

## تحلیل تاب آوری شبکه توزیع آب در حالت شکست لوله و نیاز اضافی (مطالعه موردی: شبکه کنگاور)

طیبه کردستانی<sup>۱</sup>، الهام درویشی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

<sup>۲\*</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰

### چکیده

با توجه به نقش شبکه های توزیع آب شهری در تامین نیاز شرب مشترکان، بررسی تاب آوری شبکه ها در شرایط مختلف اهمیت دارد. برآورد و ارزیابی تاب آوری در هر شبکه در زمان طراحی موجب کاهش خسارت به مشترکان و شبکه خواهد شد. در صورت ارزیابی تاب آوری برای شبکه در حال بهره برداری امکان افزایش آن با اصلاح شبکه نیز وجود دارد. در این پژوهش، روابط و توابع مربوط به تاب آوری (GRA) در سیستم های آبرسانی و راهکارهای چگونگی بالا بردن تاب آوری با استفاده از دو سناریوی شکست لوله و نیاز اضافی برای شبکه کنگاور بررسی و اجرا شد که نتایج GRA به صورت نمودارهای اندازه کرنش، مدت زمان کرنش و زمان شروع کرنش ارائه شده است. قسمت شاخه ای در خیابان های بن بست قرار داشت و از این رو امکان ایجاد حلقه برای افزایش تاب آوری در شرایط شکست لوله وجود نداشت به همین دلیل به موازات لوله های اصلی به شبکه، لوله اضافه شد. زمانی که ۴۵ درصد لوله های شبکه دچار شکست می شوند، متوسط کمبود در شبکه موجود برابر ۶۴ درصد است. با اضافه کردن ۳۸ لوله به شبکه، کمبود عرضه در حالت متوسط برابر ۵۶ درصد است. در حالت تقاضای اضافی نیز با افزایش قطر ۳۷ لوله در محل شیرهای آتشنشانی و اطراف آن ها منجر به افزایش تاب آوری شبکه در این شرایط شد. مقدار کمبود فشار از ۱۰/۸۲ درصد به ۰/۳۱ درصد کاهش پیدا کرده است که به معنی افزایش تاب آوری به میزان ۹۷ درصد است.

**واژه های کلیدی:** تاب آوری، شبکه توزیع آب، تقاضای اضافی، شکست لوله، تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار

### مقدمه

این سیستم ها به واسطه کارهای انسان و بر اثر مخاطرات طبیعی، غیرمعمول و غیرقابل پیش بینی، تهدید می شوند. این تهدیدها شامل تغییرات شدید دمایی، بارندگی، تغییرات فشار آب، آلودگی، فرسودگی و قطع برق هستند. تحت تاثیر این عوامل، سیستم های توزیع آب به صورت منظم دچار شکستگی می شوند که سالانه هزینه های زیاد را به بار می آورد (Farmani et al. 2005).

سیستم های توزیع آب<sup>۱</sup> WDS شامل تاسیساتی هستند که وظیفه انتقال و تحویل آب آشامیدنی به مشترکان را دارند به نحوی که آب و فشار آب مورد نیاز آنها تامین شود. سیستم های توزیع آب به عنوان زیرساخت های اساسی برای تامین آب آشامیدنی به شکلی مطمئن، برای جامعه و اقتصاد ضروری هستند (Meng et al. 2018).

<sup>۱</sup> Water Distribution Systems

Email: e.darvishi@razi.ac.ir

نگارنده مسئول :

صورت کلی در محاسبات وارد می کند، بنابراین آن ها به طور دقیق توانایی شبکه برای تأمین کافی نیاز تحت عدم اطمینان تقاضا را تعیین نمی کنند.

گرکو و همکاران (Greco *et al.* 2012) شاخص های آنتروپی و تاب آوری را برای اندازه گیری استحکام شبکه های توزیع آب بررسی کردند و تاثیرات بر عملکرد شبکه، ناشی از شکست یک یا دو پیوند را با استفاده از میانگین دبی در گره ها، کسری متوسط و کسری بودجه وزنی تقاضا و یک شاخص عملکرد هیدرولیکی (بیانگر میزان تحقق فشار و نیازهای طراحی در گره ها) برای دو شهر کوچک در جنوب ایتالیا در نظر گرفتند. این محققان تمام پیکربندی شبکه را توسط شکست یک یا دو لینک به دست آمده مطالعه کردند و پس از ارزیابی عملکرد شبکه به این نتیجه رسیدند که مقادیر بالای تاب آوری قوی بودن شبکه را با توجه به شکست پیوند نشان می دهد. در حالی که آنتروپی شبکه، هر چند نشان دهنده جایگزین قابلیت اطمینان توپولوژی مفید در روش های طراحی شبکه است، اطلاعات مربوط به قابلیت شبکه را برای اطمینان از عملکرد خوب پس از وقوع خرابی لینک ارائه نمی کند.

دیاو و همکاران (Diao *et al.* 2016) یک روش تجزیه و تحلیل تاب آوری جامع (GRA) ارائه و آن را برای توسعه سیستم های توزیع آب (WDSs) پیشنهاد کردند. این روش برای تست مقاومت در برابر چهار سیستم توزیع آب (WDS) با ویژگی های مختلف به سه حالت شکست متداول (شکست لوله، اضافه بار و نفوذ مواد) اعمال و نتایج GRA در یک سری از توابع ارائه شد که رابطه بین مقدار استرس و شاخص های مختلف فشار را نشان می دهد.

مایز و خاتاوکار (Mays & Khatavkar, 2018) یک مدل شبیه سازی-بهینه سازی را برای زمان واقعی بهره برداری بهینه از سیستم های توزیع آب در شرایط دسترسی محدود به آب و انرژی ارائه دادند و رویکرد مدل سازی روش بهینه سازی را با الگوریتم ژنتیک و

تحت تاثیر افزایش شهرنشینی و تغییر اقلیم، سیستم های توزیع آب به طور فزاینده ای در معرض آسیب پذیری های ناشی از شکست های غیر معمول و غیر قابل پیش بینی هستند که اغلب اجتناب ناپذیر نیز هستند. به همین دلیل مدیریت ریسک معمول، که همواره با خطرهای شناخته شده و قابل اندازه گیری مواجه است و هدف آن پیشگیری از شکست است، دیگر کافی نیست (Meng *et al.* 2018).

به منظور افزایش قابلیت اطمینان هیدرولیکی و دسترسی به آب در هنگام خرابی لوله ها، تودینی (Todini, 2000) "شاخص تاب آوری" مبتنی بر این واقعیت را معرفی کرد که شبکه های توزیع آب به صورت «سیستم های حلقه ای» طراحی شده اند. وی این موضوع را به عنوان مسئله بهینه سازی برداری با دو تابع هدف هزینه و تاب آوری ارائه داد. این محقق با استفاده از سه مثال نشان داد که شبکه توزیع با شاخص تاب آوری بالا با شبکه توزیع با حداقل هزینه مطابقت ندارد و راه حل های با شاخص تاب آوری بالا عموماً قابل اعتمادتر از راه حل های حداقل هزینه هستند.

بانوس و همکاران (Baños *et al.* 2011) بررسی کیفیت چندین شاخص تاب آوری، بهینه سازی چند هدفه شبکه توزیع آب توسط الگوریتم تکاملی SPEA2 در تعداد زیادی از سناریوهای دبی مورد تقاضای بیش از مقدار مورد نیاز را با هدف کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن شاخص تاب آوری در دو شبکه توزیع آب به انجام رساندند. براساس قابل قبول بودن جواب ها، این محققان به این نتیجه رسیدند که شاخص NRI ارائه شده توسط تودینی (Todini) کمی بهتر از NRI (توسط Prasad) و MRI (توسط Jayaram) در شبکه Alperovits است. در حالی که شاخص NRI (ارائه شده توسط Prasad) در شبکه Hanoi بهتر بود. بانوس و همکاران (Baños *et al.* 2011) می گویند که چون هیچ یک از شاخص های تاب آوری هر گره با تقاضای بیش از حد را جداگانه در نظر نمی گیرد، بلکه اضافه فشار در شبکه را به

استرس). در حالی که شدت تنش تا ۱۰۰ درصد ممکن است بسیار نامطلوب باشد، اما از لحاظ تئوری امکان‌پذیر است و اگر طیف وسیعی از اثرهای بالقوه شناسایی شود، باید لحاظ گردد. برای هر مقدار استرس داده شده، تعداد مناسب سناریوهای شکست تعیین می‌شود. تعداد سناریوهای خرابی تعیین شده است و نمونه‌ها به صورت زیر تولید می‌شوند:

فرض کنید  $C$  تعداد کل اجزاء و  $C_f$  تعداد اجزای دچار شکست است. اگر تنها یک جزء در سیستم دچار شکست شود ( $C_f=1$ ) تعداد کل سناریوها برابر  $C$  است. هنگامی که تمام اجزا دچار شکست شوند ( $C_f=C$ ) تنها یک سناریوی ممکن وجود دارد.

اما برای زمانی که  $1 < C_f < C$  باشد، سناریوی تصادفی تمام مکان‌های اجزای شکست‌خورده  $C_f$  را به صورت تصادفی انتخاب می‌کند و هر سناریو منحصر به فرد است. شبیه‌سازی سناریوهای تصادفی به تعداد  $n_R$  تکرار می‌شود که در آن  $n_R$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$n_R = \frac{N \cdot P \cdot (1-P)}{(N-1)D + P(1-P)} \quad (1)$$

$$D = \left( \frac{CI}{Z_a} \right)^2 \quad (2)$$

$n_R$  تعداد سناریوهای تصادفی است که در هر قدر استرس تنزل می‌شود،  $N$  تعداد کل سناریوهای ممکن برای یک حالت شکست و  $P$  احتمال موفقیت است. در این مطالعه،  $P$  احتمال شبیه‌سازی هیدرولیکی موفق به‌شمار می‌رود، برای حداقل اندازه نمونه مورد نیاز  $P = 0.5$  فرض می‌شود.  $CI$  فاصله اطمینان و  $Z_a$  ارزش توزیع نرمال برای یک سطح اطمینان داده شده (برای مثال:  $1/645$  در سطح اطمینان ۹۰ درصد،  $1/960$  در ۹۵ درصد و  $2/575$  در ۹۹ درصد است).

