

مکانیابی و تنظیم بهینه شیرهای کاهنده فشار در شبکه‌های آبرسانی شهری به منظور مدیریت فشار و کاهش نشت

حامد منصف^۱، محمد نقاش زادگان^{۲*}، علی جمالی^۳، راضیه فرمانی^۴

۱. دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۲. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۳. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۴. دانشیار، مرکز سیستم‌های آب، دانشگاه اگرتز، اگرتز، انگلستان

naghash@guilan.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۷/۰۷/۱۸

تاریخ دریافت ۹۷/۰۴/۲

چکیده

با توجه به متغیر بودن میزان تقاضا در ساعات مختلف شبانه روز از فصول متفاوت سال، فشار شبکه توزیع آب در زمان‌های مختلف، متفاوت خواهد بود. در مواقع کاهش تقاضا نسبت به بیشینه مصرف، فشار شبکه افزایش می‌یابد و این افزایش فشار منجر به افزایش نشت از اتصالات فرسوده و شکستگی‌های کوچک می‌شود. یکی از روش‌های کاهش نشت، کاهش دادن فشار مازاد موجود در شبکه است که این مهم می‌تواند توسط شیرهای کاهنده فشار^۱ محقق شود. تعداد و مکان بهینه نصب این شیرها از پارامترهای تاثیرگذار در مدیریت فشار شبکه، کاهش فشار مازاد و در نتیجه کاهش نشت است. در تحقیق حاضر روشی برای محاسبه تعداد و مکان بهینه شیرهای کاهنده فشار در شبکه‌های توزیع آب ارائه شده است. در این روش، ابتدا با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی که از پیوند الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تکامل تفاضلی تشکیل شده، تعداد و مکان بهینه شیرهای کاهنده فشار در شبکه توزیع آب شهری مشخص می‌شود. سپس برای مدیریت فشار در هنگام بهره‌برداری از شبکه، میزان فشار خروجی بهینه هر یک از شیرها برای رسیدن به کمترین میزان نشت به دست می‌آید. در نهایت روش ارائه شده روی یک شبکه آبرسانی واقعی در استان گیلان اعمال شده و ضمن تعیین تعداد و مکان بهینه شیرهای کاهنده فشار، فشار بهینه خروجی شیرها تنظیم شد. نتایج نشان دادند که با مدیریت فشار شبکه، می‌توان میزان نشت آب را از ۲۱٫۹٪ به ۱۲٫۳٪ (به اندازه ۴۱٫۳٪) کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های آبرسانی شهری، مکان‌یابی شیرهای کاهنده فشار، مدیریت فشار، کاهش نشت زمینه، بهینه‌سازی

۱- مقدمه

شبکه های آبرسانی شهری یکی از زیرساخت های حیاتی هر شهر محسوب می شود. این شبکه ها به گونه ای طراحی می شوند تا بتوانند در پایان دوره طرح، حداقل های مورد نیاز مشترکین را در لحظات اوج مصرف تامین نمایند. این زمان مربوط به پر مصرف ترین ساعات در گرمترین روز از سال پایانی دوره طراحی است و در سایر زمان ها، مصرف کمتر از میزان تقاضا در ساعات اوج مصرف می باشد [1]. این بدان معناست که در سایر زمان ها فشار در شبکه بیشتر از حداقل فشار قابل قبول است. افزایش فشار در شبکه باعث افزایش نشت از اتصالات و شکستگی های غیر قابل رویت در لوله های فرسوده می شود. در نتیجه به منظور کاهش نشت لازم است به هر شکل ممکن فشار مازاد در شبکه به حداقل مجاز رسانده شود. نویسندگان زیادی در دهه های اخیر به بررسی روش های کاهش فشار به عنوان یکی از شاخص های نشت در شبکه آبرسانی پرداختند [2-4]. این پژوهشگران پیشنهاد دادند که بهترین راه حل برای مدیریت فشار استفاده از تجهیزاتی برای تلف کردن فشار مازاد در شبکه است. شیرهای کاهنده فشار (PRV) به خوبی برای انجام این مهم قابل استفاده هستند. این شیرها بدون اینکه در میزان جریان یا فشار بالادست تغییر ایجاد نمایند، فشار خروجی خود را به میزان تعیین شده تقلیل می دهند [4-6].

شیرهای کاهنده فشار در سه حالت خروجی ثابت، تنظیم شده با زمان و تنظیم شده با جریان^۱ مورد استفاده قرار می گیرند [7]. نکته مهم در گام بعدی تعیین تعداد و محل نصب این شیرها در شبکه توزیع آب است. Savic and Walter [8] با استفاده از شبیه سازی استاتیکی، مدلی را برای تعیین محل شیر در شبکه ارائه دادند، اما در مطالعه آنها شیرها تنها قابلیت باز یا بسته شدن کامل را داشتند. Reis and Chaudhry [6] نیز در ادامه تحقیقات نویسنده قبل و با فرض معین بودن تعداد شیرها، چندین سناریو مصرف را در طول فرآیند بهینه سازی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. Araujo et al. [9] با استفاده از الگوریتم ژنتیک روشی برای یافتن تعداد و مکان بهینه شیرهای

کاهنده فشار ارائه داده اند. آنها ضریب زبری لوله را به عنوان متغیر طراحی در نظر گرفته و با استفاده از الگوریتم بهینه سازی خود ضریب زبری بهینه برای ایجاد کمترین فشار مازاد در شبکه را محاسبه نمودند. در نهایت لوله هایی که دارای ضرایب زبری غیر متعارف (بیشتر از ۹۰٪ زبری واقعی لوله) بودند به عنوان مسیرهای بالقوه برای نصب شیر کاهنده فشار معرفی شدند. ایراد اصلی کار آنها تغییر ضریب زبری تمامی لوله ها در پروسه بهینه سازی بود در حالی که بهتر است تغییرات تنها روی لوله هایی که برای نصب شیر بالقوه هستند اعمال شود. Liberatore & Sechi [10] با استفاده از یک روش ابتکاری فشار مرجع، ضمن بررسی هیدرولیکی شبکه در ساعات مختلف شبانه روز و رسم خطوط هم تراز فشار، لوله هایی را که در ساعات کم مصرف، خطوط هم تراز فشار را قطع نمودند به عنوان نقاط بالقوه برای نصب شیرهای کاهنده فشار معرفی کردند. آنها همچنین از الگوریتم بهینه سازی جستجوی پراکنده^۲ برای تنظیم بهینه خروجی شیرها در سناریوهای مختلف مصرف استفاده نمودند. Nicolini & Zovatto [7] از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک چند هدفه برای بررسی همزمان تعداد، مکان و فشار خروجی بهینه شیرهای کاهنده فشار در شبکه توزیع آب استفاده نمودند. تابع هدف اول در مطالعات این پژوهشگران کمینه کردن تعداد شیرهای کاهنده فشار در راستای کاهش هزینه اولیه و هدف دوم کمینه کردن میزان نشت در شبکه بیان شد. آنها از تغییر قطر لوله به عنوان متغیر طراحی استفاده نمودند تا با کاهش قطر و افزایش افت فشار در لوله، شیر کاهنده فشار نصب شده بر روی آن لوله را شبیه سازی نمایند. Eck & Mevissen [11] نیز یک برنامه غیرخطی عدد صحیح ترکیبی (MINLP)^۳ را برای حل مساله مکانیابی شیرهای کاهنده فشار ارائه کردند که در آن متغیرهای باینری موقعیت شیرهای کاهنده فشار را بر روی لوله هایی با جریان دو طرفه نشان می دهد. مشکل اصلی روش ارائه شده توسط این پژوهشگران زمان بسیار زیاد لازم برای حل یک مساله واقعی است. Dai & Li [12] در راستای توسعه و اصلاح روش ارائه شده توسط Eck

