Journal of Water & Wastewater Science & Engineering (jwwse) Winter 2017, Vol. 1, No. 1.
Doi:10.22112/jwwse.2017.51051

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال اول، شماره ۱، زمستان ۱۳۹۵

Analysis and Evaluation of the Performance of Water Distribution Networks Using Performance Criteria and Certain and Fuzzy Stability index

Shiva Bakhtyari[1]*, Hamid Reza Safavi[2] and Mohammad Hossein Gol Mohammadi[3]
1- M.Sc.of Water Resources Management, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
*Corresponding Author, Email: shi22a@yahoo.com

Received: 29/5/2017
Revised: 21/8/2017
Accepted: 26/8/2017

Abstract

Water distribution networks are one of the major water supply projects and amongst the most important infra s tructures in cities and villages. Currently the networks are analyzed based on demand analysis method in which the demands at different nodes are always constant and reachable and pressure is assumed as a constraint to evaluate the system stability. Various criteria are utilized in analyzing networks of which the performance criteria could be mentioned. These criteria are developed and analyzed based on binary logic. One of the greatest defects of this method is that it presents unreal and insensible results at threshold values. It also has no flexibility confronting experts' knowledge. In this study, a new method is presented that utilizes performance criteria including reliability in time, combinational reliability (elas ticity, water age, and entropy), resilience, and vulnerability. A new sus tainability index is developed to evaluate the water supply networks using the capabilities of membership function in fuzzy logic. The usefulness of this method is demons trated with optimized specifications of Hanoi network. Comparison of the proposed and traditional methods indicated improvement in estimations, showing that the new approach is quite effective and practical.

Keywords: Fuzzy logic, Performance criteria, Sustainability index, Water supply networks.

تحلیل و ارزیابی عملکرد شبکه‌های توزیع آب با استفاده از معیارهای عملکرد و شاخص پایداری قطعی و فازی

شیوا بختیاری[1*]، حمیدرضا صفوی[2]، محمد حسین گل محمدی[3]
۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مدیریت آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
* نویسنده مسئول، ایمیل: shi22a@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۸
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۶/۵/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۶/۴

چکیده

شبکه های توزیع آب یکی از اصلی ترین قسمت های پروژه های آبرسانی و از مهمترین سازه های زیربنایی شهرها و روستاها هستند. وظیفه شبکه های توزیع آب، رساندن آب تامین شده از منابع آب و تصفیه شده در تصفیه خانه ها با کمیت کافی، کیفیت مناسب و فشار استاندارد به هریک از مشترکین است. در این تحقیق تحلیل شبکه ها بر اساس تحلیل مبتنی بر تقاضا صورت گرفته و روشی با استفاده از منطق فازی برای محاسبه معیارهای عملکرد شامل قابلیت اطمینان در زمان، قابلیت اطمینان ترکیبی (قابلیت ارتجاع، سن آب و آنتروپی)، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری ارائه شده که در آن شاخص پایداری شبکه آبرسانی با استفاده از قابلیت های تابع عضویت در منطق فازی توسعه یافته است. کارایی روش جدید در شبکه های پرکاربرد دوحلقه ای و Anytown مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌است. نتایج حاکی از آن است که عملکرد شاخص پایداری فازی توسعه‌داده شده در این تحقیق در مقایسه با روش قطعی، از نظر کارشناسی به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد.

کلمات کلیدی: شبکه توزیع آب، معیارهای عملکرد، شاخص پایداری، منطق فازی.

۱- مقدمه

شبکه های توزیع آب شهری گسترده‌ترین بخش از تأسیسات زیربنای شهری است که در بقاء و چرخه معمول زندگی شهرها از ضروریات بی چون و چرای دنیای امروز است. وظیفه شبکه های توزیع آب، رساندن آب تأمین شده از منابع آب و تصفیه شده در تصفیه خانه ها با کمیت کافی، کیفیت مناسب و فشار استاندارد به هر یک از مشترکین است (Monzavi, 2009). از حدود چهار دهه پیش استفاده از روش های مختلف بهینه سازی در طراحی شبکه ها، یکی از زمینه های مورد علاقه دانشمندان بوده است که علاوه بر داشتن بهترین شرایط از لحاظ سرمایه گذاری و هزینه، بهترین شرایط بهره برداری را نیز برای مصرف کننده تأمین کند. در بهره برداری چند هدفه شبکه های توزیع آب، علاوه بر حداقل سازی هزینه ها، حداکثرسازی قابلیت اطمینان شبکه از جمله قابلیت اطمینان مکانیکی، هیدرولیکی و کیفی نیز به عنوان اهداف بهینه سازی مطرح است و مجموع آنها برای توسعه پایدار امری بسیار مهم و اجتناب‌ناپذیر است (Tabesh et al., 2013).