برای مثال، یک WDS با ۴۲۸ لوله را در نظر بگیرید ( $C=428$ ):

شبیه‌ساز هیدرولیکی (EPANET) در چارچوب یک مسئله کنترل بهینه‌ای درآوردند. مطالعه موردی برای یک شبکه فرضی، کاربرد روش‌شناسی عملیات را در زمان محدودیت دسترسی به آب و برق نشان داد. ماهیت تعاملی روش بهینه‌سازی-شبیه‌سازی که در خصوص روش محاسبات تاب‌آوری استفاده شده بود، این ابزار را یک تحلیلگر زمان واقعی و ابزاری برای تصمیم‌گیری نشان داد. براساس نتایج مطالعات محققان، تحلیل تاب‌آوری در شبکه‌های توزیع آب شهری امکان افزایش کارآمدی آن‌ها را در زمان شکست فراهم می‌کند. شبکه توزیع آب شهر کنگاور جمعیت زیادی را تحت پوشش دارد و بسیاری از قسمت‌های آن لوله‌های فرسوده دارند. رفتار شبکه‌ها در مواجهه با شکست با یکدیگر متفاوت است، بنابراین نمی‌توان نتایج به‌دست آمده از یک شبکه را به شبکه‌های دیگر توسعه داد. به همین دلیل در این پژوهش تاب‌آوری شبکه توزیع آب کنگاور بررسی و راهکارهای افزایش تاب‌آوری نیز ارائه شده است.

## مواد و روش

با مدل‌سازی حالت‌های شکست اولیه بر اثر افزایش شدت تنش و تخمین پیامدهایی که به وجود می‌آید می‌توان تاب‌آوری هر سیستم را ارزیابی کرد که شامل مراحل زیر است (Diao et al. 2016):

مرحله ۱: شناسایی حالت شکست برای ارزیابی (برای مثال: شکست ساختاری، تقاضای بیش از حد).

مرحله ۲: تعیین تنش سیستم مرتبط با حالت شکست و روش شبیه‌سازی آن (برای مثال: شبیه‌سازی WDS با بار اضافی در یک گره برای دوره‌ای مشخص).

مرحله ۳: شناسایی سیستم مناسب و چگونگی اندازه‌گیری آن (برای مثال: نسبت تقاضای تامین نشده در برابر کل تقاضای مورد نیاز در مدت زمان شکست).

مرحله ۴: شبیه‌سازی پیامدهای حالت شکست در افزایش شدت تنش (صفر تا ۱۰۰ درصد از حداکثر

سناریوهای شکست باید برای هر مقدار ممکن از استرس، از شکست یک لوله واحد ( $C_f = 1$ ) تا شکست تمام لوله ها ( $C_f = C = 428$ ) محاسبه شود.

سناریوهای شکست باید برای هر مقدار ممکن از استرس، از شکست یک لوله واحد ( $C_f = 1$ ) تا شکست تمام لوله ها ( $C_f = C = 428$ ) محاسبه شود.

و اما در حالتی که تعداد لوله های دچار شکست بیشتر از یک و کمتر از تعداد کل لوله ها ( $1 < C_f < C$ ) باشد، تعداد سناریوهای شکست تصادفی ( $n_R$ ) با فرض  $CI = \pm 5\%$ ،  $P = 0.5$ ،  $Z_a = 1.960$  برای سطح اطمینان ۹۵ درصد به صورت زیر محاسبه می گردد:

زمانی که تنها یک لوله در شبکه دچار شکست شود ( $C_f = 1$ )، تعداد سناریوهای تصادفی برابر ۴۲۸ خواهد شد ( $n_R = 428$ ). در حالتی که تمام لوله ها دچار شکست شوند

$$n_R = \frac{\sum_{i=1}^{428} C_{428}^i \cdot (0.5) \cdot (1-0.5)}{\left( \sum_{i=1}^{428} C_{428}^i - 1 \right) \cdot \left( \frac{0.05}{1.960} \right)^2 + (0.5)(1-0.5)} = 384 \quad (3)$$

حالت تقاضای بیش از حد: یعنی زمانی که شبکه دچار هیچگونه شکستی نشده است اما تقاضا در گره ها بیش از نیاز تعریف شده برای هر گره در شبکه است. فلوجارت این حالت در شکل ۲ آمده است.

بنابراین، به طور خلاصه تعداد حالات شامل تمام بزرگی استرس به صورت زیر است:

$$\begin{cases} 428 & C_f = 1 \\ 384 & 1 < C_f < C \\ 1 & C_f = C \end{cases} \quad (4)$$

از انجایی که دبی تامین شده در گره ها تابعی از فشار است، برای محاسبه دبی در گره ها از رابطه (۵) استفاده شد که توسط Wagner *et al.* (1988) ارائه شده است. اندازه کرنش (کمبود عرضه)  $dD_f$ ، نسبت تقاضای تامین نشده به تقاضای کل در طول مدت تنش با معادله (۵) و (۶) ارزیابی می شود. مدت زمان کرنش اختلاف زمانی بین اولین وقوع شکست عرضه (کمبود تامین در گره) و زمان بازگشت نهایی به حالت بدون شکست است زمان شروع کرنش، زمانی است که در یک گره دبی تقاضا تامین نشود.

مرحله ۵: ایجاد منحنی تنش\_تاب آوری است که متوسط، حداکثر و حداقل پیامدهای تولید شده از شبیه سازی را برای هر مقدار تنش داده شده نشان می دهد. حالت های شکست مورد بررسی: در این پژوهش، به منظور بررسی تاب آوری یک شبکه آبرسانی، دو حالت شکست لوله و تقاضای بیش از حد شبیه سازی شد.

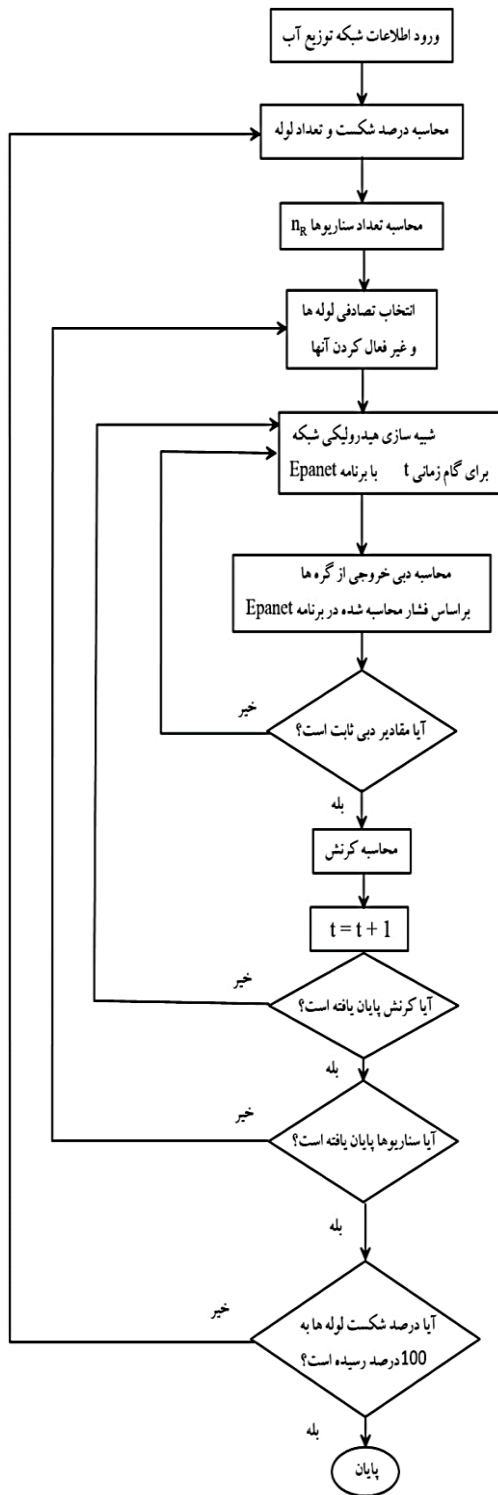
$$q_1(t) = \begin{cases} 0 & P_1(t) \leq 0 \\ d_1(t) \cdot \left( \frac{P_1(t)}{P_{\min}} \right)^{\frac{1}{2}} & 0 < P_1(t) < P_{\min} \\ d_1(t) & P_1(t) \geq P_{\min} \end{cases} \quad (5)$$

حالت شکست لوله: بیانگر وضعیت شبکه در زمانی است که شبکه دچار شکستگی لوله و به اصطلاح دچار شکست اتصالی از نوع فیزیکی می شود. فلوجارت این حالت در شکل ۱ آمده است.

$$dD_f = \frac{\sum_{T_{SS}}^{T_{SE}} \sum_i^N (q_i(t) - q_{i,f}(t))}{\sum_{T_{SS}}^{T_{SE}} \sum_i^N q_i(t)} \quad (6)$$