3. Mixed-Integer Nonlinear Program (MINLP)

1. Fixed outlet, Time modulated, and Flow modulated
2. Scatter-Search

شکن ورودی شبکه تهیه و اعمال نمودند. نتایج مطالعات آنها منجر به کاهش ۳۵ درصدی حداقل جریان شبانه شد. مهدوی و همکاران [17] با استفاده از الگوریتم ژنتیک تک هدفه و چند هدفه طی دو مرحله به مکانیابی بهینه شیرهای کاهنده فشار پرداختند. هدف بهینه - سازی در مرحله اول مطالعات آنها کاهش نشت و در مرحله دوم کاهش نشت و کاهش تعداد شیرهای کاهنده فشار بود. مودنی و همکاران [18] نیز از الگوریتم کرم شبتاب برای مکانیابی بهینه و تنظیم شیرهای فشار شکن استفاده نمود. آنها توانستند با استفاده از الگوریتم کرم شبتاب کاهش قابل توجهی در نشت شبکه ایجاد نمایند. در تمامی مطالعات صورت گرفته فوق از یک نوع الگوریتم بهینه سازی بطور همزمان برای انتخاب مکان بهینه شیر و همچنین فشار بهینه خروجی هر شیر استفاده شده است. با توجه به متفاوت بودن ماهیت متغیرهای طراحی در مساله حاضر، استفاده همزمان آنها در پاسخ می تواند سرعت رسیدن به پاسخ بهینه را کاهش داده یا پاسخ های بهینه محلی را به عنوان پاسخ بهینه نهایی ارائه دهد. همچنین اجرای چند باره کد ممکن است به پاسخ های متفاوت منجر شود. برای جبران نقاط ضعف ذکر شده، در این مطالعه یک الگوریتم بهینه سازی تلفیقی از دو الگوریتم ژنتیک باینری و الگوریتم تکامل تفاضلی ارائه شده است. در پروسه بهینه سازی الگوریتم ژنتیک مکان نصب شیرهای کاهنده فشار را به الگوریتم تکامل تفاضلی پیشنهاد می دهد تا فشار خروجی بهینه شیرها را به منظور کاهش فشار مازاد در شبکه محاسبه نماید. چیدمان ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک و فشار خروجی ارائه شده توسط الگوریتم تکامل تفاضلی منجر به محاسبه میزان نشت در شبکه می شود که الگوریتم در نسل های بعدی برای کمینه کردن میزان این نشت با تغییر مکان شیرها اقدام خواهد نمود. در نهایت پس از درستی آزمایی نتایج به دست آمده از الگوریتم ارائه شده، روش فوق روی شبکه آبرسانی مسکن مهرشهر رشت اعمال و مکان بهینه شیرهای کاهنده فشار و همچنین تنظیمات بهینه شیرها (فشار خروجی آنها) با توجه به تعداد مورد نظر مشخص شد.

Mevissen & [11] از یک برنامه ریاضی با محدودیت های تکمیلی (MPCC)^۱ استفاده کردند. نتایج نشان داد روش ارائه شده توسط آنها زمان رسیدن به پاسخ بهینه را بسیار کاهش می دهد. همچنین Saldarriaga & Salcedo [13] با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چند هدفه NSGA-II، مکان و تنظیمات روزانه شیرهای کاهنده فشار در شبکه توزیع آب را بهینه سازی نمودند. هدف اول بهینه سازی در مطالعه آنها کاهش نشت و هدف دوم کاهش هزینه اولیه نصب شیر کاهنده فشار با توجه به قطر شیر قابل نصب بر روی لوله بود. در نهایت Gupta et. al. [14] با توسعه روش ابتکاری مبتنی بر فشار ارائه شده توسط Liberatore & Sechi [10] و پیوند آن با الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGA-II)، راهکاری برای تعیین مکان شیرهای کاهنده فشار در یک شبکه توزیع آب با یک الگوی تقاضای متغیر ارائه دادند. کمینه کردن نشت در شبکه به ازای تغییر تقاضا هدف اصلی مطالعه آنها بوده و با اعمال روش ارائه شده روی یک شبکه توزیع آب نمونه، نشان دادند که می توان در حدود ۲۰٪ میزان نشت را کاهش داد. تعدادی از پژوهشگران داخلی نیز در این زمینه مطالعاتی انجام داده اند که از مهمترین آنها می توان به موارد زیر اشاره نمود. تابش و واسطی [15] روشی را برای کاهش نشت در شبکه های توزیع آب شهری از طریق کمینه نمودن مجموع مربعات فشار اضافی در گره های شبکه ارائه دادند. در مطالعات ایشان به منظور تحلیل هیدرولیکی شبکه از روش مبتنی بر فشار استفاده شده است. در این نوع تحلیل در صورتی که فشار نقاط، کمتر از فشار استاندارد تعریف شده باشد، میزان آب قابل استحصال در نقاط مصرف به صورت کسری از میزان تقاضای آن نقاط تحویل می شود. در حالتی که فشار نقاط شبکه بیشتر از فشار استاندارد باشد نتایج تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا و تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار کاملاً یکسان خواهد بود. سلطانی و فغفور مغربی [16] تاثیر کاهش فشار بر میزان نشت را بررسی نمودند. آنها ضمن استفاده از نرم افزار Epanet برای تحلیل هیدرولیکی، یک برنامه زمانی برای تنظیم فشار خروجی شیر فشار

۲- روابط حاکم و روش حل مساله

۲-۱- روابط هیدرولیکی

همانگونه که در کتب مفاهیم پایه هیدرولیک و تحلیل شبکه های آبرسانی آمده است، در راستای محاسبه مجهولات مساله تحلیل هیدرولیکی شبکه توزیع آب از قانون بقای جرم (پیوستگی) و قانون بقای انرژی استفاده می شود. در مطالعه حاضر از نرم افزار Epanet 2.0 برای حل هیدرولیکی شبکه استفاده می شود تا پس از دریافت معلومات مساله (مانند طول، قطر و زبری لوله ها، رقوم و میزان تقاضای نقاط مصرف، محل نصب، تعداد و منحنی عملکرد پمپ ها، مشخصات منابع تولید و ذخیره) با استفاده از قوانین بقای جرم و انرژی و روابط محاسبه افت در لوله و اتصالات (هیزن-ویلیامز)، مجهولات مساله را (مانند سرعت آب در لوله ها و فشار در گره ها) به عنوان خروجی ارائه دهد [19]. همانگونه که در مقدمه ذکر شد، نشت آب به صورت مستمر در تعداد زیادی از اتصالات، انشعابات، ترک های مویی و گره ها رخ می دهد و مقدار آن به طور مستقیم با میزان فشار شبکه در ارتباط است [9]. رابطه بین میزان نشت و فشار بهره برداری از شبکه در یک گره توسط رابطه زیر محاسبه می شود [9]:

$$l_i(t) = k \cdot P_i(t)^a \quad (1)$$

در رابطه بالا $l_i(t)$ و $P_i(t)$ به ترتیب جریان نشت و فشار کاری نقطه i در زمان t و a و k نیز به ترتیب توان و ضریب نشت هستند. در این رابطه فرض شده که نشت متناسب با تقاضا بین تمام گره ها پخش شده است. توان نشت (a) یک عدد ثابت بین ۰٫۵ تا ۲٫۵ است که در بسیاری از مطالعات این مقدار برابر ۱٫۱۸ در نظر گرفته شده است [9]. ضریب نشت (k) نیز که به جنس لوله ها یا نوع خاکی که لوله در آن دفن است بستگی دارد و از رابطه زیر به دست می آید:

$$k = c \cdot \sum_{j=1}^M 0.5 \times L_{ij} \quad (2)$$

در رابطه بالا c ضریب تخلیه اوریفیس بوده که وابسته به شکل و قطر نشت است که در بسیاری از مقالات به مقدار ۵-۱۰ در نظر گرفته می شود [2, 7, 9]. همچنین M تعداد لوله های

متصل به نقطه i و L_{ij} طول لوله ی متصل به نقطه i از نقطه j است. در نتیجه در صورت موجود بودن فشار شبکه در نقطه i ، تعداد و طول لوله های متصل به آن نقطه، می توان میزان نشت نقطه در همان لحظه را محاسبه نمود.