در طراحی شبکه ی توزیع آب ترکیب های مختلف از اندازه قطر لوله ها، ارتفاع مخازن و نوع پمپ ها را می‌توان انتخاب نمود، اما مهندس طراح باید شبکه ای را ارائه دهد که در بدترین شرایط موجود جوابگوی نیاز آبی مردم باشد، علاوه بر این باید گسترش شهرها و نیازهای اضطراری را در نظر بگیرد. همچنین شبکه باید طوری عمل کند تا قوانین هیدرولیکی نیز در آن کاملاً صدق کنند. این اهداف به عنوان شاخص پایداری ارائه شده است که امکان ارزیابی و مقایسه گزینه های سیاست های مدیریتی برای سیستم های آبرسانی را ممکن می سازد.

تمایل تصمیم گیرندگان به احداث شبکه های کم هزینه تر در گذشته، محققان را به سمت طراحی شبکه ها با هدف کمینه کردن هزینه ها سوق می دهد. اما تمرکز بیش از حد مدل های طراحی به کمینه کردن هزینه های ساخت، بدون توجه به وضعیت فاکتورهای کارایی و پایداری شبکه، اصلی ترین دلیل ناکارآمدی مدل های مزبور در طی سال های اخیر بوده است (Walski, 2001). از این رو مفاهیم معیارهای عملکرد و شاخص پایداری و کاربرد آن‌ها در تحلیل شبکه‌های آب در یک دهه اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته‌است.

کمی‌کردن مفاهیمی چون قابلیت اطمینان، برگشت پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری یکی از دغدغه‌های مهم دانشمندان و محققان در چند دهه اخیر بوده‌است. Loucks (1997) شاخص پایداری (SI) را با استفاده از تمام معیارهای عملکرد شامل قابلیت اطمینان، برگشت‌پذیری و آسیب پذیری توسعه داد و بیان کرد که قابلیت اطمینان، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری باهم ابزاری برای تعیین کمیت و نظارت بر پایداری در طول زمان است. برای تأمین نیازمندی های آب برای بشر یا محیط زیست در زمان حال و آینده لازم است که عملکرد و شاخص‌ها اندازه‌گیری شود تا بتوان سناریوهای مختلف سیستم‌های منابع آب را با یکدیگر مقایسه و ارزیابی نمود. این هدف توسط Sandoval-Solis et al. (2011) به عنوان شاخص‌های پایداری منابع آب ارائه شده است که امکان ارزیابی و مقایسه گزینه‌های سیاست های مدیریتی برای سیستم های منابع آب را ممکن می سازد.

قابلیت اطمینان یا اعتمادپذیری شبکه های آبرسانی در سال های اخیر به دلیل افزایش عمر زیرساخت ها و تغییرات آب و هوایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این قابلیت ها در دو دسته گرهی یا نقطه ای و شبکه قابل دسته بندی است که با دو الگوریتم اصلی براساس تقاضای آب در گره ها و کل شبکه بدون در نظر گرفتن فشار در گره ها و دیگری رویکرد بر پایه فشار در گره ها بدون در نظر گرفتن تغییرات نیاز در گره ها بیان می‌شود (BTES, 2013). قابلیت اطمینان، احتمال موفقیت یک سامانه در یک دوره زمانی مشخص و معیار ارزیابی معین را ارائه می‌دهد (Bazovsky, 1961). در شبکه‌های توزیع آب، قابلیت اطمینان را می‌توان توانایی شبکه در فراهم‌کردن آب کافی در فشار مناسب برای مصرف‌کنندگان بیان کرد (Tabesh, 1998). به طور کلی در شبکه های توزیع آب، قابلیت اطمینان از سه جنبه هیدرولیکی، مکانیکی و کیفیت آب بررسی می شود. Hashimoto et al. (1982) فرمولی برای قابلیت اطمینان بر اساس تعریف Loucks (1997) به صورت زیر ارائه نمود:

$$Rel = \frac{\text{تعداد گامهای زمانی که در آن موفقیت رخ داده است}}{\text{تعداد کل گامهای زمانی}} \qquad (۱)$$

معیار برگشت‌پذیری، توانایی سیستم در بازگرداندن آن به حالت ایده‌آل و مطلوب پس از وقوع یک شکست در سیستم را بیان می‌کند. Todini (2000) مفهوم قابلیت ارتجاع را شدیداً مرتبط با توانایی ذاتی سیستم در غلبه بر شکست دانست و آن

را معیاری برای معرفی محدودیت‌های قابلیت اطمینان بیان نمود. Moy et al. (1986) از حداکثر تعداد دوره های کمبود متوالی قبل از ترمیم به عنوان تعریفی از برگشت‌پذیری استفاده نمودند.

$$\text{Res} = \frac{\text{تعداد گامهای زمانی که در آن موفقیت بلافاصله بعد از یک شکست رخ داده است}}{\text{تعداد کل گامهای زمانی همراه با شکست}} \qquad (۲)$$

