Journal of Iranian Water Engineering Research

Research Article, P. 15-25
https://doi.org/10.22034/IJWER.2022.301276.1002

Investigation of the effects of hydraulic integration and determination of resilience index in water distribution network systems

Javad Vejahat[1*], Shadi Saraf [2]

[1] Senior Consultant of Water Structures, University of Tehran, Tehran, Iran
[2] Master Student, Department of Water Engineering, Agricultural Engineering Faculty, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

[*]**Corresponding Author: J.Vejahat@ut.ac.ir**

Received: **03 Oct. 2021**
Accepted: **24 Feb. 2022**

Homepage: **ijwer.uoz.ac.ir**

Abstract: Evaluating the efficiency of the water distribution network is one of the most critical and challenging issues for users in this field. In this research, using WaterGEMS software, a hydraulic model of the water distribution network covering the area of six adjacent reservoirs was prepared. The network resilience index for the connected and discrete reservoirs cases was calculated to evaluate each scenario's capability to supply water. The results showed that the hydraulic integration of the adjacent reservoirs has a positive effect on improving the resilience of the distribution network. Also, due to the accuracy of the consumption pattern in the case of integrated tanks, the accuracy of the prepared hydraulic model is higher. Investigation of the effect of hydraulic continuous led to improved calibration of the hydraulic model.

Keywords: Water Distribution Networks, Hydraulic Model, Resilience Index, WaterGEMS Software

Introduction: An interesting procedure to evaluate the system management policies, including water distribution networks, is to use performance indicators, referring to parameters governing the system performance, including field monitoring, how it works, operation status (Klise et al., 2018). In general, two indicators of reliability and resilience are considered in the operation of the water distribution network in urban and rural areas. Hydraulic reliability refers to the continuous supply of a certain amount of water with the required pressures at the desired time and place (Mazaherizadeh et al., 2019) and resilience as the ability of a system or community to survive, absorb and adapt to risk and to protect yourself from the effects of hazards is defined as quickly and efficiently as possible (UNISDR, 2018).

Resilience index has been applied to assess the hydraulic needs of the network (Pandit and Crittenden, 2016), to evaluate the urban water network infrastructure against earthquakes (Alavi et al., 2020), to optimize the network Water distribution (Reca et al., 2017; Mazaherizadeh et al., 2019), and simultaneous pipe failure assumptions (Gheisi and Naser, 2014; Atashi et al., 2020).

In this study, the efficiency of the distribution network in the case of integrating several reservoirs and discrete was investigated and compared using the Resilience index. The distribution network was analyzed based on two scenarios: 1) sufficient flow in the network and 2) essential reversibility of the system.

Material and Methods: The water distribution network of Surat, India, with a resilience index of 0.396, can supply water to only 56% of its population (Popawala and Shah, 2011). The area covered by six reservoirs (Fig. 1) was selected to evaluate the city's water distribution network. The resilience index of the distribution network was calculated for both cases of the connected and discrete reservoirs. In the current situation, the reservoirs are connected through transmission lines, and the maximum water level of all reservoirs is the same. Fig. 2 shows the hourly fluctuations of consumption patterns.

WaterGEMS software, an upgraded version of WaterCAD software, was used for modeling. This software evaluates the water supply network based on hydraulic conditions and examines the pressure and flow velocity at the node points. This software has more flexibility than other software and also provides the possibility of interacting with other software.

To build the model, first, the physic of the distribution network was simulated and the nodal elevations and consumption amounts were allocated. According to the reservoir output pattern and maximum daily and hourly coefficient, consumer consumption pattern was calculated based on the output flow analysis and assigned to the nodes related to each reservoir. Finally, the hydraulic model of the grid was dynamically fabricated for maximum daily consumption, and calibrated for points with very high or shallow pressures over four months at different time intervals.

Results and Discussion: Fig. 3 shows the outlet pressure ranges of the hydraulic model. In the case of maximum consumption, it changes from 26 to 60 meters in most cases in the current situation. Ten percent of water distribution network nodes in the study area have pressures below 26 meters and more than 60 meters. The most important reason for the equilibrium pressure of the site is the reservoirs connection and the integrity of the water distribution network system throughout the area under study. Also, a minimal number of nodes in the minimum consumption state have pressure above 60 meters affected by night patterns for pressure breakers in the study area.

Table 2 shows the pressure in the water distribution network in the state of maximum consumption in integrated and discrete tanks. The rate of nodes with hydraulic pressure in the defined range in the case of connected tanks is higher than that of unconnected tanks.

Table 3 represents the network resilience index (SI), the number of points outside the desired pressure range (26 to 60 meters of water pressure) during peak hours and minimum consumption, and the ratio of this number of points to all points. The resilience index of the network in the state of integrated reservoirs (0.87) is higher than the state of non-interconnection (0.79) because happening a failure, the interconnected reservoirs help adjacent areas in the matter of water supply. In general, the status of the network is considered acceptable.

Conclusion: A continuous and separate hydraulic model of the study water distribution network was prepared. The results show that the integration of adjacent reservoirs has a positive effect on improving the resilience of the distribution network; in other words, at different times of the day and night, depending on the volume of the tank and the consumption pattern of the connected tanks, it helps to supply water to the adjacent related areas. Due to the complexity of connecting distribution network lines in neighboring regions and the change of consumption pattern at different hours, the degree of dependence of nodes to the relevant reservoir varies during the day and night.

