

طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب تحت عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و استحکام بخشی

سمیرا گوهری مقدم^۱، مجید رحیم پور^{۲*}، کورش قادری^۳ و محمد مهدی احمدی^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲

DOI: 10.22103/nrswe.2023.20470.1018

چکیده

از موارد رایج عملکرد نامطلوب شبکه‌های توزیع آب، عدم قطعیت در تقاضای آب برنامه‌ریزی شده و تغییرات در مقادیر زبری لوله‌ها است. در این تحقیق مدلی برای بهینه‌سازی شبکه‌هایی که اجرا شده‌اند ولی نیاز به استحکام بخشی تحت شرایط عدم قطعیت دارند، توسعه داده شده است. در این مدل، شبیه‌ساز EPANET با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک در محیط برنامه‌نویسی متلب تلفیق شده است. به این صورت که ابتدا با استفاده از مفهوم منطق فازی، توابع عضویت فازی پارامترهای ورودی (تقاضای گرهی و ضریب زبری لوله) ایجاد شده است، سپس با در نظر گرفتن ارتباط بین تقاضاها و هد فشاری مورد نیاز گره‌ها و استفاده از روش تأثیر (Gupta and Bhawe 2007) مدل بهینه‌سازی فازی به مدل قطعی تبدیل شده و نهایتاً با استفاده از الگوریتم ژنتیک قطر لوله‌هایی که بایستی به موازات لوله‌های موجود کارگذاری شوند به دست می‌آید. روش ایجاد شده برای یک شبکه نمونه از تحقیقات گذشته با تغییر سطح عدم قطعیت بررسی شد که نتایج حاکی از افزایش ۲۸ درصدی هزینه شبکه با افزایش ۵۰ درصدی عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده و کاهش ۷/۵ درصدی هزینه با اعمال ۰/۷۵ متر تلورانس در هد فشاری مورد نیاز بود. روش پیشنهاد شده بر اساس الگوریتم ژنتیک کاملاً مناسب بوده و جوابی را ایجاد می‌کند که فشارهای مورد نیاز در بدترین وضعیت ایجاد شده تأمین شود.

واژگان کلیدی: تقاضای گره‌ها، روش فازی، زبری لوله‌ها، عدم قطعیت، هد فشاری.

۱- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

*۲- دانشیار و نویسنده مسئول، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. Email: rahimpour@uk.ac.ir

۳- دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

۴- دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

مقدمه

شبکه‌های توزیع آب از مهم‌ترین بخش‌های زیربنایی هر شهر هستند که در زمان‌های مختلف با مقادیر متفاوتی از تقاضا مواجه‌اند. هزینه شبکه‌های توزیع آب معمولاً ۶۰ تا ۷۰ درصد کل هزینه سیستم‌های تأمین آب را در بر می‌گیرد. از آنجایی که اکثر متغیرهای مؤثر در طراحی و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب به طور دقیق و قطعی قابل محاسبه و ارزیابی نیستند، بنابراین بایستی در طراحی شبکه‌های توزیع آب، هزینه و عملکرد شبکه تحت شرایط عدم قطعیت در نظر گرفته شود. با توجه به مزایای استفاده از روش فازی نسبت به سایر روش‌های بررسی عدم قطعیت، از جمله عدم نیاز به تکرار زیاد محاسبات، صرفه‌جویی در زمان و هزینه و دقت بالای محاسبات، در این تحقیق برای بررسی عدم قطعیت‌ها نظریه مجموعه فازی به کار گرفته شده است. در زمینه آنالیز و بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب با روش فازی تحقیقات زیادی انجام شده است از جمله (Revelli and Ridolfi 2002) که شبیه‌سازی هیدرولیکی را با یک روش بهینه‌سازی مرتبط کردند. در پژوهش آن‌ها ضریب زبری لوله‌ها و مصارف گره به عنوان اعداد فازی معرفی شدند. سپس در هر سطح عدم قطعیت، دو بار بهینه‌سازی برای بدست آوردن مقادیر حداقل و حداکثر هر پاسخ اجرا شد. با توجه به آنکه تحلیل فازی در شبکه آبرسانی یک تصمیم‌گیری چند معیاره با چندین تابع هدف می‌باشد، در تحقیقی (Haghighi and Zahedi 2014) به جای آنکه برای هر پاسخ در هر سطح عدم قطعیت، دو مسأله بهینه‌سازی برای محاسبه حداقل و حداکثر با در نظر گرفتن بهینه‌سازی تک هدفه انجام دهند، از بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از روش بهینه‌سازی (NSGA-II) استفاده کردند. (Gupta and Behave 2007) نشان دادند که چگونه پارامترهای فازی وابسته به طور یکنواخت یا غیریکنواخت روی بازه پارامترهای فازی مستقل تغییر می‌کنند و برای تعیین توابع عضویت پارامترهای فازی وابسته یکنواخت یک روش ساده را (که در آن تأثیر پارامترهای مستقل روی پارامترهای وابسته در یک مرحله مشخص می‌شود) پیشنهاد دادند. همچنین توابع عضویت پارامترهای وابسته غیر یکنواخت نیز با انتخاب مقادیر مناسبی از پارامترهای مستقل بر اساس ماهیت تأثیر بدست آمد. (Pandey et al. 2020) روش‌های فازی و احتمالاتی به کار گرفته شده توسط محققان مختلف

در تحلیل عدم قطعیت شبکه‌های توزیع آب را بررسی نمودند.

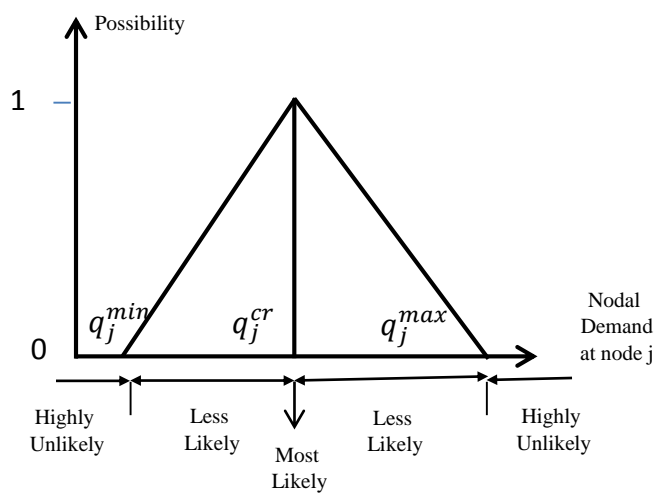
(Karmakar 2011) به بررسی منابع عدم قطعیت در مدل-سازی هیدرولیکی و کیفی شبکه‌های توزیع آب پرداخت. اثرات عدم قطعیت زبری لوله در عملکرد شبکه‌های توزیع آب در طول بهره‌برداری نیز توسط پژوهشگرانی نظیر (Seifollahi-Aghmiuni et al. 2013a,b) بررسی شده است.

(Shibu and Reddy 2014) از روش کراس انترپولی برای طراحی بهینه شبکه‌ها با در نظر گرفتن تقاضای فازی گره‌ها استفاده نمودند. ولی روش آن‌ها برای در نظر گرفتن مقادیر غیر قطعی ضریب زبری لوله‌ها جوابگو نمی‌باشد. (Sarbu et al. 2020) به طور خلاصه به بررسی روش‌ها و مدل‌ها و مثال‌های عددی بهینه‌سازی چندهدفه شبکه‌های توزیع آب توسط محققان گذشته پرداختند.

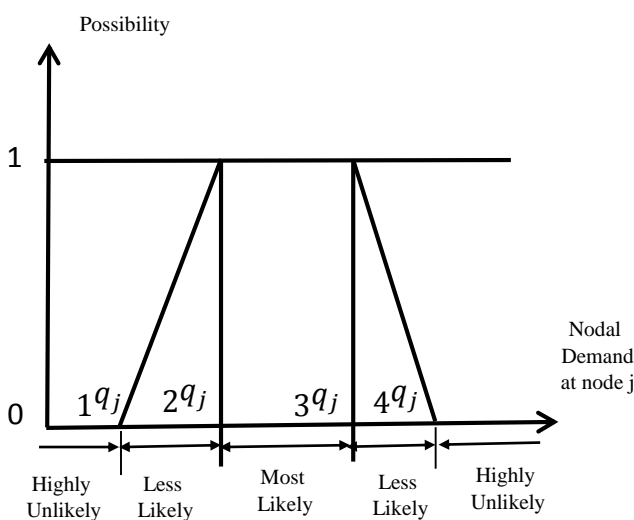
(Dongre and Gupta 2017) با در نظر گرفتن همزمان ۱۰٪ عدم قطعیت در میزان تقاضا و ± 10 در مقادیر ضریب زبری لوله‌ها، با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی در شرایط استحکام بخشی شبکه نیویورک پرداختند و نتیجه بدست آمده را با نتایج حاصل از اعمال ۳ حالت تلورانس (۰/۳۰، ۰/۶۱ و ۰/۹۱ متر تلورانس در هر مورد نیاز قطعی) مقایسه نمودند که نتایج بیانگر کاهش هزینه با افزایش تلورانس در نظر گرفته شده می‌باشد.

