

## بررسی آسیب ناپذیری شبکه های توزیع آب با درجه های خرابی مختلف

علیرضا غیثی<sup>\*۱</sup> - علی نقی ضیائی<sup>۲</sup> - سعیدرضا خداشناس<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۵/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۲۰

### چکیده

خرابی و یا شکست در مؤلفه های یک سیستم توزیع آب، رخدادی اجتناب ناپذیر است که باید در تمام مراحل تصمیم گیری اعم از برنامه ریزی، طراحی، اجرا و نگهداری برای یک شبکه توزیع آب مد نظر قرار گیرد. اگر چه در تحقیقات پیشین به موضوع اعتمادپذیری شبکه ها زیاد پرداخته شده است ولی به آسیب ناپذیری (تحمل خرابی) شبکه های توزیع آب با درجات مختلف خرابی توجهی نشده است، که شاید علت آن محاسبات سنگین و وقت گیر تحلیل این آسیب ناپذیری باشد. در این تحقیق روابط مورد نیاز برای محاسبه میزان آسیب ناپذیری شبکه های توزیع آب با درجه های خرابی مختلف استخراج شده اند. همچنین معادلاتی جهت تخمین خطای احتمالی در این محاسبات ارائه گردیده اند. سپس در تلاشی میزان آسیب ناپذیری شانزده طرح از یک شبکه فرضی با درجه های خرابی مختلف محاسبه گردید. نتایج نشان داد که با استفاده از معادلات ارائه شده در این تحقیق می توان تا حد زیادی جلوی شبیه سازی های زائد و غیر ضروری که گاهی اوقات بررسی آسیب ناپذیری شبکه ها را بسیار مشکل می سازد، گرفت. همچنین نتایج نشان داد که به تدریج با کاهش قطر لوله های شبکه میزان آسیب ناپذیری شبکه از درجه های مختلف کاهش پیدا می کند و از مقایسه مقادیر میزان آسیب ناپذیری شبکه با درجه های خرابی مختلف می توان میزان حساسیت شبکه نسبت به خرابی های همزمان را تخمین زد.

واژه های کلیدی: شبکه توزیع آب، آسیب ناپذیری، شبیه سازی هیدرولیکی، احتمال شکست

### مقدمه

تکنیکها را به سه گروه شامل روشهایی بر اساس قابلیت دستیابی (reachability) یا قابلیت اتصال (connectivity)، روشهای

هیدرولیکی و روشهایی بر مبنای آنتروپی تقسیم بندی نمود. مرور مطالعات گذشته نشان می دهد که اعتمادپذیری و تحمل به خرابی عمدتاً بوسیله بررسی تاثیر شکست مؤلفه های یک سیستم بر عملکرد آن بررسی می گردد. سو و همکاران (۱۵) و کولینین و همکاران (۲) اشاره کردند که احتمال شکست همزمان بیش از یک مؤلفه در سیستم قابل صرف نظر کردن است. بنابراین میزان اعتمادپذیری شبکه بطور معمول در حالتی مطالعه می گردد که همه مؤلفه های سیستم در حال کار هستند و یا فقط یک شکست در سیستم رخ داده است (۳ و ۱۵). گارگانو و پیانسه (۷) بیان داشتند که این ساده سازی بطور چشمگیری تعداد شبیه سازی های هیدرولیکی را کاهش می دهد ولی در شبکه هایی که دارای عمر طولانی هستند و در آنها شکست های زیادی اتفاق می افتد این ساده سازی ممکن است خطای زیادی ایجاد نماید. حالتی بیشتری از شکست مؤلفه ها باید در شرایط سخت آب و هوایی در محاسبات اعتمادپذیری وارد گردند (۹). علاوه بر این کانسال و ارورا (۱۱) بیان داشتند که فرض رخداد تنها یک شکست در زمان در سیستمهای توزیع آب در

یک طراحی قابل قبول از یک شبکه آبرسانی باید بتواند بطور مداوم مقدار مورد نیاز آب مشترکین شبکه را در فشار مناسب و کیفیت قابل قبول تامین نماید. همچنین این نکته نیز باید مورد توجه قرار گیرد که شبکه از لحاظ فیزیکی و اقتصادی قابل اجرا در منطقه مورد نظر باشد.

در یک سیستم توزیع آب شهری، شکست در شبکه ممکن است به دلایل مختلفی مانند شرایط بد آب و هوایی، یخ زدگی، فرایند فرسودگی و خوردگی، فشار هیدرولیکی بالا و ... رخ دهد. بنابراین ضروری است که عملکرد سیستم در حالتی که خرابی یا شکستی در آن رخ می دهد بررسی شود که به آن تحلیل آسیب ناپذیری یا تحمل خرابی شبکه می گویند.

محققین در طول سالهای گذشته روشهای مختلفی برای تحلیل اعتمادپذیری شبکه های توزیع آب معرفی کرده اند. اوستفلد (۱۲) این

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، استادیار و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد  
\* - نویسنده مسئول: (Email: alirezagheisi@gmail.com)

عدد بطور همزمان بسیار کم بوده و قابل صرفنظر کردن می باشد. همچنین ممکن است بدین علت باشد که آنالیز تحمل به خرابی شبکه‌ها نیازمند محاسبات سنگین و گاهاً بسیار وقت گیر می باشند. دلیل اینکه در یک سیستم هر یک از مؤلفه های شبکه می توانند تنها دو حالت مشغول بکار یا خارج از سرویس را اتخاذ کنند، بنابراین در کل  $2^n$  ترکیب برای مؤلفه های شکست در یک شبکه با  $n$  مؤلفه می توان قائل شد. اگر سعی گردد تحمل به خرابی یک شبکه را با در نظر گرفتن تمام حالات خرابی ممکنه محاسبه کنیم مقدار حجم محاسبات حتی برای یک شبکه کوچک هم بسیار زیاد خواهد بود. بطوریکه برای یک شبکه بسیار ساده و ابتدایی حاوی تنها ۱۰ مؤلفه نیاز به بیش از  $10^3$  شبیه سازی هیدرولیکی می باشد و این مقدار در شبکه ای ساده حاوی ۵۰ مؤلفه به بیش از  $10^{15}$  بار می رسد. لذا با افزایش تعداد مؤلفه های سیستم نه تنها شبیه سازی هیدرولیکی شبکه پیچیده تر می گردد، بلکه تعداد دفعاتی که باید سیستم از نظر هیدرولیکی شبیه سازی شود نیز بطور چشمگیری افزایش می یابد این امر باعث می شود که محاسبات بخصوص در شبکه های بزرگتر با مؤلفه های بیشتر بسیار وقت گیر و پرزحمت گردد. بنابراین در این تحقیق به نحوه محاسبه میزان تحمل شبکه ها به خرابی با درجه های مختلف و انتخاب تعداد مؤلفه های شکستی که باید در آنالیز تحمل به خرابی با هر درجه ای وارد گردد تا نتایج از دقت کافی برخوردار باشند، پرداخته شده است.

