نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال دهم. شماره سی و نهم، بهار۱۳۹۹

بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب با تقاضای فازی در شرایط شکست یکی از لوله‌های شبکه

سمیرا گوهری مقدم[۱]، مجید رحیم پور[۲]، کورش قادری[۳] و محمد مهدی احمدی[۴]

تاریخ ارسال: ۱۳۹۵/۱۱/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۰۸
مقاله پژوهشی برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد

چکیده

بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای تعیین‌کننده در طراحی شبکه، امری غیر واقعی به نظر می‌رسد. بنابراین توسعه روش‌هایی که بتوانند عدم‌قطعیت‌های موجود در متغیرهای تأثیرگذار در طراحی شبکه‌های توزیع آب را مدلسازی کند ضروری می‌باشد. در این تحقیق مدلی بر مبنای رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب به صورت تلفیق الگوریتم ژنتیک با نرم‌افزار EPANET، با متغیرهای فازی توسعه داده شده است. همچنین، شبکه‌های توزیع آب به گونه‌ای بهینه می‌شوند که با وجود از دسترس خارج شدن هریک از لوله‌های شبکه (شکست لوله از شبکه) اختلالی در عملکرد شبکه ایجاد نشود. در این مدل تقاضای گره‌ها و هد در دسترس به صورت فازی و با استفاده از توابع عضویت مثلثی بیان شده است. علاوه بر این هد مطلوب گره‌ها نیز به صورت فازی در نظر گرفته شده و با استفاده از ارتباط بین هدهای فازی در دسترس و مطلوب گره‌ها، محدودیت‌های فازی به محدودیت‌های قطعی تبدیل شده‌اند. آزمون درستی مدل با استفاده از بهینه‌سازی شبکه توزیع آب تک مخزنی در یک سطح (لوله) برکنار شده با تقاضای فازی اجرا شده است. سپس به عنوان مطالعه موردی به بهینه‌سازی شبکه توزیع آب شهر جنگل با تقاضای فازی (تحت شرایط برکناری یکی از لوله‌ها از شبکه) پرداخته شد. نتایج حاصل از این مدل نشان داد که هزینه بدست آمده از بهینه‌سازی شبکه توزیع آب با یک سطح (لوله) برکنار شده با تقاضای فازی به‌خاطر جبران شرایط برکناری هر یک از لوله‌ها به منظور تأمین هد گره‌ها با توجه به میزان وسعت شبکه‌ها افزایش ۳۰ تا ۷۰ درصدی داشته است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، پارامترهای فازی، شبکه توزیع آب، عدم‌قطعیت.

۱- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران Email: asad18_me5@yahoo.com
۲- دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، Email: rahimpour@uk.ac.ir (نویسنده مسئول)
۳- دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، Email: Kouroshqaderi@uk.ac.ir
۴- دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، Email: ahmadi_mm@ uk.ac.ir

مقدمه

شبکه‌های انتقال و توزیع آب از اساسی‌ترین تأسیسات عمومی و زیربنایی شهری می‌باشند. در طراحی این شبکه‌ها عدم قطعیت موجود در پارامترهای ورودی مانند میزان تقاضا، ضریب زبری لوله‌ها، هد مخزن و... باعث می‌شود تا در مقادیر حاصل از نتایج طراحی مانند هد گره‌ها، سرعت و دبی جریان در لوله-ها، عدم‌دقت پدیدار شود که هدف اصلی در تجزیه و تحلیل عدم قطعیت نیز کمی نمودن این فرآیند است. رویکرد فازی یکی از روش‌های مناسب جهت بررسی عدم قطعیت می‌باشد که از انعطاف کامل در انتخاب پارامترهای ورودی و سهولت در محاسبات و کاربرد برخوردار است. در روش فازی امکان ایجاد تغییرات در پارامترهای ورودی با استفاده از توابع عضویت فازی بیان می‌شود پس در آن نیازی به داده‌های آماری نیست.

منظور از بهینه‌سازی یک شبکه توزیع آب انتخاب قطر لوله‌ها، ارتفاع مخازن، تعداد و مشخصات ایستگاه-های پمپاژ در آن است به نحوی که نخست کلیه ضوابط هیدرولیکی و فنی مورد نیاز تأمین شوند و دوم هزینه احداث شبکه به کمترین مقدار ممکن تقلیل یابد. از محبوب‌ترین روش‌های فراکاوشی[1] که در خصوص بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب نیز به وفور مورد استفاده قرار گرفته است روش الگوریتم ژنتیک می-باشد(Simpson et al.(1994); Savic and Vairavamoorthy and Ali Walters (1997); (2005); Reca et al. (2008); Kadu et al. (2008)). همچنین در سال‌های اخیر گروهی از محققان به توسعه روش‌های هیبریدی ریاضی-فراکاوشی روی آوردند. از نمونه کارهای انجام شده در این دسته به منظور بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب می‌توان به تحقیقات Krapivka and Ostfeld (2009) و Cisty (2010) با تلفیق الگوریتم ژنتیک GA و برنامه‌ریزی خطی LP و همچنین کار Haghighi et al.(2011) با ترکیب GA و برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح ILP اشاره کرد.

عموماً شبکه‌های توزیع آب بر اساس نیاز انتهای دوره طرح و به صورت قطعی طراحی می‌شوند. در طول دوره بهره‌برداری به دلیل وجود خطا در برآورد مقدار تقاضای افق طراحی به سبب تغییر الگوی مصرف ممکن است شبکه قادر به تأمین نیازها نباشد و تعادل هیدرولیکی آن از بین برود. مقادیر نیاز در گره‌های شبکه به عنوان یکی از منابع عدم قطعیت در فرآیند طراحی و بهره‌برداری شبکه منظور می‌شود. اخیراً آنالیز شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن تقاضای گره‌ها به عنوان پارامتر فازی توسط محققان مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است (Revelli and Ridolfi (2002)، Gupta and Bhave (2007) و Branisavljević and et al.(2009)). Shibu and Janga Reddy (2011) از روش کراس‌اینتروپی برای تعیین حداقل و حداکثر پارامترهای فازی وابسته روی بازه پارامترهای فازی مستقل استفاده کردند. Spiliolis and Tsakiris (2012) روش نیوتون رافسون را برای تحلیل شبکه توزیع آب تحت تقاضای فازی به کار بردند و از این طریق توابع عضویت هد گره-ها را بدست آوردند. Gupta et al. (2014) آنالیز فازی شبکه را تحت شرایط کمبود فشار پیشنهاد دادند. Xu and Goulter (1999) و Bhave and Gupta (2004) با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی فازی شبکه تک منبعی را تحت تقاضای فازی بهینه نمودند. Dongre et al. (2011) از الگوریتم ژنتیک برای مینیمم کردن هزینه شبکه با تقاضای فازی با در نظر گرفتن هد فشار فازی مورد نیاز استفاده کردند. Shibu and Janga Reddy (2014) با استفاده از روش کراس انتروپی[2] روشی را برای بهینه کردن شبکه توزیع آب با در نظر گرفتن تقاضای تصادفی فازی ارائه نمودند.

