

Studying the Performance of Different Approaches for PRVs Setting and Improving Reliability in Water Distribution Networks

Mohammad Amin Gheybi^{1*}, Milad Latifi² and Mohammad Taghi (Omid) Naeeni³

1- PhD Student in Civil Engineering-Water, Shahid Abbaspour College of Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran.

2- PhD, School of Civil Engineering, College of Engineering, Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, Tehran, Iran.

* Corresponding Author, Email: m_gheibi@sbu.ac.ir

Received: 29/7/2017

Revised: 13/10/2017

Accepted: 14/10/2017

Abstract

High pressure in water distribution networks leads to various problems such as increased leakage, bursts and unexpected consumptions. Hence, pressure management plans are implemented using pressure reducing valves (PRVs), tanks and pump stations. In this study, PRVs are applied for pressure management in three different approaches; fixed outlet, time modulation and flow modulation. In fixed outlet PRVs, a steady set pressure is considered for each PRV during the day. A simulation-optimization model is developed to find the optimal set pressures for all PRVs. In time modulation approach, PRVs are able to apply different pressure settings at different hours of the day which results the better control of the hourly pressure fluctuations in the water network. In this approach, optimization of set pressures is carried out. In flow modulation PRVs, the set pressure is regulated according to the average pressure in the network. In addition, in this study a new reliability index is introduced considering the average pressure and hourly pressure fluctuations and their effects on consumer's satisfaction. This index is considered as an optimization objective function. Finally, comparing the performance of the above approaches shows that flow modulation, time modulation and fixed outlet approach are the most reliable, respectively.

Keywords: Consumer's satisfaction, Flow modulation, PRV, Time modulation, Water distribution.

بررسی و مقایسه کارایی رویکردهای مختلف تنظیم شیرهای فشارشکن در بهبود قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع آب

محمدامین غیبی^{۱*}، میلاد لطیفی^۲ و سیدتقی (امید) نایینی^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران-آب، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- دکتری مهندسی عمران-آب، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول، ایمیل: m_gheibi@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۵/۷

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۶/۷/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۲۲

چکیده

بالا بودن فشار در شبکه‌های توزیع آب موجب بروز مشکلات متعددی مانند افزایش نشت، حوادث و مصرف ناخواسته می‌شود. به این منظور برنامه‌های مدیریت فشار با به کارگیری شیرهای فشارشکن، مخازن و پمپ‌ها اجرا می‌شوند. در این تحقیق از شیرهای فشارشکن با سه رویکرد فشار خروجی ثابت، نوسان زمانی و نوسان دبی برای مدیریت فشار در شبکه توزیع آب استفاده شده است. در شیرهای با خروجی ثابت، یک فشار تنظیمی یکسان در تمام ساعات بر روی جریان اعمال می‌شود. یک مدل شبیه‌ساز و بهینه‌ساز برای یافتن تنظیمات بهینه این شیرها توسعه داده شده است. شیرهای نوسان زمانی قادر هستند در ساعات مختلف شبانه‌روز، فشار تنظیمی متغیری را اعمال نمایند. به این ترتیب می‌توان نوسانات ساعتی فشار در شبکه را بهتر کنترل نمود. در این مورد هم بهینه‌سازی تنظیمات شیرها انجام شده است. در شیرهای نوسان دبی با توجه به فشار متوسط شبکه مقدار فشار خروجی تنظیم می‌شود. به علاوه، در این پژوهش شاخص قابلیت اطمینان جدیدی بر پایه رضایت مشترکین و لحاظ نمودن اثر نوسانات و متوسط فشار، معرفی و به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی به کار گرفته شده است. در نهایت و با مقایسه عملکرد رویکردهای مذکور ملاحظه شد که به ترتیب رویکردهای نوسان دبی، نوسان زمانی و خروجی ثابت دارای بیشترین اطمینان‌پذیری هستند.

کلمات کلیدی: شبکه‌های توزیع آب، مدیریت فشار، رضایت مشترکین، شیر فشارشکن، نوسان زمانی، نوسان دبی.