آسیب‌پذیری میزان شکست سیستم را بیان می‌کند که می تواند به صورت ۱) میانگین شکست ها ۲) میانگین حداکثر شکست ها در طول یک دوره مداوم شکست ۳) احتمال بیشتر شدن شکست در یک یا چند دوره از یک مقدار مشخص کمی شود. به عقیده Hashimoto et al. (1982)، میتوان آسیب پذیری را از تقسیم مجموع مقادیر عدم رضایت به مجموع تمام مقادیر در گام های زمانی شبیه سازی شده به دست آورد. این روش ارزیابی به وسیله Huizar et al. (2011) به منظور ایجاد سیستم های حمایت تصمیم گیری برای پایداری منابع آب نیز استفاده شده است.

$$Vul = \frac{\text{مجموع کل مقادیر نامطلوب}}{\text{مجموع کل مقادیر موردنیاز هدف}} \qquad (۳)$$

شاخص پایداری توسعه‌یافته توسط Loucks (1997)، توسط Sandoval-Solis et al. (2011) با استفاده از توان هندسی ضرب معیارهای عملکرد به صورت رابطه زیر اصلاح شد که در آن معیار C_m^i عملکرد M ام مربوط به مصرف کننده یا گره i ام می باشد.

$$SI^i = \left[\prod_{m=1}^{M} C_m^i\right]^{1/M} \qquad (۴)$$

Taheri (2016) شاخص پایداری با استفاده از قابلیت اطمینان ترکیبی به صورت زیر ارائه نمود:

$$SI^i = [Rel_C^i * Res^i * (1 - Vul^i)]^{1/3} \qquad (۵)$$

که در آن Rel_c^i: قابلیت اطمینان ترکیبی است و به صورت رابطه (۶) می باشد. I_n: برگشت پذیری، r_{WA}: شاخص سن آب و ε_F آنتروپی هستند و روابط و توضیحات مربوط به آن‌ها در Taheri, 2016) به طور کامل ارائه شده‌است.

$$Rel_C^i = 0.3 * I_n(i,t) + 0.3 * r_{WA}(i,t) + 0.4 * \varepsilon_F(i,t) \qquad (۶)$$

آنچه در روابط فوق از اهمیت زیادی برخوردار است نحوه شمارش گام‌های زمانی یا تعداد دفعات شکست یا پیروزی در محاسبه معیارهای عملکرد می‌باشد. در روابط فوق برای شمارش شکست‌ها یا موفقیت‌ها در هر گام از منطق کلاسیک استفاده می‌شود. از معایب این منطق آن است که در مقادیر آستانه نمی‌تواند واقعیت شکست یا پیروزی سیستم را به صورت عددی بیان کند چرا که محدوده جواب آن صفر یا یک است.

$$\text{منطق کلاسیک} \begin{cases} \text{if } x \in \tilde{A} \rightarrow \mu(x) = 1 \\ \text{if } x \notin \tilde{A} \rightarrow \mu(x) = 0 \end{cases} \qquad (۷)$$

در مقابل منطق کلاسیک، منطق فازی اولین بار توسط Zadeh (1965) مطرح شد. او به ناتوانی منطق کلاسیک برای پرداختن به مسائل نادقیق دنیای واقعی اشاره کرد و چارچوب جدیدی به نام تئوری فازی را پایه ریزی کرد و مبانی آن را معرفی نمود. این تئوری تعمیم یافته منطق کلاسیک است که در آن دسترسی گزاره ها می تواند در محدوده صفر و یک تغییر کند و بدین ترتیب امکان استدلال تقریبی فراهم می شود.

$$\text{منطق فازی} \quad \begin{cases} \text{if } x \in \tilde{A} \rightarrow 0 < \mu(x) \leq 1 \\ \text{if } x \notin \tilde{A} \rightarrow \mu(x) = 0 \end{cases} \qquad (۸)$$

در این تحقیق با استفاده از مفهوم تابع عضویت در منطق فازی برای محاسبه معیارهای عملکرد، ضمن توسعه یک شاخص پایداری حاصل از ترکیب چهار معیار قابلیت اطمینان فازی در زمان، قابلیت اطمینان ترکیبی (قابلیت ارتجاع، سن آب و آنتروپی)، برگشت‌پذیری فازی و آسیب پذیری فازی برای ارزیابی شبکه های توزیع آب، کارایی آن‌ها با استفاده از نتایج فشار حاصل از شبیه سازی شبکه‌های دوحلقه‌ای و Anytown با معیارها و شاخص پایداری در منطق کلاسیک، مورد مقایسه، ارزیابی و بحث قرار گرفته‌است.