با توجه به اینکه در تحقیقات پیشین کمتر به مسئله بهینه‌سازی به منظور اصلاح شبکه‌های اجرا شده (تحت عدم قطعیت همزمان ضرایب زبری و تقاضا) پرداخته شده است، بنابراین در این تحقیق یک مدل بهینه‌سازی فازی به منظور استحکام بخشی شبکه موجود بر اساس الگوریتم ژنتیک (که مشابه مدل تحقیق (Dongre and Gupta 2017) می‌باشد) در محیط برنامه‌نویسی متلب توسعه داده شده است تا همزمان تقاضای گره‌ها و همچنین مقادیر ضرایب زبری لوله‌ها را به عنوان پارامتر فازی در نظر بگیرد. توابع عضویت برای متغیرهای وابسته با استفاده از روش تأثیر پیشنهاد شده توسط (Gupta and Bhav 2007) بدست آمده‌اند و مدل بهینه‌سازی با استفاده از توابع عضویت هدهای مطلوب فازی به مدل قطعی تبدیل شده است و نتایج حاصل از مدل توسعه داده شده با تحقیق (Dongre and Gupta 2017) مقایسه شده است. در این مدل سعی شده که قطر لوله‌ها(که

عنوان پارامتر فازی با تابع توزیع دوزنقه‌ای شکل نشان دادند (همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است). در این شکل محتمل‌ترین مقدار به جای یک مقدار واحد، شامل محدوده ($2q_j$ تا $3q_j$) به خاطر تغییرات روزانه تقاضا می‌باشد. همچنین این مقادیر می‌توانند به دلیل عدم قطعیت به مقدار حداقل ($1q_j$) و حداکثرشان ($4q_j$) کاهش یا افزایش یابند. ضرایب زبری لوله‌ها (C_{HW}) را می‌توان با تابع عضویت مثلثی (مانند شکل (۱)) با محتمل‌ترین



شکل (۱): تابع عضویت مثلثی تقاضا در گره j (Dongre and Gupta 2017)



شکل (۲): تابع عضویت دوزنقه‌ای تقاضا در گره j (Dongre and Gupta 2017)

به موازات لوله‌های موجود کارگذاری می‌شوند) به گونه‌ای انتخاب گردد که شبکه علاوه بر عملکرد مطلوب تحت شرایط عدم قطعیت، کمترین هزینه را نیز در برداشته باشد. همچنین برای بررسی تأثیر تغییرات میزان عدم قطعیت بر روی هزینه، در چهار حالت ۱- قطعی بودن تمامی پارامترها ۲- لحاظ نمودن ۱۰٪ عدم قطعیت فقط در میزان تقاضای گره‌ها ۳- ۵۰٪ افزایش در میزان عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده توسط (Dongre and Gupta 2017) ۴- غیر قطعی در نظر گرفتن هد مطلوب مورد نیاز گره‌ها (۰/۷۵ متر تلورانس در هد مورد نیاز قطعی)، شبکه اجرا گردیده و مقادیر بدست آمده با هم مقایسه شده‌اند.

مواد و روش‌ها

توابع عضویت فازی

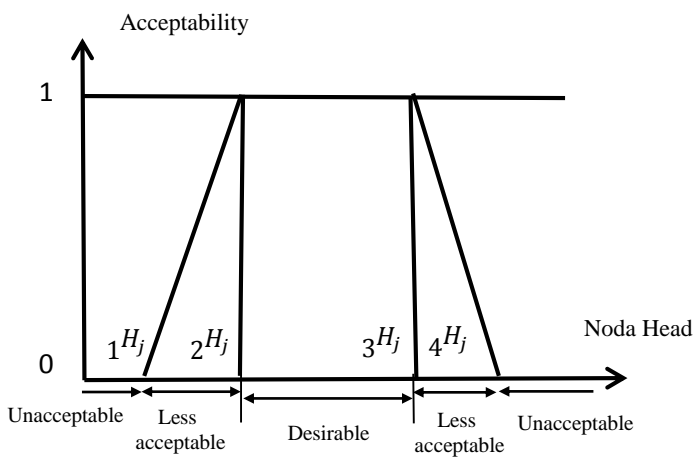
تئوری مجموعه فازی در واقع با استفاده از مجموعه‌ای از معلومات نادقیق به دنبال استخراج نتایج دقیق است. تابع عضویت، میزان وابستگی هر عضو را به مجموعه فازی نشان می‌دهد. به دلیل اینکه در طراحی، مقادیر تقاضای گره‌ها و ضرایب زبری لوله‌ها برای آینده پیش‌بینی می‌شوند این مقادیر دارای عدم قطعیت‌اند. بنابراین تابع توزیع امکان-پذیری مثلثی برای تقاضای گره‌ها و همچنین مقادیر زبری لوله‌ها کاربردی است.

توابع عضویت برای تقاضای گره‌ها و مقادیر C_{HW} لوله‌ها

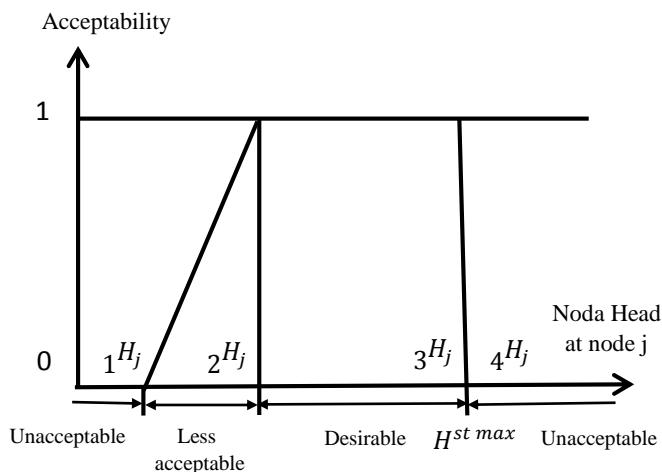
تقاضای فازی گره‌ها می‌تواند با تابع توزیع امکان‌پذیری مثلثی یا دوزنقه‌ای نشان داده شود. در شکل (۱) یک تابع عضویت مثلثی برای تقاضای گره q در نظر گرفته شده است. تقاضا در گره j می‌تواند با q_j^{cr} (محتمل‌ترین مقدار تقاضا در گره j) به همراه q_j^{min} و q_j^{max} (حداکثر و حداقل تقاضا در گره j) نشان داده شود. محتمل‌ترین مقدار تقاضا (q_j^{cr}) مقدار عضویت یک را داراست و به دلیل عدم قطعیت، این مقدار ممکن است افزایش یا کاهش پیدا کند. در نتیجه در حداکثر و حداقل مقادیر تقاضا (q_j^{min} و q_j^{max})، به ترتیب کم‌ترین احتمال وقوع وجود دارد. به دلیل اینکه امکان وقوع تقاضای گره پایین‌تر از مقدار تقاضای حداقل q_j^{min} یا بیش‌تر از مقدار تقاضای حداکثر q_j^{max} وجود ندارد مقدار عضویت برای مقادیر غیرمحتمل صفر است. (Xu and Goulter 1999a) و (Bhave and Gupta 2004) تقاضای گره را به

تابع عضویت برای هدهای در دسترس

همان‌طور که تقاضای گره‌ها و مقادیر C_{HW} لوله‌ها، فازی در نظر گرفته شدند، متغیرهای خروجی (مثل هد در دسترس گره‌ها و دبی لوله‌ها) نیز فازی خواهند بود. (Gupta and Bhave 2007) یک آنالیز فازی را برای استخراج تابع عضویت هد در دسترس با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضای گره‌ها و مقادیر ضریب زبری نشان دادند.