شبکه صورت می‌گیرد مدیریت فشار اطلاق می‌شود، به شکلی که حقوق قانونی مشترکان و مصرف‌کنندگان تأمین شود و تغییرات و ناپایداری در فشار وجود نداشته باشد. امروزه مطالعات انجام شده در زمینه مدیریت فشار در شبکه‌های آب هم در فاز طراحی و هم در فاز بهره‌برداری روی لوله‌ها، عملکرد پمپ‌ها و شیرها و همچنین استفاده از مخازن کمکی متمرکز شده است. (Nicolini and Zovatto, 2009) با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه مدلی برای بهینه‌سازی در انتخاب تعداد، جانمایی و تنظیمات شیرهای کاهنده فشار در شبکه توزیع آب ارائه دادند. (Awad et al., 2010) با استفاده از شیرهای فشارشکن نوسان زمانی^۱ به کمینه‌سازی نشت در شبکه‌های آب با ابزار الگوریتم ژنتیک پرداختند. (Abdel Meguid et al., 2011) به بررسی شیرهای فشارشکن با نوسان دبی^۲ در شبکه و مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل عددی پرداختند که نتایج ایشان نشان‌دهنده عملکرد مناسب این شیرها بوده است. (Costa et al., 2010) بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب را در فاز بهره‌برداری با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از پمپ‌ها انجام دادند. (Tabesh et al., 2011) بهترین مکان و بهترین مقدار تزریق کلر در شبکه‌های توزیع آب را باهدف تعیین مقدار بهینه کلر موجود در گره‌ها یافتند. (Kurek and Ostfeld, 2013) بهینه‌سازی چندهدفه شبکه آب را با الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه‌سازی با اهداف کیفیت آب با در نظر گرفتن سن آب و مقدار کلر موجود در آب و عملکرد پمپ‌ها با بررسی پمپ دور متغیر و اندازه تانک‌های ذخیره موردبررسی قرار دادند.

شیرهای فشارشکن ابزاری هستند که با نصب بر روی یک لوله اجازه نمی‌دهند فشار در پایین‌دست شیر از حد معینی فراتر رود. مدیریت فشار در شبکه‌هایی که از شیر فشارشکن استفاده می‌شود، عموماً به منظور کنترل میزان نشت در شبکه توزیع آب انجام می‌شود (Tabesh and Hoomehr, 2009). با این حال می‌توان از ابزارهای مدیریت فشار برای بهبود شاخص قابلیت اطمینان در شبکه نیز بهره گرفت. به خصوص در شبکه‌هایی که اضافه یا کمبود فشار موجب پایین آمدن شاخص‌های قابلیت اطمینان شده باشد، استفاده از این ابزارها بسیار مؤثر خواهد بود (Latifi et al., 2015).

در این تحقیق، برای مدیریت فشار در شبکه‌های در دست بهره‌برداری از شیرهای فشارشکن با فشار خروجی ثابت^۳،

در سال‌های اخیر، شبکه‌های توزیع آب از لحاظ گستردگی و کیفیت بهره‌برداری تکامل یافته و اهمیت بسیاری در سطح رفاه جامعه پیدا کرده است. از این رو افزایش قابلیت اطمینان، بهبود وضعیت سرویس‌دهی و عملکرد این شبکه‌ها با توجه به محدودیت‌های مالی و اجرایی در طول دوره بهره‌برداری تبدیل به یک ضرورت گشته است. وظیفه اصلی شبکه‌های توزیع آب، رساندن آب کافی با فشار مناسب و کیفیت مطلوب به دست مصرف‌کنندگان است (Tabesh, 1998). در این میان، عدم توزیع یکنواخت فشار در شبکه موجب بروز مشکلات متعددی برای مشترکین و بهره‌برداران می‌شود. افزایش بیش از حد فشار در شبکه، احتمال خرابی در اجزای شبکه را افزایش داده و باعث کوتاه شدن عمر شبکه می‌شود. آنچه مشترکین را بیش از همه دچار مشکل می‌کند کمبود و نوسانات فشار در بخشی از شبکه است. برای اطمینان از بهره‌مند شدن مشترکین از آب تحت الگوی متغیر تقاضا، برنامه‌ریزی و مدیریت در حین بهره‌برداری از شبکه آب امری ضروری است.