۲-۲- الگوریتم حل مساله

همانگونه که در مقدمه ذکر شد، برای حل مساله از یک الگوریتم بهینه سازی تلفیقی از دو الگوریتم ژنتیک و تکامل تفاضلی استفاده شده است. در ابتدا شرح کوتاهی از روال این دو الگوریتم بهینه سازی ارائه می شود.

۲-۲-۱- الگوریتم ژنتیک^۱

الگوریتم ژنتیک، الهامی از علم ژنتیک و نظریه تکامل داروین بوده و بر اساس انتخاب طبیعی استوار است. این الگوریتم که به عنوان یکی از روش های بهینه سازی مبتنی بر جمعیت و تصادفی شناخته می شود برای اولین بار توسط Goldberg [20] در حل مسائل بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفت و بواسطه توانایی های خود امروزه جایگاه مناسبی در میان سایر روش ها دارد. در این الگوریتم، کروموزوم ها که هر یک دارای ژن هایی شامل متغیرهای مساله هستند و به صورت تصادفی انتخاب می شوند، جمعیت اولیه را تشکیل می دهند. برای تولید نسل جدید در پروسه تکامل، الگوریتم ژنتیک از عملگرهای تقاطع (Crossover) و جهش (Mutation) برای تولید کروموزوم های جدید استفاده می کند. سپس مقدار تابع هدف هر کروموزوم محاسبه شده و کروموزوم هایی که در مرحله ارزیابی دارای کیفیت بیشتری باشند برای قرار گرفتن در نسل جدید انتخاب می شوند. این مراحل تا جایی که کیفیت پاسخ به حد مورد نظر برسد ادامه پیدا می کند. الگوریتم ژنتیک باینری یکی از گونه های این الگوریتم است که ژن های موجود در کروموزوم های آن تنها قادر به پذیرفتن مقادیر صفر و یک هستند.

۲-۲-۲- الگوریتم تکامل تفاضلی^۲

الگوریتم تکامل تفاضلی یک الگوریتم تصادفی بر پایه جمعیت برای بهینه سازی توابع غیر خطی است که برای اولین بار توسط

Storn & Price [21] در سال ۱۹۹۶ مطرح گردید. تفاوت اساسی این الگوریتم با سایر الگوریتم‌های تکاملی، تغییر اولویت استفاده از عملگرهای تولید نسل است. به این صورت که در این الگوریتم بر خلاف روش‌های رایج، ابتدا جهش و سپس تقاطع صورت می‌گیرد. این الگوریتم برای تولید جمعیت جدید، اطلاعات جهت و فاصله را از اعضای جمعیت فعلی استخراج کرده سپس یک انحراف تصادفی را برای ایجاد تنوع اضافه می‌نماید. اگر پاسخ جدید مقدار تابع هدف بهتری نسبت به یک عضو جمعیت از قبل تعیین شده داشته باشد، با این عضو جایگزین خواهد شد. این فرآیند تکامل تا زمانی که معیار توقف برآورده شود ادامه می‌یابد. الگوریتم تکامل تفاضلی به واسطه تواناییش در حفظ تنوع و انجام جستجوی محلی عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌های تکاملی دارد [22]. همچنین منصوری و ترابی [23] نشان دادند این الگوریتم قابلیت خوبی برای استفاده در مسائل مرتبط با شبکه آبرسانی دارد. برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص روش کار دو الگوریتم فوق، پیشنهاد می‌شود به مراجع [20 و 21] مراجعه شود.

۲-۳- تلفیق الگوریتم ژنتیک و تکامل تفاضلی

در مطالعه حاضر از پیوستگی الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک باینری و الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی برای یافتن مکان بهینه و همچنین تنظیم فشار بهینه شیرهای کاهنده فشار استفاده شده است. در ابتدا الگوریتم ژنتیک باینری با تولید کروموزوم‌های تصادفی با ژنهای صفر و یک، مکان پیشنهادی برای نصب شیرهای کاهنده فشار را مشخص می‌کند. ژنهای صفر نشان‌دهنده لوله‌های فاقد شیر و ژنهای یک نشان‌دهنده لوله‌های دارای شیر هستند. طول هر کروموزوم به اندازه تعداد لوله با قابلیت نصب شیر بوده و تعداد کروموزوم‌ها به اندازه جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک است. شایان ذکر است اگر قرار به نصب دو شیر در شبکه باشد، در هر کروموزوم تنها دو ژن با مقدار یک وجود خواهد داشت که مکان آن در جمعیت اولیه به صورت تصادفی تعیین شده و در نسل‌های بعد بر اساس عملگرهای الگوریتم ژنتیک بهبود می‌یابند. پس از تعیین جمعیت اولیه، کروموزوم‌ها به الگوریتم تکامل تفاضلی تحویل

داده می‌شوند تا فشار خروجی بهینه شیرهای کاهنده فشار (که مکان نصب آنها در کروموزوم تحویلی مشخص شده است) مربوط به هر کروموزوم را به گونه‌ای به دست آورد که مجموع فشار مازاد در نقاط شبکه مینیمم شود. برای انجام این مهم الگوریتم تکامل تفاضلی، ضریب هیزن ویلیامز لوله‌هایی که در کروموزوم تحویلی برای نصب شیر پیشنهاد شده‌اند را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که افت لوله، معادل افت مورد نظر در شیر کاهنده فشار شود. در هر مرحله شبکه با ضرایب جدید توسط حل گر هیدرولیکی تحلیل شده و فشار گره‌ها برای محاسبه مجموع فشار مازاد به الگوریتم تکامل تفاضلی تحویل داده می‌شود. در پایان کار الگوریتم تکامل تفاضلی، فشار خروجی بهینه شیرها مشخص شده و به کروموزوم مربوطه تخصیص داده می‌شود. در این مرحله الگوریتم ژنتیک با توجه به محل نصب شیرها در کروموزوم و تنظیمات هر شیر (خروجی الگوریتم تکامل تفاضلی) میزان نشت در شبکه را با استفاده از رابطه (۱) و نتایج تحلیل هیدرولیکی محاسبه نموده و به عنوان تابع هدف کروموزوم مذکور ذخیره می‌نماید. این فرایند برای تمام کروموزوم‌های جمعیت اولیه تکرار می‌شود تا مقدار تابع هدف هر یک مشخص شود. حال الگوریتم ژنتیک با استفاده از عملگرها تقاطع و جهش نسبت به تولید کروموزوم‌های جدید، محاسبه تابع هدف، برازندگی و در نهایت تولید نسل جدید اقدام می‌نماید. این فرایند تا جایی که کیفیت پاسخ‌ها به اندازه لازم رسیده باشد ادامه پیدا می‌کند. در نتیجه کروموزوم برتر در پاسخ نهایی، مکان بهینه شیرهای کاهنده فشار را مشخص می‌کند در حالی که الگوریتم تکامل تفاضلی نیز فشار بهینه خروجی شیرها را محاسبه نموده است. برای درک بهتر الگوریتم شرح داده شده، مراحل اجرای الگوریتم در شکل (۱) نمایش داده شده است. پس از اتمام مراحل حل مساله مکانیابی شیرهای کاهنده فشار، می‌توان برای تنظیم فشار خروجی شیرهای کاهنده در هنگام بهره‌برداری (متناسب با میزان تقاضا در هر لحظه) از یک کد بهینه‌سازی دیگر بر پایه الگوریتم تکامل تفاضلی استفاده نمود.