شکل (۳): تابع عضویت مقبولیت نسبی هد گره‌ها در گره j (Dongre and Gupta 2017)



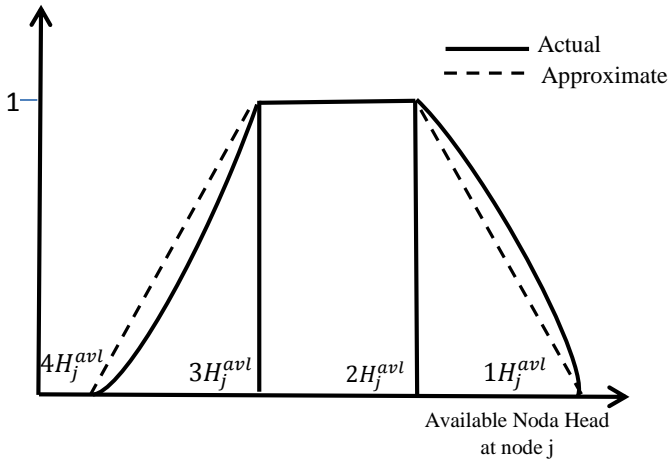
شکل (۴): تابع عضویت میزان مقبولیت نسبی هد گره‌ها وقتی هر فشاری بالاتر از فشار حداکثر استاتیک قابل قبول باشد (Dongre and Gupta 2017)

مقدار C_{HW}^{cr} ، حداقل مقدار C_{HW}^{min} و حداکثر مقدار C_{HW}^{max} نشان داد. تغییرات در مقادیر ضریب زبری برای لوله‌ها با جنس‌های متفاوت می‌تواند متفاوت باشد. در حالی که تغییر در مقادیر C_{HW} برای تمام لوله‌های شبکه با جنس یکسان می‌تواند یکسان باشد.

تابع عضویت برای هد مطلوب گره‌ها

عملکرد شبکه در صورتی که مصرف‌کننده مقدار مورد نیاز آب را در فشار مطلوب دریافت کند، قابل قبول در نظر گرفته می‌شود. فشار تأمین شده نه باید خیلی بالا باشد که به تجهیزات مصرف‌کنندگان خسارت وارد کند و نه خیلی پایین باشد که روی مقادیر تأمین‌کننده تأثیر بگذارد. عملکرد شبکه در صورتی که هد گره‌ها کمی پایین‌تر از مقدار حداقل یا بالاتر از مقدار حداکثر برای یک دوره کوتاه باشد، می‌تواند برای مصرف‌کنندگان قابل قبول در نظر گرفته شود. هد مطلوب گره‌ها نیز فازی رفتار می‌کند و با تابع عضویت نشان داده می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۳) نشان داده شده است، اگر هد در دسترس گره j بین $2H_j$ و $3H_j$ باشد مطلوب بوده و بنابراین میزان مقبولیت نسبی آن یک در نظر گرفته می‌شود. مصرف‌کنندگان حتی می‌توانند افزایش یا کاهش فشار را بین $2H_j$ تا $1H_j$ و از $3H_j$ تا $4H_j$ بپذیرند (با اینکه مقبولیت نسبی کاهش می‌یابد). در حالی که هد فشاری کمتر از $1H_j$ و بیشتر از $4H_j$ پذیرفته نخواهد شد (بنابراین مقبولیت نسبی در این حالت با صفر نشان داده می‌شود). این محدوده اطراف فشار مورد نیاز مطلوب ($1H_j$ تا $4H_j$)، به عنوان محدوده مجاز تلورانس، در طول شرایط غیر قطعی است. در صورتی که تجهیزات مصرف‌کنندگان بتوانند فشار استاتیک را تحمل کنند تابع عضویت هد فشاری گره‌ها می‌تواند تغییر داده شود (شکل ۴). در این شکل $3H_j$ و $4H_j$ برابر با حداکثر فشار استاتیک ($H^{st max}$) می‌باشد بنابراین هر هد فشاری بالاتر از $2H_j$ قابل قبول خواهد بود. در شکل (۲) چهار مقدار تقاضا $1q_j, \dots, 4q_j$ به عنوان چهار شرایط عملکردی (شامل مرزهای بالا و پایین $1q$ و $4q$ با عدم قطعیت $2q$ و $3q$ بدون عدم قطعیت می‌باشد) در نظر گرفته شده است. برای مرزهای بالا و پایین تقاضا، باید فشار مورد نیاز رضایت‌بخش باشد. با توجه به کاهش هد فازی با افزایش تقاضای گره‌ها، چهار نقطه $1q_j, \dots, 4q_j$ شکل (۲) به ترتیب بر $1H_j, \dots, 4H_j$ شکل (۳) مطابقت داده می‌شود.

در روش آنالیز فازی (Gupta and Bhawe 2007) تأثیر افزایش یا کاهش پارامترهای غیر قطعی مستقل بر روی پارامترهای غیر قطعی وابسته با استفاده از چندین آنالیز هیدرولیکی ثبت می‌شود و یک جدول تأثیر بدست می‌آید. سپس با استفاده از جدول تأثیر، مقادیر حداقل و حداکثر پارامترهای وابسته با انتخاب مقادیر مناسب پارامترهای غیر قطعی مستقل تعیین می‌شوند. برای شبکه وقتی هدهای فشاری در دسترس قابل قبول‌اند که داخل محدوده هد فشاری مطلوب قرار گیرند. شکل تابع عضویت هد فشاری در دسترس گره‌ها مثل تابع عضویت تقاضای گره‌ها است. بعد از آنالیز هیدرولیکی شبکه با مقادیر تابع عضویت مثلثی تقاضای گره‌ها، یک تابع عضویت مثلثی با گوشه‌های انحنادار برای هدهای در دسترس به دست خواهد آمد. به طور مشابه یک تابع تقاضای دوزنقه‌ای گره‌ها، یک تابع عضویت دوزنقه‌ای هد در دسترس گره‌ها با گوشه‌های انحنادار خواهند داشت (شکل ۵) که باید کاملاً داخل تابع عضویت هدهای مطلوب قرار گیرند. (Xu and Goulter 1999a; Revelli and Ridolfi 2002; Bhawe and Gupta 2004; Gupta and Bhawe 2007).



شکل (۵): تابع عضویت استخراج شده برای هد در دسترس گره‌ها نظیر تابع عضویت دوزنقه‌ای تقاضای فازی (Dongre and Gupta 2017)

افت هد لوله در رابطه (۳) می‌تواند با استفاده از فرمول هیزن ویلیامز به صورت زیر باشد:

$$\hat{h}_x = \frac{\omega L_x \hat{Q}_x^n}{C_{HWx}^n D_x^r} \quad (۶)$$

که C_{HW} ضریب زبری هیزن ویلیامز، ω ضریب ثابت تبدیل عددی رابطه هیزن ویلیامز وابسته به سیستم مورد نظر می‌باشد که توسط محققان مختلف و بصورت تجربی تعیین شده است و n و r ضرایب توانی رابطه هیزن ویلیامز هستند. در مدل شبیه‌سازی EPANET، ω برابر $10/667$ برای $n=1/852$ و $r=4/87$ می‌باشد.

برای تابع عضویت دوزنقه‌ای تقاضای گره (شکل ۲) روابط (۲) و (۳) مطابق با نقطه اول تقاضا (یعنی حداقل تقاضا) می‌توانند به صورت زیر نوشته شوند:

$$\sum_{x \in j} 1 Q_x - 1 q_j = 0 \quad (۷)$$

$$\sum_{x \in C} h_x = 0 \quad (۸)$$

به طور مشابه محدودیت‌های افت هد حلقه و پیوستگی جریان می‌تواند برای نقاط ۲، ۳ و ۴ نیز به ترتیب نوشته

شکل تابع عضویت هد فشاری در دسترس گره‌ها مثل تابع عضویت تقاضای گره‌ها است. بعد از آنالیز هیدرولیکی شبکه با مقادیر تابع عضویت مثلثی تقاضای گره‌ها، یک تابع عضویت مثلثی با گوشه‌های انحنادار برای هدهای در دسترس به دست خواهد آمد. به طور مشابه یک تابع تقاضای دوزنقه‌ای گره‌ها، یک تابع عضویت دوزنقه‌ای هد در دسترس گره‌ها با گوشه‌های انحنادار خواهند داشت (شکل ۵) که باید کاملاً داخل تابع عضویت هدهای مطلوب قرار گیرند. (Xu and Goulter 1999a; Revelli and Ridolfi 2002; Bhawe and Gupta 2004; Gupta and Bhawe 2007).

مدل بهینه‌سازی

طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب به هدف حداقل‌سازی هزینه شبکه، قطرهای طبیعی گسسته را به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری به ما می‌دهد.

