

# Resilience Analysis Under Simultaneous Failure of Pipes in Water Distribution Network (Case Study in One of the Cities of Khorasan Razavi)

Mansoureh Atashi <sup>1</sup>, Saeed Reza Khodashenas <sup>2\*</sup>, Ali Naghi Ziaei <sup>3</sup>, Raziye Farmani <sup>4</sup>


1- Ph.D. student in Hydraulic structures, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

4- Associate Professor, Department of Engineering, University of Exeter, Exeter, UK.

\* [khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir](mailto:khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)

Received: 17 June 2020, Accepted: 9 September 2020  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Water distribution systems (WDS) are the crucial component of urban infrastructure that play a critical role in delivering sufficient water to users with acceptable pressure, volume and quality. Occurrence of a pipe failure may interrupt service, undermine system performance and ultimately lead to consumer dissatisfaction. Nowadays, the threat of accidental or man-made disruptions motivates water utilities to plan risk mitigation works and to improve the preparedness for extreme events. Pipe breaks increase with aging infrastructure, natural disasters such as earthquakes and man-made disruptions. Three criteria; reliability, resiliency and vulnerability have been used to assess the performance of the water distribution system (Hashimoto et al., 1982). The resilience capacities are absorptive, adaptive and restorative that a system needs to be able to respond to perceived or real shocks (Francis and Bekera, 2014). Butler et al. (2017) defined the resilience in WDSs as “the degree to which the system minimizes level of service failure magnitude over its design life when subject to exceptional conditions”. Failure modes in WDSs can be broadly categorized into structural failure and functional failure (Mugume et al., 2015). Response to pipe failure can indicate system resilience to loss of structural connectivity (Butler et al., 2014). Todini (2000) proposed a technique based upon the definition of resilience index that emulate both reducing the cost and preserving a capability of the system to overcome failures while still satisfying demand and pressure at each node. Diao et al. (2016) proposed the Global Resilience Analysis (GRA) as a methodology that focusses on the response to system failure modes. Using GRA, the whole range of performance strains resulting from any stress magnitude can be evaluated. In GRA, the model of pipe failure mode (stress on the system) is modified by changing the pipe status to close for three hours during peak consumption (Diao et al., 2016).

In this paper, the numerical code of the GRA method for NET3 network is evaluated and the resilience of water distribution network is examined separately from the main transmission lines. Then, the pressure-based algorithm for the above method is assessed. Then, the resilience of the real water distribution network in Iran is examined. Based on the inquiry from the water

and wastewater company, and considering the diameter of the network pipes, the failure time of the pipes in the consumption peak (12-18) is considered to be an average of 6 hours. Finally, the critical network pipes are identified and the resilience analysis of the network is examined if these pipes are protected.

**Methodology:** In this paper, the GRA approach is adopted to evaluate the system resilience under different pipe failure modes (Diao et al., 2016). The possible failure modes were modelled with increasing the stress magnitude and estimating the corresponding strains (Johansson, 2007). Different combinations of pipe failure are considered as stress magnitude and ratio of unsupplied demand to total demand is defined as strain magnitude. Due to huge number of possible combinations (i.e. a system with N component and m simultaneous failures has  $\sum n!/m!(n-m)!$  potential failure scenarios), it is not possible to model every conceivable scenario for each system failure magnitude (Sweetapple et al., 2018). For any given stress magnitude, an appropriate affordable number of failure scenarios must be determined. Where the total number of scenarios (TNS) is determined as follows (Diao et al., 2016).

As a demand-driven model, EPANET2 determines the nodal pressures by considering the specified demand at nodal points (Rossman, 2000). To illustrate actual supplied water to customers in abnormal conditions, the available nodal demand is expressed as a function (Eq. 2) of nodal pressure head (Wagner et al., 1988).

**Results and Discussion:** Figure 4 shows the calibration of code with results (Diao et al., 2016) for the Net3 distribution network. The results of the code above 95% correspond to the results (Diao et al. 2016). In Fig. 5 the resilience of Net3 for two approaches (i.e., whole network (WN), and network without CRP (NWCRP)) are compared. The GRA showed that Net3 encountered complete failure due to simultaneous failure of the four main CRPs. Whereas excluding these pipes caused the failure of 12 pipes lead to the same results. The maximum and average network supply shortage were 36% and 12% higher than the whole network model. The supply shortage for all combinations of CRP failures in the peak demand period (18-20 pm) is presented in Fig. 7. In Fig. 8 the resilience of real water distribution network for three approaches (i.e., network without CRP1 (NWCRP1), and network without CRP2 (NWCRP2)) are compared. If the resilience of the main transmission lines is examined separately from the total distribution network, the resilience of the network will increase in three modes of maximum, average, and minimum by 72, 23, and 14%, respectively. The results showed that if ten critical pipes were protected, network resilience would increase by an average of 20 percent (Fig. 9).

**Conclusion:** Resilience analysis is critical to the presentation of emergency schemes in distribution networks before a crisis occurs. One of the network components that is considered in resilience analysis is the failure of part or all of the different pipe combinations. In this study, after testing the resilience analysis model in the NET3 study network, the model was implemented for a real water network in Iran. Accordingly, by reinforcement of the main lines, the efficiency of the real network will increase by a maximum of 72%. Because this network has the only major source, with a single failure of the pipes, it reaches 100% of the water supply. The resilience analysis of other network pipes also shows that if the network's ten critical pipes are protected, the network's resilience will increase by an average of 20%.

**Keywords:** Real water distribution network, critical pipes, water supply deficit, Calibration.

© 2020 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.



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

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

# تحلیل تاب‌آوری در حالت شکست همزمان لوله‌ها در شبکه‌ی توزیع آب (مطالعه موردی در یکی از شهرهای خراسان رضوی)

منصوره آتشی<sup>۱</sup>، سعیدرضا خداشناس<sup>۲\*</sup>، علی نقی ضیایی<sup>۳</sup>، راضیه فرمانی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترای سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

۴- دانشیار، گروه مهندسی، دانشکده مهندسی، دانشگاه اکستر، انگلستان.

\* [khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir](mailto:khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۸، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۹ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

