

مدیریت فشار و نشت در شبکه توزیع آب با برنامه زمان بندی بهینه تنظیم شیرها و

پمپها

مهدی دینی^{۱*}، اصغر اسدی^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز
^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان، تبریز

(دریافت: ۹۸/۵/۱۰، پذیرش: ۹۹/۲/۲۰، نشر آنلاین: ۹۹/۲/۲۰)

چکیده

سن بالای لوله‌ها، فرسودگی آن‌ها و عدم وجود منابع مالی لازم برای نوسازی شبکه‌های توزیع آب باعث شده است که میزان نشت از شبکه به‌طور چشم‌گیر افزایش یابد. مدیریت فشار یکی از کاراترین و مقرون به‌صرفه‌ترین روش‌های کاهش نشت می‌باشد. در این تحقیق، هدف ارائه مدلی مبتنی بر بهینه‌سازی قابلیت اطمینان شبکه با اعمال برنامه زمان‌بندی بهینه تنظیم شیرهای کنترل جریان و پمپ‌ها در ساعات مختلف شبانه‌روز است که منجر به مدیریت فشار و کاهش نشت در شبکه‌ها می‌شود. بهینه‌سازی در محیط متلب و با به‌کارگیری الگوریتم دسته ذرات در ترکیب با مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی شبکه انجام شده است. برای صحت‌سنجی روش پیشنهادی از یک شبکه نمونه و برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی از شبکه توزیع آب اهر استفاده شده است. مقایسه نتایج نشت ساعتی در یک وضعیت یکسان برای شبکه نمونه در این تحقیق و تحقیقات قبلی صحت عملکرد مدل پیشنهادی را تصدیق می‌کند، به‌طوری‌که انطباق خیلی خوبی بین نتایج این مقاله با تحقیقات قبلی وجود دارد. همچنین با به‌کارگیری برنامه زمان‌بندی بهینه شیرها و پمپ‌ها در شبکه توزیع آب اهر قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه به‌طور متوسط در حدود ۳۳ درصد افزایش و نشت شبکه در حدود ۲۵ درصد کاهش یافته است که نشان‌دهنده توانایی مدل پیشنهادی در بهبود کارایی شبکه‌ها می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: برنامه زمان‌بندی، شبکه توزیع آب، قابلیت اطمینان فشار گرهی، نشت، EPANET، MATLAB.

۱- مقدمه

تکنیک‌های مدرن برنامه‌نویسی، یکی از کارآمدترین و ارزان‌ترین روش‌ها می‌باشد. پژوهش‌های گسترده‌ای در سطح ملی و بین‌المللی در این زمینه صورت گرفته است.

تابش و هومر (۱۳۸۵) با هدف کاهش نشت شبکه از روش مدیریت فشار در قالب بهینه‌سازی هد خروجی شیرهای کاهنده فشار^۱ استفاده کردند که در آن هد بهینه خروجی شیرهای فشارشکن طوری تنظیم شد که تقاضا در گره‌ها برآورد شود و نشت شبکه نیز کم‌ترین مقدار به‌دست آید. تابش و واسطی (۱۳۸۵) کاهش میزان نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری از طریق حداقل نمودن فشار اضافی در شبکه را مطرح کردند. بر اساس این روش با محاسبه مقدار بهینه فشار خروجی شیر فشارشکن، حداقل فشار ممکن در گره‌ها که باعث بیشترین کاهش نشت و حفظ سرویس‌دهی مطلوب در شبکه می‌شود، به‌دست می‌آید. با این روش نشت شبکه به حداقل مقدار ممکن نسبت به وضعیت پایه

با رشد و توسعه جوامع بشری، نیاز به آب شرب برای مصارف عمومی و بهداشتی بیش‌ازپیش شده است. شبکه‌های توزیع آب یکی از منابع اصلی در انتقال و توزیع منابع آب شرب می‌باشند. مطابق آخرین سالنامه آماری کشور (۱۳۹۵)، تلفات آب شهری در حدود ۱ میلیارد و ۵۷۱ میلیون مترمکعب معادل ۲۶ درصد کل آب تولیدشده و تلفات آب روستایی در حدود ۴۳۵ میلیون مترمکعب معادل ۳۱/۵ درصد کل آب تولیدشده می‌باشد که بخش عمده آن مربوط به نشت از شبکه‌های توزیع آب می‌باشد. نشت آب نه‌تنها باعث هدررفت منابع آبی و خسارات مالی به شرکت‌های آب و فاضلاب می‌شود، بلکه در مناطق مسکونی موجب آسیب‌های جدی به زیرساخت‌های عمرانی می‌شود. عوامل متعددی بر کنترل و کاهش نشت از شبکه تأثیر دارند که کنترل و مدیریت بهینه فشار و دبی خروجی شیرآلات موجود در شبکه با استفاده از

1. Pressure reducing valve

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۱۴۵۲۵۸۰

اسدی و دینی (۱۳۹۷) در محیط نرم‌افزار Excel و با ایجاد ارتباط با نرم‌افزار EPANET برنامه زمان‌بندی تنظیم شیر فشارشکن را برای شبکه نمونه دوحلقه‌ای با دو مخزن ارائه کردند. نتایج نشان داد که برنامه زمان‌بندی تنظیم شیر فشارشکن، در تعدیل مقادیر فشار در محدوده تعریف‌شده مؤثر است. همچنین قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه حداقل ۲ درصد و حداکثر ۶/۸ درصد افزایش یافته است.

اسدی و دینی (۱۳۹۸) برنامه زمان‌بندی بهینه تنظیم هد خروجی شیرهای فشارشکن در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز برای شبکه نمونه دوحلقه‌ای با دو مخزن را ارائه کردند. براساس نتایج و در مقایسه با مدل پایه، میزان نشت از شبکه در حدود ۲۳ درصد کاهش و مقادیر قابلیت اطمینان شبکه در حدود ۳۳ درصد افزایش یافته است. در سطح بین‌المللی نیز مطالعات گسترده‌ای در زمینه مدیریت فشار، کنترل و کاهش نشت صورت گرفته است.

Araujo و همکاران (۲۰۰۶) با به‌کارگیری شیرهای کنترل جریان و تنظیم بهینه میزان بازشدگی آن‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک میزان نشت از شبکه را حداقل کردند که در آن با تنظیم ضرایب زبری لوله‌ها، تعداد و موقعیت بهینه نصب شیرها نیز به دست آمد نتایج نشان داد که به‌طور متوسط نشت شبکه در حالت تنظیم بهینه شیرآلات در حدود ۲۳ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافته است.

Tricarico و همکاران (۲۰۱۳) یک روش جدید برای مدیریت هزینه و فشار در شبکه توزیع آب ارائه دادند که در آن از شیرهای با عملکرد دوگانه (پمپ و توربین)^۳ برای مدیریت کمبود و مازاد فشار استفاده می‌شود بدین ترتیب که از پمپ برای جبران کمبود فشار و از توربین برای بازیافت یا تولید انرژی مربوط به فشار مازاد استفاده شد. امکان استفاده از شیرهای دوگانه در طول شبکه برای بازیافت انرژی، نشان‌دهنده یک مزیت اقتصادی واضح در سیستم است.

Samir و همکاران (۲۰۰۶) مدلی را برای کنترل نشت در شبکه توزیع آب شهر اسکندریه مصر در محیط نرم‌افزار WaterCad ایجاد کردند. آن‌ها به روش تجربی نقاطی را در شبکه شناسایی کردند و با تنظیم آن‌ها، مدیریت فشار و نشت در شبکه را انجام دادند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که برای بهترین سناریو مدل‌سازی، نشت شبکه در حدود ۳۷ درصد کاهش یافته است.

Menelaos و همکاران (۲۰۱۶) مکان‌یابی و نصب توربین‌های هیدرولیکی و شیرهای فشارشکن به‌طور هم‌زمان را بررسی کردند. مطالعه بر روی شبکه کوزانی^۴ یونان انجام شد که بعد از کالیبراسیون شبکه و با مکان‌یابی نصب شیرهای فشارشکن و توربین‌های هیدرولیکی، نتایج قابل قبولی در کاهش فشار شبکه

کاهش یافته است. کارآموز و همکاران (۱۳۸۵) مدلی را برای تغییرات بهینه تراز مخزن در طول ساعات مختلف شبانه‌روز به منظور مدیریت فشار شبکه ارائه کردند که در آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی، میزان نشت از شبکه را تا ۳۰ درصد در طول سال کاهش دادند. روش پیشنهادی بر روی شبکه آب شمال غرب تهران به کار برده شد که ضمن برخورداری بودن از مقبولیت عمومی، از لحاظ محدود بودن بازه تغییرات تراز مخزن، عدم امکان استفاده در مناطق ناهموار و همچنین برای مصرف با نوسان زیاد، نامطلوب است.