© 2022 University of Zabol, Zabol, 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/

، نشریه علمی
پژوهش‌های مهندسی آب ایران

مقاله پژوهشی، ص ۲۵-۱۵
https://doi.org/10.22034/IJWER.2022.301276.1002

بررسی تأثیرات یکپارچه‌سازی هیدرولیکی و تعیین شاخص تاب‌آوری در سامانه‌های شبکه توزیع آب

جواد وجاهت[1*]، شادی صراف[2]

[1] مشاورارشد سازه های آبی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[2] دانشجوی کارشناسی ارشدگروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

[*] **پست الکترونیکی نگارندۀ مسئول: J.Vejahat@ut.ac.ir**

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۵
وب‌گاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir

چکیده

ارزیابی وضعیت کارایی شبکۀ توزیع آب یکی از مسائل مهم و چالش‌برانگیز کاربران این حوزه است. در پژوهش حاضر پس از تعریف شاخص تاب‌آوری شبکۀمیزان این پارامتر در حالت‌های اتصال مخازن به یکدیگر و عدم اتصال آن‌ها به هم و تأثیر هر یک از حالات در نحوه آب‌رسانی به مشترکین موردبررسی قرارگرفته است. در این تحقیق نسبت به تهیۀ مدل هیدرولیکی شبکه توزیع آب محدوده ۶ مخزن هم‌جوار با استفاده از نرم‌افزار WaterGEMS اقدام شد. مدل هیدرولیکی در ساعت حداکثر مصرف در حالت‌های اتصال مخازن به یکدیگر و در حالت عدم اتصال مخازن به یکدیگر اجرا و شرایط هیدرولیکی محدوده هر یک از مخازن به‌صورت نقشه فشار و در نمودارهای مربوطه ارائه گردید. همچنین از قابلیت‌های نرم‌افزار WaterGEMS برای تعیین درصد نحوۀ تأثیرگذاری مخازن در محدوده تحت پوشش آن‌ها و اینکه مخازن متصل به شبکه توزیع آب یک محدودۀ خاص کمک می‌نماید یا خیر استفاده گردید. نتایج نشان داد که یکپارچه-سازی هیدرولیکی محدوده مخازن هم‌جوار تأثیر مثبتی در بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع دارد. همچنین به دلیل تدقیق الگوی مصرف مخازن در حالت اتصال مخازن به یکدیگر دقت مدل هیدرولیکی تهیه‌شده بیشتر هست. بررسی تأثیر به هم‌پیوستگی هیدرولیکی منجر به ارتقای واسنجی مدل هیدرولیکی گردید.

کلیدواژگان: شبکه‌های توزیع آب، مدل هیدرولیکی، شاخص تاب‌آوری، نرم‌افزار WaterGEMS

۱- مقدمه

شبکه‌های توزیع آب ازجمله مهم‌ترین زیرساخت‌های حیاتی شهری بوده و وظیفه تأمین آب باکیفیت و فشار مناسب به مصرف‌کننده را بر عهده‌دارند. ارزیابی وضعیت کارایی شبکه توزیع آب یکی از مسائل مهم و چالش‌برانگیز متصدیان این حوزه بوده است. یکی از راه‌های ارزیابی ساختار فنی و سیاست‌های مدیریتی یک سامانه، استفاده از شاخص‌های عملکردی است. این شاخص‌ها به دودسته کلی شاخص‌های عملکردی سنتی و عملکردی جدید تقسیم می‌شوند. شاخص‌های سنتی همان شاخص‌های آماری مانند میانگین، واریانس، کمینه و ... هستند. هدف تعریف این شاخص‌ها

کمی‌سازی وضعیت کارایی شبکه بوده است. شاخص‌های قابلیت برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری، قابلیت اطمینان و تاب‌آوری شبکه از این قبیل می‌باشند. در نقطهٔ مقابل، شاخص‌های عملکردی به مجموعه پارامترهای حاکم بر شیوه و نوع عملکرد سامانه شامل پایش میدانی، چگونگی کارکرد، وضعیت بهره‌برداری و ... اطلاق می‌گردد. (Klise et al., 2018).

به‌طورکلی در بهره‌برداری از شبکه توزیع آب در مناطق شهری و روستایی، دو نوع اطمینان‌پذیری و شاخص تاب‌آوری موردتوجه است. اطمینان‌پذیری مکانیکی به توانایی بهره‌برداری از تجهیزات مربوط می‌شود. اطمینان‌پذیری هیدرولیکی نیز به تأمین پیوسته کمیت مشخصی از آب با فشارهای موردنیاز در زمان و مکان موردنظر اطلاق می‌گردد (Mazaherizadeh et al., 2019). اطمینان‌پذیری هیدرولیکی به‌صورت توانایی سامانه در تأمین خدمات با سطح قابل قبولی از شکست، باوجود شرایط غیرنرمال تعریف می‌شود. نکته قابل‌توجه این است که در ارزیابی اطمینان‌پذیری از کارکرد سامانه توزیع آب، بررسی پارامتر اطمینان‌پذیری از عملکرد مکانیکی با در نظر گرفتن اساس مقدار آب تحویل داده‌شده، فشار باقیمانده قابل‌استفاده در شبکه، مدت‌زمان لازم جهت تحویل آب و محل تحویل آب از سامانه صورت گیرد (Sobhi et al., 2018).