برای بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب نیاز به مدیریت صحیح جهت رسیدن به حالت بهینه با توجه به مسائل اقتصادی و همچنین بالا بردن قابلیت اطمینان سیستم است. قابلیت اطمینان سامانه‌های آب‌رسانی یکی از بهترین معیارها در زمینه طراحی و مدیریت این سامانه‌ها است. در این زمینه محققین زیادی به ارائه تعاریف مختلف از قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع آب پرداخته‌اند (Liserra et al., 2002; Ostfeld et al., 2002; Chandramouli, 2015).

شاخص‌های ذکر شده برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه عموماً برمبنای شکست مکانیکی و یا عملکرد هیدرولیکی شبکه تعریف شده‌اند. با این حال یک شاخص قابلیت اطمینان که علاوه بر خصوصیات هیدرولیکی شبکه، رضایت مشترکین را نیز لحاظ نماید، تاکنون معرفی نشده است. یکی از مسائلی که در بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب اهمیت فراوانی دارد، رضایت مشترکین و مصرف‌کنندگان شبکه است. تاکنون برای رضایت مشترکین تعریف دقیق و کاملی ارائه نشده است. در این تحقیق، به منظور کمی کردن رضایت مشترکین و بهبود آن، از یک مدل ریاضی استفاده شده است.

به مجموعه برنامه‌ها و عملیاتی که به منظور تنظیم فشار در

شیرهای فشارشکن با نوسان زمانی استفاده شده و شیرهای فشارشکن با نوسان دبی معرفی شده است. در شبکه‌هایی که فشار در نقاط مختلف آن به‌طور متعادلی توزیع نشده است، نصب شیر فشارشکن در نقاط مناسب و تنظیم آن روی فشار مناسب می‌تواند به تعادل فشار در نقاط مختلف بیانجامد.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق، یک مدل شبیه‌ساز به‌منظور شبیه‌سازی وضعیت شبکه و یک مدل بهینه‌ساز برای یافتن فشار تنظیمی شیرهای فشارشکن ایجاد شده است. این دو مدل به‌نحو مناسبی به یکدیگر متصل شده‌اند تا بتوانند اهداف مدل اصلی را برآورده کنند.

۲-۱- تحلیل شبکه توزیع آب

یک مدل شبیه‌ساز برای تحلیل وضعیت هیدرولیکی شبکه موردنیاز است. به‌این منظور مدلی برای تحلیل شبکه با استفاده از روش گرادیان ایجاد شده است. این روش توسط Todini and

شبکه، روش شبیه‌سازی مبتنی بر فشار^۴ پیشنهاد شده و طی یک دهه اخیر مورد استقبال قرار گرفته است. در این دیدگاه، دبی تأمین‌شده در هر گره، تابعی از فشار موجود در آن گره است. لذا برای انجام تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار لازم است رابطه مناسبی بین فشار در گره و مقدار دبی تأمین‌شده برقرار شود. برای مرتبط نمودن فشار گرهی با دبی تأمین‌شده در گره، روابط متعددی ارائه شده است (Tabesh et al., 2013; Ciaponi et al., 2015; Wagner et al., 1988).

برای محاسبه مقدار دبی تأمین شده در شرایطی که فشار تأمین شده بیش از فشار مطلوب باشد، روابطی ارائه شده که در میان آن‌ها رابطه (۱-ب) و (۱-ج) بیشتر از سایرین مورد استفاده قرار گرفته است. برای برآورد دبی تأمین شده در حالتی که فشار تأمین شده کمتر از فشار مطلوب باشد، نیز روابطی ارائه شده است. (Ciaponi et al., 2015) با در نظر گرفتن مصارف داخلی منازل رابطه (۱-الف) را ارائه کردند که مشابهت زیادی به نتایج Tanyimboh and Templeman (2010) دارد. در این پژوهش، تلفیقی از رابطه (2013) Tabesh et al. و رابطه پیشنهادشده توسط (2015) Ciaponi et al. مورد استفاده قرار گرفته است. بر این اساس دبی تأمین شده برحسب فشار گرهی از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\left\{ \begin{array}{ll} Q_j^{avl} = Q_j^{req} \frac{\exp(-2.570 + 7.873 \times H_j^{avl} / H_j^{req})}{1 + \exp(-2.570 + 7.873 \times H_j^{avl} / H_j^{req})} & \text{if } H_j \leq H_j^{des} \quad (\text{Ciaponi et al., 2015}) \quad (1\text{-الف}) \\ Q_j^{avl} = Q_a + Q_b \left(\frac{H_j - H_j^{min}}{H_j^{req} - H_j^{min}} \right)^{\left(\frac{1}{n}\right)} & \text{if } H_j^{req} \leq H_j \leq H_j^{max} \quad (\text{Tabesh et al., 2013}) \quad (1\text{-ب}) \\ Q_j^{avl} = Q_a + Q_b \left(\frac{H_j^{max} - H_j^{min}}{H_j^{req} - H_j^{min}} \right)^{\left(\frac{1}{n}\right)} & \text{if } H_j > H_j^{max} \quad (\text{Tabesh et al., 2013}) \quad (1\text{-ج}) \end{array} \right.$$