### مواد و روش ها

در این مطالعه روشهای محاسبه اعتمادپذیری هیدرولیکی پیشنهاد گردیده توسط گارگانو و پیانسه (۶)، گارگانو و پیانسه (۷)، تانیمبوه و همکارنش (۱۹) و غیثی و ناصر (۸) با هم ترکیب شده و میزان آسیب ناپذیری شبکه با درجه های مختلف خرابی تخمین زده می شود. روش بکاربرده شده دو مزیت و برتری چشمگیر نسبت به بقیه روشهای پیشنهادی توسط محققین جهت تخمین تحمل به خرابی سیستمها دارد. اولاً اینکه این روش می تواند تمام ترکیبهای شکست ممکن در یک سیستم و تغییرات مکانی و زمانی نیاز مصرف کننده ها در گره های شبکه را در نظر بگیرد. علاوه بر این در این روش با استفاده از مفهوم تحلیل هیدرولیکی شبکه بر اساس فشار در گره ها می توان عملکرد شبکه و به تبع آن میزان آسیب ناپذیری را در حالتی که شکست در سیستم رخ داده بخوبی محاسبه کرد (۷، ۱۰ و ۱۹). آسیب ناپذیری شبکه های توزیع آب ( $T^0$ ) بوسیله میانگین وزنی شاخصهای عملکرد سیستم ( $PI$ ) برای ترکیبهای شکست مؤلفه های مختلف مثل  $a$  طبق رابطه ۱ محاسبه می گردد (۷ و ۱۹):

کشورهای در حال توسعه که معمولاً بخاطر پوسیدگی سیستم، شکستهای زیادی ممکن است در آنها رخ دهد یک فرض نادرست و غیر واقعی می باشد. همچنین در مطالعه ای که توسط الزهرانی و لایک سید (۱) در مورد اعتمادپذیری شبکه ای در منطقه الخیر کشور عربستان انجام پذیرفت، مشخص شد که تعداد ترکیبات شکست در نظر گرفته شده در مطالعات اثر چشمگیری بر نتایج داشته و در نظر گرفتن تعداد بیشتر ترکیبات شکست احتمالی منجر به کاهش میزان اعتمادپذیری شبکه شده است. آنها پیشنهاد کردند که تعداد ترکیبات شکست احتمالی در شبکه بر اساس تجربه انتخاب گردند. با یک نگاه کلی به تحقیقات پیشین می توان به این نتیجه رسید که وارد کردن تعداد ترکیبات شکست مختلف در آنالیز اعتمادپذیری شبکه ها و آنالیز تحمل به خرابی شبکه های توزیع آب با درجه خرابی های مختلف امری ضروری می باشد. این امر در شبکه های فرسوده، قدیمی یا آنهایی که در مناطق با شرایط آب و هوایی سخت قرار دارند و یا در کشورهای در حال توسعه که با شرایط تعمیر و نگهداری پایینی مورد استفاده قرار می گیرند اجتناب ناپذیر می باشد.

تانیمبوه و شیاهان (۱۷) روشی جهت کاهش میزان خطا در آنالیز اعتمادپذیری با توجه به ترکیبات شکستی که ممکن است در نظر گرفته نشوند، ارائه کردند. آنها یک مرز بالا برای مقادیر تحمل به خرابی شبکه ارائه دادند که مقادیری بیش از آن برای اعتمادپذیری شبکه حتی اگر تمامی ترکیبات شکست ممکنه در محاسبات وارد گردند، قابل تصور نمی باشد. آنها برای کاهش میزان خطا در آنالیز تحمل به خرابی شبکه پیشنهاد کردند که نصف اختلاف مقدار بین اعتمادپذیری شبکه و مقدار حداکثر به مقادیر محاسباتی اضافه گردد تا جبران خطای حاصل از مؤلفه های شکستی که ممکن است در محاسبات در نظر گرفته نشده باشند را بکند. همچنین غیثی و ناصر (۸) در مطالعه ای به اهمیت موضوع ماکزیمم تعداد مؤلفه های شکست در بحث اعتماد پذیری شبکه ها پرداختند و سعی کردند خطای ممکن در محاسبات اعتمادپذیری شبکه ها که در اثر صرفنظر کردن تعدادی از مؤلفه های شکست ایجاد می شود را تخمین بزنند. همچنین با مقداری ساده سازی، فرمولها و گرافهایی را ارائه دادند که از آنها می توان جهت تعیین ماکزیمم تعداد مؤلفه های شکستی که باید در آنالیز اعتمادپذیری وارد گردند تا خطای محاسبات کمتر از ۲٪ گردد استفاده کرد.

یک نگاه کلی به مطالعات قبلی نشان می دهد که در تحقیقات پیشین توجه خاصی به مسئله اعتمادپذیری شبکه ها شده است ولی به آنالیز تحمل به خرابی شبکه با درجه خرابی های مختلف، نحوه محاسبه و تعداد ترکیبهای شکستی که باید در آنالیز تحمل به خرابی شبکه با درجه های مختلف وارد گردد توجه نشده است.

این ممکن است بدین دلیل باشد که محققین باور داشته اند که احتمال رخداد شکست در یک سیستم با تعداد مؤلفه های بیش از یک

معرفی نمودند. معیار آسیب ناپذیری با درجه های مختلف نشان دهنده میزان مقاومت شبکه به شکست مولفه های آن می باشد. این معیار نشان دهنده حدی است که شبکه می تواند به خرابی در سیستم و تامین آب کافی برای تمام مصرف کننده ها با فشار کافی مقاومت نشان دهد. مقادیر بیشتر آسیب ناپذیری در شبکه نشان دهنده میزان بیشتر افزونگی و تاثیر کمتر خرابی مؤلفه ها بر روی عملکرد سیستم می باشد. درجه بالاتر افزونگی در یک شبکه توزیع آب می تواند بوسیله وجود مسیرهای متعدد بیشتر بین مصرف کننده و منبع بوجود آید.

در این تحقیق روابط مورد نیاز برای محاسبه میزان آسیب ناپذیری شبکه های توزیع آب با درجه های خرابی مختلف تا درجه چهار ( $T^4$ ) استخراج شده اند (روابط ۵ تا ۸).

$$T^1 = \frac{\prod_{i=1}^N A_i \cdot \left[ \sum_{a=1}^N \frac{U_a}{A_a} \cdot PI^{(a)} + \dots \right]}{1 - \prod_{i=1}^N A_i} \quad (5)$$

$$T^2 = \frac{\prod_{i=1}^N A_i \cdot \left[ \sum_{a=1}^{N-1} \sum_{b=a+1}^N \frac{U_a U_b}{A_a A_b} \cdot PI^{(a,b)} + \dots \right]}{1 - \prod_{i=1}^N A_i - \sum_{a=1}^N \frac{U_a}{A_a} \cdot \prod_{i=1}^N A_i} \quad (6)$$

$$T^3 = \frac{\prod_{i=1}^N A_i \cdot \left[ \sum_{a=1}^{N-2} \sum_{b=a+1}^{N-1} \sum_{c=b+1}^N \frac{U_a U_b U_c}{A_a A_b A_c} \cdot PI^{(a,b,c)} + \dots \right]}{1 - \prod_{i=1}^N A_i - \sum_{a=1}^N \frac{U_a}{A_a} \cdot \prod_{i=1}^N A_i - \sum_{a=1}^{N-1} \sum_{b=a+1}^N \frac{U_a U_b}{A_a A_b} \cdot \prod_{i=1}^N A_i} \quad (7)$$

$$T^4 = \frac{\prod_{i=1}^N A_i \cdot \left[ \sum_{a=1}^{N-3} \sum_{b=a+1}^{N-2} \sum_{c=b+1}^{N-1} \sum_{d=c+1}^N \frac{U_a U_b U_c U_d}{A_a A_b A_c A_d} \cdot PI^{(a,b,c,d)} + \dots \right]}{1 - \prod_{i=1}^N A_i - \sum_{a=1}^N \frac{U_a}{A_a} \cdot \prod_{i=1}^N A_i - \sum_{a=1}^{N-1} \sum_{b=a+1}^N \frac{U_a U_b}{A_a A_b} \cdot \prod_{i=1}^N A_i - \sum_{a=1}^{N-2} \sum_{b=a+1}^{N-1} \sum_{c=b+1}^N \frac{U_a U_b U_c}{A_a A_b A_c} \cdot \prod_{i=1}^N A_i} \quad (8)$$