تابع هزینه به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$\text{Min} \sum_{x=1}^X C_{D_x} L_x \quad (۱)$$

که X تعداد لوله‌ها در شبکه، $C_{D_x} = 343.07 \times (\frac{D_x}{1000})^{1.24}$ هزینه واحد طول لوله با قطر D_x (mm) و L_x (m) طول لوله x است.

تابع هدف بالا با محدودیت‌های زیر حداقل‌سازی می‌شود:

پیوستگی جریان در گره‌ها

$$\sum_{x \in j} \hat{Q}_x - \hat{q}_j = 0 \quad (۲)$$

افت-هد حلقه برای همه حلقه‌ها

$$\sum_{x \in C} \hat{h}_x = 0 \quad (۳)$$

محدودیت هد در دسترس در همه گره‌های تقاضا

$$\hat{H}_j^{avl} \subseteq \hat{H}_j \quad (۴)$$

محدودیت متغیرهای تصمیم‌گیری

$$D_x \in D \quad (۵)$$

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{x=1}^X 343.07 \times \left(\frac{D_x}{1000}\right)^{1.24} \times L_x + p_1 \times \\ \sum_{j=1}^J [\max(0, 1H_j^{avl} - 4H_j)] + p_2 \times \\ \sum_{j=1}^J [\max(0, 2H_j^{avl} - 3H_j)] + p_3 \times \\ \sum_{j=1}^J [\max(0, 2H_j - 3H_j^{avl})] + p_4 \times \\ \sum_{j=1}^J [\max(0, 1H_j - 4H_j^{avl})] \end{aligned} \quad (11)$$

که دو عبارت جریمه اول p_1 و p_2 انحراف از محدودیت حداکثر هد فشاری (مطابق با نقطه ۱ و ۲ تقاضا) و دو عبارت جریمه دوم برای انحراف از حداقل هد فشاری مورد نیاز (مطابق با نقاط ۳ و ۴) می‌باشند. برای تابع عضویت تغییر داده شده هد مطلوب گرہها (شکل ۴)، دو ترم جریمه اول حذف می‌شوند.

شکل (۶) فلوچارت روش طراحی بهینه شبکه‌ها با تقاضا و مقادیر ضرایب زبری فازی را نشان می‌دهد که به طور خلاصه گام‌های روش به صورت زیر می‌باشد:

- ۱- ایجاد جمعیت اولیه به صورت تصادفی.
- ۲- محاسبه هزینه برای هر جواب در جمعیت.
- ۳- انجام آنالیز فازی (بر پایه روش تأثیر) برای هر جواب و بررسی امکان پذیر بودن جواب‌ها و محاسبه جریمه هزینه برای جواب‌های غیرشده.
- ۴- محاسبه هزینه کل (هزینه به اضافه جرایم) هر جواب و برآوردنگی هر جواب.
- ۵- استفاده از عملگرهای الگوریتم ژنتیک مثل انتخاب، تزیوج، جهش و نخبه‌گرایی برای ایجاد یک نسل جدید از جواب‌ها.

- ۶- تکرار گام‌های ۲ تا ۵ برای تعداد مشخصی نسل. پارامترهای انتخاب شده GA برای حل مسئله تحقیق حاضر به صورت جمعیت اولیه (۱۶۰)، جمعیت نسل‌های بعد (۴۰)، احتمال ترکیب (۰/۹)، احتمال جهش (جهش خطی) از ۰/۰۵ تا ۰/۰۱، انتخاب (مرتب‌بندی)، ترکیب (یکنواخت)، تعداد بیت‌های مربوط به هر کروموزوم ۴ و نوع GA (باینری) می‌باشد. تولید جمعیت اولیه بصورت تصادفی و با توزیع یکنواخت انجام می‌شود. لازم به ذکر است که بعد از خروجی گرفتن از شبکه ایجاد شده در EPANET با پسوند inp آنالیز هیدرولیکی شبکه، در حین اجرای مدل، با فراخوانی EPANET در محیط MATLAB انجام می‌گردد که با استفاده از این مدل برنامه‌نویسی شده EPANET، می‌توان پارامترهای طراحی مثلاً قطر لوله‌ها را با دستور `setdata('EN_DIAMETER',valu);`

شوند. تقاضای فازی گرہ شکل (۲) و هد در دسترس گرہ شکل (۵) به هم وابسته‌اند (همان‌گونه که پیش‌تر بحث شد). هد در دسترس فازی باید به هد مطلوب فازی رضایت-بخش محدود شود (شکل ۳). بنابراین محدودیت‌ها برای هد در دسترس می‌توانند به صورت زیر نوشته شوند.

$$1H_j^{avl} \leq 4H_j \quad (9a)$$

$$2H_j^{avl} \leq 3H_j \quad (9b)$$

$$3H_j^{avl} \geq 2H_j \quad (9c)$$

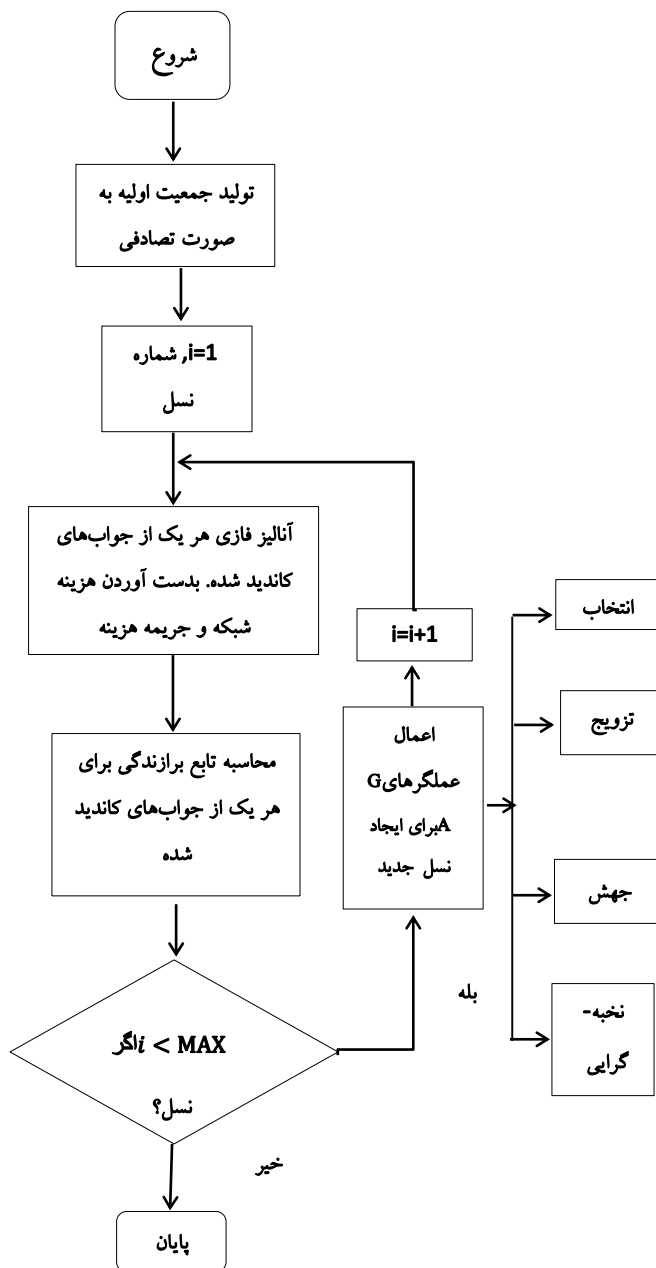
$$4H_j^{avl} \geq 1H_j \quad (9d)$$

در صورت استفاده از شکل (۴) قیود محدود کننده هد در دسترس گرہها به هد فشاری مطلوب ماکزیمم، حذف خواهند شد. برای تابع عضویت مثلثی تقاضای گرہها (شکل ۱) قیود هد فشاری نظیرشان می‌توانند به طور مناسب تغییر داده شوند. مدل بهینه‌سازی غیرخطی تعریف شده با رابطه (۱) و قیود در معرض تغییرات با الگوریتم ژنتیک حل شده‌اند. از آن‌جا که مدل توسعه داده شده الگوریتم ژنتیک بر اساس قیود شبیه‌سازی هیدرولیکی می‌باشد روابط (۷) و (۸) به طور خودکار در طول شبیه‌سازی محقق می‌گردند. محدودیت مربوط به رابطه (۵) هم به دلیل اینکه الگوریتم ژنتیک ساینز لوله‌ها را از لیست لوله‌های تجاری در دسترس انتخاب می‌کند تأمین می‌شود. به هر حال محدودیت هد فشاری در گرہ الزماً رضایت بخش نیست به همین دلیل یک ضریب جریمه هزینه به جواب‌های غیر عملی که محدودیت‌های مربوط به فرمول‌های ۹a تا ۹c را تأمین نکرده‌اند به هزینه اضافه می‌شود. جریمه هزینه تابع انحراف از محدودیت‌ها و ضریب جریمه (که در مدل توسعه داده شده تحقیق حاضر این ضریب برابر با ۲۰٪ هزینه شبکه در نظر گرفته شده است) می‌باشد. بنابراین تابع هدف تغییر داده شده به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{x=1}^X 343.07 \times \left(\frac{D_x}{1000}\right)^{1.24} \times L_x + p \times \\ \sum_{j=1}^J [\max(0, H_j^{avl} - \\ H_j)] \end{aligned} \quad (10)$$

