کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران
دانشگاه تهران، تهران
۲۶ و ۲۷ بهمن‌ماه ۱۳۹۵

1082O-NWWCE
قابلیت اعتماد تلفیقی هیدرولیکی و مکانیکی شبکه توزیع آب شهری

نازلی مهزاد[۱]، کیوان اصغری[۲]

۱-دانشجوی دکتری مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲-دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

n.mehzad@cv.iut.ac.ir

خلاصه

بررسی عملکرد شبکه‌های توزیع آب از موضوعاتی است که در بهینه‌سازی این شبکه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. قابلیت اعتماد شبکه توزیع آب بیانگر عملکرد آن‌ها می‌باشد و نشان‌دهنده توانایی شبکه برای رساندن آب کافی با کیفیت مناسب به مصرف‌کنندگان در زمان مناسب است. قابلیت اعتماد از جنبه‌های مکانیکی، هیدرولیکی و کیفی در اثر شکست‌های مکانیکی و هیدرولیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این پژوهش قابلیت اعتماد هیدرولیکی از جنبه برآورده شدن تقاضای گرهی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به این منظور شبیه‌سازی مبتنی بر فشار بر پایه الگوریتم EPANET-IMNO انجام می‌شود. همچنین قابلیت اعتماد مکانیکی با استفاده از روش BDD (Binary Decision Diagram) از جهت احتمال ارتباط گره‌های مصرف شبکه با گره‌های منبع مورد بررسی قرار می‌گیرد. نرم‌افزار DNA و RNA برای محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی شامل روش BDD استفاده می‌شود. در نهایت قابلیت اعتماد تلفیقی هیدرولیکی و مکانیکی شبکه ارائه می‌شود. در روند محاسبه قابلیت اعتماد شبکه، شکست لوله‌های شبکه بررسی می‌شود. شبکه توزیع آب ۹ گره‌ای و همین‌طور شبکه توزیع آب Anytown برای مقایسه و ارزیابی روش ارائه شده، در نظر گرفته شده است.

کلمات کلیدی: شبکه توزیع آب، قابلیت اعتماد هیدرولیکی، قابلیت اعتماد مکانیکی، BDD، شبیه‌سازی مبتنی بر فشار.

۱. مقدمه

شبکه‌های توزیع آب از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین زیرساخت‌های شهری بوده که عملکرد مناسب آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. قابلیت اعتماد از جمله شاخص‌های برآورد عملکرد شبکه‌ها است که به عنوان توانایی شبکه برای فراهم کردن آب کافی با کیفیت مناسب معرفی شده است. قابلیت اعتماد از جنبه‌های مختلف هیدرولیکی، مکانیکی و کیفی در شرایط عادی و غیرعادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. قابلیت اعتماد صفت ذاتی هر سیستمی است و هیچ سیستمی به طور کامل قابل اطمینان نیست. در هر سیستمی اتفاقات ناخواسته مانند شکست لوله‌ها، شیرآلات و پمپ‌ها منجر به بر هم خوردن کارایی آن می‌شود [1]. در کل، قابلیت اعتماد شبکه‌های توزیع آب وابسته به دو نوع شکست هیدرولیکی و مکانیکی است. شکست مکانیکی شامل خرابی اجزای مختلف شبکه مانند لوله‌ها، شیرآلات و پمپ‌ها و شکست هیدرولیکی در اثر تغییرات در تقاضا و غیره اتفاق می‌افتد. بررسی قابلیت اعتماد سیستم‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است زیرا یک اتفاق ساده می‌تواند نتایج فاجعه‌باری در پی داشته باشد.

در سال‌های اخیر محققان به محاسبه قابلیت اعتماد هیدرولیکی شبکه بر مبنای درصد تقاضای گرهی برآورده شده گرهی در اثر شکست یک لوله با استفاده از شبیه‌سازی مبتنی بر فشار پرداخته‌اند[2-3]. همین‌طور با بررسی شکست لوله‌ها، پمپ‌ها و شیرآلات، میزان قابلیت اعتماد هیدرولیکی بر اساس درصد تقاضای تأمین شده گرهی با استفاده از شبیه‌ساز مبتنی بر فشار محاسبه شده است [4]. قابلیت اعتماد شبکه توزیع آب با استفاده از شبیه‌ساز مبتنی بر تقاضای EPANET2.0 به صورت استاتیکی نیز با بررسی احتمال شکست مکانیکی یک تا سه لوله ارزیابی شده است [5-6]. در هر بار شبیه‌سازی با بررسی ترکیبی از شکست لوله‌ها، در صورتی که فشار گره‌ها کم‌تر از فشار حداقل بوده و یا کلا ارتباط فیزیکی شبکه قطع شده باشد، ترکیب