پارامترهای آسیب ناپذیری درجه یک  $T^1$ ، دو  $T^2$ ، سه  $T^3$  و درجه چهار  $T^4$  میزان توانایی سیستم به برآورد نیاز مصرف کننده ها با کیفیت مناسب هنگامی که حداقل یک، دو، سه و چهار شکست بطور همزمان در سیستم رخ دهد را نشان می دهد. در این تحقیق از معادلات استخراجی ۵ تا ۸ جهت تعیین میزان تحمل شکست از درجه یک، دو، سه و چهار استفاده شده است.

با تعریف یک مرز بالا و پایین برای میزان اعتمادپذیری محاسبه شده برای یک شبکه توزیع آب، فوجیوارا و تانگ (۵) و تانیمبوه و همکاران (۱۹) بیان داشتند که ماکزیمم خطا در محاسبه میزان اعتمادپذیری یک شبکه با توجه به تعداد ترکیبات شکستی که در محاسبات وارد شده است میتواند از اختلاف بین این مرز بالا و پایین

$$T^0 = PI^{(0)} \cdot P(0) + \sum_{a=1}^N PI^{(a)} \cdot P(a) + \dots \quad (1)$$

که در آن  $N$  تعداد مولفه های سیستم و  $PI^{(0)}$  نماینده شاخص عملکرد سیستم هنگامی که شکستی رخ نداده است می باشد. شاخص عملکرد سیستم پارامتری بی بعد است که نشان دهنده میزان توانایی سیستم در انجام وظیفه محوله است. بطور مثال اگر هدف از طراحی یک شبکه توزیع آب، تامین آب مورد نیاز مصرف کننده ها باشد، شاخص عملکرد سیستم می تواند از تقسیم حجمی یا وزنی مقدار آب تحویلی به مصرف کننده ها به مقدار آبی که مصرف کننده ها نیاز دارند بدست آید. همچنین  $PI^{(a)}$  نشان دهنده عملکرد شبکه است هنگامی که مولفه  $a$  از شبکه دچار شکست شده و فراهم نمی باشد.  $P(a)$  و  $P(0)$  وزن ضرایب مربوط به سناریو های مختلف شکست می باشند.  $P(0)$  احتمال این است که در شبکه شکستی رخ ندهد و  $P(a)$  نشان دهنده احتمال شکست مؤلفه  $a$  و از در دسترس خارج شدن آن می باشد. با استفاده از مفهوم فراهم بودن ( $A$ ) و فراهم نبودن ( $U$ ) مؤلفه  $i$  ( $U_i = I - A_i$ )، فوجیوارا و داسیلوا (۴) و فوجیوارا و تانگ (۵) ضریب وزنی شاخصهای عملکرد سیستم مثل  $P(a)$ ،  $P(0)$  را بصورت زیر تعریف کردند:

$$P(0) = \prod_{i=1}^N A_i \quad (2)$$

$$P(a) = P(0) \cdot \frac{U_a}{A_a} \quad (3)$$

که  $\Pi$  اپراتور ضرب و اندیس "i" نماینده شماره مؤلفه سیستم است.  $A_a$  و  $U_a$  به ترتیب نشان دهنده مقادیر فراهم بودن و فراهم نبودن مؤلفه  $a$  است. با جایگزینی مقدار معادله ۲ در رابطه ۳ و همچنین جایگزینی معادلات ۲ و ۳ در معادله ۱ میزان آسیب ناپذیری برای شبکه می تواند بصورت زیر محاسبه گردد:

$$T^0 = \prod_{i=1}^N A_i \cdot \left[ PI^{(0)} + \sum_{a=1}^N \frac{U_a}{A_a} \cdot PI^{(a)} + \dots \right] \quad (4)$$

بطور معمول یک شبکه توزیع آب طوری طراحی می گردد که در شرایط معمولی در حالتی که شکستی در آن رخ نداده باشد بتواند تمام آب مورد نیاز مصرف کننده ها را تامین نماید. بنابراین در بحث آسیب ناپذیری شبکه ها می توان از شرایط معمولی صرف نظر نمود و این معیار را فقط در حالتی بررسی کرد که حداقل یک شکست یا خرابی در سیستم رخ داده باشد. تانیمبوه و تمپلمن (۱۸) مفهوم افزونگی، وجود جایگزین (redundancy) و یا آسیب ناپذیری از درجه یک را بعنوان یک معیار جدید جهت تعیین میزان آسیب ناپذیری شبکه ها در زمانی که حداقل یک خرابی در سیستم رخ داده باشد

$$E(T^1) = 1 - \frac{\prod_{i=1}^N A_i \cdot \left[ \sum_{a=1}^N \frac{U_a}{A_a} + \dots \right]}{1 - \prod_{i=1}^N A_i} \quad (10)$$

$$E(T^2) = 1 - \frac{\prod_{i=1}^N A_i \cdot \left[ \sum_{a=1}^{N-1} \sum_{b=a+1}^N \frac{U_a U_b}{A_a A_b} + \dots \right]}{1 - \prod_{i=1}^N A_i - \sum_{a=1}^N \frac{U_a}{A_a} \cdot \prod_{i=1}^N A_i} \quad (11)$$

$$E(T^3) = 1 - \frac{\prod_{i=1}^N A_i \cdot \left[ \sum_{a=1}^{N-2} \sum_{b=a+1}^{N-1} \sum_{c=b+1}^N \frac{U_a U_b U_c}{A_a A_b A_c} + \dots \right]}{1 - \prod_{i=1}^N A_i - \sum_{a=1}^N \frac{U_a}{A_a} \cdot \prod_{i=1}^N A_i - \sum_{a=1}^{N-1} \sum_{b=a+1}^N \frac{U_a U_b}{A_a A_b} \cdot \prod_{i=1}^N A_i} \quad (12)$$

$$E(T^4) = 1 - \frac{\prod_{i=1}^N A_i \cdot \left[ \sum_{a=1}^{N-3} \sum_{b=a+1}^{N-2} \sum_{c=b+1}^{N-1} \sum_{d=c+1}^N \frac{U_a U_b U_c U_d}{A_a A_b A_c A_d} + \dots \right]}{1 - \prod_{i=1}^N A_i - \sum_{a=1}^N \frac{U_a}{A_a} \cdot \prod_{i=1}^N A_i - \sum_{a=1}^{N-1} \sum_{b=a+1}^N \frac{U_a U_b}{A_a A_b} \cdot \prod_{i=1}^N A_i - \sum_{a=1}^{N-2} \sum_{b=a+1}^{N-1} \sum_{c=b+1}^N \frac{U_a U_b U_c}{A_a A_b A_c} \cdot \prod_{i=1}^N A_i} \quad (13)$$

