

# A New Reliability Index for Evaluating the Performance of Water Distribution Network

*M. Dini<sup>1</sup>, M. Tabesh<sup>2</sup>*

1. Assist. Prof., Department of Civil Engineering, Shahid Madani University of Azarbayjan, Tabriz, Iran  
(Corresponding Author) m.dini@azaruniv.ac.ir
2. Prof., Center of Excellence on Engineering and Management of Civil Infrastructure, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

*(Received May 27, 2016 Accepted Apr. 6, 2017)*

#### To cite this article :

Dini, M. and Tabesh, M., 2018, "A new reliability index for evaluating the performance of water distribution network." *Journal of Water and Wastewater*, 29(3), 1-16. Doi: 10.22093/wwj. 2017. 51035.2154 (In Persian)

## Abstract

Various reliability indices have been defined by researchers for the water distribution networks. Due to the complexity and heterogeneous nature of distribution networks, results of indices can vary substantially and municipalities have hard time to select the most practical indices for their networks. This study was undertaken to develop a new method for identifying the best reliability index by considering various factors including the appropriate sensitivity to changes in network parameters, the appropriate shift in extreme conditions, the capability in covering critical condition, hydraulic condition, and water quality reliability. To accomplish the objective of the study, several water distribution networks were evaluated under multiple scenarios and the optimum reliability indices were verified with an example real water distribution network in Ahar. Controlling parameters included in scenario analysis for network reliability indices include: minimum, maximum and optimal pressure, residual chlorine in nodes, velocity in pipes, nodal pressure reliability, pipe velocity reliability, and nodal residual chlorine reliability. To evaluate the performance of defined index, a two-loop test (critical) were compared with the conventional single-loop test (normal). The performance assessment of indices obtained from this study showed that the index values ranged between 0.11 and 1.0, which indicate the normality and the appropriate sensitivity of the indices. Also, by increasing the residual chlorine of the reservoir, the network reliability index changed from 0.54 to 0.75 and then as the residual chlorine decreases in the distribution network the reliability index decreased back to 0.54. This appropriate shift in reliability index while changing residual chlorine in the network, clearly shows the effectiveness of new method in determining the reliability indices under extreme conditions. Also, the new method did not respond to the failure of some network components, as were evident with insignificant change in the indices values under critical conditions. From the results of this study generally can be concluded that the newly defined reliability indices is an efficient way for evaluating the performance of water distribution networks.

**Keywords:** Reliability Index, Nodal Pressure, Pipe Velocity, Nodal Residual Chlorine, Water Distribution Network.



# ارائه شاخص قابلیت اطمینان جدید برای ارزیابی عملکرد شبکه توزیع آب

مهدی دینی<sup>۱</sup>، مسعود تابش<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران  
(نویسنده مسئول) m.dini@azaruniv.ac.ir

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌های عمرانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت ۹۵/۳/۷ پذیرش ۹۶/۱/۱۷)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

دینی، م.، تابش، م.، ۱۳۹۷، "ارائه شاخص قابلیت اطمینان جدید برای ارزیابی عملکرد شبکه توزیع آب" مجله آب و فاضلاب، ۲۹(۳)، ۱۶-۱.

Doi: 10.22093/wwj.2017. 51035.2154

## چکیده

در سال‌های اخیر شاخص‌های قابلیت اطمینان زیادی به منظور بررسی شبکه‌های آبی توسط پژوهشگران مختلف تعریف شده است، به طوری که کاربران و مدیران به دلیل پیچیدگی، تعدد و دامنه تغییرات ناهمگون نتایج برای شاخص‌ها، در به کارگیری آنها دچار سردرگمی هستند. در این پژوهش با در نظر گرفتن ویژگی‌های یک شاخص کاربردی که شامل نرمال بودن نتایج شاخص، حساسیت مناسب شاخص نسبت به تغییرات پارامترهای شبکه، تغییر جهت مناسب شاخص در شرایط حدی و قابلیت شاخص در پوشش شرایط بحرانی بهره‌برداری است، شاخص‌های قابلیت اطمینان هیدرولیکی و کیفی جدیدی ارائه شد. برای این منظور ضوابط و معیارهای طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع آب به صورت کنترل حدود تغییرات حداقل و حداکثر و بهینه فشار در گره‌ها، سرعت جریان در لوله‌ها و کلر آزاد باقیمانده در گره‌ها در نظر گرفته شد و شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی، شاخص قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله‌ای، شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی و شاخص قابلیت اطمینان کل شبکه تعریف شد. برای ارزیابی عملکرد شاخص تعریف شده، از یک شبکه نمونه دو حلقه‌ای و یک شبکه واقعی توزیع آب استفاده شد. بررسی مقادیر شاخص‌ها نشان داد که مقدار شاخص‌ها بین ۰/۱۱ و ۱/۰ در نوسان است و این تغییر نشان دهنده نرمال بودن و حساسیت مناسب شاخص‌ها است. همچنین با افزایش مقادیر هد و کلر باقیمانده مخزن، شاخص قابلیت اطمینان تلفیقی شبکه‌ای از ۰/۵۴ به ۰/۷۵ افزایش یافته و سپس به ۰/۵۴ کاهش یافت و این تغییر نشان دهنده تغییر جهت مناسب شاخص در شرایط حدی است. همچنین با شکست برخی اجزای شبکه، مقدار شاخص‌ها تغییر محسوسی نکرد و این نشان دهنده قابلیت شاخص‌ها در پوشش شرایط بحرانی است. با نتایج حاصل از این پژوهش مشخص شد که در مجموع شاخص‌های تعریف شده از کارایی مناسبی برای ارزیابی عملکرد شبکه‌های توزیع آب برخوردار هستند.

**واژه‌های کلیدی:** شاخص قابلیت اطمینان، فشار گرهی، سرعت جریان لوله‌ای، کلر باقیمانده گرهی، شبکه توزیع آب

## ۱- مقدمه

احتمال این که یک سامانه در یک دوره زمانی معین و در محیطی مشخص، وظیفه‌اش را در محدوده تعریف شده به خوبی انجام دهد (Bazovski, 1961). قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع آب به صورت قابلیت اطمینان مکانیکی، هیدرولیکی و کیفی مطرح

برای تعیین میزان اطمینان از عملکرد شبکه‌های توزیع آب در شرایط مختلف بهره‌برداری، از شاخصی به نام قابلیت اطمینان استفاده می‌شود. به طور کلی تعریف قابلیت اطمینان عبارت است از



برای شبکه‌های چندمخزنی، قابلیت استفاده ندارد؛  
- برای حالت شکست در شبکه تعریف شده و برای شبکه در حالت  
نرمال بهره‌برداری قابل استفاده نیست و کاربرد عمومی آنها را  
محدود می‌کند.

هدف این پژوهش تعیین قابلیت اطمینان شبکه در شرایط  
نرمال بهره‌برداری است به طوری که قابلیت کاربرد عمومی داشته  
باشد، لذا پژوهش‌هایی که با این ایده توسعه یافته‌اند، بررسی  
می‌شوند. شاخص شکست حجم تحویل شده آب به صورت مجموع  
تمام حجم آب تحویل نشده، تقسیم بر مجموع تمام حجم مورد نیاز  
توسط مصرف‌کنندگان در گره‌های مصرف در طول کل دوره  
شبیه‌سازی، تعریف می‌شود. شاخص شکست زمانی تقاضای تحویل  
شده به صورت نسبت مجموع تمام دوره‌های زمانی، که در آنها  
تقاضای تأمین شده در گره‌های مصرف خارج از محدوده فاکتور  
تقاضا است، به تمام دوره زمانی در کل بازه شبیه‌سازی تعریف  
می‌شود (Tabesh, 2016). همچنین شاخص شکست زمانی کیفیت  
تحویل شده به صورت مجموع همه دوره‌ها، که در آن غلظت آب  
تأمین شده پایین‌تر از فاکتور غلظت آستانه است، تقسیم بر دوره  
تقاضا در کل زمان اجرا، تعریف می‌شود (Ostfeld, 2002). شاخص  
شکست کیفی به صورت تجاوز از حدود حداقل و حداکثر مجاز کلر  
باقیمانده تعریف شده است که در آن در صورت تجاوز مقادیر کلر  
باقیمانده شبکه از حدود حداقل و حداکثر، شکست گزارش می‌شود  
(Filion et al., 2004). در این شاخص‌ها، تغییرات پارامترهای  
هیدرولیکی و کیفی و نقطه مطلوبیت آنها در مقدار شاخص  
تأثیرگذار نیست و ممکن است مقادیر بالای شاخص با مقادیر  
نامطلوب پارامترهای شبکه حاصل شود، مانند زمانی که در مقادیر  
بالای فشار، تمامی تقاضای شبکه تأمین شود و مقدار شاخص برابر  
یک باشد که عملاً از نظر عملکرد هیدرولیکی شبکه مطلوب نیست.  
از میان شاخص‌هایی که در آنها به این موضوع توجه شده است،  
شاخص اطمینان‌پذیری فازی و شاخص کارایی کیفی شبکه است.  
شاخص اطمینان‌پذیری فازی به شکلی تعریف شده است که در آن  
اطمینان‌پذیری گره‌های شبکه در صورتی افزایش می‌یابد که فشار  
آنها به میانگین فشار حداقل و حداکثر مجاز نزدیک شود؛ به عبارت  
دیگر در این شاخص یک نقطه مطلوب بر اساس میانگین فشار  
حداقل و حداکثر مجاز شبکه تعریف شده است که اطمینان‌پذیری