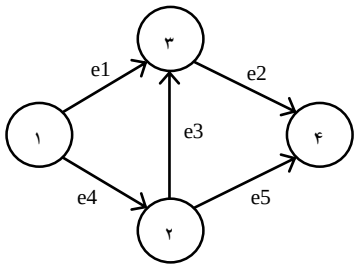
شکست مذکور به عنوان Minimum Cut Set در نظر گرفته شده و با روش Inclusion- Exclusion قابلیت اعتماد شبکه محاسبه می‌شود. نقطه ضعف این پژوهش استفاده از شبیه‌ساز مبتنی بر تقاضا و آن هم به صورت تحلیل استاتیکی بوده است. در سال‌های بعد با استفاده از شبیه‌ساز مبتنی بر فشار نقطه ضعف پژوهش‌های پیشین برطرف شده است [7]. در سال‌های بعد به منظور ارائه قابلیت اعتماد کلی شبکه توزیع آب، رویکردی بر مبنای فشار گرهی و کیفیت و کمیت آب قابل دسترس گرهی ارائه شده است [8]. این پژوهشگران از شبیه‌ساز مبتنی بر تقاضا برای تحلیل هیدرولیکی شبکه استفاده نمودند که نمی‌تواند نتایج دقیقی ارائه دهد. محققان دیگری با شبیه‌سازی مبتنی بر فشار به صورت تحلیل استاتیکی به تعریف شاخص جدیدی برای قابلیت اعتماد شبکه پرداختند [9]. این پژوهشگران ترکیب دو شاخص قابلیت اعتماد گرهی و قابلیت اعتماد لوله‌ای را به عنوان قابلیت اعتماد کلی در نظر گرفتند. قابلیت اعتماد گرهی بر اساس درصد تأمین تقاضای گرهی و قابلیت اعتماد لوله‌ای نیز بر اساس افت فشار گرهی تعریف شده است.

قابلیت اعتماد هیدرولیکی شبکه با در نظر گرفتن سرعت آب در لوله‌ها به صورت تابع فازی مثلثی با شبیه‌ساز EPANET2.0 نیز مورد بررسی قرار گرفته است [10]. همچنین قابلیت اعتماد هیدرولیکی با بررسی سرعت آب در لوله‌ها به صورت فازی نیز با استفاده از شبیه‌ساز مبتنی بر تقاضای EPANET2.0 مورد ارزیابی قرار گرفته است [11]. در سال ۲۰۱۱، قابلیت اعتماد هیدرولیکی به صورت تابع عضویت ذوزنقه‌ای درصد فشار گره‌ای موجود با استفاده از نرم‌افزار EPANET2.0 ارزیابی شده است [12]. در سال ۲۰۱۴، قابلیت اعتماد هیدرولیکی شبکه با شبیه‌ساز مبتنی بر فشار EPANET-emitter بر اساس درصد تقاضای گرهی برآورده شده محاسبه شده است [13].

در پژوهش حاضر به بررسی قابلیت اعتماد هیدرولیکی و مکانیکی شبکه توزیع آب در اثر شکست یک لوله در هر بار شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. به این منظور شبیه‌سازی شبکه با استفاده از شبیه‌ساز مبتنی بر فشار بر پایه EPANET-IMNO و بر اساس رابطه دبی- فشار Wagner و همکاران در سال ۱۹۹۸ انجام می‌شود. همچنین قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه بر اساس روش BDD با ابزار DNA (Dependable Network Analyzer) برای شبکه تا ۲۰ گره و از ابزار NRA (Network Reliability Analyzer) برای شبکه با بیش از ۲۰ گره محاسبه خواهد شد.

۲. روش تحقیق

قابلیت اعتماد مکانیکی در شبکه‌ها با روش‌های مختلفی محاسبه می‌شوند. روش‌های محاسبه قابلیت اعتماد در شبکه‌ها احتمال رسیدن آب از یک گره مبدا به یک گره مقصد را محاسبه می‌نمایند. در واقع قابلیت اعتماد شبکه، احتمال این است که همه گره‌ها و یا زیرمجموعه‌ای از گره‌های گراف حداقل به وسیله یک مسیر عملکردی با یکدیگر در ارتباط باشند. گراف شبکه‌ها در محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی نقش اساسی دارد. شبکه می‌تواند در قالب گراف G= (V,E) بیان شود که در آن سری گره‌ها با V و سری لینک‌ها با E نمایش داده می‌شوند. حالت اعضا به وسیله در حال عملکرد (up) و غیر دسترس (Down) تعریف می‌شوند. گراف می‌تواند جهت‌دار (Directed) و یا بدون جهت (Undirected) باشد. گراف‌های بدون جهت به صورت دوطرفه و گراف‌های جهت‌دار یک‌طرفه عمل می‌کنند. گراف شبکه ساده‌ای که شامل ۴ گره می‌باشد و ارتباط بین گره‌ها از نوع یک‌طرفه می‌باشد به صورت شکل ۱ قابل نمایش است.