**چکیده:** در شبکه‌های توزیع آب پس از رخداد‌های اضطراری چون سیل و زلزله و ایجاد شکستگی در لوله‌ها در قسمت‌های مختلف شبکه، به علت نداشتن آگاهی کافی از شرایط شبکه و نیز نبود برنامه‌ریزی در زمینه لوله‌های حیاتی شبکه تا اصلاح و برقراری دوباره جریان زمان قابل توجهی لازم می‌باشد. تحلیل تاب‌آوری سامانه‌های توزیع برای خرابی همزمان لوله‌ها در شبکه برای برنامه‌ریزی شرایط اضطراری بسیار اهمیت دارد. تحلیل تاب‌آوری جامع به بررسی همه ترکیب‌های مختلف شکست (شکست تک تک لوله‌ها تا شکست همه‌ی لوله‌ها) در شبکه می‌پردازد. تاکید بر عملکرد سامانه در شرایط غیر منتظره و شرایط حاد (فراتر از شکست‌های معمولی و حتی غیر محتمل) می‌باشد. در این بررسی به صحت‌سنجی مدل تحلیل تاب‌آوری جامع با شبکه‌ی توزیع مطالعاتی (Net3) پرداخته شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که برای محاسبه تاب‌آوری شبکه توزیع آب، لوله‌های انتقال اصلی آب بایستی جداگانه تجزیه و تحلیل شوند. پس از آن مدل برای شبکه توزیع آب واقعی در ایران پیاده‌سازی شده‌است. در این بررسی‌ها زمان شکست لوله‌ها بر مبنای قطر لوله‌ها در نظر گرفته شده‌است. بررسی تاب‌آوری شبکه‌ی توزیع یادشده نشان داد که این شبکه با وجود تنها یک منبع اصلی در حالت بیشینه با شکست تکی لوله‌ها، در حالت میانگین با شکست توامان ۲۷۷ لوله و در حالت کمینه با شکست توامان ۴۶۹ لوله به صد درصد کسری تامین آب می‌رسد. اگر تاب‌آوری خطوط انتقال اصلی از منبع تامین آب به‌طور جداگانه از کل شبکه‌ی توزیع بررسی شود تاب‌آوری شبکه‌ی یادشده در سه حالت بیشینه، میانگین و کمینه به ترتیب ۷۲، ۲۳ و ۱۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در صورت محافظت از ده لوله‌ی بحرانی شبکه، تاب‌آوری شبکه به‌طور میانگین ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. لذا توصیه می‌شود برای افزایش تاب‌آوری این شبکه، منبع تامین آب و لوله‌های انتقال اصلی جدیدی در صورت امکان جانمایی شده و لوله‌های انتقال اصلی و لوله‌ی بحرانی مورد محافظت قرارگیرد.

**کلیدواژگان:** شبکه‌ی توزیع آب واقعی، لوله‌های بحرانی، کسری تامین آب، صحت‌سنجی.

## ۱- مقدمه

سن تاسیسات، رویدادهای طبیعی مانند سیل، زلزله و یا اختلال‌های ناشی از عملکرد انسان تشدید می‌شود. برای مدیریت رویدادهای محتمل از این تهدیدها، لازم است برنامه‌ریزی برای کاهش خطر و افزایش آمادگی در مقابل رویدادهای اضطراری تمهید شود.

یکی از راه‌های ارزیابی ساختار فنی و سیاست‌های مدیریتی یک سامانه، استفاده از شاخص‌های عملکردی است. این شاخص‌ها به دو دسته کلی؛ شاخص‌های عملکردی سنتی و

شبکه‌های توزیع آب از جمله مهم‌ترین زیرساخت‌های حیاتی شهری بوده و تامین آب با کیفیت و فشار مناسب به مصرف‌کننده را برعهده دارند. هرگونه خرابی یا شکستگی در لوله‌های شبکه، عملکرد شبکه را تضعیف کرده و در نهایت منجر به نارضایتی مصرف‌کنندگان می‌شود هنگامی که چندین لوله در سامانه به‌طور همزمان خراب شوند شرایط بسیار وخیم‌تر خواهد شد. شکست لوله با بالا رفتن

عملکردی جدید تقسیم می‌شوند. شاخص‌های سنتی همان شاخص‌های آماری مانند میانگین، واریانس، کمینه و غیره هستند؛ در حالی که خطرپذیری، اعتمادپذیری<sup>۱</sup>، تاب‌آوری<sup>۲</sup> و آسیب‌پذیری<sup>۳</sup> از جمله شاخص‌های جدید به شمار می‌روند (Srdjevic and Obradovic, 1997). سه معیار قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری برای ارزیابی عملکرد سامانه منابع آب استفاده می‌شود (Hashimoto et al., 1982). تاب‌آوری شامل سه ظرفیت جذب، سازگاری و بازیابی یا ترمیم می‌باشد (Francis and Bekera, 2014). روش فنی مبتنی بر شاخص تاب‌آوری با کاهش هزینه و حفظ توانایی سامانه برای چیره‌شدن بر شکست‌ها با فرض ثابت ماندن فشار و تقاضا در گره‌ها ارائه داد (Todini, 2000). (Baños et al., 2011) در بررسی‌های خود عملکرد چندین شاخص تاب‌آوری مختلف مانند شاخص تاب‌آوری (Todini, 2000) RI<sup>4</sup>، شاخص تاب‌آوری شبکه (Prasad and Park, 2004) NRI<sup>5</sup> و شاخص تاب‌آوری اصلاح شده (Jayaram and Srinivasan, 2008) MRI<sup>6</sup> را برای شبکه‌های توزیع آب تجزیه و تحلیل کردند. نتایج نشان داد که این شاخص‌ها توانایی بررسی شبکه را در شرایط حدی چون تقاضا و فشارهای بیش از حد در حالت شکست ندارند. (Berardi et al., 2014) روشی با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌های توزیع پیشنهاد کردند. در این بررسی‌ها کمترین لوله‌های آسیب دیده که باعث بیشترین کسری تأمین آب در شبکه شدند مشخص شدند. حالت‌های شکست در شبکه‌های توزیع به دو دسته شکست ساختاری و عملکردی طبقه بندی می‌شوند (Mugume et al., 2015). پاسخ به شکست لوله مقاومت سامانه را نسبت به از بین رفتن اتصال‌های ساختاری نشان می‌دهد (Butler et al., 2014). تاب‌آوری مهندسی به طور گسترده شامل دو بخش مبتنی بر ویژگی<sup>۷</sup> و مبتنی بر عملکرد<sup>۸</sup> می‌باشد. تاب‌آوری مبتنی بر ویژگی شامل مجموعه‌ای از اصول و

طراحی کلی است که سبب می‌شود سامانه در برابر هرگونه تهدیدی واکنش مناسبی داشته باشد. تاب‌آوری مبتنی بر عملکرد برای رویارویی با تهدیدهای خاص است و هدف خاص عملیاتی را دنبال می‌کند (Butler et al., 2014). تاکید بر عملکرد سامانه‌های آبی در شرایط غیر منتظره و شرایط حاد (فراتر از شکست‌های معمولی) می‌باشد (Butler et al., 2017). در بررسی‌های صورت گرفته توسط (Gheisi et al., 2014). احتمال آنکه شبکه تحت پیش‌فرض‌های شکست همزمان لوله‌ها قرار گیرد ۷۸.۵٪ برآورد شد. آنان علت توجه بسیار کم به پیش‌فرض‌های شکست همزمان لوله‌ها را حجم زیاد محاسباتی مورد نیاز دانستند. از نظر Laucelli و همکاران شکست‌های همزمان لوله‌ها مهم‌ترین پیش‌فرض‌های شکست بوده‌اند. آنان اثرهای شکست چندین لوله همزمان در شبکه را در هنگام زلزله تجزیه و تحلیل کردند (Laucelli et al., 2015). از نظر (Butler et al., 2017) تاب‌آوری به صورت توانایی سامانه در کمینه کردن بزرگی گستره شکست در هنگام رویارویی با شرایط غیر منتظره تعریف می‌شود. تحلیل خطرپذیری روش معمول برای بررسی خطر تهدیدها می‌باشد اما قادر به مشخص کردن تهدیدهای ناشناخته نیست (ASCE Policy Statement 518, 2006). لذا لازم است روشی برای تمرکز سامانه به همه حالت‌های شکست‌های احتمالی (شناخته و ناشناخته) ارائه شود (Diao et al., 2016). ایشان تحلیل تاب‌آوری جامع (GRA<sup>9</sup>) را ارائه دادند. روش GRA بر پاسخ به همه‌ی حالت‌های شکست سامانه متمرکز می‌باشد (Diao et al., 2016). در بررسی‌های (Pagano et al., 2019) و همکاران به ارائه برتری‌های روش GRA بر نظریه گراف در تحلیل تاب‌آوری پرداخته شده‌است. با توجه به تمرکز نظریه گراف بر بررسی عوارض‌شناسی شبکه و اندازه‌گیری مبتنی بر عملکرد از استحکام سامانه در برابر حالت‌های خرابی سامانه در GRA، تحلیل GRA (که اطلاعات مفصلی در مورد مدت زمان خرابی و بزرگای آن