که Q_j^{avl} : دبی در دسترس در گره موردنظر، Q_j^{req} : دبی تقاضا در گره، H_j^{avl} : هد فشار موجود در گره و H_j^{req} : هد فشار مورد نیاز برای تأمین تمام دبی تقاضا (Q_j^{req}) است. اگرچه در تحقیق ایشان به‌صراحت به مقدار H_j^{req} اشاره نشده است، اما اغلب محققین این مقدار را بین ۲۵ تا ۳۵ متر فشار آب در نظر گرفته‌اند. در این پژوهش، مقدار $H_j^{req} = 30$ (m) در نظر گرفته شده است. همچنین Q_a و Q_b : به‌ترتیب دبی تأمین‌شده وابسته به حجم و دبی تأمین شده وابسته به فشار هستند. دبی وابسته

(Pilati 1987) معرفی شده و به دلیل پایداری بالا امروزه در اغلب نرم‌افزارهای تجاری تحلیل شبکه توزیع آب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روش‌های سنتی تحلیل شبکه‌های توزیع آب مبتنی بر تأمین تمام تقاضای گرهی صرف‌نظر از فشار در گره‌ها هستند. در این رویکرد، فرض می‌شود که در تمام فشارها دبی مورد تقاضا تأمین می‌شود، فرضی که در مواقع بحرانی تا حد زیادی از واقعیت به دور است. به‌منظور شبیه‌سازی واقعی‌تر شرایط

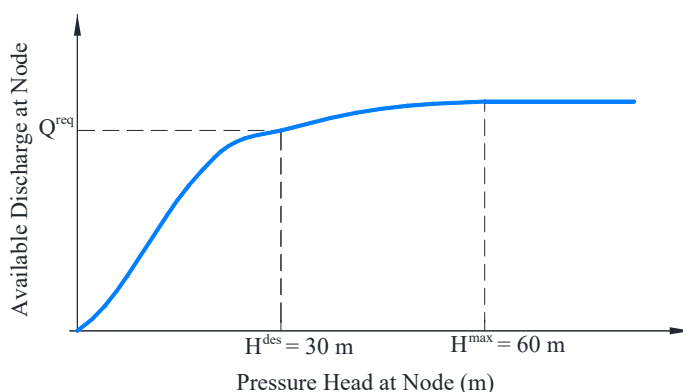
دبی: در این شیرها با نصب حس گر فشار در نقاطی از شبکه و بر اساس فشار قرائت شده در آن نقاط، یک مدار الکترونیکی دستور تغییر فشار تنظیمی را به فشارشکن صادر می‌کند. در این نوع از فشارشکن‌ها لازم است یک منحنی فرمان برای هر یک از شیرها تهیه شده و دستور تغییر فشار تنظیمی بر اساس آن صادر شود.

۲-۲- قابلیت اطمینان پیشنهادی

پس از انجام تحلیل هیدرولیکی و محاسبه فشار در گره‌ها و دبی در لوله‌ها باید مقدار کمی شاخص قابلیت اطمینان را برای شبکه محاسبه نمود. همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، روابط متعددی برای محاسبه شاخص قابلیت اطمینان وجود دارد. در این تحقیق، بر روی هدف جلب رضایت مشترکین و رساندن آب به مقدار کافی و فشار مناسب و در نظر گرفتن کمترین تغییرات در طول شبانه‌روز تمرکز شده است. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، تغییرات (نوسانات) زیاد فشار در طول شبانه‌روز باعث نارضایتی و عدم اعتماد مشترکین به عملکرد مناسب و