شکل ۱- الگوریتم استفاده شده در مکانیابی بهینه شیرهای کاهنده فشار

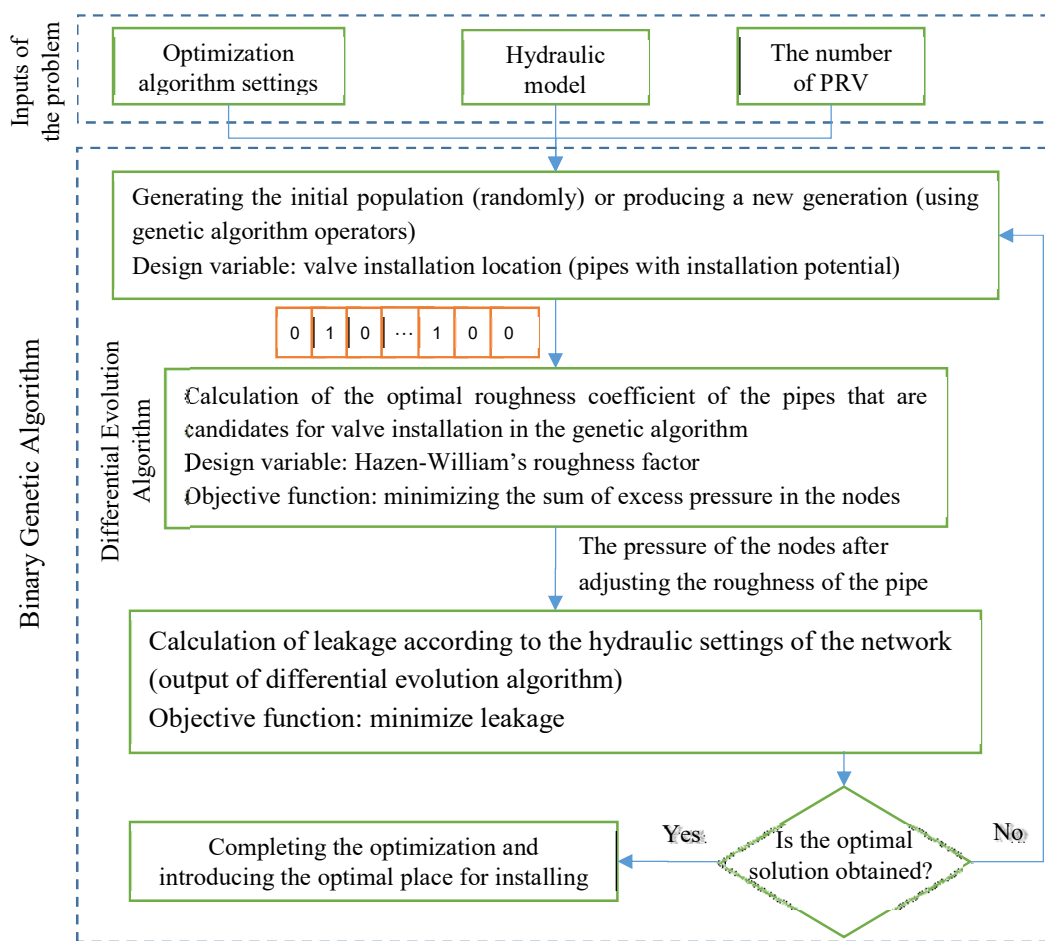


Fig. 1. The used algorithm to optimal locate pressure reducing valves

شده نسبت به زمان یا اطلاعات مخابره شده از فلومتر ورودی شبکه مشخص و به الگوریتم تعرفه شود) فشار مازاد و نشت شبکه را به صورت هوشمند کمینه نماید.

۳-۲- اعتبارسنجی الگوریتم مکانیابی

برای اعتبارسنجی روش فوق، الگوریتم ارائه شده در نرم افزار Matlab کدنمایی و با نرم افزار Epanet 2.0 به عنوان حل گر هیدرولیکی ارتباط داده شد. کد نوشته شده برای یافتن محل بهینه نصب شیرهای کاهنده فشار روی یک شبکه آبرسانی که در بسیاری از مقالات [7,9,10] برای این مهم مورد استفاده قرار گرفته، اعمال شد. این شبکه شامل ۲۲ گره، ۳۷ لوله و ۳ مخزن است. همچنین طول کل لوله های آن معادل ۴۴٫۲ کیلومتر و میزان متوسط تقاضا در آن معادل ۱۵۰ لیتر در ثانیه است. شکل (۲) ساختار شبکه مذکور را با ذکر شماره لوله ها نشان می دهد. اطلاعات جامع در مورد ویژگی های این شبکه شامل قطر لوله ها، ضریب زبری

برای انجام این مهم ابتدا باید در مدل هیدرولیکی شبکه تغییراتی صورت پذیرد و در مکان هایی که در حل مساله قبل به عنوان مکان بهینه معرفی شده اند، شیرهای کاهنده فشار نصب شود. در این مساله بهینه سازی، فشار خروجی شیرهای کاهنده فشار به عنوان متغیر طراحی و کمینه کردن نشت شبکه به عنوان تابع هدف بوده و همچنین بیشتر بودن فشار تمامی نقاط مصرف از حداقل فشار قابل قبول و بیشتر بودن نسبت فشار در دو سمت شیرهای کاهنده از عدد ۵ به عنوان قیدهای مساله در نظر گرفته می شوند. بیشترین نسبت فشار در دو سمت شیرهای کاهنده فشار برای جلوگیری از ایجاد کاویتاسیون در شیر لحاظ شده که از کاتالوگ شرکت های سازنده قابل برداشت است. برای درک بهتر، پارامترها و مدل ریاضی دو مساله در جدول شماره (۱) نمایش داده شده است. با استفاده از کد بهینه سازی دوم می توان در هر لحظه بر اساس میزان تقاضای شبکه (که می تواند از یک پروفایل تقاضای از پیش تعیین

شکل ۲- نمای شماتیک شبکه آبرسانی نمونه برای محاسبه مکان بهینه نصب شیرهای کاهنده فشار

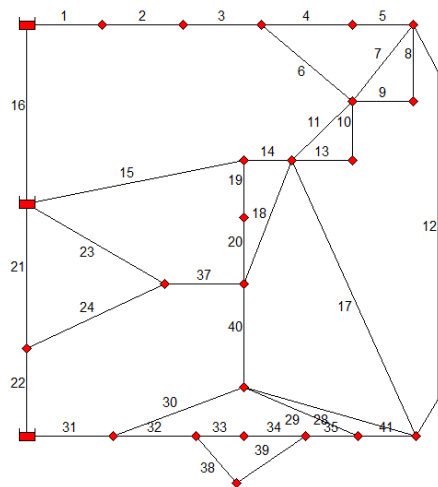


Fig. 2. Schematic view of sample WDS to calculate the optimal installation location of the PRVs