<sup>6</sup> Modified Resilience Index

<sup>7</sup> Attribute-based

<sup>8</sup> Performance based

<sup>9</sup> Global Resilience Analysis

<sup>1</sup> Reliability

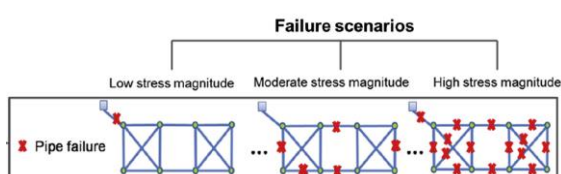
<sup>2</sup> Resilience

<sup>3</sup> Vulnerability

<sup>4</sup> Resilience Index

<sup>5</sup> Network Resilience Index

تخاذ شده است (Diao et al., 2016). ترکیب‌های مختلف شکست با افزایش میزان تنش و برآورد کرنش متناسب با آن مدل‌سازی شده‌است (Johansson, 2007). ترکیب‌های مختلف شکست لوله‌ها به عنوان بزرگی تنش و نسبت تقاضای تامین شده به تقاضای کل به عنوان میزان کرنش عملکردی تعریف می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ آورده شده است در این بررسی‌ها به تمام ترکیب‌های مختلف شکست لوله‌ها؛ شکست تکی لوله‌ها، شکست دوتایی لوله‌ها و... تا شکست همه‌ی لوله‌ها در شبکه پرداخته می‌شود (Diao et al., 2016).



**Fig. 1** Schematic of the pipe failure modes and corresponding failure scenarios. Crosses represent the location of pipe failures (Diao et al., 2016)

شکل ۱ شمای کلی حالت شکست لوله و پیش‌فرض‌های شکست مربوطه. (صلیب‌ها نشان دهنده محل شکست در لوله‌ها)

با توجه به شمار بسیار زیاد ترکیب‌های مختلف شکست احتمالی (سامانه با  $c$  جزء و  $m$  شکست همزمان دارای  $\sum \frac{c!}{m!(c-m)!}$  پیش‌فرض‌های شکست بالقوه می‌باشد)، مدل‌سازی همه‌ی پیش‌فرض‌های موجود برای هر بزرگی شکست سامانه امکان‌پذیر نمی‌باشد (Sweetapple et al., 2018). لذا برای هر میزان تنش وارده به سامانه باید شمار مناسبی از پیش‌فرض‌های شکست تعیین شود. شمار پیش‌فرض‌ها ( $TNS^1$ ) به شرح رابطه (۱) تعیین می‌شود (Diao et al., 2016).

$$TNS = \begin{cases} 1 \rightarrow \text{if } c = c_f \\ c \rightarrow \text{if } c_f = 1 \\ \frac{N \times P \times (1 - P)}{\left(\frac{CI}{Z_\alpha}\right)^2 \times (N - 1) + P \times (1 - P)} \\ +2[c - (c_f - 1)] \rightarrow \text{if } 1 < c_f < c, \end{cases} \quad (1)$$

تأمین می‌کند) نتایج مناسب‌تری در خرابی لوله‌ها ارائه می‌دهند. به ویژه برای شبکه‌های پیچیده، ویژگی‌های عوارض‌شناسی نمی‌تواند عملکرد هیدرولیکی و اثرگذاری‌های خرابی لوله‌ها را به خوبی نشان دهند.

پس از شکست لوله، برخی از آسیب‌ها جزئی هستند و می‌توان آنها را ترمیم کرد، اما ممکن است آسیب‌ها جدی‌تر بوده و به تعویض همه یا بخشی از لوله منجر شود. در حین ترمیم، نیازی به جداسازی و بی‌آب‌کردن لوله وجود ندارد و تا زمان پایان تعمیر ممکن است نشتی ادامه یابد. اما در حین تعویض، جداسازی لازم است و تعویض لوله شکسته تا پیش از بی‌آب‌کردن آغاز نمی‌شود (Paez et al., 2018). در GRA مدل‌سازی حالت شکست لوله (تنش وارد بر سامانه) با تغییر وضعیت لوله به حالت بسته برای مدت سه ساعت در زمان اوج مصرف انجام شده است (Diao et al., 2016). در این بررسی‌ها مدت زمان شکست بدون توجه به قطر لوله‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. درحالی که بنا بر نتایج بررسی‌های Paez et al. (2018) در کارهای اجرایی این مدت زمان تابعی از قطر لوله می‌باشد. همچنین مدل ارائه شده برای شبکه‌های مطالعاتی بررسی شده و در شبکه‌ی واقعی بررسی نشده‌است.

در این تحقیق در آغاز به صحت‌سنجی کد عددی روش GRA برای شبکه‌ی مطالعاتی پژوهش (Diao et al., 2016) پرداخته می‌شود. پس از آن تاب‌آوری شبکه‌ی توزیع یاد شده به‌صورت جدا از خطوط اصلی انتقال بررسی می‌شود. در ادامه تاب‌آوری شبکه‌ی توزیع واقعی آب در ایران با در نظر گرفتن قطرهای مختلف و زمان شکست لوله‌ها بر مبنای قطر لوله‌های شبکه تحقیق می‌شود. در نهایت لوله‌های بحرانی شبکه مشخص شده و تحلیل تاب‌آوری شبکه در صورت مقاوم‌سازی این لوله‌ها بررسی شده و پیشنهادهایی با بیشترین تاثیر و کمترین هزینه در جهت اصلاح و بازسازی شبکه در طرح‌های اضطراری ارائه می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

همان‌طور که بیان شد در این تحقیق، رویکرد GRA برای ارزیابی تاب‌آوری سامانه در ترکیب‌های مختلف شکست لوله

<sup>1</sup> Total Number Senario

گره‌های با نیاز آبی، ۲۰ متر و برای گره‌های بدون نیاز آبی صفر متر) می‌باشد.  $q_i(t)$  تقاضای گره واقعی عرضه شده در گره  $i$  در زمان  $t$  است.

با محاسبه‌ی نرخ تقاضای تامین نشده به کل میزان تقاضا ( $dD_f$ ) بزرگای کرنش محاسبه می‌شود (رابطه‌ی ۳) که از این پس کسری تامین نامیده می‌شود. زمان بین نخستین رخداد کسری تامین و بازگشت نهایی به حالت بدون شکست لوله، زمان کرنش می‌باشد (Diao et al., 2016).

$$dD_f = \frac{\sum_{T_{ss}}^{T_{SE}} \sum_i^n (q_i(t) - q_{if}(t))}{\sum_{T_{ss}}^{T_{SE}} \sum_i^n q_i(t)} \quad (3)$$

$q_i(t)$  تقاضای گره‌ای عرضه شده در گره  $i$  در شرایط عادی و نبود شکست،  $q_{if}(t)$  تقاضای گره‌ای برآورد شده در گره  $i$  در زمان  $t$  در پیش‌فرض‌های شکست  $f$ ،  $T_{ss}$  زمان آغاز کرنش (کسری تامین تقاضا)؛  $T_{SE}$  زمان پایان کرنش؛  $n$  شمار کل گره‌ها می‌باشد.