محققان مختلف بسته به رویکرد موردنظر در پژوهشی که انجام می‌دهند، عبارت تاب‌آوری را به روش‌های مختلف در مبانی نظری مفهوم‌سازی کرده‌اند. استراتژی بین‌المللی سازمان ملل برای کاهش مخاطرات (UNISDR[1]) تاب‌آوری را به‌عنوان توانایی یک سیستم یا جامعه برای دوام، جذب و وفق با مخاطره و حفظ خود از اثرات مخاطرات در سریع‌ترین زمان ممکن و به شکل کارا تعریف کرده است. این چهار توانایی متصل‌به‌هم و همدیگر را تقویت می‌کنند (UNISDR, 2018). تعاریف بسیاری از تاب‌آوری توسط محققان با دیدگاه‌های مختلفی بیان‌شده است. به‌عنوان‌مثال، پاتون و جانستون تاب‌آوری را از دیدگاه اجتماعی تعریف کرده‌اند. آن‌ها پیشنهاد نمودن که تاب‌آوری جامعه نسبت به مخاطرات نیازمند حفظ سلامت اجتماعی، تضمین اقتصاد مداوم، تجارت و فعالیت‌های اجتماعی و همچنین تضمین اینکه اعضای جامعه منابع، ظرفیت و قابلیت‌های ضروری لازم برای استفاده از منابع فیزیکی و اقتصادی به‌منظور به حداقل رساندن مخاطرات رادارند (Kusumastuti et al., 2014). در شبکه توزیع آب شهرهای بزرگ به دلیل پیچیدگی آرایش شبکه و نیاز بالای آب مشترکین و مشکلاتی از قبیل خشک‌سالی و ... نیاز به اتصال و یکپارچگی شبکه احساس می‌شود؛ لذا، در اکثر شهرهای بزرگ شبکه توزیع محدوده مخازن با تراز ارتفاعی تقریباً یکسان در بخش‌هایی که ازنظر رقوم ارتفاعی در محدوده شبکه توزیع محدودیت خاصی وجود نداشته است از طریق خطوط اتصال بین مخازن به یکدیگر متصل گردیده‌اند (Mugume et al., 2015)

پایداری شبکه بر اساس معیارهای شاخص برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و قابلیت اطمینان تعریف می‌گردد. شاخص قابلیت اطمینان نیز بر اساس ترکیبی از قابلیت ارتجاع، سن آب و آنتروپی تعریف می‌شود. شاخص‌های فوق با استفاده از روش منطق فازی و قطعی انجام تعیین و که نهایتاً روش منطق فازی نتایج مطلوب‌تری نسبت به روش دیگر ارائه نمود (Bakhtyari et al., 2016).

شاخص تاب‌آوری شبکه متأثر از چهار پارامتر اجتماعی، اقتصادی، محیط‌زیستی و مهندسی می‌باشد هر یک از این معیارها وزن مخصوص خود را دارا می‌باشد. هر یک از این چهار معیار اصلی دارای ریز شاخص‌های مختص به خود بوده و دارای وزن ویژه می‌باشند به‌طور مثال پارامتر اجتماعی دارای ریز شاخص‌های دسترسی کمی مشترکین به آب، میزان کیفیت آب تحویلی به مشترکین، تعداد ساعات دسترسی مشترکین به آب در شبانه‌روز، شکایات مردمی و سیل‌خیزی منطقه می‌باشد همچنین در بخش اقتصادی، ریز شاخص‌های میزان سرمایه‌گذاری، هزینه بهره‌برداری و نگهداری و هزینه سرمایه‌گذاری تحقیق و توسعه در نظر گرفته‌شده است (Golmohammadi et al.,

[1] United Nations International Strategy for Disaster Reduction

2021).

شاخص تاب‌آوری معیاری است که نشان‌دهنده میزان رضایت بخشی عملکرد شبکه توزیع آب می‌باشد. میزان رضایت بخشی یا مطلوبیت عملکرد شبکه با استفاده از یک تابع ریاضی از عدم رضایت بخشی متمایز می‌گردد. در این تحقیق فشار مطلوب در شبکه بین ۲۶ متر تا ۶۰ متر فشار آب در نظر گرفته‌شده است. این حدود با توجه به مقررات موجود در مناطق مختلف تعیین می‌گردند. که در این تحقیق بر اساس نشریه ۳-۱۱۷ سازمان برنامه‌وبودجه حداقل و حداکثر فشار مطلوب شبکه در نظر گرفته‌شده است (Baños et al., 2011).

عدم مطلوبیت در نقطه i: $P_{\max} < P_i, P_{\min} > P_i$ مطلوبیت در نقطه i: $P_i \geq P_{\min}, P_i \leq P_{\max}$

مقادیر $P_{\max}$، $P_{\min}$ و P_i بیانگر فشار حداکثر، حداقل و موردی در شبکه توزیع آب می‌باشد. شاخص تاب‌آوری شبکه ترکیب وزنی قابلیت اطمینان، قابلیت انعطاف و میزان آسیب‌پذیری شبکه می‌باشد که می‌تواند در طول زمان متغیر باشد.

قابلیت اطمینان شبکه عبارت است از احتمال وضعیت رضایت بخشی شبکه که در ارتباط با تعاریف زیر می‌باشد:

REL: کل مدت‌زمان تحلیل شبکه تقسیم‌بر مدت‌زمان وضعیت مطلوب شبکه. قابلیت انعطاف[1] سرعت بازگشت شبکه را پس از یک حادثه به حالت مطلوب را نشان می‌دهد.

RES: کل مدت‌زمان رخداد عدم مطلوبیت وضعیت شبکه تقسیم‌بر مدت‌زمان ترمیم وضعیت شبکه پس از حادثه.

میزان آسیب‌پذیری[2] مقدار یا زمان وضعیت غیرقابل‌قبول شبکه در بازه زمانی مشخص به‌عنوان میزان آسیب‌پذیری شبکه تعریف می‌شود:

VUL: کل مقادیر تقسیم‌بر مجموع مقادیر مطلوب. به‌عنوان جمع‌بندی، شاخص تاب‌آوری شبکه با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌گردد:

$$SI = \left[REL \times RES \times (1 - VUL)\right]^{1/3} \quad (1)$$

دامنه تغییرات شاخص تاب‌آوری شبکه (SI) از صفر به معنی عدم مطلوبیت آب‌رسانی و یک به معنی ابرشانی مطلوب به تمام نقاط شبکه در دامنه تعریف‌شده هست.
ارزیابی وضعیت شبکه بر اساس شاخص تاب‌آوری کل شبکه مطابق جدول ۱ تعیین می‌گردد.