سطح برکناری برای شبکه توزیع آب حداکثر تعداد شکست همزمان لوله‌ها در شبکه توزیع آب است به طوری که اختلالی در سرویس‌دهی قسمتی یا کل شبکه

1- Metaheuristic

2- Cross Entropy

ایجاد نشود. در این شرایط هزینه شبکه به دلیل سطح برکنار شده افزایش می‌یابد. از آن جایی که احتمال شکست همزمان دو لوله یا بیش‌تر در شبکه بسیار کم است، از این رو از احتمال شکست دو لوله به طور همزمان نیز می‌توان چشم پوشی کرد (Gupta et al.,2013). بسیاری از الگوریتم هایی که دو سه دهه گذشته گسترش یافته اند قابلیت اطمینان در شبکه توزیع آب را از طریق مقادیر مختلف قابلیت اطمینان و دستیابی به اطمینان مطلوب در هر شکست لوله در نظر گرفته‌اند(برای مثال Goulter and Coals (1986)، Fujiwara and De Silva (1990)، Park and Liebman (1993)، Gupta and Bhave (1996)، Guercio and Xu (1997)، Devi Prasad and Park (2004)). عملکرد شبکه تحت حوادث شکست لوله به مقدار انتخاب شده از مقادیر قابلیت اطمینان وابسته است (Gupta et al.,2013). Kessler et al. (1990) مفهوم یک سطح (لوله) حذف شده را به گونه‌ای تعریف کردند که در رویداد شکست هر یک از لوله‌ها، عملکرد هیدرولیکی تأمین شود. آن‌ها مدلی بر اساس برنامه‌ریزی خطی برای طراحی شبکه در یک سطح (لوله) حذف شده از سیستم پیشنهاد دادند. Ormsbee and Kessler (1990) نرم‌افزاری را برای استحکام و گسترش شبکه‌های توزیع آب توسعه دادند. Agrawal et al. (2007) از یک روش تکرار شونده بر اساس سبک و سنگین کردن بین هزینه و قابلیت اطمینان برای بهبود طراحی اولیه انتخاب شده به منظور دستیابی به طراحی در یک سطح حذف شده استفاده کردند. Gupta et al. (2013) هزینه بهینه یک شبکه دوحلقه‌ای را با استفاده از الگوریتم ژنتیک در یک سطح حذف شده (شکست هر یک از لوله‌های شبکه) تحت تقاضای فازی بدست آوردند.

در این تحقیق با فازی در نظر گرفتن تقاضای آب در گره‌ها و توسعه مدلی به صورت تلفیق الگوریتم ژنتیک با نرم‌افزار EPANET، از طریق کدنویسی در محیط MATLAB به بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب با تقاضای فازی تحت شرایط حذف هر یک از لوله‌ها از شبکه پرداخته می‌شود. به‌طوریکه با استفاده از ارتباط بین هدهای فازی در دسترس و هد مطلوب گره‌ها محدودیت‌های فازی به محدودیت‌های قطعی تبدیل می‌شوند. برای صحت‌سنجی مدل به بهینه‌سازی شبکه توزیع آب تک منبعی پرداخته می‌شود سپس به عنوان مطالعه موردی مدل برای شبکه توزیع آب شهر جنگل اجرا می‌شود.

مواد و روش‌ها

تقاضای فازی و درجه قابل قبول بودن هد گره‌ها

یک متغیر فازی توسط محدوده‌ای از مقادیر با درجه عضویت مربوط به هر یک از این مقادیر تعریف می‌شود. توزیع امکان پذیری تقاضای گره‌ها با استفاده از تابع عضویت ذوزنقه‌ای در شکل(۱) ارائه شده است. ساختن تابع توزیع امکان پذیری تقاضای گره و توابع عضویت رضایت مصرف کنندگان از میزان هد گره یکی از سخت‌ترین نظریه ها و وظایف عملی در استفاده از نظریه مجموعه فازی در تجزیه و تحلیل شبکه‌های توزیع آب است. در هر حال پارامترهای تابع عضویت معمولاً با ترکیبی از تجزیه و تحلیل داده‌های کمی در دسترس و یک ارزیابی ذهنی از اطلاعات کیفی در دسترس تعیین می‌شوند.

در شکل (۲) یک تابع عضویت مثلثی تقاضای گره نشان داده شده است. در این شکل، $2q_j$ محتمل‌ترین تقاضا در گره j است که بالاترین درجه امکان پذیری به آن تعلق دارد و با احتمال کمتری تقاضا بین $1q_j$ و $2q_j$ یا بین $2q_j$ و $3q_j$ قرار دارد و احتمال اینکه تقاضا از $1q_j$ کمتر یا از $3q_j$ بیشتر شود صفر است. همان گونه که در شکل (۳) نشان داده شده است. هد مطلوب بین $2H_j$ و $3H_j$ قرار داشته و بالاترین درجه مقبولیت (یک) را دارد. میزان قابل قبول بودن هد از $2H_j$ به $1H_j$ و از $3H_j$ به $4H_j$ کاهش می‌یابد و هد کمتر از $1H_j$ غیر قابل قبول است زیرا در این شرایط هیچ آبی به مصرف کننده نمی‌رسد (درجه مقبولیت صفر است). همچنین

هد بالای $4H_j$ نیز به دلیل اینکه به تجهیزات مصرف کننده خسارت وارد می‌کند غیر قابل قبول است که در این مورد بایستی تجهیزات به اندازه کافی مناسب باشند تا حداکثر فشار استاتیک را تحمل کنند. علاوه بر این می‌توان تابع عضویت هد مطلوب گره‌ها را به صورت شکل (۴) در نظر گرفت که در این حالت هر میزان هد بالاتر از $2H_j$ قابل قبول است (درجه مقبولیت در این حالت برابر ۱ است)، درجه مقبولیت از $2H_j$ به $1H_j$ کاهش می‌یابد تا اینکه برای هدهای کمتر از $1H_j$ میزان قابل قبول بودن هد به صفر می‌رسد. در این تحقیق از تابع عضویت شکل (۴) برای سنجش مطلوب بودن هدها استفاده می‌شود.