جدول ۱ پارامترهای استفاده شده در حل مساله

Problem	Optimum placement of PRV during design		Pressure management during operation
Algorithm	Genetic algorithm	Differential Evolution Algorithm	Differential Evolution Algorithm
Variable type	Binary	Real	Real
Purpose of using algorithm	Proposing the place (pipe's number) to install the PRV	Proposing the necessary pressure drop in the pipes than proposed by the genetic algorithm	Optimum setting point of the PRV
Design Variable	Pipe location for PRV installation	Hazen-William's coefficient of the pipes than proposed by genetic algorithm	of PRV Setpoint
Variable range	0-1	1-135	0 – Pressure in PRV's input
Constraints	The number of valves should be less than the number determined at the beginning of the problem	The pressure of all nodes should be higher than the minimum acceptable pressure	1-The pressure of all nodes should be higher than the minimum acceptable pressure The pressure ratio of the two 2-sides of the PRV should be less than 5
Math Model of Constraints	$\sum_{i=1}^L DV_i < Valve\ Count$	$P_i > P_{\min\ acceptable} = 2\ bar$ $i = 1 \dots N$	$1 - P_i > P_{\min\ acceptable} \quad i = 1 \dots N$ $2 - \left(P_{PRV_j\ input} / P_{PRV_j\ output} \right) < 5$ $j = 1 \dots PRV\ Count$
Objective Function	Minimize the total network leakage	Minimize the total surplus pressure of the network	Minimize the total network leakage
Math Model of Objective Function	$5 \times 10^{-6} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M L_{ij} \cdot P_i^{1.18}$	$\sum_{i=1}^N (P_i - P_{\min\ acceptable})$	$5 \times 10^{-6} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M L_{ij} \cdot P_i^{1.18}$

بر اساس اطلاعات موجود در مقالات پیشین در خصوص شبکه آبرسانی نمونه، مدل هیدرولیکی شبکه ساخته شد و برای تحلیل در اختیار کد بهینه‌سازی قرار گرفت. در هر مرحله با تعیین تعداد شیر کاهنده فشار مد نظر (۱ تا ۵)، کد اجرا شده و نتایج

مطالعه است و کمتر بودن نشت نشان از بهتر بودن نتایج دارد. مورد دیگر میزان نشت تفاوت اندکی با نتایج دو مرجع دیگر در دو مورد از پنج مورد آزمایش، نتایج روش ارائه شده در این مطالعه بهتر از نتایج ارائه شده در دو مرجع دیگر بوده و در سه

جدول ۲. مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج مطالعات گذشته

Number of Valves	Current Study		Dai & Li 2014		Nicolini & Zovatto 2009	
	Valve installation location (Pipe's number)	Minimum Leakage (l/s)	Valve installation location (Pipe's number)	Minimum Leakage (l/s)	Valve installation location (Pipe's number)	Minimum Leakage (l/s)
1 PRV	37	24.59	37	24.55	37	24.70
2 PRVs	1-37	23.64	28-37	23.81	1-37	24.08
PRVs 3	1-35-37	23.42	28-37-40	23.60	1-28-37	23.39
4 PRVs	1-13-35-37	23.30	1-28-37-40	22.89	1-28-37-40	23.39
PRVs 5	1-28-31-37-40	22.72	1-28-31-37-41	22.73	1-28-37-40-41	22.89

Table 2. Comparison of the results of this study with the results of previous studies

ژنتیک دارای ۲۰ ژن بوده که هر ژن معرف یکی از لوله های انتخاب شده می باشد. شکل (۴) مکان لوله های موصوف را نمایش می دهد. در الگوریتم ژنتیک جمعیت اولیه ۵۰، تعداد نسل ۱۰۰، ضریب تقاطع ۰.۸ و ضریب جهش ۰.۰۳ در نظر گرفته شدند [24]. همچنین در الگوریتم تکامل تفاضلی نیز جمعیت اولیه ۳۰، تعداد نسل ۸۰، ضریب مقیاس ۰.۵ و ضریب تقاطع ۰.۳ در نظر گرفته شدند [25]. پس از تعیین تعداد شیر کاهنده (۱ تا ۵)، اجرای کد و اتمام بهینه سازی، مکان بهینه شیرها (که تعداد آن در ابتدای معین شده بود) مشخص می شود. نتایج بهینه سازی برای حالت ۱ تا ۵ شیر در شکل شماره (۴) نمایش داده شده است.

۳- مطالعه موردی - شبکه توزیع آب مسکن مهر رشت

در این قسمت از مطالعه، شبکه توزیع آب مسکن مهر رشت برای استفاده از روش فوق به منظور جانمایی بهینه شیرهای کاهنده فشار مورد استفاده قرار گرفته است. این شبکه آبرسانی در شهر رشت از استان گیلان قرار داشته و وظیفه آبرسانی به حدود ۴۴ هزار نفر را به عهده دارد. منطقه تحت پوشش این شبکه ۱۴۴ هکتار بوده و متوسط تقاضای روزانه آن ۴۷۶ مترمکعب در ساعت است. اختلاف ارتفاع رقومی نقاط شبکه در حدود ۴ متر است و دارای ۳۷۱ لوله با طول ۳۳ کیلومتر، ۳۶۶ گره، یک مخزن و یک ایستگاه پمپ با ۳ پمپ است. این شبکه از لوله هایی با قطرهای ۹۰ تا ۵۰۰ میلی متر و از جنس پلی اتیلن ساخته شده است. به دلیل وجود مخزن آب و سیستم پمپاژ داخلی در تمامی آپارتمان های موجود در شهرک، کمترین فشار قابل قبول شبکه به اندازه ۲۰ متر ستون آب در نظر گرفته شد. پیکربندی لوله ها و رقوم ارتفاعی شبکه موصوف در شکل (۳) نشان داده شده است.

با توجه به سائز لوله های موجود در شبکه و مکان هایی که امکان نصب شیر کاهنده فشار وجود داشت، ۲۰ لوله مشخص به عنوان لوله های بالقوه برای نصب شیر کاهنده فشار انتخاب شدند. در نتیجه کروموزوم های الگوریتم

شکل ۳. پیکربندی لوله ها (تصویر چپ) و رقوم ارتفاعی (تصویر راست) شبکه توزیع آب مسکن مهر رشت

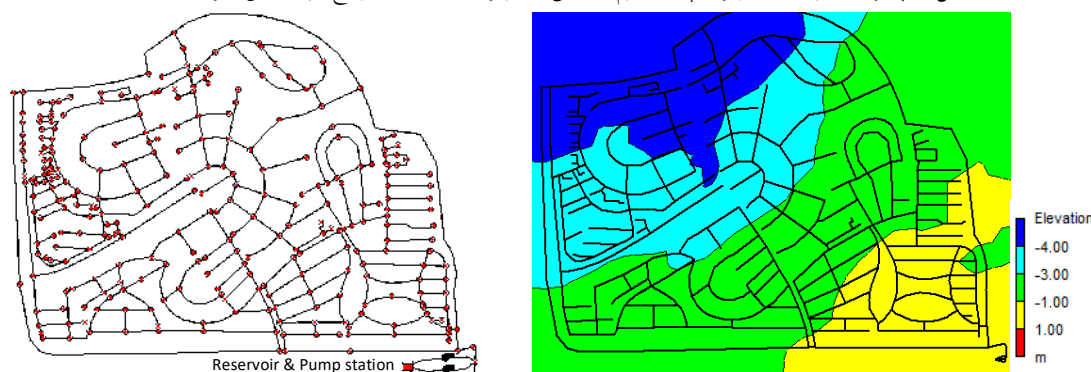


Fig. 3. Pipe configuration (left) and ground elevation (right) of Mehr WDS

شکل ۴. لوله های کاندید شده برای نصب شیر (بالا، سمت چپ) و مکان بهینه شیرها در حالت ۱ تا ۵ شیر