جدول ۱ ارزیابی وضعیت شبکه بر اساس شاخص تاب‌آوری

Table 1 Assess network status based on resilience index

SI Index Value	Network Condition
0 – 0.25	Unacceptable
0.25 – 0.5	Median
0.5 – 0.75	Acceptable
0.75 - 1	Veri good

ارزیابی‌ها حاکی از آن است که به‌طورکلی رویکردهای موردنظر در مورد تاب‌آوری در سه بخش پایداری، بازیابی و گذار قابل‌بررسی است. رویکرد پایداری غالباً در پژوهش‌های اکولوژیکی مدنظر بوده که بر میزان اخلالی که سیستم زیست‌محیطی توانایی تحمل آن را بدون شکست کامل دارد، متمرکز است. در رویکرد بازیابی، غالباً تاب‌آوری زیرساخت‌ها مدنظر قرار داشته که در خصوص توانایی جامعه با سیستم در بازگشت به گذشته یا بازگشت به سطح عملکرد از پیش تعیین‌شده است که معیار سنجش آن بر اساس زمان موردنیاز بازیابی است. در رویکرد گذار تاب‌آوری، غالباً جنبه اجتماعی تاب‌آوری اجتماعی مدنظر بوده و بر نوسازی و تطبیق با وضع به وجود آمده در اثر حادثه متمرکز است (Bastaminia et al., 2016).

میزان برگشت‌پذیری شبکه به‌عنوان میزان ظرفیت سیستم برای جذب و مرتفع نمودن مشکلات ناشی از شوک‌های ناگهانی شبکه ناشی از حوادث و ... می‌توان برای تعیین شاخص تاب‌آوری شبکه توزیع آب به کار رود. شبکه‌های توزیع آب اکثراً در برابر برخی بلایا و اتفاقات از قبیل زلزله و حمله‌های تروریستی نقطه‌ضعف دارند. تحلیل چند معیاره برای ارزیابی نیازهای هیدرولیکی شبکه و با استفاده از تحلیل AHP جهت تعیین وزن هر یک از معیارها تعیین می‌گردد (Pandit and Crittenden, 2016).

توانایی تحویل فشار و دبی مناسب به اجرای شبکه توزیع آب مرتبط با شاخص کارایی شبکه است. این شاخص به

[1] Resiliency

[2] Vulnerability

متوسط چهار معیار قابلیت اطمینان، میزان آسیب‌پذیری، قابلیت برگشت‌پذیری و قابلیت اتصال مرتبط است. این معیارها به‌خودی‌خود بر پایه کفایت انرژی، ظرفیت هیدرولیکی و توانایی سازه‌ای سیستم در تحویل آب تحت شرایط مشخص می‌باشند (Dziedzic and Karney, 2016).

تأمین آب با چالش‌هایی از قبیل تغییر آب‌وهوا، افزایش جمعیت، افزایش نیاز آبی، میزان دسترس بودن، گسترش شهرنشینی و ... مواجه می‌باشد. هر یک از این پارامترها میزان آسیب‌پذیری سیستم توزیع آب را بالا می‌برد. میزان برگشت‌پذیری شبکه و تأثیر آن در مرتفع نمودن چالش‌های فوق باهدف تأمین آب مناسب تحویلی به مشترکین هدف اصلی تحقیقات است (Urban, 2019).

تحلیل برگشت‌پذیری شبکه در سه مرحله جذب، مرحله هماهنگ‌سازی و مرحله بازسازی مجدد تعریف می‌گردد. مرحله اول که مرحله جذب نام‌گذاری گردیده است مربوط به زمانی است که اولین حادثه در شبکه اتفاق می‌افتد. در این مرحله میزان برگشت‌پذیری شبکه بر اساس سه وضعیت کیفی سازی گردید. پارامتر $R_{abs}=(3,2,1)$ سه پارامتر کیفی معمولی، زیر معمولی و بد تعریف گردید (Cabrera et al., 2018).

در بررسی صورت گرفته توسط (Mazaherizadeh et al., 2019) بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب با دو هدف کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری از شبکه مورد ارزیابی واقع گردید. به‌منظور محاسبه اطمینان‌پذیری از شاخص تاب‌آوری تودینی و به‌منظور شبیه‌سازی هیدرولیکی آن از مدل EPANET استفاده شد. سپس با استفاده از نسخه دوم الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو و ایجاد ارتباط پویا با مدل هیدرولیکی در محیط نرم‌افزار متلب، بهینه‌سازی چند هدفه چهار شبکه توزیع آب شامل شبکه‌های دو حلقه‌ای، کادو، هانوی و چهنه D شهر مشهد انجام گرفت. شاخص تاب‌آوری تودینی با تکیه‌بر افزایش فشار گرهی توانایی خود را در جهت بالا بردن اطمینان-پذیری شبکه نشان داد که این امر موجب می‌شود شبکه در شرایط بحرانی و یا شکست لوله‌ها، با ضریب اطمینان بالایی قادر به تأمین فشار و دبی مناسب در سایر نقاط باشد.

(Reca et al., 2017) در پژوهش خود یک رویکرد جدید برای افزایش کارایی روش‌های اکتشافی برای طراحی بهینه سیستم‌های توزیع آب ارائه دادند. این رویکرد بر مبنای کاهش فضای جستجو استوار است که برای انتخاب هر لوله از شبکه تعریف می‌شود. این روش با یک الگوریتم ژنتیک توسعه داده شد و بر روی چندین شبکه توزیع آب شاخص موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل توسعه‌یافته بسیار سریع‌تر و دقیق‌تر از سایر روش‌ها منجر به کسب پاسخ‌های بهینه می‌گردد.