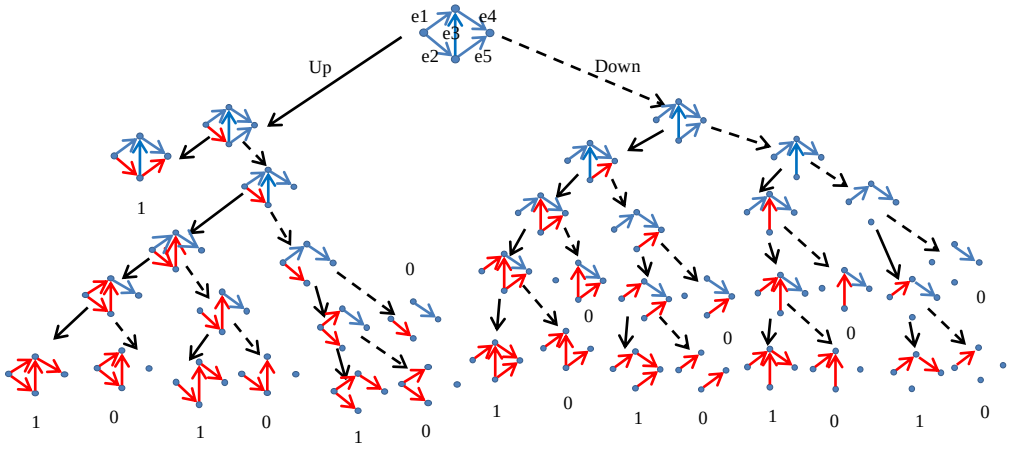


شکل ۱- گراف شبکه‌ای با ٤ گره و به صورت یک‌طرفه

روش‌های مختلفی برای ارزیابی قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه‌ها وجود دارد. در سیستم‌های سری و موازی قابلیت اعتماد شبکه به سادگی قابل محاسبه می‌باشد. در سیستم‌های سری در اثر عمل نکردن یک عضو، کل شبکه نمی‌تواند عمل نماید. در چنین سیستمی قابلیت اعتماد شبکه از قابلیت اعتماد ضعیف‌ترین عضو آن کم‌تر است. در سیستم‌های موازی، در اثر عمل نکردن یک جز، سیستم از کار نمی‌افتد و قابلیت اعتماد شبکه از قابلیت اعتماد تک

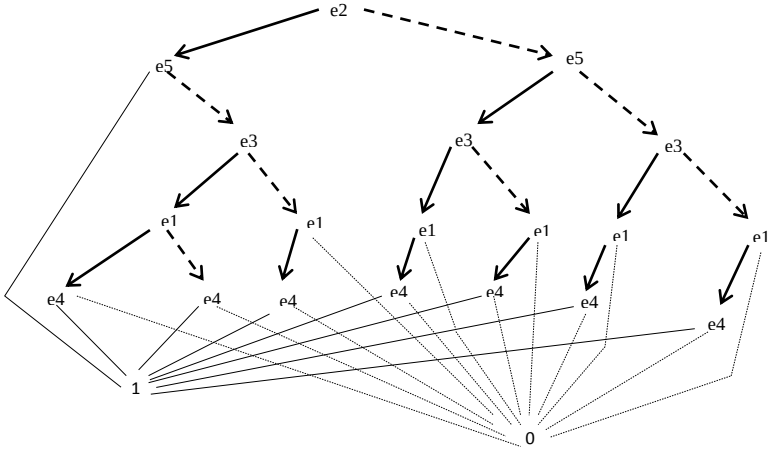
تک اجزا بیشتر می‌باشد. برای سیستم‌های پیچیده، روش‌های مختلفی برای محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی وجود دارد. از جمله این روش‌ها، Complete State Enumeration، Factoring Method، Minpaths and Mincuts، The Inclusion-Exclusion Method، Sum of Disjoint Products Method و Binary Decision Diagrams (BDD) می‌باشند.