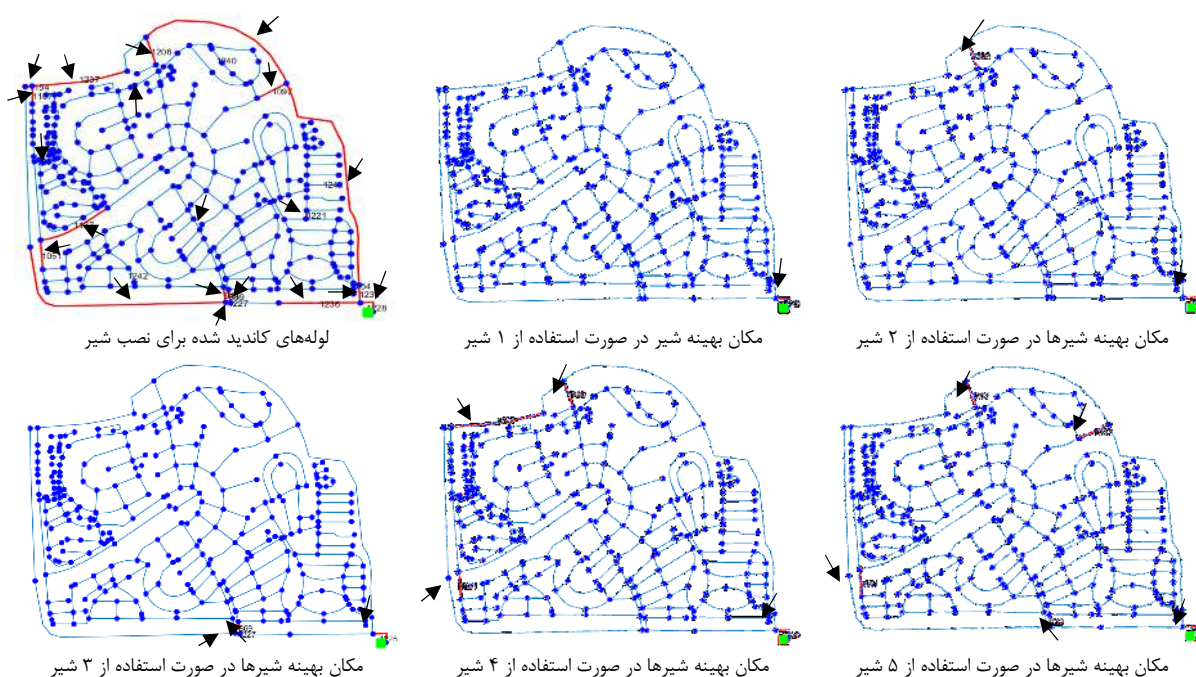


Fig. 4. Candidate Pipes for valve installation (Up, left) & the optimal position of PRV in states with 1 to 5 valve

بر اساس نتایج بدست آمده، در حالت بدون استفاده از شیر، نشت شبکه در حد ۳۲،۷۴ لیتر بر ثانیه به دست آمده در حالی که با استفاده از یک شیر کاهنده فشار این مقدار به ۱۴،۱۸ لیتر بر ثانیه (معادل ۵۷٪) کاهش پیدا کرد. البته این مقدار کاهش مربوط به کم مصرف ترین ساعات شبانه روز است و کاهش نشت در ساعات دیگر به مراتب کمتر خواهد بود.

برای بررسی بیشتر، توزیع فشار شبکه در حالت بدون نصب شیر و حالات نصب شیر در مکان های بهینه و تنظیم آنها (بر اساس نتایج بهینه سازی) در شکل شماره (۵) نمایش داده شده است. تصاویر نشان می دهد با نصب و تنظیم مناسب شیرها چگونه می توان فشار شبکه را مدیریت و نشت را کاهش داد. نشت محاسبه شده از رابطه (۱) برای هر حالت در ذیل تصاویر توزیع فشار شکل ۵ بیان شده است.

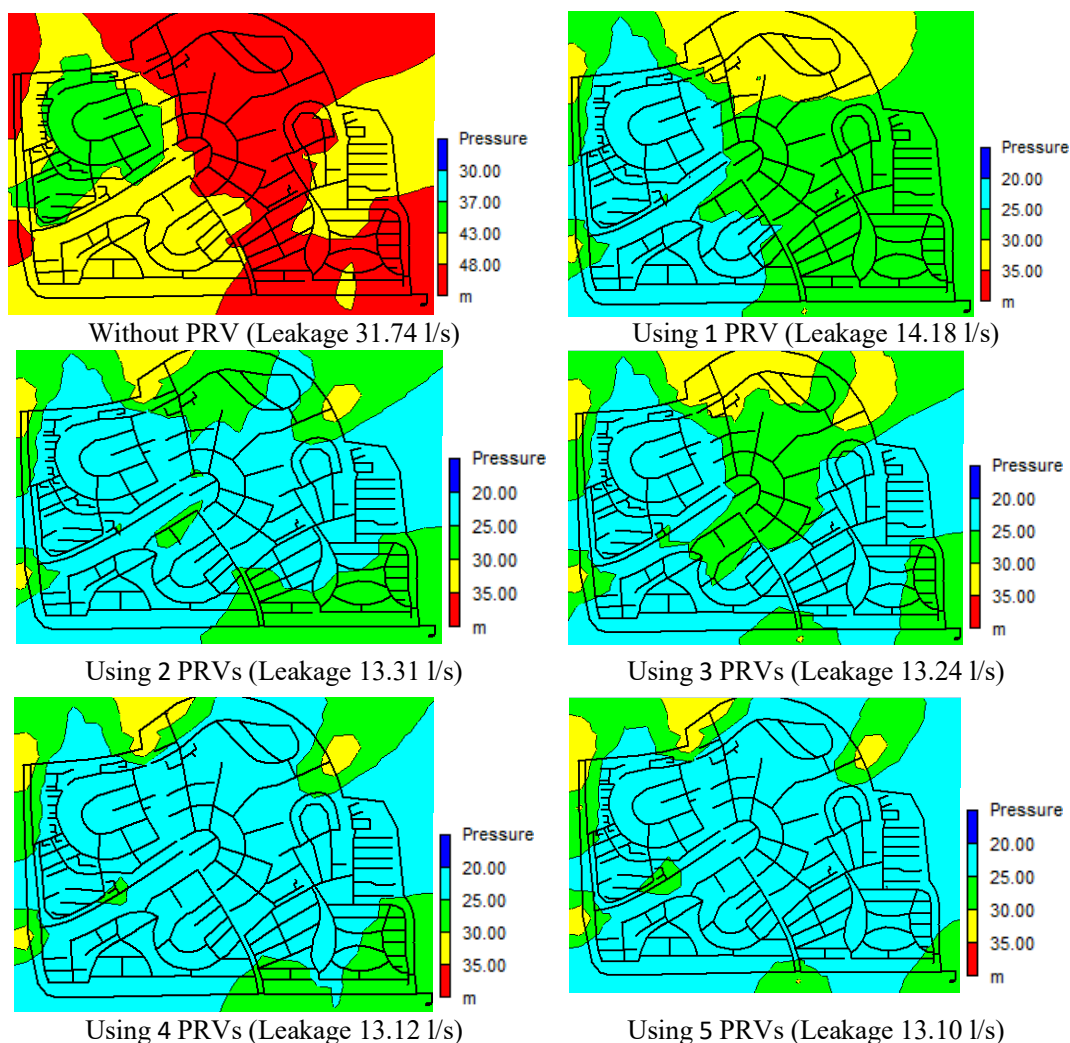


Fig. 5. Pressure distribute at 3:00am in no-valve mode and 1 to 5 installed PRV

مشخص می‌شود. در این بهینه‌سازی، فشار خروجی شیرهای کاهنده فشار به عنوان متغیر طراحی و کمینه کردن نشت شبکه به عنوان تابع هدف مورد استفاده قرار گرفته شده است. همچنین بیشتر بودن فشار تمامی نقاط از حداقل فشار مجاز (۲ بار) و کمتر بودن نسبت فشار در دو سمت شیر کاهنده فشار از عدد ۵ (برای جلوگیری از کاویتاسیون) به عنوان قیود مساله هستند. شکل (۶)، ضریب تقاضا، کمینه و بیشینه فشار شبکه، فشار خروجی بهینه دو شیر کاهنده فشار و همچنین میزان نشت در ساعات مختلف شبانه روز را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که از نمودارها بر می‌آید در حالت بدون استفاده از شیرهای کاهنده فشار، به دلیل کاهش تقاضا در شب فشار شبکه و نشت افزایش

