

# Evaluation of Urban Water Distribution Network Under the Combined Hydraulic and Mechanical Reliabilities

*N. Mehzad<sup>1</sup>, K. Asghari<sup>2</sup>*

1. PhD Student, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran  
(Corresponding Author) n.mehzad@cv.iut.ac.ir
2. Assoc. prof., Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

*(Received July 26, 2017 Accepted Oct. 18, 2017)*

**To cite this article :**

Mehzad, N., Asghari, K., 2018, "Edvaluation ofetermining urban water distribution network under the combined integrating hydraulic and mechanical reliabilities." Journal of Water and Wastewater, 29(6), 27-39.  
Doi: 10.22093/wwj.2017.94520.2470 (In Persian)

## Abstract

Network reliability is one of the most important parameter when evaluating the efficiency of water distribution networks (WDNs). WDN reliability is calculated based on the mechanical, hydraulic and water quality aspects under normal and also abnormal conditions such as system failures. In this paper, hydraulic reliability was calculated through the ratio of satisfied nodal demands. In this regard, hydraulic simulation is performed based on the proposed EPANET-IMNO algorithm based on a Pressure-Driven Simulation model. This algorithm is written in Visual Studio through C<sup>++</sup> code. The mechanical reliability of the network was evaluated by means of BDD algorithm based on probability of having a connection between the source nodes and consumption nodes. DNA and RNA tools are used to evaluate the mechanical reliability based on BDD method. Finally, an integrated reliability is proposed for optimum design and operation of WDNs. A looped WDN with nine nodes and a branched WDN were considered in this paper. The results showed that besides the hydraulic reliability the evaluation of mechanical reliability index is very important in the design of WDN to improve the operation of WDNs. Adding 4 loops to the branched WDN increased its reliability by 18.3%. Also, it was determined that under a looped WDN eliminating one pipe in the worst case may reduce the network reliability by 28%.

**Keywords:** Water Distribution Network, Hydraulic Reliability, Mechanical Reliability, BDD, Pressure-Driven Simulation.



# برآورد عملکرد شبکه توزیع آب شهری با تلفیق قابلیت اعتماد هیدرولیکی و مکانیکی

نازلی مهزاد<sup>۱</sup>، کیوان اصغری<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران (نویسنده مسئول) n.mehzad@cv.iut.ac.ir  
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت ۹۶/۵/۱۴ پذیرش ۹۶/۸/۶)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

مهزاد، ن.، اصغری، ک.، ۱۳۹۷، "برآورد عملکرد شبکه توزیع آب شهری با تلفیق قابلیت اعتماد هیدرولیکی و مکانیکی" مجله آب و فاضلاب، ۲۹ (۶)، ۲۷-۳۹. Doi: 10.22093/wwj.2017.94520.2470

## چکیده

بررسی عملکرد شبکه‌های توزیع آب در فاز طراحی و بهره‌برداری در بهینه‌سازی این شبکه‌ها اهمیت فراوانی دارد. از جمله شاخص‌های برآورد عملکرد این شبکه‌ها، شاخص قابلیت اعتماد است که نشان‌دهنده توانایی شبکه برای رساندن آب کافی با کیفیت مناسب به مصرف‌کنندگان در زمان مناسب است. قابلیت اعتماد از جنبه‌های گوناگون مکانیکی، هیدرولیکی و کیفی در شرایط عادی و غیرعادی مانند وقوع انواع شکست‌های مکانیکی و هیدرولیکی قابل بررسی است. در این پژوهش قابلیت اعتماد هیدرولیکی از جنبه برآورده شدن میزان تقاضای گرهی مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور، ابزار شبیه‌سازی مبتنی بر فشار بر پایه الگوریتم EPANET-IMNO توسعه داده شد و در محیط Visual Studio به زبان C++ نوشته شد. همچنین قابلیت اعتماد مکانیکی با استفاده از روش نمودارهای تصمیم‌گیری دودویی از جهت احتمال ارتباط گره‌های مصرف شبکه با گره‌های منبع مورد بررسی قرار گرفت. نرم‌افزارهای DNA و RNA برای محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی بر مبنای روش نمودارهای تصمیم‌گیری دودویی استفاده شدند. در نهایت قابلیت اعتماد تلفیقی هیدرولیکی و مکانیکی شبکه به‌منظور طراحی هرچه بهتر شبکه توزیع آب ارائه شد. شبکه توزیع آب حلقوی ۹ گره‌ای و همین‌طور شبکه توزیع آب شاخه‌ای برای مقایسه و ارزیابی روش ارائه شده، در نظر گرفته شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ارزیابی شاخص قابلیت اعتماد مکانیکی در فاز طراحی و حلقوی کردن شبکه‌ها به بهره‌برداری بهینه از آن‌ها و افزایش قابلیت اعتماد تلفیقی هیدرولیکی و مکانیکی شبکه کمک شایانی می‌نماید. به‌طوری‌که با ایجاد ۴ حلقه در شبکه توزیع آب شاخه‌ای به میزان ۱۸/۳ درصد به قابلیت اعتماد کلی شبکه افزوده خواهد شد. در مورد شبکه توزیع آب حلقوی نیز عدم وجود یک لوله در شبکه در بدترین وضعیت، کاهش قابلیت اعتماد حدود ۲۸ درصد را در پی خواهد داشت.

**واژه‌های کلیدی:** شبکه توزیع آب، قابلیت اعتماد هیدرولیکی، قابلیت اعتماد مکانیکی، نمودارهای تصمیم‌گیری دودویی، شبیه‌سازی مبتنی بر فشار

## ۱- مقدمه

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 به‌طور کامل قابل اطمینان نیست. در هر سیستمی

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 به‌عنوان توانایی شبکه برای فراهم کردن آب کافی با کیفیت



شبکه‌های توزیع آب مورد بررسی قرار گیرد تا تحلیل واقعی تری از شبکه ارائه شود. در شرایطی که محاسبه کمبود فشار و مقدار کاهش آب قابل دسترس در قالب شاخص‌هایی نظیر قابلیت اعتماد مد نظر باشد، استفاده از تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار ضروری خواهد بود (Tabesh, 2015).