روش BDD بر مبنای نشان دادن گراف درخت شبکه تجزیه شده می‌باشد. در این روش بر مبنای عملکرد و یا عدم عملکرد هر جز، گراف درخت شبکه قابل ترسیم می‌باشد. گراف درخت شبکه شکل ۱ با ترتیب بررسی اجزای e2< e5< e3< e1< e4 به صورت شکل ۲ قابل رسم می‌باشد. لازم به ذکر است که در این شبکه گره شماره ۱ به عنوان گره مبدا و گره شماره ۴ به عنوان گره مصرف می‌باشد.



شکل ۲- درخت گراف BDD شبکه شکل ۱- خطوط خط چین عدم عملکرد عضو و خطوط ممتد عملکرد عضو را نشان می‌دهند.

گام بعدی در محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه با استفاده از این رویکرد، ادغام شاخه‌های یکسان به عنوان گام Ordered BDD Tree (ROBDD) می‌باشد. گراف درخت شبکه در این گام به صورت شکل ۳ می‌باشد.

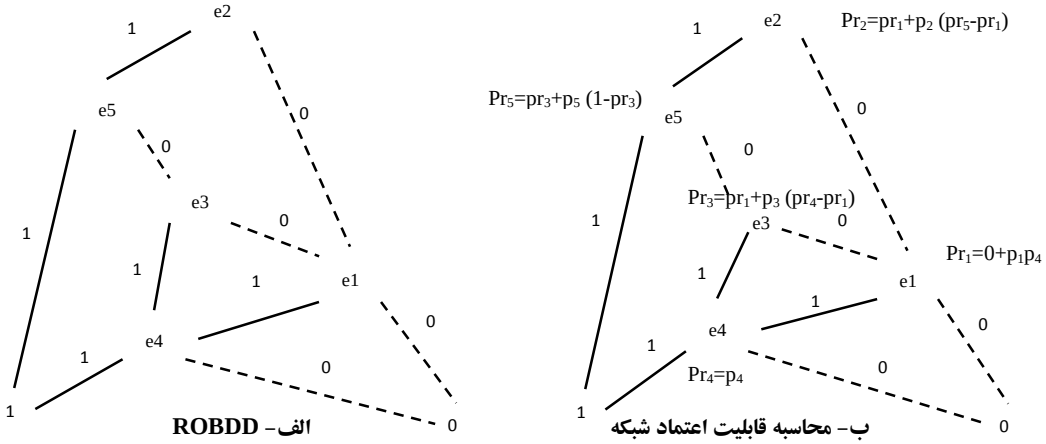


شکل ۳- Ordered BDD Tree

به منظور کاهش ابعاد گراف و محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه از BDD کاهش یافته یا همان Reduced OBDD (ROBDD) استفاده می‌شود. درخت مذکور در شکل ۴ (الف) مشخص است. با استفاده از درخت کاهش یافته نشان داده شده در شکل ۴ (الف) می‌توان محاسبات مربوط به قابلیت اعتماد را مطابق با شکل ۴ (ب) انجام داد و در نهایت قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه به صورت رابطه ۱ قابل محاسبه می‌باشد.

$$P\{F\} = P\{Fx1=0\} + p1\,(P\{Fx1=1\}-P\{Fx1=0\})$$

$$R(s,t)=p_1p_4+p_2p_3p_4+p_2p_5-p_1p_2p_3p_4-p_2p_3p_4p_5-p_1p_2p_4p_5+p_1p_2p_3p_4p_5 \quad (1)$$



الف- ROBDD ب- محاسبه قابلیت اعتماد شبکه

شکل ٤- درخت کاهش یافته و محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه

با توجه به کارایی روش ارائه شده در یافتن قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه، در این مطالعه به منظور محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه توزیع آب شهری از این الگوریتم استفاده می‌شود. از جمله نرم‌افزارهایی که با استفاده از روش BDD قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه را محاسبه می نماید، نرم‌افزار DNA است [15]. این نرم افزار توانایی محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه‌ای تا ۲۰ گره را دارد. برای شبکه‌های بزرگ‌تر از ابزار NRA استفاده خواهد شد [16]. اگرچه با ایجاد مسیرهای بین گره‌ها و به عبارتی بالا بردن قابلیت اعتماد مکانیکی، شرط لازم برای برآورده کردن سرویس مناسب برای مصرف‌کنندگان فراهم می‌شود ولی شرط کافی برای یک شبکه توزیع آب که همان قابلیت اعتماد هیدرولیکی است نیاز به بررسی دارد [17]. هرچند هر دو رویکرد قابلیت اعتماد مکانیکی و هیدرولیکی مزایا و محدودیت‌های خود را دارند، ترکیب این دو رویکرد در کنار هم در ارزیابی صحیح‌تر قابلیت اعتماد شبکه موثر خواهد بود. قابلیت اعتماد هیدرولیکی در این پژوهش نسبت برآورده شدن تقاضای گرهی بوده که بر اساس مدل‌سازی شبکه توزیع آب با استفاده از شبیه‌ساز مبتنی بر فشار EPANET-IMNO به صورت دوره گسترده به دست می‌آید [18]. بر این اساس قابلیت اعتماد هیدرولیکی بر اساس نسبت تقاضای گرهی برآورده شده مطابق با روابط ۲ و ۳ به دست می‌آید.