نتایج نشان داد که با افزایش تعداد شیر می‌توان میزان نشت را حتی تا ۱۳٫۱ لیتر بر ثانیه نیز کاهش داد (در حالت استفاده از ۵ شیر کاهنده فشار). اما با توجه به اینکه با افزایش تعداد شیرها بیشتر از ۲ عدد، کاهش قابل توجهی در میزان نشت اتفاق نمی‌افتد، اقتصادی‌تر آن است که به نصب دو شیر در شبکه بسنده شود. این امر مشکلات نصب، نگهداری و کنترل فشار شبکه را نیز ساده‌تر می‌نماید. پس از اینکه مکان بهینه شیرها مشخص شد، ساختار شبکه در مدل هیدرولیکی از حالت بدون شیر به حالت شبکه با دو شیر کاهنده فشار در نقاط بهینه ارتقاء یافت. حال با استفاده از کد بهینه‌سازی تکامل تفاضلی، نقطه تنظیم فشار بهینه دو شیر در ساعات مختلف شبانه‌روز با توجه به تغییرات تقاضا

با کد بهینه‌سازی بر طبق ضریب تقاضای ساعتی، می‌توان نشت شبکه مسکن مهر را از ۲۳۹۰ متر مکعب در شبانه روز (۲۱,۹٪ ورودی شبکه) به ۱۴۰۳ متر مکعب در شبانه روز (به اندازه ۱۲,۳٪ ورودی شبکه) کاهش داد که نشان از یک کاهش ۴۱,۳٪ دارد.

می‌یابد. اما در حالت استفاده از شیرهای PRV برای مدیریت فشار، کمترین فشار شبکه با وجود تغییرات میزان تقاضا در پایتترین حد قابل قبول خود ثابت نگاه داشته شده است. این بدان معناست که فشار مازاد در شبکه به حداقل مقدار خود رسیده و میزان نشت کمینه شده است. بر اساس محاسبات انجام شده، استفاده از دو شیر کاهنده فشار و تنظیم فشار خروجی آن

شکل ۶. ضریب تقاضا، کمینه و بیشینه فشار شبکه، فشار خروجی بهینه شیرهای کاهنده فشار و نشت در ساعات مختلف شبانه روز (نمودار راست) در حالت استفاده از دو شیر کاهنده فشار (نمودار چپ) در حالت عدم استفاده از شیر کاهنده فشار

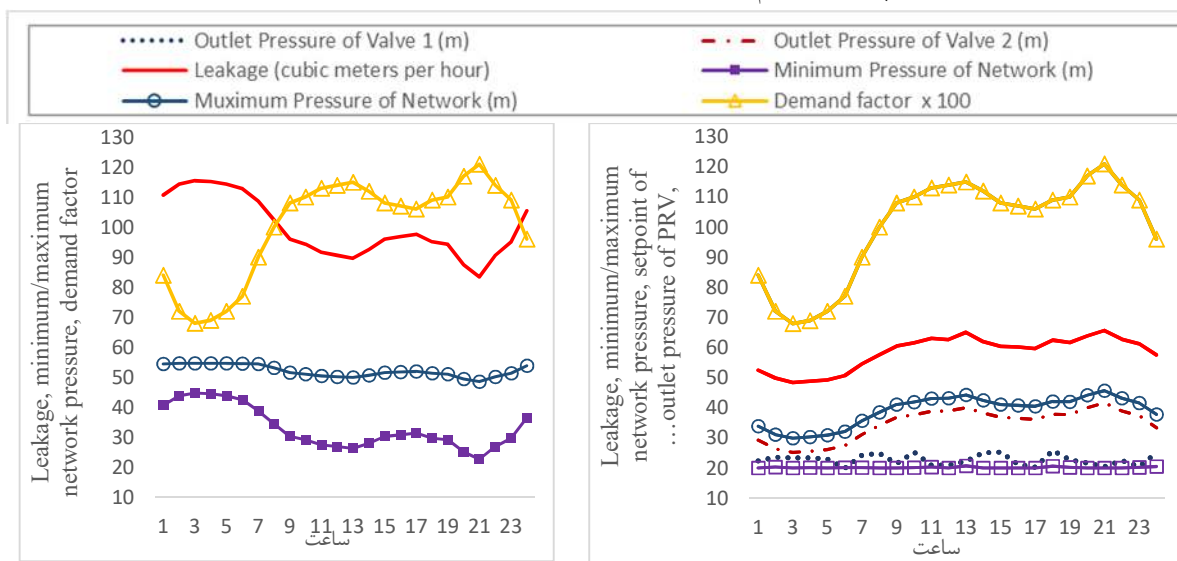


Fig. 6. Demand multiplier, min/max of pressure, optimal PRV setting point and leakage at different hours of the day in the no-valve mode (left diagram) and in the mode of using two PRVs (right diagram)

کاهنده فشار و تنظیم فشار خروجی آنها توسط الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده، می‌توان میزان نشت آب از شبکه مسکن مهر رشت را از ۲۳۹۰ به ۱۴۰۳ متر مکعب در شبانه روز (به اندازه ۴۱,۳٪) کاهش داد. استفاده از این روش در سایر شبکه‌ها علاوه بر تعیین تعداد و مکان بهینه نصب شیرهای کاهنده فشار در شبکه می‌تواند به ازای مقادیر متفاوت تقاضا تنظیم بهینه فشار خروجی هر یک از شیرها را نیز مشخص نماید.

۵- مراجع:

- [1] Journal of 117-3, 2013, Design criteria for Urban and Rural Water Supply and Distribution Systems, National Planning and Budget Organization, Islamic Republic of Iran, Section 5-3 (In Persian).
- [2] Jowitt, P.W. & Xu, C., 1990, Optimal valve control in water distribution networks. *Water Resources Planning and Management*, 116(4), 455-472.