پژوهشگران مختلفی در سال‌های اخیر، مدل‌هایی به‌منظور شبیه‌سازی بر پایه فشار پیشنهاد داده‌اند. تعدادی از این مدل‌ها از بسط شبیه‌سازی EPANET2.0 ایجاد شده‌اند، مانند Ooten که در سال ۲۰۰۵ پیشنهاد شده است (Cheung et al., 2005). همچنین در سال ۲۰۱۰، نرم‌افزاری به نام EPANET-EMITTER ارائه شد (Pathirana, 2010). در همان سال ابزاری به نام CWSNET با قابلیت شبیه‌سازی مبتنی بر فشار تدوین شد (Cuidoline et al., 2010). قابل ذکر است که نرم‌افزارهای EPANET-EMITTER، CWSNET و Ooten از فرمول‌های آفشان و وانگر و همکاران در سال ۱۹۸۸ پیروی می‌کنند (Wanger et al., 1988). در این روابط برای مقادیر هد فشاری بیشتر از مقدار مورد نیاز، آب قابل دسترس مقدار ثابتی داشته و برابر با تقاضای مورد نیاز گره خواهد بود. در پژوهش تابش و همکاران در سال ۲۰۱۴ نشان داده شده است که CWSNET از دقت مناسبی برخوردار نیست و حتی در مواردی مقدار خروجی‌های گرهی با مقدار آبی که وارد شبکه می‌شود، مطابقت ندارد. در این پژوهش عملکرد ابزار Ooten نیز مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده که نتایج این ابزار غیرمنطقی بوده و احتمال وجود خطا در کدنویسی این ابزار وجود دارد (Tabesh et al., 2014). در نرم‌افزار EPANET-EMITTER نیز تنها از رابطه آفشان استفاده شده است و قابلیت شبیه‌سازی با استفاده از روابط دیگر در آن وجود ندارد. بنابراین در این پژوهش از روشی به‌منظور شبیه‌سازی بر پایه فشار استفاده می‌شود که قابلیت استفاده از روابط مختلف دبی-فشار در آن وجود داشته باشد.

در سال‌های اخیر پژوهشگران به محاسبه قابلیت اعتماد هیدرولیکی شبکه بر مبنای درصد تقاضای گرهی برآورده شده در اثر شکست یک لوله با استفاده از شبیه‌سازی مبتنی بر فشار پرداخته‌اند (Ozger and Mays, 2003, Shuang et al., 2014). همین‌طور با بررسی شکست لوله‌ها، پمپ‌ها و شیرآلات، میزان قابلیت اعتماد هیدرولیکی بر اساس درصد تقاضای تأمین شده گرهی با استفاده از

اتفاقات ناخواسته مانند شکست لوله‌ها، شیرآلات و پمپ‌ها منجر به برهم خوردن کارایی آن می‌شود (Ostfeld, 2004). 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 پمپ‌هاست 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. برای محاسبه قابلیت اعتماد هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب، در ابتدا نیاز به تحلیل هیدرولیکی رفتار شبکه در شرایط مختلف می‌باشد.

شبیه‌سازی شبکه‌های توزیع آب و یا به‌عبارتی مدل‌سازی اجزای مختلف آن و تحلیل هیدرولیکی آن‌ها به دو نوع تحلیل مبتنی بر تقاضا و مبتنی بر فشار تقسیم می‌شود. در بسیاری از تحلیل‌های هیدرولیکی، دبی‌های خروجی از گره‌ها بدون توجه به مقدار فشار گرهی موجود برآورد می‌شود. به این روش، تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا گفته می‌شود. اکثر نرم‌افزارهای تجاری موجود بر مبنای این روش عمل می‌نمایند. از جمله این نرم‌افزارها که به‌طور گسترده در شبیه‌سازی شبکه‌های توزیع آب مورد استفاده قرار می‌گیرد، نرم‌افزار EPANET2.0 است.

در شرایطی که فشار موجود در گره‌ها از فشار حداقل مجاز بیشتر باشد، این روش برای تحلیل شبکه مناسب خواهد بود. اما اگر در شرایط غیرعادی، شبکه با استفاده از این روش تحلیل شود، یعنی در حالتی که فشارهای گرهی از میزان حداقل مجاز کمتر شود و حتی مقدار منفی داشته باشد، باز هم شبکه به‌طور کامل نیازهای گرهی را برطرف می‌نماید. این برآورده کردن نیازهای گرهی به‌طور کامل، بدون توجه به این مطلب که فشار گرهی از حداقل مجاز خود کمتر می‌باشد، انجام شده است. بنابراین در این شرایط با استفاده از تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا جواب‌های حاصل با واقعیت مطابقت نخواهند داشت. به همین دلیل پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که در تحلیل شبکه‌های توزیع آب، باید رابطه بین فشار در گره‌ها و دبی خروجی از آن‌ها مورد توجه قرار گیرد (Tabesh et al., 2002).

به این روش تحلیل هیدرولیکی که رابطه بین فشار و دبی خروجی از گره‌ها را در نظر می‌گیرد، تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار گفته می‌شود. رابطه دبی-فشار باید در کنار معادلات اصلی



فشار گره‌ای موجود با استفاده از نرم افزار EPANET2.0 ارزیابی شده است (Chandramouli and Malleswararao, 2011). در سال ۲۰۱۴، قابلیت اعتماد هیدرولیکی شبکه با شبیه‌سازی مبتنی بر فشار EPANET-emitter بر اساس درصد تقاضای گرهی برآورده شده محاسبه شده است (Abunada et al., 2014).

در پژوهش حاضر به بررسی قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه توزیع آب و بررسی اثرات آن بر قابلیت اعتماد هیدرولیکی شبکه در هر بار شبیه‌سازی با وجود احتمال شکست لوله‌های شبکه (بررسی امکان کاربری لوله‌ها) پرداخته شد. در پژوهش‌های پیشین بررسی هر سناریو مجزا از رخداد سایر سناریوهای شکست در نظر گرفته شده است، در صورتی که در شبکه‌ای که شکست یک لوله اتفاق افتاده، احتمال رخداد سایر شکست لوله‌ها نیز وجود داشته و ممکن است در برخی شرایط احتمال عدم اتصال گره‌های منبع و مصرف وجود داشته باشد که بدترین حالت ممکن محسوب می‌شود. به این منظور در این پژوهش، قابلیت اعتماد هیدرولیکی و مکانیکی به صورت تلفیقی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی شبکه، شبیه‌سازی مبتنی بر فشار بر پایه EPANET-IMNO و بر اساس رابطه دبی- فشار پیشنهاد شده توسط Wagner و همکاران در سال ۱۹۹۸ توسعه داده شد (Wanger et al., 1998). همین‌طور، قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه بر اساس روش نمودارهای تصمیم‌گیری دودویی با ابزار DNA برای شبکه تا ۲۰ گره و ابزار NRA برای شبکه با بیش از ۲۰ گره محاسبه شد. محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه توزیع آب و اثرات آن بر قابلیت اعتماد هیدرولیکی شبکه بر اساس میزان تقاضای برآورده شده بر روی دو شبکه توزیع آب حلقوی و شاخه‌ای انجام شد. در نهایت قابلیت اعتماد تلفیقی هیدرولیکی و مکانیکی و لزوم حلقوی کردن شبکه‌های شاخه‌ای ارائه شد.

## ۲- روش کار

### ۲-۱- محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه

قابلیت کاربری اجزا و قابلیت اعتماد مکانیکی کل شبکه در پژوهش‌های مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. روش‌های متنوع محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی کل شبکه‌ها، احتمال رسیدن آب از یک گره مبدأ به یک گره مصرف را محاسبه می‌نمایند. در واقع

شبیه‌سازی مبتنی بر فشار محاسبه شده است (El-Jumaily and Radi, 2005). قابلیت اعتماد شبکه توزیع آب با استفاده از شبیه‌سازی مبتنی بر تقاضای EPANET2.0 به صورت استاتیکی نیز با بررسی احتمال شکست مکانیکی یک تا سه لوله ارزیابی شده است (Al-Zahrani and Laiq Syed, 2005, Gavril et al., 2013).