در این مطالعه، روش پیشنهادی توسط کولینین و همکاران (۳) برای محاسبه احتمال میزان فراهم بودن لوله ها استفاده شده است. طبق روش آنها میزان فراهم بودن لوله  $i$  بصورت نسبت متوسط زمان بین خرابیها به مجموع متوسط زمان بین خرابیها و زمان خرابی حساب می گردد و از رابطه ۱۴ بدست می آید.

$$A_i = \frac{45.6086 D_i^{1.462131}}{0.0021 D_i^{0.285} + 45.6086 D_i^{1.462131}} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

که  $D_i$  نماینده قطر لوله  $i$  به متر می باشد.

بنابراین ماکزیمم خطا در محاسبه تحمل به خرابی شبکه از درجه صفر، یک، دو، سه و یا چهار می تواند در صورت مشخص بودن میزان فراهم بودن مؤلفه های سیستم و تعداد مؤلفه ها، قبل از انجام هرگونه شبیه سازی هیدرولیکی تخمین زده شود.

با استفاده از معادلات پیشنهادی در این تحقیق و دانستن میزان فراهم بودن هر یک از مؤلفه های سیستم می توان حداکثر خطای احتمالی در محاسبه آسیب ناپذیری یک شبکه با تعداد  $N$  مؤلفه را با توجه به تعداد ترکیبات شکستی که در محاسبات وارد شده تخمین نمود. همچنین با استفاده از معادلات ۹ تا ۱۳ و در نظر گرفتن یک بیشینه خطای مجاز در محاسبات، می توان تعداد ترکیبات شکست مورد نیاز جهت تحلیل آسیب ناپذیری یک شبکه با  $N$  مؤلفه را قبل از هر گونه اقدام به شبیه سازی هیدرولیکی تخمین نمود. این امر می تواند بطور چشمگیری حجم بالا و وقت گیر محاسبات اضافی و غیرضروری در تخمین آسیب ناپذیری شبکه ها با درجه خرابی های مختلف را کاهش دهد.

محاسبه گردد. منظور از مرز بالایی در بحث آسیب ناپذیری شبکه با درجه های خرابی مختلف مقدار بیشینه ای است که مقداری بیش از آن برای آسیب ناپذیری سیستم حتی اگر تمامی ترکیبات شکست ممکنه در محاسبات وارد گردند، قابل تصور نمی باشد. در این مطالعه از فرایند معرفی شده توسط فوجیوارا و تانگ (۵)، تانیموه و همکاران (۱۹) و غیثی و ناصر (۸) برای تخمین میزان خطای احتمالی در محاسبات آسیب ناپذیری درجه یک، دو، سه و چهار یک شبکه با توجه به تعداد ترکیبات شکستی که در محاسبات وارد شده است، استفاده گردیده است. مرز پایینی در بحث آسیب ناپذیری توسط معادلات استخراجی در این مطالعه (روابط ۴ تا ۸) از طریق میانگین گیری وزنی شاخصهای عملکرد شبکه با در نظر گرفتن تعداد مشخصی شکست در مؤلفه های سیستم محاسبه می گردد (بعنوان مثال معادله ۵ برای آسیب ناپذیری از درجه یک استفاده شود). در حالی که مرز بالایی از کم کردن میزان آسیب پذیری و یا عدم تحمل خرابی (damage intolerance) شبکه از مقدار واحد، یعنی از طریق کم کردن مقدار میانگین وزنی شاخصهای ناکارآمدی شبکه با توجه به تعداد مشخصی شکست در مؤلفه های سیستم از مقدار واحد حاصل می گردد. باید توجه داشت که بر خلاف شاخص عملکرد، شاخص ناکارآمدی یک سیستم میزان ناتوانی شبکه در انجام وظیفه محوله به آن را نشان می دهد و می توان آن را از طریق کم کردن شاخص عملکرد شبکه از مقدار واحد محاسبه کرد. همچنین ملاحظه می گردد که جهت محاسبه مرز بالایی، احتیاج است که پارامتر آسیب پذیری برای شبکه تعیین گردد. برخلاف آسیب ناپذیری شبکه، پارامتر آسیب پذیری از درجه یک، دو، سه و یا چهار میزان عدم توانایی سیستم توزیع آب را در تامین آب مورد نیاز مصرف کننده ها هنگامی که حداقل یک، دو، سه و یا چهار شکست همزمان در سیستم رخ دهد نشان می دهد.

در این تحقیق میزان آسیب پذیری شبکه از درجه صفر، یک، دو، سه و چهار با استفاده از معادلات ۴ تا ۸ هنگامی که مقدار شاخص عملکرد شبکه با مقدار شاخص ناکارآمدی جایگزین شود، بدست می آیند. با توجه به توضیحات ارائه شده و محاسبه مقادیر مرزهای بالایی و پایینی در بحث آسیب ناپذیری شبکه های توزیع آب و کم کردن مرز بالا از پایین و مقداری ساده سازی (مجموع مقادیر شاخصهای عملکرد و ناکارآمدی شبکه برابر یک می شود)، روابط ۹ الی ۱۳ جهت تخمین بیشینه خطا ( $E$ ) در محاسبه میزان آسیب ناپذیری شبکه های توزیع آب با درجه های خرابی مختلف استخراج شده اند.

$$E(T^0) = 1 - \prod_{i=1}^N A_i \cdot \left[ 1 + \sum_{a=1}^N \frac{U_a}{A_a} + \dots \right] \quad (9)$$

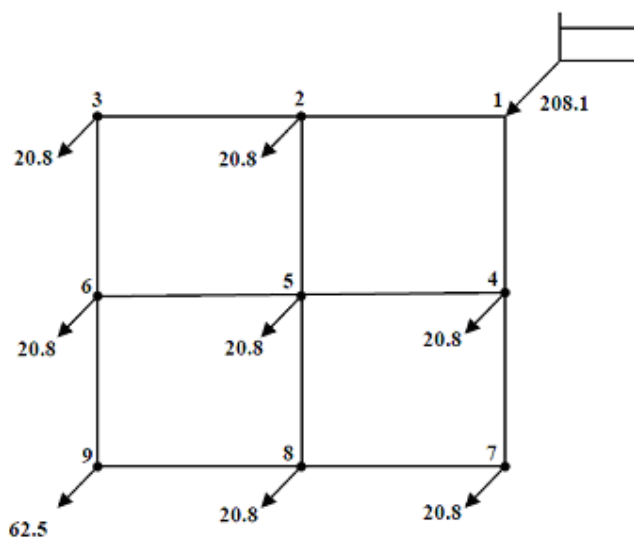
که توسط پاتیرانا (۱۳) ارائه گردیده است، جهت شبیه سازی هیدرولیکی شبکه مورد استفاده قرار گرفت. این نسخه اصلاح شده می تواند شبکه را بر اساس فشار در گره ها شبیه سازی هیدرولیکی کند و میزان آبدهی در گره های شبکه را در حالتی که فشار به اندازه کافی برای تامین تمام نیاز مصرف کننده ها کافی نمی باشد، تخمین بزند. حداقل فشار مورد نیاز در گره های شبکه جهت تامین تمام نیاز مصرف کننده ها ۱۵ متر در نظر گرفته شد.