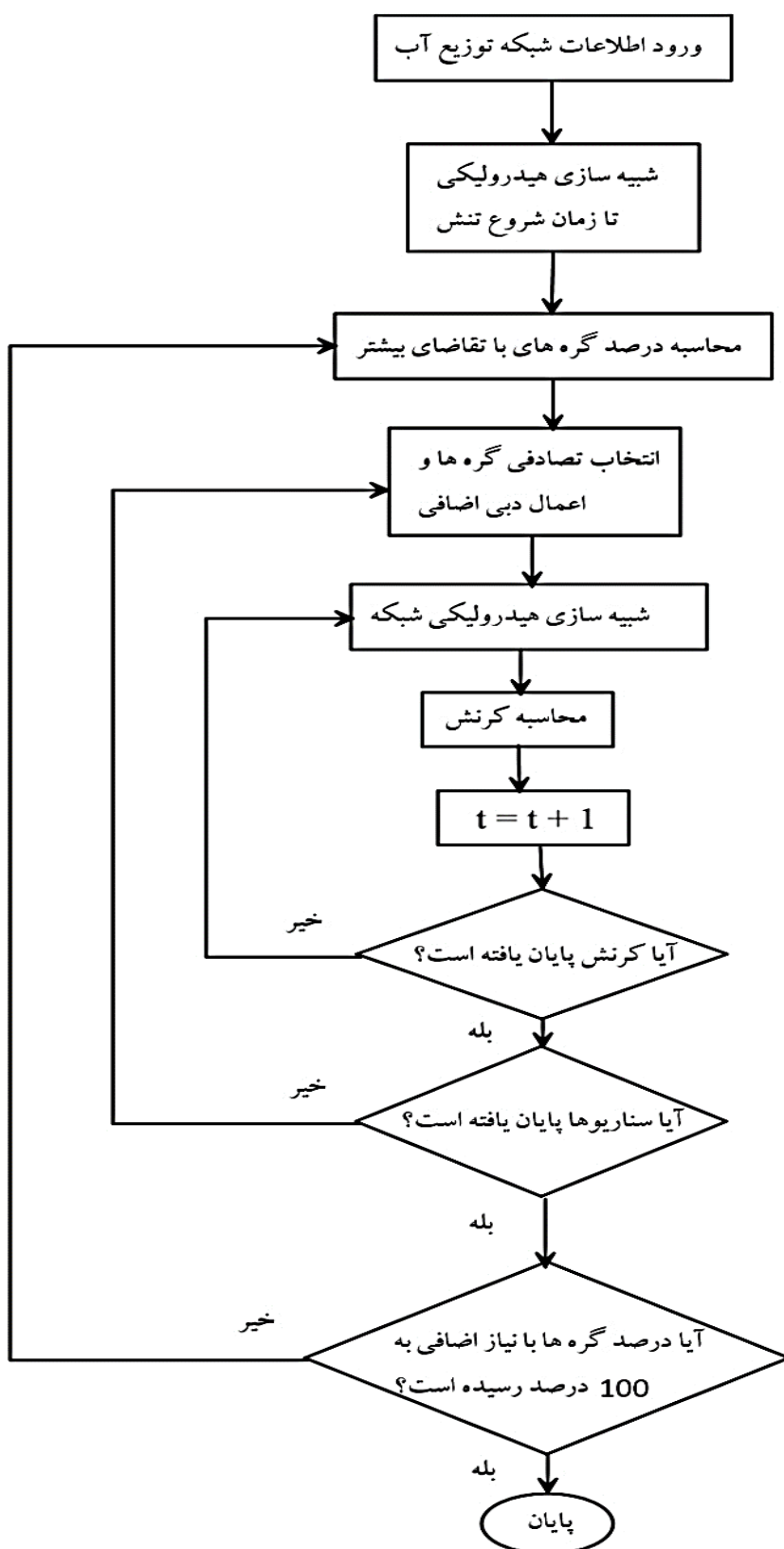
که در آن:  $d_i(t)$  تقاضای گره مورد نظر برای توزیع در گره  $i$  در زمان  $t$ ، فشار حقیقی در گره  $i$  در زمان  $t$ ،  $P_{min}$  حداقل فشار مجاز در گره  $i$  (۲۰ متر برای گره‌های دارای تقاضا و صفر متر برای گره‌های بدون تقاضا)،  $q_i(t)$  برآورد واقعی تقاضا در گره  $i$  در زمان  $t$  زمانی که هیچ شکست لوله‌ای وجود ندارد،  $q_{i,f}(t)$  برآورد واقعی تقاضا در گره  $i$  در زمان  $t$  در سناریو شکست،  $T_{SS}$  زمان شروع کرنش،  $T_{SE}$  زمان پایان کرنش و  $N$  تعداد کل گره‌هاست.

برنامه تحلیل تاب‌آوری به زبان ویژوال بیسیک تهیه شد. در این برنامه بعد از انتخاب لوله‌ها (در حالت شکست لوله) و انتخاب گره‌ها (در حالت نیاز اضافی)، مدل هیدرولیکی Epanet برای محاسبه فشار در گره‌ها و سرعت در لوله‌ها فراخوانی می‌شود. بعد از محاسبه فشار در گره‌ها در برنامه تاب‌آوری دبی گره‌ها با استفاده از رابطه دبی و فشار محاسبه شده است. فلوجارت حالت شکست لوله در شکل ۱ و فلوجارت حالت نیاز اضافی در شکل ۲ ارائه شده است. کمبود عرضه، مدت زمان کرنش و زمان شروع کرنش در برنامه تاب‌آوری محاسبه و به صورت نمودار ارائه خواهد شد.



شکل ۱- الگوریتم حالت شکست لوله

Fig. 1. Pipe failure scenario algorithm



شکل ۲- الگوریتم حالت نیاز اضافی

Fig. 2. Extra Demand scenario algorithm

شبکه مورد مطالعه

کنگاور در موقعیت جغرافیایی ۱۶° ۳۴' تا ۳۹° ۳۴' عرض

شمالی و ۳۴° ۴۷' تا ۰۵' ۴۸° طول شرقی واقع شده است.

کنگاور در میانه راه امروزی کرمانشاه-همدان و بر سر راه تاریخی هگمتانه-تیسفون قرار گرفته است. شهرستان

جدول ۱- مشخصات شبکه آبرسانی کنگاور

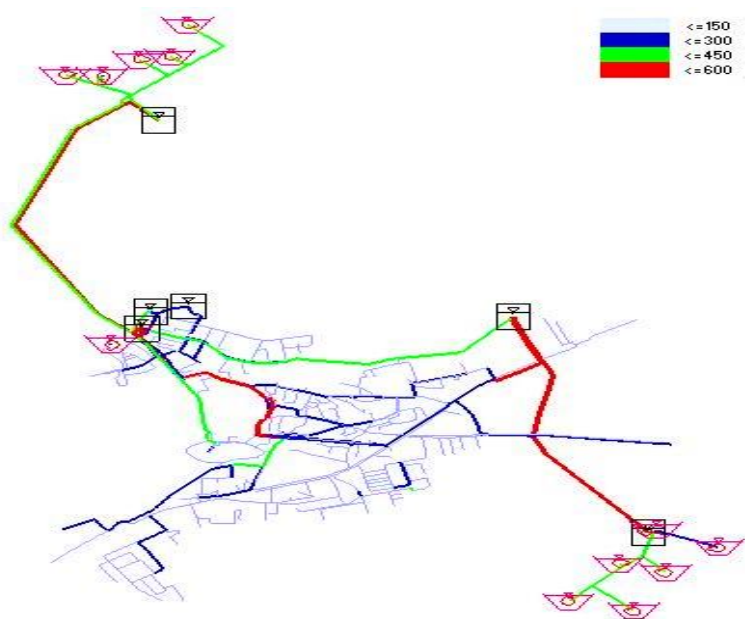
Table 1. Kangavar network specifications

کنگاور	نام شبکه
۷۰۹	تعداد گره
۸۲۲	تعداد لوله
۱۳	تعداد مخازن
۶	تعداد تانک
۱۵	تعداد ایستگاه پمپاژ
۶۲/۷۱	متوسط تقاضای سیستم (l/s)
۲۴	دوره شبیه‌سازی شده (hr)
۲۲/۲۵	حجم کل تانک‌ها (ML)



شکل ۳- منطقه مورد مطالعه

Fig. 3. Case study area

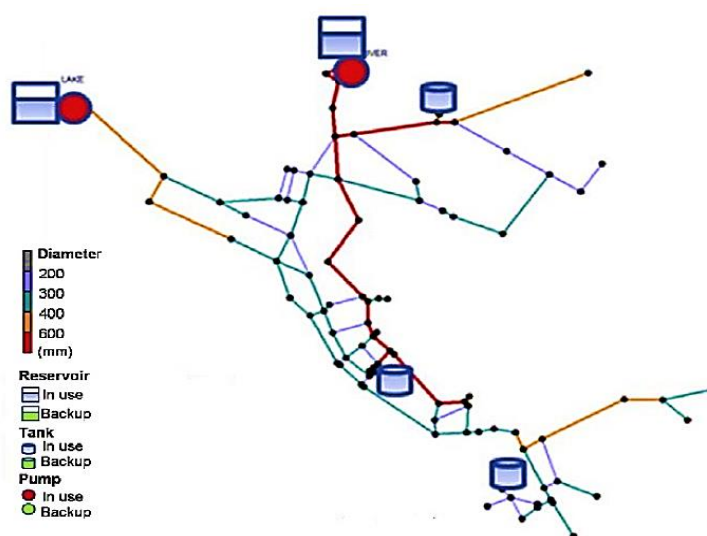


شکل ۴- شبکه آبرسانی کنگاور

Fig. 4. Kangavar Water Supply Network

مدت زمان شکست لوله در مقاله دیائو و همکاران (Diao *et al.*, 2016) برای شبکه Net3 از ساعت ۹ تا ۱۱ صبح در نظر گرفته شد، در این پژوهش نیز همان ساعات ذکر شده در نظر گرفته شد.

به منظور صحت‌سنجی کدهای نوشته شده، از شبکه Net3 موجود در مقاله دیائو و همکاران (Diao *et al.*, 2016) استفاده و نتایج حاصل از اجرای این برنامه با نتایج مطالعات آن‌ها مقایسه گردید. پس از آنکه کد نوشته شده با شبکه Net3 صحت‌سنجی شد و از درستی آن اطمینان حاصل گردید. شبکه اصلی مورد پژوهش یعنی شبکه کنگاور واقع در استان کرمانشاه مورد اجرا قرار گرفت.



شکل ۵- شبکه آبرسانی Net3 (Diao *et al.*, 2016)

Fig. 5. Network Net3 (Diao *et al.*, 2016)



جدول ۲- مشخصات شبکه Net3 (Diao et al. 2016)

نام شبکه	Net3
تعداد گره	۹۱
تعداد لینک	۱۱۵
تعداد مخزن	۲
تعداد تانک	۳
تعداد ایستگاه پمپاژ	۲
ساعت شبیه سازی (hr)	۲۴
متوسط تقاضای سیستم (l/s)	۷۱۷/۳
حجم کل تانک‌ها (MM)	۲۸۶۲۱

اولیه و حتی گاهی بدون هیچ مدت زمانی و فوراً در میزان تامین تقاضا اثرگذار باشد. گاهی هم ممکن است چندین لوله دچار شکست شوند و تا چندین ساعت هیچ اثری بر کمبود تامین تقاضای شبکه پدیدار نشود. بنابراین هم تعداد لوله‌های دچار شکست و هم اصلی یا فرعی بودن لوله دچار شکست نقش بسیار مهمی در مدت زمان تنش به سیستم یا همان شبکه آبرسانی دارند.