با این تعاریف عملکرد شبکه وقتی رضایت بخش است که مصرف کننده مقدار آب مورد نیاز را در هد مطلوب بدست آورد. در صورتی که مصرف کننده مقدار آب مورد نیاز را در هدی کمتر از هد مطلوب بدست آورد یا مقداری کمتر از مقدار آب مورد نیاز را در هد مطلوب بدست بیاورد عملکرد شبکه رضایت بخش نخواهد بود.

مدل‌سازی

فرمول بندی مسئله

تابع هدف مدل بهینه‌سازی فازی برای حداقل‌سازی هزینه شبکه مطابق رابطه (۱) می‌باشد.

$$Min \sum_{x=1}^{X} C_x L_x \qquad (۱)$$

محدودیت‌ها نیز به صورت زیر می باشند:

۱) پیوستگی جریان در گره‌ها

$$\sum_{x\in j} \hat{Q}_x - \hat{q}_j = 0, \dots \forall j \qquad (۲)$$

۲) افت-هد حلقه برای همه حلقه‌ها

$$\sum_{x\in l} \hat{h}_x = 0, \dots \forall l \qquad (۳)$$

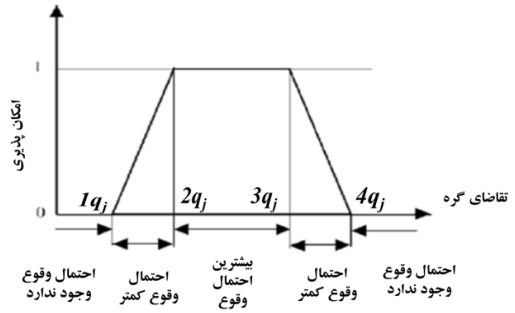
۳) محدودیت هد در دسترس در همه گره‌های تقاضا

$$\widehat{H}_j^{avl} \subseteq \widehat{H}_j \qquad (۴)$$

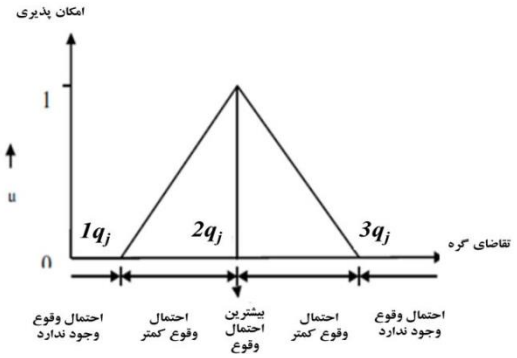
۴) محدودیت متغیرهای تصمیم گیری

$$D_x \in \overrightarrow{CD} = \{D_{min}, \dots, D_{max}\}$$
$$x = 1, \dots, X \qquad (۵)$$

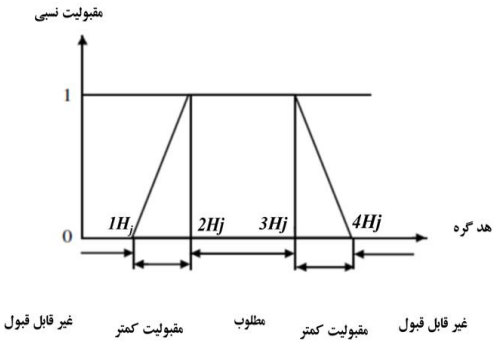
که X تعداد لوله‌ها در شبکه، C_x هزینه واحد طول لوله برای قطر انتخاب شده لوله x، L_x طول لوله x، $\hat{Q}_x$ جریان فازی در لوله x مطابق با تقاضای فازی گره $\hat{q}$، $\hat{q}_j$ تقاضای فازی در گره j، $\hat{h}_x$ افت هد فازی در لوله x، $\widehat{H}_j^{avl}$ هد فازی در دسترس گره j، $\widehat{H}_j$ هد



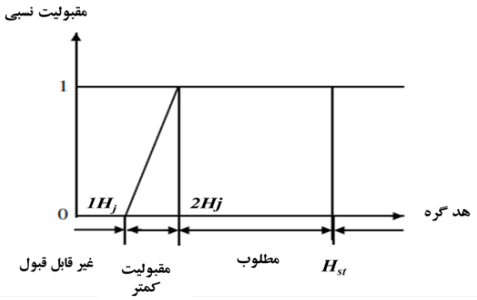
شکل(۱): تابع عضویت ذوزنقه‌ای تقاضا در گره j (Gupta et al., 2013)



شکل(۲):تابع عضویت مثلثی تقاضا در گره j (Gupta et al., 2013)



شکل(۳):تابع عضویت هد مطلوب گره‌ها (Gupta et al., 2013)



شکل(۴): تابع عضویت هد مطلوب گره‌ها وقتی که هر فشاری بالاتر از فشار استاتیک قابل قبول باشد (Gupta et al., 2013)

قابل قبول گره j ، D_x قطر لوله x و D قطر داخلی لوله‌های در دسترس می‌باشد(به منظور گسسته سازی قطرها از روش ارائه شده در تحقیق حقیقی و احمدی(۱۳۸۹) استفاده شده است). محدودیت‌های فازی می‌توانند با استفاده از ارتباط بین هد فازی در دسترس بدست آمده برای تقاضای فازی و هد فازی قابل قبول گره‌ها به محدودیت‌های قطعی تبدیل شوند تمامی محدودیت‌ها باید برای هر دو حالت کارکرد همه لوله‌ها[1](APWC) و برکناری یکی از لوله‌ها از شبکه[2] (1-PFC) تأمین شوند.