به حجم بخشی از دبی است که صرف‌نظر از مقدار فشار در گره‌ها به‌طور ثابتی تأمین می‌شود. دبی وابسته به فشار بخشی از دبی تأمین شده است که مقدار آن تابعی از فشار تأمین شده در گره است. با توجه به تجربیات قبلی و توصیه‌های محققان دیگر، مقدار هر یک از دو دبی مذکور برابر با ۵۰ درصد کل دبی تقاضا فرض شده است. مزیت رابطه (۱) تقسیم دبی‌های موردنیاز به دو بخش حجمی و وابسته به فشار است که انطباق بیشتری با واقعیت دارد. شکل ۱ منحنی رابطه (۱) را نشان می‌دهد. در این تحقیق مقادیر فشار حداقل (H^{min})، فشار مطلوب (H^{req}) و فشار حداکثر (H^{max}) به ترتیب برابر با ۵، ۳۰ و ۶۰ متر آب در نظر گرفته شده‌اند.

همان‌گونه که اشاره شد، در این تحقیق شیرهای فشارشکن با سه روش مورد بررسی قرار می‌گیرند: (۱) شیرهای فشارشکن با خروجی ثابت: در این شیرها فشار تنظیمی خروجی در تمام طول دوره بهره‌برداری ثابت است؛ (۲) شیرهای فشارشکن با نوسان زمانی: در این شیرها به کمک نصب یک مدار الکترونیکی فشار تنظیمی در طول ساعات شبانه‌روز تغییر می‌کند. به این ترتیب در ساعات شب که مصرف پایین و فشار شبکه بالا می‌رود، این



شکل ۱- مقدار تقاضای تأمین شده بر حسب فشار موجود در گره‌ها

مطمئن شبکه می‌شود؛ بنابراین برای تأمین رضایت مشترکین باید شبکه به نحوی عمل کند که از طرفی در طی ساعات روز کمترین نوسانات فشار را داشته باشد و از طرف دیگر، متوسط فشار آن به فشار مطلوب نزدیک باشد.

در این تحقیق، برای کمی کردن این موضوع تابعی تعریف شده است که در صورت قرارگرفتن متوسط فشار در بازه مطلوب برای تأمین تقاضا و تغییرات کم فشار در طول شبانه‌روز،

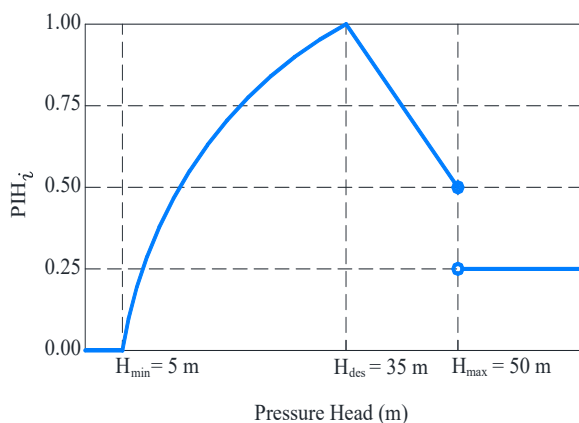
شیرها فشار تنظیمی کمتری را عبور می‌دهند و در ساعات روز که مصرف بالا می‌تواند کمبود فشار ایجاد کند، فشار تنظیمی بیشتری را عبور می‌دهند. استفاده از این شیرها موجب می‌شود فشار نسبتاً متعادلی در طول روز ایجاد شود. فشارهای تنظیمی این شیرها معمولاً بر اساس ضرایب مصرف ساعتی شبکه تعیین می‌شوند. در این تحقیق روشی برای بهینه‌سازی فشارهای تنظیمی ارائه شده است. (۳) شیرهای فشارشکن با نوسان

در بخش دوم تأثیر کمبود و مازاد فشار بر رضایت مشترکین مدنظر قرار گرفته است. در این بخش، میزان متوسط فشار در بازه زمانی شبیه‌سازی محاسبه شده و با استفاده از تابع پنالتی فازی که توسط Tabesh et al. (2013) پیشنهاد شده است، مقدار مؤلفه مربوط به اختلاف فشار از فشار معیار به دست می‌آید که این رابطه به صورت رابطه (۴) است و به صورت گرافیکی در شکل (۲-ب) نمایش داده شده است.

