

# Examining the Influence of Data Uncertainty and Hydraulic Simulation Method on the Results of Modeling and Performance Evaluation of Water Distribution Networks

*M. Tabesh<sup>1</sup>, M. Askarzadeh<sup>2</sup>, A. Shirzad<sup>3</sup>*

1. Prof., Center of Excellence for Engineering and Management of Civil Infrastructures, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran  
(Corresponding Author) mtabesh@ut.ac.ir
2. MSc Student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Assist. Prof., Faculty of Civil Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

(Received July 1, 2017 Accepted Apr. 3, 2018)

#### To cite this article :

Tabesh, M., Askarzadeh, M., Shirzad, A., 2019, "Examining the influence of data uncertainty and hydraulic simulation method on the results of modeling and performance evaluation of water distribution networks." Journal of Water and Wastewater, 30(4), 33-50. Doi: 10.22093/wwj.2018.87938.2417. (In Persian)

#### Abstract

Water distribution networks (WDNs) are complicated infrastructures which their construction, operation and maintenance have considerable costs. Since most of the variables effective on the design and operation of WDNs cannot be computed and achieved accurately and definitely, uncertainty subject should be considered as an inseparable issue in the calculation of these networks. In this study, using the fuzzy logic concept and genetic optimization algorithm, the impact of uncertainties of input variables (nodal demands and pipe roughness coefficients) on the results of hydraulic analysis of two sample networks have been examined. In this regard, first, the fuzzy membership functions of input variables have been determined and by considering the simultaneous impacts of these variables' uncertainties, the output variables of hydraulic analysis have been calculated more accurately. Afterwards, variables of pressure, velocity and energy loss have been considered as representers for evaluating the hydraulic performance of network elements (nodal demand and pipes). In order to calculate the hydraulic performance indices of these elements, after analyzing the network based on the pressure driven simulation method, penalty curves defined according to the available standards, have been employed and the obtained results have been compared to the results of the demand driven simulation method. In addition, a new relation for combining the performance indices of network elements and obtaining an index for evaluating the total pipe performance and calculating the total hydraulic performance index of network has been introduced. According to the obtained results, slight uncertainties in the input variables of hydraulic analysis lead to high uncertainties in the outputs of the hydraulic analysis of WDNs. Meanwhile, velocity in pipes more than nodal pressures are affected by the uncertainties of input variables of hydraulic analysis. Also, implementing the pressure driven simulation method in performance evaluation of WDNs in their operation period leads to more reasonable and real results. For instance the total performance of network was 0.56 for 9-loop network and was 0.26 and 0.59 for 2-loop network, respectively, based on demand and pressure driven simulation methods.

**Keywords:** Water Distribution Networks, Pressure Driven Simulation Method, Performance Evaluation, Uncertainty, Fuzzy Logic, Genetic Algorithm.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۰، شماره ۴، صفحه: ۳۳-۵۰

## بررسی تأثیر عدم قطعیت داده‌ها و نوع شبیه‌سازی هیدرولیکی بر نتایج مدل‌سازی و ارزیابی عملکرد شبکه‌های توزیع آب

مسعود تابش<sup>۱</sup>، مژگان عسکرزاده<sup>۲</sup>، اکبر شیرزاد<sup>۳</sup>

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌های عمرانی،

پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(نویسنده مسئول) mtabesh@ut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران،

پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

پذیرش ۹۷/۱/۱۴

(دریافت ۹۶/۴/۱۰)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

تابش، م، عسکرزاده، م، شیرزاد، ا، ۱۳۹۸، " بررسی تأثیر عدم قطعیت داده‌ها و نوع شبیه‌سازی هیدرولیکی بر نتایج مدل‌سازی و ارزیابی

عملکرد شبکه‌های توزیع آب " مجله آب و فاضلاب، ۳۰(۴)، ۳۳-۵۰. Doi: 10.22093/wwj.2018.87938.2417

### چکیده

شبکه‌های توزیع آب زیرساخت‌های پیچیده‌ای هستند که ساخت، بهره‌برداری و نگهداری از آنها نیازمند صرف هزینه‌های قابل توجهی است. از آنجایی که اکثر متغیرهای مؤثر در طراحی و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب به‌طور دقیق و قطعی قابل محاسبه و دستیابی نیستند، لذا بحث عدم قطعیت به‌عنوان یک موضوع جدا نشدنی در زمینه محاسبات این شبکه‌ها نیز باید مد نظر قرار گیرد. در این پژوهش با استفاده از مفهوم منطق فازی و به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، تأثیر عدم قطعیت‌های موجود در متغیرهای ورودی شبکه (تقاضای گرهی و ضریب زبری لوله) بر نتایج تحلیل هیدرولیکی دو شبکه توزیع آب نمونه بررسی شد. در ابتدا توابع عضویت فازی متغیرهای ورودی به‌دست آمد و با منظور نمودن تأثیر توأم عدم قطعیت این متغیرها، متغیرهای خروجی تحلیل هیدرولیکی با دقت بیشتری محاسبه شد. در ادامه متغیرهای فشار، سرعت و افت انرژی به‌عنوان نشانگرهایی برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی اجزای شبکه (گره‌های مصرف و لوله‌ها) در نظر گرفته شد. به‌منظور محاسبه شاخص عملکرد هیدرولیکی این اجزا، پس از تحلیل هیدرولیکی شبکه با استفاده از مدل تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار، از منحنی‌های جریمه تعریف شده مطابق با استانداردهای موجود، استفاده شد و نتایج با خروجی‌های تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا مقایسه شد. به‌علاوه معادله جدیدی برای تلفیق عملکرد اجزای شبکه و به‌دست آوردن شاخصی برای ارزیابی عملکرد کل لوله و محاسبه اندیس عملکرد هیدرولیکی کل شبکه معرفی شد. طبق نتایج حاصل، مقادیر عدم قطعیت جزئی در متغیرهای ورودی تحلیل هیدرولیکی، عدم قطعیت بالایی در نتایج تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب به‌دنبال داشت. البته متغیر سرعت جریان در لوله‌ها بیشتر از متغیر فشار گرهی تحت تأثیر عدم قطعیت موجود در متغیرهای ورودی تحلیل هیدرولیکی قرار می‌گیرد. همچنین استفاده از روش تحلیل مبتنی بر فشار در ارزیابی عملکرد هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب در طول دوره بهره‌برداری منجر به نتایج منطقی‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت می‌شود. به‌طور مثال شاخص عملکرد کل شبکه برای شبکه ۹ حلقه‌ای برابر ۰/۵۶ و برای شبکه دو حلقه‌ای هم بر اساس روش‌های تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا و مبتنی بر فشار به‌ترتیب برابر ۰/۲۶ و ۰/۵۹ به‌دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** شبکه‌های توزیع آب، تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار، ارزیابی عملکرد، عدم قطعیت، منطق فازی، الگوریتم ژنتیک



## ۱- مقدمه

ارزیابی عملکرد شبکه‌های توزیع آب از مهم‌ترین موضوعاتی است که در شرایط حاضر با توجه به محدودیت منابع آب و لزوم برنامه‌ریزی به‌منظور استفاده بهینه از آنها باید مورد توجه قرار گیرد. در واقع با شناخت رفتار این شبکه‌ها در شرایط مختلف بهره‌برداری، می‌توان گامی مهم برای بهره‌برداری بهینه و رفع معضلات و مشکلات آنها و سرویس‌دهی مطلوب برداشت (Shirzad and Tabesh, 2016).

به‌طور کلی طراحی شبکه‌ها به صورت قطعی انجام شده و تغییرات متغیرهای مختلف، از قبیل تقاضای گرهی و ضریب زبری لوله‌ها، در طول عمر مفید سیستم مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. عدم قطعیت در متغیرهای ورودی یک مدل طراحی، در نتایج مدل گسترش می‌یابد که هدف اصلی در تجزیه و تحلیل عدم قطعیت نیز کمی نمودن این فرایند است. عدم قطعیت را می‌توان به‌عنوان خاصیتی از سیستم در نظر گرفت که توصیف‌کننده نقص دانش بشر درباره یک سیستم و وضعیت پیشرفت آن است. عدم قطعیت می‌تواند از اندازه‌گیری متغیرها، تخمین متغیرها و هر یک از فرایندهای موجود در مدل‌سازی پدیده مورد بررسی و حتی استفاده از مدل مورد نظر ناشی شود. بنابراین توسعه مدل‌هایی که عدم قطعیت را نیز شامل شود، بسیار ارزشمند خواهد بود (Babayan et al., 2005).

هادسون در سال ۱۹۶۶ تغییرات ظرفیت سیستم توزیع آب را در ضریب زبری لوله‌ها منعکس کرده و ضریب زبری هیزن-ویلیامز<sup>۱</sup> شبکه‌های توزیع آب هفت شهر ایالات متحده را به‌صورت تابعی از سن لوله مقایسه و بررسی نمود. در اثر گذشت زمان با توجه به رسوب‌گذاری و خوردگی در لوله‌های شبکه توزیع آب، زبری این لوله‌ها افزایش یافته و مانعی در مقابل عبور جریان کافی در شبکه ایجاد می‌شود (Hudson, 1966).

پژوهشگران زیادی به تحلیل تأثیر تغییرات ضریب زبری بر طراحی بهینه و کارآمد شبکه‌های توزیع آب پرداخته‌اند (Bao and Mays, 1990, Cullinane et al., 1992, Todini, 2000, Kapelan et al., 2005, Bozorg-Haddad et al., 2008). از دیدگاه احتمالاتی در مسائل مهندسی آب، برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت روش‌های مختلفی وجود دارد. این روش‌ها به

سه دسته تحلیلی، تقریبی و شبیه‌سازی طبقه‌بندی می‌شوند. انتخاب روش مناسب به ماهیت مسئله، دسترسی به اطلاعات، پیچیدگی مدل ریاضی مورد استفاده و نوع و دقت نتایج خواسته شده بستگی دارد (Tung, 1996). تجزیه و تحلیل و ارزیابی‌های آماری و احتمالاتی نیاز به یک حداقل برای تعداد اطلاعات دارد که در اکثر موارد در دسترس نیست. در این صورت طراح باید به همان تعداد داده در دسترس اکتفا کند که می‌تواند نتیجه حاصل از تحلیل‌های آماری را زیر سؤال ببرد. در چنین شرایطی می‌توان از تئوری مجموعه‌های فازی که دارای درجه آزادی بیشتری در مدل‌سازی هستند، استفاده نمود (Ayyub, 1998).

ژو و گولتر در سال ۱۹۹۶ نتایج حاصل از سه دیدگاه متمایز تجزیه و تحلیل عدم قطعیت بر اساس تئوری بازی‌ها، تئوری احتمال و منطق فازی را برای ارزیابی و تخمین چگونگی اثر عدم قطعیت تقاضای گرهی و متغیرهای لوله بر آنالیز شبکه ارائه نمودند (Xu and Goulter 1996). در این پژوهش روش‌های مبتنی بر تئوری مجموعه‌های فازی، بهترین روش‌ها برای بیان عدم قطعیت ناشی از تعاریف مبهم حاصل از دانش ناقص بشری و عدم دقت در عبارات بیانی متغیرهای مورد نظر ذکر شده است (Xu and Goulter 1996).