تبدیل محدودیت‌های فازی به محدودیت‌های قطعی

در تابع عضویت هد در دسترس گره‌ها(شکل (۵)) تقاضای فازی تقریباً مثلثی شکل است. وقتی هد در دسترس گره‌ها حداقل باشد که تقاضا در تمام گره‌ها حداکثر باشد و بالعکس. بنابراین مقادیر $^3H_j^{avl}$ که در شکل حداقل‌اند مطابق با حداکثر تقاضا در گره‌ها ($3q_j$) هستند و مقادیر $^1H_j^{avl}$ که در شکل حداکثراند مطابق با مقادیر $1qj$ (حداقل تقاضا در گره‌ها) می‌باشند. مقادیر $^2H_j^{avl}$ مطابق با مقادیر $2q_j$ (تقاضای نرمال در شکل (۲)) در تمام گره‌ها هستند. هد در دسترس گره‌ها برای هر دو حالت (همه لوله‌ها در دسترس باشند و برکناری یکی از لوله‌ها از شبکه) باید در حد مطلوب باشد (مطابق شکل (۳) یا (۴) که توسط کاربر در نظر گرفته می‌شود). برای تقاضای $2q_j$ (محتمل‌ترین تقاضا در شکل (۲)) هد در دسترس $^2H_j^{avl}$ باید برای هر دو حالت کارکرد همه لوله‌ها و برکناری یک لوله از شبکه بین $2H_j$ و $3H_j$ (برای استفاده از شکل (۳)) و بالاتر از $2H_j$ (برای استفاده از شکل(۴)) باشد، برای $3q_j$ (تقاضا با احتمال وقوع کمتر در شکل (۲))، $^3Hj^{avl}$ باید از $1H_j$ (شکل (۳) یا (۴)) بیشتر باشد و به طور مشابه برای $1qj$ (تقاضا با احتمال وقوع کمتر در شکل (۲))، $^1H_j^{avl}$ باید کمتر از $4H_j$ باشد (شکل (۳)).

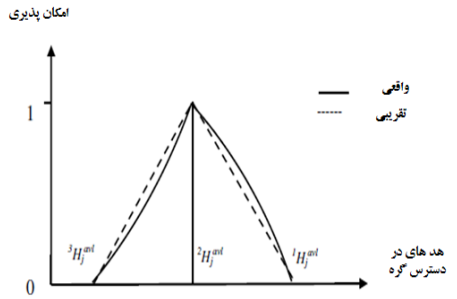
$$^2H_j^{avl} \geq 2H_j \qquad (۶)$$

$$^2H_j^{avl} \leq 3H_j \qquad (۷)$$

$$^3H_j^{avl} \leq 1H_j \qquad (۸)$$

$$^1H_j^{avl} \leq 4H_j \qquad (۹)$$

در واقع روابط (۶) تا (۹) به این منظور به کار می‌روند که هد گره‌ها برای بدترین شرایط (مثلاً تقاضای همه گره‌ها بالاترین یا پایین ترین حد را داشته باشند) در محدوده مطلوبی قرار داشته باشد در غیر اینصورت مقدار تقاضا در هر نقطه از زمان هر مقداری داخل محدوده $1q$ تا $3q$ می‌تواند باشد.



شکل(۵): تابع عضویت هد در دسترس گره‌ها برای توابع عضویت مثلثی تقاضای فازی (Gupta et al., 2013)

1- All Pipes Working Condition
2- Pipe Failure Condition

فرمولاسیون بهینه‌سازی شبکه توزیع آب در یک سطح (لوله) حذف شده با تقاضای فازی

فرمولاسیون ارائه شده در این بخش از تحقیق Gupta et al.(2013) استخراج شده است. تابع هدف (رابطه (۱)) برای طراحی شبکه توزیع آب (حداقل کردن هزینه) در یک سطح برکناری با تقاضای فازی به رابطه (۱۰) تبدیل می‌شود که در صورت انحراف از محدودیت‌های روابط (۶) و (۸) ترم‌های جریمه هزینه (P_1 و P_2) در تابع هدف به صورت زیر اعمال می‌شوند.

$$Min \sum_{x=1}^{X} C_x L_x + \sum_{k=0}^{k=X} P_1 \times \sum_{j=1}^{nd} \psi_j^2 + \sum_{k=0}^{k=X} P_2 \times \sum_{j=1}^{nd} \psi_j^3 \qquad (۱۰)$$

$$\psi_j^2 = \begin{cases} (2H_j - {}^2H_j^{avl}) & 2H_j^{avl} < 2H_j \\ 0 & {}^2H_j^{avl} \geq 2H_j \end{cases} \qquad j=1, n_d \qquad (۱۱)$$

$$\psi_j^3 = \begin{cases} (1H_j - {}^3H_j^{avl}) & 3H_j^{avl} < {}_1H_j \\ 0 & {}^3H_j^{avl} \geq 1H_j \end{cases} \qquad j=1, n_d \qquad (۱۲)$$

در رابطه (۱۰)، k شرایط شکست لوله k ام می‌باشد و k=۰ شرایط کارکرد همه لوله‌ها می‌باشد. همچنین ψ_j^2 ترم انحراف از رابطه (۶) و ψ_j^3 ترم انحراف از رابطه (۸) می‌باشند. در صورتی که روابط (۷) و (۹) نیز در نظر گرفته شوند (تابع عضویت هد مطلوب شکل (۳) در نظر گرفته شود) ترم‌های جریمه‌ای مطابق با آن‌ها نیز باید در نظر گرفته شود. همچنین اگر محدودیت سرعت نیز در مسئله برنامه‌ریزی شده وجود داشته باشد؛ دو ترم جریمه دیگر (مثلاً P_3 در صورت انحراف سرعت حاصل از آنالیز هیدرولیکی شبکه با $2q$ از محدوده سرعت تعریف شده و P_4 در صورت انحراف سرعت حاصل از آنالیز هیدرولیکی شبکه با $1q$ از محدوده سرعت تعریف شده) نیز بایستی به رابطه (۱۰) اضافه شوند. در این تحقیق همه ترم‌های جریمه ۲۰٪ درصد از هزینه شبکه در نظر گرفته شده‌اند. برای طراحی شبکه توزیع آب (حداقل کردن هزینه) با تقاضای فازی (بدون در نظر گرفتن حذف هر یک از لوله‌ها از شبکه) کافی است عبارات $\sum_{k=0}^{k=X} P_1$ و $\sum_{k=0}^{k=X} P_2$ موجود در رابطه (۱۰) را به ترتیب برابر P_1 و P_2 درنظر بگیریم (حالت کارکرد همه لوله‌ها k=۰) ؛ بقیه روابط در هر دو مدل مشترک است.