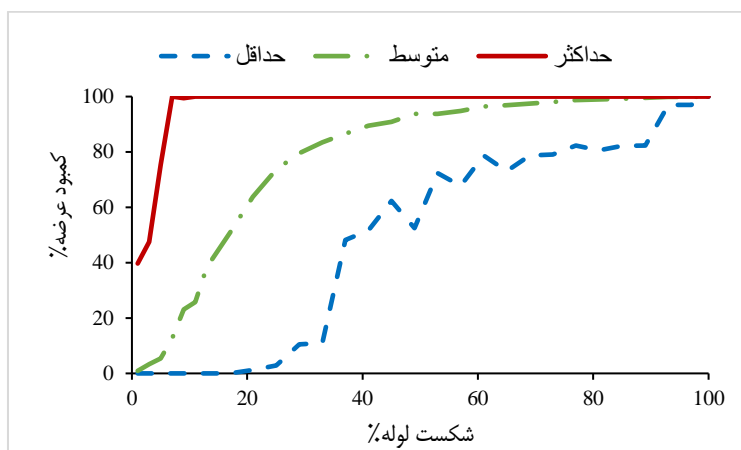
شکل ۸ مدت زمان تنش برای شبکه Net3 را نشان می‌دهد. به طور مثال با توجه به خط ماکزیمم تنش، مشاهده می‌شود تا زمانی که بیست درصد از لوله‌های شبکه Net3 دچار شکست می‌شوند، دو ساعت طول می‌کشد تا به سیستم تنش وارد شود. اما بعد از بیست درصد به محض شکسته شدن لوله‌ها این تنش به سیستم وارد می‌شود.

هر چه تعداد بیشتری از لوله‌های شبکه دچار شکست شود، شبکه از خود سریع‌تر واکنش نشان می‌دهد. بنابراین، درصد شکست لوله و مدت زمان تنش با هم رابطه عکس دارند.

شکل ۷ نتایج حاصل از شکست لوله برای شبکه Net3 را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل پیداست، با افزایش درصد شکست لوله، میزان کمبود عرضه در شبکه افزایش پیدا می‌کند. به عبارتی، هر چه به تعداد لوله‌های دچار شکست اضافه می‌شود، شبکه توانایی کمتری برای تامین تقاضا دارد. بدترین وضعیت مربوط به شکست ۱۰۰ درصد لوله‌هاست. زمانی که تمام لوله‌های شبکه دچار شکست می‌شوند، کمبود عرضه به ۱۰۰ درصد رسیده است، یعنی شبکه قادر به تامین نیست.

از توضیحات بالا می‌توان به این نتیجه رسید که شکست لوله و تامین تقاضا با هم دارای رابطه عکس هستند. یا به عبارتی شکست لوله و کمبود عرضه رابطه‌ای مستقیم با هم دارند.

هرگاه شبکه‌ای دچار شکستگی لوله شود، مدت زمانی طول می‌کشد تا این شکستگی اثر خود را بر شبکه و تامین نیازها نشان دهد. به طور مثال اگر یک لوله از لوله‌های اصلی شبکه دچار شکستگی شود، ممکن است در همان لحظات



شکل ۶- نتایج اندازه کرنش برای شبکه آبرسانی Net3

Fig. 6. Result of Strain magnitude for Net3

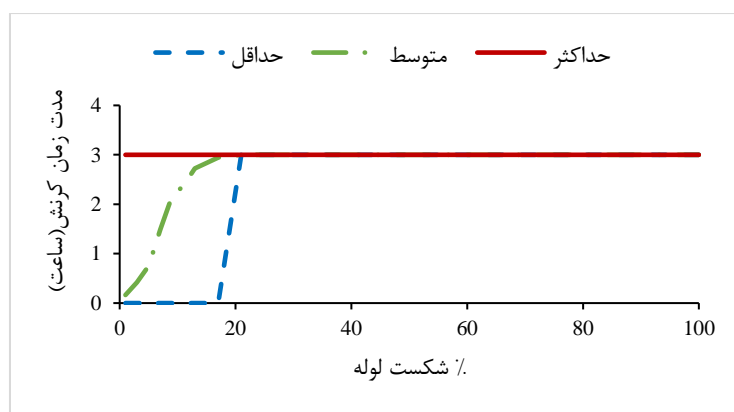
حوالی بیست درصد دچار واکنش شده‌اند. یعنی اینکه وقتی میزان شکست لوله از بیست درصد بیشتر می‌شود و شبکه روندی صعودی در کمبود عرضه در پیش می‌گیرد، همزمان و به طور خودکار میزان تنش به شبکه هم دچار کاهش و مدت زمان کرنش دچار افزایش می‌شود.

این واکنش شبکه در بیست درصد برای هر سه نمودار فوق نشان دهنده ارتباط مستقیم و اثرگذار هر سه پارامتر کمبود عرضه، مدت زمان کرنش و مدت زمان تنش است. اما اگر به نتایج مقاله دیائو و همکاران (Diao *et al.* 2016) دقت شود این هماهنگی فقط برای مدت زمان تنش و مدت زمان کرنش وجود دارد.

پارامتر بعدی، مدت زمان کرنش است که در شکل ۷ آورده شده است. مدت زمان کرنش یعنی سیستم از زمانی که دچار تنش شده تا زمانی که به حالت اولیه برگشته است چه مدت طول کشیده است.

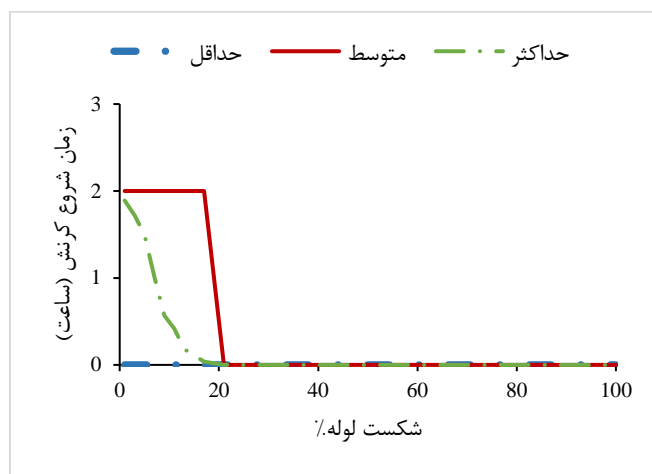
همانطور که در شکل ۷ پیداست بیشترین مدت زمان بهبود شبکه برای Net3 سه ساعت است. روند صعودی مدت زمان کرنش به این معناست که با افزایش درصد شکست لوله در شبکه و درگیر شدن تعداد بیشتر لوله‌ها، مدت زمان کرنش شبکه نیز افزایش پیدا می‌کند.

نکته مهم این است که هر سه نمودار مربوط به کمبود عرضه، مدت زمان کرنش و زمان شروع کرنش (شکل ۸) در



شکل ۷- نتایج مدت زمان کرنش برای شبکه آبرسانی Net3

Fig. 7. Result of strain duration for Net3



شکل ۸- زمان شروع کرنش برای Net3  
Fig. 8. Result of Time to strain for Net3

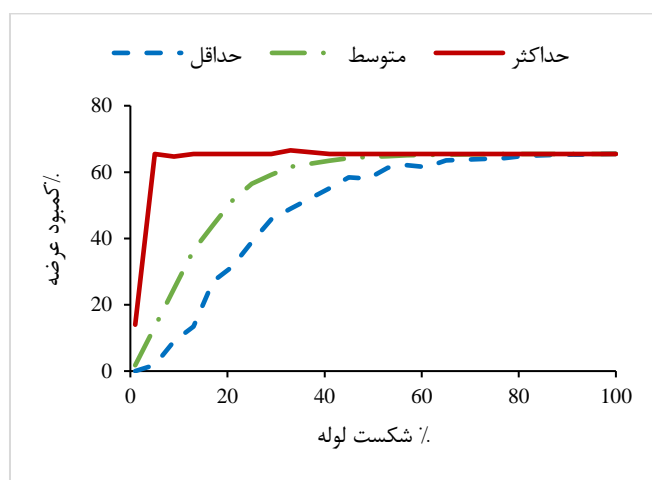
شکل ۱۰ نتایج کمبود عرضه در شبکه کنگاور را نشان می‌دهد. همان طور که پیش‌تر بحث شد، باید با افزایش درصد شکست لوله، کمبود عرضه نیز افزایش پیدا کند که این موضوع به وضوح در شکل ۱۰ پیداست و نمودارهای حداقل، متوسط و حداکثر کمبود عرضه هر سه دارای روند صعودی هستند. اما آنچه می‌توان از مقایسه شکل ۷ و شکل ۱۰ فهمید این است که شیب این روند صعودی برای شبکه‌های بزرگ‌تر بیشتر است. دلیل این موضوع هم این است که وقتی شبکه‌ای دارای لوله‌های بیشتری است حتی در درصد‌های شکست پایین هم تعداد زیادی لوله دچار شکست می‌شود و این تعداد زیاد خود احتمال وجود لوله‌های اصلی درین شکست را نیز بالا می‌برد.

## بحث و نتایج

### حالت شکست لوله

شکست لوله برای شبکه کنگاور از ساعت ۱۹ تا ۲۲ مورد نظر قرار گرفت. زیرا الگوی مصرف موجود برای شبکه در ساعت ۱۹ تا ۲۲ دارای بیشترین مقدار ضرایب است. به عبارتی، می‌توان گفت بیشترین تقاضا برای این شبکه در ساعت‌های ۱۹ تا ۲۲ است.

