت به زمان برای سناریوهای ۲، ۸ و ۱۴

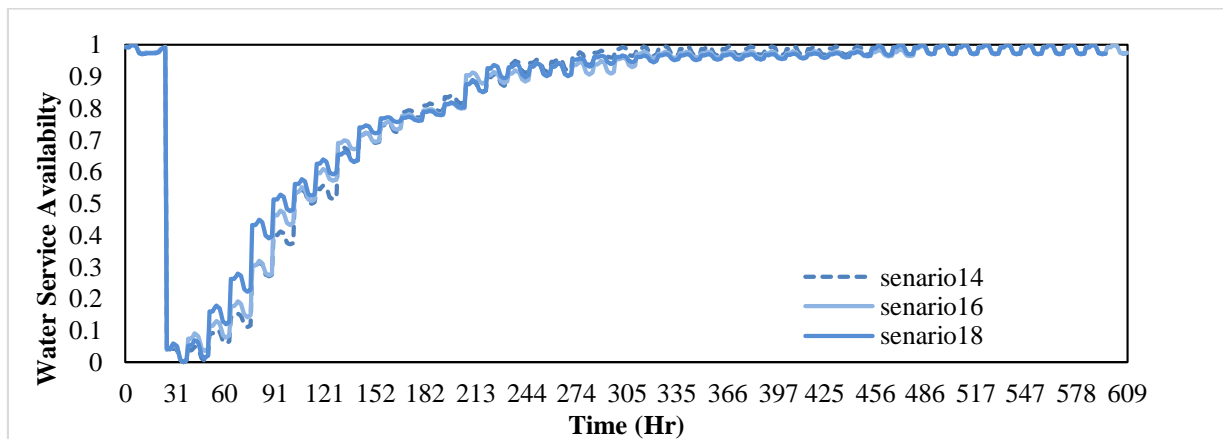


Fig. 11- Comparison of water service availability index over time for scenarios 14, 16, 18

شکل ۱۱- مقایسه شاخص دسترسی خدمات آب نسبت به زمان برای سناریوهای ۱۴، ۱۶ و ۱۸

وقتی که محل وقوع زلزله در مرکز شهر باشد در روز ۲۴ به مقدار ۰/۰۰۲۷۵ می‌رسد و وقتی که زلزله در جنوب شهر اتفاق می‌افتد مقدار شاخص در روز ۲۴ به ماکزیمم مقدار خود یعنی ۰/۰۰۳۵۵ می‌رسد.

و به طور خلاصه می‌توان گفت وضعیت شبکه آب در جنوب بهتر می‌باشد. در جدول ۶ شاخص Todini در حالت قبل از وقوع زلزله و در جدول ۷ خلاصه نتایج شاخص Todini برای سناریوهای ۱ تا ۱۸ آورده شده است. قبل از وقوع زلزله شاخص Todini پس از یک روز اصلاح می‌شود، در حالی که 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.

در این پژوهش به منظور ارزیابی تاب‌آوری شبکه آب شهری صدرا به تحلیل فراکتال چیدمان شبکه آبراهه پرداختیم. بدین منظور چیدمان شبکه به سه منطقه شمال، جنوب و مرکز تفکیک گردید (شکل‌های ۵-a، ۵-b و ۵-c) و در هر منطقه آنالیز فراکتال انجام شده و بعد فراکتال به عنوان نمادی از افزونگی سیستم مورد بررسی قرار گرفت (شکل‌های ۵-d، ۵-e و ۵-f). بررسی نتایج نشان می‌دهد که کمینه میزان بعد فراکتال مربوط به شمال برابر با ۱/۶۳۸ می‌باشد. با بررسی شاخص Todini نیز درمی‌یابیم که کمترین میزان شاخص Todini که بیانگر آسیب‌پذیرترین ناحیه در سیستم آبرسانی شهر صدرا می‌باشد منطقه شمال است. علاوه بر آن در بررسی شاخص Todini روشن شد که مقادیر این شاخص در مرکز و جنوب بطور معناداری به هم نزدیک می‌باشند و از این نظر مرکز با اختلاف اندکی دومین ناحیه آسیب‌پذیر به شمار می‌رود و نهایتاً ناحیه جنوب شبکه آب صدرا قرار می‌گیرد.