در هر بار شبیه‌سازی با بررسی ترکیبی از شکست لوله‌ها، در صورتی که فشار گره‌ها کمتر از فشار حداقل باشد و یا کلاً ارتباط فیزیکی شبکه قطع شده باشد، ترکیب شکست مذکور به عنوان برش کمینه<sup>۱</sup> در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از اصل شمول و عدم شمول<sup>۲</sup>، قابلیت اعتماد شبکه محاسبه می‌شود. نقطه ضعف این پژوهش استفاده از شبیه‌سازی مبتنی بر تقاضا و آن هم به صورت تحلیل استاتیکی است. در پژوهش‌های اخیر با استفاده از شبیه‌سازی مبتنی بر فشار نقطه ضعف پژوهش‌های پیشین برطرف شده است (Yannopoulos and Spiliotis, 2013). 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 (Ataouni and Ermini, 2014). این پژوهشگران از شبیه‌سازی مبتنی بر تقاضا برای تحلیل هیدرولیکی شبکه استفاده نمودند که نمی‌تواند نتایج دقیقی ارائه دهد. پژوهشگران دیگری با شبیه‌سازی مبتنی بر فشار به صورت تحلیل استاتیکی به تعریف شاخص جدیدی برای قابلیت اعتماد شبکه پرداختند (Shirzad and Tabesh, 2016). 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 شبیه‌سازی EPANET2.0 نیز مورد بررسی قرار گرفته است (Geem, 2015). همچنین قابلیت اعتماد هیدرولیکی با بررسی سرعت آب در لوله‌ها به صورت فازی نیز با استفاده از شبیه‌سازی مبتنی بر تقاضای EPANET2.0 مورد ارزیابی قرار گرفته است (Dini et al., 2016). در سال ۲۰۱۱، قابلیت اعتماد هیدرولیکی به صورت تابع عضویت دوزنقه‌ای درصد

<sup>1</sup> Minimum Cut Set

<sup>2</sup> Inclusion-Exclusion Principal



و یا عدم عملکرد هر عضو، گراف درخت شبکه قابل ترسیم است. در واقع روش نمودارهای تصمیم‌گیری دودویی به ارائه فشرده‌ای از روابط حاکم بر شبکه می‌پردازد. مراحل مختلف این روش در پژوهش Terruggia در سال ۲۰۱۰ به‌طور کامل توضیح داده شده است (Terruggia, 2010).

با توجه به کارایی روش نمودارهای تصمیم‌گیری دودویی در یافتن قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه، در این پژوهش به‌منظور محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی کل شبکه توزیع آب شهری با بررسی احتمال کاربری لوله‌ها از این الگوریتم استفاده شد. از جمله نرم‌افزارهایی که با استفاده از روش نمودارهای تصمیم‌گیری دودویی، قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه را محاسبه می‌نماید، نرم‌افزار DNA است (Xing, 2008). این نرم‌افزار، توانایی محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه‌ای تا ۲۰ گره را دارد. برای شبکه‌های بزرگ‌تر از ابزار NRA استفاده خواهد شد که در محیط لینوکس قابل نصب و راه‌اندازی است (Bobbio et al., 2008).

## ۲-۲- محاسبه قابلیت اعتماد هیدرولیکی

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 بیشتر دارد (Ostfeld, 2012). هرچند هر دو رویکرد قابلیت اعتماد مکانیکی و هیدرولیکی مزایا و محدودیت‌های خود را دارند، ترکیب این دو رویکرد با یکدیگر در ارزیابی صحیح‌تر قابلیت اعتماد شبکه مؤثر خواهد بود.

قابلیت اعتماد هیدرولیکی در این پژوهش نسبت برآورده شدن تقاضای گرهی می‌باشد. بر این اساس اولین گام در محاسبه قابلیت اعتماد هیدرولیکی، مدل‌سازی شبکه توزیع آب با استفاده از شبیه‌ساز مناسب خواهد بود. همان‌طور که در بخش‌های پیشین گفته شد، استفاده از شبیه‌ساز مبتنی بر فشار در مواقعی که هدف محاسبه قابلیت اعتماد شبکه است، ضروری است.

تا به امروز روابط دبی-فشار مختلفی پیشنهاد شده‌اند که قبل از استفاده از این روابط باید مزایا و معایب هر یک مورد بررسی قرار گیرند و به‌صورت تجربی اعتبارسنجی شوند. این روابط به دو دسته روابط دبی-فشار گسسته و پیوسته تقسیم می‌شوند. شیرزاد و

قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه، احتمال این است که همه گره‌ها و یا زیرمجموعه‌ای از گره‌های گراف حداقل به‌وسیله یک مسیر عملکردی با یکدیگر در ارتباط باشند. گراف شبکه‌ها در محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی نقش اساسی دارد. شبکه می‌تواند در قالب گراف  $G=(V,E)$  ارائه شود که در آن سری گره‌ها با  $V$  و سری لینک‌ها با  $E$  نمایش داده می‌شوند. حالت اعضا به‌صورت "در حال عملکرد" و "غیر قابل دسترس" تعریف می‌شود. همین‌طور گراف می‌تواند جهت‌دار و یا بدون جهت باشد. گراف‌های بدون جهت به صورت دو طرفه 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.

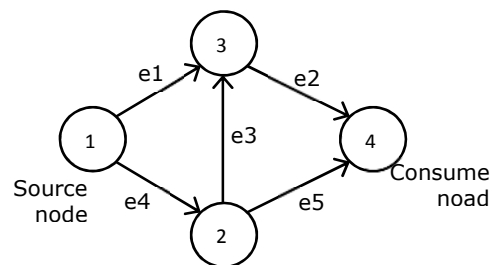


Fig. 1. Directed network graph with four nodes

شکل ۱- گراف شبکه‌ای با ۴ 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 عضو، سیستم از کار نمی‌افتد و قابلیت اعتماد شبکه از قابلیت اعتماد تک تک اجزا بیشتر است.

برای سیستم‌های پیچیده، روش‌های مختلفی برای محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی وجود دارد. از جمله این روش‌ها، روش نمودارهای تصمیم‌گیری دودویی در ترکیبی با روش برش کمینه می‌باشد.