است. این قابلیت‌های گره‌های شبکه تقاضای معینی را با فشار  
مطلوب و کیفیت مناسب دریافت می‌کنند (Filion et al., 2004).  
هر چه میزان این شاخص در یک شبکه توزیع آب بیشتر باشد،  
نشان‌دهنده میزان اعتماد بیشتر به عملکرد شبکه در شرایط بحرانی  
است، یعنی با وقوع شرایط بحرانی، تعداد کمتری از مصرف‌کنندگان  
تحت تأثیر قرار می‌گیرند. برای قابلیت اطمینان هیدرولیکی و کیفی  
تعاریف بسیار زیادی ارائه شده است که در آنها به طور کلی تأمین  
دبی مورد نیاز در گره‌ها و کل شبکه، یا تأمین دبی مورد نیاز با فشار  
و کیفیت کافی که در آن دبی تأمین شده نیز تابعی از فشار در گره‌ها  
است، مورد توجه بوده است. این تعاریف به صورت قابلیت اطمینان  
گره‌ی یا کل شبکه و در قالب افزونگی<sup>۱</sup> (Bhave, 1978)، قابلیت  
ارتجاع<sup>۲</sup> (Prasad and park, 2004, Todini, 2000)، آنتروپی<sup>۳</sup>  
(Awumah and Goulter, 1992)، شاخص اطمینان‌پذیری<sup>۴</sup>  
(Carrijo et al., 2004) و قابلیت ارتجاع اصلاح شده<sup>۵</sup> (Jayaram,  
2006, Soltani, 2009) ارائه شده است. قابلیت اطمینان گره‌ی،  
به صورت محاسبه کارایی هیدرولیکی و کیفی هر گره (Gupta and  
Zhao et al., 2010, Kansal et al., 2004, Bhave, 1996)  
قابلیت اطمینان کل شبکه، به صورت متوسط وزنی قابلیت اطمینان  
هیدرولیکی و کیفی گره‌های شبکه تعریف می‌شود (Tabesh, 1998,  
Tanyimboh, 2001). قابلیت اطمینان حجمی هیدرولیکی، برابر  
با نسبت حجم کل جریان خروجی به حجم جریان مورد نیاز و  
قابلیت اطمینان حجمی کیفی، به صورت حجم کل جریان خروجی با  
کیفیت مجاز به حجم کل جریان خروجی مورد نیاز در کل گره‌های  
شبکه تعریف می‌شوند (Gupta et al., 2009, Ostfeld, 2002). در  
شاخص‌های بالا اشکالات و محدودیت‌های مختلفی به چشم  
می‌خورد که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد

- در برخی موارد برای قسمتی از دامنه جواب، به طور مثال حالت  
کمبود یا مازاد فشار، جواب مناسب وجود ندارد؛

- افزایش قابلیت اطمینان، منجر به افزایش بی‌قید و شرط فشار در  
گره‌ها می‌شود؛

- برای حالت خاصی از شبکه مثلاً شبکه تک‌مخزنی تعریف شده و

<sup>1</sup> Redundancy

<sup>2</sup> Resiliency

<sup>3</sup> Entropy

<sup>4</sup> Index of Hydraulic Benefit

<sup>5</sup> Modified Resiliense Index



کیفی به صورت شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی، شاخص قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله‌ای، شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی و شاخص قابلیت اطمینان کل شبکه تعریف شده است. (The Management & Planing Organization of Iran, 2013)

برای کنترل کارایی و عملکرد شاخص‌های تعریف شده از یک شبکه نمونه و یک شبکه توزیع آب واقعی استفاده شد. محاسبات با کدنویسی در محیط متلب<sup>۱</sup> و با ایجاد ارتباط بین شبیه‌ساز شبکه ایپانت<sup>۲</sup> و متلب انجام شده است.

هدف از ارائه شاخص‌های جدید، ارزیابی کارایی شبکه در زمان نرمال بهره‌برداری است، به طوری که با پیشینه‌سازی این شاخص‌ها در مرحله طراحی، در مرحله بهره‌برداری قابلیت اطمینان شبکه افزایش یافته و در مقابل شرایط بحرانی نوسان کمتری داشته باشد. همچنین با توجه به حد مطلوبیت تعریف شده برای معیارهای هیدرولیکی و کیفی شبکه، بین مقادیر مطلوب برای معیارها و شاخص‌های تعریف شده همخوانی وجود خواهد داشت، به عبارت دیگر مقادیر حداکثر شاخص‌ها زمانی حاصل می‌شود که قسمت‌های مختلف شبکه دارای معیارهای هیدرولیکی و کیفی مطلوب باشند.

سادگی محاسبات، همخوانی مناسب شاخص‌های تعریف شده با ضوابط و معیارهای هیدرولیکی و کیفی طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع آب و دارا بودن ویژگی‌های یک شاخص خوب از جمله نرمال بودن شاخص، حساسیت مناسب شاخص نسبت به تغییرات پارامترهای شبکه، تغییر جهت مناسب شاخص (افزایش یا کاهش مقادیر شاخص) در شرایط حدی و قابلیت شاخص در پوشش شرایط بحرانی بهره‌برداری، از نوآوری‌های این پژوهش محسوب می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش یک شاخص جدید برای ارزیابی عملکرد شبکه بر اساس معیارهای طراحی و بهره‌برداری شبکه ارائه شده است روند نمای روش پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. در تعریف شاخص‌های جدید، راهکارهای زیر در نظر گرفته شده است.

شبکه در آن نقطه برابر یک است و با فاصله گرفتن از آن کمتر می‌شود (Ghajarnia, 2009).

در این شاخص وزن گره‌های پرمصرف کوچک‌تر و وزن گره‌های کم مصرف بزرگ‌تر می‌شود. اینکه فرض شده است اطمینان‌پذیری گره‌های شبکه در صورتی برابر یک است که فشار آنها برابر میانگین فشار حداقل مطلوب و حداکثر مجاز باشد، هر چند ایده خوبی است اما کاملاً منطقی نیست، چون در شبکه فشار اضافه ایجاد می‌کند. همچنین مقدار به دست آمده برای شاخص اطمینان‌پذیری شبکه نرمال نیست، زیرا به صورت مجموع مقدار شاخص اطمینان‌پذیری در گره‌ها محاسبه می‌شود. لذا با داشتن این شاخص برای دو شبکه مجزا از هم نمی‌توان قابلیت اطمینان شبکه‌ها را با هم مقایسه نمود. شاخص کارایی کیفی کل شبکه بر اساس منحنی جریمه تعریف شده برای کلر آزاد باقیمانده در گره‌های شبکه ارائه شده است (Coelho, 1996, Tabesh and Dolatkhaei, 2006).

این شاخص از شاخص‌های کیفی خوب قابل استفاده در شبکه‌ها است ولی منحنی جریمه تعریف شده برای کلر آزاد باقیمانده در گره‌های شبکه تطابق خوبی با استاندارد کیفی آب‌های آشامیدنی در ایران ندارد و نیاز است بر این اساس تعریف مجدد انجام شود. به طور مثال برای مقادیر کمی کمتر از  $0.2$  میلی‌گرم در لیتر در منحنی جریمه، شبکه دارای شاخص کارایی کیفی بالا در حد یک است، در حالی که در استاندارد ایران مقدار کمتر از  $0.2$  میلی‌گرم در لیتر از نظر کارایی کیفی غیرقابل قبول است. همچنین اگر در یک شبکه توزیع آب در شرایط عادی مقدار کیفی در گره‌های شبکه،  $0.2$  میلی‌گرم در لیتر باشد که در حالت کارایی کیفی صد در صد قرار دارد، با اندکی تغییر مانند شکست اجزای شبکه و یا تغییرات فصلی بهره‌برداری، مقدار کیفی می‌تواند به کمتر از  $0.2$  کاهش یابد و شبکه را از نظر کیفی در حالت هشدار قرار دهد.

در این پژوهش، بر اساس ضوابط و معیارهای هیدرولیکی و کیفی طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع آب (نشریه ۳-۱۱۷- بازنگری اول) و با لحاظ کردن معیار شاخص‌های خوب شامل نرمال بودن نتایج شاخص، حساسیت مناسب شاخص نسبت به تغییرات پارامترهای شبکه، تغییر جهت مناسب شاخص (افزایش یا کاهش مقادیر شاخص) در شرایط حدی و قابلیت شاخص در پوشش شرایط بحرانی، شاخص‌های قابلیت اطمینان هیدرولیکی و