### نتایج و بحث

جدول ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ نشان دهنده بیشینه خطای محاسباتی در میزان آسیب ناپذیری شبکه با درجه های صفر، یک، دو، سه و چهار بر اساس معادلات ۹ تا ۱۳ در حالتی که تا ترکیب ۴ از شکستها (۴ = F) در محاسبات وارد شوند، می باشند. مقادیر جدول مذکور نشان دهنده میزان خطای خیلی کم در محاسبات آسیب ناپذیری شبکه می باشد که عمدتاً بدلیل تعداد کم مؤلفه های شبکه و مقادیر بالای میزان فراهم بودن آنها می باشد.

جهت نشان دادن مزیت های روش پیشنهادی در این تحقیق، شبکه ای فرضی که در ابتدا توسط فوجیوارا و تانگ (۵) معرفی شده بود و بعداً توسط محققین زیادی مثل تابش (۱۶)، تانیمبوه و همکاران (۱۹) و کالونگی و تانیمبوه (۱۰) مورد استفاده قرار گرفته است، در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱ تصویر شماتیک این شبکه توزیع آب را نشان می دهد. در این شکل میزان نیاز هر یک از مصرف کننده ها در گره های شبکه بصورت لیتر در ثانیه مشخص شده است. این شبکه توزیع آب دارای ۱۶ طرح مختلف می باشد که دارای ۱۲ لوله ( $N = 12$ )، ۹ گره و دارای یک مخزن با هد ثابت ۱۰۰ متر در گره شماره یک می باشد. جدول شماره ۱ اندازه قطر لوله های بکاررفته در سیستم را در ۱۶ طرح از شبکه نشان می دهد. تمام لوله ها ۱ کیلومتر طول دارند و ضریب هیزن-ویلیامز آنها ۱۳۰ می باشد. همانطور که در جدول شماره ۱ ملاحظه می شود قطر لوله ها در ۱۶ طرح مختلف از شبکه طوری انتخاب شده اند که به تدریج از طرح یک تا شانزده قطر لوله ها افزایش پیدا می کند و در هر طرح نسبت به طرح قبلی حداقل قطر دو لوله از شبکه افزایش پیدا کرده است.

در این مطالعه نسخه اصلاح شده نرم افزار EPANET2، (۱۴)



شکل ۱- تصویر شماتیک شبکه توزیع آب مورد استفاده در این تحقیق

جدول ۱- مشخصات قطر لوله های کاربردی شبکه در ۱۶ طرح مختلف

اتصالات	قطر لوله ها (میلیمتر)															
۱-۲, ۱-۴	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۵	۲۵۵	۲۵۵
۲-۳, ۴-۷	۱۷۵	۱۷۵	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۵	۱۸۵	۱۸۵	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰
۲-۵, ۴-۵	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۵	۱۵۵
۳-۶, ۷-۸	۱۱۵	۱۱۵	۱۱۵	۱۲۰	۱۲۵	۱۲۵	۱۳۰	۱۳۵	۱۳۵	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۰
۵-۶, ۵-۸	۱۰۰	۱۰۵	۱۰۵	۱۰۵	۱۰۵	۱۰۵	۱۰۵	۱۰۵	۱۰۵	۱۰۵	۱۰۵	۱۱۰	۱۱۵	۱۱۵	۱۱۵	۱۲۰
۶-۹, ۸-۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
طرح	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶

این امر بسیار واضح و روشن است که مقدار محاسبات اضافی و غیرضروری که می توان بدین وسیله آنها را در محاسبات آسیب ناپذیری در شبکه های بزرگ در دنیای واقعی از بین برد بسیار بیشتر از مثال فرضی آورده شده در این مطالعه خواهد بود.

همچنین از مقایسه میزان آسیب ناپذیری شبکه با درجه های خرابی مختلف برای هر یک از ۱۶ طرح مختلف از شبکه ملاحظه می گردد که به تدریج با کاهش قطر لوله های شبکه از طرح ۱۶ تا ۱ میزان آسیب ناپذیری شبکه از درجه های مختلف کاهش پیدا کرده است. لذا طراحان شبکه های توزیع آب باید به این مسئله توجه خاص کنند که در طراحی شبکه های آبرسانی با بهینه سازی شبکه ها و استفاده از کمترین قطر لوله های موجود در بازار که بتواند محدودیت های طراحی را برآورده نماید جهت پایین آوردن هزینه ها، در حقیقت ممکن است میزان آسیب ناپذیری شبکه طراحی شده بطور چشمگیری پایین بیاید که این مسئله معمولاً بررسی نمی گردد. عدم توجه به این موضوع مهم ممکن است باعث این امر شود که اگر در شبکه طراحی شده هرگاه خرابی رخ دهد تعداد بسیار زیادی از مصرف کننده های شبکه نتوانند آب مورد نیاز خود را دریافت کنند و در حقیقت در هنگام رخداد شکست یا خرابی در هر یک از مؤلفه های سیستم، شبکه طراحی شده نتواند وظیفه خود را که آبرسانی به مصرف کننده ها است بخوبی انجام دهد. علاوه بر این از مقایسه میزان آسیب ناپذیری شبکه با درجه های خرابی مختلف در شکل ۲ ملاحظه می گردد که با افزایش درجه خرابی در شبکه بتدریج میزان آسیب ناپذیری کاهش یافته است و این کاهش در شبکه مورد بررسی در این تحقیق حدود هفت درصد می باشد.

بنابراین می توان میزان آسیب ناپذیری شبکه از درجه صفر، یک، دو، سه و چهار را با خطای به ترتیب کمتر از ۰/۵۸، ۰/۲۷، ۰/۱۷، ۰/۱۳ و ۰/۱۱ درصد بدون در نظر گرفتن حتی یک شکست در سیستم ( $F=0$ )، تنها یک شکست ( $F=1$ )، دو شکست ( $F=2$ )، سه شکست ( $F=3$ ) و چهار شکست ( $F=4$ ) در شبکه محاسبه کرد. شکل ۲ نتایج این مطالعه جهت تحلیل آسیب ناپذیری شبکه از درجه صفر، یک، دو، سه و چهار را برای حالتی که تعداد صفر، یک، دو، سه و چهار ترکیب شکست در محاسبات در نظر گرفته شود و همچنین نتایج تانیموه و همکاران (۱۹) را برای تحلیل آسیب ناپذیری شبکه از درجه صفر نشان می دهد. برتری متدولوژی پیشنهادی در این تحقیق وقتی نمایان می گردد که می بینیم که نتایج این مطالعه نشان می دهد که تنها با یک شبیه سازی هیدرولیکی بدون در نظر گرفتن شکستی در سیستم می توان آسیب ناپذیری شبکه از درجه صفر را به خوبی و با دقت مناسب تخمین زد در حالی که تانیموه و همکاران (۱۹) تعداد ۱۳ و ۷۹ مرتبه شبکه را بطور هیدرولیکی شبیه سازی کردند تا میزان آسیب ناپذیری شبکه از درجه صفر را در حالتی که یک یا دو شکست همزمان ممکن است در سیستم رخ دهد بدست بیاورند.