که p ضریب جریمه و عبارت داخل پرانتز حداکثر انحراف از محدودیت فشار در یک گرہ در شبکه را بر می‌گیرد. تابع هدف به طور دقیق می‌تواند به صورت رابطه (۱۱) تعریف شود که بیشتر تغییر داده شده است تا ضرایب جریمه هزینه برای انحراف هد فشاری از محدودیت‌ها، برای هر چهار نقطه تقاضا در نظر گرفته شود.

بهینه‌سازی شبکه با عدم قطعیت در تقاضای گره‌ها و مقادیر ضریب CHW با سطح گرادیان هیدرولیکی مورد نیاز (مطلوب) قطعی با توجه به سطح گرادیان هیدرولیکی مورد نیاز قطعی گره‌ها که در جدول (۱) نشان داده شده است، شبکه به منظور استحکام‌بخشی با تقاضاهای فازی و مقادیر CHW فازی، طراحی بهینه شده است و نتایج در جدول (۲) ثبت گردیده



ماتریسی متشکل از قطر انتخاب شده برای لوله‌ها می‌باشد. در حالت استحکام بخشی شبکه وجود یا عدم وجود لوله دوپل شده را با دستور `setdata('EN_INITSTATUS',VALU);` می‌توان تعیین نمود که VALU ماتریسی متشکل از اعداد صفر (عدم وجود لوله دوپل شده) و یک (وجود لوله دوپل شده) می‌باشد.

شبکه نیویورک

روش طراحی آماده شده در این تحقیق روی شبکه تونل شهر نیویورک (شکل ۷) به منظور استحکام بخشی، اجرا شده است. در گره ۱ منبع با سطح گرادیان هیدرولیکی برابر ۹۱/۴۴ متر قرار گرفته است. در حالی که گره‌های ۲ تا ۲۰ گره‌های تقاضا هستند. تقاضا، هد مطلوب گره‌ها و جزئیات لوله‌های شبکه در جدول (۱) درج شده‌اند. مقادیر CHW برای لوله‌های موجود و لوله‌های موازی جدید ۱۰۰ می‌باشد. به منظور احیای شبکه (برای تأمین فشار مورد نیاز گره‌ها) مجاز است که لوله‌های موجود دوپل شوند (به موازات لوله‌های موجود لوله جدیدی اضافه شود). سایز قطرهای موجود در دسترس برای لوله‌های جدید ۹۱۴/۴۰، ۱۲۱۹/۲۰، ۱۵۲۴/۰۰، ۲۴۳۸/۴۰، ۲۷۴۳/۲۰، ۳۱۳۳/۶۰، ۳۶۵۷/۶۰، ۳۳۵۲/۸۰، ۳۰۴۸/۰۰، ۴۵۷۲/۰۰، ۴۸۷۶/۸۰ و ۵۱۸۱/۶۰ میلیمتر می‌باشد. برای هر لوله در شبکه ۱۶ جواب وجود دارد. بدین صورت که با هر ۱۵ سایز در دسترس، یا لوله دوپل (دوتایی) شده یا نشده، که نهایتاً تعداد کل جواب‌های ممکن $16 \times 10^{25} = 1.6 \times 10^{26}$ می‌باشد، تقاضای گره‌ها و مقادیر ضریب زبری هر دو فازی در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به تحقیق (Dongre and Gupta (2017) مقدار عدم قطعیت در تقاضای گره‌ها، ۱۰٪ فرض شده است. در حالی که عدم قطعیت در مقدار ضریب زبری، ± 10 مقدار نرمالش فرض شده است. هزینه بهینه طراحی شبکه برای هد مورد نیاز قطعی (هد مطلوب قطعی) و هد مورد نیاز فازی (هد مطلوب فازی) گره‌ها بدست آورده شده است که هد مطلوب فازی با اعمال حد قابل قبول تغییرات (تلورانس) در هد مطلوب قطعی به دست می‌آید.

نتایج و بحث

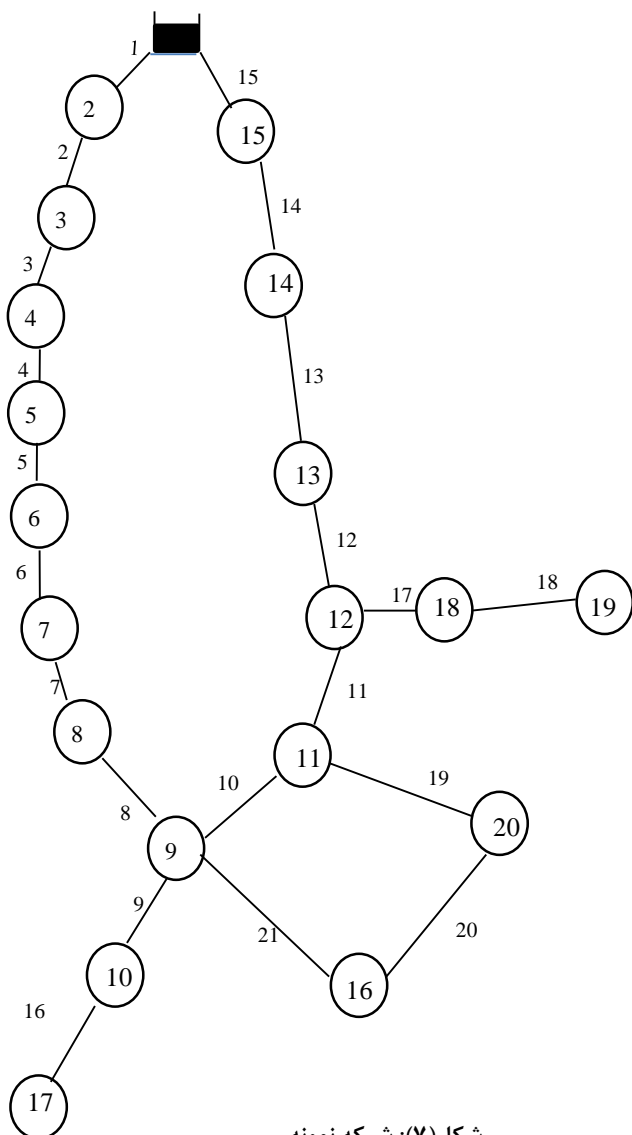
شکل (۶): فلوچارت طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب با پارامترهای غیر قطعی (Dongre Shilpa and Gupta 2017)

بهینه‌سازی شبکه با عدم قطعیت در تقاضای گره‌ها و مقادیر ضریب CHW با سطوح گرادبان هیدرولیکی مورد نیاز (مطلوب) فازی

مدل توسعه داده شده تحقیق حاضر با فازی در نظر گرفتن هد مورد نیاز گره‌ها (در نظر گرفتن ۰/۷۵ متر تلورانس در هد مورد نیاز گره‌ها) اجرا گشته و جواب بهینه در ستون مربوط به شرایط (۴) جدول (۲) ثبت شده است که کاهش ۷/۵ درصدی هزینه در مقایسه با حالت قطعی بودن هد مورد نیاز (شرایط (۳)) کاملاً نمایان است.