۲- مواد و روش ها

در این تحقیق ابتدا مقادیر قابلیت اطمینان در زمان، قابلیت اطمینان ترکیبی، برگشت پذیری و آسیب پذیری با استفاده از روش قطعی به دست آمده و با استفاده از این سه معیار پایداری شبکه به صورت قطعی محاسبه شده است. سپس با استفاده از توابع عضویتی که توسط متخصصین تعیین شده، میزان عضویت قابلیت اطمینان در زمان، برگشت پذیری و آسیب پذیری به دست آمده و با استفاده از این مقادیر، شاخص پایداری فازی برای شبکه توزیع محاسبه شده است. تئوری مجموعه‌های فازی اساساً نوع جدیدی از ریاضیات است که مقادیر مبهم یا فازی که توسط توزیع‌های احتمالاتی قابل توصیف نیستند، را بیان می‌کند (Abbott et al., 2014). بیان میزان «فازیت» نسبت به میزان احتمالات بسیار راحت‌تر و کاربردی‌تر است. در تئوری کلاسیک تعلق یک عضو به یک مجموعه به‌صورت صریح بوده و یک عضو می‌تواند به یک مجموعه تعلق داشته باشد و یا به آن تعلق نداشته باشد. یعنی تابع تعلق به صورت یک مجموعه دودویی حاوی صفر و یک است؛ درحالی‌که در تئوری فازی، تابع تعلق به‌صورت یک تابع پیوسته در محدوده صفر و یک می باشد. تابع عضویت در تئوری مجموعه‌های فازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا تمام اطلاعات مربوط به یک مجموعهٔ فازی به وسیلهٔ تابع عضویت آن توصیف می‌شود. تابع عضویت، مقدار فازی‌بودن یک مجموعه فازی را نشان می‌دهد. در واقع به تابعی که میزان درجه عضویت المان‌های مختلف را به یک مجموعه نشان می‌دهد، تابع عضویت گفته می‌شود. توابع عضویت مثلثی، ذوزنقه ای، گوسی، زنگوله‌ای و سیگموئید از جمله معروف‌ترین توابع عضویت استاندارد می‌باشند.

تابع عضویت زنگوله‌ای از مهم‌ترین و پرکاربردترین توابع عضویت فازی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu(x) = bell(x;a,b,c) = \frac{1}{1+\left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}} \qquad (۹)$$

Safavi and Golmohammadi (2016) با استفاده از مفهوم تابع عضویت در تئوری فازی و مفاهیم مطلوبیت و عدم مطلوبیت قابل استنتاج از تابع عضویت، روابط مربوط به معیارهای عملکرد اعم از قابلیت اطمینان، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری را برای تحلیل عملکرد سیستم‌های منابع آب مورد بازبینی قرار داده و روابط زیر را برای محاسبه این معیارها پیشنهاد دادند.

$$\mathrm{Re}l^i_{time} = \frac{\sum_t \mu^i(x_t)}{N} \times 100\%; \qquad 0 \le \mathrm{Re}l^i_{time} \le 100\% \qquad (۱۰)$$

$$\mathrm{Re}s^i = \frac{\sum_t^N \left\langle \mu^i(x_t) - \mu^i(x_{t-1}) \middle| \mu^i(x_t) > \mu^i(x_{t-1}) \right\rangle}{\sum_t \left(1-\mu^i(x_t)\right)} \times 100\%; \quad 0 \le \mathrm{Re}s^i \le 100\% \qquad (۱۱)$$

در این تحقیق معیار آسیب‌پذیری فازی برای شبکه‌های آب با استفاده از مفهوم رابطه (۳) و مقدار مطلوبیت حاصل از تابع عضویت فازی به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$Vul^i = \frac{\sum_t x_t \times (1-\mu^i(x_t))}{\sum_t x_t} \qquad (۱۲)$$

که $\mu(x_t)_j$: میزان مطلوبیت در گره j در زمان t، N: تعداد کل گام های زمانی، x_t: پارامتر در نظر گرفته شده (در این تحقیق پارامتر فشار) هستند.

همچنین برای محاسبه پایداری شبکه های آب، رابطه زیر براساس رابطه (۴) و روابط (۸) تا (۱۱) پیشنهاد می‌شود:

$$SI^i = [Rel^i_{time} \times Rel^i_C \times Res^i \times (1 - Vul^i)]^{1/4} \qquad (۱۳)$$

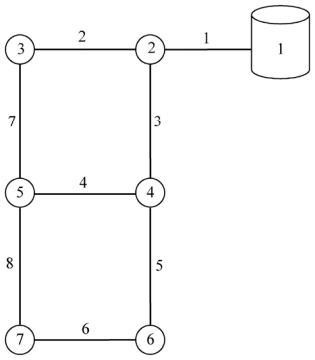
در این رابطه پارامترها، به ترتیب قابلیت اطمینان در زمان، قابلیت اطمینان ترکیبی، برگشت پذیری و آسیب پذیری در گره i هستند.