روش GA در بهینه‌سازی شبکه توزیع آب در یک سطح حذف شده با تقاضای فازی

از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی فرمولاسیون ارائه شده در بخش ۳-۳ (در شرایطی که محدودیت‌ها باید برای دو حالت کارکرد همه لوله ها و حذف هر یک از لوله‌ها از شبکه تأمین شوند) استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک با ایجاد جمعیت اولیه فضای پاسخ را جست و جو می‌کند، در فضای جست و جو آن‌ها را انتخاب می‌کند بعد از آن برازندگی هر پاسخ را ارزیابی می‌کند و ترکیب می‌کند. عملگرهای انتخاب، ارزیابی، ترکیب، جهش و ایجاد نسل بعدی بعد از اجرای چندین نسل (که توسط کاربر مشخص شده است) یا زمانی که دیگر بهبودی در برازندگی مشاهده نشود متوقف می‌شوند. پارامترهای تنظیم شده GA برای حل مسائل تحقیق حاضر عبارتند از جمعیت اولیه (۱۶۰)، جمعیت نسل‌های بعد (۸۰)، احتمال ترکیب (۰/۹)، احتمال جهش(جهش خطی از ۰/۰۵ تا۰/۰۱)، انتخاب (مرتبه‌ای)، ترکیب (یکنواخت)، تعداد بیت‌های مربوط به هر کروموزوم (۴) و نوع GA (باینری). تولید جمعیت اولیه بصورت تصادفی و با توزیع یکنواخت انجام می‌شود. گام‌های GA برای حل رابطه (۱۰) در $\alpha - cut$=۰ :

۱- تولید جمعیت اولیه به طور تصادفی.

۲- آنالیز هیدرولیکی برای هر کروموزوم (جواب) برای ${}_2q$ (محتمل‌ترین تقاضا) و $1q$ و $3q$ (تقاضا با کمترین احتمال وقوع) با در نظر گرفتن دو حالت کارکرد همه لوله‌ها و برکناری یک به یک لوله‌ها از شبکه (در مجموع

3(x+1) آنالیز برای یک شبکه با x لوله و تابع عضویت مثلثی تقاضای فازی انجام می‌شود).

۳- بدست آوردن هزینه و ترم‌های جریمه هزینه در صورتی که هد گره‌ها تأمین نشود.

۴- تعیین برازندگی هر کروموزوم (رابطه (۱۰)).

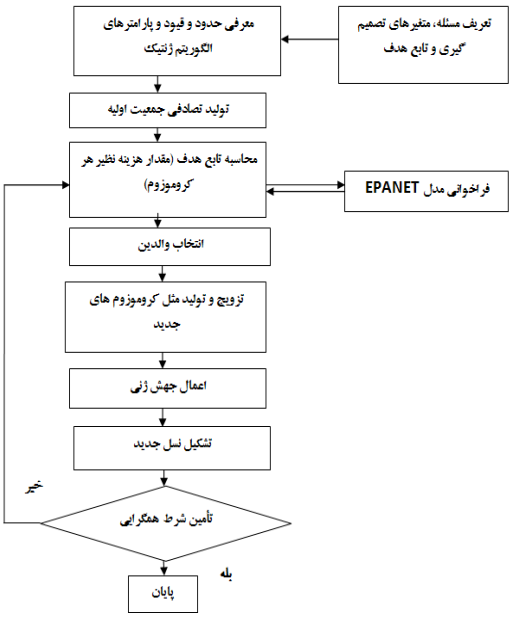
۵- اعمال عملگر انتخاب، ترکیب و جهش برای ایجاد نسل بعد.

۶- تکرار گام‌های ۲ تا ۵ تا برقرار شدن شرط همگرایی.

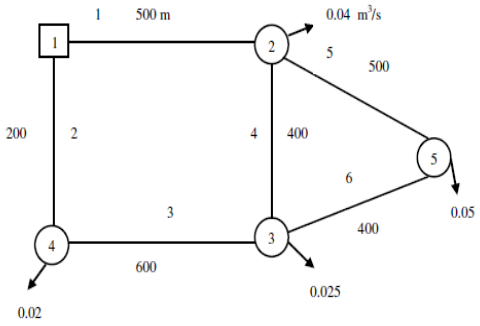
شکل(۶) فلوچارت مدل توسعه داده شده را نشان می‌دهد.

صحت‌سنجی مدل توسعه داده شده

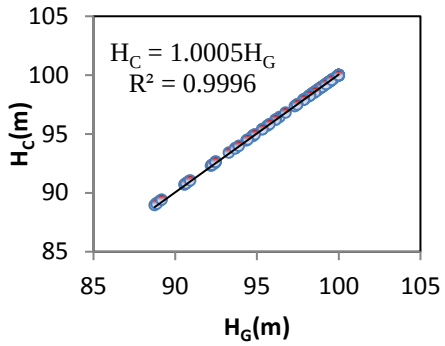
برای بررسی صحت و سقم مدل توسعه داده شده به بهینه‌سازی شبکه تک‌مخزنی شکل (۷) در یک سطح (لوله) حذف شده با تقاضای فازی پرداخته شده است. در این شبکه ضریب هایزن- ویلیامز لوله‌ها ۱۰۰ و ارتفاع گره‌های ۲ تا ۵ برابر ۷۵m می‌باشد و در دو انتهای هر لوله دو شیر قرار دارد که با بستن آن‌ها لوله از شبکه حذف می‌شود. در این شبکه هد مطلوب گره‌ها باید بیشتر از ۹۰m باشد و هد کمتر از ۸۸/۵ m غیر قابل قبول است. بقیه اطلاعات مربوط به این شبکه در جدول (۱) نشان داده شده است. جدول (۲)، با فرض ۱۰٪ عدم‌قطعیت در تقاضای گره‌ها نشان می‌دهد که مقدار بهینه بدست آمده برای این شبکه به کمک مدل توسعه داده شده تحقیق حاضر با چندین بار کاهش فضای جست و جو با مقادیر بدست آمده توسط Gupta et al. (2013) مطابقت دارد. همچنین با توجه به نمودار شکل (۸) از آن جایی که ضریب همبستگی خیلی به یک نزدیک است می‌توان اطمینان کامل از مدل توسعه داده شده را کسب نمود.