$$HR_{i,t}{}^{demand} = \frac{Q_{i,t}^{avl}}{Q_{i,t}^{req}} \quad (2)$$

$$HR_t{}^{demand} = \frac{\sum_{i=1}^{N} HR_{i,t}{}^{demand}}{N} \quad (3)$$

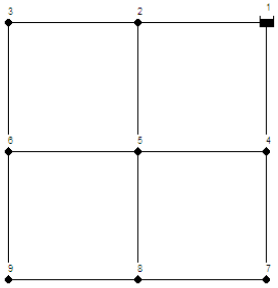
در این روابط، $HR_{i,t}{}^{demand}$ و $HR_t{}^{demand}$ به ترتیب قابلیت اعتماد هیدرولیکی گره i و کل شبکه در زمان t بر اساس دبی خروجی گرهی هستند. $Q_{i,t}^{avl}$ و $Q_{i,t}^{req}$ به ترتیب دبی خروجی از گره i در زمان t و تقاضای گره i در زمان t هستند. همچنین در رابطه ۳، N تعداد گره‌های تقاضای شبکه توزیع آب می‌باشد. در رابطه ۳ مقدار $HR_t{}^{demand}$ که همان قابلیت اعتماد هیدرولیکی بر اساس تقاضا می‌باشد، بین صفر و یک تغییر می‌یابد. هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده قابلیت بالاتر شبکه در برآورده کردن تقاضای مورد نیاز مصرف‌کنندگان از لحاظ کمی است. در این پژوهش قابلیت اعتماد کلی شبکه، تلفیق قابلیت اعتماد مکانیکی و هیدرولیکی بر اساس تقاضای گرهی برآورده شده به صورت رابطه ۴ تعریف می‌شود.

$$R_{total} = \frac{\sum_{\text{تعداد سناریوهای شکست}} (HR^{demand} \times MR)}{\text{تعداد لوله‌ها}} \quad (4)$$

در این رابطه HR^{demand}، میانگین قابلیت اعتماد هیدرولیکی شبکه بر اساس تقاضا در زمان‌های مختلف در هر سناریو و MR قابلیت اعتماد مکانیکی در هر سناریو است. همچنین R_{total}، قابلیت اعتماد تلفیقی هیدرولیکی و مکانیکی است. همچنین سناریو شکست یک لوله در هر بار شبیه‌سازی مدنظر این پژوهش است.