در GRA مدل‌سازی حالت شکست لوله (تنش وارد بر سامانه) با تغییر وضعیت لوله به حالت بسته برای مدت سه ساعت در زمان اوج مصرف انجام می‌شود شایان ذکر است مدت سه ساعت (بیشینه زمان ارائه خدمات پشتیبانی در انگلستان) شامل زمان جداسازی لوله‌های شکسته شده (از بین رفتن اتصالاتها) و پیرو آن تعمیرات می‌باشد (Diao et al., 2016). زمان تعویض لوله‌های خراب توسط Paez و همکاران در رابطه ۴ ارائه شده است (Paez et al., 2018):

$$T(\text{rep}) = 0 \cdot 156 \times D^{0.719} \quad (4)$$

که در آن  $T(\text{rep})$  زمان تعمیر لوله بر حسب ساعت و  $D$  قطر لوله بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

## ۲-۱- مدل پیشنهادی

روش GRA برای شکست لوله توسط کد رایانه‌ای در محیط Matlab بر مبنای روابط ۱ تا ۴ ارائه شده تنظیم شده است. کد بالا از نرم‌افزار EPANET2.2 برای محاسبات هیدرولیکی (مدل مبتنی بر تقاضای گره‌ای) استفاده می‌کند

در رابطه‌های بالا،  $c$  شمار کل اجزاء و  $c_f$  شمار اجزای شکست خورده را نشان می‌دهد.  $N$  شمار پیش‌فرض‌های ممکن برای یک حالت شکست و  $P$  احتمال موفقیت است. مقدار  $P$ ، 0.5 فرض می‌شود که کمینه اندازه نمونه مورد نیاز را ارائه می‌دهد. CI بازه اطمینان و  $Z\alpha$  مقدار توزیع نرمال برای سطح اطمینان خاص است. برای رابطه‌ی یک اگر همه‌ی لوله‌ها دچار شکست شوند تنها یک پیش‌فرض شکست خواهیم داشت و پیش‌فرض شکست تک تک لوله‌ها به‌طور مشخص برابر شمار لوله‌ها خواهد بود. شمار پیش‌فرض‌های تصادفی برای ترکیب‌های بین این دو شکست از قسمت سوم رابطه‌ی ۱ بدست می‌آید. همچنین شمار پیش‌فرض‌های هدفمند در هر حالت شکست ۲۰ درصد از همه‌ی ترکیب‌های لوله‌ها که بیشترین و کمترین میزان کمبود در مرحله پیش را ایجاد کرده می‌باشد.

برای محاسبات هیدرولیکی از نرم‌افزار هیدرولیکی EPANET2.2 استفاده شد (Rossman, 2000). این نرم‌افزار مدلی مبتنی بر تقاضای گره‌ای  $^1$  DDSM بوده و به محاسبه‌ی فشار گره‌ای در گره‌هایی با تقاضای ثابت می‌پردازد (Pathirana, 2010).

برای شبیه‌سازی واقعی عملکرد سامانه به‌ویژه در شرایط بحرانی (چون شکست) که فشار از کمینه فشار استاندارد کمتر می‌شود لازم است رابطه‌ی فشار خروجی گره‌ها در نظر گرفته شود. این نوع تحلیل که در آن ارتباط میان دبی خروجی گره و فشار در نظر گرفته می‌شود روش شبیه‌سازی مبتنی بر فشار نامیده می‌شود (Tabesh, 2016). این روش به مبتنی بر فشار  $^2$  PDA یا  $^3$  HDSM معروف است. در این روش از رابطه Wagner (رابطه‌ی ۲) استفاده می‌شود (Wagner et al., 1988).

$$q_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } P_i(t) \leq 0 \\ Q_i(t) \sqrt{\frac{P_i(t)}{P_{\min}}}, & \text{if } 0 < P_i(t) < P_{\min} \\ Q_i(t), & \text{if } P_i(t) \geq P_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن  $Q_i(t)$  تقاضای گره‌ای مورد انتظار تامین شده در گره  $i$  در زمان  $t$ ،  $P_i(t)$  فشار واقعی در گره  $i$  در زمان  $t$ ،  $P_{\min}$  کمینه فشار مجاز در گره  $i$  (در این پژوهش برای

<sup>3</sup> Head Driven Simulation Method

<sup>1</sup> Demand Driven Simulation Method

<sup>2</sup> Pressure Dependent Analysis

برمبنای کمینه و بیشینه کسری تامین دسته بندی می‌شوند.

۱۰. برای آغاز ترکیب دوتایی شکست به گام سوم رفته و شمار پیش‌فرض‌های تصادفی برابر رابطه‌ی ۱ و پیش‌فرض‌های هدفمند نیز برمبنای ۲۰ درصد از همه‌ی ترکیب‌های لوله‌ها که بیشترین و کمترین میزان کمبود را در مرحله شکست تکی لوله‌ها ایجاد کرده در نظر گرفته می‌شوند.

۱۱. برمبنای این پیش‌فرض‌ها شکست دوتایی لوله‌ها در نظر گرفته می‌شود و گام ۴ تا ۹ انجام می‌گیرد.

۱۲. برای شکست‌های سه‌تایی، چهارتایی، ... تا شکست همه‌ی لوله‌ها این گام‌ها انجام شده و تاب‌آوری شبکه تحت تمامی شکست‌های محتمل بررسی می‌شود.

در روش پیشنهادی تاب‌آوری جامع همه‌ی پیش‌فرض‌های شکست بررسی می‌شود و برمبنای آن لوله‌های بحرانی شبکه که با ترکیب‌های مختلف شکست سبب بیشترین کسری تامین شبکه می‌شوند مشخص می‌شوند.

## ۲-۲- داده‌های شبکه مورد استفاده

برای صحت‌سنجی کد تاب‌آوری جامع نوشته شده در این تحقیق از شبکه‌ی Net3 دریافت شده از Diao et al. (2016) استفاده شد. پس از آن یک شبکه‌ی توزیع واقعی آب اجرا شده در یکی از شهرهای خراسان رضوی بررسی شد. شایان یادآوری است تحلیل تاب‌آوری لوله‌های اصلی انتقال آب از منبع‌ها به شبکه‌ی توزیع به‌طور جداگانه از لوله‌های شبکه در دو شبکه‌ی یادشده بررسی شدند. شکل ۳ و ۴ شبکه‌های توزیع Net3 و شبکه‌ی واقعی آب مورد تحلیل را نشان می‌دهند. جدول ۱ ویژگی‌های کلی این دو شبکه توزیع را نشان می‌دهد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- صحت‌سنجی کد برای شبکه توزیع Net3

شکل ۵ نتایج کد عددی نوشته شده را برای شبکه‌ی توزیع Net3 نشان می‌دهد. نتایج کد عددی بالای ۹۵ درصد با نتایج (Diao et al. 2016) همخوانی دارد. نتایج GRA مدل (Diao et al. 2016) برای شبکه‌ی Net3 نشان می‌دهد که به دلیل خرابی همزمان چهار لوله اصلی اتصال مخزن‌ها

(EPA, 2020). مطابق روندنمای مدل پیشنهادی در شکل

۲ گام‌های زیر برای انجام کار بایستی مد نظر قرار گیرد:

۱. مدل هیدرولیکی شبکه در نرم‌افزار Epanet پیاده‌سازی می‌شود (اطلاعات اولیه شامل مخزن‌ها، لوله‌ها، میزان تقاضای گره‌ای و ارتفاع نقطه‌ها)

۲. در کد نوشته شده در Matlab مدل هیدرولیکی نرم‌افزار Epanet فراخوانی شده و فشار اولیه نقاط محاسبه می‌شود.