سلطانی‌اصل و فغفورمغربی (۱۳۸۷) مدلی را برای مدیریت فشار شبکه توزیع آب منطقه سرافرازان مشهد با نرم‌افزار EPANET ارائه کردند. یک برنامه زمانی تغییرات هد فشار خروجی در طول ساعات روز و بر مبنای تأمین حداقل فشار در کم‌فشارترین نقطه، تعیین و اعمال گردید. نتایج نشان داد که میزان تغییرات فشار اثر مستقیم بر میزان نشت شبکه در ساعات مختلف شبانه‌روز دارد. آسفی و همکاران (۱۳۸۸) در یک مطالعه میدانی بر روی شبکه منطقه شمیرانات تهران، با استفاده از زون‌بندی شبکه و مدیریت فشار شیرآلات موجود در شبکه برای یک دوره بارگذاری مختلف، نشت از شبکه را در حدود ۵۰ درصد کاهش دادند. صدیقیان (۱۳۸۹) در پژوهش خود ابتدا رابطه‌ای را بین نشت و فشار در شبکه به دست آورد و سپس با تنظیم بهینه شیرآلات فشارشکن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، فشار در گره‌ها و در نتیجه نشت در شبکه را کاهش دادند.

اسدیانی یکتا و تایش (۱۳۸۹) براساس استاندارد انجمن بین‌المللی آب^۵، میزان نشت در هر گره و لوله را تحلیل و روش جدیدی را برای محاسبه میزان نشت از شبکه ارائه کردند. روش پیشنهادی بر روی یک پایلوت در استان ایلام پیاده شد و نتایج نشان داد که مدل دقت مناسبی در تخمین نشت شبکه دارد. جهانگیر و همکاران (۱۳۹۱) با نصب شیرهای فشارشکن در نقاط بحرانی و تنظیم زمانی آن‌ها مدیریت فشار در شبکه را انجام دادند. تحقیق به روش مبتنی بر تقاضا و بر روی یکی از مجتمع‌های آبرسانی شرکت آب و فاضلاب روستایی خراسان جنوبی انجام شده است. نتایج نشان داد که با کاهش ۱۴/۲ درصدی میانگین فشار، نشت شبکه در حدود ۲۷/۴ درصد کاهش یافته است. جمشیدی (۱۳۹۳) با شبیه‌سازی هیدرولیکی خطوط آبرسانی منطقه ۵ تهران و با استفاده از دو شیر فشارشکن، مدیریت فشار در شبکه را انجام دادند. نتایج نشان داد که این رویکرد منجر به کاهش ۲/۴ درصدی میزان مصرف آب در منطقه شده است که ۸۲ درصد از آن تنها در طی ساعات شب اتفاق افتاده است.

4. Kozani

2. International Water Association
3. Pumps working As Turbines (PAT)

مبتنی بر فشار^۷ وجود دارد. روش تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضای ثابت متداولترین روش تحلیل شبکه است و بر فرض تقاضای ثابت در گرهها استوار است و مبنای بسیاری از نرم‌افزارهای تحلیل شبکه مثل EPANET می‌باشد. در روش تحلیل مبتنی بر فشار، بین دبی و فشار گرهی رابطه برقرار می‌شود به عبارت دیگر میزان دبی تخصیص یافته در گرهها تابعی از مقادیر فشار در گرهها می‌باشد. در نرم‌افزار EPANET این امکان وجود دارد که با تعریف ضرایب رابطه بین دبی نشت و فشار گرهی بتوان میزان دبی نشت در گرهها را تابعی از فشار محاسبه نمود. در این مقاله از نرم‌افزار EPANET برای تحلیل هیدرولیکی شبکه استفاده می‌شود که بر اساس روابط تجربی هیزن ویلیامز^۸، افت هد در حلقه‌ها و پیوستگی جریان در گرهها و پایستگی انرژی کار می‌کند. برای مدل‌سازی نشت نیز از تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار استفاده می‌شود که در قالب Emitter در گرههای شبکه و در نرم‌افزار EPANET (Rossman, 2000) تعریف شده است. در تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب، معمولاً مدل‌سازی شبکه در یک زمان مشخص در طول شبانه‌روز و یا به صورت زمان گسترده در طول شبانه‌روز انجام می‌شود. در مطالعات مربوط به مدیریت فشار و نشت از شبکه‌های توزیع آب، مدیریت فشار در تمامی ساعت‌ها و به خصوص در ساعت‌های کم مصرف مدنظر است، از این رو تحلیل زمان گسترده برای مدل‌سازی شبکه استفاده می‌شود.

هدف از این تحقیق، تنظیم دبی جریان خروجی شیرهای کنترل جریان و تنظیم ظرفیت نسبی پمپاژ در پمپ‌ها و به دنبال آن افزایش قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه و کاهش نشت از شبکه است. معادله حاکم بر شیر کنترل جریان به صورت رابطه (۱) است (تائبی و چمنی، ۱۳۹۷).

$$Q = \sqrt{\left(\frac{12.1 h_k}{k}\right)} D^2 \quad (1)$$

که در آن Q دبی جریان عبوری، D قطر لوله، h_k افت هد و k ضریب افت موضعی است. متغیر تصمیم مسئله شامل تنظیم مقادیر دبی جریان خروجی شیرها و تنظیم ظرفیت نسبی پمپاژ پمپ‌ها است به طوری که مقادیر قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه حداکثر شود. تابع هدف به کار رفته برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه به صورت روابط (۲) و (۳) است (دینی و تابش، ۱۳۹۷).

در مقایسه با فشار سرویس به دست آمد و در کنار آن باعث تولید انرژی الکتریکی از مازاد فشار موجود در شبکه شد.

Zidan و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه، روشی برای تنظیم فشار در شبکه‌های توزیع آب با تعریف تعداد، مکان و تنظیمات بازشدگی شیرآلات کنترل جریان ارائه کردند و آن را بر روی شبکه توزیع آب شهر دمنهور^۵ در کشور مصر به کار بردند. با به کارگیری این روش، کاهش قابل توجهی در فشار مازاد شبکه ایجاد شد.

Meniconi و همکاران (۲۰۱۵) در یک مطالعه آزمایشگاهی با نصب شیرهای فشارشکن در خطوط لوله شبکه توزیع، تغییرات هد خروجی شیرهای فشارشکن را برای دو الگوی مصرف کم‌وزیاد در قالب یک برنامه زمانی و سیستم کنترل هوشمند تنظیم کردند. نتایج نشان داد که برای الگوهای مصرف زیاد، شیرهای فشارشکن توسط اپراتور هوشمند غیرفعال می‌شود و با این تغییر فشار شبکه در محدوده حداقل فشار مجاز باقی می‌ماند.

De Paola و همکاران (۲۰۱۷) شبکه توزیع آب ناپولی ایتالیا را به منظور تعیین بهینه تعداد، مکان و میزان بازشدگی شیرهای فشارشکن مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که تعیین بهترین موقعیت شیرهای کاهش فشار برای نصب و میزان بازشدگی آن‌ها با استفاده از الگوریتم کاوشی هارمونی در کاهش نشت بسیار مؤثر می‌باشد.

همان طوری که مشخص است در تحقیقات قبلی با انجام تنظیم فشار یا دبی بر روی شیرهای فشارشکن و شیرهای کنترل جریان و یا در کنار آن با تنظیم تعداد و مکان این شیرها و یا به کارگیری شیرهای دوگانه (پمپ یا توربین) و تنظیم آن‌ها سعی در مدیریت فشار شبکه، کاهش نشت از شبکه و تولید انرژی از فشار مازاد شبکه شده است. در این تحقیق، تأثیر تنظیم هم‌زمان شیرهای کنترل جریان و پمپ‌های موجود در شبکه در بهبود کارایی شبکه بررسی شده است که به عنوان نوآوری مقاله می‌باشد. برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی، از الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات در محیط متلب و برای شبیه‌سازی هیدرولیکی از نرم‌افزار EPANET استفاده شده است (Rossman, 2000). این روش در شبکه نمونه Jowitt و Xu (۱۹۹۰) صحت‌سنجی شده و توسعه یافته است و در شبکه توزیع آب اهر مدل‌سازی و پیاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل‌سازی هیدرولیکی

جهت تحلیل هیدرولیکی شبکه توزیع آب، دو دیدگاه عمده تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضای ثابت^۶ و تحلیل هیدرولیکی

7. Head Driven Simulation Method (HDSM)
8. Hazen-Williams

5. Damanhur
6. Demand Driven Simulation Method (DDSM)

که در آن شاخص اهمیت هیدرولیکی لوله، Q دبی عبوری از لوله، L طول لوله، D قطر لوله و C_{HW} نیز ضریب هیزی ویلیامز لوله است. مطابق این شاخص، از مجموعه تمام لوله‌های موجود در شبکه، تنها در موقعیت‌های شیر کنترل جریان در نظر گرفته می‌شود که مقدار شاخص SI بالاتری دارند.