روش نمودارهای تصمیم‌گیری دودویی که اساس بررسی قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه در این پژوهش بود، بر مبنای نشان دادن گراف درخت شبکه تجزیه شده است. در این روش بر مبنای عملکرد



همکاران در سال ۲۰۱۳، روابط مختلف دبی- فشار را مورد بررسی قرار داده و نشان داده‌اند که از میان روابط موجود، رابطه دبی- فشار پیشنهاد شده توسط وانگر و همکاران در سال ۱۹۸۸ بیشترین تطابق را با نتایج میدانی و آزمایشگاهی داشته است (Shirzad et al., 2013).

$$\Delta V_i(t, t + \Delta t) = \Delta t \times q_i(t) \quad (2)$$

که در این معادله

به این منظور در این پژوهش، شبیه‌ساز مبتنی بر فشار EPANET-IMNO به صورت دوره گسترده<sup>۱</sup> با استفاده از رابطه وانگر و همکاران در سال ۱۹۸۸ در محیط Visual Studio به زبان برنامه‌نویسی C++ مطابق با الگوریتم شکل ۲ نوشته شد و مورد استفاده قرار گرفت (He et al., 2016). روش EPANET-IMNO که بر پایه تکرار تا رسیدن به یک جواب واحد است، توانایی همگرایی بالا و همچنین قابلیت کاربرد در شبیه‌سازی دوره گسترده و استاتیکی را دارد. همچنین با استفاده از این الگوریتم می‌توان با روابط مختلف دبی- فشار، شبیه‌سازی شبکه را انجام داد. در پژوهشی در سال ۲۰۱۶، نشان داده شد که شبیه‌ساز EPANET-IMNO نه تنها توانایی شبیه‌سازی هیدرولیکی در شرایط عادی و غیرعادی را دارد بلکه قادر است که تحلیل کیفی شبکه توزیع آب را با موفقیت انجام دهد (He et al., 2016).

در شکل ۲،  $Q_i^{(k)}$  و  $Q_i^{(k+1)}$  به ترتیب تقاضای گرهی در  $k$  و  $k + 1$  امین تکرار هستند.  $Q_i^{avl}$  دبی قابل دسترس گرهی محاسبه شده با رابطه دبی- فشار و  $Q_i^{out}$  خروجی واقعی گره هستند. همین‌طور در این شکل،  $flag_i^{(k)}$  تغییر روند تقاضای گرهی را نشان می‌دهد.  $Q_i^{max}$  و  $Q_i^{min}$  حد بالا و پایین خروجی گرهی هستند که به وسیله  $flag_i^{(k)}$  تعیین می‌شوند.

$$HR_{i,t}^{demand} = \frac{Q_{i,t}^{avl}}{Q_{i,t}^{req}} \quad (3)$$

$$HR_t^{demand} = \frac{\sum_{i=1}^N HR_{i,t}^{demand} \times \text{فشار گرهی موجود}}{\sum_{i=1}^N \text{فشار گرهی موجود}} \quad (4)$$

که در این معادلات

از اصلاح مقادیر دبی خروجی و فشار گرهی در پایان هر دوره زمانی، میزان تراز آب در تانک‌های موجود در شبکه نیز طبق معادله ۱ اصلاح شود

$$H_i(t + \Delta t) = H_i(t) + \frac{\Delta V_i(t,t+\Delta t)}{A(t)} \quad (1)$$

که در این معادله  $H_i(t)$  و  $H_i(t + \Delta t)$  تراز آب در تانک  $i$  در زمان  $t$  و  $t + \Delta t$ ،  $A(t)$  سطح مقطع آب در زمان  $t$  در تانک مورد نظر و

در روند تحلیل دوره گسترده شبکه توزیع آب نیاز است تا پس از اصلاح مقادیر دبی خروجی و فشار گرهی در پایان هر دوره زمانی، میزان تراز آب در تانک‌های موجود در شبکه نیز طبق معادله ۱ اصلاح شود

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 قابل دسترس 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 معادله ۴،  $N$  تعداد گره‌های تقاضای شبکه توزیع آب می‌باشد. در معادله ۴ 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

از اصلاح مقادیر دبی خروجی و فشار گرهی در پایان هر دوره زمانی، میزان تراز آب در تانک‌های موجود در شبکه نیز طبق معادله ۱ اصلاح شود

که در این معادله  $H_i(t)$  و  $H_i(t + \Delta t)$  تراز آب در تانک  $i$  در زمان  $t$  و  $t + \Delta t$ ،  $A(t)$  سطح مقطع آب در زمان  $t$  در تانک مورد نظر و

$$H_i(t + \Delta t) = H_i(t) + \frac{\Delta V_i(t,t+\Delta t)}{A(t)} \quad (1)$$

که در این معادله

$H_i(t)$  و  $H_i(t + \Delta t)$  تراز آب در تانک  $i$  در زمان  $t$  و  $t + \Delta t$ ،  $A(t)$  سطح مقطع آب در زمان  $t$  در تانک مورد نظر و