در پژوهش‌های دیگری با تأکید بر اینکه در تجزیه و تحلیل رفتار هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب عموماً متغیرهای کم دقت و نامطمئن مانند ضریب زبری لوله‌های کهنه و یا دبی‌های برداشتی از شبکه وجود دارند، تئوری مجموعه‌های فازی به‌منظور تجزیه و تحلیل عدم قطعیت و چگونگی گسترش عدم قطعیت متغیرهای ورودی به متغیرهای خروجی تحلیل شبکه، نظیر دبی لوله‌ها و فشارهای گرهی، مورد استفاده قرار گرفته است (Revelli and Ridolfi, 2002, Gupta and Bhawe, 2007).

کارماکار در سال ۲۰۱۱ به بررسی منابع عدم قطعیت در مدل‌سازی هیدرولیکی و کیفی شبکه‌های توزیع آب پرداخت (Karmakar, 2011). اثرات عدم قطعیت زبری لوله در عملکرد شبکه‌های توزیع آب در طول دوره بهره‌برداری نیز توسط پژوهشگرانی نظیر (Seifollahi-Aghmiuni et al., 2013a,b) و (Haghighi and Zahedi, ASL, 2014) بررسی شده است. حقیقی و زاهدی اصل به بررسی عدم قطعیت شبکه‌های توزیع آب با

<sup>۱</sup>Hazen-Williams Coefficient

توزیع آب را با در نظر گرفتن احتمال وقوع طیفی از تقاضاهای گرهی و شکست‌های مکانیکی و هیدرولیکی در سیستم بر اساس تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار محاسبه نمودند (Tabesh and Zia, 2003). در پژوهش‌های دیگر، ارزیابی عملکرد شبکه‌های توزیع آب بر اساس متغیرهای کیفیت آب با استفاده از مدل تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار انجام شده است (Tabesh and Dolatkahi, 2006).

با توجه به پیچیدگی‌های موجود در شبکه‌های توزیع آب و متغیرهای مؤثر در عملکرد آنها، تاکنون یک بررسی همه جانبه با در نظر گرفتن شرایط عمده موجود یا مؤثر در کنار هم، کمتر صورت گرفته است. در پژوهش‌های گذشته، عدم قطعیت متغیرهای ورودی شبکه به صورت درصدی از مقادیر اصلی هر متغیر فرض می‌شد. در این پژوهش، توابع عضویت فازی متغیرهای ورودی شبکه (زبری لوله‌ها و تقاضای گرهی) با مقایسه فشارهای محاسباتی با فشار مشاهداتی تعیین شد. سپس با در نظر گرفتن تأثیر هم‌زمان این عدم قطعیت‌ها در شبیه‌سازی شبکه و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، متغیرهای خروجی به صورت فازی به دست آمد. ارزیابی عملکرد المان‌های شبکه و محاسبه شاخص‌های عملکردی آنها، با استفاده از متغیرهای خروجی تحلیل هیدرولیکی انجام شد که این کار با استفاده از نرم‌افزارهای MATLAB (R2007b) و EPANET اصلاح شده برای مدل‌سازی و تحلیل HDSM و همچنین منحنی‌های جریمه تعریف شده برای فشار گرهی، سرعت جریان و افت فشار در لوله‌ها مطابق با استانداردهای موجود، صورت گرفت. سپس با تلفیق شاخص‌های عملکرد اجزای شبکه توسط معادله‌ای جدید، شاخص عملکرد کل لوله محاسبه شد و در نهایت، با استفاده از توابع تعمیم، شاخص عملکرد کل شبکه توزیع آب به دست آمد. همچنین تأثیر روش شبیه‌سازی هیدرولیکی بر نتایج مدل‌سازی و ارزیابی عملکرد شبکه‌های توزیع آب مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تعیین توابع عضویت فازی متغیرهای ورودی

متغیرهای ورودی بررسی شده در این پژوهش، زبری لوله‌ها و تقاضاهای گرهی بود که این متغیرها دارای عدم قطعیت هستند.

استفاده از تئوری فازی<sup>۱</sup> و الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> و بر اساس تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا<sup>۳</sup> پرداختند. آن‌ها توابع عضویت فازی متغیر ورودی ضریب زبری لوله را با اعمال درصدی عدم قطعیت فرض کردند و برای محاسبه حدود بالا و پایین توابع عضویت فازی متغیرهای خروجی، از روش بهینه‌سازی چند هدفه استفاده نمودند. از دیگر پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه می‌توان به منابع (Spiliotis and Tsakiris, 2012, Branisavljevic and Ivtetic, 2006, Sabzkouhi and Haghghi, 2016) اشاره نمود.

تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب اولین قدم در طراحی هرگونه سیستم آب‌رسانی شهری است. اصلاح شبکه‌های قدیمی و یا توسعه آنها، به دلیل گسترش مناطق مسکونی جدید، مستلزم تحلیل هیدرولیکی آنهاست. هر شبکه باید قادر باشد آب مورد نیاز را با فشار کافی در هر موقع از شبانه روز و با کیفیت مناسب در اختیار مصرف‌کنندگان قرار دهد. چنانچه شبکه به لحاظ هیدرولیکی دارای نقایصی باشد، این هدف تأمین نخواهد شد (Shirzad et al., 2013).

روش‌های شبیه‌سازی و تحلیل شبکه‌های توزیع آب به دو دسته تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا (DDSM) و تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار<sup>۴</sup> تقسیم می‌شوند (Tabesh et al., 2002). نوع تحلیل هیدرولیکی نیز می‌تواند در نتایج بررسی عدم قطعیت مربوط به متغیرهای ورودی مؤثر باشد. به عبارت دیگر، روش DDSM توانایی انجام محاسبات هیدرولیکی صحیح مربوط به اجزای شبکه را در قبال دبی‌های بیش از مقدار دبی طراحی ندارد. بنابراین استفاده از این روش در ارزیابی عدم قطعیت متغیرهای ورودی شبکه می‌تواند منجر به بروز خطا در نتایج محاسبات مربوطه شود. در حالی که روش HDSM با در نظر گرفتن رابطه‌ای برای دبی و فشار گره‌ای، قادر است تا اثرات ناشی از افزایش تقاضا نسبت به تقاضای طراحی را بر روی دیگر متغیرهای هیدرولیکی شبکه با دقت شبیه‌سازی کند. در نتیجه می‌توان عدم قطعیت مربوط به متغیرهای ورودی شبکه را به درستی محاسبه نمود (Tabesh, 2016). تابش و ضیا در سال ۲۰۰۳ عملکرد شبکه‌های

<sup>1</sup> Fuzzy Theory

<sup>2</sup> Genetic Algorithm (GA)

<sup>3</sup> Demand Driven Simulation Method (DDSM)

<sup>4</sup> Head Driven Simulation Method (HDSM)



نیازهای گرهی و زبری لوله‌ها به ترتیب  $15 \pm$  و  $10 \pm$  درصد محتمل‌ترین مقدار آن‌ها را به عنوان عدم قطعیت در نظر گرفتند؛ یعنی مثلاً برای ضریب زبری یک لوله با مقدار تخمینی  $130$ ، با لحاظ نمودن  $10 \pm$  درصد عدد  $130$ ، حد پایین و بالای ضریب زبری برای آن لوله برابر با  $117$  و  $143$  در نظر گرفته شد (Haghighi and Zahedi Asl, 2014). ولی در پژوهش حاضر متفاوت عمل شد و حدود پایین و بالا (تکیه‌گاه اعداد فازی ضریب زبری و نیاز گرهی) و یا به عبارتی فقط آن بخش از عدم قطعیت متغیرهای ورودی که باعث تغییر در متغیرهای خروجی مدل (فشارهای گرهی) مطابق با سه شرط بالا شوند، در نظر گرفته شد.

## ۲-۲- بررسی اثرات عدم قطعیت متغیرهای ورودی در نتایج

### حاصل از تحلیل هیدرولیکی

فلویدیاگرام روش ارائه شده در این تحقیق برای بررسی عدم قطعیت‌های موجود در شبکه‌های توزیع آب، در شکل ۱ نمایش داده شده است.

## ۲-۲-۱- محاسبه مقادیر حدی فاصله برش $\alpha$ برای هر تابع

### عضویت متغیرهای ورودی

در ابتدا با توجه به توابع عضویت متغیرهای ورودی، یک خط افقی مربوط به هر سطح  $\alpha$  خاص، منحنی تابع عضویت متغیرهای ورودی را در دو نقطه مجزا قطع می‌کند. این نقاط محدود به بالا و پایین هر بازه برش  $\alpha$  برای تمام توابع عضویت متغیرهای ورودی تعیین می‌شود.

لازم به ذکر است که تعداد سطوح  $\alpha$ ، با توجه به دقت مورد نیاز برای دریافت توابع عضویت متغیرهای خروجی تحلیل، تعیین می‌شود. این مقادیر در آرایه‌هایی که متناظر با هر برش  $\alpha$  است، ذخیره می‌شود. الگوی ذخیره‌سازی داده‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است (Karmakar, 2011). در اینجا، دو ستون به هر متغیر فازی ورودی اختصاص داده شد. از این رو، کل ستون‌ها به اندازه دو برابر مجموع تعداد لوله‌ها و گره‌های مصرف شبکه و تعداد سطرها نیز برابر تعداد سطوح برش  $\alpha$  بود. در آرایه برش‌های  $\alpha$ ، در هر ستون دو تایی، مقدار حدهای پایین (a,c,e,g,i) در ستون اول و حدهای بالا (b,d,f,h,i) در ستون دوم، مربوط به فواصل برش‌های مختلف  $\alpha$ ، ذخیره شدند.