است. از آنجایی که تعداد کمی از گره‌های شبکه بحرانی‌اند اگر این گره‌ها بتوانند براساس فشار مورد نیاز و یا فاصله از منبع شناسایی شوند، موقع اجرای مدل دیگر نیازی به بدست آوردن فشار مورد نیاز تمام گره‌ها نبوده که در این صورت زمان محاسبات و پیشنهادات می‌تواند کاهش یابد. (Kapelan et al. 2005) با استفاده از روش احتمالاتی با در نظر گرفتن همین اندازه (مانند تحقیق حاضر) عدم قطعیت در تقاضا و مقادیر CHW، جواب بهینه را برای ۹۰٪ استحکام بخشی ۴۹/۲۸۰ میلیون دلار بدست آورده‌اند. حل آن‌ها در مقایسه با حل روش حاضر ارزانتر است. لیکن با این جواب شبکه برای رویارویی با فشار مورد نظر، زمانی که مقادیر حادی تقاضا و CHW در نظر گرفته شوند، شکست می‌خورد و حل بدست آمده توسط آن‌ها در مقایسه با روش حاضر فقط برای مقادیر غیر قطعی با $\pm 2/5$ درصد عدم قطعیت در تقاضا و $\pm 2/5$ در CHW قابل قبول است. با توجه به هدهای فشاری در دسترس به دست آمده از روش حاضر مشخص می‌گردد که شبکه توانایی تأمین فشار مورد نیاز با سناریو در نظر گرفته شده را داراست.

(Shibu and Reddy 2014) تنها با فازی در نظر گرفتن تقاضای گره‌ها، شبکه را برای ۹۹٪ توانایی در رویارویی با فشار مورد نیاز مطلوب طراحی نمودند. با توجه به جدول (۲) مشخص است کمترین هزینه شبکه با قطعی در نظر گرفتن پارامترهای طراحی حاصل شده است (۴۲/۰۷×۱۰^۶ دلار) که با در نظر گرفتن ۱۰٪ عدم قطعیت فقط در میزان تقاضا، هزینه نسبت به حالت قطعی ۴۲٪ زیاد شده است (مقایسه هزینه شرایط (۱) با شرایط (۲)). همچنین با فرض غیر قطعی بودن توأمان ضرایب زبری و تقاضا، هزینه نسبت به حالت غیر قطعی بودن تقاضا، ۲۵٪ افزایش داشته (مقایسه هزینه شرایط (۳) با شرایط (۲)) و نهایتاً با افزایش ۵۰ درصدی عدم قطعیت ضرایب زبری و تقاضا، هزینه ۲۸٪ افزایش پیدا کرده است (مقایسه هزینه شرایط (۵) با شرایط (۳)). هزینه بدست آمده از اجرای مدل در شرایط مختلف، به صورت نمودار نیز (شکل ۸) نمایش داده شده است.



شکل (۷): شبکه نمونه

جدول (۱): مشخصات شبکه نیویورک

شماره لوله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۲۱
طول (m)	۳۵۳۵/۶۸	۶۰۳۸/۰۴	۲۲۲۵/۰۴	۲۵۲۹/۸۴	۲۶۲۱/۲۸	۵۸۲۱/۶۸	۲۹۲۶/۰۸	۳۸۱۰/۰۰	۲۹۲۶/۰۸	۳۴۱۳/۷۶	
قطرهای موجود (mm)	۴۵۷۲/۰۰	۴۵۷۲/۰۰	۴۵۷۲/۰۰	۴۵۷۲/۰۰	۴۵۷۲/۰۰	۴۵۷۲/۰۰	۳۳۵۲/۸۰	۳۳۵۲/۸۰	۴۵۷۲/۰۰	۵۱۸۱/۶۰	
شماره لوله	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	
طول (m)	۴۴۱۹/۶۰	۳۷۱۸/۵۶	۷۳۴۵/۶۸	۶۴۳۱/۲۸	۴۷۲۴/۴۰	۸۰۴۶/۷۲	۹۵۰۹/۷۶	۷۳۱۵/۲۰	۴۳۸۹/۱۲	۱۱۷۰۴/۳۲	۸۰۴۶/۷۲
قطرهای موجود (mm)	۵۱۸۱/۶۰	۵۱۸۱/۶۰	۵۱۸۱/۶۰	۵۱۸۱/۶۰	۵۱۸۱/۶۰	۱۸۲۸/۸۰	۱۸۲۸/۸۰	۱۵۲۴/۰۰	۱۵۲۴/۰۰	۱۵۲۴/۰۰	۱۸۲۸/۸۰
شماره گره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	
ارتفاع (m)	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	
تقاضا m ³ /s	مخزن	۲/۶۲	۲/۶۲	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۴/۸۱	۰/۰۳	
هد مطلوب (m)	۹۱/۴۴	۷۷/۷۲	۷۷/۷۲	۷۷/۷۲	۷۷/۷۲	۷۷/۷۲	۷۷/۷۲	۷۷/۷۲	۷۷/۷۲	۷۷/۷۲	
شماره گره	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	
ارتفاع (m)	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۵۲۶	۵/۴۲۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	
تقاضا m ³ /s	۴/۸۱	۳/۳۱	۳/۳۱	۲/۶۲	۲/۶۲	۴/۸۱	۱/۶۳	۳/۳۱	۳/۳۱	۴/۸۱	
هد مطلوب (m)	۷۷/۷۲	۷۷/۷۲	۷۷/۷۲	۷۷/۷۲	۷۷/۷۲	۷۹/۲۵	۸۳/۱۵	۷۷/۷۲	۷۷/۷۲	۷۷/۷۲	

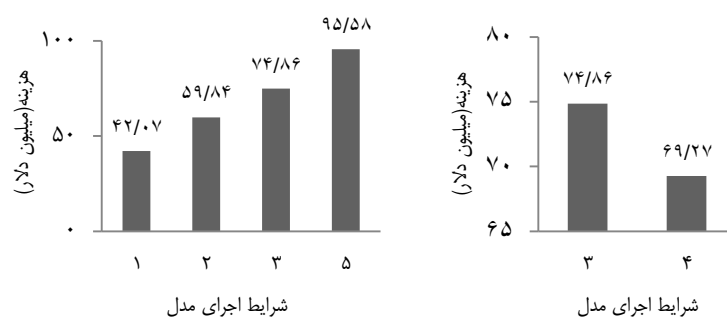
آنالیز فازی شبکه

همان‌گونه که در بخش‌های قبل اشاره شد برای کاهش زمان و تعداد محاسبات، مدل براساس تأمین فشار گره بحرانی (گره ۱۷) اجرا شده تا قطرهای بهینه لوله‌ها بدست آیند. برای بدست آوردن مقادیر حداقل HGL در دسترس در تمامی گره‌ها، مجدداً آنالیز فازی بر پایه روش تأثیر (Gupta and Behave 2007) و به کمک مدل شبیه‌ساز EPANET در متلب انجام می‌گردد. بدین صورت که شبکه با قطرهای بهینه بدست آمده ابتدا برای محتمل‌ترین تقاضاها (مقادیر نرمال تقاضا) و محتمل‌ترین مقادیر C_{HW} (مقادیر نرمال ضرایب زبری) آنالیز می‌شود تا مقادیر HGL در دسترس نرمال بدست آیند. سپس با افزایش هر یک از ضرایب زبری به مقدار حداکثرشان و ثابت نگه داشتن بقیه ضرایب در حالت نرمالشان، شبکه آنالیز شده و مقادیر HGL در دسترس بدست آمده با مقادیر نرمال نظیرشان مقایسه می‌شود تا تأثیر افزایش ضریب زبری مربوطه بر روی HGL در دسترس بدست آید. این مراحل برای تمامی ضرایب زبری تکرار می‌گردد. جدول تأثیر (جدول (۳)) گویای تأثیر افزایش هر یک از ضرایب زبری بر روی HGL در

دسترس می‌باشد که عدد ۱ نشانگر افزایش، ۱- نشانگر کاهش و صفر نشانگر عدم تغییر HGL در دسترس گره‌ها نسبت به حالت نرمالشان می‌باشد. به دلیل اینکه مقادیر HGL گره‌ها با افزایش تقاضای گره‌ها کاهش می‌یابد، افزایش در تقاضای گره‌ها نشان داده نشده و فقط تأثیر افزایش در مقادیر C_{HW} لوله‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است. نهایتاً آنالیز هیدرولیکی شبکه با قطرهای بهینه و حد بالای تقاضاهای غیر قطعی و جایگذاری مقادیری از ضرایب زبری که تأثیر کاهشی در HGL در دسترس دارند انجام شده و جدول (۴) بدست می‌آید. در این جدول HGL در دسترس برای گره ۱۷ به عنوان گره بحرانی (شرایط (۳)) ۸۳/۱۶ متر است و HGL مورد نیاز آن نیز ۸۳/۱۵ متر می‌باشد که با احتساب ۰/۷۵ متر تلورانس (یا به عبارتی ۰/۱ درصد) در HGL مورد نیاز این گره (۸۳/۴m = ۰/۷۵ - ۸۳/۱۵)، HGL در دسترس نیز ۸۲/۴m به دست آمده است. مقادیر بحرانی ایجاد شده (برای هد در دسترس گره ۱۷) در تمامی حالات، بیانگر بهینه بودن قطرهای حاصل از اجرای مدل می‌باشد.