۳. شمار پیش‌فرض‌های تصادفی شکست لوله‌ها در ترکیب‌های مختلف از شکست (شکست دوتایی لوله‌ها، شکست سه‌تایی لوله‌ها، ... شکست همه‌ی لوله‌ها) که در رابطه‌ی ۱ ارائه شده محاسبه می‌شود.

۴. در نخستین سعی شکست لوله‌ی  $i=1$  در نظر گرفته می‌شود. مدلسازی شکست با بستن لوله‌ی بالا برابر رابطه‌ی ۴ به مدت شش ساعت در اوج مصرف صورت گرفته است). در این کد نیز دستور بستن لوله به نرم افزار Epanet ارسال می‌شود.

۵. مدل هیدرولیکی شبکه تحت شکست اجرا می‌شود.

۶. برمبنای فشار گره‌ها میزان تقاضای تامین شده برابر رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود. سه حالت رخ می‌دهد:

الف- اگر فشار گره‌ها کمتر از صفر باشند. تقاضای آن نقطه تامین نخواهد شد.

ب- اگر فشار بین صفر و فشار کمینه باشد در آن صورت برابر رابطه‌ی ۲ درصدی از تقاضا تامین می‌شود.

ج- اگر فشار بالاتر از فشار کمینه باشد تمامی تقاضا تامین می‌شود.

۷. پس از محاسبه‌ی تقاضای تامین شده در گره‌ها لازم

است مدل هیدرولیکی شبکه برمبنای تقاضای واقعی تامین شده دوباره اجرا و فشار نقطه‌ها محاسبه شود. این چرخه تا حصول همگرایی فشارها ادامه می‌یابد.

۸. برمبنای فشارها و تقاضاهای تامین شده پس از شکست و پیش از شکست برابر رابطه‌ی ۳ تاب‌آوری شبکه محاسبه می‌شود.

۹. گام ۴ تا ۸ برای شکست تک تک لوله‌ها انجام می‌گیرد و تاب‌آوری (میزان کسری تامین آب شبکه برمبنای شکست هر لوله) محاسبه می‌شود. لوله‌ها

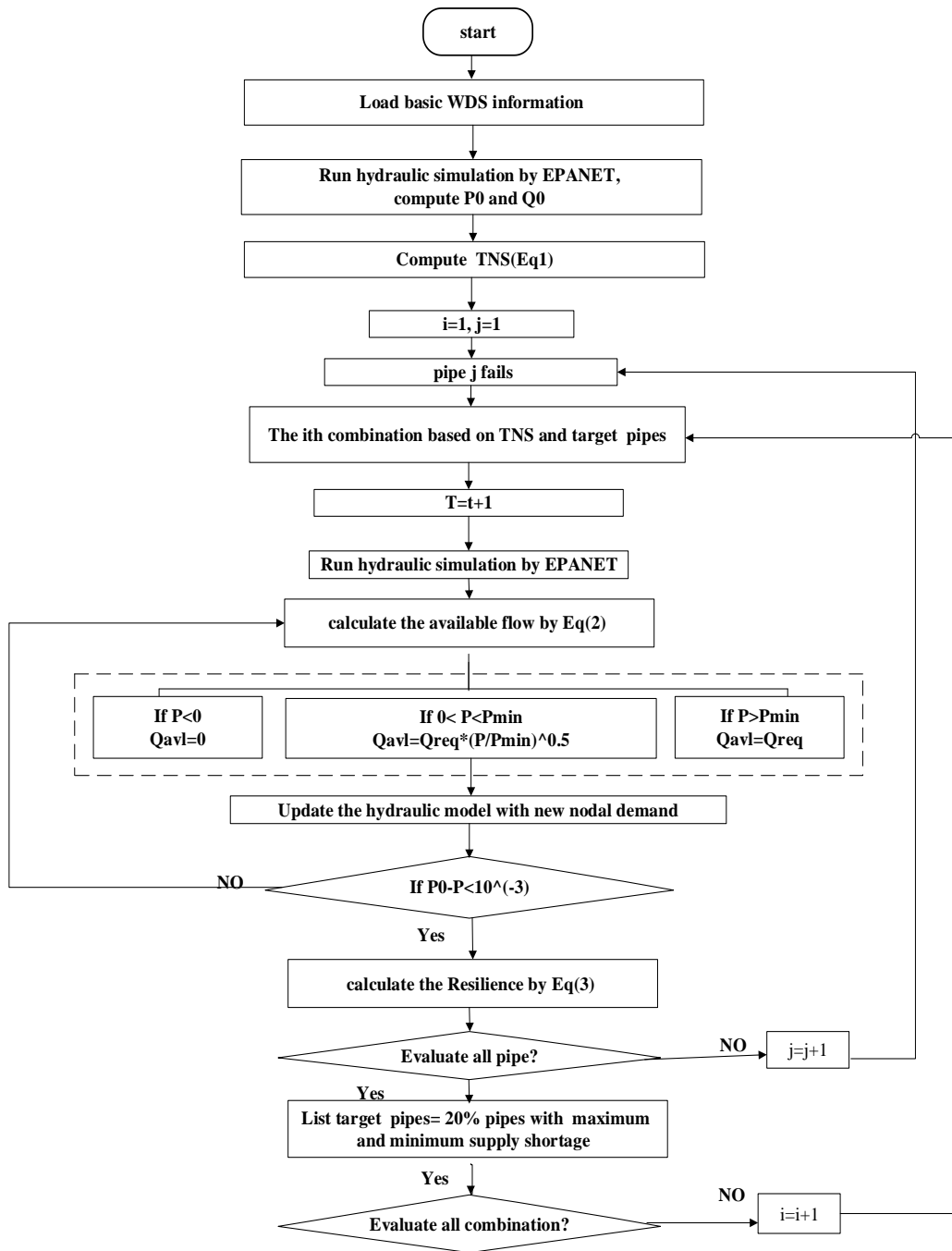


Fig. 2 A flowchart for resilience analysis of pipe failure in WDS by isolation valves

شکل ۲ روندنمای تحلیل تاب‌آوری در شبکه‌ی توزیع آب

جدول ۱ ویژگی‌های شبکه‌های توزیع Net3 و شبکه واقعی آب در ایران

Table 1. Properties of Net3 and Real water distribution network in Iran

Networks	Junctions	Pipes	Reservoirs	Tanks	Demand(L/s)
Net3	91	115	2	3	717.3
Real water distribution network in Iran	1217	1325	1	0	317



رودخانه، مخزن ۱، مخزن ۲ و دریاچه) است. از آنجا که در این زمان پمپاژ دریاچه کار نمی‌کند، لوله ۵ کمترین اولویت را دارد. بر این مبنا، با محافظت از تنها چهار لوله اصلی انتقال آب، میزان تاب‌آوری شبکه ۳۰ درصد افزایش یافته‌است.