شکل (۶): فلوچارت مدل توسعه داده شده



شکل(۷): شبکه تک مخزنی(Gupta et al., 2013)



شکل(۸):نمودار همبستگی هدهای محاسبه شده تحقیق حاضر (H_C) و هدهای محاسباتی (H_G)برای تمامی شرایط عملکرد و فازی

جدول (۱): لوله‌های تجاری برای شبکه تک مخزنی (Gupta et al.,2013)

قطر (mm)	هزینه واحد طول($)	قطر (mm)	هزینه واحد طول($)
۱۰۰	۶۱۵	۳۰۰	۲۲۵۰
۱۵۰	۹۰۰	۳۵۰	۲۷۹۰
۲۰۰	۱۲۹۰	۴۰۰	۳۴۲۰
۲۵۰	۱۷۴۰		

جدول (۲): حالات بحرانی(نقاط پررنگ تر) ایجاد شده به دلیل حذف لوله‌ها از شبکه توزیع آب تک مخزنی در یک سطح (لوله) برکنار شده با تقاضای فازی به کمک مدل توسعه داده شده تحقیق حاضر

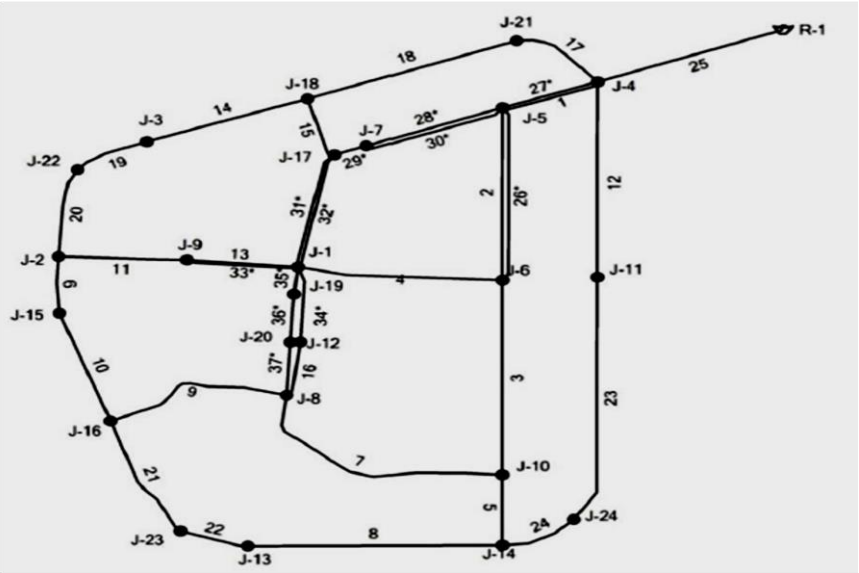
شرایط فازی	شرایط عملکرد	هد در دسترس گره‌ها (m)				
		۱	۲	۳	۴	۵
q^2	لوله یک حذف شود	۱۰۰	**۹۰/۵۶**	۹۴/۳۷	۹۸/۲۶	۹۰/۶۷
	لوله دو حذف شود	۱۰۰	۹۵/۶۴	۹۰/۸۳	**۹۰/۶۷**	۹۰/۹۳
q^3	لوله یک حذف شود	۱۰۰	**۸۸/۷۴**	۹۳/۲۹	۹۷/۹۲	**۸۸/۸۷**
	لوله دو حذف شود	۱۰۰	۹۴/۸	**۸۹/۰۶**	**۸۸/۸۷**	**۸۹/۱۷**
شماره لوله	۱	۲	۳	۴	۵	۶
قطرهای بهینه (mm)	۳۰۰	۳۵۰	۳۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۲۵۰
هزینه بهینه($)			۵۷۰۹۰۰۰			

مطالعه موردی

شهر جنگل در استان خراسان رضوی می‌باشد. اطلاعات مربوط به این شبکه در جداول (۳) و (۴) درج شده است. شبکه شهر جنگل (شکل(۹)) دارای یک مخزن در ارتفاع ۹۶۲ متر می‌باشد. محدوده مجاز تغییرات فشار در گره‌ها ۱۴ تا ۶۰ متر آب می‌باشد (فشار مطلوب گره‌ها باید بیشتر از ۲۶ m باشد و فشار کمتر از ۱۴ m غیر قابل قبول است) و سرعت در لوله‌ها ۰/۱ تا ۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در محاسبه هزینه نهایی، به

دلیل طول زیادی که خط انتقال (لوله شماره ۲۵) دارد و بزرگترین قطر موجود به این لوله اختصاص داده شده است هزینه این لوله از برآورد نهایی حذف شده است و فقط هزینه لوله‌های طراحی شده در شبکه توزیع مد نظر قرار گرفته است(لوله-های فعلی که در هزینه شبکه محاسبه نشده‌اند ستاره‌دار می‌باشند). برای طراحی این شبکه از لوله‌های پلی اتیلن (PE-80) با ضریب هایزن ویلیامز ۱۳۰ استفاده شده است (مقدم و همکاران، ۱۳۹۲). نتایج مربوط به بهینه‌سازی شبکه توزیع آب شهر جنگل با فرض۳۰٪ عدم قطعیت در تقاضای گره‌ها تحت شرایط حذف لوله‌ها از شبکه در $\alpha - cut$=۰ در جدول (۵) ارائه شده است. این جدول گره‌هایی را نشان می‌دهد که به دلیل حذف لوله‌ها از شبکه، هد در آن‌ها (نقاط بحرانی شبکه) به کمترین مقدار مجاز خود میرسد.

به منظور بررسی میزان افزایش هزینه می‌توان هزینه حاصل از اجرای مدل برای شبکه جنگل(بدون در نظر گرفتن حالت برکناری لوله ها از شبکه تحت ۳۰٪ عدم قطعیت در تقاضا)که برابر با ۲۱۱۸۱۲۷۹۲۴ می‌باشد را با هزینه بهینه درج شده در جدول(۵) مقایسه نمود.



شکل(۹): شبکه توزیع آب شهر جنگل (مقدم و همکاران، ۱۳۹۲)

جدول (۳): سایز و هزینه لوله‌های تجاری در بازار برای شبکه شهر جنگل

لوله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
قطر	۷۶/۶	۹۳/۸	۱۰۶/۶	۱۳۶/۴	۱۷۰/۶	۱۹۱/۸	۲۱۳/۲	۲۳۸/۸	۲۶۸/۶	۳۰۲/۸
هزینه	۴۹۵۶۰	۷۳۳۶۰	۹۴۳۶۰	۱۵۴۰۰۰	۲۳۹۶۸۰	۳۰۵۲۰۰	۳۷۵۲۰۰	۴۷۰۴۰۰	۵۹۳۶۰۰	۷۵۳۲۰۰