این امر بخوبی اهمیت این مسئله را نمایان می سازد که تخمین تعداد ترکیبات شکستی که مورد نیاز است که در محاسبات آسیب ناپذیری شبکه وارد گردند، قبل از هرگونه اقدام به شبیه سازی هیدرولیکی می تواند بطور چشمگیری محاسبات اضافی که گاهی ممکن است بسیار سنگین و وقت گیر هم باشند را کاهش دهد و محاسبه میزان آسیب ناپذیری شبکه ها را بسیار آسان تر نماید. البته

جدول ۲- پیشینه درصد خطا در بررسی آسیب ناپذیری شبکه از درجه صفر برای هر یک از ۱۶ طرح با در نظر گرفتن ترکیبات شکست مختلف

شماره طرح	پیشینه خطا در محاسبات آسیب ناپذیری شبکه (%)				
	F=۰	F=۱	F=۲	F=۳	F=۴
۱	۵.۷۸E-۰۱	۱.۵۳E-۰۳	۱.۴۶E-۰۶	۲.۶۸E-۰۹	۲.۱۰E-۱۲
۲	۵.۷۰E-۰۱	۱.۴۹E-۰۳	۲.۳۷E-۰۶	۲.۵۴E-۰۹	۱.۹۸E-۱۲
۳	۵.۶۸E-۰۱	۱.۴۸E-۰۳	۲.۳۴E-۰۶	۲.۵۰E-۰۹	۱.۹۴E-۱۲
۴	۵.۶۲E-۰۱	۱.۴۵E-۰۳	۲.۲۷E-۰۶	۲.۴۰E-۰۹	۱.۷۹E-۱۲
۵	۵.۵۷E-۰۱	۱.۴۲E-۰۳	۲.۲۱E-۰۶	۲.۳۱E-۰۹	۱.۷۱E-۱۲
۶	۵.۵۵E-۰۱	۱.۴۱E-۰۳	۲.۱۸E-۰۶	۲.۲۸E-۰۹	۱.۶۹E-۱۲
۷	۵.۵۰E-۰۱	۱.۳۹E-۰۳	۲.۱۳E-۰۶	۲.۲۰E-۰۹	۱.۶۲E-۱۲
۸	۵.۴۶E-۰۱	۱.۳۷E-۰۳	۲.۰۸E-۰۶	۲.۱۳E-۰۹	۱.۵۷E-۱۲
۹	۵.۴۴E-۰۱	۱.۳۶E-۰۳	۲.۰۶E-۰۶	۲.۱۰E-۰۹	۱.۵۰E-۱۲
۱۰	۵.۴۰E-۰۱	۱.۳۴E-۰۳	۲.۰۱E-۰۶	۲.۰۴E-۰۹	۱.۴۸E-۱۲
۱۱	۵.۳۳E-۰۱	۱.۳۰E-۰۳	۱.۹۴E-۰۶	۱.۹۴E-۰۹	۱.۳۳E-۱۲
۱۲	۵.۳۰E-۰۱	۱.۲۹E-۰۳	۱.۹۰E-۰۶	۱.۸۹E-۰۹	۱.۳۷E-۱۲
۱۳	۵.۲۳E-۰۱	۱.۲۶E-۰۳	۱.۸۳E-۰۶	۱.۸۰E-۰۹	۱.۲۵E-۱۲
۱۴	۵.۲۲E-۰۱	۱.۲۵E-۰۳	۱.۸۲E-۰۶	۱.۷۹E-۰۹	۱.۲۳E-۱۲
۱۵	۵.۱۹E-۰۱	۱.۲۴E-۰۳	۱.۷۹E-۰۶	۱.۷۵E-۰۹	۱.۲۰E-۱۲
۱۶	۵.۱۴E-۰۱	۱.۲۱E-۰۳	۱.۷۳E-۰۶	۱.۶۷E-۰۹	۱.۱۲E-۱۲

جدول ۳- بیشینه درصد خطا در بررسی آسیب ناپذیری شبکه از درجه یک برای هر یک از ۱۶ طرح با در نظر گرفتن ترکیبات شکست مختلف

شماره طرح	بیشینه خطا در محاسبات آسیب ناپذیری شبکه از درجه یک (%)			
	F=۱	F=۲	F=۳	F=۴
۱	۲.۶۵E-۰۱	۴.۲۷E-۰۴	۴.۶۳E-۰۷	۳.۵۷E-۱۰
۲	۲.۶۲E-۰۱	۴.۱۶E-۰۴	۴.۴۵E-۰۷	۳.۴۴E-۱۰
۳	۲.۶۱E-۰۱	۴.۱۲E-۰۴	۴.۴۰E-۰۷	۳.۴۱E-۱۰
۴	۲.۵۸E-۰۱	۴.۰۴E-۰۴	۴.۲۷E-۰۷	۳.۲۰E-۱۰
۵	۲.۵۶E-۰۱	۳.۹۷E-۰۴	۴.۱۵E-۰۷	۳.۰۶E-۱۰
۶	۲.۵۵E-۰۱	۳.۹۴E-۰۴	۴.۱۱E-۰۷	۳.۰۴E-۱۲
۷	۲.۵۳E-۰۱	۳.۸۷E-۰۴	۴.۰۰E-۰۷	۲.۹۴E-۱۰
۸	۲.۵۱E-۰۱	۳.۸۱E-۰۴	۳.۹۱E-۰۷	۲.۸۷E-۱۰
۹	۲.۵۰E-۰۱	۳.۷۸E-۰۴	۳.۸۷E-۰۷	۲.۷۷E-۱۰
۱۰	۲.۴۸E-۰۱	۳.۷۳E-۰۴	۳.۷۸E-۰۷	۲.۷۵E-۱۰
۱۱	۲.۴۵E-۰۱	۳.۶۳E-۰۴	۳.۶۴E-۰۷	۲.۵۴E-۱۰
۱۲	۲.۴۳E-۰۱	۳.۵۹E-۰۴	۳.۵۷E-۰۷	۲.۵۲E-۱۰
۱۳	۲.۴۰E-۰۱	۳.۵۰E-۰۴	۳.۴۵E-۰۷	۲.۴۲E-۱۰
۱۴	۲.۴۰E-۰۱	۳.۴۹E-۰۴	۳.۴۳E-۰۷	۲.۳۷E-۱۰
۱۵	۲.۳۸E-۰۱	۳.۴۵E-۰۴	۳.۳۶E-۰۷	۲.۳۰E-۱۰
۱۶	۲.۳۶E-۰۱	۳.۳۷E-۰۴	۳.۲۶E-۰۷	۲.۲۰E-۱۰

جدول ۴- حداکثر درصد خطا در بررسی آسیب ناپذیری شبکه از درجه دو برای هر یک از ۱۶ طرح با در نظر گرفتن ترکیبات شکست مختلف