با در نظر گرفتن تأثیر شدت زلزله بر روی شاخص Todini، مقدار شاخص برای شدت ۵/۵ ریشتر از ۰/۰۰۹۳ شروع و تا روز پنجم ثابت می‌باشد. از روز پنجم تا روز دهم ۱۰ درصد کاهش یافته و پس از آن به روند افزایشی دارد به طوری که در روز هجدهم به مقدار اصلاحی ۰/۰۱۱ می‌رسد و پس از آن به ماکزیمم مقدار خود یعنی ۰/۰۱۱۳ در روز ۲۴ خواهد رسید.

با بررسی شاخص Todini برای زلزله با شدت ۶ ریشتر، شاخص از مقدار ۰/۰۰۲۵ شروع و تا روز پنجم ثابت می‌باشد. از روز ۵ تا روز دهم ۱۲ درصد کاهش یافته و در روز هجدهم به مقدار ۰/۰۰۲۹ و روز ۲۴ به ماکزیمم خود یعنی ۰/۰۰۳۱ می‌رسد با بررسی این شاخص برای زلزله با شدت ۷ ریشتر، شاخص از مقدار ۰/۰۰۵۴ شروع و تا روز پنجم ثابت بوده و از روز ۵ تا روز دهم روند کاهشی به میزان ۱۰ درصد دارد و در روز هجدهم به مقدار ۰/۰۰۶۵ و در نهایت در روز ۲۴ به مقدار ماکزیمم ۰/۰۰۶۷ خواهد رسید.

به طور خلاصه با بررسی تأثیر میزان شدت زلزله بر روی شاخص Todini متوجه می‌شویم که شبکه به طور کل ضعیف بوده و با افزایش شدت زلزله از ۶ ریشتر به بالا به طور چشمگیری شاخص کاهش می‌یابد. با بررسی شاخص Todini و تأثیر محل زلزله متوجه می‌شویم زمانی که که محل زلزله در شمال شهر باشد، شاخص از مقدار ۰/۰۰۲۵ شروع و تا روز پنجم ثابت بوده و پس از آن تا روز دهم روند کاهشی داشته (حدوداً ۸ درصد). از روز دهم تا هجدهم روند افزایشی می‌باشد و به مقدار اصلاحی ۰/۰۰۲۹ و در نهایت در روز ۲۴ به مقدار ماکزیمم ۰/۰۰۳۱ می‌رسد.

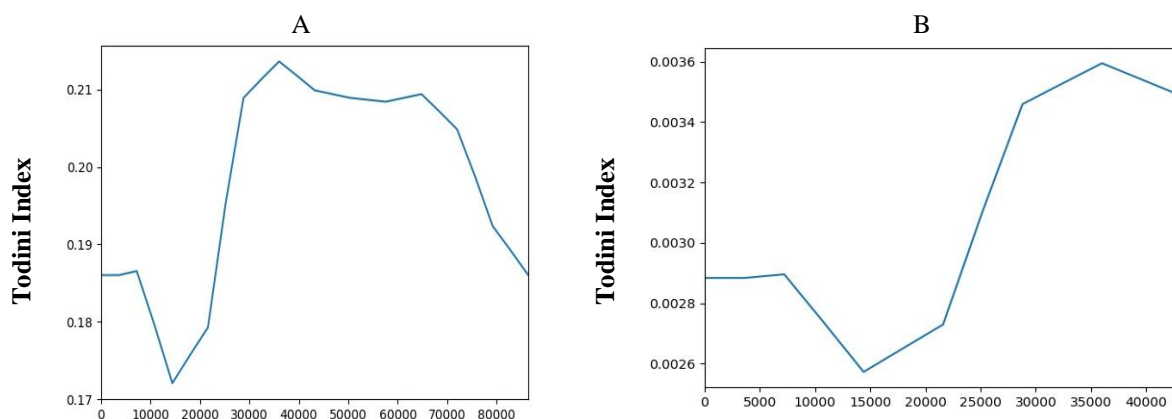


آسیب‌پذیرتر بودن ناحیه مرکز را با اختلافی اندک نسبت به جنوب نشان می‌دهد. این نتیجه همچنین کارا بودن تحلیل فراکتال چیدمان شبکه در ارزیابی تاب‌آوری شبکه را نشان می‌دهد.