۳- مطالعه موردی

برای بررسی و ارزیابی شاخص پایداری پیشنهادی، از شبکه‌های دوحلقه‌ای و Anytown به عنوان مطالعه موردی

استفاده شده‌است. شکل‌های ۱ و ۲ شماتیک شبکه‌های مذکور را نمایش می‌دهد (Fujiwara and Khang, 1990). شبکه دو حلقه ای از ۸ لوله با اندازه های یکسان به طول ۱۰۰۰ متر قرار گرفته در دو حلقه تشکیل شده است. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود با یک مخزن ثابت تغذیه می شود.

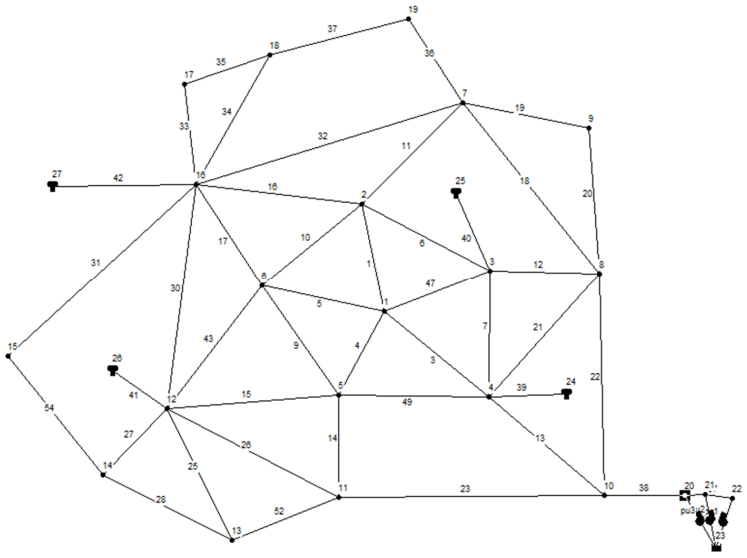
در این تحقیق، مشخصات بهینه شبکه دو حلقه ای که توسط Zhou et al. (2015) به دست آمده، نیز مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین منبع تأمین آب در شبکه Anytown از رودخانه است که تصفیه آب در تصفیه خانه مرکزی شهر واقع در گره شماره ۱۰ انجام می‌گیرد. براساس شکل ۲، سه پمپ یکسان به صورت موازی آب را از تصفیه خانه به شبکه پمپاژ می‌کنند. مشخصات بهینه این شبکه از مطالعات (Farmani et al., 2005) استخراج و مورد استفاده قرار گرفته‌است. پس از توسعه شبکه‌های فوق و اجرای آن در محیط نرم‌افزار EPA-NET، خروجی های مربوط به پارامتر فشار در گره‌ها با استفاده از روابط مربوط به معیارهای عملکرد و شاخص پایداری از دو منطق کلاسیک و فازی محاسبه شده و نتایج برای ارزیابی روابط توسعه‌داده‌شده با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.



شکل ۱- شبکه دو حلقه ای

۴- نتایج و بحث

مدل‌سازی این دو شبکه در ۲۴ ساعت با دوره زمانی ۳ ساعته با ضرایب تقاضای متفاوت در طول روز (مطابق جدول ۱)، مورد تحلیل قرار گرفته‌است. با اجرای مدل در نرم افزار EPANET، فشار در گره‌های مختلف در کل شبکه ها محاسبه شده و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در این تحقیق طبق نظر کارشناسان از تابع زنگوله ای استفاده شده است. برای این دو شبکه با در نظر گرفتن محدوده مجاز فشار (حداقل فشار ۳۰ متر و حداکثر فشار ۵۰ متر آب) طبق نظر کارشناسان خبره در وزارت نیرو و شرکت های آب و فاضلاب در بخش های طراحی و بهره برداری که به صورت مکتوب نظر خواهی شده است، مطلوبیت فشار ۲۵ و ۵۵ متر آب برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. با استفاده از تابع زنگوله ای (رابطه ۷) مقادیر a، b و c به ترتیب برابر ۱۵، ۱/۸ و ۴۰ به دست آمده که نمودار آن در شکل ۳ نمایش



شکل ۲- شبکه Anytown

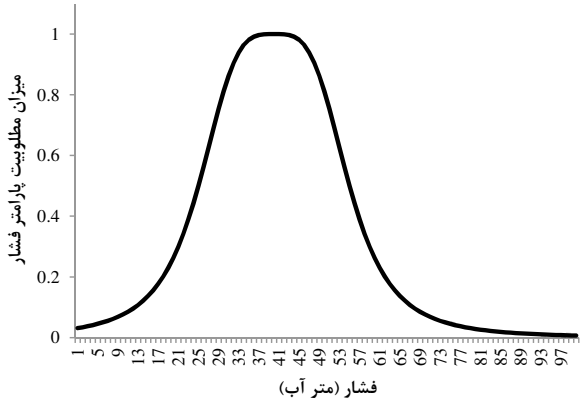
داده شده‌است. در نهایت با استفاده از خروجی های نرم افزار EPANET و تابع عضویت فوق، می توان میزان درجه عضویت گره ها یا به عبارت دیگر میزان مطلوبیت فشار در هر گره از شبکه ها را محاسبه کرد.