(Alavi et al., 2020) به ارزیابی تاب‌آوری زیرساخت‌های شبکه‌ی آب شهری در برابر زلزله در منطقه ۲ شهر تهران پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش‌های تحلیل احتمال حرکت لرزه‌ای، پارامترهای حرکت لرزه‌ای بر اساس گسل شمال تهران را به دست آوردند. سپس با توجه به شاخص حداقل آب موردنیاز جامعه، مقوله‌ی آب‌رسانی اضطراری مدنظر قرار گرفت. نتایج نشان داد که کمینه‌ی نرخ تغییرات بر کیلومتر ۰/۰۶ و بیشینه‌ی آن ۰/۴۴ است، بنابراین احتمال شکست خطوط و نشت آن‌ها در محله‌های شمالی منطقه ۲ در رتبه‌های خیلی زیاد و در محله‌های جنوبی در رتبه‌ی متوسط و پایین قرار دارد. بر اساس نتایج تحلیل خسارت، در ۴۳ نقطه شکست کامل خطوط و در ۱۷۵ نقطه نشت قابل‌مشاهده است.

(Atashi et al., 2020) در بررسی خود به صحت‌سنجی مدل تحلیل تاب‌آوری جامع در شبکه توزیع آب مطالعاتی با استفاده از Net 3 پرداختند. نتایج یافته‌های آن‌ها حاکی از آن است که برای محاسبه تاب‌آوری شبکه توزیع آب، لوله‌های انتقال اصلی آب را بایستی جداگانه در نظر گرفت. بررسی تاب‌آوری شبکه توزیع موردمطالعه نشان داد که این شبکه باوجود تنها یک منبع اصلی در حالت بیشینه با شکست تکی لوله‌ها در حالت میانگین با شکست توأمان ۲۷۷ لوله و در حالت کمینه با شکست توأمان ۴۶۹ لوله به صد درصد کسری تأمین آب می‌رسد. اگر تاب‌آوری خطوط انتقال اصلی از منبع تأمین آب به‌صورت جداگانه از کل شبکه‌ی توزیع بررسی شود، تاب‌آوری شبکه‌ی مذکور در سه حالت بیشینه، میانگین و حداقل به ترتیب ۷۲، ۲۳ و ۱۴ درصد افزایش می‌یابد.

در بررسی‌های (Pagano et al., 2019) به ارائه برتری‌های روش GRA بر نظریه گراف در تحلیل تاب‌آوری پرداخته شد. با توجه به تمرکز نظریه‌ی گراف در تحلیل تاب‌آوری بر بررسی عوارض‌شناسی شبکه و اندازه‌گیری مبتنی بر عملکرد از استحکام سامانه در برابر حالات خرابی سامانه در GRA، تحلیل GRA که اطلاعات مفصلی در مورد مدت‌زمان خرابی و بزرگی آن تأمین می‌کند)، نتایج مناسب‌تری در خرابی لوله‌ها ارائه می‌دهند. به‌ویژه برای شبکه‌های پیچیده، ویژگی‌های عوارض‌شناسی نمی‌تواند عملکرد هیدرولیکی و اثرگذاری خرابی لوله‌ها را به‌خوبی نشان دهند. در بررسی‌های صورت گرفته توسط (Gheisi and Naser, 2014) احتمال آنکه شبکه تحت پیش‌فرض‌های شکست هم‌زمان لوله‌ها قرار بگیرد، ۷۸.۵ درصد برآورد شد. آنان علت توجه بسیار کم به پیش‌فرض‌های شکست هم‌زمان لوله‌ها را حجم زیاد محاسباتی موردنیاز دانستند. (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 آسیب‌دیده که باعث بیشترین کسری تأمین آب در شبکه شدند، مشخص گشتند.

هدف از این تحقیق بررسی میزان کارایی شبکه توزیع در حالت اتصال مخازن به یکدیگر و عدم اتصال آن‌ها و تعیین شاخص ارزیابی برای این حالات به‌صورت کمی و مقایسه آن‌ها می‌باشد. دو سناریو برای وزن دهی در نظر گرفته شد. در ابتدا وزن معیار به‌طوری در نظر گرفته شد که دبی کافی در شبکه وجود داشته باشد و دوم اینکه وزن‌ها طوری تعیین گردیدند که شبکه از برگشت‌پذیری لازم برخوردار باشد.

۲- مواد و روش‌ها

مطالعهٔ موردی پژوهش حاضر مربوط به شهر سورات هند با مساحت حدود ۳۳۴ کیلومترمربعی تنها ۵۶ درصد جمعیت خود را تحت پوشش تأمین آب قرار داده است که میزان شاخص تاب‌آوری شبکه توزیع آب در این شهر بر اساس پارامترهای ذکرشده ۰/۳۶۹ محاسبه گردید (Popawala and Shah, 2011). برای بررسی و ارزیابی وضعیت شبکه توزیع آب در حالت‌های اتصال مخازن و عدم اتصال آن‌ها و مقایسه این دو وضعیت بر اساس شاخص تاب‌آوری شبکه توزیع به‌عنوان مطالعه موردی شبکه توزیع یک محدوده دارای ۶ مخزن انتخاب شد. شکل ۱، محدوده موردمطالعه را نشان می‌دهد.

Fig. 1 Case study limit
شکل ۱ محدوده موردمطالعه

این محدوده دارای جمعیتی بالای ۲۰۰۰۰۰ نفر به وسیله دو رودخانه اصلی و به همراه تعدادی رودخانه‌های فصلی دیگر مشروب می‌گردد. حجم مخازن ذخیره برای این محدوده بالغ بر ۳۲۳ هزار مترمکعب و مجموع طول خطوط لوله آن نزدیک به ۱۳۰۰ کیلومتر می‌باشد. در وضعیت موجود محدوده این مخازن از طریق خطوط انتقال بین مخازن به یکدیگر متصل بوده و حداکثر تراز ارتفاعی آب داخل مخازن با یکدیگر برابر می‌باشند. جهت مدل‌سازی شبکه توزیع آب این محدوده از نرم‌افزار WaterGEMS استفاده گردید.