<sup>1</sup> Extended Period Simulation



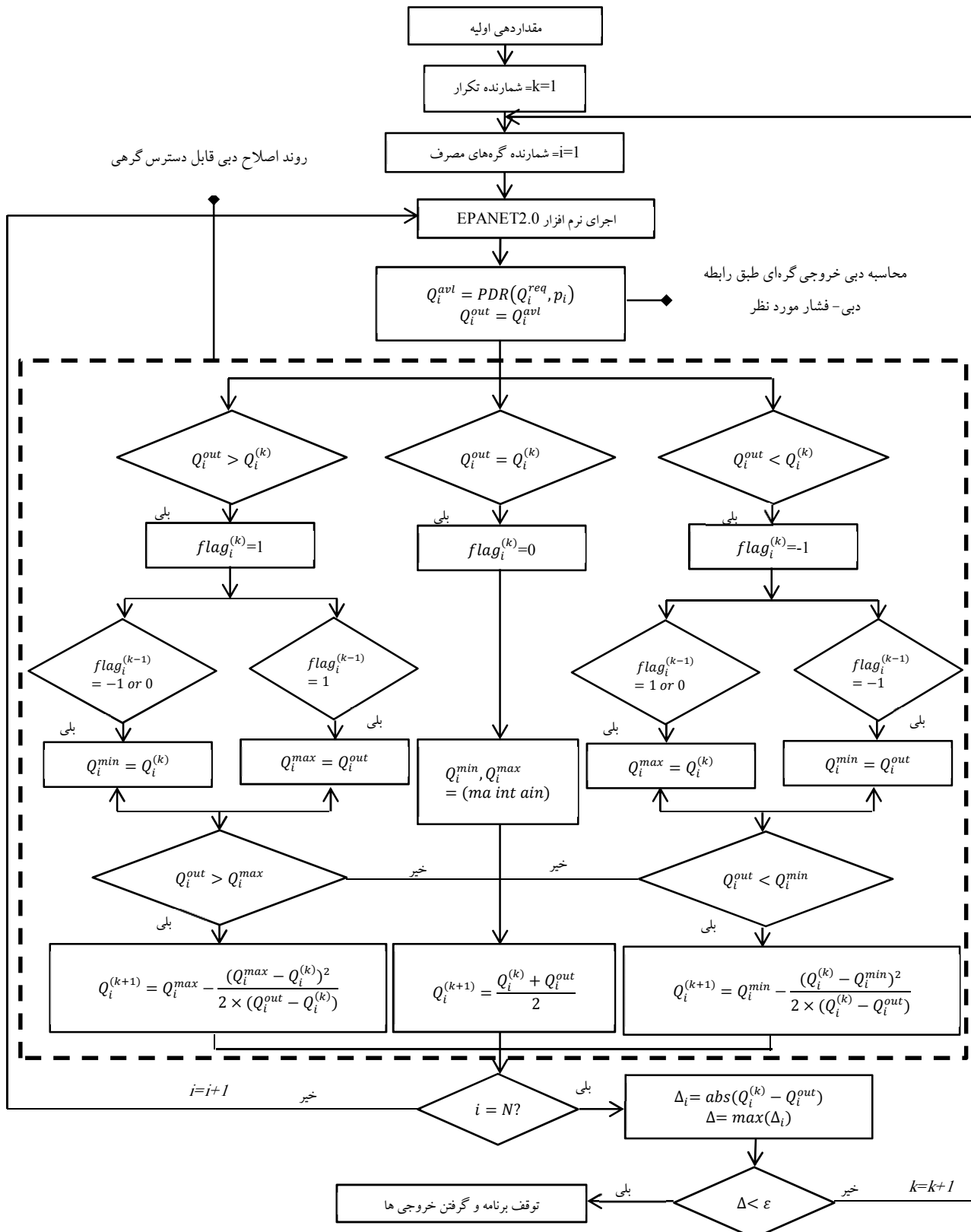


Fig. 2. Schematic diagram of EPANET-IMNO algorithm proposed by He et al. 2016

شکل ۲- الگوریتم EPANET-IMNO توسط He et al. در سال ۲۰۱۶



جدول ۱- مشخصات گره‌های شبکه توزیع آب شکل ۳

**Table 1.** Nodal characteristics of the water distribution network for figure 3

Node number	Nodal elevation (m)	Nodal demand (cubic meters per hour)
1	160	0
2	125	26
3	120	26
4	120	54
5	121	26
6	110	72
7	116	26
8	117	26
9	115	72
10	110	72
11	111	54
12	110	72
13	105	72
14	110	26
15	114	72

با مشخصات گرهی به صورت جدول ۱ انجام می‌گیرد.

عملکرد این شبکه توزیع آب شهری در فاز طراحی مورد بررسی قرار می‌گیرد. قابلیت اعتماد شبکه توزیع آب شکل ۳ با تولید سناریوهای مختلف ارزیابی می‌شود. به این منظور برای محاسبه قابلیت اعتماد هیدرولیکی شبکه مذکور شبیه‌ساز مبتنی بر فشار در هر سناریو اجرا شده و با استفاده از تعریف قابلیت اعتماد بر مبنای میزان تقاضای برآورده شده، عملکرد هیدرولیکی شبکه در هر سناریو ارزیابی می‌شود. از سوی دیگر قابلیت اعتماد مکانیکی کل شبکه توزیع آب با فرض احتمال کاربری لوله‌ها با احتمال ۰/۹۵ ارزیابی و در نهایت قابلیت اعتماد تلفیقی هیدرولیکی و مکانیکی ارائه خواهد شد. لازم به توضیح است که در فاز طراحی در سناریوی اول شبکه شاخه‌ای شکل ۳، در سناریوی دوم با اضافه کردن ۲ لوله و در سناریوی سوم با اضافه کردن ۴ لوله محاسبات انجام شده و در جدول ۲ نمایش داده شده است. جایگذاری لوله‌های جدید در شبکه به صورت شکل ۴ می‌باشد.

همان‌طور که از جدول ۲ مشخص است، اگرچه بدون حلقه طراحی کردن شبکه توزیع آب قابلیت اعتماد هیدرولیکی بالاتری در برخی شرایط و گره‌ها ارائه می‌دهد ولی با توجه به حساسیت بالای شبکه نسبت به شکست‌های ممکن در شبکه، امکان اتصال گره‌های منبع و مصرف پایین‌تر از حالتی است که در شبکه توزیع

مصرف‌کنندگان از لحاظ کمی است. لازم به ذکر است که در معادله ۴ از فشار گرهی موجود به‌عنوان ضریب وزنی استفاده شده است.

### ۳-۲- قابلیت اعتماد تلفیقی شبکه توزیع آب

در این پژوهش، قابلیت اعتماد کلی شبکه، تلفیق قابلیت اعتماد مکانیکی براساس احتمال ارتباط گره‌های منبع و مصرف با در نظر گرفتن امکان کاربری لوله‌ها و قابلیت اعتماد هیدرولیکی بر اساس تقاضای گرهی برآورده شده به‌صورت معادله ۵ تعریف می‌شود

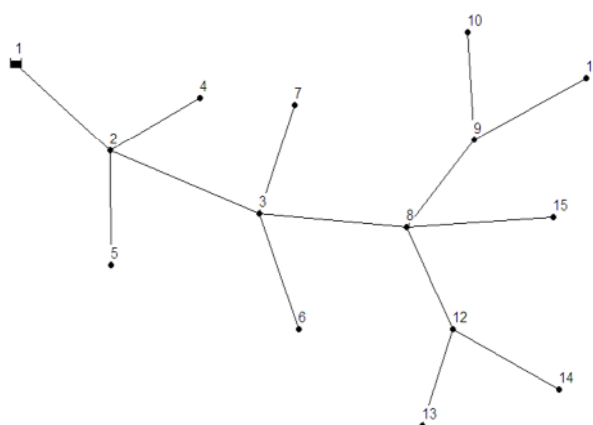
$$R_{\text{total}} = HR^{\text{demand}} \times MR \quad (5)$$

که در این معادله

$HR^{\text{demand}}$  میانگین قابلیت اعتماد هیدرولیکی شبکه بر اساس تقاضا در زمان‌های مختلف در هر سناریو و  $MR$  قابلیت اعتماد مکانیکی در هر سناریو است. همچنین  $R_{\text{total}}$ ، قابلیت اعتماد تلفیقی هیدرولیکی و مکانیکی است.