<sup>1</sup> Matlab

<sup>2</sup> EPANET



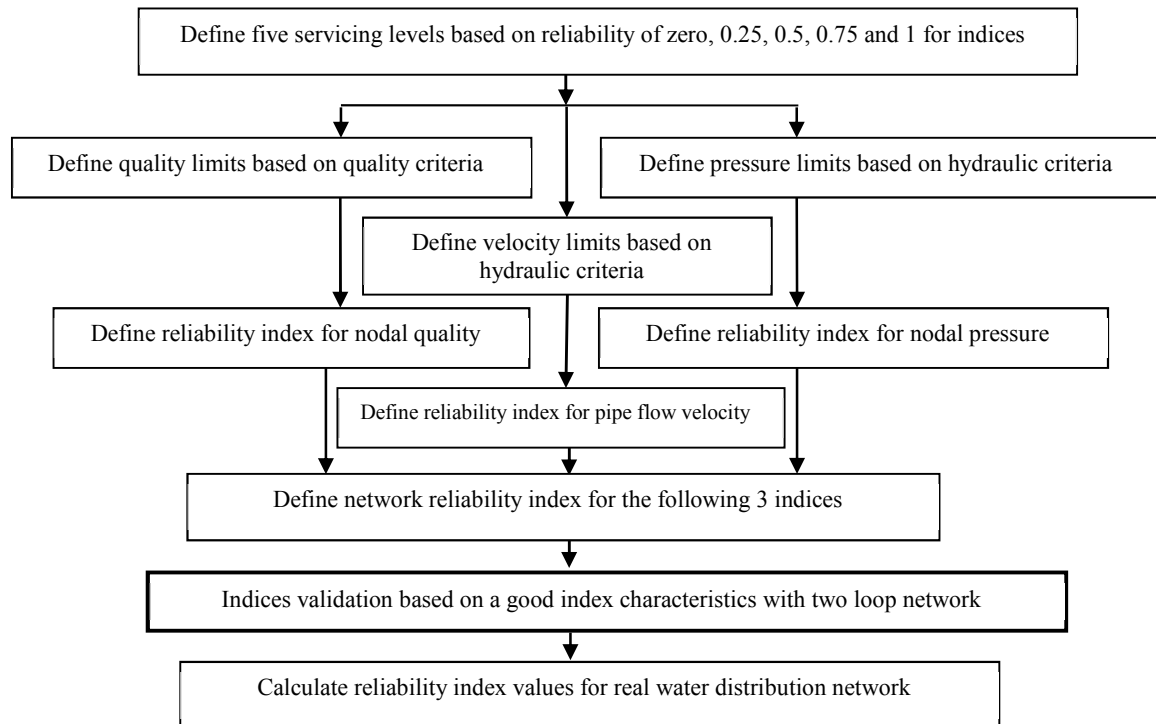


Fig.1. Research methodology flowchar

شکل ۱- روندنمای روش پژوهش

با توجه به اینکه مقدار حداقل مجاز و حداکثر مجاز فشار و کیفیت آب در گره‌ها و سرعت جریان در لوله‌ها در شرایط عادی بهره‌برداری از شبکه تعریف می‌شود، در شرایط شکست اجزای شبکه این مقادیر می‌تواند به سرعت دچار تغییر شود. حد پایین فشار یا کلر باقیمانده و یا سرعت جریان می‌باشد که با کم کردن آن از مقدار بهینه، عملکرد شبکه از حالت سرویس‌دهی خوب به سرویس‌دهی قابل قبول تغییر می‌کند. حد بالای فشار یا کلر باقیمانده و یا سرعت جریان می‌باشد که با اضافه کردن آن به مقدار بهینه، عملکرد شبکه از حالت سرویس‌دهی خوب به سرویس‌دهی قابل قبول تغییر می‌کند. برای توجیه دلایل انتخاب حد پایین و حد بالای مقادیر فوق، فرض می‌شود که شبکه دو حلقه‌ای، در حالت دارا بودن یک مخزن و یا دو مخزن، یک بار در شرایط نرمال بهره‌برداری (سالم بودن تمامی اجزای شبکه) و بار دیگر در شرایط بحرانی (شکست یکی از اجزای شبکه) اجرا شود. در جدول ۱ نتایج تغییرات پارامترها در شرایط نرمال و بحرانی بهره‌برداری ارائه شده است که در آن  $P_N - P_C$ : اختلاف فشار گرهی،  $C_N - C_C$ : اختلاف کلر باقیمانده گرهی و  $V_N - V_C$ : اختلاف سرعت جریان لوله‌ای در شرایط

- برای ارزیابی عملکرد شبکه‌های توزیع آب، پنج سطح مختلف سرویس‌دهی (Coelho, 1996) در نظر گرفته شده است که سطح اول عدم سرویس‌دهی (قابلیت اطمینان برابر با صفر)، سطح دوم سرویس‌دهی غیرقابل قبول (قابلیت اطمینان برابر با ۰/۲۵)، سطح سوم سرویس‌دهی قابل قبول (قابلیت اطمینان برابر با ۰/۵)، سطح چهارم سرویس‌دهی خوب (قابلیت اطمینان برابر با ۰/۷۵) و سطح پنجم سرویس‌دهی مطلوب یا بهترین سرویس‌دهی (قابلیت اطمینان برابر با یک) است.

- برای کنترل عملکرد کیفی در گره‌های شبکه، مقادیر کلر باقیمانده به صورت  $C_{min}$ : حداقل کلر باقیمانده مطلق،  $C_1$ : حداقل کلر باقیمانده مجاز،  $C_0$ : مقدار بهینه کلر باقیمانده،  $C_u$ : حداکثر مقدار مجاز کلر باقیمانده و  $C_{max}$ : حداکثر کلر باقیمانده مطلق در شبکه تعریف می‌شود.

برای کنترل عملکرد هیدرولیکی در لوله‌های شبکه، مقادیر سرعت جریان در لوله‌ها، به صورت  $V_{min}$ : حداقل مطلق سرعت جریان،  $V_1$ : حداقل مقدار مجاز سرعت جریان،  $V_0$ : مقدار بهینه سرعت جریان،  $V_u$ : حداکثر مجاز سرعت جریان و  $V_{max}$ : حداکثر مطلق سرعت جریان در لوله‌ها تعریف می‌شود.

جدول ۱- تغییرات پارامترهای شبکه دو حلقه‌ای در شرایط نرمال و بحرانی بهره‌برداری

Table 1. Variation of two-loop network parameters under normal and critical operation conditions

Pipe or node number	Two-loop network with single reservoir (normal)			Two-loop network with two reservoirs (Critical)		
	$P_N-P_C$ (m)	$C_N-C_C$ (mg/L)	$V_N-V_C$ (m/s)	$P_N-P_C$ (m)	$C_N-C_C$ (mg/L)	$V_N-V_C$ (m/s)
1	0	0	0	0	0	0.28
2	0	0	-0.13	-1.44	0	0.69
3	2.34	0	0.12	-6.17	0.07	0.05
4	-1.03	0	0.74	-0.57	0	-0.29
5	3.64	-0.01	-0.01	17.8	-0.05	0.1
6	-0.86	0	-0.08	-0.53	0	0.65
7	3.31	-0.02	-0.13	0.69	-0.01	0.69
8	0	0	0.02	0	0	0.71

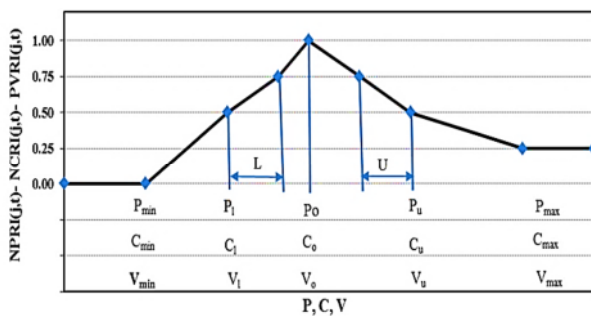


Fig. 2. Utility function for nodal and pipe reliability index

شکل ۲- تابع مطلوبیت شاخص قابلیت اطمینان گرهی و لوله‌ای شبکه

شبکه‌های توزیع آب در ایران برابر ۵۰ متر است که در شرایط خاص و در صورتی که وضع توپوگرافی منطقه اضافه هزینه قابل ملاحظه‌ای را ایجاد کند، حداکثر فشار مجاز تا ۶۰ متر افزایش می‌یابد. همچنین حداقل فشار مجاز شبکه برای ساختمان‌های یک طبقه برابر ۱۴ متر و برای هر طبقه اضافی ۴ متر جهت تأمین ارتفاع و افت فشار داخل ساختمان به عدد فوق اضافه می‌شود. به‌طور کلی با توجه به حدود مطرح شده در نشریه شماره ۳-۱۱۷ بازنگری اول، حداقل فشار ممکن در شبکه ( $P_{min}$ ) که به ازای آن، برداشت آب از گره‌های مصرف در ساختمان‌ها در حد صفر بوده و شبکه در حالت عدم سرویس‌دهی قرار داشته باشد، در حالتی پیش می‌آید که فشار در نقطه انشعاب ورودی ساختمان برابر ۱۰ متر باشد. در یک ساختمان چهار طبقه در طبقه همکف زمانی که فشار در ورودی ساختمان برابر ۱۰ متر باشد، امکان برداشت آب بسیار کم خواهد بود، زیرا ۱۰ متر فشار موجود صرف افت در کنترلر آب و لوله‌کشی داخل ساختمان خواهد شد. همچنین با توجه به شرایط ایران که در آن حداکثر طبقاتی که فشار آن باید از شبکه تأمین شود، چهار طبقه

نرمال نسبت به شرایط بحرانی بهره‌برداری است. اعداد منفی به معنی افزایش مقادیر و اعداد مثبت به معنی کاهش مقادیر می‌باشد. بررسی تغییرات فشار و کلر باقیمانده گرهی و سرعت جریان لوله‌ای در شبکه دو حلقه‌ای با یک مخزن و دو مخزن در شرایط نرمال و شکست لوله ۴ یا ۷ نشان می‌دهد که شکست اجزای شبکه همچنان که می‌تواند منجر به کاهش پارامترهای فوق در برخی گره‌های شبکه شود، می‌تواند منجر به افزایش پارامترهای فوق در برخی گره‌های دیگر شود. از این رو بهتر است برای عملکرد مطلوب شبکه در حالت شکست اجزاء، حد پایین و حد بالای پارامترهای فوق در نظر گرفته شود تا همچنان شبکه با قابلیت اطمینان بیشتری به کار خود ادامه دهد تا قابلیت شاخص در پوشش شرایط بحرانی بهره‌برداری را افزایش دهد. بر اساس راهکارهای مطرح شده، تابع مطلوبیت قابلیت اطمینان فشار گرهی و قابلیت اطمینان فشار گرهی و قابلیت اطمینان کیفیت گرهی و قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله‌ای به صورت شکل ۲ تعریف می‌شود که بر اساس ضوابط طراحی در نشریات و استانداردهای کشورهای مختلف مقادیر حدی موجود قابل تعریف می‌باشد. در شکل ۲،  $NPRI(j, t)$ : شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی در گره  $j$  در زمان  $t$  می‌باشد. با تغییر متغیر فشار گرهی به کلر آزاد باقیمانده در گره‌ها، شاخص قابلیت اطمینان کیفیت گرهی در گره  $j$  در زمان  $t$   $NCRI(j, t)$  و با تغییر متغیر فشار گرهی به سرعت جریان در لوله‌ها، شاخص قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله‌ای در زمان  $t$   $PVRI(j, t)$  محاسبه می‌شود. سایر پارامترها در قسمت مواد و روش‌ها معرفی شده است.