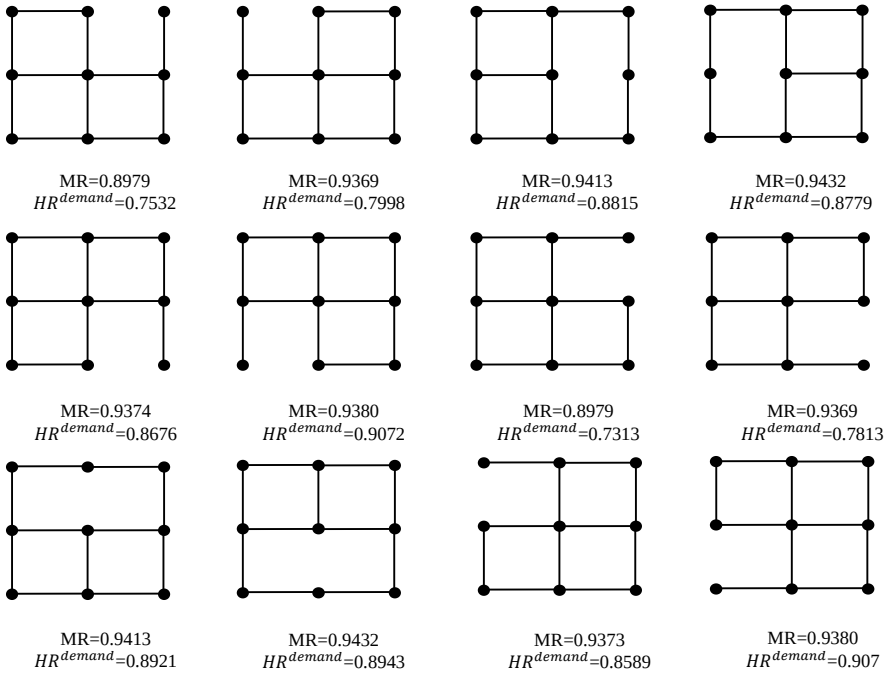
۳. مطالعه موردی

به عنوان اولین مطالعه موردی، به منظور محاسبه قابلیت اعتماد هیدرولیکی و مکانیکی تلفیقی، شبکه توزیع آب شامل ۸ گره تقاضا و یک تانک مطابق با پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد [19]. شمای کلی این شبکه در شکل ۵ نشان داده شده است. مشخصات اجزای شبکه در پژوهش Tabesh در سال ۱۹۹۸ قابل دستیابی است.



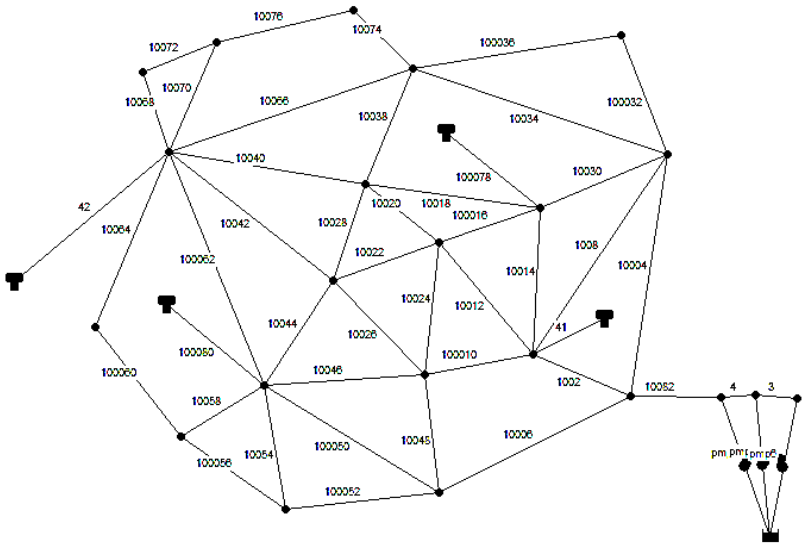
شکل ۵- شبکه توزیع آب Tabesh (1998)

تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار شبکه توزیع آب مذکور با استفاده از الگوریتم EPNAET-IMNO به صورت دینامیکی انجام شده است. به منظور تحلیل هیدرولیکی دینامیکی، الگوی مصرف ۲۴ ساعته استفاده شده است. همچنین به منظور تغییرات تراز ارتفاعی از تانک به صورت جایگزین برای مخزن استفاده می‌شود که دارای مساحت ۲۵۰۰ متر مربع می‌باشد. به منظور محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی با بررسی شکست لوله‌ها، در هر بار با فرض نرخ شکست یک لوله به مقدار یک، نرم افزار DNA اجرا شده و قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه در اثر شکست آن لوله محاسبه می‌شود. در شکل ۶، سناریوهای مختلف شکست و مقدار قابلیت اعتماد مکانیکی مربوطه ارائه شده است. قابلیت اعتماد هیدرولیکی نسبت تقاضای برآورده شده نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۶، قابلیت اعتماد تلفیقی این شبکه برابر با ۰٫۷۸۹۶ خواهد بود.



شکل ٦- سناریوهای مختلف شکست و قابلیت اعتماد هیدرولیکی و مکانیکی مربوط به هر سناریو

به عنوان مطالعه موردی دوم، شبکه توزیع آب Anytown مورد بررسی قرار می‌گیرد [20]. شمای کلی این شبکه مطابق با شکل ۷ می‌باشد. نتایج قابلیت اعتماد هیدرولیکی و مکانیکی با شکست یک لوله در هر بار شبیه‌سازی و با احتمال شکست لوله‌ها برابر با ۰٫۰۵ در جدول ۱ مشخص شده است. همان‌طور که از این جدول مشخص است به دلیل وجود حلقه‌های متعدد در شبکه توزیع آب مذکور، شکست یک لوله در هر بار شبیه‌سازی تاثیر چندانی بر قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه نخواهد داشت. در صورتی که شبکه توزیع آب شاخه‌ای مورد بررسی قرار گیرد، شکست یک لوله در شبیه‌سازی شبکه تاثیر بسزایی خواهد گذاشت.