### ۳- نتایج و بحث

به‌عنوان اولین مطالعه موردی به بررسی قابلیت اعتماد هیدرولیکی، مکانیکی و همین‌طور قابلیت اعتماد کل شبکه شاخه‌ای در فاز طراحی و نتایج مرتبط با آن پرداخته می‌شود. شمای کلی این شبکه در شکل ۳ نمایش داده شده است. این شبکه توزیع آب شامل ۱ مخزن و ۱۴ گره تقاضا است و شبیه‌سازی در آن به‌صورت استاتیکی



**Fig. 3.** Branched water distribution network  
شکل ۳- شبکه توزیع آب شاخه‌ای





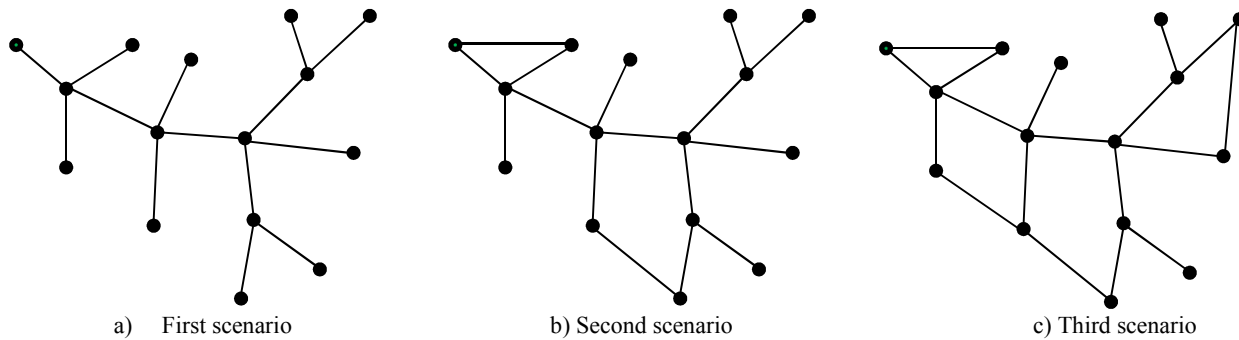


Fig. 4. Three different scenarios used for the evaluation of the reliability of water distribution network shown in Figure 3

شکل ۴- سه سناریوی مختلف به منظور ارزیابی قابلیت اعتماد شبکه توزیع آب شکل ۳

جدول ۲- نتایج محاسبه قابلیت اعتماد شبکه در سه سناریوی مختلف

Table 2. Results of the network's reliability calculation under the three different scenarios

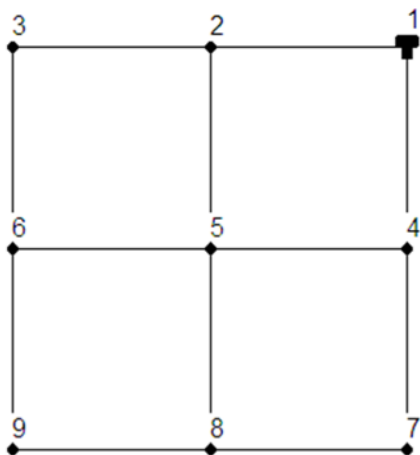
Node	Hydraulic and mechanical reliability (First scenario)		Hydraulic and mechanical reliability (Second scenario)		Hydraulic and mechanical reliability (Third scenario)	
	Hydraulic	Mechanical	Hydraulic	Mechanical	Hydraulic	Mechanical
2	0.994	0.9025	0.981	0.945	0.979	0.99
3	0.978	0.9025	0.916	0.995	0.93	0.995
4	0.962	0.95	1	0.995	1	0.995
5	0.899	0.9025	1	0.945	0.882	0.99
6	0.909	0.8574	0.959	0.898	1	0.94
7	0.973	0.8574	0.923	0.937	0.36	0.99
8	0.872	0.8574	0.89	0.937	0.91	0.983
9	0.905	0.8145	0.887	0.89	0.912	0.976
10	0.87	0.8145	0.952	0.89	0.974	0.976
11	0.937	0.7738	0.942	0.845	0.973	0.927
12	0.926	0.7738	0.973	0.845	1	0.973
13	0.952	0.8145	1	0.932	1	0.98
14	1	0.7738	0.939	0.932	0.966	0.982
15	0.919	0.7738	0.921	0.886	0.928	0.931
Integrated reliability	0.787		0.873		0.931	

طراحی با جلوگیری از ایجاد شبکه شاخه‌ای و در نظر گرفتن قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه، عملکرد شبکه در فاز بهره‌برداری بهبود خواهد یافت. به عبارتی، در شبکه‌های حلقوی، با شکست لوله‌های شبکه، احتمال عدم اتصال گره‌های منبع و مصرف کاهش خواهد یافت. به طوری که در این شبکه نمونه، با ایجاد ۴ حلقه مطابق با سناریوی سوم، قابلیت اعتماد شبکه به میزان حدود ۱۸/۳ درصد افزایش یافته است.

به‌عنوان دومین مطالعه موردی، به منظور محاسبه قابلیت اعتماد هیدرولیکی و مکانیکی تلفیقی، شبکه توزیع آب شامل ۸ گره تقاضا

آب، حلقه وجود داشته باشد. در سناریوی اول که شبکه کاملاً شاخه‌ای طراحی می‌شود قابلیت اعتماد تلفیقی شبکه برابر با ۰/۷۸۷ است. در صورتی که می‌توان با ایجاد دو حلقه مطابق با سناریوی دوم قابلیت اعتماد شبکه را تا ۰/۸۷۳ افزایش داد. با ایجاد دو حلقه در شبکه و یا به عبارتی اضافه نمودن دو لوله به شبکه، اگرچه ممکن است هزینه‌های طراحی شبکه افزایش یابد ولی می‌توان در فاز بهره‌برداری عملکرد بهتری از شبکه انتظار داشت. در سناریوی سوم با اضافه کردن دو حلقه دیگر به شبکه، قابلیت اعتماد تلفیقی شبکه تا میزان ۰/۹۳۱ افزایش خواهد یافت. بنابراین در فاز





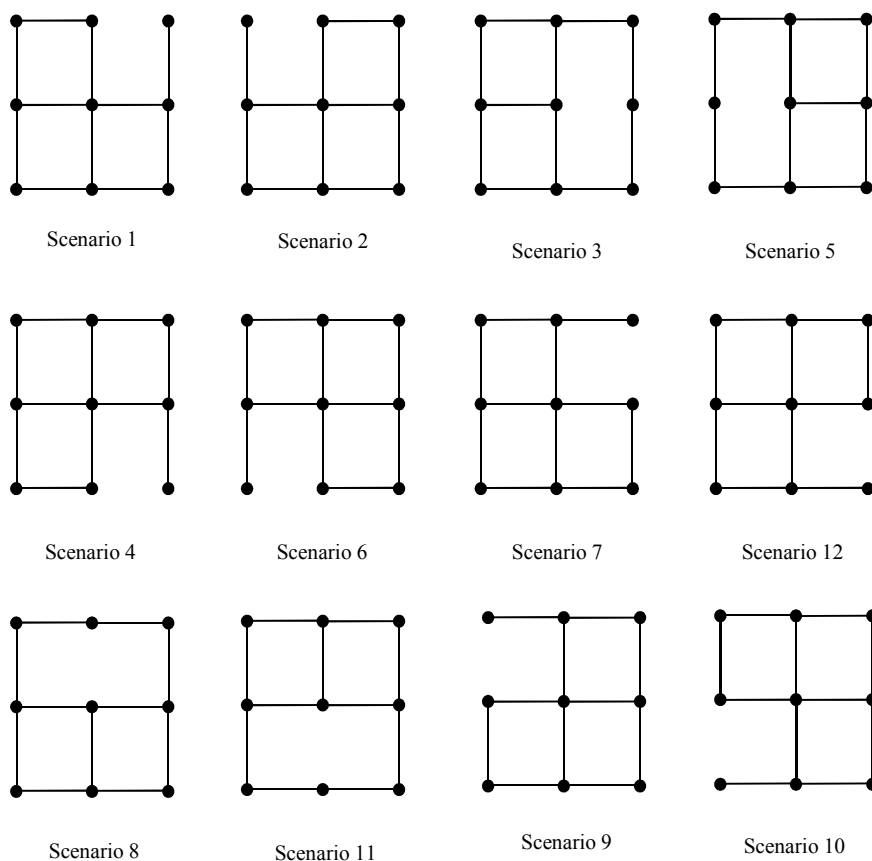
**Fig. 5.** Water distribution network proposed by Tabesh (1998)

شکل ۵- شبکه توزیع آب پیشنهاد شده توسط تابش در سال ۱۹۹۸

و یک تانک مورد بررسی قرار گرفت (Tabesh, 1998). شمای کلی این شبکه در شکل ۵ نشان داده شده است. مشخصات اجزای شبکه در پژوهش Tabesh در سال ۱۹۹۸ قابل دستیابی است.