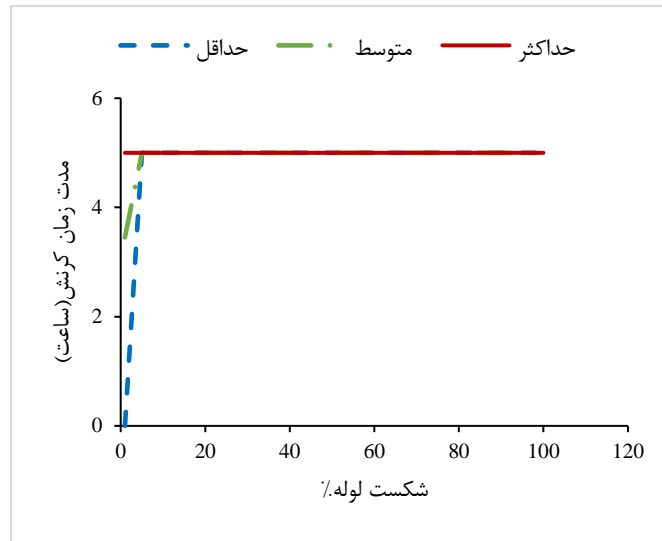
احتمال شبیه‌سازی هیدرولیکی موفق  $P=0.5$ ، ارزش توزیع نرمال برای سطح اطمینان  $Z\alpha=0.96$ ، فاصله اطمینان  $CI=0.05$  و تعداد سناریو برای اجرای مربوط به هر درصد ۳۸۴ در نظر گرفته شد.



شکل ۹- نتایج اندازه کرنش برای شبکه کنگاور  
Fig. 9. Result of Strain magnitude for Kangavar network

شکست لوله، هر سه مقدار مینیمم، میانگین و حداکثر مدت زمان کرنش برابر پنج ساعت است. یعنی زمانی که تنها پنج درصد از لوله های شبکه کنگاور دچار شکست می شوند مدت زمان کرنش به بیشترین حد خود می رسد.

بدترین وضعیت برای شبکه کنگاور در شکست ۸۹ درصد آغاز می شود و تا شکست صد درصد لوله ها باقی می ماند. همان طور که در شکل ۱۰ و ۱۱ مشاهده می شود، در شبکه های بزرگ مثل شبکه کنگاور نمودار مدت زمان کرنش و زمان شروع کرنش نیز مانند نمودار کمبود عرضه دارای شیب تندی هستند. به طور مثال، برای پنج درصد

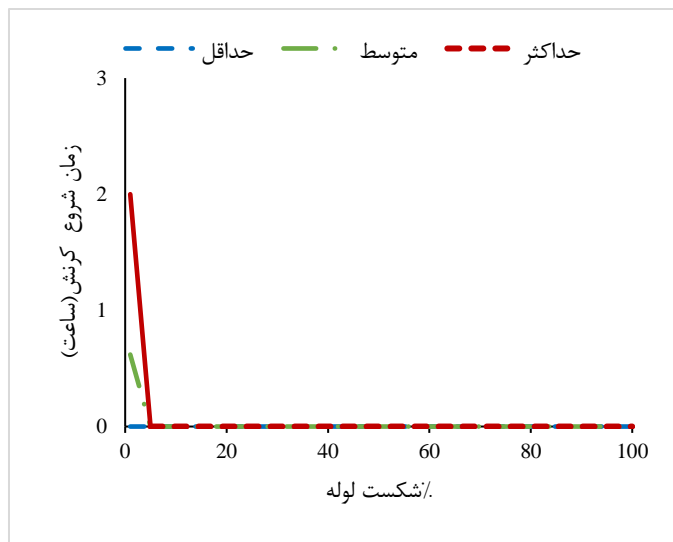


شکل ۱۰- نتایج مدت زمان کرنش برای شبکه کنگاور

Fig. 10. Result of strain duration for Kangavar network

سه نمودار کاملا با هم هماهنگ و هر سه در مقدار پنج درصد شکست خیز واکنشی خود را شروع کرده اند.

شکل ۱۱ نیز با توجه به توضیحات قبلی از روند کلی نزولی تبعیت می کند و دارای روند صحیحی است. همانطور که در شکل های ۹، ۱۰ و ۱۱ مشخص است واکنش های هر



شکل ۱۱- نتایج زمان شروع کرنش برای شبکه کنگاور

Fig. 11. Result of Time to strain for Kangavar network

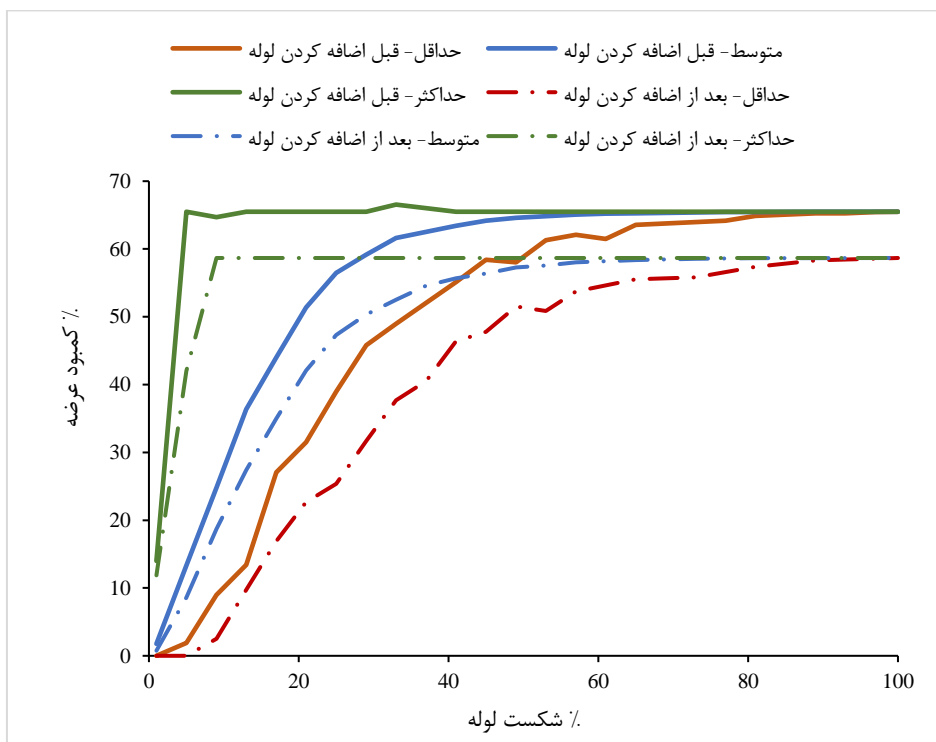
### راه حل کاهش میزان کمبود عرضه

به طور مثال، با توجه به شکل ۶ زمانی که ۴۵ درصد لوله‌های شبکه دچار شکست می‌شوند، متوسط کمبود در شبکه موجود برابر ۶۴ درصد است. اما همین درصد کمبود عرضه زمانی که لوله به شبکه اضافه شده است در حالت متوسط با توجه به شکل ۱۲ برابر ۵۶ درصد است.

در خصوص مدت زمان کرنش و زمان شروع کرنش نیز این موضوع برای درصد شکست‌های پنج و کمتر از آن وجود دارد. به طور مثال، برای زمانی که یک درصد شبکه فعلی دچار شکست شود با توجه به شکل ۱۰ مدت زمان برابر ۳/۴۵ ساعت است و در حالت اضافه کردن لوله این مقدار برابر ۱/۲۶ ساعت است (شکل ۱۳).

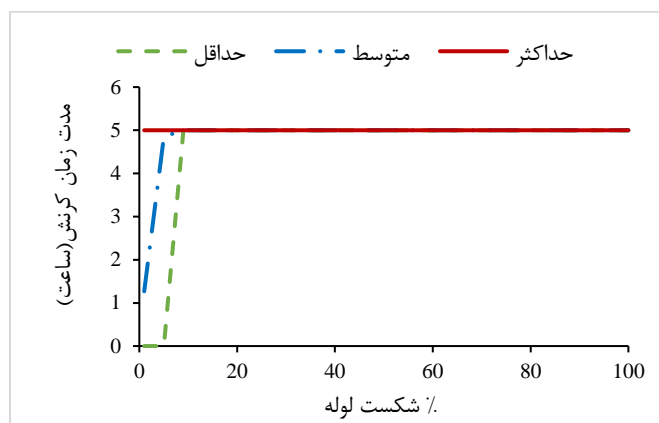
از راه‌های پیشگیری کاهش کمبود عرضه در مواقع شکست لوله، اضافه کردن لوله‌های موازی برای لوله‌های با موقعیت مهم‌تر به نسبت سایر لوله‌ها و یا حلقه کردن شبکه در مناطق مختلف شبکه است.

برای شبکه کنگاور ۳۸ لوله به شبکه اضافه شد. این لوله‌ها اغلب موازی با لوله‌هایی هستند که از مخزن خارج می‌شوند. پس از اضافه کردن تنها ۳۸ لوله به شبکه، مقدار کمبود عرضه تا حد زیادی کاهش پیدا کرد. این کاهش را می‌توان در شکل ۱۲ مشاهده کرد. این کاهش روند در هر سه نمودار حداقل، متوسط و حداکثر کمبود عرضه قابل مشاهده است.



شکل ۱۲ - مقایسه نتایج کمبود عرضه: قبل از اضافه کردن لوله و بعد از اضافه کردن لوله برای شبکه کنگاور

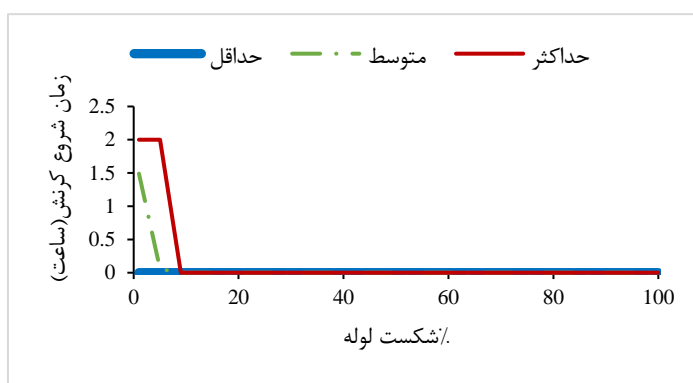
Fig. 12. Comparison of supply shortage results: before adding pipe and after adding pipe for Kangavar network



شکل ۱۳- نتایج مدت زمان کرنش، بعد از اضافه کردن لوله، شبکه کنگاور

Fig. 13. Strain duration results, after adding the pipe, Kangavar network

در واقع، با افزایش تعداد لوله‌هایی که دارای موقعیت مهم از نظر اتصالی و اندازه و سایر خصوصیات مهم لوله هستند، می‌توان تا حد زیادی کمبود عرضه را در چنین مواقعی کاهش و به تقاضاهای بیشتری پاسخ داد.