۲-۳- الگوریتم دسته ذرات

الگوریتم دسته ذرات^{۱۲}، اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط Kennedy و Eberhart مطرح شده و به سرعت به عنوان یک ابزار قدرتمند مورد توجه قرار گرفت (Kennedy و Eberhart، ۱۹۹۵). در الگوریتم دسته ذرات، هر پاسخ به صورت پرنده‌ای در دسته‌ای از پرندگان است، که به آن ذره می‌گویند. در چنین ساختاری علاوه بر هوش فردی، نوعی رفتار گروهی نیز وجود دارد که آن‌ها را به سمت هدف هدایت می‌کند. هر ذره دارای یک سرعت انطباقی است که بیانگر بردار حرکت ذره در فضای جستجو می‌باشد. علاوه بر آن دارای حافظه نیز می‌باشد، یعنی بهترین موقعیتی را که تا آن مرحله به آن رسیده است را به خاطر می‌سپارد. موقعیت و سرعت ذرات در الگوریتم دسته ذرات استاندارد بر اساس بهترین موقعیت کلی و محلی ذرات و همچنین سرعت حرکت فعلی آن‌ها به دست می‌آید.

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (۶)$$

$$V_i(t+1) = C_1 * Rand_1 * (P_{i.best} - X_i(t)) + C_2 * Rand_2 * (P_{g.best} - X_i(t)) + W * V_i(t) \quad (۷)$$

که در آن W ضریب وزنی حرکت در مسیر خودی که نشان‌دهنده میزان تأثیر بردار سرعت تکرار قبلی ($V_i(t)$) بر روی بردار سرعت در تکرار بعدی ($V_i(t+1)$) است، C_1 ضریب ثابت حرکت در مسیر بهترین ذره مورد بررسی، C_2 ضریب ثابت حرکت در مسیر بهترین ذره یافت شده در بین کل جمعیت $P_{i.best}$ بهترین مقدار ذره مورد بررسی در طول عمر ذره، $P_{g.best}$ بهترین مقدار در بین کل ذرات، $Rand_1$ ، $Rand_2$ دو عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه ۰ تا ۱، $V_i(t)$ بردار سرعت و $X_i(t)$ بردار موقعیت در تکرار قبلی و $X_i(t+1)$ بردار موقعیت در تکرار بعدی می‌باشد. برای جلوگیری از افزایش بیش از حد سرعت حرکت یک ذره در حرکت از یک محل به محل دیگر، تغییرات سرعت را در بازه V_{min} تا V_{max} محدود می‌کنند که حد بالا و پایین سرعت با توجه به نوع مسئله تعیین می‌گردد.

$$NPRI = \begin{cases} 0 & P_{jt} < 10 \\ \frac{1}{32}(P_{jt} - 10) & 10 < P_{jt} < 26 \\ \frac{1}{10}(P_{jt} - 26) + 0.5 & 26 < P_{jt} < 31 \\ 1 & P_{jt} = 31 \\ -\frac{1}{38}(P_{jt} - 31) + 1 & 31 < P_{jt} < 50 \\ -\frac{1}{40}(P_{jt} - 50) + 0.5 & 50 < P_{jt} < 60 \\ 0.25 & 60 < P_{jt} \end{cases} \quad (۲)$$

$$NPRI = \frac{\sum_{j=1}^{NN} Q_{j,t}^{req}(NPRI(j,t))}{\sum_{j=1}^{NN} Q_{j,t}^{req}} \quad (۳)$$

که در آن $NPRI(j,t)$ مقدار شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی در گره j ام در زمان t و P_{jt} فشار گرهی در گره j ام در زمان t می‌باشد. که $NPRI$ شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه، NN تعداد گره‌های شبکه، $Q_{j,t}^{req}$ تقاضای مورد نیاز گره j ام در زمان t می‌باشد. همچنین برای محاسبه نشت شبکه از رابطه (۴) استفاده شده است (Araujo و همکاران، ۲۰۰۶).

$$q_j = (C \sum_{j=1}^M 0.5 L_{ij}) P_j^\beta \quad (۴)$$

که در آن q_j میزان نشت از گره j ، P_j فشار سرویس گره j ، β ضریب توان فشار گرهی و L_{ij} مجموع طول تمام لوله‌های متصل به گره j ، C ضریب تخلیه از روزه‌های موجود در اتصالات و لوله‌ها می‌باشد و به شکل و قطر آن بستگی دارد.

۲-۲- شاخص مکان‌یابی شیرها

برای شبکه‌های توزیع آب بزرگ با تعداد لوله‌های زیاد، بدون استفاده از شاخص‌های مکان‌یابی شیرها، این امکان وجود دارد که شیرهای کنترل بر روی همه لوله‌ها نصب شود. از طرفی امکان تنظیم این تعداد شیر نه ممکن است و نه از نظر اقتصادی و هیدرولیکی معقول است. لذا در کارهای کاربردی برای محدود کردن تعداد شیرها، لازم است از شاخص‌های مکان‌یابی شیرها استفاده شود. برای این منظور در این پژوهش از شاخص SI ^{۱۱} که توسط Ali (۲۰۱۵) ارائه شده و به صورت رابطه (۵) است، استفاده شده است.

$$SI = \frac{Q L}{C_{HW} D} \quad (۵)$$

11. Selection Index

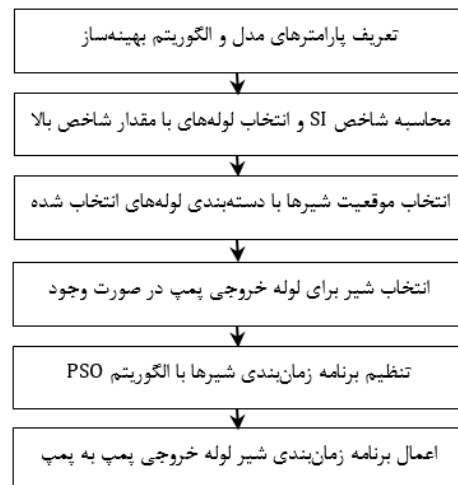
12. Particle Swarm Optimization (PSO)

9. Nodal Pressure Reliability Index

10. Network Pressure Reliability Index

۴-۲- ساختار روش

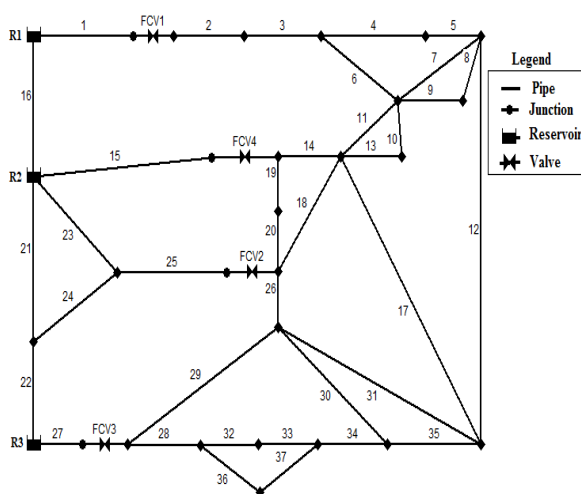
روندنمای روش پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. در این روش بعد از انتخاب موقعیت شیرها براساس شاخص SI لوله‌ها، در شبکه‌های که در آن‌ها پمپاژ مستقیم از مخزن به شبکه وجود دارد برای لوله‌های واقع در خروجی پمپ‌ها شیر انتخاب می‌شود. برنامه زمان‌بندی بهینه شیرها با استفاده از الگوریتم PSO و با حداکثرسازی شاخص NPRI به دست می‌آید و برنامه زمان‌بندی به دست‌آمده برای شیر واقع در لوله خروجی پمپ بر روی پمپ پیاده‌سازی می‌شود تا به صورت برنامه زمان‌بندی پمپ به دست آید. در این میان نقطه مشترک شیر FCV^{۱۳} و پمپ در دبی تنظیمی آن‌ها می‌باشد که باید دبی تنظیمی پمپ برابر دبی تنظیمی شیر باشد.



شکل ۱- روندنمای روش پیشنهادی

در این بخش، ابتدا صحت‌سنجی مدل پیشنهادی بر روی شبکه نمونه Jowit و Xu، ۱۹۹۰ انجام می‌شود. طرح شماتیک شبکه نمونه به صورت شکل (۲) است که در آن موقعیت شیرهای شبکه براساس شاخص مکان‌یابی شیر (Ali، ۲۰۱۵) نشان داده شده است. براساس تحقیقات Araujo و همکاران، ۲۰۰۶ چهار شیر کنترل از نوع TCV^{۱۴} در موقعیت لوله‌های ۱، ۲۵، ۲۷ و ۳۱ قرار گرفته است و در این تحقیق برای صحت‌سنجی مدل پیشنهادی چهار شیر کنترل جریان از نوع FCV در همین موقعیت‌ها قرار گرفته است.