قطرها برحسب (mm) و هزینه‌ها برحسب (Rial/ m) در جدول(۳) درج شده‌اند

جدول (۴): مشخصات گره‌ها و لوله‌های شبکه توزیع آب شهر جنگل

لوله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
طول لوله (m)	۲۸۷/۷۳	۶۲۴/۵۴	۷۰۵	۵۸۲/۷۸	۲۵۴/۵۱	۲۰۵/۴۴	۸۰۵/۵۹	۷۲۳/۲۹	۵۵۶/۵۶	۴۱۷/۲۷
لوله	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
طول لوله (m)	۳۶۷/۸۹	۷۰۷/۱۴	۳۲/۹۵۰	۴۸۵/۵۵	۲۲۶/۴۷	۲۰۱/۴۷	۲۹۲	۶۲۸/۸	۲۲۵/۲۵	۳۲۳/۰۹
لوله	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶*	۲۷*	۲۸*	۲۹*	۳۰*
طول لوله (m)	۴۵۱/۷۱	۲۰۰/۸۶	۸۹/۳۳۷	۲۳۲/۵۶	۹۹۹/۸۷۹	۶۳۴/۹	۲۹۹/۶۲	۴۰۹/۰۴	۹۶/۶۲	۴۲۳/۹۸
لوله	۳۱*	۳۲*	۳۳*	۳۴*	۳۵*	۳۶*	۳۷*			
طول لوله (m)	۴۲۷/۰۲	۴۲۲/۱۵	۳۱/۵۲۸	۲۷۴/۶۲	۹۹/۰۶	۱۷۴/۰۴	۱۹۲/۳۳			
گره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
ارتفاع (m)	۹۰۱/۵	۸۹۶/۵	۸۹۵/۵	۹۰۳/۵	۹۰۳/۵	۹۰۲/۵	۹۰۱/۵	۹۰۰	۹۰۰/۵	۹۰۰/۵
تقاضا (m3/hr)	۲۱/۷۸	۷/۸۱	۲۰/۵۶	۷/۵۶	۲۲/۶۴	۳۰/۱۳	۱۳/۲۵	۳۲/۵۸	۱۸/۸۶	۳۲/۸
گره	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
ارتفاع (m)	۹۰۳/۵	۹۰۲	۸۹۹	۹۰۵	۸۹۸	۹۰۰/۵	۹۰۰/۵	۸۹۹/۵	۹۰۱/۵	۹۰۲
تقاضا (m3/hr)	۱۴/۲۹	۰	۱۸/۷۹	۹/۵۴	۷/۴۵	۱۵/۸	۱۱/۰۲	۱۶/۳۱	۰	۰
گره	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴						
ارتفاع (m)	۹۰۲	۸۹۸	۹۰۰/۵	۹۰۴						
تقاضا (m3/hr)	۰	۰	۰	۰						

جدول (۵):حالات بحرانی (نقاط پررنگ) حاصل از بهینه‌سازی شبکه شهر جنگل در یک سطح حذف شده با تقاضای فازی

لوله حذف شده	۲	۳	۸	۱۲	۱۴	۱۷	۲۳	۲۴
شرایط فازی					3q			
شماره گره					هد گره ها (m)			
۱۴	**۱۴/۱۸**	**۱۴/۱۸**	۱۵/۹۸	**۱۴/۰۲**	۱۵/۱۷	۱۵	**۱۴/۶۳**	**۱۴/۶۳**
۱۶	۱۷/۶۷	۱۸/۳۶	۱۷/۷۳	۱۸/۰۴	**۱۴/۵**	۱۶/۱۳	۱۸/۲۹	۱۸/۲۹
۲۱	۱۹/۴۳	۱۹/۵۵	۱۹/۵۱	۱۹/۴۷	۱۹/۷۵	**۱۴/۹۸**	۱۹/۵	۱۹/۵
۲۳	۱۷/۵۸	۱۷/۹۸	**۱۴/۶۶**	۱۷/۷۴	۱۵/۸۷	۱۶/۷	۱۸/۱۵	۱۸/۱۵
شماره لوله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
قطر بهینه (mm)	۳۰۲/۸	۲۶۸/۶	۲۶۸/۶	۱۹۱/۸	۱۹۱/۸	۲۱۳/۲	۱۰۶/۶	۱۳۶/۴
شماره لوله	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
قطر بهینه (mm)	۱۰۶/۶	۱۷۰/۶	۱۳۶/۴	۲۶۸/۶	۱۳۶/۴	۲۳۸/۸	۱۷۰/۶	۹۳/۸
شماره لوله	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
قطر بهینه (mm)	۲۶۸/۶	۲۶۸/۶	۲۳۸/۸	۱۹۱/۸	۱۰۶/۶	۱۷۰/۶	۲۱۳/۲	۲۳۸/۸
هزینه بهینه (ریال)					۳۷۸۹۷۷۹۶۰۸			

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توسعه مدل تلفیقی GA به همراه برنامه شبیه ساز هیدرولیکی EPANET در محیط MATLAB به بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی در یک سطح (لوله) برکنار شده با تقاضای فازی پرداخته شد. در این مدل تقاضای گره‌ها با استفاده از توابع عضویت مثلثی و تابع عضویت هد در دسترس گره‌ها (هد بدست آمده بعد از طراحی بهینه شبکه) به طور تقریبی به صورت مثلثی در نظر گرفته شدند. علاوه بر این هد مطلوب گره‌ها نیز به صورت فازی در نظر گرفته شد. با استفاده از ارتباط بین هدهای فازی در دسترس بدست آمده برای تقاضای فازی و هد فازی مورد نیاز، محدودیت‌های فازی به محدودیت‌های قطعی تبدیل شدند. در این مدل الگوریتم ژنتیک کنار برنامه تحلیل هیدرولیکی جریان قادر به بهینه سازی تابع هدف پیشنهادی(شامل هزینه اجرای شبکه و ترم‌های جریمه حاصل از آنالیز هیدرولیکی شبکه برای حالات کارکرد همه لوله‌های شبکه و برکناری تک تک لوله‌ها از شبکه که بصورت ضرایبی در آن اعمال می‌گردد) می‌باشد. یکی از مهمترین مزایای این مدل نیاز نداشتن به تعیین تابع توزیع تقاضا و برنامه‌ریزی خطی بر پایه روش Xu and Goulter (1999)، و Bhave and Gupta (2004) می‌باشد. همچنین با استفاده از این مدل می‌توان نقاط بحرانی ایجاد شده در اثر شکست احتمالی را مشخص نمود.

منابع

مقدم، ا.، علیزاده، ا. ضیایی، ا.ن. فریدحسینی، ا. و فلاح هروی، د. ۱۳۹۲. افزایش سرعت همگرایی در بهینه سازی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک با آشفتگی سریع. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) جلد ۲۸ ، شماره ۱ ،ص ۳۴-۲۲.

حقیقی، ع. و احمدی نجل، ع. ۱۳۸۹، برنامه ریزی غیر خطی و بهینه سازی شبکه های توزیع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک ، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

Agrawal, M. L., Gupta, R. and Bhave, P. R. 2007. Optimal design of level-1 redundant water distribution networks considering nodal storage. J. Environ. Engg., 133(3), 319-330.