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 می شود که دارای مساحت ۲۵۰۰ متر مربع است.

به منظور محاسبه قابلیت اعتماد مکانیکی با بررسی شکست لوله ها، در هر بار با فرض امکان کاربری همه لوله ها به میزان ۰/۹۵، نرم افزار DNA اجرا شده و قابلیت اعتماد مکانیکی شبکه در سناریوهای مختلف محاسبه می شود. در شکل ۶، سناریوهای



**Fig. 6.** Different scenarios

شکل ۶- سناریوهای مختلف



جدول ۳- نتایج محاسبه قابلیت اعتماد شبکه توزیع آب شکل ۵ در سناریوهای مختلف

Table 3. Results for the network's reliability calculation displayed in Figure 5 under different scenarios

Reliability	Hydraulic	Mechanical	Hydraulic	Mechanical	Hydraulic	Mechanical	Hydraulic	Mechanical	Hydraulic	Mechanical	Hydraulic	Mechanical
	1 <sup>st</sup> scenario		2 <sup>nd</sup> scenario		3 <sup>rd</sup> scenario		4 <sup>th</sup> scenario		5 <sup>th</sup> scenario		6 <sup>th</sup> scenario	
Node	1 <sup>st</sup> scenario		2 <sup>nd</sup> scenario		3 <sup>rd</sup> scenario		4 <sup>th</sup> scenario		5 <sup>th</sup> scenario		6 <sup>th</sup> scenario	
2	0.654	0.8946	1	0.945	1	0.9426	1	0.9448	1	0.9465	1	0.9465
3	0.71	0.8944	0.579	0.8944	0.998	0.94	0.999	0.9421	0.999	0.94	1	0.9421
4	1	0.9032	1	0.9448	1	0.9426	1	0.9448	1	0.9465	1	0.9465
5	0.773	0.899	0.998	0.9446	0.946	0.942	0.999	0.9445	1	0.9463	1	0.9465
6	0.708	0.898	0.612	0.94	0.817	0.9417	0.877	0.944	0.705	0.9376	0.887	0.9421
7	0.959	0.899	0.999	0.9422	1	0.94	1	0.899	1	0.9439	1	0.9421
8	0.777	0.899	0.785	0.944	0.824	0.9417	0.557	0.94	0.863	0.9475	0.979	0.9421
9	0.445	0.896	0.424	0.9398	0.495	0.9395	0.506	0.9399	0.456	0.9395	0.391	0.8964
Network's reliability	0.7532	0.8979	0.7998	0.9369	0.8815	0.9413	0.8676	0.9374	0.8779	0.9432	0.9072	0.9380
Integrated reliability	0.6763		0.7493		0.8298		0.8133		0.8280		0.8509	
Node	7 <sup>th</sup> scenario		8 <sup>th</sup> scenario		9 <sup>th</sup> scenario		10 <sup>th</sup> scenario		11 <sup>th</sup> scenario		12 <sup>th</sup> scenario	
2	1	0.9032	1	0.9425	1	0.9448	1	0.9465	1	0.9465	1	0.9448
3	0.966	0.8989	1	0.94	1	0.8988	1	0.9421	1	0.9439	0.995	0.9421
4	0.601	0.8945	1	0.9425	1	0.9447	1	0.9465	1	0.9465	1	0.9448
5	0.719	0.8989	0.979	0.9420	0.999	0.9445	1	0.9465	1	0.9463	0.999	0.9445
6	0.72	0.8987	0.857	0.9417	0.559	0.94	0.981	0.9421	0.897	0.9457	0.811	0.9439
7	0.729	0.849	1	0.9399	1	0.9421	1	0.9421	0.999	0.9399	0.502	0.8943
8	0.646	0.8983	0.818	0.9417	0.824	0.9439	0.87	0.9421	0.69	0.9376	0.493	0.94
9	0.487	0.8964	0.482	0.9395	0.488	0.9398	0.404	0.8964	0.487	0.9395	0.45	0.9398
Network's reliability	0.7313	0.8979	0.8921	0.9413	0.8589	0.9373	0.907	0.9380	0.8943	0.9432	0.7813	0.9396
Integrated reliability	0.6566		0.8397		0.805		0.8508		0.8435		0.732	

شبکه به صورت شکل ۵، قابلیت اعتماد کل شبکه نسبت به بدترین حالات ممکن در اثر شکست یک لوله به میزان ۳۹ درصد افزایش دارد.

#### ۴- نتیجه گیری

ارزیابی شاخص قابلیت اعتماد مکانیکی اگرچه برای رسیدن آب از گره منبع به گره های مصرف ضروری می باشد ولی برآورد میزان آب قابل دسترس گرهی از لحاظ کمی در قالب شاخص قابلیت اعتماد

مختلف که عدم وجود یک لوله در شبکه و به عبارتی کم کردن تعداد حلقه ها در شبکه می باشد، ارائه شده است. بر اساس شکل ۶، قابلیت اعتماد تلفیقی این شبکه در سناریوهای مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. همان طور که در جدول ۳ مشخص است، قابلیت اعتماد کل شبکه در سناریوهای مختلف از ۰/۶۵۶۶ تا ۰/۸۵۰۹ تغییر می یابد. در صورتی که شبکه به صورت شکل ۵ طراحی شود، قابلیت اعتماد شبکه تا ۰/۹۱۲ افزایش خواهد یافت که لزوم وجود حلقه های بیشتر را برای این شبکه نشان می دهد؛ زیرا با طراحی



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، شبکه‌ای شاخه‌ای و شبکه دوم در این پژوهش دارای ۹ گره است که در آن‌ها قابلیت اعتماد بر پایه قابلیت کاربری لوله‌ها برآورد شده است. در شبکه شاخه‌ای بررسی شده نشان داده شده که اگر در فاز طراحی، تنها به بررسی قابلیت اعتماد هیدرولیکی پرداخته شود، در فاز بهره‌برداری با وجود احتمال شکست لوله‌ها، عملکرد شبکه به خطر می‌افتد. در صورتی که با ایجاد حلقه‌های متعدد احتمال برقراری ارتباط بین گره‌های منبع و مصرف افزایش یابد،