صحت‌سنجی مدل با مقایسه مقادیر نشت ساعتی در مقاله Araujo و همکاران، ۲۰۰۶ با این مقاله انجام شده است. موقعیت شیرها مانند مقاله مذکور ولی نوع شیرها به صورت FCV در نظر گرفته شده است. همچنین در مقاله Araujo و همکاران، ۲۰۰۶ بهینه‌سازی به صورت کمینه‌کردن فشار گره‌های شبکه با مبنا قرار دادن فشار ۳۰ متر انجام شده است که در آن تابع هدف کمینه‌کردن مجموع اختلاف فشار در گره‌های شبکه از فشار ۳۰ متر بوده و برای فشارهای کم‌تر از ۳۰ متر نیز تابع پنالتی تعریف شده است. در این مقاله، تابع هدف مدل بهینه‌سازی به صورت بیشینه‌کردن قابلیت اطمینان فشار گرهی در کل شبکه است که به صورت رابطه (۳) می‌باشد. برای بهینه‌سازی از الگوریتم دسته ذرات استاندارد استفاده شده است که پارامترهای آن به صورت جدول (۱) است. مقادیر تعدادی از پارامترهای مدل بهینه‌سازی براساس نتایج تحقیقات قبلی Sedki و Ouazar، ۲۰۱۲ و مقادیر تعدادی دیگر با تحلیل حساسیت بر روی مدل پیشنهادی به دست‌آمده است. در جدول (۱)، I_{te} تعداد تکرار در هر اجرای مدل و N_s تعداد جمعیت ذرات در هر تکرار مدل است.



۵-۲- مطالعه موردی

برای تشریح روش پیشنهادی از یک شبکه نمونه تحقیقاتی Jowit و Xu، ۱۹۹۰ و شبکه توزیع آب شهر اهر استفاده شده است. شبکه نمونه Jowit و Xu، ۱۹۹۰ که در تحقیقات قبلی نیز استفاده شده است (Jowit و Xu، ۱۹۹۰؛ De Paola و همکاران، ۲۰۱۷؛ Ali، ۲۰۱۵) دارای ۳۷ لوله، ۲۵ گره و ۳ مخزن است. همچنین شبکه توزیع آب اهر که در تحقیقات مختلف قبلی نیز مورد استفاده قرار گرفته است (Dini و Tabesh، ۲۰۱۴، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹؛ دینی، ۱۳۹۷، ۱۳۹۸) دارای ۱۷۳ گره، ۱۹۶ لوله، پنج تانک، چهار پمپ و یک مخزن است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت‌سنجی و مدل‌سازی شبکه نمونه

13. Flow Control Valves (FCVs)

14. Throttle Control Valves (TCVs)

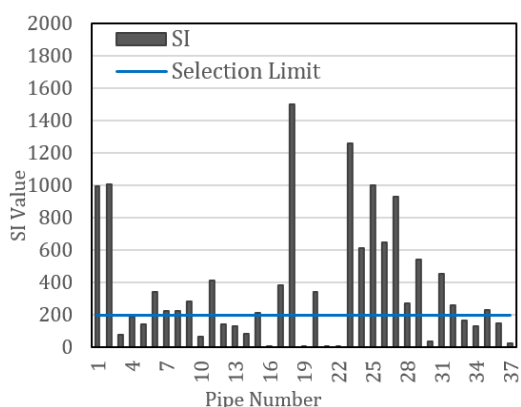
شکل ۲- طرح شماتیک شبکه نمونه اول و موقعیت شیرها

براساس شاخص SI

جدول ۱- ضرایب الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات

پارامترها	V_{max}	V_{min}	W	C_2	C_1	N_s	I_{te}
مقدار	۱۲	-۱۲	۰/۸	۲	۲	۲۰۰	۳۰۰

تنظیم شیرها بسیار بالا می‌باشد. در همین راستا در این تحقیق، ضرایب زبری لوله‌های شماره ۳ و ۲۷ متناسب با شرایط سایر لوله‌های شبکه به عدد ۱۰۰ اصلاح شده است. پس از اصلاح ضرایب زبری لوله‌های فوق، با به‌کارگیری شاخص مکان‌یابی شیر (Ali, 2015) مکان‌های جدید شیرها به‌دست آمد. در شکل (۴) مقادیر شاخص مکان‌یابی شیر برای لوله‌های مختلف نشان داده شده است. از تعداد ۳۷ لوله، حدود ۲۱ لوله دارای مقادیر شاخص مکان‌یابی بیش از ۲۰۰ و مستعد نصب شیر شناخته شده‌اند که در این میان با توجه به سری بودن و یا در یک مسیر بودن برخی لوله‌ها، شش لوله ۱، ۱۵، ۲۵، ۲۶، ۲۷ و ۳۱ برای نصب شیرهای کنترل جریان انتخاب شدند که موقعیت آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۴- تغییرات شاخص مکان‌یابی شیر برای شبکه نمونه

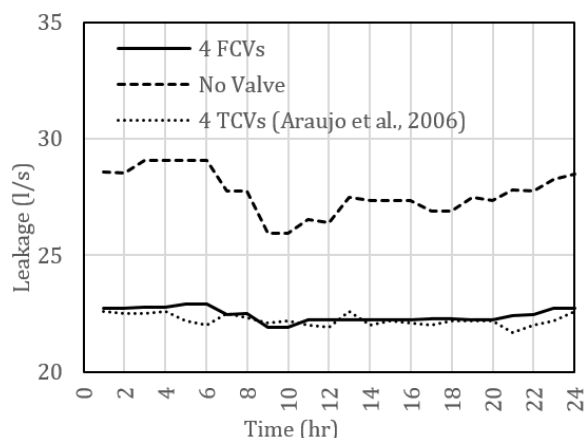
برای بررسی عملکرد شبکه نمونه بعد از اصلاح آن، سه سناریو به‌صورت نصب شیرهای کنترل جریان در چهار موقعیت ۱، ۲۵، ۲۶ و ۲۷ و نصب شیرهای کنترل جریان در چهار موقعیت ۱، ۱۵، ۲۵ و ۲۷ در نظر گرفته شد. با به‌کارگیری مدل بهینه‌سازی، جریان ساعتی خروجی از شیرهای کنترل جریان به‌صورت بهینه تنظیم شد. نتایج مربوط به متوسط مقادیر نشت و قابلیت اطمینان شبکه برای حالت قبل و بعد از بهینه‌سازی در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- مقایسه نتایج قابلیت اطمینان و نشت شبکه نمونه

برای حالت پایه و بعد از بهینه‌سازی

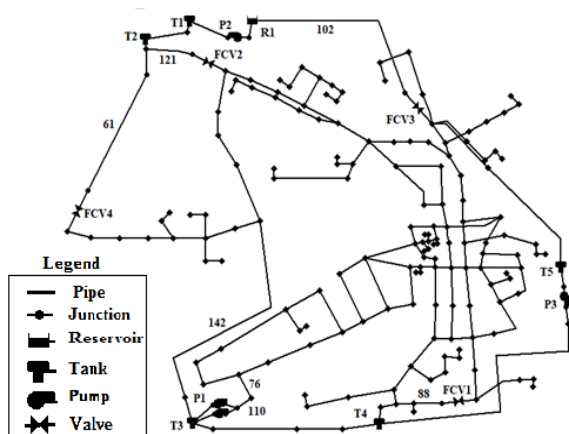
موقعیت شیرها	قابلیت اطمینان		نشت (l/s)	
	قبل (بدون شیر)	بعد (با شیر)	قبل (بدون شیر)	بعد (با شیر)
۱	۲۵	۲۶	۷	۱
۲	۲۳	۲۲	۲۹	۲
۳	۲۲	۲۴	۰/۹۴	۰/۹۵

در شکل (۳) منحنی تغییرات نشت از شبکه نمونه برای وضعیت قبل و بعد از بهینه‌سازی برای مقاله Araujo و همکاران (۲۰۰۶) و این مقاله مقایسه شده است. همان‌طوری که از شکل (۳) مشخص است، بعد از تنظیم بهینه شیرهای TCV در مقاله Araujo و همکاران (۲۰۰۶) و شیرهای FCV در این مقاله، نشت شبکه کاهش یافته است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل‌ها در کاهش نشت می‌باشد. همچنین منحنی تغییرات نشت ساعتی برای این مقاله انطباق خوبی با منحنی تغییرات ساعتی برای مقاله Araujo و همکاران، ۲۰۰۶ دارد که صحت عملکرد مدل پیشنهادی در این مقاله را تصدیق می‌کند.