جدول (۲): جواب‌های بهینه برای شبکه نمونه

قشرهای بهینه (mm) با در نظر گرفتن						
شرایط (۱)	شرایط (۲)	شرایط (۳)	شرایط (۴)	شرایط (۵)		
مقادیر قطعی پارامترهای طراحی و با HGL مورد نیاز قطعی	۱۰٪ عدم قطعیت در تقاضای گره‌ها با HGL مورد نیاز قطعی	۱۰٪ عدم قطعیت در تقاضای گره‌ها و ± 10 در ضرایب زبری با HGL مورد نیاز قطعی	۱۰٪ عدم قطعیت در تقاضای گره‌ها و ± 10 در ضرایب زبری با ۰/۷۵ متر تلورانس در HGL مورد نیاز	۱۵٪ عدم قطعیت در تقاضای گره‌ها و ± 15 در ضرایب زبری با HGL مورد نیاز قطعی	بدست آمده از	
شماره لوله	تحقیق حاضر	تحقیق حاضر	تحقیق (Dongre and Gupta 2017)	تحقیق حاضر	تحقیق حاضر	تحقیق حاضر
۴ تا ۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۵	۱۲۱۹/۲۰	۹۱۴/۴۰	۰	۰	۰	۰
۱۲ تا ۱۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۳	۰	۰	۳۹۶۲/۴۰	۳۹۶۲/۴۰	۰	۵۱۸۱/۶۰
۱۴	۰	۳۳۵۲/۸۰	۴۵۷۲/۰۰	۴۵۷۲/۰۰	۵۱۸۱/۶۰	۴۸۷۶/۸۰
۱۵	۰	۴۵۷۲/۰۰	۴۵۷۲/۰۰	۴۵۷۲/۰۰	۴۸۷۶/۸۰	۴۸۷۶/۸۰
۱۶	۲۷۴۳/۲۰	۲۴۳۸/۴۰	۲۱۳۳/۶۰	۲۱۳۳/۶۰	۲۷۴۳/۲۰	۳۰۴۸/۰۰
۱۷	۲۷۴۳/۲۰	۳۰۴۸/۰۰	۲۷۴۳/۲۰	۲۷۴۳/۲۰	۲۷۴۳/۲۰	۳۰۴۸/۰۰
۱۸	۲۷۴۳/۲۰	۱۸۲۸/۸۰	۲۱۳۳/۶۰	۲۱۳۳/۶۰	۲۷۴۳/۲۰	۳۰۴۸/۰۰
۱۹	۲۷۴۳/۲۰	۳۰۴۸/۰۰	۲۱۳۳/۶۰	۲۱۳۳/۶۰	۲۱۳۳/۶۰	۲۷۴۳/۲۰
۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲۱	۱۸۲۸/۸۰	۱۸۲۸/۸۰	۲۱۳۳/۶۰	۲۱۳۳/۶۰	۲۱۳۳/۶۰	۲۷۴۳/۲۰
هزینه (میلیون دلار)	۴۲/۰۷	۵۹/۸۴	۷۴/۸۶	۷۴/۸۶	۶۹/۲۷	۹۵/۵۸



شکل (۸): بررسی تغییرات هزینه در شرایط متفاوت عدم قطعیت‌ها

جدول (۴): مقادیر حداقل سطوح گرادیان هیدرولیکی در دسترس

مقادیر حداقل HGL با در نظر گرفتن						
شرایط (۵)	شرایط (۴)	شرایط (۳)	شرایط (۲)	شرایط (۱)		
۱۵٪ عدم قطعیت در تقاضای گره ها و ± 10 در ضرایب زبری با HGL مورد نیاز	۱۰٪ عدم قطعیت در تقاضای گره ها و ± 10 در ضرایب زبری با HGL مورد نیاز	۱۰٪ عدم قطعیت در تقاضای گره ها و ± 10 در ضرایب زبری با HGL مورد نیاز	۱۰٪ عدم قطعیت در تقاضای گره ها با HGL مورد نیاز	مقادیر قطعی پارامترهای طراحی و HGL مورد نیاز قطعی		
تحقیق حاضر	تحقیق حاضر	تحقیق حاضر	تحقیق حاضر	تحقیق حاضر	تحقیق حاضر	شماره گره
۹۱/۴۴	۹۱/۴۴	۹۱/۴۴	۹۱/۴۴	۹۱/۴۴	۹۱/۴۴	۱
۸۸/۹۵	۸۹/۱۷	۸۹/۳۴	۸۹/۳۴	۸۹/۷۵	۸۹/۶۶	۲
۸۶/۰۴	۸۶/۳۱	۸۶/۷۴	۸۶/۷۴	۸۷/۴۰	۸۷/۲۳	۳
۸۵/۳۲	۸۵/۵۵	۸۶/۰۶	۸۶/۰۶	۸۶/۷۲	۸۶/۵۴	۴
۸۴/۷۵	۸۴/۹۲	۸۵/۵۱	۸۵/۵۱	۸۶/۱۲	۸۵/۹۵	۵
۸۴/۳۷	۸۴/۴۷	۸۵/۱۲	۸۵/۱۲	۸۵/۶۶	۸۵/۵۱	۶
۸۳/۸۸	۸۳/۸۴	۸۴/۶۱	۸۴/۶۱	۸۴/۹۴	۸۴/۸۶	۷
۸۳/۳۸	۸۳/۰۷	۸۴/۰۲	۸۴/۰۲	۸۳/۹۰	۸۳/۹۸	۸
۸۳/۲۰	۸۲/۶۶	۸۳/۷۶	۸۳/۷۶	۸۳/۱۴	۸۳/۴۳	۹
۸۳/۱۸	۸۲/۶۵	۸۳/۷۴	۸۳/۷۴	۸۳/۱۳	۸۳/۴۲	۱۰
۸۳/۳۹	۸۲/۷۷	۸۳/۸۹	۸۳/۸۹	۸۳/۱۷	۸۳/۵۰	۱۱
۸۴/۴۵	۸۳/۵۱	۸۴/۷۲	۸۴/۷۲	۸۳/۵۸	۸۴/۱۰	۱۲
۸۶/۵۴	۸۵/۰۵	۸۶/۳۷	۸۶/۳۷	۸۴/۵۳	۸۵/۳۷	۱۳
۸۸/۰۲	۸۹/۰۵	۸۸/۳۸	۸۸/۳۸	۸۶/۸۹	۸۸/۵۱	۱۴
۸۹/۸۴	۹۰/۲۵	۹۰/۰۲	۹۰/۰۲	۸۹/۳۴	۹۰/۴۴	۱۵
۸۱/۱۵	۷۸/۷۵	۷۹/۸۶	۷۹/۸۶	۷۹/۸۹	۷۹/۶۷	۱۶
۸۲/۹۷	۸۲/۳۹	۸۳/۱۶	۸۳/۱۶	۸۲/۹۵	۸۳/۱۰	۱۷
۸۱/۱۱	۷۹/۴۱	۸۰/۶۲	۸۰/۶۲	۸۰/۷۶	۸۱/۸۳	۱۸
۸۰/۲۹	۷۸/۳۶	۷۷/۹۱	۷۷/۹۱	۸۰/۰۳	۷۸/۱۶	۱۹
۸۱/۶۷	۷۹/۱۵	۸۰/۲۷	۸۰/۲۷	۸۲/۰۱	۸۲/۵۸	۲۰

جدول (۳): جدول تأثیر (تأثیر افزایش مقادیر ضریب زبری بر روی هد در دسترس گره‌ها)

پارامتر فازی	هد در دسترس گره‌ها																			
	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	
CHW1	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
CHW2	-۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
CHW3	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
CHW4	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
CHW5	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
CHW6	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
CHW7	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
CHW8	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
CHW9	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰

ادامه جدول (۳): جدول تأثیر (تأثیر افزایش مقادیر ضریب زبری بر روی هد در دسترس گره‌ها)

پارامتر فازی	هد در دسترس گره‌ها																			
	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	
CHW10	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	
CHW11	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	۱	
CHW12	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱	۱	
CHW13	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱	۱	
CHW14	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۱	۱	۱	۱	۱	۱	
CHW15	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	
CHW16	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	۱	.	.	.
CHW17	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	۱	۱	.
CHW18	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	۱	.
CHW19	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	۱	
CHW20	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	
CHW21	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۱	۱	۱	۱	
CHW22	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CHW23	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CHW24	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CHW25	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CHW26	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CHW27	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CHW28	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CHW29	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CHW30	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CHW31	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CHW32	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CHW33	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CHW34	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱	۱	
CHW35	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۱	۱	۱	۱	۱	۱	
CHW36	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	
CHW37	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	۱	.	.	.
CHW38	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	۱	۱	.
CHW39	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	۱	.
CHW40	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	۱	
CHW41	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CHW42	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۱	۱	۱	۱	

(۱) افزایش در پارامتر وابسته، (-۱) کاهش در پارامتر وابسته و (۰) بدون تغییر ماندن پارامتر وابسته را نشان می‌دهد. تأثیر افزایش یا کاهش ضریب زبری لوله‌های جدید همانند لوله‌های موجود (که به موازات آن کارگذاری می‌شوند) می‌باشد.