شکل ۷- شبکه توزیع آب Anytown

جدول ۱- قابلیت اعتماد هیدرولیکی و مکانیکی شبکه توزیع آب Anytown در هر سناریو

شکست لوله	10066	10036	100036	10032	100032	10030	10020	10016	100016	10014	10018	10028	10022	10024	10048	10060	100060	10064	10038	100080	10078	100078	10074	10076	10068	10072	10070	41	10054
قابلیت اعتماد هیدرولیکی	0.7611	0.7634	0.7636	0.7644	0.7692	0.7629	0.7632	0.7633	0.7633	0.7651	0.7629	0.7632	0.7636	0.7638	0.7638	0.7626	0.7623	0.7642	0.7593	0.7630	0.7631	0.7631	0.7360	0.7619	0.7639	0.7630	0.7639	0.7631	0.7631
قابلیت اعتماد مکانیکی	0.941	0.9464	0.9464	0.942	0.942	0.947	0.947	0.948	0.948	0.9485	0.9485	0.948	0.9482	0.9477	0.943	0.945	0.945	0.9465	0.947	0.95	0.95	0.95	0.937	0.9464	0.9465	0.9464	0.9432	0.95	0.947
شکست لوله	10010	100010	1002	1008	1004	10004	1006	10006	10046	10050	100050	10052	100052	10056	100056	10040	10042	10026	10012	10058	10044	10062	100062	10034	10082	10080	42	3	4
قابلیت اعتماد هیدرولیکی	0.7629	0.7629	0.7680	0.7618	0.7694	0.7795	0.7016	0.7624	0.7632	0.7624	0.7595	0.7515	0.7628	0.7629	0.7593	0.7624	0.7630	0.7631	0.7642	0.7635	0.7643	0.7639	0.7668	0.7647	0	0.7631	0.7596	0.7648	0.7508
قابلیت اعتماد مکانیکی	0.946	0.946	0.9471	0.944	0.9471	0.9471	0.9471	0.9471	0.945	0.946	0.946	0.9473	0.9473	0.9465	0.9465	0.9471	0.9471	0.945	0.943	0.9471	0.9478	0.9428	0.9428	0.9461	0	0.95	0.95	0.95	0.95

۴. نتیجه گیری

شاخص قابلیت اعتماد مکانیکی اگرچه برای رسیدن آب از گره منبع به گره‌های مصرف ضروری می‌باشد ولی برآورد میزان آب برآورده شده گرهی از لحاظ کمی در قالب شاخص قابلیت اعتماد هیدرولیکی بیان می‌شود. در این پژوهش به ارزیابی قابلیت اعتماد هیدرولیکی و مکانیکی و در نهایت شاخص کلی شبکه پرداخته شده است. در روند مطالعه به منظور شبیه‌سازی شبکه و محاسبه میزان دبی خروجی از گره‌ها در طول بازه ۲۴ ساعته از شبیه‌ساز مبتنی بر فشار EPANET-IMNO استفاده شده است. این شبیه‌ساز، که توسط He و همکاران در سال ۲۰۱۶ پیشنهاد شده، الگوریتمی بر پایه تکرار بوده که توانایی همگرایی بالایی به جواب‌های نهایی دارد. همچنین به منظور برآورد قابلیت اعتماد هیدرولیکی از روش BDD در قالب نرم افزار DNA استفاده شده است. لازم به ذکر است که این نرم‌افزار توانایی مدل‌سازی شبکه با تعداد گره‌های بیش از ۱۹ و تعداد لوله‌های بیش از ۳۲ را ندارد بنابراین برای بررسی شبکه‌های توزیع آب بزرگ‌تر از ابزار NRA استفاده می‌شود. شبکه مورد مطالعه اول در این پژوهش دارای ۹ گره بوده و شبکه توزیع آب بزرگ‌تر مورد بررسی شبکه Anytown است که در آن‌ها قابلیت اعتماد در اثر شکست لوله‌های شبکه برآورد شده است. برآورد شکست همزمان لوله‌ها از مسائلی است که در این پژوهش به دلیل احتمال وقوع کم‌تر نسبت به شکست یک لوله در هر بار شبیه‌سازی در نظر گرفته نشده است ولی مسلما بر نتایج تاثیرگذار خواهد بود. در مطالعات موردی این پژوهش به دلیل وجود چندین حلقه، در اثر شکست لوله‌ها هم‌چنان مسیرهایی برای رساندن آب به گره‌های مصرف وجود دارد. بنابراین هرچند که لوله‌های شبکه دچار شکست شده‌اند و همین‌طور احتمال شکست برای لوله‌های دیگر نیز وجود دارد، ولی قابلیت اعتماد مکانیکی و هیدرولیکی افت شدیدی نخواهد داشت و هم‌چنان اتصال شبکه باقی خواهد ماند. در شبکه‌های شاخه‌ای به دلیل شکست لوله‌های شبکه، اتصال در شبکه بین گره‌های منبع و مصرف از بین خواهد رفت و قابلیت اعتماد کمتری در این شبکه‌ها انتظار می‌رود. بنابراین در فاز طراحی شبکه‌ها هرجند وجود حلقه‌ها و لوله‌های اضافی، هزینه‌های طراحی را بالا می‌برد ولی در فاز بهره‌برداری در اثر اتفاقات ناخواسته قابلیت اعتماد شبکه کاهش چشمگیری نخواهد داشت.