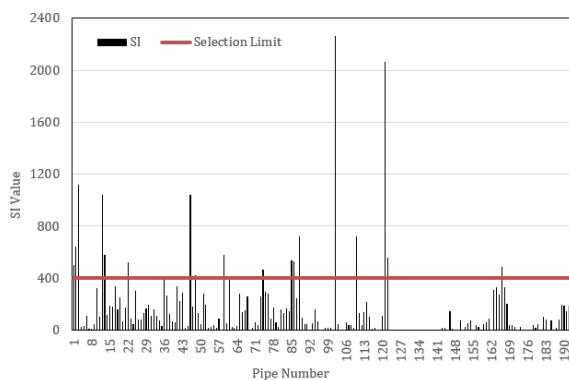


شکل ۳- منحنی تغییرات ساعتی نشت از شبکه نمونه

برای شبکه نمونه، ضرایب هیزن ویلیامز لوله‌های شماره ۳ و ۲۷ به‌ترتیب ۱۰ و ۶ است. درحالی‌که براساس مطالعات Lamont (۱۹۸۱) برای شبکه توزیع آب با قدمت‌های ۳۰ تا ۱۰۰ سال و متناسب با شرایط نگهداری و بهره‌برداری و با هر نوع لوله از نظر جنس و قطر، مقادیر ضریب هیزن ویلیامز لوله‌ها بین اعداد ۴۰ تا ۱۴۰ دسته‌بندی شده است. در تحقیقات قبلی برای مکان‌یابی بهینه نصب شیرهای کنترل فشار و کنترل جریان از همین ضرایب زبری برای لوله‌های ۳ و ۲۷ استفاده شده است. به‌کارگیری ضرایب هیزن ویلیامز خیلی کم برای لوله‌های شبکه، عملکردی شبیه به شیرهای کنترل جریان و یا کنترل فشار ایجاد می‌کند که موجب محدودیت جریان عبوری می‌شوند. لذا در تحقیقات مذکور امکان انحراف از نتایج اصلی در تعیین مکان بهینه نصب شیرها و نتایج



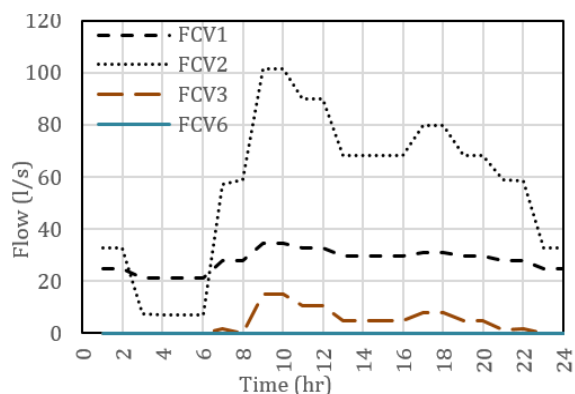
شکل ۶- شبکه توزیع آب شهر اهر و موقعیت شیرهای کنترل جریان



شکل ۷- تغییرات شاخص مکان‌یابی شیر برای لوله‌های شبکه توزیع آب اهر

همان‌طوری که مشخص است از مجموع ۱۹۲ لوله ۱۹ لوله دارای مقدار شاخص مکان‌یابی SI بیشتر از ۴۰۰ است و به‌عنوان مکان‌های مستعد انتخاب شیر در نظر گرفته شده است. در بین لوله‌های انتخاب‌شده برای نصب شیر نیز با توجه به این‌که برخی لوله‌ها با لوله‌های دیگر سری و در یک مسیر می‌باشند، براساس میزان اهمیت و مقدار شاخص مکان‌یابی SI در آن‌ها، پنج مورد شامل لوله‌های ۶۱، ۸۸، ۱۰۲، ۱۱۰ و ۱۲۱ به‌عنوان گزینه نهایی برای نصب شیرها انتخاب شدند، که در طرح نهایی در چهار مورد از آن‌ها شیر کنترل جریان از نوع FCV و در یک مورد که در لوله واقع در خروجی پمپ‌ها قرار دارد، پمپ در نظر گرفته شده است. ابتدا برنامه زمان‌بندی پنج شیر موجود بدون در نظر گرفتن پمپ تنظیم شده است. برای شیرهای کنترل جریان، میزان دبی خروجی از شیرها به‌عنوان متغیر تصمیم مسئله فرض شده است. مقادیر دبی شیرها در بازه ۰ تا ۲۰۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی دبی خروجی از شیرها با استفاده از الگوریتم دسته ذرات انجام شده است که مقادیر

براساس نتایج جدول (۲) قابلیت اطمینان شبکه نمونه قبل از بهینه‌سازی برابر ۰/۷۷ است که بعد از بهینه‌سازی و اعمال برنامه زمان‌بندی بهینه شیرها به‌ترتیب برای سه سناریوی فوق به ۰/۹۴، ۰/۹۳ و ۰/۹۵ افزایش یافته است. همچنین میزان نشت شبکه نمونه قبل از بهینه‌سازی برابر ۲۹/۲ لیتر بر ثانیه است که بعد از بهینه‌سازی به‌ترتیب برای سه سناریوی تعریف‌شده به ۲۳، ۲۲/۹ و ۲۲/۴ کاهش یافته است. در بین سناریوهای تعریف‌شده سناریوی سوم بهترین عملکرد از نظر افزایش قابلیت اطمینان و کاهش نشت را دارد. در شکل (۵) برنامه زمان‌بندی تنظیم شیرهای کنترل جریان برای این سناریو نشان داده شده است. براساس نتایج شکل (۵) شیر کنترل جریان FCV6 کاملاً بسته است و جریانی را عبور نمی‌دهد. درحالی‌که شیر کنترل جریان FCV3 در ساعت‌های ۱ تا ۶ و ۲۳ و ۲۴ بسته بوده و در سایر ساعت‌ها دبی کم‌تر از ۱۸ لیتر بر ثانیه را تنظیم می‌کند. در مقابل شیرهای FCV1 و FCV2 در تمامی ساعت‌ها باز بوده و برای ساعت‌های پرمصرف دبی بالا و برای ساعت‌های کم‌مصرف دبی پایین را تنظیم می‌کنند. بدین‌ترتیب عملکرد برنامه‌ریزی‌شده شیرهای کنترل جریان باعث بهبود عملکرد هیدرولیکی شبکه نمونه از نظر قابلیت اطمینان و کاهش نشت می‌شود. در مورد سناریوی سوم، تنظیمات شیرهای کنترل جریان باعث افزایش ۲۴ درصدی قابلیت اطمینان و کاهش ۲۳ درصدی نشت می‌شود.



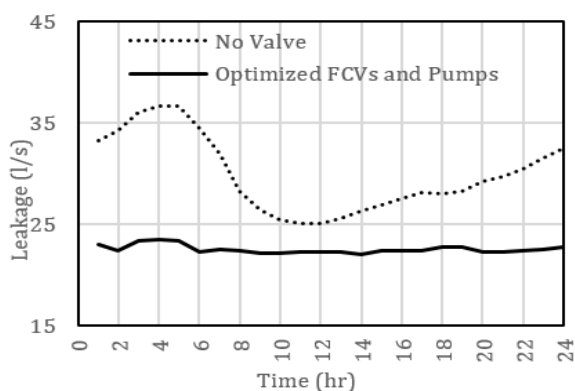
شکل ۵- منحنی تنظیمات ساعتی شیرهای کنترل جریان

۲-۳- مدل‌سازی شبکه توزیع آب اهر

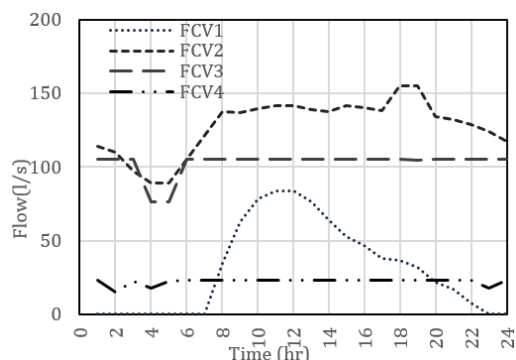
در شکل (۶) طرح شماتیک شبکه توزیع آب اهر به‌همراه موقعیت مناسب نصب شیرها نشان داده شده است. برای بهسازی عملکرد شبکه توزیع آب اهر از برنامه‌ریزی تنظیم بهینه شیرها و پمپ‌ها در شبکه استفاده شده است. برای این منظور ابتدا قبل از بهینه‌سازی، موقعیت مناسب شیرهای کنترل جریان تعیین شده است. در شکل (۷) مقادیر شاخص مکان‌یابی شیر برای لوله‌های مختلف در شبکه توزیع آب اهر نشان داده شده است.

این که تنها تأمین آب برای یکی از شهرک‌های در حال توسعه شهر اهر را بر عهده دارد دبی پایین در حدود ۱۵ تا ۲۳ لیتر بر ثانیه را تنظیم کرده است. همان طوری که از شکل (۹) مشخص است پمپ‌ها در ساعت‌های ۳، ۴ و ۵ در وضعیت خاموش هستند و برای دیگر ساعت‌ها تغییرات ظرفیت نسبی پمپاژ در بازه ۰ تا ۱ قرار دارد که متناسب با نیاز شبکه از بخشی از ظرفیت پمپاژ دبی پمپ‌ها و یا ظرفیت کامل آن‌ها بهره‌برداری می‌شود. همان طوری که مشخص است حالت خاموش و پمپاژ با ظرفیت پایین مربوط به ساعت‌های شب و ظرفیت پمپاژ کامل مربوط به ساعت‌های پیک مصرف در شبکه می‌باشد.