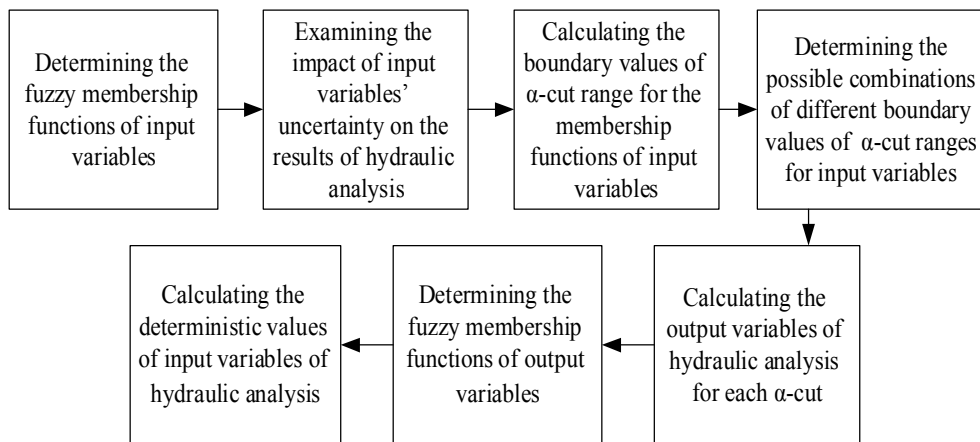
برای در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها، در گام اول برای متغیر زبری، با توجه به مقدار آن در هر لوله، مقادیر جدیدی برای حدود پایین و بالای آن در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که مقدار زبری در سایر لوله‌ها و مقادیر تقاضای گرهی ثابت فرض شده است. در گام بعد، با در نظر گرفتن مقدار جدید برای زبری لوله مورد نظر، شبکه فرض شده، تحلیل و مقادیر فشار ناشی از این تغییرات محاسبه می‌شود. سپس این کار برای کل لوله‌های شبکه تکرار می‌شود. مقادیر محاسبه شده در این گام باید در محدوده توصیه شده زیر قرار بگیرند (Tabesh, 2016)

۱-  $85$  درصد فشارهای اندازه‌گیری شده باید در بازه  $5/0 \pm$  متری و یا  $5 \pm$  درصدی مقدار حداکثر افت هد در سیستم واقع شوند (هر کدام که بزرگ‌تر است).  
۲-  $95$  درصد فشارهای اندازه‌گیری شده باید در بازه  $75/0 \pm$  متری و یا  $5/0 \pm$  درصدی مقدار حداکثر افت هد در سیستم واقع شوند (هر کدام که بزرگ‌تر است).  
۳-  $100$  درصد فشارهای اندازه‌گیری شده باید در بازه  $2 \pm$  متری و یا  $15 \pm$  درصدی مقدار حداکثر افت هد در سیستم واقع شوند (هر کدام که بزرگ‌تر است).

در این مرحله برای به دست آوردن توابع عضویت فازی ضریب زبری لوله، با توجه به مقادیر اعمال شده در هر تکرار (حد بالا و حد پایین) و مقدار خطای ایجاد شده ناشی از آن، کنترل‌هایی برای اطمینان از رعایت ضوابط موجود انجام می‌گیرد. در صورتی که خطای ایجاد شده برای مقادیر حدی تعریف شده در هر تکرار در محدوده مورد نظر قرار گیرد، فرایند سعی و خطا برای به دست آوردن محدوده تغییرات متغیر زبری ادامه خواهد داشت. مقادیر حدی که خطای ناشی از آن خارج از محدوده به دست آمده قرار می‌گیرد، دارای درجه عضویت صفر و مقادیر اولیه زبری لوله نیز دارای درجه عضویت یک هستند. در نهایت حدهای بالا و پایین متغیر مورد بررسی تعیین می‌شود و تابع عضویت مثلثی ضریب زبری هر لوله رسم می‌شود.

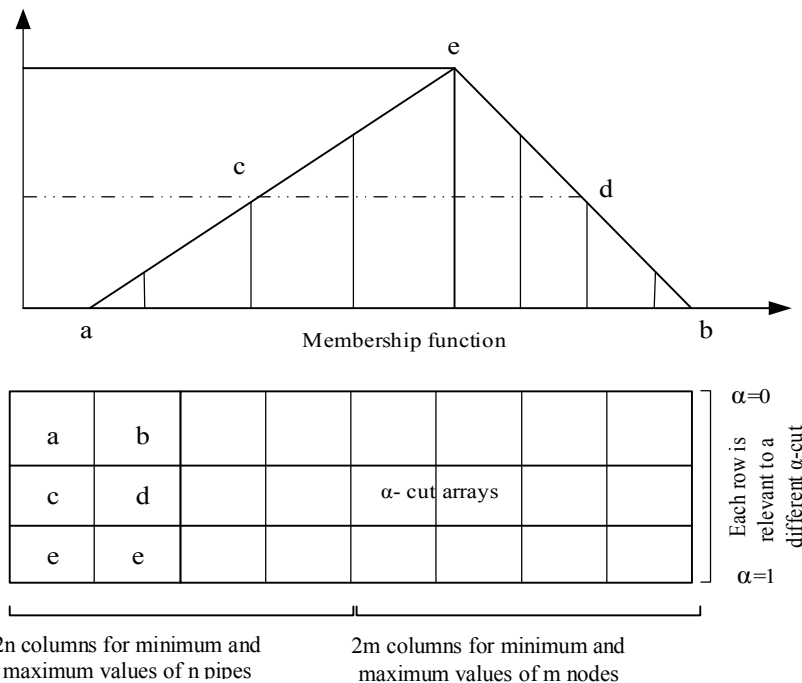
همین روند برای به دست آوردن نمودار تابع عضویت فازی ضریب زبری سایر لوله‌ها و همچنین، متغیر تقاضای هر گره از شبکه نیز تکرار می‌شود. البته لازم به ذکر است که تعیین دامنه عدم قطعیت متغیرهای ورودی در پژوهش‌های مختلف ممکن است متفاوت باشد. برای نمونه در مقاله حقیقی و زاهدی اصل برای





شکل ۱- فلودیاگرام بررسی عدم قطعیت‌های موجود در شبکه‌های توزیع آب

Fig. 1. Flowchart of examining the uncertainties in water distribution networks



شکل ۲- نمایش شماتیک الگوی ذخیره‌سازی داده‌ها در برش‌های  $\alpha$  (Karmakar, 2011)

Fig. 2. Schematic representation for pattern of data hold in  $\alpha$ -cuts (Karmakar, 2011)

قادر است عدم قطعیت متغیرهای ورودی را به صورت دقیق تری منظور نماید. در هر سطح  $\alpha$  خاص، متغیرهای ورودی فازی می‌توانند تنها یک مقدار از مقادیر حدی بالا یا پایینی مربوط به هر فاصله برش  $\alpha$  ذخیره شده را اتخاذ نمایند. در مجموع  $n$  لوله و  $m$  گره

۲-۲-۲- به دست آوردن ترکیبات ممکن از مقادیر مختلف حدی فواصل برش  $\alpha$  متغیرهای مختلف ورودی برخلاف روش‌های سنتی که تاکنون برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت در شبکه‌های توزیع آب توسعه یافته است، مدل پیشنهادی



به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری یا محاسبه هستند، انجام گیرد. در محاسبه عملکرد هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب می‌توان از متغیرهایی مانند دبی و سرعت در لوله‌ها و فشار در گره‌ها استفاده کرد (Shirzad and Tabesh, 2016). ارزیابی عملکرد هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب از دو مرحله تشکیل شده است. مرحله اول شامل تهیه داده‌های هیدرولیکی است که این داده‌ها از طریق شبیه‌سازی هیدرولیکی به دست می‌آید. مرحله دوم نیز پردازش نتایج حاصل از شبیه‌سازی است که خود نیز از دو گام تشکیل شده است. در گام نخست از یک منحنی به نام منحنی جریمه به منظور محاسبه شاخص عملکرد هیدرولیکی اجزای شبکه (گره‌های مصرف و لوله‌ها) استفاده شده و در گام نهای برای تعمیم شاخص عملکرد محاسبه شده در مرحله قبل به کل شبکه و به دست آوردن شاخص عملکرد کل شبکه، از توابعی به نام توابع تعمیم استفاده می‌شود.

#### ۲-۳-۱- منحنی‌های جریمه هیدرولیکی

برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی شبکه‌ها از نقطه نظر فشار هیدرولیکی گره‌ها و از نقطه نظر سرعت در لوله‌ها به ترتیب شکل‌های ۳-ا و ۳-ب پیشنهاد شده است. این شکل‌ها با استفاده از ضوابط فنی استاندارد طراحی شبکه‌های توزیع آب (IRIVSPS (2011) و معادله فشار-دبی در گره‌ها به دست آمده است (Tabesh and Zia, 2003).

همچنین برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی شبکه‌ها از نقطه نظر افت فشار در لوله‌ها، معادله ۲ پیشنهاد شده است (Shirzad and Tabesh, 2016).

البته لازم به ذکر است که این معادله بر اساس حداقل فشار مجاز یا فشار مطلوب برابر با ۲۶ متر، بر اساس آیین‌نامه‌های طراحی (همچون نشریه ۳-۱۱۷ بازنگری اول)، ارائه شده است (۲)

$$PI_{I_i} = \begin{cases} h_{f_i} & \text{if } h_{f_i} \leq 1 \\ 1 & \text{if } 1 < h_{f_i} \leq 5 \\ \left(\frac{26 - \frac{h_{f_i} \times L_i}{1000}}{26}\right)^{0.51} & \text{if } 5 < h_{f_i} \leq \frac{26000}{L_i} \\ 0 & \text{if } h_{f_i} > \frac{26000}{L_i} \end{cases}$$

که در آن

$PI_{I_i}$  شاخص عملکرد لوله نام از منظر افت فشار،  $h_{f_i}$  مقدار افت

مصرف،  $(n+m)$  متغیر ورودی فازی حاصل می‌شود. در نتیجه  $2^{n+m}$  ترکیب از مقادیری که به متغیرهای فازی ورودی اختصاص داده شده، ایجاد می‌شود.

#### ۲-۲-۳- محاسبه متغیرهای مجهول برای سطح $\alpha$ خاص

در هر سطح  $\alpha$ ، به ازای تمامی  $2^{n+m}$  حالت از مقادیر متغیرهای ورودی، مدل تحلیل هیدرولیکی EPANET (اصلاح شده برای تحلیل HDSM) اجرا شد و برای هر کدام از متغیرهای خروجی (فشار گرهی و سرعت) در گره‌ها و لوله‌ها،  $2^{n+m}$  مقدار مختلف حاصل شد. در نهایت مقادیر حداکثر و حداقل از بین  $2^{n+m}$  مقدار به دست آمده برای فشار در هر گره و سرعت در هر لوله برای هر سطح  $\alpha$  تعیین شد. با توجه به اینکه در شبکه‌های بزرگ دارای گره‌ها و لوله‌های زیاد، تعداد اجراهای مدل تحلیل هیدرولیکی بسیار زیاد می‌شود، لذا در این نوع شبکه‌ها برای به دست آوردن حدود پایین و بالای متغیرهای شبکه نظیر فشار و سرعت از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که در این پژوهش، از معادله هیزن-ویلیامز به عنوان رابطه افت هد لوله استفاده شده است.