شکل ۱۴- نتایج زمان شروع کرنش، بعد از اضافه کردن لوله، شبکه کنگاور

Fig. 14. Result of Time to strain, after adding the pipe, Kangavar network

زمانی مشخص دبی برداشتی از تعدادی گره تقاضای تعریف شده خود باشند. این حالت در واقع بسیار شبیه به زمان رخ دادن آتش‌سوزی در شبکه است، با این تفاوت که در حالت آتش‌سوزی ممکن است تقاضای عادی و معمول شبکه مقداری کمتر شود. اما در این شبیه‌سازی علاوه بر اینکه همچنان نیاز معمولی و تقاضا وجود دارد، نیاز اضافی نیز در نظر گرفته شده است (Diao et al. 2016).

اندازه کرنش با محاسبه نسبت میانگین تعداد گره‌ها با کمبود فشار در هر گام زمانی در طول مدت فشار به تعداد کل گره‌ها ارزیابی می‌شود. برای گره‌های دارای تقاضا، فشار در هنگام آتش‌سوزی کمتر از ۱۷ متر و یا پس از آتش‌سوزی کمتر از ۲۰ متر در نظر گرفته می‌شود. برای گره‌های

از مقایسه شکل ۱۱ و ۱۴ می‌توان متوجه شد که بعد از اضافه کردن لوله، روند کاهش مدت زمان تنش برای درصد شکست پنج و کمتر از آن دارای سرعت کمتری شده است. بدین معنی که شبکه دیرتر دچار کمبود شده است. برای مثال، زمانی که شبکه دچار یک درصد شکست شده است متوسط زمان شروع کرنش با توجه به شکل ۱۱ برابر ۰/۶۲ ساعت است، اما بعد از اضافه کردن لوله‌ها با توجه به شکل ۱۳ این مقدار برابر ۱/۴۸ ساعت است.

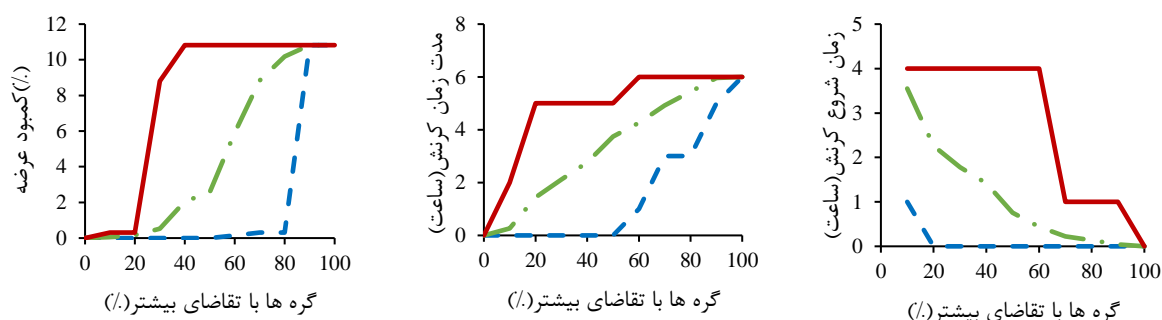
#### حالت نیاز اضافی

در مقاله دیائو و همکاران (Diao et al. 2016) اشاره شده است حالت نیاز اضافی در واقع حالتی است که در مدت

در نظر گرفته شد که بیشترین مصرف در شبکه توزیع وجود دارد؛ این نتایج در شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ آورده شده است. شکل ۱۵ مدت زمان آتش‌سوزی را برای ساعات ۱۸ تا ۲۱ نشان می‌دهد. در این بازه زمانی در بدترین حالت یعنی در ۱۰۰ درصد گره‌های با تقاضای بیشتر، شبکه تنها با ۱۰/۸۲ درصد کمبود عرضه مواجه می‌شود. این یعنی در صورتی که تمام یازده نقطه انتخابی در شبکه هم‌زمان دارای نیاز اضافی باشند شبکه دچار تقریباً ۱۱ درصد کمبود عرضه می‌شود. در این وضعیت مشاهده می‌شود تنش وارد شده به شبکه همان لحظه رخ می‌دهد و مدت زمان کرنش برابر شش ساعت است.

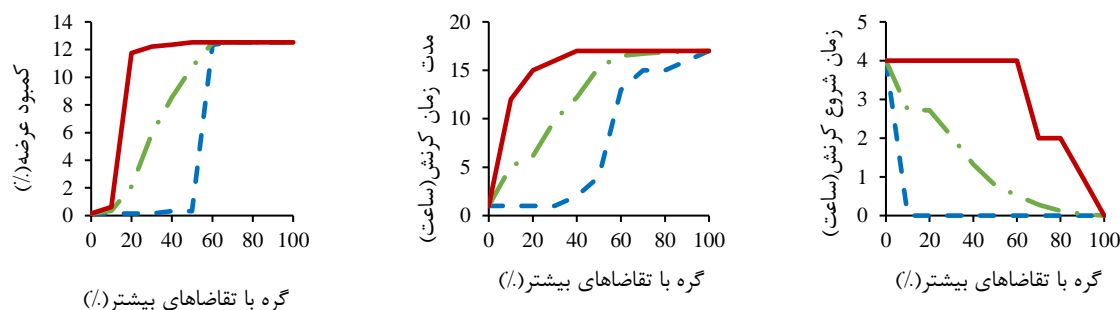
بدون تقاضا، فشار اگر صفر باشد نامناسب است. مدت زمان کرنش نیز اختلاف زمانی بین اولین کمبود در یک گره و بهبود نهایی زمانی (تامین فشار کافی در تمام گره‌ها) است. زمان شروع کرنش زمانی است که اولین کمبود فشار در یک گره وجود داشته باشد (Diao et al. 2016).

برای شبکه کنگاور تعداد ۱۱ گره از کل شبکه انتخاب شد، با استناد به نشریه ۳-۱۱۷ (IRIVSPS 2013) میزان دبی اضافی برای گره‌های انتخابی ۱۰ لیتر بر ثانیه انتخاب شد. مدت زمان آتش‌سوزی در نشریه ۳-۱۱۷ (IRIVSPS 2013) با توجه به نوع بافت شهری بین ۲ تا ۴ ساعت متغیر است. در این پژوهش، مدت زمان آتش‌سوزی میانگینی از مدت زمان توصیه شده در نشریه یعنی ۳ ساعت در نظر گرفته شد. این شبیه‌سازی سه ساعته برای سه بازه زمانی



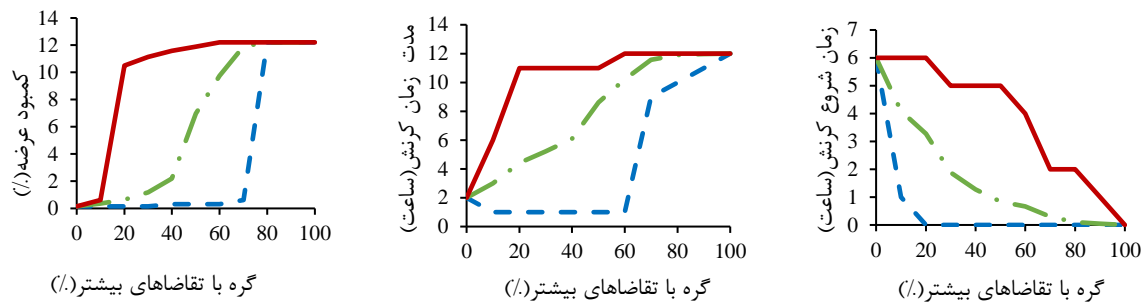
شکل ۱۵- نتایج شبیه‌سازی نیاز اضافی برای شبکه کنگاور در ساعات ۲۱-۱۸

Fig. 15. Simulation results of excess demand for Kangavar network (period under stress: hours 18-21)



شکل ۱۶- نتایج شبیه‌سازی نیاز اضافی برای شبکه کنگاور (در ساعات ۱۲-۹)

Fig. 16. Simulation results of excess demand for Kangavar network (period under stress: hours 9-12)



شکل ۱۷- نتایج شبیه‌سازی نیاز اضافی برای شبکه کنگاور (در ساعات ۱۶-۱۳)

Fig. 17. Simulation results of excess demand for Kangavar network (period under stress: hours 13-16)

شکل ۱۷، حالت سوم شبیه‌سازی نیاز اضافی را نشان می‌دهد. در این حالت نیز مانند دو حالت قبل تمام پارامترهای قبلی در نظر گرفته شده‌اند و فقط زمان شبیه‌سازی برای ساعات ۱۶-۱۳ انتخاب شده است.

در این حالت نیز بیشترین میزان کمیود عرضه‌ای که شبکه با آن مواجه می‌شود  $12/2$  درصد است. در نگاه اول و از نظر درصد کمیود عرضه شاید شکل ۱۶ و ۱۷ تفاوت چندانی با هم نداشته باشند. اما همانطور که در شکل‌های بالا پیداست نمودار مدت زمان تنش برای شکل ۱۷ از مقدار ۶ ساعت آغاز می‌شود و شروع به نزول می‌کند، در حالی که در شکل ۱۶ نمودار مدت زمان تنش از مقدار ۴ ساعت آغاز می‌شود. این بدان معناست که مدت زمانی که طول می‌کشد تا شبکه تنش را احساس کند در ساعات ۱۳ تا ۱۶ بیشتر است. یعنی اگر شبکه در ساعات ۱۳ تا ۱۶ دچار آتش‌سوزی شود مقاومت بیشتری نسبت به ساعات ۹ تا ۱۲ دارد. از مقایسه نمودارهای مدت زمان کرنش نیز این نتیجه حاصل می‌شود که اگر شبکه در ساعات ۹ تا ۱۲ دچار آتش‌سوزی شود ماکزیمم مدت زمان کرنش برای آن ۱۷ ساعت است در حالی که این مدت زمان برای آتش‌سوزی در ساعات ۱۳ تا ۱۶ بسیار کمتر و برابر ۱۲ ساعت است.