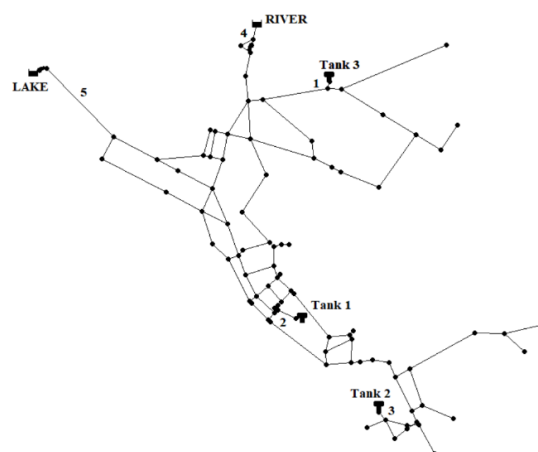


Fig. 3 Case study water distribution systems  
شکل ۳ شبکه توزیع مطالعاتی

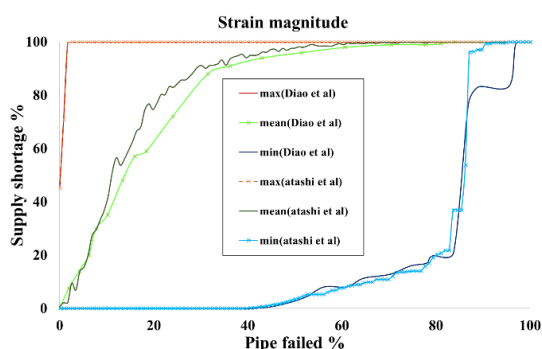


Fig. 5 Calibration of code with results (Diao et al) for Net3 network

شکل ۵ مقایسه نتایج کد با نتایج (Diao et al) برای شبکه‌ی Net3



Fig. 4 Real water distribution network in one of the cities of Khorasan Razavi

شکل ۴ شبکه توزیع آب واقعی در یکی از شهرهای خراسان رضوی

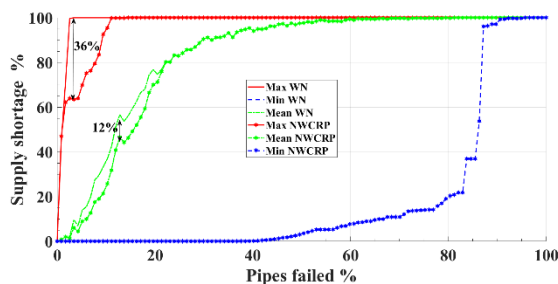


Fig. 6 Supply shortage for the whole network (WN) and the network without CRPs (NWCPR)

شکل ۶ کسری تأمین آب برای کل شبکه‌ی توزیع (WN) و شبکه بدون لوله‌های اصلی تأمین آب (NWCPR) برای شبکه Net3

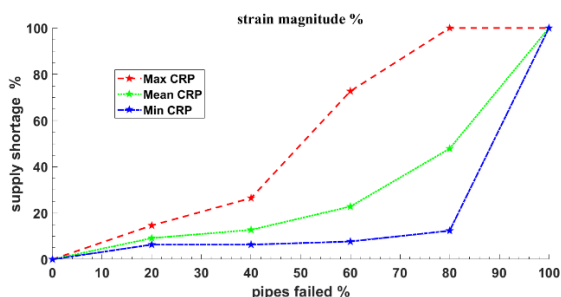


Fig. 7 Supply shortage for CRP failures

شکل ۷ کسری تأمین آب برای لوله‌های اصلی انتقال آب (CRP) برای شبکه Net3

(CRP<sup>۱</sup>) به شبکه‌ی توزیع، سامانه با شکست کامل (۱۰۰٪) کسری تأمین) روبه‌رو شده‌است. در حالی که با تحلیل شبکه بدون لحاظ لوله‌های انتقال آب، با شکست ۱۲ لوله، سامانه با شکست کامل روبه‌رو خواهد شد. میزان بیشینه و میانگین کمبود تأمین آب در شبکه برای مدل یادشده ۳۶ و ۱۲ درصد بیشتر از مدل (Diao et al. 2016) است (شکل ۶). بنابراین، برای محاسبه تاب‌آوری شبکه توزیع آب، لوله‌های CRP باید جداگانه تجزیه و تحلیل شوند. درصد کسری تأمین برای همه‌ی ترکیب‌های خرابی لوله‌های CRP در دوره اوج تقاضا (۱۸-۲۰ بعد از ظهر) در شکل ۷ ارائه شده‌است. بر اساس این تحلیل، اولویت لوله‌های CRP به ترتیب ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ (لوله‌های متصل به مخزن ۳،

<sup>1</sup> Connecting reservoir pipes

می‌شود. با توجه به این موضوع برای بالابردن تاب آوری شبکه بهتر است در صورت امکان یک مخزن تامین آب دیگر جانمایی شود. و یا یک لوله انتقال دیگر به صورت رزرو و یا در مدار از منبع یادشده آب را به شبکه برساند. ده لوله بحرانی شبکه برابر شکل ۹ نشان داده شده است. در صورت مقاوم سازی این لوله‌ها و یا قراردادن لوله‌ی ذخیره در کنار آنها برابر شکل ۱۰ تاب آوری شبکه در حالت میانگین ۲۰ درصد افزایش می‌یابد.

جدول ۲ زمان تعویض لوله های شبکه توزیع واقعی آب

Table 2. Replacement time for real water distribution network in Iran

	D(mm)	T(hours)
Max	700	17
Mean	158	6
Min	62	3

#### ۴- نتیجه گیری

تحلیل تاب آوری برای ارائه‌ی طرح‌های اضطراری، پیش از رخداد بحران در شبکه‌های توزیع بسیار اهمیت دارد. بر مبنای تحلیل تاب آوری می‌توان شبکه‌ی توزیع را به‌طور کامل شناسایی کرده و نقطه‌های بحرانی شبکه را مشخص کرد. پس از شناخت این نقطه‌ها، طرح‌های افزایش تاب آوری پیشنهاد می‌شوند. یکی از اجزای شبکه که در تحلیل تاب آوری بررسی می‌شود شکست بخش یا همه ترکیب‌های مختلف لوله‌ها می‌باشد. در این پژوهش پس از آزمون مدل تحلیل تاب آوری در شبکه‌ی مطالعاتی NET3، مدل برای یک شبکه واقعی آب در ایران پیاده‌سازی شد. با توجه به اهمیت و وابسته بودن تامین آب کل شبکه به خطوط اصلی انتقال، تاب آوری این لوله‌ها به‌طور جداگانه از کل شبکه‌ی توزیع بررسی شد. بر این مبنای تقویت خطوط اصلی، تاب آوری شبکه‌ی مذکور در حالت بیشینه ۷۲ درصد افزایش می‌یابد. زیرا این شبکه با وجود تنها یک منبع اصلی در حالت بیشینه با شکست تکی لوله‌ها به صد درصد کسری تامین آب می‌رسد. تحلیل تاب آوری سایر لوله‌های شبکه نیز نشانگر آن است که در صورت محافظت از ده لوله‌ی بحرانی شبکه، تاب آوری شبکه به طور میانگین ۲۰ درصد افزایش