جدول ۱- الگوی زمانی تغییرات تقاضا

دوره زمانی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
ضریب	۰/۷	۰/۶	۱/۲	۱/۳	۱/۲	۱/۱	۱	۰/۹

خروجی‌های شبکه دو حلقه ای برای تحلیل، ارزیابی و مقایسه شاخص‌های توسعه‌داده‌شده فازی در این تحقیق با شاخص‌های متداول غیرفازی (روابط ۱، ۲، ۵) در جدول ۲ ارائه شده‌است. همان طور که در جدول ۲ مشاهده می شود بعضی از فشارها با اختلاف کمی خارج از محدوده مجاز قرار گرفته‌است که مقادیر از لحاظ روش قطعی، شکست مطلق محسوب می‌شود، در حالی‌که در روش فازی این مقادیر دارای مطلوبیت بالایی هستند. برای مثال در گره ۲ در حالت قطعی در تمامی بازه های زمانی فشار بالاتر از حد حداکثر است. در نتیجه از لحاظ روش قطعی، دچار شکست شده و میزان مطلوبیت صفر است، در حالی که در روش فازی در ساعت ۹ بر اساس نظر کارشناسان میزان مطلوبیت برابر ۸۱٪ است که میزان مطلوبیت نسبتاً بالایی دارد. حال اگر در جدول ۲ فشار گره ۲ در ساعت ۹ مشاهده شود، فشار برابر با ۵۰/۱۵ متر آب است که فقط ۰/۱۵ متر با حداکثر فشار مجاز فاصله دارد. این بدین معنی است که در این ساعت گره دارای فشار مناسبی بوده و باید میزان مطلوبیت بالایی داشته باشد. حال اگر این حالت برای ما بقیه فشارها نیز بررسی شود نشان می دهد که نتایج حاصل از معیارهای فازی بسیار ملموس‌تر از نتایج معیارهای قطعی است.

معیارهای عملکرد و شاخص پایداری محاسبه‌شده برای کل شبکه به روش های قطعی و فازی در جدول ۳ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که براساس روش فازی قابلیت اطمینان فازی بالاتر از حدی است که روش قطعی نمایش می‌دهد. همچنین



شکل ۳- تابع عضویت مورد استفاده در محاسبه معیارهای عملکرد شبکه‌های دوحلقه‌ای و Anytown

جدول ۲- فشارهای بدست آمده در بازه زمانی ۲۴ ساعته برای شبکه دو حلقه ای

شماره گره	فشار (متر آب)								
	۰:۰۰	۳:۰۰	۶:۰۰	۹:۰۰	۱۲:۰۰	۱۵:۰۰	۱۸:۰۰	۲۱:۰۰	۰:۰۰
۲	۵۶/۸۷	۵۷/۶۵	۵۱/۵۱	۵۰/۱۵	۵۱/۵۱	۵۲/۷۷	۵۳/۹۴	۵۵/۰۱	۵۶/۸۷
۳	۴۰/۸۶	۴۳/۱۳	۲۵/۱۹	۲۱/۲۳	۲۵/۱۹	۲۸/۸۹	۳۲/۳	۳۵/۴۴	۴۰/۸۶
۴	۴۹/۸۱	۵۱/۱	۴۰/۹۱	۳۸/۶۶	۴۰/۹۱	۴۳/۰۱	۴۴/۹۵	۴۶/۷۳	۴۹/۸۱
۵	۴۵/۶۹	۴۹/۲۵	۲۱/۱۷	۱۴/۹۷	۲۱/۱۷	۲۶/۹۵	۳۲/۳	۳۷/۲۱	۴۵/۶۹
۶	۳۷/۸۵	۳۹/۶۳	۲۵/۶	۲۲/۵	۲۵/۶	۲۸/۴۹	۳۱/۱۶	۳۳/۶۱	۳۷/۸۵
۷	۴۰/۴۷	۴۲/۸۳	۲۴/۱۳	۱۹/۹۹	۲۴/۱۳	۲۷/۹۸	۳۱/۵۴	۳۴/۸۱	۴۰/۴۷