۴- جمع بندی

در مطالعه حاضر یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تکامل تفاضلی ارائه شده است که می‌تواند مکان بهینه برای نصب شیرهای کاهنده فشار را برای کمینه کردن فشار مازاد و نشت در شبکه محاسبه نماید. پس از درستی آزمایشی عملکرد، الگوریتم ارائه شده روی شبکه توزیع آب مسکن مهر شهر رشت اعمال و مکان نصب بهینه شیرهای کاهنده فشار نشان داده شد. با در نظر گرفتن ملاحظات فنی و اقتصادی، از دو عدد شیر کاهنده فشار جهت مدیریت فشار شبکه استفاده شد. پس از اضافه کردن شیرها در مدل هیدرولیکی، از الگوریتم تکامل تفاضلی برای تنظیم بهینه فشار خروجی شیرهای موصوف استفاده شد. نتایج نشان دادند در صورت استفاده از دو شیر

- Pressure Reducing Valves Using Soft Computing Techniques, *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 7(2), 1528-1534.
- [15] Tabesh, M., Vasei, M. M., 2006, Reducing leakage in urban water distribution networks by minimizing additional pressure in the network, *Journal of Research in Water Resources of Iran*, 2(2), 53-66. (In Persian)
- [16] Soltani Asl, M., and Faghfoor, M., 2009, Intelligent Pressure Management to Reduce Leakage in Water Supply Systems, Case Study: Sarafazan Area of Mashhad, *Journal of Water and Sewage Research*, 20(3), 99-104. (In Persian)
- [17] Mahdavi, M. M., Hosseini, Kh., and Behzadian, K., 2011, Comparison of Single-objective and Multi-objective Genetic Algorithms in Optimal Locating of Pressure Lightening Valves, *4th Iranian Water Resources Management Conference, Tehran, Amirkabir University of Technology*. (In Persian)
- [18] Moazeni, H., Hosseini, Kh., and Rahmani Manesh, M., 2016, Leakage Control in Water Distribution Network with Pressure Management and Optimization Algorithm, *First National Conference on Supply and Demand for Drinking Water and Health, Challenges and Solutions*. (In Persian)
- [19] Rossman, L. A., 2000, EPANET 2 USERS MANUAL. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/R-00/057.
- [20] Goldberg, D. E., 1989, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, *Kluwer Academic Publishers*, Boston, MA.
- [21] Storn, R. & Price, K., 1997, Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, *Journal of Global Optimization*, 11, 341-359.
- [22] Sun, J., Zhang, Q., Tsang, E., 2005, DE/EDA: A New Evolutionary Algorithm for Global Optimization, *Information Sciences*, 169(3-4), 249-262.
- [23] Mansouri, R., and Torabi, H., 2015, Using Differential Evolution Algorithm for Optimization of Water Distribution Network (Case Study: Esmaeel abad Water Resources Irrigation Network), *Journal of Water and Soil Science*, 25(2-4), 81-95. (In Persian)
- [24] Srinivas, M. & Patnaik, L., 1994, Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms, *IEEE Transactions Sys*, 24(4), 656-667.
- [25] Zielinski, K., Weitkemper, P., Laur, R., Kammeyer, K., 2006, Parameter study for differential evolution using a power allocation problem including interference cancellation. In: *Proceedings of the IEEE congress on evolutionary computation*, pp 1857-1864.
- [3] Alonso, JM., Alvarruiz, F., Guerriero, D., Hernandez, V., Ruiz, PA., Vidal, AM., Martinez, F., Vercher, J., Ulanicki, B., 2000, Parallel computing in water network analysis and leakage minimization, *Water Resources Planning and Management*, 4(126), 251-260.
- [4] Ulanicka, K., Bounds, P., Ulanicki, B., and Rance, J., 2001, Pressure Control of a Large Scale Water Distribution Network with Interacting Water Sources: A Case Study, *Water Software Systems: Theory and Applications*, 2, 41-53.
- [5] Tucciarelli, T., Criminisi, A. and Termini, D. 1999 Leak Analysis in Pipeline Systems by Means of Optimal Valve Regulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125, 277-285.
- [6] Reis, F. R., Porto, R. M., and Chaudhry, F. H., 1997, Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm, *Water Resources Planning and Management*, 123(6), 317-326.
- [7] Nicolini M. & Zovatto L., 2009, Optimal Location and Control of Pressure Reducing Valves in Water Networks, *Water Resources Planning and Management*, 135(3), 178-187.
- [8] Savic, D. A. & Walters, G. A., 1995, Integration of a model for hydraulic analysis of water distribution networks with an evolution program for pressure regulation, *Microcomputers in Civil Engineering*, 10, 219-229.
- [9] Araujo, LS., Ramos, H., Coelho, ST., 2006, Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management, *Water Resour Manag*, 20(1), 133-149.
- [10] Liberatore, S., & Sechi, G. M., 2008, Location and Calibration of Valves in Water Distribution Networks Using a Scatter-Search Meta-heuristic Approach, *Water Resour Manage*, 23(8), 1479-1495.
- [11] Eck BJ, Mevissen M, 2012, Valve placement in water networks: mixed-integer non-linear optimization with quadratic pipe friction. Report No RC25307 (IRE1209-014), IBM Research (September).
- [12] Dai P. D. & Li P., 2014, Optimal Localization of Pressure Reducing Valves in Water Distribution Systems by a Reformulation Approach, *Water Resour Manag*, 28(10), 3057-3074.
- [13] Saldarriaga. J. & Salcedoa, C. A., 2015, Determination of optimal location and settings of Pressure Reducing Valves in Water Distribution Networks for minimizing water losses, *Procedia Engineering*, 119, 973-983.
- [14] Gupta, A., Bokde, N., Marathe, D., Kulat, K., 2017, Leakage Reduction in Water Distribution Systems with Efficient Placement and Control of

Location and setting optimization of the pressure reducing valves in urban water networks to pressure management and leakage reduction

H. Monsef¹, M. Naghash Zadegan², A. Jamali³, R. Farmani⁴

1. Graduated in PhD, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Iran.

2. Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Iran.

3. Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Iran.

4. Associate Professor, Centre of Water Systems, Exeter University, United Kingdom.

naghash@guilan.ac.ir

Abstract

Given the varying water demand for various hours of the day from different seasons, the pressure of the water distribution network (WDN) will vary at different times. In the event of a decrease in demand, the network pressure increases, and the excess pressure leads to increase the leakage from old connections and small fractures. One of the ways to reduce leakage is the network pressure management and reduce excess pressure, which it can be achieved by the pressure reducing valves. but the question is, how many pressure reducing valves and at which points of the water network should be installed. In the first part of this study, the optimal location of the pressure reducing valves (PRV's) was found by the combination of the binary genetic optimization algorithm (GA) and real differential evolution (DE) optimization algorithm. For this purpose, the GA proposes the potential locations (pipes) for the valve installation to the DE algorithm, and it attempts to eliminate surplus head in the WDN by making changes in the Hazen-William coefficient of proposed pipes and creating a head loss on the pipes. These changes should be in such a way that the WDN's constraints like the minimum allowable pressure to be respected. The related hybrid algorithm was coded in MATLAB software and connected to the Epanet software as a hydraulic solver. After determining the hydraulic model of the water network and the number of PRVs by the designer, the proposed code determines the optimal installation location of the PRVs in order to the reduction of network background leakage. In the next part of the study, after determining the optimal location of the PRVs, the optimal set-point of each PRVs has been determined. To this end, a single objective differential evolution algorithm is used. The design variable of the optimization algorithm is the outlet pressure of the installed PRVs and the permissible pressure ratio on both sides of PRVs considered as a new network constraint alongside the minimum allowable pressure. The objective function of this optimization problem is minimizing of WDN's background leakage. After validating of presented codes, they applied on a local WDN in the north of IRAN, Guilan, entitled Mehr Water Network. The covered area of this network is 144 acres and its daily average demand is 366 m³ per hour. The altitude difference of Mehr WDS is about 4 meters and it has 371 pipes with the length of 33 kilometers, 366 junctions, one reservoir and a pump station with 3 pumps. Results show that installing two pressure reducing valves in determined locations and control them with DE optimization algorithm can reduce the surplus head and background water leakage from 21.9% to 12.3% (about 41.3%) On a full day. It is noteworthy that this method can be used in Supervisory control and data acquisition (SCADA) in order to pressure management of WDNs and leakage reduction. A calibrated hydraulic model of WDN, current state of valves and pumps and demand multiplier (obtained from installed flow meters or estimated demand profile) are required as the input of the optimization code to determine the optimum output pressure (set-point) of PRVs in SCADA tele-control system.

Keywords: Urban water networks, location of pressure reducing valves, pressure management, reduction of background leakage, optimization