با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری‌شده از مراجع ذی‌ربط ابتدا فیزیک شبکه توزیع در مدل هیدرولیکی ساخته می‌شود. در این مرحله اطلاعات قطر و جنس لوله‌ها، محل شیرهای فشارشکن، خروجی تنظیمی آن‌ها، شیرهای حدی بین مخازن و بین زون‌های فشاری، موقعیت مخازن و ... به مدل وارد گردیده و پس از رفع مشکلات مدل از قبیل عدم اتصال برخی از نقاط به منبع تأمین فیزیک مدل هیدرولیکی تکمیل می‌گردد. سپس رقومی ارتفاعی به گره‌های موجود در مدل هیدرولیکی، با استفاده از نقشه‌های رقومی تهیه‌شده از سازمان نقشه‌برداری، اختصاص‌یافته و پس‌ازآن

میزان مصرف برای هر گره با استفاده از اطلاعات کنتورهای مصرف مشترکین (دریافت شده از آب و فاضلاب منطقه موردنظر) اختصاص داده می‌شود. الگوی مصرف مشترکین با توجه به الگوی خروجی مخزن و ضریب حداکثر روزانه و ساعتی نیز بر اساس آنالیز دبی خروجی محاسبه و به گره‌های مربوط به هر مخزن اختصاص می‌یابد.

جهت واسنجی مدل هیدرولیکی از نتایج فشارسنجی در شبکه تحت پوشش مخازن موردمطالعه در طول دوره بررسی به مدت ۴ ماه در مقاطع زمانی مختلفی برای نقاطی از شبکه که دارای فشارهای بسیار زیاد یا بسیار کم بودند، انجام‌شده است. مدل هیدرولیکی شبکه برای روز حداکثر مصرف روزانه به‌صورت دینامیکی مدل‌سازی و موردمطالعه قرار گرفت. مقایسه فشارهای خروجی مدل هیدرولیکی با فشارهای سنجیده شده در عملیات میدانی بررسی و انجام گردید.

از سوی دیگر برای تعداد ۶۷ دستگاه شیر فشارشکن در شبکه توزیع موردمطالعه که فشارهای ورودی آن‌ها در دوره‌های آماری در سنوات گذشته ثبت‌شده و این نقاط نیز به‌عنوان نقاط قابل‌بررسی با خروجی مدل هیدرولیکی مقایسه گردید. الگوی مصرف در هر شبکه، از تغییرات خروجی مخزن متصل به شبکه با بررسی دبی خروجی آن استفاده‌شده است که این موضوع تعدیل‌کننده رفتار مصرف در شبکه بود. بنابراین برای مقایسه بین فشارهای اندازه‌گیری شده در عملیات میدانی و فشارهای خروجی مدل هیدرولیکی در روز حداکثر مصرف از تشابه رفتار آن‌ها در پهنه‌های فشاری استفاده گردید.

نرم‌افزار WaterGEMS درواقع همان نسخه ارتقا یافته نرم‌افزار واترکد می‌باشد که توسط شرکت بنتلی طراحی‌شده است. رویکرد کلی موردنظر در این نرم‌افزار ارزیابی و تحلیل شبکه آب‌رسانی مبتنی بر شرایط هیدرولیکی با بررسی فشار و سرعت جریان در نقاط مختلف می‌باشد. این نرم‌افزار نسبت به سایر نرم‌افزار از قابلیت انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار بوده و امکان برقراری ارتباط متقابل با سایر نرم‌افزارها نیز فراهم است.

۳- نتایج و بحث

برگشت‌پذیری شبکه در شرایط حاد اضطراری می‌تواند به‌عنوان یک شاخص مهم و قابل‌اطمینان برای تعیین شاخص تاب‌آوری مورداستفاده قرار گیرد (Pandit and Crittenden, 2016). نتایج حاصل از این پژوهش که در ادامه ارائه می‌شود نیز همین امر را تصدیق می‌کند.

مدل‌سازی در شبکهٔتوزیع آب محدوده موردمطالعه به‌صورت ۲۴ ساعته و الگوی پیشنهادی برای مصرف که در مدل هیدرولیکی وارد شد بر اساس اطلاعات خروجی مخازن در روز حداکثر مصرف بوده است. شکل ۲ نوسانات ساعتی یا الگوی مصرف در محدوده مخازن ۶ گانه که در مدل هیدرولیکی به‌عنوان الگوی مصرف به گره‌های شبکه معرفی گردیده است را نشان می‌دهد.

نتایج بررسی فشار در شبکه توزیع آب محدوده مورد مطالعه بر اساس نشریه ۳-۱۱۷ سازمان برنامه‌وبودجه بین ۲۶ متر تا ۶۰ متر فشار آب در نظر گرفته‌شده است. در این تحقیق، با مشاهده فشار در شبکه توزیع محدوده مطالعاتی ملاحظه می‌گردد که در حالت حداکثر مصرف، در وضعیت موجود در اکثر مواقع در دامنه ۲۶ تا ۶۰ متر قرار دارد. ۱۰ درصد گره‌های شبکه توزیع آب محدوده مطالعاتی دارای فشار زیر ۲۶ متر و بیش از ۶۰ متر دارند. مهم‌ترین دلیل متعادل بودن فشار محدوده، قابلیت اتصال مخازن و یکپارچگی سیستم شبکه توزیع آب محدوده موردمطالعه می‌باشد.