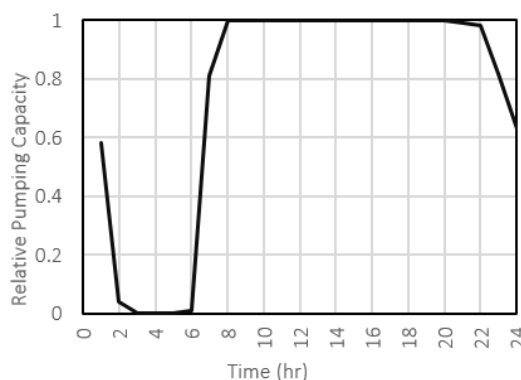
برای بررسی تأثیر برنامه زمان‌بندی بهینه تنظیم شیرها و پمپ‌ها بر عملکرد شبکه توزیع آب اهر، شاخص نشت شبکه و قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه برای وضعیت موجود شبکه و وضعیت بعد از تنظیمات بررسی شده است. در شکل (۱۰) روند تغییرات نشت برای شبکه توزیع آب اهر در وضعیت موجود و بعد از اعمال برنامه زمان‌بندی بهینه تنظیم شیرها و پمپ‌ها مقایسه شده است. همان طوری که معلوم است در وضعیت موجود، مقدار نشت شبکه در زمان‌های حداقل مصرف، بیش‌ترین مقدار و در حدود ۳۷ لیتر بر ثانیه و در زمان‌های حداکثر مصرف، کم‌ترین مقدار و در حدود ۲۵ لیتر بر ثانیه است و به‌طور متوسط در حدود ۳۰ لیتر بر ثانیه است که نشان‌دهنده بالا بودن نشت و نوسان زیاد آن در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز است. این شاخص با انجام برنامه زمان‌بندی بهینه تنظیم شیرها و پمپ‌ها کاهش یافته و نوسان‌های آن تعدیل شده است، به طوری که مقادیر نشت در شبکه به حدود ۲۲ تا ۲۳ لیتر بر ثانیه و به‌طور متوسط به ۲۲/۵ لیتر بر ثانیه محدود شده است. در مجموع اعمال برنامه زمان‌بندی تنظیم شیرها و پمپ‌ها در شبکه توزیع آب اهر باعث کاهش نوسان نشت و کاهش حدود ۲۵ درصدی نشت در شبکه شده است. در شکل (۱۱) روند تغییرات قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه برای شبکه توزیع آب اهر در وضعیت موجود و بعد از اعمال برنامه زمان‌بندی بهینه تنظیم شیرها و پمپ‌ها نشان داده شده است.



پارامترهای آن در جدول (۱) آورده شده است. بعد از تنظیم برنامه زمان‌بندی دبی خروجی از شیرها، برنامه زمان‌بندی شیر واقع در خروجی پمپ به پمپ‌های موجود اعمال شده است. تنظیم پمپ در قالب ظرفیت نسبی دبی خروجی پمپاژ که به‌صورت نسبت ظرفیت پمپاژ در وضعیت موجود به ظرفیت پمپاژ کامل تعریف می‌شود و در بازه ۰ تا ۱ قرار دارد، انجام شده است. وضعیت صفر به معنی عدم پمپاژ و وضعیت یک به معنی پمپاژ با ظرفیت کامل و اعداد بین ۰ تا ۱ به معنی پمپاژ نسبی کم‌تر در مقایسه با ظرفیت پمپاژ کامل است. برنامه زمان‌بندی بهینه تنظیم شیرها در شکل (۸) و برنامه زمان‌بندی ظرفیت نسبی پمپاژ در شکل (۹) نشان داده شده است. برنامه زمان‌بندی پمپ‌ها برگرفته از برنامه زمان‌بندی شیر ۱۱۰ است.



شکل ۸- منحنی تنظیمات ساعتی شیرها در شبکه اهر



شکل ۹- منحنی تنظیمات ساعتی وضعیت عملکرد پمپ

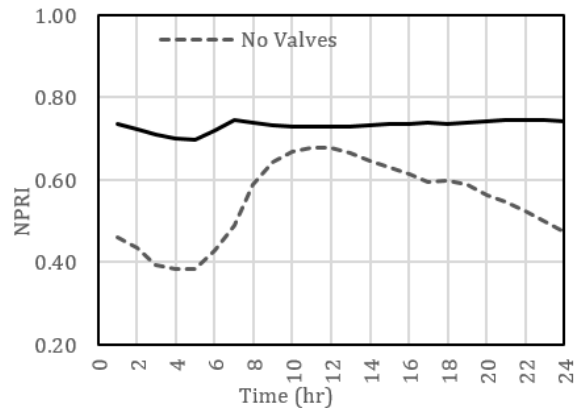
شیر FCV2 که بر روی لوله ۱۲۱ قرار گرفته است، دبی ورودی بالایی را کنترل می‌کند، به طوری که در زمان حداقل مصرف در طول شب، دبی ۸۹ لیتر بر ثانیه و در زمان پیک مصرف در ساعت‌های بعد از ظهر دبی ۱۵۵ لیتر بر ثانیه را تنظیم می‌کند. شیر FCV3 که بر روی لوله ۱۰۲ واقع شده است، به‌غیر از دو ساعت ۴ و ۵ شب که دبی تنظیم آن حدود ۷۶ لیتر بر ثانیه است برای سایر ساعت‌ها دبی ۱۰۵ لیتر بر ثانیه را تنظیم کرده است. همچنین شیر FCV4 که بر روی لوله ۶۱ قرار گرفته است، به‌دلیل

اولیه مدل‌ها، از شبکه نمونه Jowit و Xu (۱۹۹۰) و برای بررسی تفصیلی آن‌ها از شبکه توزیع آب اهر استفاده شده است. برای صحت‌سنجی روش پیشنهادی، در شبکه نمونه و در شرایط مشابه، مقادیر نشت ساعتی برای مقاله Araujo و همکاران (۲۰۰۶) با این مقاله مقایسه شده است که نشان‌دهنده انطباق مناسب بین آن‌ها است و این موضوع عملکرد مدل پیشنهادی را تصدیق می‌کند. برای بررسی عملکرد شبکه نمونه، ضرایب هیزن ویلیامز شبکه اصلاح شد و بعد از آن با توجه به موقعیت‌های تعیین شده بر شیرهای کنترل جریان از نوع FCV، سناریوهای مختلفی در ارتباط با نصب و تنظیم بهینه چهار شیر در نظر گرفته شد که در بهترین سناریو، قابلیت اطمینان شبکه در حدود ۲۴ درصد افزایش و نشت شبکه در حدود ۲۳ درصد کاهش یافت. در مورد شبکه توزیع آب اهر، ابتدا بر اساس مقادیر شاخص مکان‌یابی شیر و هم‌پوشانی لوله‌ها با یکدیگر، موقعیت مناسب نصب شیرها شامل لوله‌های ۶۱، ۸۸، ۱۰۲، ۱۱۰ و ۱۲۱ انتخاب شدند که در چهار مورد از آن‌ها شیر کنترل جریان و در یک مورد پمپ در نظر گرفته شد. با اعمال برنامه زمان‌بندی بهینه تنظیم شیرها و پمپ‌ها در شبکه توزیع آب اهر، نشت شبکه در حدود ۲۵ درصد کاهش و قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه در حدود ۳۳ درصد افزایش یافت که نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش پیشنهادی برای بهبود کارایی شبکه‌ها می‌باشد.

۵- مراجع

آسفی ح، ذالنوری ا، نوذریپور ع، مرادی ع، "مدیریت فشار شبکه‌های توزیع آب شهری و استفاده صحیح از منابع آب"، اولین همایش منطقه‌ای مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی‌شهر، اصفهان، ۱ اسفند، ۱۳۸۸. اسدیانی یکتا ا ح، تابش م، "یک مدل تلفیقی جامع برای محاسبه و مدیریت نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری"، نشریه مهندسی عمران و نقشه‌برداری، ۱۳۸۹، ۴۴ (۱)، ۱-۱۲. اسدی ا، دینی م، "بررسی تأثیر تنظیم شیر فشارشکن بر افزایش قابلیت اطمینان فشارگرهی شبکه"، هفتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه یزد، ۲ و ۳ آبان، ۱۳۹۷. اسدی ا، دینی م، "بهینه‌سازی نشت و قابلیت اطمینان شبکه توزیع آب با استفاده از الگوریتم PSO"، چهارمین کنگره بین‌المللی توسعه کشاورزی، منابع طبیعی، محیط زیست و گردشگری ایران، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، ۲۳ تا ۲۵ مرداد، ۱۳۹۸. تابش م، هومهر س، "مدیریت نشت در شبکه‌های آبرسانی به‌وسیله بهینه‌سازی تنظیم شیرهای فشارشکن با استفاده از

شکل ۱۰- تغییرات نشت شبکه توزیع آب اهر در وضعیت موجود و بعد از اعمال برنامه زمان‌بندی



شکل ۱۱- تغییرات قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه اهر در وضعیت موجود و بعد از اعمال برنامه زمان‌بندی