#### ۲-۲-۴- محاسبه مقادیر قطعی متغیرهای مجهول

پس از به دست آوردن نمودارهای تابع عضویت فازی متغیرهای مجهول (سرعت در لوله و فشار در گره)، نوبت به غیرفازی‌سازی برای محاسبه مقادیر قطعی آن‌ها می‌رسد. در این پژوهش، برای غیر فازی‌سازی توابع عضویت فازی متغیرهای خروجی، از روش مرکز ناحیه<sup>۱</sup> مطابق معادله ۱ استفاده شد (Ross 2004).

$$Z^* = \frac{\int \mu(z).zdz}{\int \mu(z)dz} \quad (1)$$

که در آن

$Z^*$  مقدار عدد قطعی متناظر تابع عضویت فازی متغیر مورد نظر و  $\mu(z)$  تابع عضویت فازی متغیر مورد نظر است.

#### ۲-۳-۳- سنجش عملکرد هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب

نظر به این که عملکرد شبکه‌های توزیع آب قابل اندازه‌گیری مستقیم نیست، لذا باید این کار با استفاده از سایر متغیرهای شبکه که

<sup>۱</sup>COA (Center of Area)



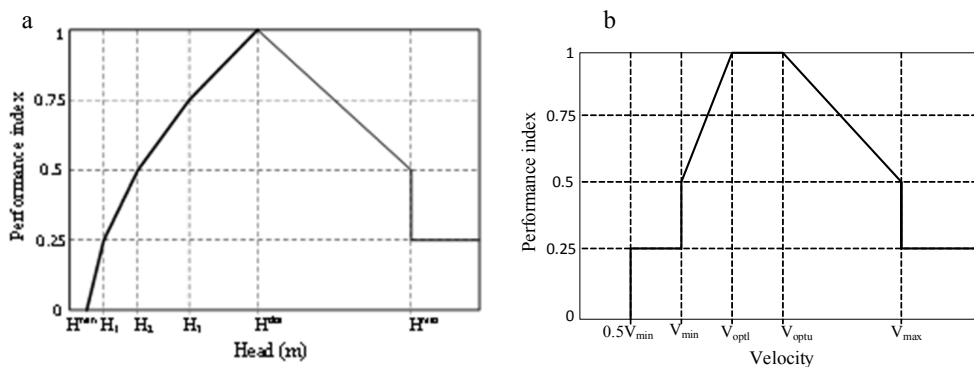


Fig. 3. Penalty curves for nodal a) pressures and b) velocity in pipes (Tabesh & Zia, 2003)  
 شکل ۳- منحنی‌های جریمه برای مقادیر (a) فشار گرهی و (b) سرعت در لوله‌ها (Tabesh & Zia 2003)

توجه به دیدگاه ارزیابی عملکرد شبکه، مانند اهمیت موضوع از دیدگاه مصرف‌کننده، اهمیت وضعیت مکانیکی هر جزء می‌تواند متفاوت در نظر گرفته شوند.  $PI_{p_i}$  و  $PI_{v_{ij}}$  عملکرد هیدرولیکی از منظر فشار در گره  $i$  و  $z$ ،  $W_i$  و  $W_j$  وزن نسبی هر گره،  $Q_i^{req}$  دبی مورد نیاز هر گره،  $NJ$  تعداد کل گره‌های مصرف شبکه و  $NJ_{31}$  تعداد گره‌های مصرف دارای فشار بیش از ۳۱ متر هستند.

طبق معادله ۳، عملکرد هیدرولیکی کل هر لوله تابعی از عملکرد متغیرهای هیدرولیکی لوله (سرعت و افت انرژی) و عملکرد گرهی دو سر آن است؛ به طوری که اگر کمتر از ۵۰ درصد گره‌های مصرف دارای فشار پایین‌تر از ۳۱ متر (حداقل فشار مجاز به اضافه ۵ متر فشار ذخیره) باشند، بخشی از عملکرد هیدرولیکی کل لوله برابر با حاصل ضرب عملکرد هیدرولیکی از منظر افت فشار لوله در عملکرد متوسط هیدرولیکی از منظر فشار گره بوده و در غیر این صورت، برابر با میانگین هندسی آن‌ها خواهد بود. علت این تمایز آن است که اگر پایین بودن عملکرد گرهی ناشی از کمبود فشار گرهی باشد، در آن صورت علاوه بر آنکه شبکه در شرایط بهره‌برداری نرمال قادر به تأمین کامل تقاضای گرهی نخواهد بود، در شرایط بحرانی شکست لوله‌ها نیز با توجه به افزایش افت انرژی، قادر به انجام وظیفه نخواهد بود.

در واقع می‌توان گفت که این شاخص علاوه بر هیدرولیک شبکه، جنبه‌های کیفی و اجرایی آن مانند هزینه خرید لوله و لوله‌گذاری را نیز در نظر می‌گیرد؛ زیرا اگر عملکرد گرهی برابر یک باشد، یعنی فشار گرهی برابر ۳۱ متر بوده و تقاضای گرهی به‌طور کامل تأمین خواهد شد و اگر عملکرد لوله‌ای برابر یک باشد، یعنی افت انرژی در محدوده یک تا پنج متر در هر یک کیلومتر طول لوله

فشار بر حسب متر در هر کیلومتر طول لوله  $\lambda m$  و  $L_i$  طول لوله  $\lambda m$  بر حسب متر است.

### ۲-۳-۲- تلفیق متغیرهای مختلف عملکرد هیدرولیکی لوله

پس از به دست آوردن عملکرد هیدرولیکی هر یک از المان‌های شبکه توزیع آب از نظر سرعت و افت فشار در لوله و فشار گره، تلفیق این شاخص‌های عملکردی به منظور محاسبه عملکرد هیدرولیکی کل هر لوله با معادله جدید ۳ انجام شد

$$(۳)$$

$$PI_{ij}^{tot} = \begin{cases} W_1 \times PI_{v_{ij}} + W_2 \times ((PI_{i_{ij}} \times PI_{p_{ij}}) + MF) & \text{if } NJ_{31} < \frac{NJ}{2} \\ W_1 \times PI_{v_{ij}} + W_2 \times \sqrt{PI_{i_{ij}} \times PI_{p_{ij}}} & \text{if } NJ_{31} \geq \frac{NJ}{2} \end{cases}$$

$$MF = \frac{NJ_{31}}{2} \times [\sqrt{PI_{i_{ij}} \times PI_{p_{ij}}} - (PI_{i_{ij}} \times PI_{p_{ij}})] \quad (۴)$$

$$PI_{p_{ij}} = \frac{W_i \times PI_{p_i} + W_j \times PI_{p_j}}{W_i + W_j} \quad (۵)$$

$$W_i = \frac{Q_i^{req}}{\sum_{i \in NJ} Q_i^{req}} \quad (۶)$$

که در معادلات بالا

$PI_{ij}^{tot}$  عملکرد هیدرولیکی کل لوله  $ij$ ،  $PI_{v_{ij}}$  عملکرد هیدرولیکی از منظر سرعت در لوله  $ij$ ،  $PI_{i_{ij}}$  عملکرد هیدرولیکی از منظر افت فشار در لوله  $ij$ ،  $PI_{p_{ij}}$  عملکرد متوسط هیدرولیکی از منظر فشار در لوله  $ij$  و  $W_1$  و  $W_2$  اهمیت نسبی هر یک از عملکردهای مفروض که با





$$V_{ij} = \frac{\pi D_{ij}^2 L_{ij}}{4} \quad (9)$$

که در آن

$V_{ij}$ ،  $D_{ij}$  و  $L_{ij}$  به ترتیب حجم، قطر و طول لوله  $ij$  بوده و NP تعداد کل لوله‌های شبکه است (Tabesh, 2016).

### ۳- مطالعه موردی

برای ارزیابی روش پیشنهادی در این پژوهش از دو شبکه توزیع آب استفاده شد. مورد اول، شبکه توزیع آب ارائه شده توسط (Revelli and Ridolfi, 2002) است (شکل ۴-ا). این شبکه دارای ۵ لوله و ۴ گره است که در آن گره ۱ مخزن بوده و سایر گره‌ها، گره‌های مصرف هستند. مورد دوم، یک شبکه دو مخزنه با ۹ حلقه، ۲۶ گره و ۳۴ لوله با ضریب زبری هیزن-ویلیامز ۱۳۰ است که اولین بار توسط (Kadu et al., 2008) ارائه شده است (شکل ۴-ب). در این شبکه، گره‌های ۱ و ۲ مخزن بوده و سایر گره‌ها، گره‌های مصرف هستند. لازم به ذکر است که در شکل ۴-ب، نیازهای گرهی بر حسب مترمکعب بر دقیقه هستند. شبکه دوم توسط (Haghighi et al., 2011) بهینه‌سازی شده و قطر بهینه لوله‌های آن برای رسیدن به هزینه کمینه به دست آمده است. در پژوهش حاضر نیز از این مقادیر بهینه قطر لوله استفاده شد.

### ۴- نتایج و بحث

مقادیر به دست آمده برای حدود پایین و بالا و یا به عبارتی تکیه‌گاه توابع عضویت فازی متغیرهای تقاضای گرهی و ضریب زبری لوله برای شبکه دو حلقه‌ای، در جدول ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر حداکثر حد بالا و حداقل حد پایین مربوط به ضریب زبری لوله با توجه به جداول ارائه شده برای ضریب زبری لوله در مراجع، به ترتیب به مقادیر ۱۵۰ و ۶۰ محدود شده است (Taebi and Chamani, 2008).

پس از به دست آوردن توابع عضویت فازی مثلثی مربوط به متغیرهای ورودی (ضریب زبری لوله‌ها و تقاضای گرهی)، اثرات توأم عدم قطعیت این متغیرها بررسی شده و توابع عضویت فازی مثلثی متغیرهای خروجی (فشار گرهی و سرعت در لوله) مورد نیاز برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی اجزای شبکه محاسبه شد. حدود

است که نشان دهنده این است که اولاً انتخاب قطرها به صورت اقتصادی صورت گرفته و ثانیاً سرعت جریان در محدوده مجاز بوده و مشکلی از نظر سن آب و کیفیت آن و همچنین مومنتم جریان وجود نخواهد داشت. بنا به دلایلی که گفته شد فشارهای گرهی مجاز به تنهایی نمی‌توانند نمایانگر عملکرد اجزای شبکه باشند، بلکه افت انرژی در طول لوله‌ها است که مشخص می‌کند که آیا اجزای شبکه در مواقع بحرانی قابل اطمینان است یا نه و آیا شبکه می‌تواند در مواقع شکست لوله‌ها، نیازهای گرهی را با کمیت و کیفیت مناسب تأمین کند یا نه (Shirzad and Tabsh, 2016).