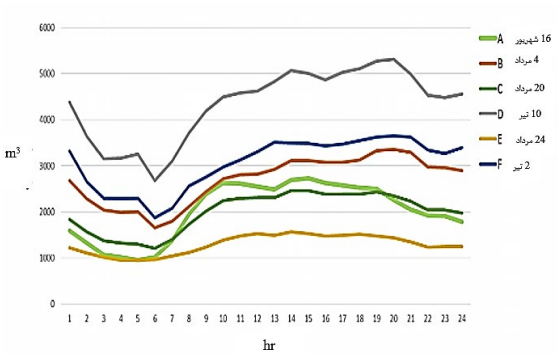

Fig. 2 Hourly fluctuations of water distribution in the areas per day of maximum consumption

شکل ۲ نوسانات ساعتی توزیع آب در محدوده‌ها در روز حداکثر مصرف

همچنین تعداد بسیار کمی از گره‌ها در وضعیت حداقل مصرف دارای فشار بالای ۶۰ متر می‌باشند که دلیل این امر استفاده از الگوی شبانه برای فشارشکن‌های محدوده موردمطالعه هست.

شکل ۳ محدوده‌های فشاری خروجی مدل هیدرولیکی را نمایش می‌دهد. فشار مدل با استفاده از فشار ثبت‌شده در فشارسنج‌های منطقه و فشارسنجی‌های به‌عمل‌آمده واسنجی گردیده و نتیجه فشارهای خروجی مدل در شکل فوق‌الذکر منعکس گردیده است.

خلاصهٔ نتیجهٔ مقایسه وضعیت فشار در شبکه توزیع آب در حالت حداکثر مصرف در وضعیت اتصال مخازن به یکدیگر و عدم اتصال آن‌ها در جدول ۲ ارائه گردیده است. مشاهده می‌شود که میزان درصد گره‌ها دارای فشار در دامنه تعریف‌شده به‌کل گره‌ها برحسب درصد در مخازن متصل بیشتر از مخازن غیر متصل هست.

شاخص تاب‌آوری شبکه (SI) در محدوده موردمطالعه با استفاده از رابطه (۱) تعیین گردید. تعداد نقاط خارج از دامنه فشار مطلوب (۲۶ تا ۶۰ متر فشار آب) در ساعات پیک مصرف و حداقل مصرف مشخص و نسبت این تعداد نقاط به‌کل نقاط تعیین گردید.

برای تعیین قابلیت انعطاف شبکه فرض گردید که خط آب‌رسان شبکه توزیع دچار حادثه گردیده و آب‌رسانی به محدوده تحت پوشش مخزن دچار اختلال کامل گردد، در این حالت با توجه به اتصال مخازن به یکدیگر از طریق

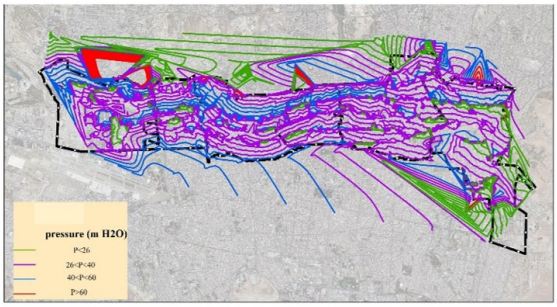

Fig. 3 Calibrated output pressure zones of the hydraulic model

شکل ۳ پهنه‌های فشاری خروجی مدل هیدرولیکی واسنجی‌شده

خطوط انتقال بین مخازن، و امکان اتصال محدوده مخازن هم‌جوار به یکدیگر، مشاهده گردید مخازن هم‌جوار تا حدودی وظیفه آب‌رسانی به محدوده تحت پوشش مخزن دچار حادثه شده را بر عهده می‌گیرند. این شاخص بر اساس تعداد نقاط دارای فشار مطلوب در محدوده‌های مجاور تعیین گردید. در جدول ۳ شاخص تاب‌آوری شبکه در محدوده موردمطالعه در حالات اتصال مخازن به یکدیگر و عدم اتصال آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به اینکه در هنگام حوادث مخازن به محدوده‌های مجاور در امر آب‌رسانی کمک می‌نمایند، در حالت اتصال آن‌ها شاخص تاب‌آوری شبکه بیشتر بوده و در کل در وضعیت شبکه قابل‌قبول ارزیابی می‌گردد.

جدول ۲ مقایسه وضعیت فشار در شبکه توزیع آب در وضعیت اتصال و عدم اتصال مخازن

Table 2 Comparison of pressure status in water distribution network in connection status and un-connection of reservoirs

Reservoir	Condition	Pressure in m H2o (percentage of number of nodes to total nodes)*			
		<26	26-40	40-60	>60
A	Connecting Res	4.79	56.92	37.95	0.34
	Unconnecting Res	4.03	61.41	34.13	0.43
B	Connecting Res	6.26	72.66	20.87	0.21
	Unconnecting Res	10.00	69.54	20.31	0.15
C	Connecting Res	14.95	51.24	33.67	0.14
	Unconnecting Res	13.83	55.37	30.78	0.02
D	Connecting Res	2.53	54.77	41.22	1.48
	Unconnecting Res	5.87	60.28	33.35	0.49
E	Connecting Res	29.80	47.62	22.52	0.07
	Unconnecting Res	26.23	63.13	10.64	0.0021
F	Connecting Res	19.42	40.52	37.08	2.97
	Unconnecting Res	17.10	53.72	29.09	0.09

* اعداد جدول، میزان درصد گره‌ها دارای فشار در دامنه تعریف‌شده به‌کل گره‌ها برحسب درصد می‌باشد.

جدول ۳ مقایسه شاخص تاب‌آوری کل شبکه در حالت اتصال مخازن به یکدیگر و عدم اتصال آن‌ها

Table 3 Comparison of the resilience index of the whole network when the tanks are connected to each other and they are not connected

Reservoir	Connecting Reservoirs to each other	Unconnecting Reservoirs to each other
A	0.87	0.84
B		0.73
C		0.73
D		0.85
E		0.93
F		0.95
Weight index	0.87	0.79

٤- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با توجه به بررسی فشار در شبکه توزیع آب محدوده مخازن ملاحظه گردید که در اکثر موارد شبکه توزیع آب محدوده هر مخزن از مخزن مربوطه تغذیه می‌گردند؛ لیکن در ساعات مختلف شبانه‌روز بسته به حجم مخزن، و الگوی مصرف مخازن متصل‌به‌هم، در آب‌رسانی به نواحی مجاور متصل کمک می‌نماید. با توجه به پیچیدگی اتصال خطوط شبکه توزیع در نواحی مجاور و همچنین تغییر الگوی مصرف در ساعات مختلف، میزان وابستگی گره‌ها به مخزن مربوطه در طول شبانه‌روز متغیر هست.