#### ۳-۲- نتایج مدل شبکه‌ی واقعی آب در خراسان

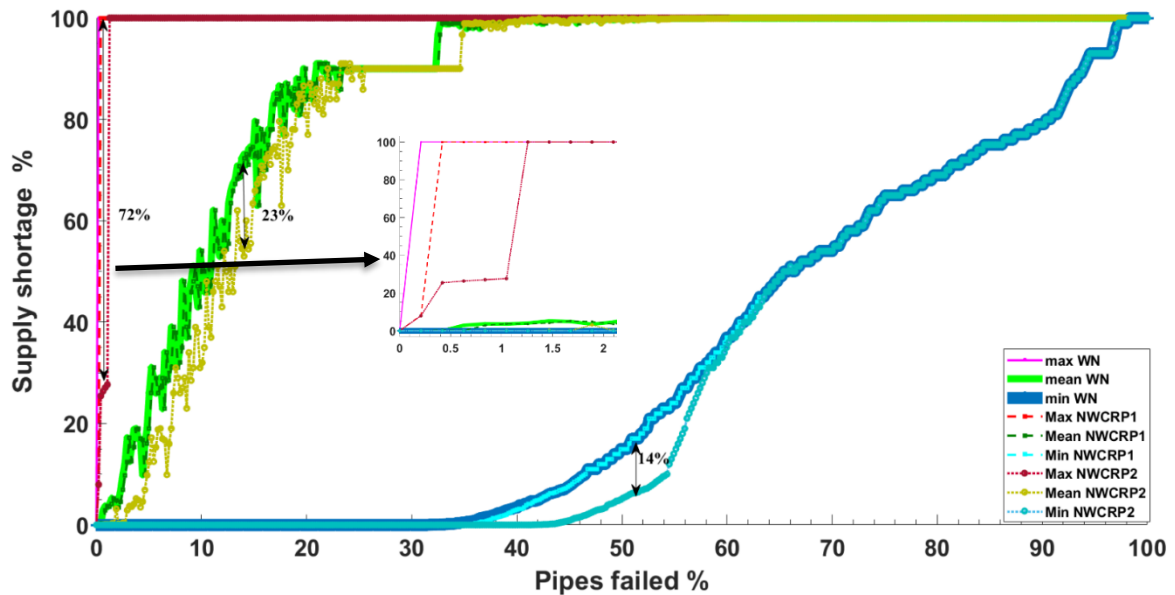
##### رضوی

شکل ۸ کسری تامین آب برای شبکه‌ی توزیع واقعی آب را نشان می‌دهد. کسری تامین آب برای کل شبکه‌ی توزیع (WN) می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود خط انتقال به قطر ۱۲۰۰ میلی‌متر از مخزن با کد ارتفاعی ۹۸۰ متر تا ابتدای منطقه به ارتفاع ۹۵۵ متر موجود می‌باشد. پس از آن خط لوله ۱۰۰۰ میلی‌متر در کمربندی جنوب شبکه مورد نظر گذر کرده و در چهار نقطه به شبکه‌ی اصلی متصل می‌شود. لذا دو تحلیل دیگر یکی با بررسی شبکه بدون شکست لوله‌ی اصلی تامین آب (لوله ۱۲۰۰ میلی‌متری) (NWCPR1) دیگری با بررسی شبکه بدون شکست لوله‌های اصلی انتقال (۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ میلی‌متر) (NWCPR2) ارائه شده‌است. میزان بیشینه، میانگین و کمینه کمبود تامین آب در شبکه بدون لحاظ لوله‌های اصلی (NWCPR2) ۷۲ درصد، ۲۳ درصد و ۱۴ درصد بیشتر از کل شبکه توزیع (WN) است. میزان کمینه، میانگین و بیشینه زمان تعمیر و تعویض لوله بر مبنای قطر برابر جدول ۲ می‌باشد. بر مبنای استعلام از بخش بهره‌برداری و اتفاقات شرکت آب و فاضلاب در این زمینه و با توجه به قطر لوله‌های شبکه زمان شکست لوله‌ها در اوج مصرف (۱۲-۱۸) به صورت میانگین ۶ ساعت در نظر گرفته شده‌است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در سه پیش‌فرض WN، NWCPR1 و NWCPR2 به ترتیب با شکست ۱ لوله (لوله اصلی انتقال)، ۲ لوله و ۶ لوله شبکه با ۱۰۰ درصد کسری تامین روبرو می‌شود. همچنین با شکست ۴۰ درصد لوله در حالت کمینه میزان کسری تامین شبکه زیر ۵ درصد می‌باشد. این بدان معنی است که با شکست همزمان ۵۳۰ لوله‌ی شبکه‌ی یادشده میزان کسری تامین آب کمتر از ۵ درصد می‌باشد. به طور میانگین نیز شبکه با شکست ۳۵ درصد لوله همزمان (۴۶۴ لوله) به کسری کامل تامین می‌رسد. با توجه به آنکه شبکه‌ی یادشده تنها یک منبع تامین دارد لذا باید با تمهیدهای ویژه لوله‌های انتقال آب همیشه در مدار بوده و دچار شکست نشود وگرنه شبکه با از دست دادن این لوله‌ها به کسری کامل تامین روبرو

و لوله‌های انتقال اصلی آب می‌توان تاب‌آوری شبکه توزیع را به طور چشمگیری افزایش داد.

می‌یابد. لذا با استفاده از تمهیدهای مختلف و مقاوم‌سازی و یا استفاده از لوله‌ی ذخیره برای این لوله‌های بحرانی شبکه



**Fig. 8** Supply shortage for real water distribution network in Iran  
 شکل ۸ میزان کسری تامین آب در شبکه‌ی توزیع واقعی آب در ایران