۵. مراجع

1. Ostfeld, A., (2004). Reliability analysis of water distribution systems. *Journal of Hydroinformatics*, 6(4), pp.281-294.
2. Ozger, S.S., Mays, L.W., (2003). A semi-pressure-driven approach to reliability assessment of water distribution networks. PhD Thesis, Arizona State University, Arizona, USA.
3. Shuang, Q., Zhang, M., Yuan, Y., (2014). Performance and reliability analysis of water distribution systems under cascading failures and the identification of crucial pipes. *PLoS ONE* 9(2): e88445. doi:10.1371/journal.pone.0088445.
4. El-Jumaily, K.K., Radi, A.H., (2005). Reliability analysis of water distribution systems. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 12(3), pp.22-52.
5. Al-Zahrani, M.A., Laiq Syed, J., (2005). Evaluation of municipal water distribution system reliability using minimum cut-set method. *Journal of King Saud University, Engineering Sciences*, 18(1), pp.67-82.
6. Gavrila, C., Vartires, A., Gruia, I., Ardelean, F., (2013). Reliability analysis of water distribution systems. Recent Advances in Energy, Environment, Economics and Technological Innovation, Paris, France.
7. Yannopoulos, S., Spiliotis, M., (2013). Water distribution system reliability based on minimum cut-set approach and the hydraulic availability. *Water Resources Management*, 27(6), pp.1821-1836.

8. Ataouni, R., Ermini, R., (2014). Overall reliability assessment of water distribution system. *Procedia Engineering*, 89, pp.1282-1291.

9. Shirzad, A., Tabesh, M., (2016). New indices for reliability assessment of water distribution networks. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 65(5), pp.384-395.

10. Geem, Z.W., (2015). Multiobjective optimization of water distribution networks using fuzzy theory and harmony search. *Water 2015*, 7(7), pp.3613-3625.

11. Dini, M., Shirzad, A., Tabesh, M., (2016). Comparing the efficiency of hydraulic reliability indices in the design of water distribution systems. *4th International Reliability Engineering Conference*, Sahand University of Technology.

12. Chandramouli, S., Malleswararao, P., (2011). Reliability based optimal design of a water distribution network for municipal water supply. *International Journal of Engineering and Technology*, 3(1), pp.13-19.

13. Abunada, M., Trifunović, N., Kennedy, M., Babel, M., (2014). Optimization and reliability assessment of water distribution networks incorporating demand balancing tanks. *12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI*, 70, pp.4-13.

14. Wagner, J., Shamir, U., Marks, D.H., (1998). Water distribution reliability: simulation methods. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 114(3), pp.276-294.

15. Xing, L., (2008). Dependable network analyzer. Developed by Akhilesh Shrestha, University of Massachusetts, Dartmouth.

16. Bobbio, A., Terruggia, R., Ciancamerla, E., Minichino, M., (2008). Evaluating network reliability versus topology by means of BDD algorithm. In: PSAM-9, Hong Kong, May 2008.

17. Ostfeld, A., (2012). Optimal reliable design and operation of water distribution systems through decomposition. *Journal of Water Resources Research*, 48, W10521.

18. He, P., Tao, T., Xin, K., Li, S., Yan, H., (2016). Modeling water distribution systems with deficient pressure: an improved iterative methodology. *Water Resources Management*, 30(2), pp.593-606.

19. Tabesh, M., (1998). Implications of the pressure dependency of outflows on data management, mathematical modeling and reliability assessment of water distribution systems. PhD Thesis, Civil Engineering Department, University of Liverpool, UK.

20. Murphy, L.J., Dandy, G.C., and Simpson, A.R., (1994). Optimum design and operation of pumped water distribution systems. *Proceeding Conference on Hydraulics in Civil Engineering*, Institution of Engineers, Brisbane, Australia, pp.149–155.