بر اساس نتایج شکل (۱۱) در وضعیت موجود میزان قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه پایین و دارای نوسان زیاد است، به‌طوری‌که در زمان حداقل مصرف مقدار قابلیت اطمینان شبکه، کم‌ترین مقدار و در حدود ۰/۳۸ و در زمان حداکثر مصرف مقدار قابلیت اطمینان شبکه، بیش‌ترین و در حدود ۰/۶۸ است که نوسان شدید در حدود ۰/۳۲ را دارد. همچنین متوسط قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز در حدود ۰/۵۵ است. با اعمال برنامه زمان‌بندی بهینه تنظیم شیرها و پمپ‌ها، قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه افزایش یافته و نوسان‌های آن نیز کاهش یافته است. به‌طوری‌که مقادیر حداقل و حداکثر قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه در ۲۴ ساعت شبانه‌روز به حدود ۰/۷۰ تا ۰/۷۵ و مقادیر متوسط آن به حدود ۰/۷۳ رسیده است. به‌طور کلی با اعمال برنامه زمان‌بندی بهینه تنظیم شیرها و پمپ‌ها، قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه به‌طور متوسط در حدود ۳۳ درصد افزایش یافته است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدیریت فشار و نشت در شبکه‌های توزیع آب با اعمال برنامه زمان‌بندی بهینه تنظیم شیرها و پمپ‌ها بررسی شده است. برای این منظور یک مدل بهینه‌سازی ساخته شده است که در آن بعد از تعیین موقعیت مناسب شیرها با استفاده از شاخص مکان‌یابی شیر، با تنظیم بهینه دبی جریان خروجی از شیرها، مقادیر قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه بهینه‌سازی شده است. همچنین در حالت وجود پمپ به‌صورت سری در همسایگی شیر کنترل جریان، برنامه زمان‌بندی بهینه شیر به پمپ موجود اعمال و شیر حذف شده است. برای انجام بهینه‌سازی، الگوریتم دسته‌ذرات به‌عنوان بهینه‌ساز با مدل EPANET به‌عنوان شبیه‌ساز شبکه در محیط متلب تلفیق شده است. برای صحت‌سنجی و ارزیابی

- Araujo LS, Ramos H, Coelho ST, "Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management", *Water Resources Management*, 2006, 20 (1), 133-149.
- Eberhart RC, Kennedy J, "Particle swarm optimization", *IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, 27 November-1 December, 1995.
- De Paola FD, Giugni M, Portlano D, "Pressure Management Through Optimal Location and Setting of Water Distribution Networks Using a Music-Inspired Approach", *Water Resources Management*, 2017, 31, 1517-1533.
- Dini M, Tabesh M, "A New Method for Simultaneous Calibration of Demand Pattern and Hazen-Williams Coefficients in Water Distribution Systems", *Water Resources Management*, 2014, 28 (7), 2021-2034.
- Dini M, Tabesh M, "Water distribution network quality model calibration; a case study: Ahar", *Water Supply*, 2017, 16 (5), 1-13.
- Dini M, Tanesh M, "Optimal renovation planning of water distribution networks considering hydraulic and quality reliability indices", *Urban Water Journal*, 2019, 16 (4), 249-258.
- Jowitt PW, Xu C, "Optimal valve control in water distribution networks", *Water Resources Planning and Management*, ASCE, 1990, 116 (4), 455-472.
- Lamont PA, "Common pipe flow formulas compared with the theory of roughness. *American Water Works Association*, 1981, 73 (5), 274-280.
- Menelaos P, Vasilis K, Konstantinos G, "Pressure management and energy recovery capabilities using PATs", *Procedia Engineering*, 2016, 162, 503-510.
- Meniconi B, Brunone M, Ferrante E, Mazzetti DB, Laucelli G, "Transient effect of Self-adjustment of Pressure Reducing Valves", *Procedia Engineering*, 2015, 119, 1030-1038.
- Rossman LA, "EPANET2: user's manual", U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, Ohio, 2000.
- Samir N, Kansoh R, Elbarki W, Fleifle A, "Pressure control for minimizing leakage in water distribution systems", *Alexandria Engineering Journal*, 2017, 56, 601-612.
- Sedki A, Ouazar D, "Hybrid particle swarm optimization and differential evolution for optimal design of water distribution systems", *Advanced Engineering Informatics*, 2012, 26, 582-591.
- الگوریتم ژنتیک"، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۳ بهمن، ۱۳۸۵.
- تابش م، واسطی م م، "کاهش میزان نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری از طریق حداقل نمودن فشار اضافی در شبکه"، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳۸۵، ۲ (۲)، ۵۳-۶۶.
- تائبی ا، چمنی م ر، "شبکه‌های توزیع آب شهری"، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۷، ۱-۶۰۰.
- جمشیدی ش، "کاهش تلفات شبکه توزیع آب شهری با استفاده از مدیریت فشار"، اولین کنفرانس بین‌المللی مهندسی محیط زیست، مرکز راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار، تهران، ۹ بهمن، ۱۳۹۳.
- جهانگیر م، عباس غ، جهانگیر ع، "مدیریت هوشمند فشار و کاهش نشت شبکه‌های آبرسانی در محیط WaterGems مطالعه موردی مجتمع آبرسانی دو حصاران خراسان جنوبی"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، ۱۳۹۱، ۴ (۱۳)، ۴۵-۵۵.
- دینی م، "ارزیابی عملکرد شبکه توزیع آب اهر بعد از بلندمرتبه‌سازی‌های مضاعف"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۷، ۴۸ (۱)، ۸۹-۱۰۰.
- دینی م، تابش م، "ارائه شاخص قابلیت اطمینان جدید برای ارزیابی عملکرد شبکه توزیع آب"، *مجله آب و فاضلاب*، ۱۳۹۷، ۲۹ (۳)، ۱-۱۶.
- دینی م، "بررسی کارایی الگوریتم دسته ذرات در تنظیم ضرایب هیزن ویلیامز مدل شبکه توزیع آب"، *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز*، ۱۳۹۸، انتشار آنلاین.
- سلطانی اصل م، فغفورمغربی م، "مدیریت هوشمند فشار به‌منظور کاهش نشت در شبکه‌های آبرسانی، مطالعه موردی: منطقه سرفرازان مشهد"، *مجله آب و فاضلاب*، ۱۳۸۸، ۲۰ (۳)، ۹۹-۱۰۴.
- سالنامه آماری کشور، مرکز آمار ایران، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، دفتر ریاست جمهوری، ۱۳۹۵.
- صدیقیان ح، "بهینه‌سازی نشت از شبکه آبرسانی شهری با استفاده از مدل فیزیکی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی دانشگاه کرمان، ایران، ۱۳۸۹.
- کارآموز م، تابش م، نظیف س، مریدی ع، "مدل مدیریت فشار در شبکه توزیع آب شهری"، *هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت، ۱۳۸۵*.
- Ali M, "Knowledge-based Optimization Model for Control Valve Locations in Water Distribution Networks", *Water Resources Planning Management*, 2015, 141 (1), 481-487.

EXTENDED ABSTRACT

Pressure and Leakage Management of Water Distribution Network with Optimal Scheduling of Valves and Pumps

Mehdi Dini^{*}, Asghar Asadi

Civil Engineering Department, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Received: 02 August 2019; Accepted: 10 May 2020

Keywords:

Water distribution network, Scheduling program, Network pressure reliability index, Leakage, EPANET, MATLAB

1. Introduction

Control of water leakage in Water Distribution Networks (WDNs) is important to save drinking water consumption. Pressure management is one of the solutions that directly affected the water leakage and reliability of the WDNs. The leakage rate depended on the nodal pressure, high-pressure increases the leakage rate and failure in the network, and low pressure decreases water supply reliability in WDNs. However, it is necessary to be preserved sufficient pressure throughout the network to ensure that consumer demands are fully provided at all times. Pressure management is one of the effective and cheapest methods for leakage reduction and reliability addition in WDNs. The aim of this paper is to develop a methodology based on maximizing the network reliability by applying an optimized scheduling program for setting flow control valves (FCVs) and pumps at different times of the day, leading to pressure management and leakage reduction in the networks. For this purpose, the particle swarm optimization (PSO) algorithm is used to find the optimal setting of FCVs and pumps. The aim of the optimization algorithm is to maximize the network reliability of the WDN. For this purpose, the network pressure reliability index (NPRI) is used which is proposed by Dini and Tabesh (2017). Also, to determine the optimal location of the valves, the valve selection index (SI) is used which is proposed by Ali (2015). The methodology is verified by an example network (Jowitt and Xu, 1990). Also, it is applied to an example network and Ahar WDN.

2. Methodology

2.1. Leakage rate

In this paper, the leakage in each node of the network is calculated by a function of flow through an orifice (Araujo et al., 2006). They are presented in eq. (1).

$$q_j = (C \sum_{j=1}^M 0.5 L_{ij}) P_j^\beta \quad (1)$$

where q_j is the leakage flow at node j , C is the discharge coefficient of the orifice which depends on the shape and the diameter, L_{ij} is the pipe length between nodes i and j , p_j is the service pressure at node j , M is the number of pipe connected to the node j and β is the nodal pressure exponent ($\beta=1.18$).

* Corresponding Author

E-mail addresses: m.dini@azaruniv.ac.ir (Mehdi Dini), asghar.asadi71@gmail.com (Asghar Asadi).