### ۲-۳-۳- محاسبه عملکرد هیدرولیکی کل شبکه

به منظور دست‌یابی به شاخص عملکرد کل شبکه توزیع آب باید از توابع تعمیم که شاخص عملکرد المان‌های شبکه را به کل شبکه تعمیم می‌دهند، استفاده شود. بیان ریاضی توابع تعمیم در حالت کلی به صورت زیر است

$$PI_N = W(PI_j) \quad (7)$$

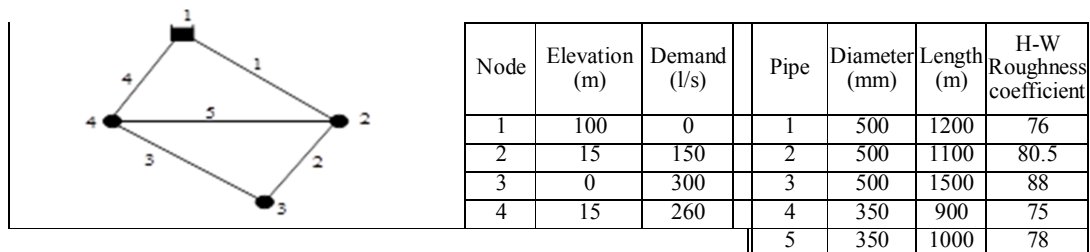
که در آن

$PI_N$  مقدار شاخص عملکرد هیدرولیکی کل شبکه،  $PI_j$  شاخص عملکرد المان شماره  $j$  ام شبکه (لوله یا گره) و  $W$  عملکردی است که شاخص عملکرد المان‌های شبکه را به کل شبکه تعمیم می‌دهد (تابع تعمیم).

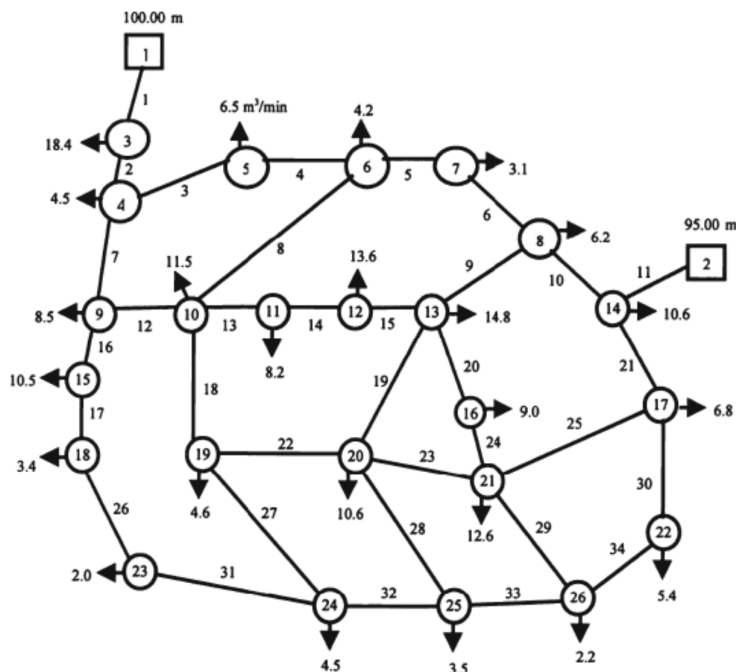
توابع تعمیم مختلفی برای این منظور می‌توان در نظر گرفت، از قبیل تابع میانگین (تابعی که میانگین مقادیر یا متغیرها را حساب می‌کند)، تابع حداکثر و تابع حداقل (تابعی که حداکثر یا حداقل مقادیر متغیرها را بیان می‌کند) و یا توابع دیگر. در این راستا با این استدلال که سهم هر یک از شاخص‌های عملکرد به دست آمده در مرحله قبل در شاخص عملکرد کل شبکه باید به اندازه سهم المان‌های مربوطه در کل شبکه باشد، تا مقدار نهایی شاخص عملکرد محاسبه شده بتواند عملکرد واقعی شبکه را بیان کند، تابع  $W$  به صورت معادله ۸ و ۹ در نظر گرفته شده است

$$PI_N = W(PI_{ij}) = \frac{\sum_{j \in NP} V_{ij} \times PI_{ij}^{tot}}{\sum_{j \in NP} V_{ij}} \quad (8)$$





(a) 2-loops network with 5 pipes and 4 nodes (Revelli and Ridolfi, 2002)



(b) 9-loop network with 34 pipes and 26 nodes (Kadu et al., 2008)

Fig. 4. Schematic view of the studied networks

شکل ۴- نمای شماتیک شبکه‌های مورد بررسی

جدول ۱- حدود بالا و پایین ضریب زبری لوله و تقاضای گرهی شبکه دو حلقه‌ای

Table 1. Minimum and maximum values of pipe roughness coefficients and demand nodes in 2-loop network

Pipe	Roughness coefficient	Minimum value of fuzzy roughness coefficient	Maximum value of fuzzy roughness coefficient	Demand node	Demand (l/s)	Minimum value of fuzzy demand node (l/s)	Maximum value of fuzzy demand node (l/s)
1	76	62	134	2	150	127	171
2	80.5	60	150	3	300	278	318
3	88	60	150	4	260	238	278
4	75	73	79				
5	78	70	82				



است. زیرا در روش ارائه شده در این پژوهش، تأثیر عدم قطعیت متغیرهای ورودی (زبری و تقاضای گرهی)، بر خلاف پژوهش‌های قبل که به صورت فرضی لحاظ شده بودند، مدل شده است و اثرات آن‌ها در متغیرهای خروجی نیز نمود پیدا کرده است.

نمودارهای توابع عضویت فازی متغیرهای خروجی با استفاده از معادله ۱ غیرفازی شده و با استفاده از منحنی جریمه تعریف شده برای هر متغیر، عملکرد آن جزء از شبکه محاسبه شد. سپس با

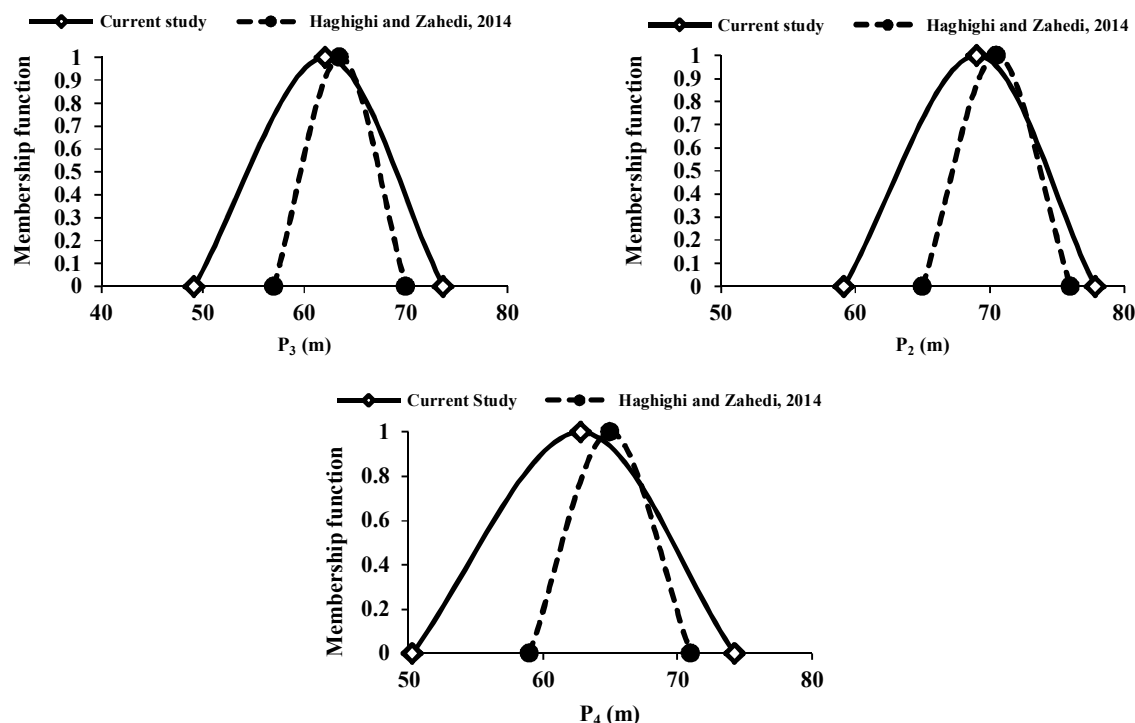
بالا و پایین توابع عضویت فازی متغیرهای فشار گرهی و سرعت در لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای در جدول ۲ ارائه شده است. فرم توابع عضویت به دست آمده برای متغیرهای فشار گرهی و دبی لوله‌ها در مقایسه با نتایج پژوهش (Haghighi and Zahedi, 2014).

در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل‌های ۵ و ۶ ملاحظه می‌شود، توابع عضویت فشار گرهی و دبی لوله در شبکه دو حلقه‌ای دارای محدوده وسیع‌تری از عدم قطعیت

جدول ۲- حدود بالا و پایین فشار گرهی و سرعت در لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای

Table 2. Minimum and maximum values of nodal pressures and velocity in pipes of the 2-loop network

Pipe	Velocity (m/s)	Minimum value of fuzzy velocity (m/s)	Maximum value of fuzzy velocity (m/s)	Demand node	Pressure (m)	Minimum value of fuzzy pressure (m)	Maximum value of fuzzy pressure (m)
1	2.42	2.06	2.62	2	69.03	59.15	77.85
2	1.20	0.74	1.50	3	62.05	49.15	73.67
3	0.33	0.001	0.72	4	62.79	50.26	74.26
4	2.46	1.98	2.89				
5	0.92	0.40	1.36				



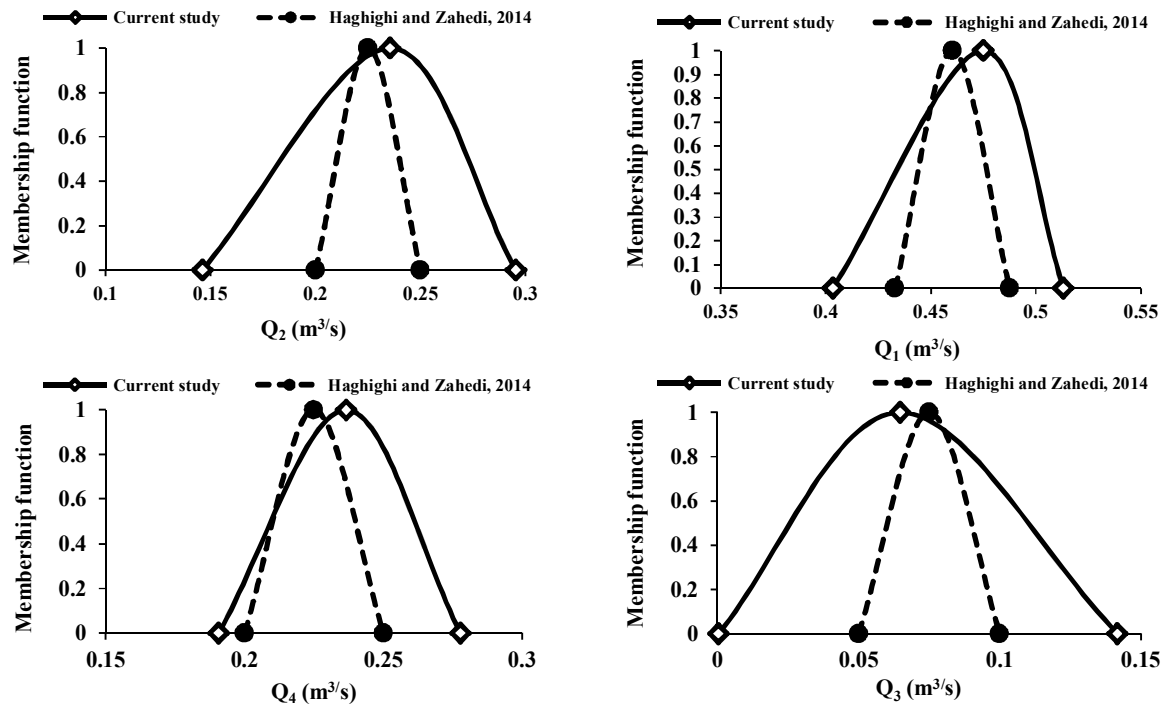
شکل ۵- تأثیر عدم قطعیت ضریب زبری لوله در مقادیر فشار گره‌های شبکه دو حلقه‌ای