## ۱-۲- شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی

بر اساس نشریه شماره ۳-۱۱۷ بازنگری اول، حداکثر فشار مجاز



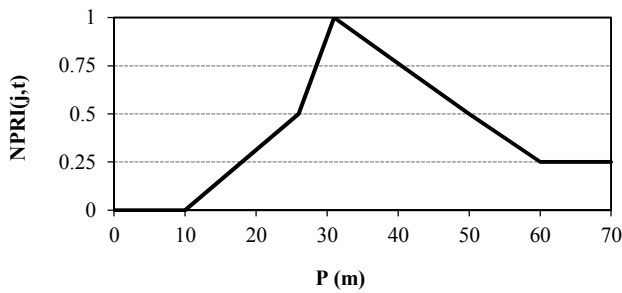


Fig. 3. Utility function for nodal pressure reliability index

شکل ۳- تابع مطلوبیت شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی

سرویس دهی قابل قبول تا غیر قابل قبول قرار دارد. برای فشارهای بالاتر از حداکثر فشار مجاز (۶۰m)، شبکه در حالت سرویس دهی غیر قابل قبول است. برای فشارهای بزرگ تر از حداکثر فشار مجاز، عدم سرویس دهی زمانی اتفاق می افتد که فشار در شبکه معادل فشار ترکیبگی لوله ها باشد. نظر به این که این فشار در لوله های مصرفی در شبکه های توزیع آب با توجه به نوع لوله مصرفی از ۱۶۰ متر برای لوله های پلی اتیلن تا ۹۰۰ متر برای لوله های چدن نشکن (Monzavi, 1997) متغیر است، احتمال وقوع چنین فشارهایی بسیار کم است و به همین دلیل می توان گفت در شبکه های توزیع آب، عدم سرویس دهی ناشی از افزایش فشار شبکه و ترکیدن لوله ها بسیار نادر خواهد بود (Monzavi 1997). تابع مطلوبیت شاخص قابلیت اطمینان به صورت معادله ۱ است.

(۱)

$$NPRI(j, t) = \begin{cases} 0 & P < 10m \\ \frac{1}{32}(P - 10) & 10m < P < 26m \\ \frac{1}{10}(P - 26) + 0.5 & 26m < P < 31m \\ 1 & P = 31m \\ -\frac{1}{38}(P - 31) + 1.0 & 31m < P < 50m \\ -\frac{1}{40}(P - 50) + 0.5 & 50m < P < 60m \\ 0.25 & 60m < P \end{cases}$$

که در آن مقدار شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی و فشار گرهی در گره  $j$  ام در زمان  $t$  می باشد. شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه به صورت زیر به دست می آید

$$NPRI = \frac{\sum_{j=1}^{NN} Q_{j,t}^{req}(NPRI(j,t))}{\sum_{j=1}^{NN} Q_{j,t}^{req}} \quad (2)$$

است، حداقل فشار بهینه شبکه که به ازای آن، برداشت آب از گره های مصرف در شبکه در شرایط نرمال به صورت صد در صد امکان پذیر باشد ( $P_1$ )، برابر ۲۶ متر خواهد بود. با توجه به مطالعات شیرزاد در سال ۲۰۱۳ در حالت وجود شکست در لوله های شبکه برای تأمین افت فشار ناشی از طولانی شدن مسیر نیاز به ۵ متر مازاد در شبکه است. لذا در شرایط وجود فشار گرهی برابر ۲۶ متر در شبکه و وقوع شکست، با توجه به کمبود فشار ناشی از طولانی شدن مسیر، شبکه آب در حالت سرویس دهی مطلوب نبوده ولی قابل قبول خواهد بود (Shirzad, 2013). با اعمال مقدار ۵ متر فشار به عنوان فشار مازاد برای غلبه بر افت های اضافی در شرایط شکست لوله ها، شبکه در فشار گرهی برابر ۳۱ متر در حالت سرویس دهی مطلوب قرار خواهد گرفت. با فرض حد پایین فشار ( $L$ )، برابر نصف فشار مازاد (۲/۵ متر) و حد بالای فشار ( $U$ )، برابر نصف اختلاف حداکثر فشار مجاز و فشار بهینه در شبکه (۹/۵ متر)، مقدار فشار سطح سرویس دهی خوب تعریف خواهد شد. در جدول ۲ حدود تغییرات فشار برای شبکه های توزیع آب در ایران نشان داده شده است.

جدول ۲- مقادیر حدی فشار در گره های شبکه توزیع آب

Table 2. Limit values for pressure in nodes of water distribution network

Parameter	$P_{min}$	$P_1$	$L$	$P_0$	$U$	$P_u$	$P_{max}$
Value (m)	10	26	2.5	31	9.5	50	60

تابع مطلوبیت شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی در گره های شبکه به صورت شکل ۳ تعریف شده است. در این شکل تا فشار گره برابر ۱۰ متر، شبکه در حالت عدم سرویس دهی، از ۱۰ تا ۲۶ متر در حالت عدم سرویس دهی تا سرویس دهی قابل قبول، از ۲۶ تا ۲۸/۵ متر در حالت سرویس دهی قابل قبول تا خوب و از ۲۸/۵ تا ۳۱ متر در حالت سرویس دهی خوب تا مطلوب قرار دارد. برای فشارهای بیشتر از فشار ۳۱ متر، تعداد حوادث، تلفات آب و نشت در شبکه افزایش می یابد و مجدداً قابلیت سرویس دهی شبکه کاهش پیدا می کند. بنابراین از فشار ۳۱ تا ۴۰/۵ متر شبکه در حالت سرویس دهی مطلوب تا خوب، از فشار ۴۰/۵ تا ۵۰ متر در حالت سرویس دهی خوب تا قابل قبول و از فشار ۵۰ تا ۶۰ متر در حالت



که در آن

NPRI شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه، NN تعداد گره‌های شبکه،  $Q_{j,t}^{req}$  تقاضای مورد نیاز گره J ام در زمان t است.

### ۲-۲- شاخص قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله‌ای

بر اساس نشریه شماره ۳-۱۱۷ بازنگری اول، حداکثر سرعت مجاز در شبکه‌های توزیع آب به‌طور معمول ۲ متر بر ثانیه و در مواقع وجود جریان آتش‌نشانی برابر ۲/۵ متر بر ثانیه است. به‌منظور جلوگیری از رسوب‌گذاری در لوله‌ها و تغییر شرایط کیفی آب، حداقل سرعت ۰/۳ متر بر ثانیه توصیه شده است. همچنین بهتر است طراحی به نحوی صورت گیرد که سرعت در لوله‌های با قطر کمتر از ۵۰۰ میلی‌متر در محدوده ۰/۸ - ۱/۰ متر بر ثانیه و برای لوله‌های با قطر بالای ۵۰۰ میلی‌متر در محدوده ۱/۲ - ۰/۸ متر بر ثانیه که به سرعت اقتصادی معروف است، قرار گیرد. به‌طور کلی حدود سرعت جریان در شبکه توزیع آب به‌صورت جدول ۳ است که در آن حداقل مطلق و حداقل مجاز سرعت جریان در لوله‌ها به ترتیب صفر و ۰/۳ متر بر ثانیه و حد پایین سرعت جریان با توجه به اختلاف حد پایین سرعت اقتصادی از حداقل مجاز سرعت جریان در لوله‌ها برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. سرعت یک متر بر ثانیه برای تمامی قطرها به‌صورت مشترک سرعت بهینه و اقتصادی است. حد بالای سرعت جریان بر اساس اختلاف حداکثر مجاز سرعت جریان از حد بالای سرعت اقتصادی برابر ۰/۸ و مقدار حداکثر مجاز سرعت جریان و حداکثر مطلق سرعت جریان به ترتیب برابر ۲/۰ و ۲/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. به‌طور کلی در شاخص قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله‌ای، در محدوده سرعت صفر تا ۰/۳ متر بر ثانیه، شبکه در حالت عدم سرویس‌دهی تا سرویس‌دهی قابل قبول قرار دارد.

جدول ۳- مقادیر حدی سرعت جریان در لوله‌های شبکه توزیع آب

Table 3. Limit values for velocity in water distribution network pipes

Parameter	$V_{min}$	$V_l$	L	$V_o$	U	$V_u$	$V_{max}$
Value (m/s)	0.0	0.3	0.5	1.0	0.8	2.0	2.5

در محدوده سرعت ۰/۳ تا ۰/۸ متر بر ثانیه در حالت سرویس‌دهی قابل قبول تا خوب و در محدود سرعت ۰/۸ تا ۱/۰ متر بر ثانیه در حالت سرویس‌دهی خوب تا مطلوب قرار دارد.

با افزایش سرعت به دلیل افزایش افت در لوله‌های شبکه، افت فشار زیاد می‌شود. از این رو شرایط سرویس‌دهی شبکه نیز کاهش می‌یابد.

در محدوده سرعت ۱/۰ تا ۱/۲ متر بر ثانیه شبکه در حالت سرویس‌دهی مطلوب تا قابل قبول، در محدوده سرعت ۱/۲ تا ۲/۰ متر بر ثانیه در حالت سرویس‌دهی خوب تا قابل قبول، در محدوده سرعت ۲ تا ۲/۵ متر بر ثانیه شبکه در حالت سرویس‌دهی قابل قبول تا غیر قابل قبول قرار دارد.