شماره طرح	بیشینه خطا در محاسبات آسیب ناپذیری شبکه از درجه دو (%)		
	F=۲	F=۳	F=۴
۱	۱.۶۱E-۰۱	۱.۷۵E-۰۴	۱.۳۵E-۰۷
۲	۱.۵۹E-۰۱	۱.۷۰E-۰۴	۱.۳۱E-۰۷
۳	۱.۵۸E-۰۱	۱.۶۹E-۰۴	۱.۳۰E-۰۷
۴	۱.۵۷E-۰۱	۱.۶۵E-۰۴	۱.۲۴E-۰۷
۵	۱.۵۵E-۰۱	۱.۶۲E-۰۴	۱.۲۰E-۰۷
۶	۱.۵۵E-۰۱	۱.۶۱E-۰۴	۱.۲۰E-۰۷
۷	۱.۵۳E-۰۱	۱.۵۸E-۰۴	۱.۱۷E-۰۷
۸	۱.۵۲E-۰۱	۱.۵۶E-۰۴	۱.۱۵E-۰۷
۹	۱.۵۱E-۰۱	۱.۵۵E-۰۴	۱.۱۰E-۰۷
۱۰	۱.۵۰E-۰۱	۱.۵۳E-۰۴	۱.۱۰E-۰۷
۱۱	۱.۴۸E-۰۱	۱.۴۹E-۰۴	۱.۰۳E-۰۷
۱۲	۱.۴۷E-۰۱	۱.۴۷E-۰۴	۱.۰۴E-۰۷
۱۳	۱.۴۶E-۰۱	۱.۴۳E-۰۴	۱.۰۱E-۰۷
۱۴	۱.۴۵E-۰۱	۱.۴۳E-۰۴	۹.۹۴E-۰۸
۱۵	۱.۴۵E-۰۱	۱.۴۱E-۰۴	۹.۶۹E-۰۸
۱۶	۱.۴۳E-۰۱	۱.۳۸E-۰۴	۹.۳۵E-۰۸

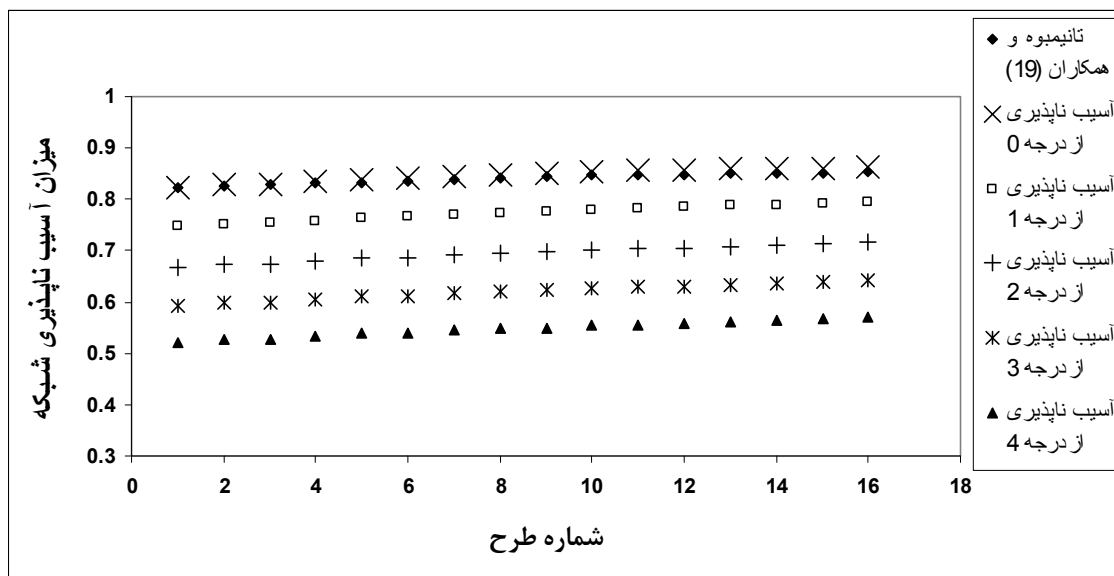
جدول ۵- حداکثر درصد خطا در بررسی آسیب ناپذیری شبکه از درجه سه برای هر یک از ۱۶ طرح با در نظر گرفتن ترکیبات شکست مختلف بیشینه خطا در محاسبات آسیب ناپذیری شبکه از درجه سه (%)

شماره طرح	F=۳	F=۴
۱	۱.۲۶E-۰۱	۱.۱۷E-۰۴
۲	۱.۲۴E-۰۱	۱.۱۴E-۰۴
۳	۱.۲۴E-۰۱	۱.۱۳E-۰۴
۴	۱.۲۳E-۰۱	۱.۱۱E-۰۴
۵	۱.۲۲E-۰۱	۱.۰۹E-۰۴
۶	۱.۲۱E-۰۱	۱.۰۸E-۰۴
۷	۱.۲۰E-۰۱	۱.۰۶E-۰۴
۸	۱.۱۹E-۰۱	۱.۰۵E-۰۴
۹	۱.۱۹E-۰۱	۱.۰۴E-۰۴
۱۰	۱.۱۸E-۰۱	۱.۰۳E-۰۴
۱۱	۱.۱۶E-۰۱	۹.۹۹E-۰۵
۱۲	۱.۱۶E-۰۱	۹.۸۷E-۰۵
۱۳	۱.۱۴E-۰۱	۹.۶۴E-۰۵
۱۴	۱.۱۴E-۰۱	۹.۶۰E-۰۵
۱۵	۱.۱۳E-۰۱	۹.۴۸E-۰۵
۱۶	۱.۱۲E-۰۱	۹.۲۸E-۰۵

جدول ۶- حداکثر درصد خطا در بررسی آسیب ناپذیری شبکه از درجه چهار برای هر یک از ۱۶ طرح بیشینه خطا در محاسبات آسیب ناپذیری شبکه از درجه چهار (%)

شماره طرح	F=۴
۱	۱.۱۴E-۰۱
۲	۱.۱۳E-۰۱
۳	۱.۱۲E-۰۱
۴	۱.۱۱E-۰۱
۵	۱.۱۰E-۰۱
۶	۱.۱۰E-۰۱
۷	۱.۰۹E-۰۱
۸	۱.۰۸E-۰۱
۹	۱.۰۸E-۰۱
۱۰	۱.۰۷E-۰۱
۱۱	۱.۰۶E-۰۱
۱۲	۱.۰۵E-۰۱
۱۳	۱.۰۴E-۰۱
۱۴	۱.۰۳E-۰۱
۱۵	۱.۰۳E-۰۱
۱۶	۱.۰۲E-۰۱