برگشت پذیری و آسیب‌پذیری شبکه نیز کمتر از مقداری است که از روش قطعی محاسبه می‌کند. بنابراین به طور کلی می‌توان گفت از دیدگاه کارشناسی و ملموس میدانی پایداری شبکه (۵۷٪) بیش از مقداری است که روش قطعی (۵۰٪) آن را محاسبه می‌کند. تفاوت بین نتایج زمانی بسیار زیاد و قابل تأمل خواهند بود که مقادیر فشار گره‌ها بسیار نزدیک به محدوده مجاز ولی خارج از آن باشد. در این مواقع به طور همان طور که در جدول ۴ مشاهده می شود شاخص پایداری فازی و قطعی با یکدیگر برابر هستند. این موضوع نشان دهنده این است که مقادیر فشار یا دقیقاً در محدوده مجاز است و یا اختلاف زیادی با مقادیر حداکثر و حداقل دارد. فشارهایی مشابه با فشار گره ذکر شده باعث می شود میزان قابلیت اطمینان روش فازی بیشتر از روش قطعی باشد. حال اگر میزان مطلوبیت گره ۶ در زمان ۱۸:۰۰ و ۲۱:۰۰ در نظر گرفته شود،

جدول ۳- مقایسه مقادیر قطعی و فازی در شبکه دو حلقه‌ای

روش	قابلیت اطمینان ترکیبی	قابلیت اطمینان در زمان	برگشت پذیری	آسیب پذیری	شاخص پایداری
قطعی	۶۱	۵۲	۳۳	۴۱	۵۰
فازی		۷۴	۳۰	۲۱	۵۷

حتم روش قطعی محقق را با اشتباهات و نتایج نادرستی روبرو خواهد کرد که طبعاً تصمیمات نادرستی را نیز در پی خواهد داشت. این درحالی است که روش فازی به خوبی مقادیر حدی را شناسایی کرده و نتایج ملموس‌تری را به محقق ارائه می‌دهد.

بخشی از خروجی های شبکه Anytown در شکل ۴ ارائه شده‌است. در این شبکه اگر میزان مطلوبیت قطعی و فازی برای فشار گره ها محاسبه شود مشاهده می شود که اکثر مطلوبیت مشاهده میشود اختلاف مطلوبیت این دو زمان تفاوت زیادی ندارد و برگشت پذیری شبکه در این زمان کم است ولی در روش قطعی در زمان ۱۸:۰۰ شبکه شکست خورده و در زمان ۲۱:۰۰ فشار مورد نیاز را تأمین نموده است. حالاتی مشابه حالت ذکر شده نشان می دهد که برگشت پذیری کلی شبکه با استفاده از روش فازی کمتر از روش قطعی به دست می آید.

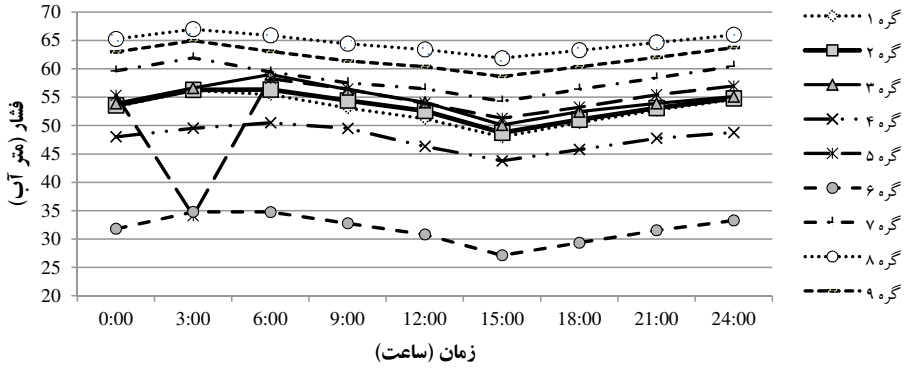
جدول ۴- مقایسه مقادیر قطعی و فازی در شبکه Anytown

روش	قابلیت اطمینان ترکیبی	قابلیت اطمینان در زمان	برگشت پذیری	آسیب پذیری	شاخص پایداری
قطعی	۴۰	۴۴	۴۶	۵۸	۴۳
فازی		۵۹	۲۵	۴۱	۴۳

هایی که برای حالات فازی به دست آمده، نزدیک به مقادیر قطعی است، ولی در بعضی گره ها مطلوبیت فازی و قطعی تفاوت فاحشی دارند. برای مثال اگر گره ۱ در زمان ۱۸:۰۰ مشاهده شود، در حالت قطعی مطلوبیتی برابر صفر دارد که در مقابل آن در روش فازی مطلوبیتی برابر ۸۱٪ دارد. حال اگر در جدول ۴ فشار این گره در زمان ۱۸:۰۰ مشاهده شود برابر است با ۵۰/۵۴ متر و همان طور که مشاهده می شود تنها ۰/۵۴ متر از حد مجاز حداکثر بیشتر است. این مقدار فشار چه از نظر متخصصین و چه از نظر ذی نفعان مقداری مطلوب می باشد.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق ارزیابی عملکرد شبکه‌های آبرسانی با استفاده از شاخص پایداری و اجزاء آن اعم از معیارهای قابلیت اطمینان، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری در دو منطق فازی و کلاسیک مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفت. نتایج فشار در گره‌های دو شبکه Anytown و دوحلقه‌ای که در نرم افزار EPANET توسعه داده شدند، به عنوان داده‌های قابل ارزیابی انتخاب و مطالعه موردی تحقیق را تشکیل دادند. نتایج نشان داد که