شکل ۱۵ مدت زمان نیاز اضافی برای شبکه کنگاور را در ساعات ۹ تا ۱۲ صبح نشان می‌دهد. همان طور که در نمودار پیداست، شروع بدترین حالت در میزان کمیود عرضه در موقع انتخاب ۶۰ درصد گره‌های با تقاضای اضافی و بعد از آن است. در حالت ۶۰ درصد نیاز اضافی (یعنی زمانی که هفت گره از یازده گره انتخابی دارای نیاز اضافی بشوند) شبکه با  $12/52$  درصد دچار کمیود عرضه می‌شود. مدت زمان تنش وارد شده به شبکه در ماکزیمم حالت خود برابر ۴ ساعت و مدت زمان کرنش ماکزیمم برابر ۱۷ ساعت است. مقایسه دو شکل ۱۵ و ۱۶ بیانگر آن است که در حالت برابر تعداد گره انتخابی و همچنین دبی اضافی برابر (۱۰ لیتر بر ثانیه)، شبکه می‌تواند دچار درصد کمیودهای متفاوت شود زیرا شبیه‌سازی در ساعات مصرف متفاوتی صورت گرفته است. در ساعات‌های ۹ تا ۱۲، شبکه دچار کمیود عرضه بیشتری نسبت به ساعات‌های ۱۸ تا ۲۱ می‌شود و به دنبال آن مشاهده می‌شود که مدت زمان کرنش در ساعات ۹ تا ۱۲ بسیار بیشتر است تا در ساعات ۱۸ تا ۲۱. از مقایسه نمودارهای تنش دو حالت فوق نیز مشاهده می‌شود که آغاز تنش وارد به شبکه در ساعات ۱۸ تا ۲۱ با تاخیر شروع شده و زمانی که ۱۰ درصد گره با تقاضای اضافی وجود دارد، اولین تنش به شبکه آغاز می‌شود. به عبارتی، در گره‌های با تقاضای کمتر از ۱۰ درصد، هیچ تنشی به سیستم وارد نشده است.



پیش‌ترگفته شد که برای حالت نیاز اضافی، یازده گره از شبکه کنگاور انتخاب و دبی به میزان ۱۰ لیتر بر ثانیه به نیاز این گره‌ها اضافه شد و نمودارهای مربوط به کمبود فشار، مدت زمان کرنش و زمان شروع کرنش ارائه گردید. به منظور افزایش تاب‌آوری شبکه کنگاور در حالت نیاز اضافی قطر لوله‌های متصل یا نزدیک به یازده گره انتخابی به دو برابر افزایش داده شد و مجدداً برنامه مربوط به نیاز اضافی اجرا و نتایج خروجی تهیه گردید. تعداد لوله‌هایی که در شبکه کنگاور قطر آنها به دو برابر تغییر داده شد ۳۷ لوله است که در شکل ۱۵ به رنگ قرمز نشان داده شده‌اند.



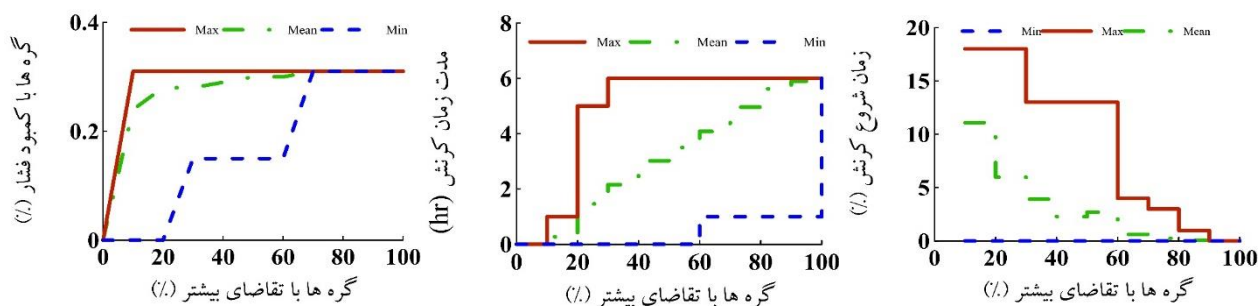
شکل ۱۸ - شبکه کنگاور - موقعیت لوله‌های با افزایش قطر

Fig. 18. Kangavar Network- location of pipes with increasing diameter

شکل ۱۶، حالت نیاز اضافی برای شبکه کنگاور را در سناریوی افزایش قطر برای ساعات‌های ۱۸-۲۱ نشان می‌دهد. مقایسه دو شکل ۱۲ و ۱۶ نشان می‌دهد که با افزایش قطر تنها ۳۷ لوله، مقدار کمبود فشار به اندازه بسیار قابل توجهی کاهش پیدا کرده است. مقدار کمبود فشار از ۱۰/۸۲ درصد به ۰/۳۱ درصد کاهش پیدا کرده است بدین معنی که میزان تاب‌آوری ۹۷ درصد افزایش پیدا کرده است.

### افزایش تاب‌آوری شبکه کنگاور - حالت نیاز اضافی

از راهکارهایی که برای کاهش درصد کمبود فشار در حالت نیاز اضافی می‌توان در نظر گرفت افزایش ظرفیت پمپ‌های شبکه یا افزایش قطر لوله‌های متصل به شیرهای آتشنشانی است. سناریوی افزایش ظرفیت پمپ برای شبکه کنگاور قابل اجرا نیست زیرا هیچ یک از پمپ‌ها به صورت مستقیم به داخل شبکه پمپاژ نمی‌شود بلکه پمپاژ به داخل مخزن‌هاست و سپس آبرسانی از طریق مخازن به داخل شبکه است. اما سناریوی دوم برای شبکه کنگاور مانعی ندارد و قابل اجراست.



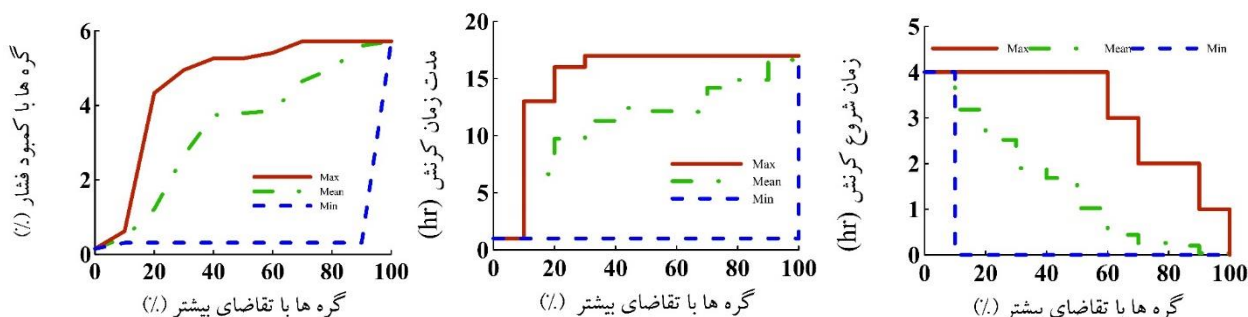
شکل ۱۹- اندازه کرنش، مدت زمان کرنش، زمان شروع کرنش سناریو افزایش قطر لوله (ساعات ۱۸ تا ۲۱)

Fig. 19. Strain magnitude, strain duration and time of strain of increasing pipe diameter

(Period under stress: hours 18-21)

درصد کاهش پیدا کرده است. در واقع با کاهش کمبود فشار در گره ها از ۱۲/۵۲ به ۵/۷۲ درصد، مقدار تاب آوری به اندازه ۵۴ درصد افزایش یافته است. نمودارهای مدت زمان کرنش و زمان شروع کرنش نیز در حالت کلی مسیر کاهشی نسبت به قبل از اعمال سناریوی افزایش قطر لوله دارند.

شکل ۲۰، نمودارهای شبکه کنگاور را در سناریو افزایش قطر برای ساعت های ۹-۱۲ نشان می دهد. کمبود فشار در گره های انتخابی، از صفر درصد شروع و در مقدار ۵/۷۲ درصد به ماکزیمم مقدار خود می رسد. این مقدار، در مقایسه با حالت قبل از افزایش قطرها (شکل ۱۴)، به اندازه ۶/۸



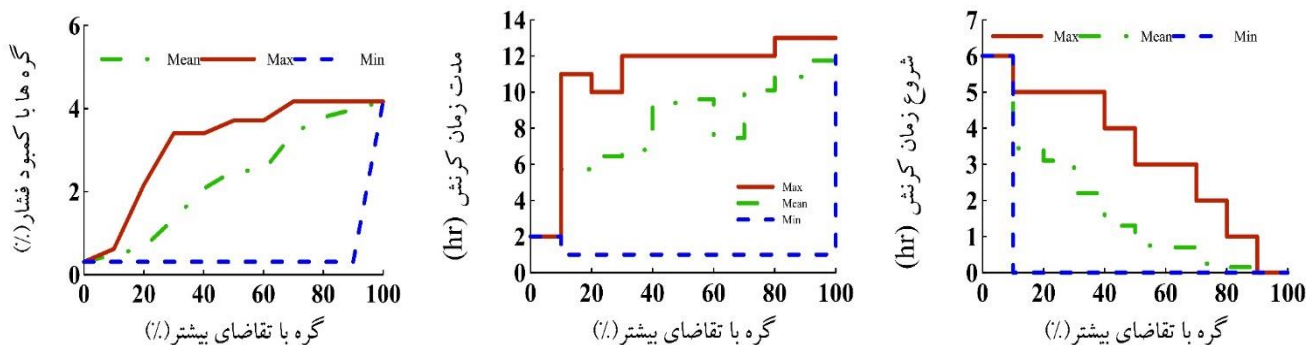
شکل ۲۰- اندازه کرنش، مدت زمان کرنش، زمان شروع کرنش سناریو افزایش قطر لوله (ساعات ۹ تا ۱۲)

Fig. 20. Strain magnitude, strain duration and time of strain of increasing pipe diameter

(Period under stress: hours 9-12)

نکته قابل توجه دیگر آن است که از مقایسه سه شکل ۱۹، ۲۰ و ۲۱ با شکل های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ می توان دریافت که بعد از افزایش قطر لوله، علاوه بر کاهش کمبود فشار، شیب نمودارها نیز به مقدار بسیار زیادی کاهش یافته است.