نکته جالب آنکه نتایج تحلیل فراکتال شبکه نیز دقیقاً نتایج مشابهی را برای نواحی مرکز و جنوب ثبت نموده است. بر این اساس بعد فراکتال در مرکز و جنوب به ترتیب برابر با ۱/۷۲۸ و ۱/۷۶۵ می‌باشد که نشان‌دهنده نزدیکی افزونگی در این دو ناحیه بوده و همزمان

**Table 5- Summary of recovery time by hour for all scenarios**  
جدول ۵- خلاصه recovery time بر حسب ساعت برای تمام سناریوها

Epicenter	Earthquake intensity (Richter)	Repair strategies (1 and 2)	Recovery time (hr)
north	5.5	1	120
		2	125
	6	1	200
		2	210
	7	1	320
		2	330
center	5.5	1	120
		2	130
	6	1	195
		2	205
	7	1	300
		2	310
south	5.5	1	120
		2	125
	6	1	150
		2	165
	7	1	280
		2	300



**Fig. 12- Todini index for Scenario 12 A) before the earthquake B) after the earthquake**  
شکل ۱۲- شاخص Todini برای سناریو ۱۲ A) قبل از زلزله B) بعد از زلزله

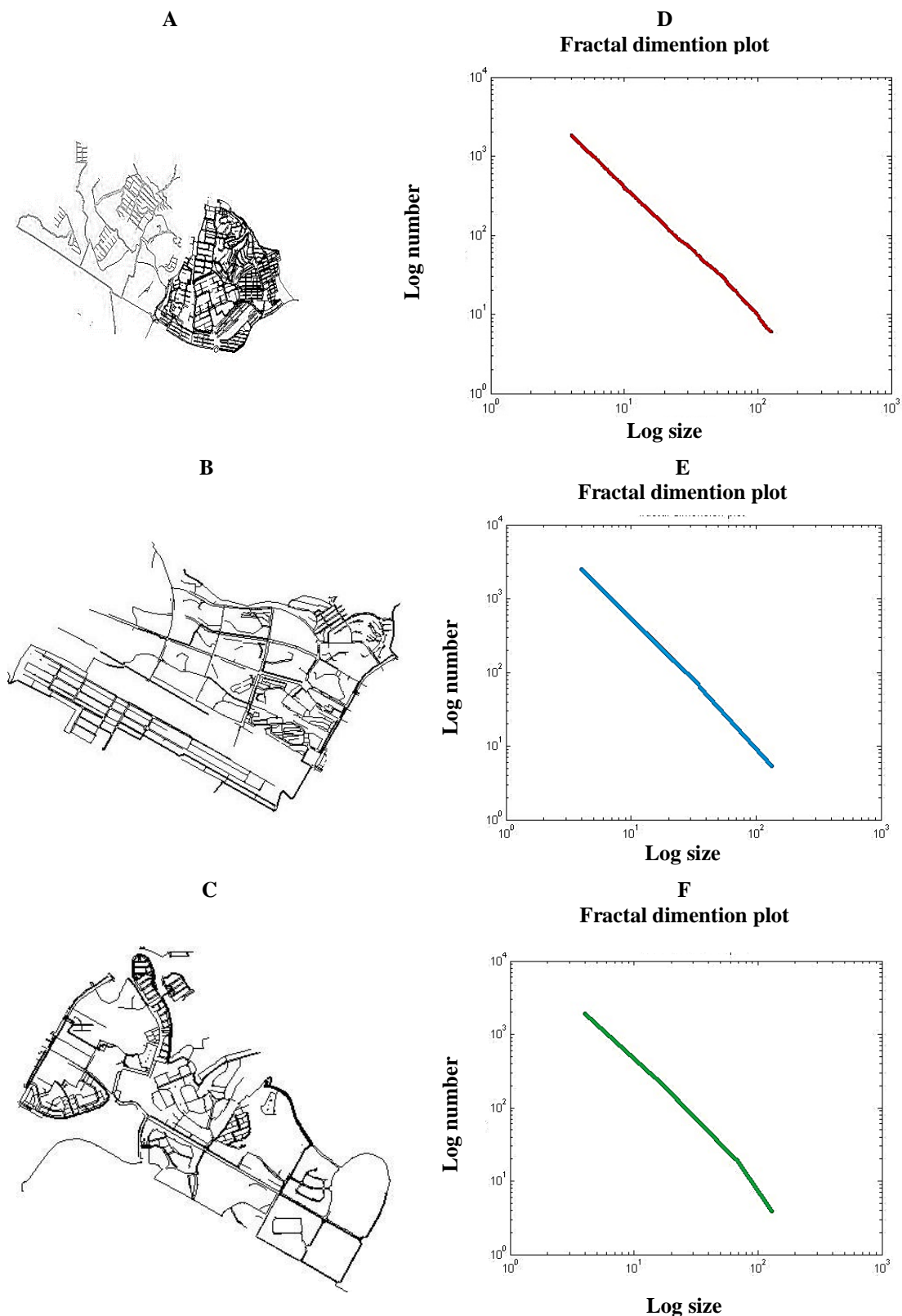
**Table 6- Values of the minimum, mean and maximum Todini index before the earthquake for all scenarios**  
جدول ۶- مقادیر کمترین، میانگین و بیشترین شاخص Todini قبل از وقوع زلزله برای تمام سناریوها