**Fig. 9** Critical pipes in real water distribution network in Iran  
 شکل ۹ لوله‌های بحرانی شبکه‌ی توزیع واقعی آب

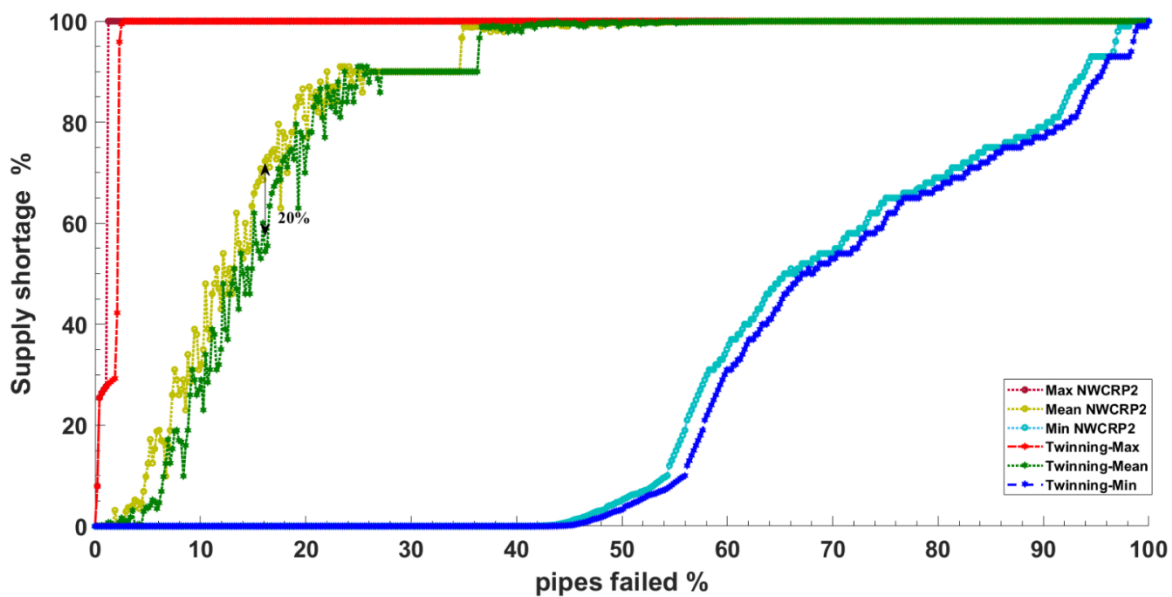


Fig. 10 Enhancement of the real water distribution network resilience to pipe failure by twinning critical pipes

شکل ۱۰ افزایش تاب‌آوری با محافظت از لوله‌های بحرانی در شبکه‌ی توزیع واقعی آب در ایران

D	قطر لوله (mm)				
	زیرنویس‌ها:	c	شمار کل اجزاء سامانه		
TNS	شمار پیش‌فرض‌ها	m	شمار شکست همزمان		
CRP	لوله اصلی اتصال مخزن‌ها	cf	شمار اجزای شکست خورده		
DDSM	مدلی مبتنی بر تقاضای گره ای	N	شمار پیش‌فرض‌های ممکن برای یک حالت شکست		
GRA	تحلیل تاب‌آوری جامع	P	احتمال موفقیت		
MRI	شاخص تاب‌آوری اصلاح شده	CI	بازه اطمینان		
NRI	شاخص تاب‌آوری شبکه	Z $\alpha$	میزان توزیع نرمال برای سطح اطمینان خاص		
NWCRP	شبکه بدون لوله‌های اصلی تامین آب	Q <sub>i</sub> (t)	تقاضای گره‌ای مورد انتظار تامین شده		
HD و PDA	روش به مبتنی بر فشار		(L/s)		
SM		i	شماره گره		
RI	شاخص تاب‌آوری	t	زمان (s)		
WN	کل شبکه‌ی توزیع	P <sub>i</sub> (t)	فشار واقعی (mH <sub>2</sub> o)		
		P <sub>min</sub>	کمینه فشار مجاز (mH <sub>2</sub> o)		
		q <sub>i</sub> (t)	تقاضای گره واقعی عرضه شده در گره i در زمان t (L/s)		
		Q <sub>if</sub> (t)	تقاضای گره‌ای برآورد شده در گره i در زمان t در پیش‌فرض‌های شکست f (L/s)		
		TSS	زمان آغاز کرنش (کسری تامین تقاضا) (s)		
		TSE	زمان پایان کرنش (S)		
		n	شمار کل گره‌ها		
		T(rep)	زمان تعمیر لوله (h)		

### ۶- منابع‌ها

ASCE Policy Statement 518. (2006). <http://www.asce.org/issues-and-advocacy/public-policy/policy-statement-518e-unified-definitions-for-criticalinfrastructure-resilience.2006>.

Baños, R., Reza, J., Martínez, J., Gil, C. and Márquez, A.L. (2011). Resilience indexes for water distribution network design: a performance analysis under demand uncertainty. *Water resources management*, 25, 2351-2366.

Berardi, L., Ugarelli, R., Røstum, J. and Giustolisi, O. (2014). Assessing mechanical vulnerability in

- Mugume, S.N., Gomez, D.E., Fu, G., Farmani, R. and Butler, D. (2015). A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems. *Water research*, 81, 15-26.
- Paez, D., Fillion, Y. and Hulley, M. (2018). Battle of post-disaster response and restoration (BP-DRR): Problem description and rules. Paper presented at the 1st International Water Distribution System Analysis/Computing and Control in the Water Industry Joint Conference, Kingston, ON, Canada, 23–25 July 2018.
- Pagano, A., Sweetapple, C., Farmani, R., Giordano, R. and Butler, D. (2019). Water Distribution Networks Resilience Analysis: a Comparison between Graph Theory-Based Approaches and Global Resilience Analysis. *Water Resour Manage* 33, 2925–2940. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02276-x>
- Pathirana, A. (2010). EPANET2 desktop application for pressure driven demand modeling. *Water Distribution Systems Analysis 2010*.
- Rossman, L.A. (2000). EPANET 2: user's manual.
- Srdjevic, B. and Obradovic, D. (1997). Reliability and risk in agricultural irrigation. *IFAC Proceedings Volumes*, 30, 97-102.
- Sweetapple, C., Diao, K., Farmani, R., Fu, G. and Butler, D. (2018). A tool for global resilience analysis of water distribution systems. 2018. WDSA/CCWI Joint Conference 2018.
- Tabesh, M. (2016). Advanced modeling of water distribution networks, Tehran, Iran: Tehran University Publications. (In Persian)
- Tabesh, M., Soltani, J., Farmani, R. and Savic, D. (2009). Assessing pipe failure rate and mechanical reliability of water distribution networks using data-driven modeling. *Journal of Hydroinformatics*, 11, 1-17.
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban water*, 2, 115-122.
- Wagner, J.M., Shamir, U. and Marks, D.H. (1988). Water distribution reliability: simulation methods. *Journal of water resources planning and management*, 114, 276-294.
- water distribution networks under multiple failures. *Water Resources Research*, 50, 2586-2599.
- Butler, D., Farmani, R., Fu, G., Ward, S., Diao, K. and Astaraie-Imani, M. (2014). A new approach to urban water management: Safe and sure.
- Butler, D., Ward, S., Sweetapple, C., Astaraie-Imani, M., Diao, K., Farmani, R. and Fu, G. (2017). Reliable, resilient and sustainable water management: the Safe & SuRe approach. *Global Challenges*, 1, 63-77.
- Diao, K., Sweetapple, C., Farmani, R., Fu, G., Ward, S. and Butler, D. (2016). Global resilience analysis of water distribution systems. *Water research*, 106, 383-393.
- EPA's GitHub site for EPANET 2.2 open source project. (2020). <https://www.epa.gov/water-research/epanet>.
- Francis, R. and Bekera, B. (2014). A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 121, 90-103.
- Gheisi, A. and Naser, G. (2014). Water distribution system reliability under simultaneous multicomponent failure scenario. *Journal-American Water Works Association*, 106, E319-E327.
- Gheisi, A. and Naser, G. (2015). Multistate reliability of water-distribution systems: comparison of surrogate measures. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141, 04015018.
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R. and Loucks, D.P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water resources research*, 18, 14-20.
- Johansson, J. (2007). Risk and vulnerability analysis of large-Scale technical infrastructures. PhD Report, Lund University.
- Klise, K.A., Murray, R. and Haxton, T. (2018). An Overview of the Water Network Tool for Resilience (WNTR). Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM, United States.
- Laucelli, D. and Giustolisi, O. (2015). Vulnerability assessment of water distribution networks under seismic actions. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141, 04014082.