نتیجه‌گیری

عدم قطعیت وارده به یک سامانه آبرسانی در قالب معادلات حاکم بر هیدرولیک شبکه در سامانه منتشر شده و پاسخ-های هیدرولیکی شبکه را متأثر می‌سازد. در این پژوهش با

استفاده از مفهوم منطق فازی و به کارگیری الگوریتم بهینه سازی ژنتیک و همچنین استفاده از مفهوم تأثیر، یک مدل پیشنهاد شد که تقاضای گره‌ها و همچنین مقادیر ضرایب زبری CHW لوله‌ها را به عنوان پارامترهای غیر قطعی در نظر

موجب افزایش هزینه شبکه خواهد شد (به عنوان مثال افزایش ۱۰ درصدی تقاضا و احتساب ± 10 تلورانس در ضرایب زبری در جهت تأمین هد مورد نیاز قطعی، منجر به افزایش ۷۵ درصد هزینه نسبت به شرایط قطعی (قطعی در نظر گرفتن تمام پارامترها) می‌شود) ولی روش پیشنهاد شده راه حلی را فراهم می‌کند که شبکه تحت شرایط حدی بتواند با فشارهای مورد نیاز روبرو شود و اطمینان‌پذیری شبکه بالا رود.

می‌گیرد. مدل با در نظر گرفتن ارتباط بین تقاضاهای فازی و هد فازی مورد نیاز گره‌ها با انتخاب ۲ دسته عملکرد بحرانی (با و بدون در نظر گرفتن تلورانس در هد مطلوب گره‌ها) به مدل قطعی تبدیل گشته و به منظور استحکام بخشی یک شبکه نمونه اجرا شد. روش پیشنهاد شده بر اساس الگوریتم ژنتیک در مقایسه با الگوریتم ژنتیک بر پایه روش‌های احتمالاتی (روش مونت کارلو و دیگر تکنیک‌های نمونه)، مناسب بوده و شبیه‌سازی کمتری نیاز دارد. گرچه بالا رفتن تعداد پارامترهای غیرقطعی و درصد عدم قطعیت

منابع

- 1- Bhave P. R., and Gupta R. 2004. Optimal design of water distribution networks for fuzzy demands. *Journal of Civil Engineering and Environmental Systems*, 21(4): 229–245. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10286600412331314564>
- 2- Dongre Shilpa R., and Gupta R. 2017. Optimal design of water distribution network under hydraulic uncertainties *Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 3(3): 1-11. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/AJRUUA6.0000903>
- 3- Gupa R., and Bhave P. R. 2007. Fuzzy parameters in pipe network analysis. *Journal of Civil Engineering And Environmental Systems*, 24(1): 33–54.
- 4- Haghghi A., and Zahedi Asl A. 2014. Uncertainty analysis of water supply networks using the fuzzy set theory and NSGA-II. *Journal of Engineering Application of Artificial Intelligence* 32(2014): 270-282. <https://rms.scu.ac.ir/Files/Articles/Journals/Abstract/uncertainty.pdf201451264247191.pdf>
- 5- Kapelan Z. S., Savic D. A., and Walters G. A. 2005. Multi- objective design of water distribution systems under uncertainty. *Journal of Water Resources Research*, 41(11):1-15. https://www.researchgate.net/publication/235694743_Multiobjective_design_of_water_distribution_systems_under_uncertainty
- 6- Karmakar S. 2011. Propagation of uncertainty in water distribution systems modeling. *Journal of Desalination And Water Treatment*, 33(13): 107-117. https://www.deswater.com/DWT_abstracts/vol_33/33_2011_107.pdf
- 7- Pandey P., Dongre Sh., and Gupta R. 2020. Probabilistic and fuzzy approaches for uncertainty consideration in water distribution. *Journal of Water Supply*, 20(1): 13-27. <https://www.semanticscholar.org/paper/Probabilistic-and-fuzzy-approaches-for-uncertainty-Pandey-Dongre/f1bb1e3b1da498f2b66ebb78e8>
- 8- Revelli, R., and Ridolfi, L. 2002. Fuzzy approach for analysis of pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1): 93–101. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%2907339429%282002%29128%3A1%2893%29>
- 9- Shibu A., and Reddy M. J. 2012. Least cost design of water distribution network under demand uncertainty by fuzzy-cross entropy method. *Journal of Environmental Research and Development*, 6(3A): 853–862. https://www.academia.edu/7371685/Least_cost_design_of_water_distribution_Network_under_demand_uncertainty_by_fuzzy_cross_entropy_method

- 10- Sarbu I., Popa-Albu S., and Tokar A. 2020. Multi-objective optimization of water distribution networks: An overview. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 7(11): 74-86. <http://science-gate.com/IJAAS/Articles/2020/2020-7-11/1021833ijaas202011008.pdf>
- 11- Shibu A., and Reddy M. J. 2014. Optimal design of water distribution networks considering fuzzy randomness of demands using crossentropy optimization. *Journal of Water Resources Management*, 28(12): 4075–4094. <https://ideas.repec.org/a/spr/waterr/v28y2014i12p4075-4094.html>
- 12- Seifollahi-Aghmiuni S., Bozorg-Haddad O., Omid M.H. and Marino M.A. 2013a. Effect of pipe roughness on water distribution network performance during its operational period. *Journal of Water Resource Management*, 27(5): 1581-1599. https://www.researchgate.net/publication/235770579_Effects_of_Pipe_Roughness_Uncertainty_on_Water_Distribution_Network_Performance_During_its_Operational_Period
- 13- Seifollahi-Aghmiuni S., Bozorg-Haddad O. and Marino M.A. 2013b. Water distribution network risk analysis under simultaneous consumption and roughness uncertainties. *Journal of Water Resource Management*, 27(7): 2595-2610. https://www.researchgate.net/publication/235770574_Water_Distribution_Network_Risk_Analysis_Under_Simultaneous_Consumption_and_Roughness_Uncertainties
- 14- Xu C., and Goulter I. C. 1999a. Optimal design of water distribution networks using fuzzy optimization. *Journal of Civil Engineering and Environmental Systems*, 16(4): 243–266. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02630259908970266>

Optimal Design of Water Distribution Network under Hydraulic Uncertainties and Robusting

Samira Goharimoghadam¹, Majid Rahimpour^{2*}, Kourosh Qaderi³ and Mohammad Mehdi Ahmadi⁴

DOI: 10.22103/nrswe.2023.20470.1018

Abstract

Uncertainty in the planned water demand and changes in the roughness values of the pipes are among the common cases of unfavorable performance of water distribution networks. In this research, a model has been developed to optimize networks that have been implemented but need to be strengthened under conditions of uncertainty. In this model, the EPANET simulator model was combined with optimization genetic algorithm in MATLAB programming environment. In such a way that it is first created using the concept of fuzzy logic, fuzzy membership functions of the input parameters (nodal demand and pipe roughness coefficient), then by considering the relationship between demands and pressure head requirements at nodes and using (Gupta and Bhave 2007) impact method The fuzzy optimization model is converted to a deterministic model and finally, the diameter of the pipes that should be installed parallel to the existing pipes is obtained by using the genetic algorithm. The method created for a typical network from past researches is checked by changing the uncertainty level, the results indicated a 28% increase in the cost of the network with a 50% increase in considered uncertainties and a 7.5% decrease in cost by applying a tolerance of 0.75 meters in the desirable pressure head. The proposed method based on the genetic algorithm is completely suitable and creates a solution that provides the required pressures in the worst situation variables.

Keywords: Nodals demand, Fuzzy approach, Pipes roughness, Uncertainty, Pressure head.

1- M. Sc. Student of Water Structures, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

2*- Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
Corresponding author email:rahimpour@uk.ac.ir

3-Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

4- Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahid bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.