با افزایش سرعت در شبکه از ۲/۵ متر بر ثانیه به بالا، به دلیل اینکه افت هد با توان دوم سرعت رابطه دارد، افت فشار به شدت افزایش می‌یابد، اما این افت به حدی نیست که شبکه را به حالت عدم سرویس‌دهی برساند. از این رو برای سرعت‌های بیشتر از سرعت ۲/۵ متر بر ثانیه حالت سرویس‌دهی شبکه غیر قابل قبول (قابلیت اطمینان برابر ۰/۲۵) در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۴ نمودار تابع مطلوبیت مذکور نشان داده شده است.

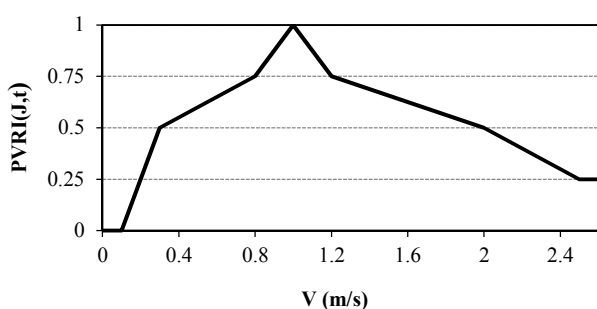


Fig. 4. Utility function for pipe velocity reliability index  
شکل ۴- تابع مطلوبیت شاخص قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله‌ای

شاخص قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله‌ای شبکه از رابطه ۷ محاسبه می‌شود

$$PVRI = \frac{\sum_{j=1}^{NP} |Q_{i,t}| (PVRI(i,t))}{\sum_{i=1}^{NP} |Q_{i,t}|} \quad (3)$$

که در آن

PVRI شاخص قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله‌ای شبکه، NP تعداد لوله‌های شبکه،  $Q_{j,t}$  دبی جریان در لوله J ام در زمان t و  $PVRI(j,t)$  شاخص قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله‌ای در لوله i ام در زمان t است و به صورت زیر محاسبه می‌شود





۸ تا ۹، برابر ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود. این میزان در حد بالای کلر باقیمانده نیز برابر نصف اختلاف حداکثر مجاز و مقدار بهینه کلر باقیمانده، یعنی ۰/۱۵ است.

جدول ۴- مقادیر حدی کلر باقیمانده در شبکه توزیع آب

Table 4. Limit values for residual chlorine in the water distribution network

Parameter	Ch <sub>min</sub>	Ch <sub>l</sub>	L	Ch <sub>o</sub>	U	Ch <sub>u</sub>	Ch <sub>max</sub>
Value (m/s)	0.1	0.2	0.2	0.5	0.15	0.8	1.0

در تابع مطلوبیت مربوط به شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی برای کلر آزاد باقیمانده بین ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر، شبکه از نظر کیفی در حالت عدم سرویس‌دهی تا سرویس‌دهی قابل قبول قرار دارد. برای کلر آزاد باقیمانده بین ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر، شبکه از نظر کیفی در حالت سرویس‌دهی قابل قبول تا سرویس‌دهی مطلوب قرار دارد. با افزایش مقدار کلر آزاد باقیمانده به دلیل اینکه احتمال تولید محصولات جانبی مضر و هزینه‌های کلرزی افزایش می‌یابد، قابلیت اطمینان کیفی شبکه نیز کاهش می‌یابد. به طوری که برای کلر آزاد باقیمانده بین ۰/۵ تا ۰/۸ میلی‌گرم در لیتر شبکه در حالت سرویس‌دهی مطلوب تا سرویس‌دهی قابل قبول و برای کلر آزاد باقیمانده بین ۰/۸ تا ۱ میلی‌گرم در لیتر شبکه در حالت سرویس‌دهی قابل قبول تا سرویس‌دهی غیرقابل قبول قرار می‌گیرد. برای مقادیر بیش از ۱/۰ میلی‌گرم در لیتر نیز شبکه در حالت سرویس‌دهی غیرقابل قبول می‌باشد. در شکل ۵ نمودار تابع مطلوبیت شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی نشان داده شده است که معادله آن به صورت زیر است

(۵)

$$CRI(j, t) = \begin{cases} 0 & C < 0.1 \text{ mg/L} \\ 5(C - 0.1) & 0.1 \text{ mg/L} < C < 0.2 \text{ mg/L} \\ \frac{5}{4}(C - 0.2) + 0.5 & 0.2 \text{ mg/L} < C < 0.4 \text{ mg/L} \\ 2.5(C - 0.2) + 0.5 & 0.4 \text{ mg/L} < C < 0.5 \text{ mg/L} \\ 1.0 & C = 0.5 \text{ mg/L} \\ -\frac{5}{3}(C - 0.5) + 1.0 & 0.5 \text{ mg/L} < C < 0.8 \text{ mg/L} \\ -\frac{5}{4}(C - 0.8) + 0.5 & 0.8 \text{ mg/L} < C < 1.0 \text{ mg/L} \\ 0.25 & 1.0 \text{ mg/L} < C \end{cases}$$

که در آن

NCRI(j, t) شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی در گره زام در

(۴)

$$PVRI(j, t) = \begin{cases} 0 & V < 0 \text{ m/s} \\ \frac{5}{3}V & 0 \text{ m/s} < V < 0.3 \text{ m/s} \\ \frac{1}{2}(V - 0.3) + 0.5 & 0.3 \text{ m/s} < V < 0.8 \text{ m/s} \\ \frac{5}{4}(V - 0.8) + 0.75 & 0.8 \text{ m/s} < V < 1.0 \text{ m/s} \\ 1 & V = 1.0 \text{ m/s} \\ -\frac{5}{4}(V - 1.0) + 1.0 & 1.0 \text{ m/s} < V < 1.2 \text{ m/s} \\ -\frac{5}{16}(V - 1.2) + 0.75 & 1.2 \text{ m/s} < V < 2.0 \text{ m/s} \\ -\frac{1}{2}(V - 2.0) + 0.5 & 2.0 \text{ m/s} < V < 2.5 \text{ m/s} \\ 0.25 & 2.5 \text{ m/s} < V \end{cases}$$

### ۳-۲- شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی

به طور کلی با توجه به استاندارد ۱۰۵۳ ایران مقدار مطلوب pH در آب‌های آشامیدنی در حدود ۷-۸/۵ و مقدار حدی آن در حدود ۶/۵-۹/۲ است. بر این اساس حداقل کلر باقیمانده در شبکه برای مقادیر pH ۶ تا ۸ برابر ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر و برای مقادیر pH ۸ تا ۹ برابر ۰/۴ میلی‌گرم در لیتر است. حداقل میزان کلر باقیمانده توصیه شده در آب آشامیدنی در سیستم‌های مختلف آبرسانی و محل برداشت در شرایط عادی ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر است. از طرفی با توجه به نمودار پیشنهادی کولهو در سال ۱۹۹۶، حداقل مقدار کلر باقیمانده در شبکه‌ای که از نظر کیفی در حالت عدم سرویس‌دهی قرار دارد، برابر ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر است (Coelho, 1996). با توجه به اینکه با افزایش مقدار کلر باقیمانده در گره‌های شبکه، هزینه‌های مربوط به کلرزی در تصفیه‌خانه آب و شبکه توزیع آب افزایش می‌یابد، همچنین امکان تشکیل ترکیبات زیان‌آور نیز زیاد می‌شود، از این رو مقدار بهینه کلر آزاد باقیمانده در شبکه‌های توزیع آب ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر انتخاب شده و برای مقادیر حداکثر کلر باقیمانده در گره‌های شبکه نیز محدودیت‌هایی در نظر گرفته شده است. بر این اساس مقدار حداکثر کلر باقیمانده در شرایط عادی ۰/۸ میلی‌گرم در لیتر و در شرایط اضطراری ۱/۰ میلی‌گرم در لیتر است. مقادیر حدی کلر باقیمانده در گره مصرف در جدول ۴ داده شده است. که در آن مقدار حداقل مطلق و حداقل مجاز کلر باقیمانده به ترتیب برابر ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر و مقدار حداکثر مجاز و حداکثر مطلق کلر باقیمانده به ترتیب برابر ۰/۸ و ۱/۰ میلی‌گرم در لیتر است. مقدار کلر باقیمانده بهینه برابر ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر، و حد پایین کلر باقیمانده با توجه به حداقل کلر باقیمانده برابر ۰/۴ میلی‌گرم در لیتر در شرایط pH معادل



منظور تحلیل هیدرولیکی شبکه به صورت ساعتی و تحلیل کیفی شبکه به صورت بازه زمانی ۵ دقیقه‌ای انجام شد. برای ایجاد همگرایی و پایداری در نتایج مدل، بازه زمانی اجرای مدل ۷۲ ساعت در نظر گرفته شد و نتایج ۲۴ ساعت انتهایی بازه در مدل سازی تأثیر داده شد. مدل سازی و محاسبات قابلیت اطمینان شبکه با استفاده از نرم افزار ایپانت و با کدنویسی در محیط متلب انجام شده است. برای تحلیل هیدرولیکی یک شبکه آبرسانی دو دیدگاه عمده شامل تحلیل مبتنی بر تقاضای ثابت<sup>۱</sup> و تحلیل مبتنی بر فشار<sup>۲</sup> وجود دارد (Tabesh, 2016). بسیاری از نرم افزارهای شبکه توزیع آب از جمله ایپانت، برای تحلیل هیدرولیکی شبکه از روش مبتنی بر تقاضای ثابت استفاده می کنند. با توجه به اینکه این پژوهش درون پژوهش دیگری با عنوان "برنامه ریزی بهینه مبتنی بر کیفیت برای نوسازی شبکه های توزیع آب با در نظر گرفتن شاخص های قابلیت اطمینان" تهیه شده است که در آن هدف وارد کردن معیارهای کیفی به عنوان یک شاخص در طراحی و بازسازی شبکه های توزیع آب بوده (Dini, 2014) و با توجه به اینکه سرعت اجرای مدل شبیه ساز کیفی شبکه بسیار کندتر از مدل شبیه ساز هیدرولیکی است و در مدل های بهینه سازی نیاز به رجوع به مدل های شبیه ساز برای دفعات متعدد وجود دارد، برای عملی شدن امکان محاسبات از نظر زمانی در مدل های بهینه سازی، در این پژوهش، از روش مبتنی بر تقاضای ثابت استفاده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

برای بحث و بررسی نتایج شاخص های قابلیت اطمینان ارائه شده، از یک شبکه نمونه دو حلقه ای و یک شبکه توزیع آب واقعی (شبکه توزیع آب شهر اهر) به عنوان مطالعه موردی استفاده شد.