	Minimum	Mean	Maximum
Todini index	0.172	0.197	0.213

Table 7- Values of the minimum, mean and maximum Todini index after the earthquake for all scenarios

جدول ۷- مقادیر کمترین، میانگین و بیشترین شاخص Todini بعد از وقوع زلزله برای تمام سناریوها

Scenario	Todini index	
1	Min.	0.0082
	mean	0.0098
	Max.	0.0114
2	Min.	0.0082
	mean	0.0098
	Max.	0.0114
3	Min.	0.00914
	mean	0.0109
	Max.	0.0126
4	Min.	0.00914
	mean	0.0109
	Max.	0.0126
5	Min.	0.0156
	mean	0.0186
	Max.	0.0216
6	Min.	0.0156
	mean	0.0186
	Max.	0.0216
7	Min.	0.0022
	mean	0.0026
	Max.	0.0030
8	Min.	0.0022
	mean	0.0026
	Max.	0.0030
9	Min.	0.00198
	mean	0.0023
	Max.	0.0027
10	Min.	0.00198
	mean	0.0023
	Max.	0.0027
11	Min.	0.0025
	mean	0.0030
	Max.	0.0035
12	Min.	0.0025
	mean	0.0030
	Max.	0.0035
13	Min.	0.00048
	mean	0.00058
	Max.	0.00068
14	Min.	0.00048
	mean	0.00058
	Max.	0.00068
15	Min.	0.00044
	mean	0.00054
	Max.	.000632
16	Min.	0.00044
	mean	0.00054
	Max.	0.000632
17	Min.	0.00047
	mean	0.00055
	Max.	0.000635
18	Min.	0.00047
	mean	0.00055
	Max.	0.000635



**Fig. 13- Breakdown of regions A) North B) Center C) South D) Fractal dimension in North E) Fractal dimension in Center F) Fractal dimension in South**

شکل ۱۳- تفکیک نواحی شبکه و محاسبه بعد فراکتال، (A) ناحیه شمال (B) ناحیه مرکز (C) ناحیه جنوب (D) نمودار بعد فراکتال شمال (E) بعد فراکتال مرکز (F) بعد فراکتال جنوب

## ۸- اعتبارسنجی و صحت‌سنجی

مرکز و جنوب معرفی نمود که منطبق بر نتایج تحلیلی شاخص‌های هیدرولیکی تاب‌آوری می‌باشد که بایستی خطوط لوله واقع در شمال شهر از نظر تغییر و یا مقاوم سازی مورد بازنگری قرار گیرد. همچنین با تحلیل انجام شده 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 می‌توان با مقاوم‌سازی و یا جایگزینی این لوله‌ها با لوله‌های جدید و استفاده از لوله با قطر بیشتر میزان آسیب‌پذیری را کاهش داد.