شکل ۴- فشارهای بدست آمده در بازه زمانی ۲۴ ساعته برای گره های ۱ تا ۹ از شبکه Anytown

محاسبات پایداری و معیارهای عملکرد با استفاده از منطق فازی نسبت به منطق کلاسیک نسبت به واقعیت شبکه از دیدگاه خبرگان و کارشناسان، منطقی تر و ملموس‌تر است. نتایج مبین آن است که به طور قطع نمی‌توان قضاوت کرد که شاخص پایداری فازی بیشتر یا کمتر از شاخص پایداری قطعی خواهد بود، بلکه مقادیر آن بستگی به محدوده فشار گره دارد. اگر فشار گره ها اکثراً در نزدیکی مرز محدوده مجاز قرار گیرد، اختلاف شاخص پایداری فازی با شاخص پایداری قطعی زیاد است و اگر مقادیر فشار در نزدیکی مرز محدوده مجاز و اغلب در داخل محدوده مجاز قرار گیرد، شاخص پایداری فازی بیشتر از شاخص پایداری قطعی خواهد بود. بالعکس چنانچه مقادیر فشار در نزدیکی مرز محدوده مجاز ولی اکثراً خارج از محدوده مجاز باشند، شاخص پایداری فازی کمتر از شاخص پایداری قطعی خواهد بود.

۶- مراجع

Abbott, M.L., O'Neill, J., and Barkdoll, B.D., (2014). "Adaptive Greedy-Heuristic Algorithm for redundancy augmentation by loop addition in branched water distribution systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(6), 06014005.

Bazovsky, I., (1961), *Reliability theory and practice*, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, N.J.

Bureau of Technical Execution System, Office of President Deputy for Strategic Supervision, (2013), "*Design criteria of urban and rural water supply and distribution systems*", Standard Code 113-3, 1st Revision, (in Farsi).

Farmani, R., Walters, G.A., and Savic, D.A., (2005), "Trade-off between total cost and reliability for Anytown water distribution network", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(3), 161-171.

Fujiwara, O., and Khang, D. B., (1990), "A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks', *Water Resources Research*, 26(4), 539-549.

Hashimoto, T., Stedinger, J.R., and Loucks, D.P., (1982), "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation", *Water Resources Research*, 18(1), 14-20.

Huizar, Jr, L.H., Kang, D., and Lansey, K., (2011), "A decision support system for sustainable urban water supply", *In World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability*, California, 3238-3250.

Loucks, D.P., (1997), "Quantifying trends in system sustainability", *Hydrological Sciences Journal*, 42(4), 513-530.

Monzavi, M., (2009), *Urban water supply*, University of Tehran Press, Tehran, Iran, (in Farsi).

Moy, W.S., Cohon, J.L., and ReVelle, C. S., (1986), "A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir", *Water Resources Research*, 22(4), 489-498.

Safavi, H.R., Golmohammadi, M.H., and Sandoval-Solis, S., (2016), "Scenario analysis for integrated water resources planning and management under uncertainty in the Zayandehrud river basin", *Journal of Hydrology*, 539, 625-639.

Sandoval-Solis, S., McKinney, D.C., and Loucks, D.P., (2010), "Sustainability index for water resources planning and management", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(5), 381-390.

Tabesh, M., (1998), "Implications of the pressure dependency of outflows of data management, mathematical modelling and reliability assessment of water distribution systems", Doctoral Dissertation, University of Liverpool, UK.

Tabesh, M., Nazif, S., and Babai, N., (2013), "Optimal utilization of resources in water distribution networks for sustainable development", *First National Conference on Water Crisis*, Isfahan, Iran, (in Farsi).

Taheri, S., (2016), "Providing a composite index of reliability in order to assess the sustainability of urban water distribution networks", M.Sc. Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, (in Farsi).

Todini, E., (2000), "Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach", *Urban Water*, 2(2), 115-122.

Walski, T.M., (2001), "The wrong paradigm: Why water distribution optimization doesn't work", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(4), 203-205.

Zadeh, L.A., (1965), 'Fuzzy sets', *Information and Control*, 8(3), 338-353.

Zhou, X., Gao, D.Y., and Simpson, A.R., (2016), "Optimal design of water distribution networks by a discrete state transition algorithm", *Engineering Optimization*, 48(4), 603-628.