#### ۳-۱- مطالعه موردی اول

برای تشریح شاخص های قابلیت اطمینان ارائه شده، از شبکه دو حلقه ای استفاده شد که در مقالات مختلف به عنوان یک مثال پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است (Alperovits and Shamir, 1977).

در این پژوهش، سناریوهای مسئله به صورت جدول ۵ در نظر

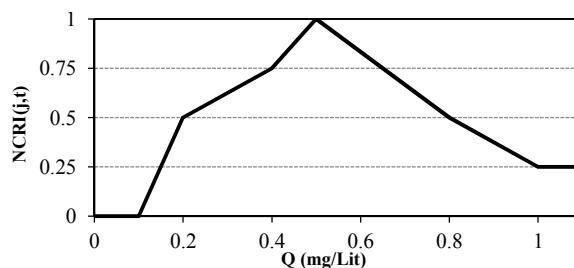


Fig. 5. Utility function for nodal chlorine reliability index

شکل ۵- تابع مطلوبیت شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی

زمان t است. شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی شبکه به صورت زیر است

$$NCRI = \frac{\sum_{j=1}^{NP} Q_{j,t}^{req}(NCRI(j,t))}{\sum_{j=1}^{NP} Q_{j,t}^{req}} \quad (6)$$

که در آن

NCRI شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی شبکه، NN تعداد گره های شبکه،  $Q_{j,t}^{req}$  تقاضای مورد نیاز گره جام در زمان t است.

#### ۲-۴- شاخص قابلیت اطمینان تلفیقی شبکه

شاخص قابلیت اطمینان تلفیقی شبکه از تلفیق شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی، شاخص قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله ای، شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی به دست می آید. برای این منظور از میانگین هندسی استفاده می شود که در صورت صفر شدن هر یک از شاخص ها، شاخص قابلیت اطمینان کل شبکه نیز صفر خواهد شد. معادله زیر این شاخص را نشان می دهد

$$NRI = \sqrt[3]{(NPRI * NCRI * PVRI)} \quad (7)$$

علت استفاده از میانگین هندسی این است که با توجه به حضور قابلیت اطمینان کیفی گرهی در این شاخص، اگر کلرزی در سیستم انجام نشود و مقدار شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی برابر صفر باشد، در این حالت، شاخص قابلیت اطمینان تلفیقی نیز صفر خواهد شد.

#### ۲-۵- روش تحلیل شبکه

در این پژوهش برای مدل سازی هیدرولیکی و کیفی شبکه های مورد مطالعه از تحلیل هیدرولیکی زمان گسترده استفاده شد. برای این

<sup>1</sup> Demand Driven Simulation Method (DDSM)

<sup>2</sup> Head Driven Simulation Method (HDSM)



جدول ۵- سناریوهای تعریف شده برای ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان

Table 5. Defined scenarios for evaluation of reliability indices

Scenario	Reservoir head (m)	Residual chlorine in reservoir (mg/l)	Pipes diameter (mm)
S <sub>1</sub>	50	0.2	According to table 1
S <sub>2</sub>	60	0.4	According to table 1
S <sub>3</sub>	60	0.6	According to table 1
S <sub>4</sub>	70	0.6	According to table 1
S <sub>5</sub>	80	0.8	According to table 1
S <sub>6</sub>	60	0.6	350
S <sub>7</sub>	60	0.6	400
S <sub>8</sub>	60	0.6	450
S <sub>9</sub>	60	0.6	500
S <sub>10</sub>	60	0.6	According to table 1 and pipe failure 4
S <sub>11</sub>	60	0.6	According to table 1 and pipe failure 6
S <sub>12</sub>	60-40	0.6-0.6	According to table 1
S <sub>13</sub>	60-40	0.6-0.6	According to table 1 and pipe failure 4
S <sub>14</sub>	60-40	0.6-0.6	According to table 1 and pipe failure 6
S <sub>15</sub>	60-40	0.6-0.6	According to table 1 and pipe failure 7
S <sub>16</sub>	60-40	0.6-0.6	According to table 1 and pipe failure 8
S <sub>17</sub>	60-40	0.6-0.6	According to table 1 and pipe failure 5

شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه برای سناریوهای ۱ و ۷ ارائه شده است. همانطور که از نتایج جدول ۶ و ۷ مشخص است، مقادیر شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی برای سناریوی ۱ بین ۰/۱۶ و ۰/۹۹ و برای سناریوی ۷ بین ۰/۴۴ و ۰/۹۸، مقادیر شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی برای سناریوی ۱ بین ۰/۳۰ و ۰/۴۸ و برای سناریوی ۷ بین ۰/۸۵ و ۰/۹۸ و مقادیر شاخص قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله‌ای برای سناریوی ۱ بین ۰/۴۳ و

گرفته شده است که در آن هر سناریو بر اساس تغییرات در مقادیر هد مخزن، مقدار کلر باقیمانده اولیه مخزن و قطر لوله‌های شبکه و شکست یکی از لوله‌های شبکه تعریف می‌شود. با توجه به دوره گسترده بودن تحلیل شبکه و عدم امکان ارزیابی نتایج به صورت ساعتی برای گره‌ها و لوله‌های شبکه، در این قسمت عملکرد شبکه در شرایط حداقل (ساعت ۵)، متوسط (ساعت ۹) و حداکثر (ساعت ۱۸) مصرف ارائه می‌شود. در جداول ۶ و ۷ نتایج

جدول ۶- قابلیت اطمینان گرهی و لوله‌ای شبکه برای سناریوی ۱

Table 6. Nodal and pipe reliability index for scenario 1

Node/pipe No.	1	2	3	4	5	6	7	8	Network index
Loading condition	NPRI								0.58
Min		0.63	0.99	0.86	0.79	0.45	0.50		0.65
Ave		0.69	0.59	0.98	0.94	0.28	0.27		0.58
Max		0.73	0.46	0.86	0.92	0.20	0.16		0.50
	NCRI								0.41
Min		0.48	0.44	0.44	0.38	0.39	0.30		0.39
Ave		0.48	0.45	0.45	0.40	0.41	0.33		0.41
Max		0.48	0.45	0.45	0.41	0.41	0.34		0.41
	PVRI								0.68
Min	0.64	0.78	0.77	0.62	0.76	0.61	0.93	0.78	0.74
Ave	0.51	0.67	0.66	0.69	0.99	0.67	0.78	0.96	0.68
Max	0.43	0.62	0.62	0.72	0.88	0.70	0.72	0.85	0.61
	NRI								0.54



جدول ۷- قابلیت اطمینان گرهی و لوله‌ای شبکه برای سناریوی ۷  
Table 7. Nodal and pipe reliability index for scenario 7

Node/pipe No.	1	2	3	4	5	6	7	8	Network index
Loading condition	NPRI								0.72
Min		0.46	0.77	0.66	0.53	0.94	0.81		0.73
Ave		0.58	0.91	0.81	0.68	0.63	0.97		0.74
Max		0.64	0.98	0.88	0.76	0.44	0.83		0.70
	NCRI								0.90
Min		0.85	0.91	0.89	0.98	0.94	0.88		0.93
Ave		0.85	0.90	0.88	0.96	0.93	0.92		0.92
Max		0.85	0.89	0.88	0.95	0.92	0.94		0.92
	PVRI								0.60
Min	0.51	0.76	1.00	0.45	0.61	0.11	0.66	0.56	0.65
Ave	0.26	0.99	0.73	0.52	0.67	0.14	0.74	0.61	0.58
Max	0.25	0.88	0.70	0.53	0.70	0.15	0.82	0.64	0.56
	NRI								0.73

جدول ۸- مقادیر شاخص قابلیت اطمینان شبکه برای سناریوهای تعریف شده  
Table 8. Nodal and pipe reliability index for scenario 7