Fig. 5. Impact of the pipe roughness uncertainty on the nodal pressure values in the 2-loop network



گرهی و ایجاد افت کمتر در شبکه از دیدگاه مصرف‌کننده است. شاخص‌های عملکرد محاسبه شده برای گره‌ها و لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای، در جدول ۳ نمایش داده شده است. در نهایت عملکرد کل شبکه دو حلقه‌ای با استفاده از معادله ۸ که حاصل ضرب وزن نسبی هر لوله در عملکرد کل هر لوله است، برابر ۰/۴۴ محاسبه شد. در این معادله، وزن نسبی هر لوله برابر با نسبت حجم هر لوله بر مجموع حجم همه لوله‌های شبکه است.

استفاده از مقادیر عملکرد گرهی از منظر فشار و معادله ۵، عملکرد لوله‌ای متوسط از نظر فشار محاسبه شد. در نهایت عملکرد کل لوله با استفاده از معادله ۳ به دست آمد. در این معادله برای محاسبه عملکرد کل هر لوله،  $W_1$  که اهمیت نسبی عملکرد لوله‌ای از نظر سرعت است، برابر ۰/۳ و  $W_2$  که اهمیت نسبی عملکرد لوله‌ای از منظر افت فشار و عملکرد لوله‌ای متوسط از نظر فشار است، برابر با ۰/۷ در نظر گرفته شد. علت این انتخاب اهمیت بیشتر تأمین فشار



شکل ۶- تأثیر عدم قطعیت ضریب زبری در مقادیر دبی لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای

Fig. 6. Impact of the pipe roughness uncertainty on the pipe discharge values in the 2-loop network

جدول ۳- شاخص‌های عملکرد محاسبه شده برای گره‌ها و لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای

Table 3. Performance indices calculated for nodes and pipes in the 2-loop network

Demand node	Nodal performance from pressure point of view	Pipe	Relative weight of pipe	Pipe performance from velocity point of view	Pipe performance from energy loss point of view	Average pipe performance from pressure point of view	Total performance of pipe
2	0.25	1	0.25	0.25	0.61	0.25	0.35
3	0.25	2	0.23	1	0.38	0.25	0.52
4	0.25	3	0.32	0.55	0.62	0.25	0.44
		4	0.09	0.25	0.36	0.25	0.29
		5	0.10	1	0.87	0.25	0.63



روی مقادیر دبی لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای نیز در شکل ۸ نشان داده شده است.

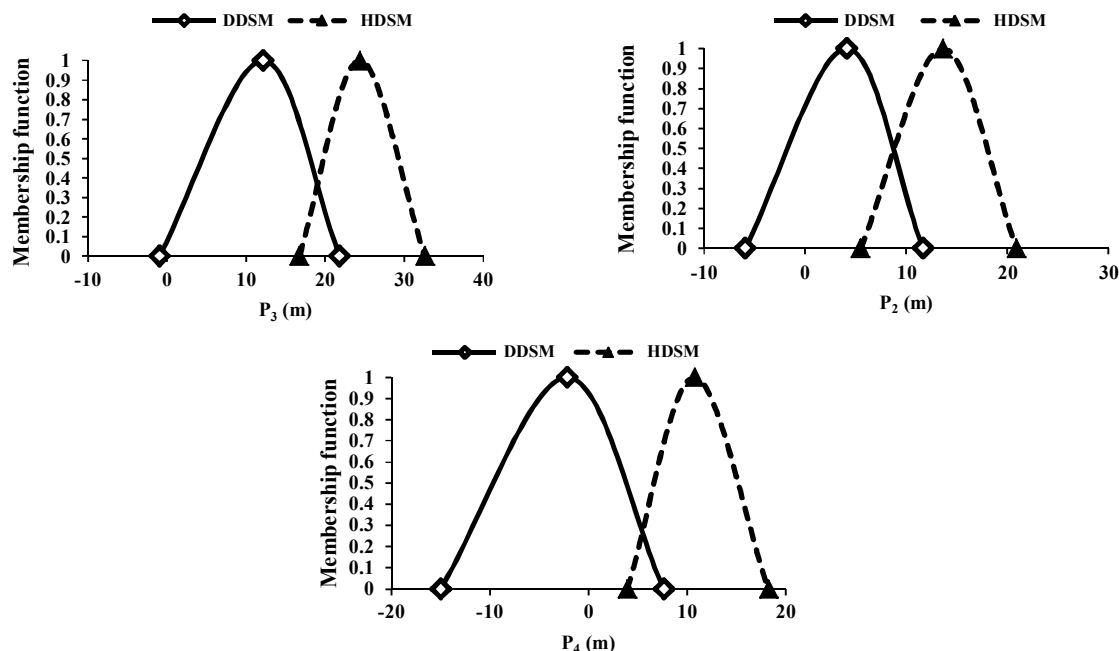
به دلیل تفاوت فشارهای گرهی شبکه دو حلقه‌ای به دست آمده از دو روش HDSM و DDSM، توابع عضویت فازی دبی در لوله‌ها نیز دارای مقادیر متفاوت است که در روش HDSM توابع عضویت دبی دارای بازه گسترده‌تری است که نشان دهنده عدم قطعیت بیشتر این توابع است.

در جدول ۴ مقادیر شاخص‌های عملکرد گره‌ها و لوله‌ها در شبکه دو حلقه‌ای با استفاده از روش‌های HDSM و DDSM ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، عملکرد گرهی مربوط به گره‌های ۲ و ۴ در حالت استفاده از روش DDSM دارای مقدار صفر بود که به ظاهر ناشی از منفی بودن فشار در این گره‌ها است. اما در حقیقت مقادیر فشار در این گره‌ها منفی نبوده و حتی عملکرد محاسبه شده در حالت استفاده از روش HDSM دارای مقادیر قابل قبول است.

با بررسی نتایج مربوط به عملکرد لوله از نظر سرعت، افت انرژی و فشار، در مجموع عملکرد تمامی لوله‌ها که با استفاده از

همانگونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، به دلیل اینکه مقدار فشار در گره‌های شبکه دو حلقه‌ای بیش از  $H_{max}$  یعنی ۵۰ متر است، با توجه به نمودار ارزیابی عملکرد از نظر فشار (شکل ۳)، عملکرد گرهی از نظر فشار برای تمامی گره‌ها برابر ۰/۲۵ است. همچنین مقدار عملکرد کل هر لوله تنها برای لوله‌های شماره ۲ و ۵، در حد متوسط بوده و سایر لوله‌ها دارای عملکرد ضعیفی می‌باشند.

در این پژوهش روش HDSM ابزار اصلی برای شبیه‌سازی شبکه بود. به منظور مقایسه نتایج روش HDSM و DDSM، شبکه دو حلقه‌ای با استفاده از روش DDSM نیز شبیه‌سازی شد. با توجه به این که به علت بالا بودن تراز مخزن این شبکه (۱۰۰ متر)، نتایج حاصل از این دو روش مشابه یکدیگر می‌شد، لذا برای انجام این مقایسه، تراز مخزن ۵۰ متر فرض شد. شکل ۷ نتایج کار را نشان می‌دهد. طبق این شکل توابع عضویت فازی مربوط به فشار در گره‌های شبکه دو حلقه‌ای که با استفاده از روش DDSM به دست آمده است، دارای مقادیر فشار منفی و از لحاظ مفهومی بی‌معناست. در نتیجه می‌توان گفت که استفاده از روش HDSM منجر به حصول نتایج منطقی و دقیق‌تر می‌شود. تأثیر استفاده از روش HDSM بر



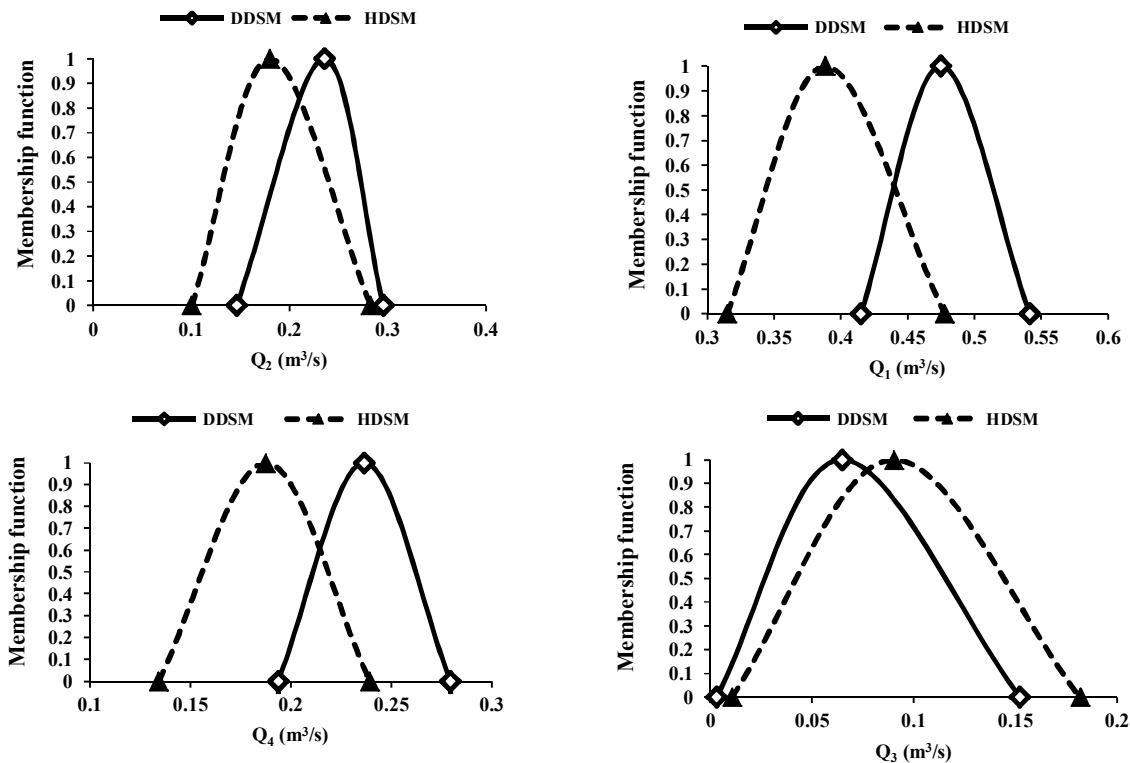
شکل ۷- تأثیر نوع تحلیل هیدرولیکی و داده‌های دارای عدم قطعیت بر فشار گره‌های شبکه دو حلقه‌ای