یکی از ویژگی‌های بارز نرم‌افزار EPANET، وجود کد باز آن است که این امکان را فراهم می‌کند تا ارتباط پویایی بین آن و نرم‌افزارهای برنامه نویسی برقرار شده و بتوان به صورت دلخواه و خودکار، اطلاعات را به مدل وارد نموده و نتایج را در برنامه نوشته شده دستی مورد تحلیل و ارزیابی قرارداد. تجزیه و تحلیل هیدرولیکی اطلاعات (مقدار آب ذخیره، سرعت، فشار و نشت) توسط مدل هیدرولیکی WaterGems انجام می‌گردد. در نرم‌افزار EPANET با ثابت قرار دادن ضرایب هیزن-ویلیامز و مصارف گرهی، مقادیر قطر لوله‌ها به عنوان متغیر در نظر گرفته شد. از این‌رو با استفاده از اطلاعات شبکه و تنها با تعیین قطر لوله‌ها، مدل تحلیل هیدرولیکی کالیبره شد و برای لوله‌های مختلف شرایط پایه مصرف نرمال، حداقل و حداکثر تعیین گردید.

## ۱۰- تشکر و قدردانی

این مقاله بر گرفته از رساله دکتری رشته مهندسی عمران- آب در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز می‌باشد. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از همکاری صمیمانه ریاست محترم ابقای شیراز به جهت تأمین داده‌های مورد نیاز سپاسگزاری و قدردانی نمایند.

## ۹- نتیجه‌گیری

این مقاله به ارزیابی تاب‌آوری هیدرولیکی 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، برای بررسی آسیب لرزه‌های خطوط لوله مدفون، 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 از جمله زمان رسیدن تیم تعمیر و مدت زمان تعمیر لوله‌های دچار حادثه، شاخص تاب‌آوری هیدرولیکی، در دسترس بودن سرویس آب، ترسیم و مورد بحث و بررسی قرار گرفتند. میزان تاب‌آوری و زمان بازگشت شبکه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. همچنین برای بررسی معیار شکست شبکه از شاخص Todini استفاده شد. با افزایش شدت زلزله شاخص Todini در شمال بیشتر می‌شود و با توجه به مفهوم این شاخص شبکه توزیع آب در شمال شهر صدرا، پتانسیل و ظرفیت در نگهداشت دبی و هد فشاری بالاتری 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 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. با بررسی شاخص در دسترس بودن آب، به ترتیب برای منطقه شمال، منطقه مرکز و سپس جنوب بیشترین مدت زمان بازگشت سیستم به حالت نرمال را دارند که رفتار این شاخص با شاخص Todini یکسان می‌باشد. همچنین بررسی نتایج حاصل از آنالیز فراکتال شبکه نیز با تأکید بر کمترین افزونگی در ناحیه شمال آسیب‌پذیرترین نواحی را به ترتیب شمال،

## پی‌نوشت‌ها

- 1- Layout
- 2- Robustness
- 3- Resourcefulness
- 4- Rapidity
- 5- Redundancy
- 6- Water Network Tools for Resiliency
- 7- Demand-Driven
- 8- Pressure-Driven Demand
- 9- Transient Ground Deformation
- 10- Permanent Ground Deformation
- 11- Peak Ground Acceleration
- 12- Peak Ground Velocity
- 13- Damage State
- 14- Distance to Epicenter
- 15- Water Service Availability

## ۱۱- مراجع

- Bahut A, Brodziak R, Bylka J, Zakrzewski P (2019) Ranking approach to scheduling repairs of a water distribution system for the post-disaster response and restoration service. *Water* 11(8):1591
- Bellingeri M, Cassi D, Vincenzi S (2014) Efficiency of attack strategies on complex model and real-world networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 414:174-80
- Bruneau M, Chang SE, Eguchi RT, Lee GC, O'Rourke TD, Reinhorn AM, Shinozuka M, Tierney K, Wallace WA, Von Winterfeldt D (2003) A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra* 19(4):733-52