عملکرد شبکه در فاز بهره‌برداری بهبود چشمگیری خواهد داشت. به طوری که در این شبکه با اضافه شدن ۴ لوله و یا به عبارتی ایجاد ۴ حلقه در شبکه، قابلیت اعتماد شبکه به میزان ۱۸/۳ درصد افزایش یافته است. بنابراین با اضافه کردن لوله‌های جدید به شبکه اگرچه هزینه‌های طراحی افزایش می‌یابد ولی به انجام وظیفه شبکه در فاز بهره‌برداری کمک شایان توجهی می‌شود. به طور مثال، شبکه موردی دوم که به صورت حلقوی طراحی شده است، در صورتی که هریک از لوله‌های آن در طراحی شبکه در نظر گرفته نشده بود، در بدترین وضعیت گاهی قابلیت اعتماد شبکه به میزان حدود ۲۸ درصد کاهش داشت.

هیدرولیکی بیان می‌شود. در این پژوهش به ارزیابی قابلیت اعتماد هیدرولیکی و مکانیکی و در نهایت شاخص قابلیت اعتماد کلی شبکه پرداخته شد. در پژوهش‌های پیشین، در محاسبه قابلیت اعتماد هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب، قابلیت اعتماد هیدرولیکی در شرایط عادی محاسبه شده و یا در اثر سناریوهای مختلف شکست به محاسبه قابلیت اعتماد هیدرولیکی پرداخته شده است. این در حالی است که شبکه‌ای که دچار شکست شده، می‌تواند مجدداً شکست را تجربه کند، بنابراین نیاز است تا در هر سناریو، احتمال عدم اتصال گره‌های منبع و مصرف نیز محاسبه شده و در ترکیب با قابلیت اعتماد هیدرولیکی در هر سناریو، ارزیابی دقیق‌تری از قابلیت اعتماد کل شبکه ارائه دهد. در این پژوهش با تعریف جدیدی از قابلیت اعتماد کل به صورت ترکیب قابلیت اعتماد هیدرولیکی و مکانیکی شبکه، سعی در برآورد عملکرد دقیق‌تر شبکه در شرایط شکست لوله‌ها شد.

در روند این پژوهش به منظور شبیه‌سازی شبکه و محاسبه میزان دبی خروجی از گره‌ها در طول بازه ۲۴ ساعته از شبیه‌ساز مبتنی بر فشار EPANET-IMNO استفاده شد. این شبیه‌ساز، الگوریتمی بر پایه تکرار بوده که توانایی همگرایی بالایی به جواب‌های نهایی دارد. همچنین به منظور برآورد قابلیت اعتماد هیدرولیکی از روش نمودارهای تصمیم‌گیری دودویی در قالب نرم‌افزار DNA استفاده شده است. لازم به ذکر است که این نرم‌افزار توانایی مدل‌سازی

## References

- Abunada, M., Trifunović, N., Kennedy, M. & Babel, M. 2014. Optimization and reliability assessment of water distribution networks incorporating demand balancing tanks. *Procedia Engineering*, 70, 4-13.
- 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), 67-82.
- Ataouni, R. & Ermini, R. 2014. Overall reliability assessment of water distribution system. *Procedia Engineering*, 89, 1282-1291.
- Bobbio, A., Terruggia, R., Ciancamerla, E. & Minichino, M. 2008. Evaluating network reliability versus topology by means of BDD algorithm. In: PSAM-9, Hong Kong.
- 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), 13-19.
- Cheung, P., Zyl, J. V. & Reis, L. 2005. Extension of EPANet for pressure driven demand modeling in water distribution. *Proceedings of CCWI2005- Water Management for the 21<sup>st</sup> Century*, Centre for Water Systems, University of Exeter, Exeter, UK, September 5-8, 215-226.
- Dini, M., Shirzad, A. & Tabesh, M. 2016. Comparing the efficiency of hydraulic reliability indices in the design of water distribution systems. *Proceedings of 4th International Reliability Engineering Conference*, Sahand University of Technology. (In Persian)



- El-Jumaily, K. K. & Radi, A. H. 2005. Reliability analysis of water distribution systems. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 12(3), 22-52.
- Gavrila, C., Vartires, A., Gruia, I. & Ardelean, F. 2013. Reliability analysis of water distribution systems. *Proc. of 4<sup>th</sup> Conf. Recent Advances in Energy, Environment, Economics and Technological Innovation*, Paris, France.
- Geem, Z. W. 2015. Multiobjective optimization of water distribution networks using fuzzy theory and harmony search. *Water*, 7(7), 3613-3625.
- Guidolin, M., Burovskiy, P., Kapelan, Z. & Savic, D. A. 2010. CWSNet: An object-oriented toolkit for water distribution system simulations. *Proceedings of the 12th International Conference on Water Distribution System Analysis Conference*, WDSA2010, ASCE, 12-15 September, Tucson, 1-13.
- 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), 593-606.
- Ostfeld, A. 2004. Reliability analysis of water distribution systems. *Journal of Hydroinformatics*, 6(4), 281-294.
- Ostfeld, A. 2012. Optimal reliable design and operation of water distribution systems through decomposition. *Journal of Water Resources Research*, 48, W10521.
- 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.
- Pathirana, A. 2010. EPANet2 desktop application for pressure driven demand modeling. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Water Distribution System Analysis Conference*, WDSA2010, ASCE, 12-15 September, Tucson, 65-74.
- Shirzad, A., Tabesh, M., Farmani, R. & Mohammadi, A. 2013. Pressure-discharge relations with application to head driven simulation of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(6), 660-670.
- Shirzad, A. & Tabesh, M. 2016. New indices for reliability assessment of water distribution networks. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 65(5), 384-395.
- 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), doi:10.1371/journal.pone.0088445.
- 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.
- Tabesh, M. 2015. *Advanced modeling of water distribution networks*, University of Tehran, Tehran, Iran.
- Tabesh, M., Shirzad, A., Arefkhani, V. & Mani, A. 2014. A comparative study between modified and available demand driven based models for head driven analysis of water distribution networks. *Urban Water*, 11(3), 221-230.
- Tabesh, M., Tanyimboh, T. T. & Burrows, R. 2002. Head driven simulation of water supply networks. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 15(1), 11-22.
- Terruggia, R. 2010. *Reliability analysis of probabilistic networks*, Department of Computer Science, University of Degli Studi di Torino, Italy.
- Wagner, J., Shamir, U. & Marks, D. H. 1998. Water distribution reliability: Simulation methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(3), 276-294.
- Xing, L. 2008. *Dependable network analyzer*, Developed by Akhilesh Shrestha, University of Massachusetts, Dartmouth.
- Yannopoulos, S. & Spiliotis, M. 2013. Water distribution system reliability based on minimum cut set approach and the hydraulic availability. *Water Resources Management*, 27(6), 1821-1836.