Bhave, P. R., and Gupta, R. 2004. Optimal design of water distribution networks for fuzzy demands. Civil Engg. and Environ. Systems, 21(4), 229-245.

Branisavljević, N., Prodanović, D. and Ivetić, M. 2009. Uncertainty reduction in water distribution network modelling using system inflow data. J. Urban Water, 6(1), 69–79.

Cisty M. 2010. Hybrid genetic algorithm and linear programming method for least-cost design of water distribution systems, Water Resour. Manage., 24, 1-24.

Dany, G.C., Simpson, A.R. and Murphy, L.J. 1996. An Improved Genetic Algorithm for Pipe Network Optimization. J. Water Resour Res, 32(2), 449–458.

Dongre, S. R., Gupta, R. and Bhave, P. R. 2011. Optimal design of water distribution networks for uncertain demands. 34th IAHR World Congress, Brisbane, Australia.

Haghighi A., Samani H.M.V. and Samani Z.M.V. 2011. GA-ILP method for optimization of water distribution networks, J. Water Resour. Manage., 25, 1791–1808.

Shibu, A., and Janga Reddy, M. 2011. Uncertainty Analysis of Water Distribution Networks by Fuzzy- Cross Entropy Approach. World Academy of Science, Engineering and Technology,59.

Shibu, A., and Janga Reddy, M. 2014. Optimal Design of Water Distribution Networks Considering Fuzzy Randomness of Demands Using Cross Entropy Optimization. *J.Water Resour Manage.*28, 4075–4094.

Spiliotis, M., and Tsakiris G. 2012. Water distribution network analysis under fuzzy demands. J. Civil Engg. and Environ. Systems, 29 (2), 107-122.

Gupta R., and Bhave, P. R. 2007. Fuzzy parameters in pipe network analysis. Civil Engg. and Environ. Systems, 24(1), 33-54.

Gupta, R., Dongre, S. R., and Tyagi, A. 2013. Optimal Design of Level-1 Redundant Water Distribution Networks with Fuzzy Demands. World Environmental and Water Resources Congress,ASCE, 1382-1391.

Gupta, R., Harkutiya, J., Dongre, Sh., and Ormsbee, L. (2014). "Fuzzy Analysis of Pressure-Deficient Water Distribution Networks." World Environmental and Water Resources Congress,ASCE, 435-444.

Kadu, M. S., Gupta, R., and Bhave, P. R. 2008. Optimal design of water networks using modified genetic algorithm with reduction in search space. J. Water Resour. Plan. and Mgmt., ASCE, 134(2), 147-160.

Kessler, A., Ormsbee, L. E., and Shamir, U. 1990. A methodology for least cost design of invulnerable water distribution networks. Civil Engg. Systems, 7(1), 20-28.

Krapivka, A. and Ostfeld, A. 2009. Coupled genetic algorithm-linear programming scheme for least-cost pipe sizing of water-distribution systems, J. Water Resour. Plann. Manage., 135, 298–302.

Ormsbee, L., and Kessler, A. 1990. Optimal upgrading of hydraulic-network reliability. J. Water Resour. Plan. and Mgmt., ASCE, 116(6), 784-802.

Reca J., Martínez J., Gil C. and Baños R. 2008. Application of several meta-heuristic techniques to the optimization of real looped water distribution networks, J. Water Resour. Manage., 22, 1367-1379.

Revelli, R., and Ridolfi, L. 2002. Fuzzy approach for analysis of pipe networks. J. of Hydraulic Engg. 128(1), 93-101.

Simpson A.R., Dandy G.C. and Murphy L.J. 1994. Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization, J. Water Resour. Plan. Manage., 120(4), 423-443.

Savic D.A. and Walters G.A. 1997. Genetic algorithms for least cost design of water distribution networks, J. Water Resour. Plan. Manage., 123(2), 67-77.

Vairavamoorthy K. and Ali M. 2005. Pipe index vector: A method to improve genetic-algorithmbased pipe optimization, J. Hyd. Eng., 131(12), 1117-1127.

Wu, Z.Y., and Simpson, A.R., 2001. Competent Genetic-Evolutionary Optimization of Water Distribution Systems. Journal of Computation in Civil Engineering, 15 (2), 89–101.

Xu, C., and Goulter, I. C. 1999. Optimal design of water distribution networks using fuzzy optimization." Civil Engg. and Environ. Systems, 16(4), 243-266.

Optimal Design of Level-1 Redundant Water Distribution Networks with Fuzzy Demands

Samira Goharimoghadam[1], Majid Rahimpour[2], Kourosh Qaderi[3] and Mohammad Mehdi Ahmadi[4]

Abstract

Optimization of water distribution networks, regardless of uncertainties of effective variables in design of network is unrealistic. Therefore, developing method based on uncertainties variables in water distribution network design is necessary. In this research, a model based on simulation-optimization approach (combination of genetic algorithm and EPANET software) with fuzzy variables has been developed. Also, water distribution networks without causing disruption in their Performance with level-1 redundant have been optimized. In this model, fuzzy nodal demands and fuzzy available nodal heads are characterised by triangular membership functions. Furthermore, desirable nodal heads are also considered as fuzzy and relationship between fuzzy available nodal heads and fuzzy desirable nodal heads is used to convert fuzzy constraints to crisp constraints. For validation of model, the program has been implemented for optimization of level-1 redundant water distribution single network with fuzzy demands then paid to the optimization Jangal water distribution network with fuzzy demands (under one pipe failure condition) as a case study. The result of this model shows the cost of optimal design of Level-1 redundant water distribution networks model with fuzzy demands regard of scale of network 30% to 70% is increases due to providing nodal heads to offset the one pipe failure condition from network.

Keywords: Water distribution networks, Optimization, GA, Uncertainty, Fuzzy parameter.

1- M. Sc. student of water structures, Department of water engineering, Shahid bahonar university.
Email: asad18_me5@yahoo.com.
2- Associ. Prof. of water Eng., Department of water engineering, Shahid bahonar university of kerman, Kerman, Iran, Email:rahimpour@uk.ac.ir,(Corresponding Author).
3-Associ. Prof. of water Eng., Department of water engineering, Shahid bahonar university of kerman, Kerman, Iran, Email:Kouroshqaderi@uk.ac.ir.
4- Associ. Prof. of water Eng., Department of water engineering, Shahid bahonar university of kerman, Kerman, Iran, Email: ahmadi_mm@ uk.ac.ir.