- distribution networks. *Reliability Engineering & System Safety* 203:107088
- Liu W, Song Z (2020) Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks. *Reliability Engineering & System Safety* 193:106617
- Mandelbrot B (1967) How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Journal of Science* 156:636-638
- Mani A, Tabesh M, Zolfaghari MR (2013) Hydraulic performance of post-earthquake water distribution networks based on head driven simulation method. *Water Science and Technology: Water Supply* 13(5):1281-8
- O'Rourke TD, Jeon SS (1999) Factors affecting the earthquake damage of water distribution systems. In *Optimizing Post-Earthquake Lifeline System Reliability*, ASCE, 379-388
- O'Rourke TD, Jeon SS (1994) Seismic zonation for lifelines and utilities. In *Invited Keynote Paper on Lifelines*. Proceedings sixth international conference on seismic zonation, Palm Springs, EERI CD ROM 2000 Nov
- Sagan, H. *Space-filling Curves*. Springer-Verlag, Berlin
- Shi P, O'Rourke TD (2008) Seismic response modeling of water supply systems. *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research*
- Todini E (2000) Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban water* 2(2):115-22
- Taoan Huang and Bistra Dilkina (2020) Enhancing seismic resilience of water pipe networks. In *ACM SIGCAS Conference on Computing and Sustainable Societies (COMPASS) (COMPASS '20)*, June 15–17, Ecuador. ACM, New York, NY, USA, 9 pages
- Toprak S (1998) Earthquake effects on buried lifeline systems. Ph.D. Thesis, Cornell University
- Zare N, Talebbeydokhti N (2018) 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* 28(2018):298–317
- Zhan X, Meng F, Liu S, Fu G (2020) Comparing performance indicators for assessing and building resilient water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 146(12):06020012
- Zhao X, Chen Z, Gong H (2015) Effects comparison of different resilience enhancing strategies for municipal water distribution network: A multidimensional approach. *Mathematical Problems in Engineering* 2015:438063
- Chang SE, Shinozuka M (2004) Measuring improvements in the disaster resilience of communities. *Earthquake Spectra* 20(3):739-55
- Chang YH, Kim JH, Jung KS (2012) A Study on the design and evaluation of connection pipes for stable water supply. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater* 26(2):249-56
- Choi J, Kang D (2020) Improved hydraulic simulation of valve layout effects on post-earthquake restoration of a water distribution network. *Sustainability* 12(8):3492
- Cimellaro GP, Tinebra A, Renschler C, Fragiadakis M (2016) New resilience index for urban water distribution networks. *Journal of Structural Engineering* 142(8):C4015014
- Di Nardo A, Di Natale M, Giudicianni C, Greco R and Santonastaso GF (2017) Complex network and fractal theory for the assessment of water distribution network resilience to pipe failures. *Water Science & Technology: Water Supply* 18 (3):767–777
- Diao K (2021) Multiscale resilience in water distribution and drainage systems. *Water* 12(6):1521
- Diao K (2021) Towards resilient water supply in centralized control and decentralized execution mode. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* 70(4):449-66
- Farahmandfar Z, Piratla KR, Andrus RD (2017) Resilience evaluation of water supply networks against seismic hazards. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 8(1):04016014
- Holling CS (1973) Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4(1):1-23
- Hunter JD (2007) Matplotlib: A 2D graphics environment. *IEEE Annals of the History of Computing* 9(03):90-5
- Klein R J T, Nicholls R J, Thomalla F (2003) Resilience to natural hazards: How useful is this concept? *Environmental Hazards* 5(1–2):35–45
- Klise KA, Bynum M, Moriarty D, Murray R (2017) A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study. *Environmental Modelling & Software* 95:420-431
- Klise KA, Murray R, Walker LT (2015) System's measures of water distribution system resilience. Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States)
- Liu W, Song Z, Ouyang M, Li J (2020) Recovery-based seismic resilience enhancement strategies of water