شکل ۲۱ نتایج سناریوی افزایش قطر لوله را برای شبکه کنگاور مربوط به ساعت های ۱۳-۱۶ نشان می دهد. با توجه به نمودارها، تاب آوری به مقدار ۶۵/۸ درصد افزایش یافته است. پیش از اعمال سناریوی افزایش قطر لوله، اندازه کرنش روی عدد ۱۲/۲۱ درصد به ثبات می رسید. در حالی که پس از افزایش قطر لوله، این مقدار در ماکزیمم حالت خود برابر ۴/۱۷ درصد است.



شکل ۲۱- اندازه کرنش، مدت زمان کرنش، زمان شروع کرنش سناریو افزایش قطر لوله (ساعات ۱۳ تا ۱۶)

Fig. 21. Strain magnitude, strain duration and time of strain of increasing pipe diameter (Period under stress: hours 13-16)

لوله‌ها بخشی از کمبود تقاضا به وسیله دیگر لوله‌ها تامین می‌شود. درحالی که این اتفاق برای شبکه‌های شاخه‌ای رخ نمی‌دهد و زمانی که لوله‌ای دچار شکست شود تاب‌آوری سیستم با شیب بیشتری کاهش پیدا می‌کند. از راهکارهایی که برای افزایش تاب‌آوری شبکه در این پژوهش مد نظر قرار گرفت، اضافه کردن لوله‌های جدید به شبکه بود. در این پژوهش لوله‌های جدید موازی لوله‌های اصلی اضافه شد که نقش مهمی در تامین تقاضا داشتند. مهم‌ترین لوله‌ها در تامین تقاضا در واقع لوله‌های متصل به مخازن هستند که لوله‌های اصلی با قطرهای بزرگ هستند. لوله‌هایی که از نظر اتصالی در واقع به نوعی رابط بین لوله‌های دیگر با هم هستند نیز جزو این دسته قرار می‌گیرند. شکست حتی یکی از این نوع لوله‌ها ممکن است تا حد زیادی تامین تقاضا را کاهش دهد در حالی که درصد بالای شکست لوله‌های فرعی ممکن است شبکه را با بحران چندانی مواجه نکند. مشخصات لوله‌های جدید برابر با لوله‌ای که با آن موازی شده بودند وارد شد. پس از اضافه کردن لوله‌های جدید، برنامه مجدداً اجرا و نتایج به صورت نمودار ارائه شد. نمودارها نشان دهنده افزایش تاب‌آوری سیستم به مقدار قابل توجهی است. یعنی برای درصد شکست یکسان، کمبود عرضه در حالت لوله‌های اضافه شده بسیار کمتر است.

### نتیجه گیری

نتایج به دست آمده نشان دهنده آن است که هرگاه شبکه‌ای دچار شکستگی لوله شود این شکستگی بر تامین تقاضای شبکه اثر می‌گذارد. با افزایش تعداد لوله‌های دچار شکست، اندازه کرنش افزایش می‌یابد تا جایی که منجر به تامین نشدن کامل تقاضاها می‌شود. مدت زمان کرنش نیز با افزایش درصد شکست لوله‌ها روند صعودی دارد. اما نمودار مربوط به زمان شروع کرنش، روند نزولی دارد و با افزایش درصد شکست لوله‌ها به صفر نزدیک شده است. از نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر، یکی آن است که سطح تاب‌آوری برای یک شبکه در سناریوهای مختلف متفاوت است، در واقع ممکن است در درصد شکست برابر، شبکه در یک سناریو تاب‌آوری بیشتری نسبت به سناریو دیگری داشته باشد. نتیجه دیگری که به دست آمد آن است که با افزایش اندکی درصد شکست لوله در برخی شبکه‌های آبرسانی، اندازه کرنش به شدت افزایش پیدا می‌کند. در حالی که در شبکه‌های دیگر حتی با افزایش مقدار زیادی درصد شکست، اندازه کرنش با شیب کمی شروع به افزایش کرده است. یکی از مهم‌ترین دلایل‌های این اتفاق نوع طراحی شبکه مورد نظر است. به طور مثال، اگر شبکه آبرسانی به صورت حلقه تعریف شده باشد در صورت شکست یکی از

## منابع

- Abdar, A. (2016). Observance of passive defense requirements in water facilities in order to increase resilience. *4<sup>th</sup> National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management and 3<sup>rd</sup> Conference and Specialized Exhibition of Mass Builders of Housing and Construction in Tehran Province*.
- Baños, R., Reza, J., Martínez, J. & Gil, C. (2011). Resilience Indexes for Water Distribution Network. *Water Resour Manage*, Volume 25.
- Diao, K., Sweetapple, C., Farmani, R., Fu, G., Ward, S., & Butler, D. (2016). Global resilience analysis of water distribution systems. *Water research*, 106, pp 383-393.
- Farmani, R., Walters, G. A. & Savic, D. A. (2005). Trade-off between Total Cost and Reliability for Anytown Water Distribution Network. *Journal of Water Resour Planning and Management*, 131(3).
- Farmani, R., Walters, G. A. & Savic, D. A. (2005). Trade-off between Total Cost and Reliability for Anytown Water Distribution Network. *Journal of Water Resour Planning and Management*, 131(3).
- Greco, R., Di Nardo, A. & Santonastaso, G. (2012). Resilience and entropy as indices of robustness of water. *Journal of Hydroinformatics*, 14(3).
- Khatavkar, P. & Mays, L. W. (2018). Resilience Computations for Optimal Operation of Water Distribution. s.l., *World Environmental and Water Resources Congress*.
- Meng, F., Fu, G., Farmani, R., Sweetapple, C. & Butler, D. (2018). Topological attributes of network resilience: A study in water distribution systems. *Water Research*, 143, pp 376-386.
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index. *Urban Water*, Volume 2.
- Wagner, J.M., Shamir, U., and Marks, D.H. (1988). "Water distribution reliability: analytical methods", *J. Water Resources Planning and Management*, ASCE, 114(3), pp. 253-275.
- Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision (IRIVPSPS). (2013). *Guidelines for design of urban and rural water supply and distribution systems*. Report No. 117-3 (1st Revision), Tehran, Iran Resilience analysis of water distribution in pipe failure mode and excess demand (Case study: Kangavar network)

*Original Research*

## **Resilience analysis of water distribution in pipe failure mode and excess demand (Case study: Kangavar network)**

**Tayebeh Kordestani, Elham Darvishi\***

\* **Corresponding Author:** Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

**Received:** 12 April 2024, **Accepted:** 1 June 2024

**Email:** [e.darvishi@razi.ac.ir](mailto:e.darvishi@razi.ac.ir)

**https://doi.org/10.22092/IDSER.2024.365407.1578**

### **Introduction:**

The concept of resilience is particularly important in water distribution networks, which are important urban infrastructures. Estimating and evaluating resilience in each network at the time of designing will reduce damage to subscribers and the network. In this research, relationships and functions related to resilience (GRA) in water supply systems and solutions for how to increase resilience using two scenarios of pipe failure and additional needs for the Kangavar network were investigated and implemented.

### **Material and Method:**

By modeling the initial failure modes by increasing the stress intensity and estimating the consequences that arise, the resilience of a system can be evaluated, which includes the following steps (Diao *et al.* 2016):

Step 1. Identify the failure mode to evaluate (eg structural failure, excessive demand).

Step 2. Determining the system stress associated with the failure mode and its simulation method (for example, WDS simulation with an additional load on a node for a certain period).

Step 3. Identify the appropriate system and how to measure it (eg ratio of unsatisfied demand to total required demand during the failure period).

Step 4: Simulating the consequences of the failure mode at increasing stress intensity (0%-100% of maximum stress). While stress intensities up to 100% may be highly undesirable, they are theoretically possible and should be considered if a wide range of potential effects are identified. For each given stress value, the appropriate number of failure scenarios is determined.

Step 5. Creating a stress-resilience curve that shows the average, maximum, and minimum results produced by the simulation for each given stress value.

### **Results:**

The worst situation for Kangavar network starts at 89% failure and remains until 100% pipe failure. In large networks like the Kangavar network, the graph of the strain duration and the stress duration have a steep slope just like the supply shortage graph. For example, for the value of five percent pipe failure, all three values of minimum, average and maximum strain duration are equal to five. That is, when only five percent of Kangavar's pipes fail, the duration of the strain reaches its maximum.

Among the prevention ways to reduce the lack of supply in case of pipe failure, adding parallel pipes for pipes with a more important position, compared to other pipes or looping the network in different areas of the network. For the Kangavar network, 38 pipes were added to the network. These pipes were mostly parallel

### *Resilience analysis of water distribution in pipe failure mode and excess demand*

to the pipes coming out of the tank. After adding only 38 pipes to the network, the amount of supply shortfall was greatly reduced.

The state of excess demand is actually a state in which a number of certain nodes have a need or demand more than their defined capacity in a certain period of time. This situation is actually very similar to when a fire occurs in the network, except that in the case of a fire, the normal and usual demand of the network may decrease a little. But in this simulation, in addition to the normal need and demand, additional needs are also considered.

Figure 12 shows the duration of the fire for hours 18 to 21. In this period of time, in the worst case, i.e. in 100% of the nodes with higher demand, the network faces only 10.82% supply shortage. This means that if all eleven selected points in the network have additional needs at the same time, the network will have an approximately 11% supply shortage. In this situation, it can be seen that the stress applied to the network occurs at the same moment and the duration of the strain is six hours.

#### **Conclusions:**

The results showed that the duration of the strain increased with the increase in the percentage of pipe failure. But the graph related to the start of strain had a downward trend and approached zero with the increase in the percentage of pipe failure. The level of resilience for a network is different in different scenarios, in fact it is possible in with equal failure percentage, and the network has more resilience in one scenario than in another scenario. With a slight increase in the percentage of pipe failure in some water supply networks, the amount of strain increases greatly. While in other networks, even with a large increase in failure percentage, the size of the slope strain has started to increase slightly. One of the most important reasons for this depends on the type of network design. For example, if the water supply network is defined as a loop, in case of failure of one of the pipes, part of the lack of demand will be supplied by other pipes. Adding new pipes to the network was one of the solutions considered to increase the resilience of the network in this research.

**Keywords:** Resilience, water distribution system, Failure mode, Excess demand, Pipe failure, Pressure Dependent Demand