Scenario	NPRI	PVRI	NCRI	NRI	FRI	PI
S <sub>1</sub>	0.58	0.68	0.40	0.54	1.34	0.81
S <sub>2</sub>	0.69	0.68	0.70	0.69	1.78	1.00
S <sub>3</sub>	0.69	0.68	0.93	0.76	1.78	0.89
S <sub>4</sub>	0.58	0.68	0.93	0.71	0.95	0.89
S <sub>5</sub>	0.38	0.68	0.63	0.54	0.16	0.44
S <sub>6</sub>	0.41	0.56	0.94	0.60	0.93	0.91
S <sub>7</sub>	0.72	0.60	0.92	0.74	2.07	0.90
S <sub>8</sub>	0.69	0.63	0.94	0.74	1.67	0.93
S <sub>9</sub>	0.58	0.62	0.95	0.70	1.09	0.93
S <sub>10</sub>	0.70	0.68	0.92	0.76	1.75	0.89
S <sub>11</sub>	0.69	0.68	0.93	0.76	1.76	0.89
S <sub>12</sub>	0.70	0.72	0.93	0.78	1.66	0.90
S <sub>13</sub>	0.70	0.75	0.93	0.78	1.66	0.9
S <sub>14</sub>	0.70	0.74	0.93	0.78	1.66	0.9
S <sub>15</sub>	0.72	0.75	0.93	0.80	1.58	0.89
S <sub>16</sub>	0.72	0.74	0.93	0.79	1.63	0.9
S <sub>17</sub>	0.40	0.70	0.94	0.64	1.06	0.91

است. همانطور که مشخص است در سناریوی ۱ تا ۵ قطر لوله‌های شبکه ثابت است از این رو مقدار شاخص قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله‌ای شبکه برای این سناریوها ثابت و برابر ۰/۶۸ است. با ثابت بودن قطر لوله‌های شبکه، سرعت جریان در لوله‌ها تغییر نمی‌کند و لذا مقدار شاخص نیز تغییر نمی‌کند. همچنین با افزایش هد و کلر باقیمانده اولیه مخزن، ابتدا مقادیر شاخص‌های قابلیت

۰/۹۹ و برای سناریوی ۷ بین ۰/۱۱ و ۱/۰ قرار دارند که نشان می‌دهد این شاخص‌ها نرمال بوده و از حساسیت مناسبی نسبت به تغییرات پارامترهای فیزیکی، هیدرولیکی و کیفی شبکه برخوردار هستند. در جدول ۸ برای سناریوهای تعریف شده، در یک بازه ۲۴ ساعته، نتایج شاخص‌های قابلیت اطمینان جدید، شاخص اطمینان‌پذیری فازی و شاخص کارایی کیفی شبکه نشان داده شده



برخی اجزای شبکه قابلیت اطمینان شبکه تأثیر نمی‌پذیرد، صادق است زیرا سناریوی ۳ و ۱۲ بیشترین مقادیر قابلیت اطمینان شبکه در بین سناریوهای تعریف شده بر اساس مقادیر هد و کلر باقیمانده مخزن را دارند و با وقوع شکست در برخی اجزای شبکه در این سناریوها، قابلیت اطمینان شبکه تغییر محسوسی نکرده است.

سناریوی ۱۷ به‌عنوان یک مثال نقض در بین سناریوهای دارای شکست در شبکه مطرح شده است که در آن با شکست لوله ۵ در شبکه با دو مخزن، قابلیت اطمینان فشار گرهی و تلفیقی شبکه نسبت به سناریوی ۱۲ تغییر قابل توجهی دارد. به‌طوری که مقادیر شاخص‌ها از ۰/۷۰ و ۰/۷۸ به ۰/۴۰ و ۰/۶۴ کاهش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که اصل فوق برای شکست در تمامی اجزای شبکه صادق نیست، زیرا اجزای اصلی که وظیفه توزیع و انتقال آب برای کل شبکه را بر عهده دارند، در صورت شکست می‌توانند عملکرد شبکه را مختل نمایند. در مجموع در این شاخص‌ها این قابلیت وجود دارد که با پیشینه‌سازی آنها در مرحله طراحی، در مرحله بهره‌برداری قدرت مانور شبکه در مقابل برخی اتفاقات افزایش یابد. همچنین مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مقادیر شاخص اطمینان‌پذیری فازی در سناریوی ۱۰ و ۱۱ نسبت به سناریوی ۳ به اندازه حداکثر ۰/۰۳ و سناریوی ۱۳ تا ۱۶ نسبت به سناریوی ۱۲ به اندازه حداکثر ۰/۰۸ کاهش یافته است و مقادیر شاخص کارایی کیفی تغییر چندانی نکرده است.

در مجموع، با توجه به نتایج ارائه شده، با تغییر مقدار هد و کلر باقیمانده اولیه در مخازن و همچنین قطر لوله‌های شبکه، مقدار شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی، شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی، شاخص قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله‌ای و شاخص قابلیت اطمینان تلفیقی شبکه تغییرات معنی‌داری دارند و همه ویژگی‌های یک شاخص خوب شامل نرمال بودن نتایج شاخص، حساسیت مناسب شاخص نسبت به تغییرات پارامترهای شبکه، تغییر جهت مناسب شاخص در شرایط حدی و قابلیت شاخص در پوشش شرایط بحرانی بهره‌برداری را دارند. نتایج شاخص اطمینان‌پذیری فازی نرمال نبوده و هر دو شاخص اطمینان‌پذیری فازی و شاخص کارایی کیفی از نظر ساختار تعریف، دارای مشکلاتی هستند که در پیشینه پژوهش بررسی شده است. از این رو شاخص‌های جدید تعریف شده می‌توانند در ارزیابی عملکرد شبکه‌ها مناسب باشند.

اطمینان فشار گرهی شبکه، کیفیت گرهی شبکه و شاخص قابلیت اطمینان تلفیقی شبکه افزایش می‌یابد به‌طوری که در هد مخزن برابر ۶۰ متر و کلر باقیمانده برابر ۰/۶ میلی‌گرم بر لیتر (سناریوی S<sub>3</sub>)، این مقادیر به بیشترین مقدار خود یعنی به ترتیب به ۰/۶۹، ۰/۹۳ و ۰/۷۶ می‌رسند و سپس مجدداً کاهش می‌یابند که نشان‌دهنده تغییر جهت مناسب شاخص (افزایش یا کاهش مقادیر شاخص) در شرایط حدی است.

بررسی نتایج شاخص اطمینان‌پذیری فازی و شاخص کارایی کیفی شبکه در پنج سناریوی اول نیز نشان می‌دهد که مقدار شاخص اطمینان‌پذیری فازی و شاخص کارایی کیفی شبکه نیز با افزایش هد و کلر باقیمانده اولیه مخزن، ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. با این تفاوت که شاخص اطمینان‌پذیری فازی و شاخص کارایی کیفی شبکه در سناریوی ۲ ولی شاخص قابلیت اطمینان تلفیقی شبکه در سناریوی ۳ به مقدار حداکثر خود می‌رسد. در سناریوهای ۶ تا ۹، مقادیر شاخص سرعت جریان لوله‌ای با افزایش قطر لوله‌ها از ۳۵۰ میلی‌متر به ۴۰۰ و ۴۵۰ میلی‌متر ابتدا از ۰/۵۶ به ۰/۶ و سپس به ۰/۶۳ افزایش می‌یابد و در صورت افزایش قطر لوله به ۵۰۰ میلی‌متر به ۰/۶۲ کاهش می‌یابد و به نوعی نشان‌دهنده تغییر جهت شاخص با افزایش قطر لوله‌ها است. این مسئله در شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی و تلفیقی شبکه و شاخص اطمینان‌پذیری فازی نیز حاکم است، به‌طوری که با افزایش قطر لوله‌ها ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابند ولی برای شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی و شاخص کارایی کیفی روند خاصی وجود ندارد. سناریوی ۱۰ و ۱۱ مشابه سناریوی ۳ است و تنها تفاوت آنها در این است که در سناریوی ۱۰، لوله ۴ و در سناریوی ۱۱، لوله ۶ دچار شکست شده و از مدار خارج شده است. سناریوی ۱۳ تا ۱۷ مشابه سناریوی ۱۲ است و تنها تفاوت آنها در این است که در سناریوی ۱۳ تا ۱۷ به ترتیب لوله‌های ۴، ۶، ۷، ۸ و ۵ دچار شکست شده و از مدار خارج شده است.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مقادیر شاخص‌های جدید ارائه شده در سناریوی ۱۰ و ۱۱ نسبت به سناریوی ۳ و سناریوی ۱۳ تا ۱۶ نسبت به سناریوی ۱۲ تغییر محسوسی نکرده است که نشان‌دهنده قابلیت شاخص در پوشش شرایط بحرانی بهره‌برداری است. به‌عبارت دیگر این فرضیه که با پیشینه‌سازی قابلیت اطمینان شبکه در مرحله طراحی، در مرحله بهره‌برداری ناشی از شکست



### ۳-۲- مطالعه موردی دوم

در این قسمت، کارایی هیدرولیکی و کیفی شبکه توزیع آب شهر اهر با استفاده از شاخص‌های قابلیت اطمینان ارائه شده ارزیابی شده است.