Fig. 7. Impact of hydraulic analysis type and the data with uncertainty on nodal pressures in the 2-loop network



که تراز مخزن برابر ۱۰۰ متر فرض شده بود، بهبود پیدا کرده که نشان از اهمیت انتخاب صحیح تر از مخزن برای دست‌یابی به سطوح بالای عملکرد کل شبکه دارد. برای ارزیابی بیشتر روش ارائه شده در این پژوهش، تأثیر عدم

روش HDSM حاصل شد، دارای مقادیر واقعی‌تر بوده و نسبت به مقادیر عملکرد به‌دست آمده از روش DDSM دارای ارتقاء و بهبود نیز بودند، بنابراین در مجموع عملکرد کل هر لوله نیز افزایش یافت. همچنین عملکرد کل شبکه دو حلقه‌ای در این حالت نسبت به حالتی



شکل ۸- تأثیر نوع تحلیل هیدرولیکی و داده‌های دارای عدم قطعیت بر روی دبی لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای

Fig. 8. Impact of hydraulic analysis type and the data with uncertainty on pipe discharges in the 2-loop network

جدول ۴- عملکرد گره‌ها و لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای با استفاده از روش‌های DDSM و HDSM (تراز مخزن برابر ۵۰ متر)

Table 4. Performance of nodes and pipes in the 2-loop network using HDSM and DDSM methods (reservoir level=50 m)

Demand node	Nodal performance from pressure point of view		Pipe	Pipe performance from velocity point of view		Pipe performance from energy loss point of view		Average pipe performance from pressure point of view		Total performance of pipe	
	DDSM	HDSM		DDSM	HDSM	DDSM	HDSM	DDSM	HDSM	DDSM	HDSM
2	0	0.56	1	0.25	0.69	0	0.40	0	0.56	0.08	0.37
3	0.48	0.86	2	1	1	0.85	1	0.32	0.76	0.49	0.83
4	0	0.47	3	0.56	0.68	0.55	0.94	0.26	0.68	0.27	0.65
			4	0.25	0.71	0	0.26	0	0.47	0.08	0.30
			5	1	0.90	0.87	1	0	0.50	0.30	0.62
Total performance of network										0.26	0.59



محاسبه می‌شد. طبق جدول ۵، متوسط دامنه تغییرات فشار در گره‌های مصرف شبکه ۹ حلقه‌ای حدود ۱۲/۹ متر است. متوسط دامنه تغییرات سرعت جریان در لوله‌ها نیز حدود ۱/۸ متر بر ثانیه است.

در شکل ۹ میزان عدم قطعیت موجود در مقادیر فشار گرهی و سرعت جریان در لوله‌های شبکه ۹ حلقه‌ای نشان داده شده است. طبق این شکل و همچنین مطابق با جدول ۵، میزان عدم قطعیت در مقادیر سرعت جریان لوله‌ها بیشتر از میزان عدم قطعیت فشارهای گرهی است. یعنی متغیر سرعت جریان لوله‌ها بیشتر از متغیر فشار گرهی تحت تأثیر عدم قطعیت موجود در متغیرهای ورودی تحلیل هیدرولیکی قرار می‌گیرد. نکته دیگر در جدول ۵ و شکل ۹ این است که عدم قطعیت موجود در متغیرهای ورودی (تقاضای گرهی و زبری لوله‌ها) کمتر از عدم قطعیت موجود در متغیرهای خروجی تحلیل هیدرولیکی (فشار گرهی و سرعت جریان) است. به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر کم عدم قطعیت در متغیرهای ورودی تحلیل هیدرولیکی می‌تواند منجر به عدم قطعیت بالایی در نتایج تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب شود. شبکه ۹ حلقه‌ای نیز از این قضیه مستثنی نیست. نکته آخر این‌که به‌علت وجود عدم قطعیت در مقادیر متغیرهایی نظیر تقاضای گرهی و زبری لوله‌ها، احتمال عدم ارضای محدودیت‌های طراحی در دوره بهره‌برداری وجود دارد. برای نمونه طبق شکل ۹-b حدود پایین و بالای سرعت جریان در برخی لوله‌های شبکه ۹ حلقه‌ای خارج از محدوده مجاز سرعت است.

قطعیت داده‌ها بر نتایج تحلیل هیدرولیکی و شاخص عملکرد شبکه ۹ حلقه‌ای نیز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به بزرگ بودن این شبکه و تعداد زیاد گره‌ها و لوله‌های آن، نیاز به  $(۲۵۸ = \text{تعداد گره‌های مصرف} + \text{تعداد لوله‌ها})$  بار اجرای مدل تحلیل هیدرولیکی بود که عملاً غیرممکن بوده و دارای هزینه محاسباتی بسار بالایی است. لذا برای تعیین حدود پایین و بالا و یا به عبارتی تکیه‌گاه توابع عضویت پارامترهای فشار گرهی و سرعت در شبکه ۹ حلقه‌ای، از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک استفاده شد. تابع هدف، قیود و متغیرهای تصمیم در مدل بهینه‌سازی مشابه پژوهش (Haghighi and Zahedi Asl, 2014) در نظر گرفته شد. مقدار پارامترهای الگوریتم ژنتیک شامل:  $۱۰ = \text{اندازه جمعیت}$ ،  $۱۰۰ = \text{تعداد نسل}$ ،  $(\text{تعداد کل نسل‌ها} / \text{شماره نسل}) = ۱ = \text{نرخ جهش}$  و  $۰/۵ = \text{نرخ تزویج}$  بود.

پس از غیرفازی‌سازی توابع عضویت متغیرهای فشار گرهی و سرعت، شاخص‌های عملکرد برای گره‌ها و لوله‌های شبکه ۹ حلقه‌ای محاسبه شد که مقدار آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

شاخص عملکرد کل شبکه ۹ حلقه‌ای نیز برابر با  $۰/۵۶$  به‌دست آمد. این در حالی است که اگر از مقادیر حد پایین فشار گرهی و حد بالای سرعت در لوله‌ها برای محاسبه شاخص عملکرد کل شبکه ۹ حلقه‌ای استفاده می‌شد.

مقدار شاخص مذکور برابر با  $۰/۲۳$  به‌دست می‌آمد. در صورت استفاده از مقادیر حد بالای فشار گرهی و حد پایین سرعت در لوله‌ها نیز مقدار شاخص عملکرد کل این شبکه برابر با  $۰/۱۹$

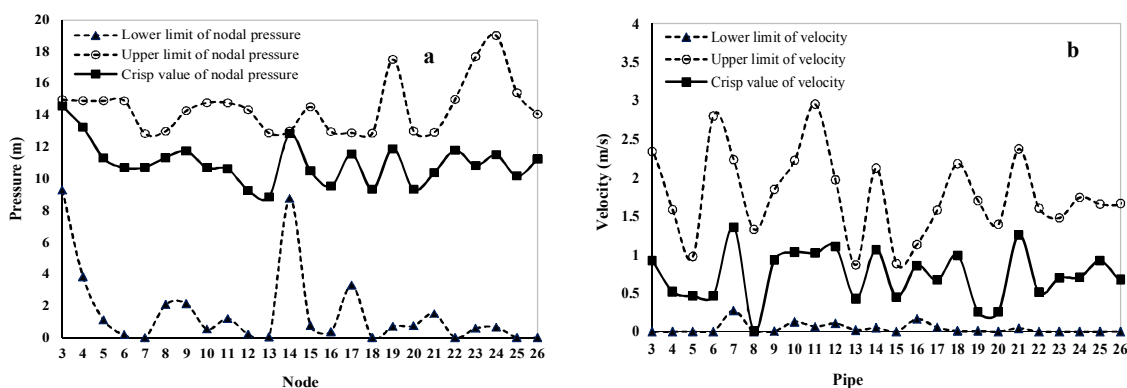


Fig. 9. Uncertainty of pipe velocities and nodal pressures in the 9-loop network

شکل ۹- عدم قطعیت موجود در مقادیر سرعت جریان لوله‌ها و فشارهای گرهی شبکه نه‌حلقه‌ای



جدول ۵- متغیرهای ورودی و خروجی تحلیل هیدرولیکی شبکه نه حلقه‌ای به همراه شاخص‌های عملکرد محاسبه شده برای گره‌ها و لوله‌ها

**Table 5.** Input and output variables of the hydraulic analysis of the 9-loop network along with the performance indices calculated for nodes and pipes