شکل ۲- نتایج بررسی آسیب ناپذیری با درجه های خرابی مختلف برای ۱۶ طرح شبکه

شبکه، میزان آسیب ناپذیری شبکه از درجه های مختلف کاهش پیدا می کند. این مسئله بسیار مهم می باشد و طراحان همزمان با بهینه سازی شبکه های توزیع آب شهری و استفاده از کمترین قطر لوله های موجود در بازار جهت پایین آوردن هزینه ها، بهتر است میزان آسیب ناپذیری شبکه ها را نیز بررسی کنند. عدم توجه به این موضوع ممکن است باعث شود که شبکه طراحی شده نتواند وظیفه خود را که آبرسانی به مصرف کننده ها است در تمامی شرایط بخوبی انجام دهد. همچنین نتایج نشان داد که با محاسبه میزان کاهش در مقدار آسیب ناپذیری یک شبکه با افزایش درجه خرابی می توان از نرخ کاهش اعتمادی که به سیستم از لحاظ برآورد نیاز مصرف کنند با افزایش وقوع شکست های همزمان تحمیل می شود اطلاع پیدا کرد. این نرخ کاهش می تواند بعنوان یک پارامتر در طراحی شبکه ها جهت انتخاب بهترین طرح مد نظر قرار گیرد. بطور مثال اگر جهت طراحی شبکه توزیع آب در منطقه ای گزینه های مختلفی وجود دارد، توصیه می گردد که این نرخ کاهش در طرح های مختلف توسط مهندس طراح محاسبه و نتایج آن با هم مقایسه گردد و بهترین طرح از شبکه با کمترین نرخ کاهش که کمترین حساسیت نسبت به خرابی های همزمان را نشان دهد انتخاب گردد.

این بدین معنی می باشد که در شبکه مورد مطالعه در این تحقیق با افزایش تعداد خرابی های همزمان در سیستم حدود هفت درصد از میزان اعتمادی که به سیستم از لحاظ برآورد نیاز مصرف کنندگان می توان داشت، کاسته می شود. این شاخص نیز می تواند بعنوان یک معیار در طراحی شبکه ها جهت انتخاب بهترین طرح برای شبکه، مد نظر قرار گیرد و با محاسبه و مقایسه این شاخص در طرح های مختلف می توان بهترین طرح از شبکه که کمترین حساسیت نسبت به خرابی های همزمان دارد را انتخاب کرد.

### نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که با استفاده از معادلات استخراج شده در این تحقیق و تخمین میزان خطای احتمالی در محاسبات آسیب ناپذیری شبکه ها با درجه خرابی های مختلف قبل از انجام هرگونه شبیه سازی هیدرولیکی می توان بطور چشمگیری جلوی محاسبات اضافی که گاهی ممکن است بسیار سنگین و وقت گیر هم باشند را گرفت و محاسبه میزان آسیب ناپذیری شبکه ها با درجه های خرابی مختلف را بسیار آسان تر انجام داد. همچنین نتایج نشان داد که به تدریج با کاهش قطر لوله های

### منابع

- 1- Al-Zahrani M.A., and Laiq-Syed J. 2005. Evaluation of Municipal water distribution system reliability using minimum cut-set method. Journal of King Saud University, 18: 67-82.
- 2- Cullinane M.J., Lansey K., and Basnet C. 1989. Water distribution system design considering component failure during static conditions. p. 762-767. In Proceedings of the National Conference on Hydraulic Engineering, 14-18 August. 1989. New York, USA.

- 3- Cullinane M.J., Lansey K.E., and Mays L.W. 1992. Optimization-availability-based design of water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118: 420-441.
- 4- Fujiwara O., and De Silva A.U. 1990. Algorithm for reliability-based optimal design of water distribution networks. *Journal of Environmental Engineering*, 116: 575-587.
- 5- Fujiwara O., and Tung H.D. 1991. Reliability improvement for water distribution network through improving pipe size. *Water Resources Research*, 27: 1395-1402.
- 6- Gargano R., and Pianese D. 1998. Influence of hydraulic and mechanical reliability on the overall reliability of water networks. In *Proceedings of the 26th Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, 9-12 September. 1998. Catania, Italy.
- 7- Gargano R., and Pianese D. 2000. Reliability as tool for hydraulic network planning. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126: 354-364.
- 8- Gheisi A.R., and Naser Gh. 2012. On the significance of maximum number of component failures in reliability analysis of water distribution systems. Accepted for publication in *Urban Water journal*.
- 9- Goulter I.C., and Kazemi A. 1989. Analysis of water distribution pipe failure types in Winnipeg, Canada. *Journal of Transportation Engineering*, 115: 95-111.
- 10- Kalungi P., and Tanyimboh T.T. 2003. Redundancy model for water distribution systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 18: 275-286.
- 11- Kansal M.L., and Arora G. 2002. Discussion of Reliability as a tool for hydraulic network planning. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128: 127-127.
- 12- Ostfeld A. 2004. Reliability analysis of water distribution systems. *Journal of Hydroinformatics*, 6: 281-294.
- 13- Pathirana A. 2010. EPANET2 desktop application for pressure driven demand modeling. p. 65-74. In *Proceedings of the 12th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium*, 12-15 September. 2002. Tuscon, AZ, USA.
- 14- Rossman L.A. 2000. EPANET User's Manual. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- 15- Su Y., Mays L.W., Duan N., and Lansey K.E. 1987. Reliability-based optimization model for water distribution systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114: 1539-1556.
- 16- Tabesh M. 1998. Implications of the pressure dependency of outflows on data management, mathematical modeling and reliability assessment of water distribution systems. Thesis (PhD). University of Liverpool, England.
- 17- Tanyimboh T., and Sheahan C. 2002. A maximum entropy based approach to the layout optimization of water distribution systems. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 19: 223-253.
- 18- Tanyimboh T.T., and Templeman A.B. 1998. Calculating the reliability of single-source networks by the source head method. *Advances in Engineering Software*, 29: 499-505.
- 19- Tanyimboh T.T., Tabesh M., and Burrows R. 2001. Appraisal of source head methods for calculating the reliability of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127: 206-213.



## Damage Tolerance Analysis of Water Distribution Networks with Different Orders of Failure

A.R. Gheisi<sup>1\*</sup>- A.N. Ziaei<sup>2</sup> – S.R. Khodashenas<sup>3</sup>

Received: 31-07-2012

Accepted: 11-08-2013

### Abstract

Damage or failure is an inevitable event which should be considered in all decisions taken at planning-, design-, operation- and maintenance-level for a water distribution network (WDN). So far several studies are conducted about reliability analysis in literature, but very little attention is paid to the damage tolerance analysis (DTA) of WDNs with different orders of failures. This may be due to the heavy and extremely time consuming computational workloads commonly required for DTA. In this study required relationships for DTA of WDNs with different orders of failure are derived. Additionally some equations are proposed to estimate the possible errors in these relationships. Then an attempt was made to evaluate the damage tolerance of sixteen designs of a hypothetical WDN with different orders of failure. The results indicate that application of the proposed equations of this study could significantly prevent redundant and unnecessary hydraulic simulations which may complicate the DTA of WDNs. Moreover the results reveal that the tolerance of the WDN to various orders of failures gradually decreases by decreasing the diameters of pipes. Comparing the damage tolerance of a network with different orders of failure, one could estimate the sensitivity of a WDN to simultaneous failures.

**Keywords:** Water Distribution Network, Damage tolerance, Hydraulic simulation, Failure probability

---

1,2,3- PhD Student, Assistant Professor and Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively  
(\*- Corresponding Author Email: alirezagheisi@gmail.com)