2.2. Valve selection index

In large-scale WDNs, there are a lot of pipes in the network. So selection of the optimal pipe for installing the valve is difficult. Therefore, before optimization of valve location, all pipes in the network are evaluated by the SI index, which is proposed by Ali (2015).

$$SI = \frac{Q L}{C_{HW} D} \quad (2)$$

Where SI is the valve selection index, Q is the pipe flow, L is the pipe length, C_{HW} is the roughness coefficient of pipes and D is the pipe diameter.

2.3. Network reliability

The Nodal Pressure Reliability Index (NPRI), proposed by Dini and Tabesh (2017) is used to evaluate the reliability of WDNs. This index is defined as nodal and network reliability indices. In eq. (3) and eq. (4), the utility function of the index is presented for each node and network.

$$NPRI(j, t) = \begin{cases} 0 & P < 10m \\ \frac{1}{32}(P - 10) & 10m < P < 26m \\ \frac{1}{10}(P - 26) + 0.5 & 26m < P < 31m \\ 1 & P = 31m \\ -\frac{1}{38}(P - 31) + 1.0 & 31m < P < 50m \\ -\frac{1}{40}(P - 50) + 0.5 & 50m < P < 60m \\ 0.25 & 60m < P \end{cases} \quad (3)$$

$$NPRI = \frac{\sum_{j=1}^{NN} Q_{j,t}^{req}(NPRI(j, t))}{\sum_{j=1}^{NN} Q_{j,t}^{req}} \quad (4)$$

Where $NPRI(j, t)$ is the nodal pressure reliability of node j at time t , P is the nodal pressure, $NPRI$ is the nodal pressure reliability of the network, NN is the number of nodes and $Q_{j,t}^{req}$ is the required nodal demand of node j at time t .

2.4. Optimization algorithm

In this paper, the particle swarm optimization algorithm is used to find the optimal setting of FCVs and pumps by maximizing the nodal pressure reliability of the network that is coupled with EPANET (Rossman, 2000). In the PSO algorithms, the position and velocity of each particle ($X_i(t)$ and $V_i(t)$) are initialized by random vectors. The new position and velocity of the particles ($X_i(t+1)$ and $V_i(t+1)$) in the PSO algorithm are updated by these equations (Eberhart and Kennedy, 1995):

$$X_i = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (5)$$

$$V_i(t+1) = C_1 * Rand_1 * (P_{i.best} - X_i(t)) + C_2 * Rand_2 * (P_{g.best} - X_i(t)) + W * V_i(t) \quad (6)$$

Where C_1 and C_2 are called the acceleration coefficients, $Rand_1$ and $Rand_2$ are two uniformly distributed random numbers, $P_{i.best}$ denotes the personal historically best particle for the i th particle, $P_{g.best}$ denotes the best position that the whole swarm has found.

3. Results and discussion

3.1. Verification of the first case study

In this part, the proposed method will be verified in the first case study (Jowitt and Xu, 1990) that was used to find the optimal location and setting of valves by Araujo et al (2006). In Fig. 1, the leakage rate of the example network is compared for the Araujo et al (2006) paper and this paper. A comparison of the results showed that

the leakage curve for this paper was in good agreement with the leakage curve for the Araujo et al (2006) paper. So the proposed method and PSO algorithm have a good performance in term of nodal pressure and leakage reduction for the first case study. Therefore, it verifies the performance of the proposed method.

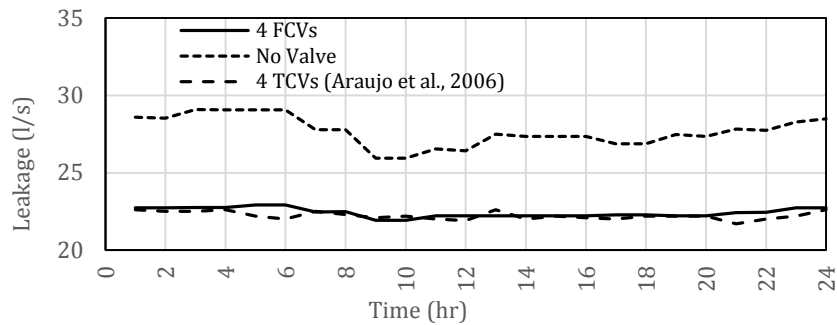


Fig. 1. The leakage rate of the example network

3.2. Application to the Ahar WDN

In this case study, first, the SI index is calculated for the pipes. The 19 pipes from the 192 pipes with the highest SI index are nominated for the installation of valves. After considering the related parameters to the valve selection index, the five pipes (pipes 61, 88, 102, 110, 121) are selected as a final case for installation of valves. In four of them, the flow control valves and in the case adjacent to the pumps, the pumps are considered. For flow control valves, the flow of the valves and for pumps, the relative pumping capacity is assumed as the problem decision variable. The PSO algorithm is used to find the optimal setting of FCVs and pumps.

Fig. 2 and 3 show the variation of NPRI and leakage rate without valves and with optimized valves and pumps for the Ahar WDN. For the case without valves, the average NPRI reliability index and the average leakage rate are 55 percent and 30 l/s respectively. After optimization, they change to 73 percent and 23 l/s respectively. It is clear that by optimizing the setting of valves and pumps in Ahar WDN, the average NPRI reliability index increased about 33 percent and the average leakage rate decreased by about 25 percent in comparison with the network without valves.

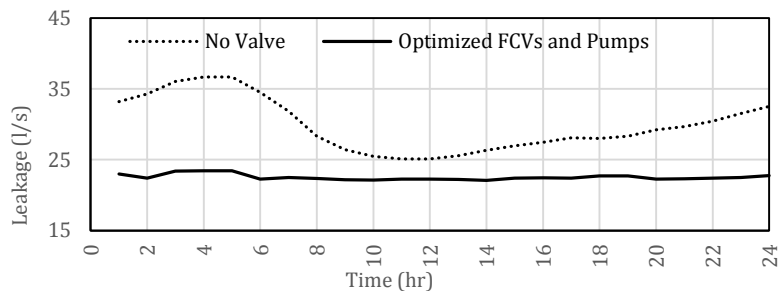


Fig. 2. Variation of leakage rate in the Ahar WDN

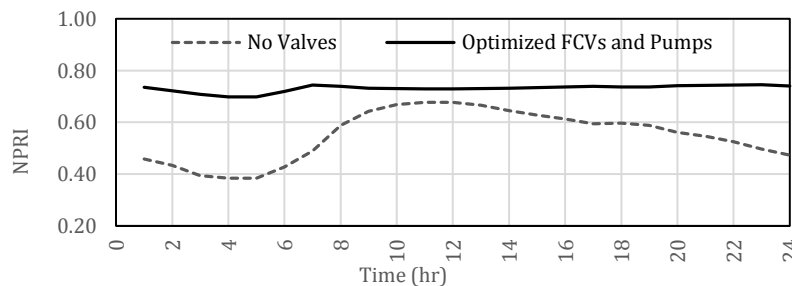


Fig. 3. Variation of NPRI in the Ahar WDN

4. Conclusions

In this paper, the management of pressure and leakage in water distribution networks is investigated by applying the optimal time scheduling of valves and pumps. For this purpose, an optimization model has been developed in which after determining the proper valve location by using the valve selection index, the pressure

reliability index of WDNs is maximized by setting the flow in the valves and the relative pumping capacity in the pumps. To create the model, The PSO algorithm that is written in the MATLAB code by the combination of WDN simulator model (EPANET) is used. The proposed method is verified on the Jowitt and Xu, (1990) network and it is used for detailed model examination on Ahar WDN.

The results of verification of the proposed method for the example network in the same condition showed that the leakage rate for this paper was in good agreement with the leakage rate for the Araujo et al (2006) paper, that, it verifies the performance of the proposed method. In Ahar WDN, after considering the related parameters to the valve selection index, the five pipes (pipes 61, 88, 102, 110, 121) are selected as a final case for the installation of valves. In four of them, the flow control valves and in one of them, the pumps are considered. After the optimal setting of valves and pumps in Ahar WDN, the average NPRI reliability index increased about 33 percent and the average leakage rate decreased about 25 percent in comparison with the network without valves which, demonstrates the proper performance of the proposed method to increase the efficiency of the networks.

5. References

- Ali M, "Knowledge-based Optimization Model for Control Valve Locations in Water Distribution Networks", *Water Resources Planning Management*, 2015, 141 (1), 481-487.
- Araujo LS, Ramos H, Coelho ST, "Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management", *Water Resources Management*, 2006, 20 (1), 133-149.
- Dini M, Tabesh M, "A new reliability index for evaluating the performance of eater distribution networks", *Journal of Water and Wastewater*, 2017, 29 (3), 1-16 (in Persian).
- Eberhart RC, Kennedy J, "A new optimizer using particle swarm theory", *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, IEEE service center, Nagoya, Japan, 4-6 Oct., 1995.
- Rossman LA, "EPANET2: user's manual", U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, Ohio, 2000.
- Jowitt PW, Xu C, "Optimal valve control in water distribution networks", *Water Resources Planning and Management*, ASCE, 1990, 116 (4), 455-472.