بعد از کالیبراسیون هیدرولیکی (Dini and Tabesh, 2015) و کیفی شبکه توزیع آب اهر (Dini, 2014) بر اساس شاخص‌های تعریف شده، عملکرد شبکه توزیع آب اهر برای وضعیت زمان مطالعه (پاییز ۱۳۹۱) مورد ارزیابی قرار گرفته است که در جدول ۹ نتایج آن ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که مقادیر ساعتی شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه اهر بین ۰/۴۳ تا ۰/۷۱ تغییر می‌کند که کمترین مقدار آن مربوط به زمان‌های حداکثر مصرف از ساعت ۸ تا ۱۲ ظهر و بیشترین آن مربوط به زمان‌های متوسط مصرف از شبکه است که در ساعت ۱۶ تا ۲۰ اتفاق می‌افتد. مقادیر ساعتی شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی شبکه بین ۰/۷۶ تا ۰/۸ تغییر می‌کند که کمترین مقادیر آن مربوط به زمان‌های حداکثر مصرف

جدول ۹- مقادیر قابلیت اطمینان شبکه توزیع آب اهر در ساعت‌های مختلف

**Table 9. Values of network reliability index for the Ahar water distribution system during different times**

Time (hour)	NPRI(t)	NCRI(t)	PVRI(t)
1	0.6	0.78	0.7
2	0.58	0.79	0.7
3	0.54	0.79	0.7
4	0.51	0.8	0.69
5	0.49	0.8	0.69
6	0.46	0.8	0.68
7	0.44	0.79	0.68
8	0.43	0.78	0.68
9	0.43	0.77	0.68
10	0.43	0.76	0.67
11	0.43	0.76	0.67
12	0.5	0.76	0.69
13	0.5	0.76	0.7
14	0.62	0.76	0.68
15	0.68	0.76	0.67
16	0.7	0.76	0.67
17	0.71	0.77	0.67
18	0.71	0.77	0.67
19	0.71	0.77	0.67
20	0.69	0.77	0.68
21	0.67	0.77	0.68
22	0.66	0.77	0.68
23	0.64	0.78	0.68
24	0.65	0.78	0.68
Daily (geometric mean)	0.564	0.774	0.681
NRI		0.667	

و بیشترین آن مربوط به زمان‌های حداقل مصرف از شبکه است. این مسئله می‌تواند ناشی از این باشد که دز کلر تزریقی در مخزن شبکه زیاد بوده و در زمان‌های حداقل مصرف به دلیل کاهش سرعت جریان در لوله‌ها و افزایش زمان ماند کلر باقیمانده در شبکه تعدیل می‌شود، لذا در این زمان‌ها مقدار شاخص بیشترین مقدار است. همچنین مقدار ساعتی شاخص قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله‌ای شبکه بین ۰/۶۷ تا ۰/۷ تغییر می‌کند که نحوه تغییرات آن در طول روز روند مشخصی ندارد که ممکن است ناشی از ترکیب ناسازگار اقطار لوله‌ها در کنار هم باشد که به دلیل تغییر رویکرد تامین آب در شبکه از منابع آب زیرزمینی به سطحی اتفاق افتاده است. در مجموع در وضعیت موجود، شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی کل شبکه برابر ۰/۵۶۴، شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی کل شبکه برابر ۰/۷۷۴، شاخص قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله‌ای کل شبکه برابر ۰/۶۸۱ و شاخص قابلیت اطمینان تلفیقی شبکه برابر ۰/۶۶۷ است. سادگی محاسبات شاخص‌های فوق، این توانمندی را ایجاد می‌کند که بتوان از آنها به عنوان یک فاکتور مؤثر در طراحی، بازسازی و نوسازی شبکه‌های توزیع آب واقعی استفاده نمود.

### ۴- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش ارائه شاخص‌های قابلیت اطمینان جدید برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی و کیفی شبکه‌های توزیع آب است. از قابلیت‌های شاخص ارائه شده می‌توان به پوشش شرایط بحرانی بهره‌برداری، نرمال بودن، حساسیت مناسب نسبت به تغییرات پارامترهای شبکه و تغییر جهت مناسب در شرایط حدی اشاره کرد. بررسی عملکرد هیدرولیکی و کیفی شبکه دوحلقه‌ای بر اساس شاخص‌های تعریف شده و در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که تغییرات پارامترهای شبکه همچنان که منجر به کاهش پارامترهای فوق در برخی گره‌های شبکه می‌شود، می‌تواند منجر به افزایش پارامترهای فوق در برخی گره‌های دیگر شود. از این رو تعریف حد پایین و حد بالای پارامترهای فوق، باعث می‌شود که با شکست اجزای شبکه همچنان شبکه با قابلیت اطمینان بیشتری به کار خود ادامه دهد و قابلیت شاخص در پوشش شرایط بحرانی بهره‌برداری افزایش یابد. همچنین بررسی مقادیر شاخص‌ها برای سناریوی ۱ و ۷ نشان می‌دهد که مقادیر شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی بین



شکست برخی اجزای شبکه نشان می‌دهد که مقادیر شاخص برای سناریوهای فوق نسبت به حالت بدون شکست تغییر محسوسی نکرده است که نشان دهنده قابلیت شاخص در پوشش شرایط بحرانی بهره‌برداری است. بررسی عملکرد شبکه توزیع آب اهر بر اساس شاخص‌های ارائه شده نشان می‌دهد که شبکه توزیع آب اهر در مرحله بهره‌برداری از نظر کنترل ضوابط فشار دارای عملکرد ۵۶/۴ درصدی، از نظر کنترل ضوابط سرعت جریان در لوله‌ها دارای عملکرد ۶۸/۱ درصدی و از نظر کنترل ضوابط کیفی دارای عملکرد ۷۷/۴ درصدی و به صورت تلفیقی دارای عملکرد ۶۶/۷ درصدی می‌باشد.

۰/۱۶ و ۰/۹۹ و شاخص قابلیت اطمینان کیفی گرهی بین ۰/۲۶ و ۰/۹۹ و شاخص قابلیت اطمینان سرعت جریان لوله‌ای بین ۰/۱۱ و ۱/۰ تغییر می‌کند که نشان‌دهنده نرمال بودن و حساسیت مناسب شاخص نسبت به تغییرات پارامترهای شبکه می‌باشد. با افزایش مقادیر هد مخزن و کلر باقیمانده مخزن در سناریوهای اول تا پنجم مقادیر شاخص قابلیت اطمینان تلفیقی شبکه‌ای از ۰/۵۴ به ۰/۷۵ افزایش یافته و سپس به ۰/۵۴ کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر لوله‌های شبکه در سناریوهای ششم تا نهم مقادیر شاخص قابلیت اطمینان تلفیقی شبکه از ۰/۶ به ۰/۷۳ افزایش یافته و سپس به ۰/۷ کاهش یافته است که نشان‌دهنده تغییر جهت مناسب شاخص در شرایط حدی می‌باشد. مقایسه نتایج سناریوی مبتنی بر

## References

- Alperovits, E. & Shamir, U. 1977. Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research*, 13(6), 885-900.
- Awumah, K. & Goulter, I.C. 1992. Maximizing entropy-defined reliability of water distribution networks. *Journal of Engineering Optimization*, 20(1), 57-80.
- Bazovski, I. 1961. *Reliability theory and practice*. N. J: Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- Bhave, P.R. 1978. Noncomputer optimization of single source networks. *Journal of Environmental Engineering*, 104, 799-813.
- Carrijo, I.B., Reis, L.F.R., Walters, G.A. & Savic, D. 2004. Operational optimization of WDS based on multi-objective genetic algorithms and operational extraction rules using data mining. *Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress*, Salt Lake City, Utah, USA.
- Coelho, S.T. 1996. Performance assessment in water supply and distribution. PhD Thesis, Civil and Offshore Engineering Department, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK.
- Dini, M. & Tabesh, M. 2015. A new method for simultaneous calibration of demand pattern and Hazen-Williams coefficients in water distribution systems. *Journal of Water Resources Management*, 28(6), 2021-2034.
- Dini, M. 2014. Quality based optimal renovation planning for water distribution networks considering reliability indices. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian)
- Ghajarnia, N. 2009. Dynamic multi criteria design and development of urban water distribution network. MSc Thesis, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran. (In Persian)
- Filion, Y.R., Karney, B.W. & Adams, B.J. 2004. Multi objective design of water networks with random loads. *Environmental Informatics Archives*, 2(2), 252-257.
- Gupta, R. & Bhave, P.R. 1996. "Reliability-based design of water-distribution systems. *Journal of Environmental Engineering*, 122(1), 51-54.
- Gupta, R., Sushma, D. & Pramod, R.B. 2009. Water quality reliability analysis of water distribution networks. *Proceeding of 33rd International Association of Hydraulic Engineering and Research Congress (IAHR)*, Vancouver, Canada.



- Jayaram, N. 2006. Reliability based optimization of water distribution networks. MSc Thesis, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Madras, India.
- Kansal, M.L, Arora, G. & Verma, Sh. 2004. Water quality reliability analysis in an urban distribution network. *Journal of Indian Water Works Association*, 36(3), 185-198.
- Monzavi, M. T. 1997. *Wastewater collection*. Tehran, Iran: Tehran University Publications, No.1801, (In Persian)
- Ostfeld, A. 2002. "Reliability analysis of regional water distribution systems", *Urban Water Journal*, 3(4), 253-260.
- Prasad, T.D. & Park, N.S. 2004. Multi objective genetic algorithm for design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1), 73-82.
- Shirzad, A. 2013. Multi objective optimization of water distribution networks and presenting comprehensive model for dynamic design of these networks. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian)
- Soltani, J. 2009. A model for rehabilitation and replacement of water distribution networks considering reliability and pressure dependency of demand. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian)
- Tabesh, M. 1998. Implications of the pressure dependency of outflows on data management, mathematical modeling and reliability assessment of water distribution systems. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Liverpool, England.
- Tabesh, M. 2016. *Advanced modeling of water distribution networks*, Tehran, Iran: Tehran University Publications. (In Persian)
- Tabesh, M. & Dolatkhahi, A. 2006. Effects of pressure dependent analysis on quality performance assessment of water distribution networks. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Civil Engineering*, 30(B1), 119-128. (In Persian).
- Tanyimboh, T.T., Tabesh, M. & Burrows, R. 2001. An appraisal of source head methods for calculating reliability of water distribution network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(4), 206-213.
- The Management and Planning Organization of Iran. 2013. Design criteria of urban and rural water supply and distribution systems. No.117-3, First Revision, Tehran, Iran. (In Persian)
- Todini, E. 2000. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water Journal*, 2(3), 115-122.
- Zhao, Y., Luo, B., Zhuang, B. & Zhao, X. 2010. Hydraulic and water quality reliability analysis of water distribution system. *IEEE 2<sup>nd</sup> Conference on Environmental Science and Information Application Technology*, Wuhan, China.