این تحقیق نشان‌دهنده میزان اهمیت بالای زون‌بندی محدوده تحت پوشش مخازن، مراقبت از شیرهای حدی بین مخازن که بر روی وضعیت شبکه تأثیرگذار هستند می‌باشد.

مدل هیدرولیکی پیوسته و جداگانه شبکه توزیع آب موردمطالعه بر اساس هدف تبیین شده قبلی تهیه گردید. همچنین شبیه‌سازی توزیع آب در زمان‌های پیک مصرف برای هرکدام از مخازن و برای شبکه به‌هم‌پیوسته مورد ارزیابی قرار گرفت این تحقیق نشان داد که یکپارچه‌سازی هیدرولیکی محدوده مخازن هم‌جوار تأثیر مثبتی در بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع دارد؛ همچنین به دلیل تدقیق الگوی مصرف مخازن در حالت اتصال مخازن به یکدیگر دقت مدل هیدرولیکی تهیه‌شده بیشتر می‌باشد. شایان‌ذکر است، بررسی تأثیر به هم‌پیوستگی هیدرولیکی منجر به ارتقای واسنجی مدل هیدرولیکی گردید.

منبع‌ها References

Alavi S, Masoud M, Karimi A. 2020. Urban Resilience: Restoration Analysis of Urban Water Infrastructures in A Potential Earthquake (Case study: Region 2 of Tehran Municipality). Human Geography Research, 52(2):533-550.

Atashi M, Khodashenas SR, Ziaei AN, Farmani R. 2020. Resilience analysis under simultaneous failure of pipes in water distribution network (Case study in one of the cities of Khorasan Razavi). Journal of Hydraulics, 15(3):93-105.

Bakhtyari S, Safavi H, Sharafzadeh A. 2016. Analysis and evaluation of the performance of water distribution networks using performance criteria and certain and fuzzy stability index. Journal of Water and Wastewater Science and Engineering, 1(1):28-36.

Baños R, Reca J, Martínez J, Gil C, Márquez AL. 2011. Resilience indexes for water distribution network design: a performance analysis under demand uncertainty. Water resources management, 25(10):2351-2366.

Bastaminia A, Rezaie MR, Saraie MH. 2016. Explaining and Analyzing the Concept of Resiliency and its Indicators and Frameworks in Natural Disasters. Disaster Prevention and Management Knowledge, 6(1):32-46. URL:http://dpmk.ir/article-1-38-fa.html

Berardi L, Ugarelli R, Røstum J, Giustolisi O. 2014. Assessing mechanical vulnerability in water distribution networks under multiple failures. Water Resources Research, 50(3):2586-2599.

Cabrera DA, Piller O, Deuerlein J, Herrera M. 2018. Key performance indicators to enhance water distribution network resilience in three-stages. Water Utility Journal, 19(79-90.

Dziedzic R, Karney BW. 2016. Performance index for water distribution networks under multiple loading conditions. Journal of Water Resources Planning and Management, 142(1):04015040.

Gheisi A, Naser G. 2014. Water distribution system reliability under simultaneous multicomponent failure scenario. Journal-American Water Works Association, 106(7):E319-E327.

Golmohammadi MH, Safavi HR, Sandoval-Solis S, Fooladi M. 2021. Improving performance criteria in the water resource systems based on fuzzy approach. Water Resources Management, 35(2):593-611.

Klise KA, Murray R, Haxton T. 2018. An Overview of the Water Network Tool for Resilience (WNTR).

Kusumastuti RD, Husodo ZA, Suardi L, Danarsari DN. 2014. Developing a resilience index towards natural disasters in Indonesia. International journal of disaster risk reduction, 10(327-340.

index for urban water management system. In: Proceedings of the 2nd international conference on environmental science and development, IPCBEE, 2011. pp 267-270.

Reca J, Martínez J, López R. 2017. A hybrid water distribution networks design optimization method based on a search space reduction approach and a genetic algorithm. Water, 9(11):845.

Sobhi HR, Rahimi M, Ravanshadnia M. 2018. Vulnerability and vulnerability of region 15 Tehran against earthquake using hierarchical analysis method. Urban Management, 17(51):213-224. URL:https://www.magiran.com/paper/1889830 [in Persian].

UNISDR (2018) United Nations International Strategy for Disaster Reduction. Geneva, Switzerland, Geneva, Switzerland.

Urban W (2019) The resilience of water supply systems. Technische Universitat Darmstadt, Darmstadt, Germany

Mazaherizadeh Y, Faridhosseini A, Davari K. 2019. Multi Objective Design of Water Distribution System Using Todini's Resilience Index and Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. Journal of Water & Wastewater, 30(124):18-34. URL:https://www.magiran.com/paper/2073075 [in Persian].

Mugume SN, Gomez DE, Fu G, Farmani R, Butler D. 2015. A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems. Water research, 81(15-26.

Pagano A, Sweetapple C, Farmani R, Giordano R, Butler D. 2019. Water distribution networks resilience analysis: A comparison between graph theory-based approaches and global resilience analysis. Water Resources Management, 33(8):2925-2940.

Pandit A, Crittenden JC. 2016. Index of network resilience (INR) for urban water distribution systems. International Journal of Critical Infrastructures, 12(1-2):120-142.

Popawala R, Shah N. Evaluation of sustainability