Demand node	Demand (l/s)	The maximum demand (l/s)	The minimum demand (l/s)	Pressure (m)	The maximum pressure (m)	The minimum pressure (m)	Nodal performance from pressure point of view ( $PI_p$ )	Pipe	Hazen-Williams roughness coefficient	The maximum roughness coefficient	The minimum roughness coefficient	Velocity (m/s)	The maximum velocity (m/s)	The minimum velocity (m/s)	The relative weight of pipe ( $V_{ij}$ )	Pipe performance from velocity point of view ( $PI_{v_{ij}}$ )	Pipe performance from energy loss point of view ( $PI_{l_{ij}}$ )	Average pipe performance from pressure point of view ( $PI_{p_{ij}}$ )	Total performance of pipe ( $PI_{ij}^{total}$ )
3	306	1000	0	14.57	14.99	9.29	0.56	1	130	150	60	1.35	3.11	0.65	0.06	0.84	0.97	0.56	0.63
4	75	330	0	13.26	14.92	3.82	0.49	2	130	150	60	1.33	2.38	0.37	0.13	0.94	1.00	0.55	0.66
5	108	400	0	11.29	14.91	1.11	0.42	3	130	150	60	0.92	2.34	0	0.03	1.00	1.00	0.44	0.61
6	70	250	0	10.68	14.91	0.18	0.39	4	130	150	60	0.52	1.58	0	0.02	0.86	1.00	0.41	0.54
7	150	1250	0	10.72	12.84	0	0.36	5	130	150	60	0.46	0.98	0	0.01	0.68	1.00	0.38	0.47
8	300	250	0	11.33	12.99	2.09	0.41	6	130	150	60	0.47	2.8	0	0.01	1.00	1.00	0.39	0.57
9	142	300	0	11.74	14.29	2.13	0.43	7	130	150	60	1.36	2.23	0.27	0.10	0.96	1.00	0.45	0.60
10	192	340	50	10.68	14.79	0.54	0.39	8	130	150	60	0.01	1.33	0	0.01	0.54	0.04	0.39	0.17
11	136	280	0	10.62	14.77	1.19	0.40	9	130	150	60	0.93	1.85	0.01	0.04	1.00	1.00	0.34	0.54
12	226.67	430	80	9.26	14.34	0.21	0.35	10	130	150	60	1.03	2.23	0.13	0.04	1.00	1.00	0.47	0.63
13	246	510	60	8.86	12.88	0.03	0.31	11	130	150	60	1.02	2.95	0.07	0.04	0.97	0.98	0.51	0.64
14	176	1700	0	12.82	12.99	8.78	0.51	12	130	150	60	1.10	1.97	0.11	0.07	1.00	1.00	0.41	0.59
15	175	280	70	10.49	14.53	0.76	0.39	13	130	150	60	0.43	0.86	0.02	0.04	0.64	0.40	0.40	0.30
16	150	370	0	9.53	12.96	0.36	0.34	14	130	150	60	1.07	2.12	0.05	0.02	1.00	1.00	0.37	0.56
17	113	330	0	11.55	12.89	3.3	0.42	15	130	150	60	0.45	0.88	0	0.01	0.65	1.00	0.33	0.42
18	56	150	0	9.34	12.87	0	0.33	16	130	150	60	0.86	1.13	0.16	0.04	0.95	1.00	0.41	0.57
19	76	215	0	11.89	17.51	0.7	0.45	17	130	150	60	0.67	1.58	0.05	0.02	0.94	1.00	0.37	0.54
20	176	260	20	9.33	13	0.74	0.34	18	130	150	60	0.99	2.18	0.01	0.02	1.00	1.00	0.41	0.59
21	210	310	45	10.38	12.92	1.51	0.37	19	130	150	60	0.26	1.70	0.01	0.00	0.76	0.58	0.32	0.36
22	90	1150	0	11.8	14.99	0	0.42	20	130	150	60	0.26	1.39	0	0.00	0.68	0.40	0.32	0.29
23	33	80	0	10.82	17.69	0.58	0.43	21	130	150	60	1.26	2.37	0.04	0.06	0.99	1.00	0.47	0.63
24	75	135	20	11.51	19.02	0.65	0.46	22	130	150	60	0.51	1.60	0	0.01	0.86	1.00	0.37	0.52
25	58	260	0	10.17	15.42	0	0.38	23	130	150	60	0.70	1.48	0	0.04	0.92	0.71	0.36	0.45
26	36	220	0	11.25	14.06	0	0.39	24	130	150	60	0.71	1.74	0	0.02	0.99	1.00	0.36	0.55
								25	130	150	60	0.92	1.66	0	0.10	1.00	0.95	0.39	0.56
								26	130	150	60	0.68	1.66	0	0.01	0.95	1.00	0.36	0.54
								27	130	150	60	0.78	1.85	0	0.01	1.00	1.00	0.46	0.62
								28	130	150	60	0.55	2.18	0	0.00	1.00	1.00	0.35	0.54
								29	130	150	60	0.44	1.63	0	0.03	0.83	1.00	0.38	0.51
								30	130	150	60	0.83	2.90	0	0.01	1.00	1.00	0.42	0.59
								31	130	150	60	0.43	1.56	0	0.01	0.80	1.00	0.45	0.56
								32	130	150	60	0.30	1.34	0	0.01	0.69	1.00	0.43	0.50
								33	130	150	60	0.36	1.45	0	0.01	0.74	0.15	0.39	0.26
								34	130	150	60	0.13	0.79	0	0.01	0.25	0.16	0.41	0.12





## ۵- نتیجه‌گیری

می‌تواند منجر به عدم قطعیت بالایی در نتایج تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب شود. همچنین متغیر سرعت جریان در لوله‌ها بیشتر از متغیر فشار گرهی تحت تأثیر عدم قطعیت موجود در متغیرهای ورودی تحلیل هیدرولیکی قرار می‌گیرد.

با توجه به نیاز به وجود ابزارهای سنجش عملکرد شبکه‌های توزیع آب برای شناخت رفتار و بهبود بهره‌برداری و مدیریت فنی شبکه‌ها، در این پژوهش متغیرهای فشار گرهی، سرعت و افت انرژی در لوله‌ها به‌عنوان نشانگری برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی اجزای شبکه معرفی شد. به‌علاوه معادله‌ای جدید برای تلفیق این متغیرها و به‌دست آوردن شاخصی برای ارزیابی عملکرد کل لوله‌ها و محاسبه اندیس عملکرد هیدرولیکی کل شبکه معرفی شد. همچنین نتایج به‌دست آمده نشان داد که استفاده از روش HDSM در ارزیابی عملکرد هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب در طول دوره بهره‌برداری منجر به نتایج منطقی‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت می‌شود.

در این پژوهش به بررسی عملکرد شبکه‌های توزیع آب، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زیر ساخت‌های شهری پرداخته شد. با توجه به مجموعه عوامل و متغیرهای مؤثر در طراحی و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب، می‌توان دریافت که اکثر این متغیرها به‌طور دقیق و قطعی قابل محاسبه و دستیابی نیستند. در نتیجه بحث عدم قطعیت به‌عنوان یک موضوع جدانشدنی در زمینه محاسبات شبکه نیز باید مد نظر قرار گیرد. در این پژوهش با استفاده از مفهوم منطق فازی و به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و با تعریف توابع عضویت فازی متغیرهای ورودی (تقاضای گرهی و ضریب زبری لوله) و در نظر گرفتن تأثیر توأم عدم قطعیت این متغیرها، تحلیل هیدرولیکی شبکه انجام گرفت و توابع عضویت متغیرهای خروجی و یا به‌عبارت دیگر، محدوده تغییرات متغیرهای خروجی شبکه در طول دوره بهره‌برداری محاسبه شد. طبق نتایج به‌دست آمده مقادیر کم عدم قطعیت در متغیرهای ورودی تحلیل هیدرولیکی

## References

- Ayyub, B.M. 1998. *Uncertainty analysis in engineering and sciences: Fuzzy logic statistics and neural network approach*, Kluwer Academic Pub., USA.
- Babayan, A.V., Kapelan, Z., Savic, D.A. & Walters, G.A. 2005. Least-cost design of water distribution networks under uncertainty. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(5), 375-382.
- Bao, Y. & Mays, L.W. 1990. Model for water distribution system reliability. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(9), 1119-1137.
- Bozorg-Haddad, O., Adams, B.J. & Marino, M.A. 2008. Optimum rehabilitation strategy of water distribution systems using the HBMO algorithm. *Journal of Water Supply Research and Technology*, 57(5), 337-350.
- Branisavljevic, N. & Ivetic, M. 2006. Fuzzy approach in the uncertainty analysis of the water distribution network of Becej, *Civil Engineering and Environmental Systems*, 23(3), 221-236.
- Cullinane, M.J., Lansey, K.E. & Mays, L.W. 1992. Optimization availability-based design of water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(3), 420-441.
- Gupta, R. & Bhave, P.R. 2007. Fuzzy parameters in pipe network analysis. *Civil Engineering and Environmental System*, 24(1), 33-54.
- Haghighi, A., Samani, H.M.V. & Samani, Z.M.V. 2011. GA-ILP method for optimization of water distribution networks. *Journal of Water Resources Management*, 25(7), 1791-1808.
- Haghighi, A. & Zahedi Asl, A. 2014. Uncertainty analysis of water supply network using the fuzzy set theory and NSGA-II. *Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 32, 270-282.
- Hudson, W.D. 1966. Studies of distribution system capacity in seven cities. *Journal of American Water Works Association*, 58(2), 157-164.
- Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision (IRIVPSPS). 2011. *Guidelines for design of urban and rural water supply and distribution systems*, Report No. 117-3 (First Revision),



- Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision Press, Iran. (In Persian)
- Kadu, M.S., Gupta, R. & Bhawe, P.R. 2008. Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(2), 147-160.
- Kapelan, Z., Savic, D.A. & Walters, G.A. 2005. Multiobjective design of water distribution systems under uncertainty. *Water Resources Research*, 41(11), 11407-11415.
- Karmakar, S. 2011. Propagation of uncertainty in water distribution systems modeling. *Desalination and Water Treatment*, 33(13), 107-117.
- Revelli, R. & Ridolfi, L. 2002. Fuzzy approach for analysis of pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 93-101.
- Ross, T. 2004. *Fuzzy logic with engineering applications*, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley & Sons, NY.
- Sabzkouhi A.M. & Haghghi A. 2016. Uncertainty analysis of pipe-network hydraulics using a many-objective particle swarm optimization, *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001148.
- Seifollahi-Aghmiuni, S., Bozorg-Haddad, O., Omid, M.H. & Marino, M.A. 2013a. Effect of pipe roughness on water distribution network performance during its operational period. *Water Resource Management*, 27(5), 1581-1599.
- Seifollahi-Aghmiuni, S., Bozorg-Haddad, O. & Marino, M.A. 2013b. Water distribution network risk analysis under simultaneous consumption and roughness uncertainties. *Water Resource Management*, 27(7), 2595-2610.
- Shirzad, A., Tabesh, M., Farmani, R. & Mohammadi, M. 2013. Pressure-discharge relations with application in 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*, 65(5), 384-395.
- Spiliotis, M. & Tsakiris, G. 2012. Water distribution network analysis under fuzzy demands, *Civil Engineering and Environmental Systems*, 29(2), 107-122.
- Tabesh, M., Tanyimboh, T.T. & Burrows, R. 2002. Head driven simulation of water supply networks. *Engineering, Transactions A: Basics*, 15(1), 11-22.
- Tabesh, M. & Zia, A. 2003. Dynamic management of water distribution networks based on hydraulic performance analysis of the system. *Water Science and Technology*, 13(1), 95-102.
- Tabesh, M. & Dolatkhahi, A. 2006. Effects of pressure dependent analysis on quality performance assessment of water distribution networks. *Iranian Journal of Science and Technology*, 30(B1), 119-128.
- Tabesh, M. 2016. *Advanced modeling of water distribution networks*, 1<sup>st</sup> Ed., University of Tehran Press, Tehran, Iran. (In Persian).
- Taebi, A. & Chamani, M.R. 2008. *Water distribution systems*, 2<sup>nd</sup> Edition, Isfahan University of Technology Press, Isfahan, Iran. (In Persian)
- Todini, E. 2000. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(3), 115-122.
- Tung, Y.K. 1996. *Uncertainty and reliability analysis*, Edited by L. Mays, McGraw-Hill, New York.
- Xu, C. & Goulter, I.C. 1996. Uncertainty analysis of water distribution networks. Tickle, K.S., Goulter, I.C., Wasimi S.A. & Bouchart, F. (Eds). *In Stochastic hydraulics 96, Proceeding of the 7th IAHR International Symposium*, Balkema, Rotterdam, Netherland.