$$PIH_i = \begin{cases} 0 & \text{if } \bar{H}_i \leq 5 \\ \left(\frac{\bar{H}_i - 5}{30}\right)^{0.51} & \text{if } 5 < \bar{H}_i \leq 35 \\ 1 - \frac{\bar{H}_i - 35}{30} & \text{if } 35 < \bar{H}_i \leq 50 \\ 0.25 & \text{if } \bar{H}_i > 50 \end{cases} \quad (4)$$

که \bar{H}_i : متوسط فشار در بازه زمانی شبیه‌سازی در گره i -ام و PIH_i : تابع فازی مطلوبیت تغییرات فشار در گره i -ام است. در نهایت مؤلفه‌های مطلوبیت به دست آمده برای هر گره به صورت هندسی باهم ترکیب شده و شاخص رضایت مشترکین برای هر گره به صورت زیر به دست می‌آید:

$$CSI_i = \sqrt{PIH_i \times PI\sigma_i} \quad (5)$$



(ب)

بیشترین قابلیت اطمینان حاصل شود و در صورت فاصله گرفتن از بازه مذکور، مقدار قابلیت اطمینان کاهش یابد. این تابع به نام شاخص رضایت مشترکین^۵ معرفی می‌شود.

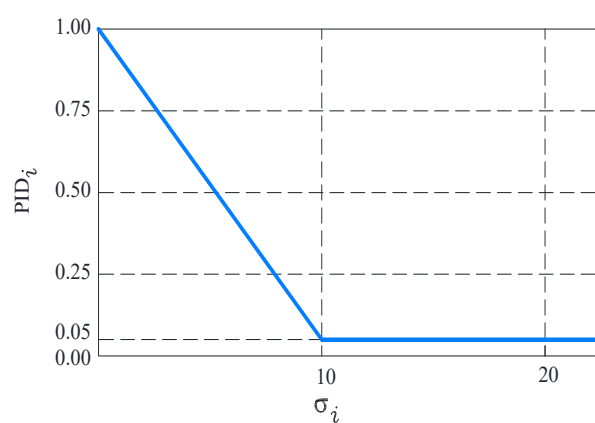
شاخص CSI به کمک دو مؤلفه محاسبه می‌شود. در مؤلفه اول تغییرات فشار در بازه زمانی شبیه‌سازی مدنظر قرار می‌گیرد. انحراف معیار فشارها در طول بازه زمانی شبیه‌سازی محاسبه شده و به کمک تابع پنالتی، مقدار مؤلفه وابسته به انحراف معیار به دست می‌آید. انحراف معیار فشار هر گره از شبکه به صورت زیر است:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (H_{i,t} - \bar{H}_i)^2}{T}} \quad (2)$$

که σ_i : انحراف معیار فشار در گره i -ام، \bar{H}_i : فشار متوسط گره i -ام در بازه زمانی مدنظر، $H_{i,t}$: فشار در گره i -ام در زمان t -ام و T : تعداد بازه‌های زمانی شبیه‌سازی است.

برای نرمال‌سازی و تعیین مطلوبیت عملکرد گره‌ها، تابع پنالتی فازی زیر برای مقادیر به دست آمده از σ_i در نظر گرفته شده است که به صورت شکل (۲-الف) قابل نمایش است.

$$PID_i = \begin{cases} 1 - \frac{\sigma_i}{10} & \text{if } 0 \leq \sigma_i < 10 \\ 0.05 & \text{if } \sigma_i \geq 10 \end{cases} \quad (3)$$



(الف)

شکل ۲- تابع پنالتی فازی برای در نظر گرفتن؛ (الف) انحراف معیار فشار؛ (ب) انحراف فشار متوسط از فشار مطلوب

که CSI_i : شاخص قابلیت اطمینان مشترکین در گره i -ام است. برای به دست آوردن شاخص CSI کل شبکه مقادیر به دست آمده از هر گره به نسبت وزنی با تقاضای مصرف آن گره میانگین گیری شده است.

$$f_1 = CSI = \frac{\sum_{i=1}^{NN} Q_i^{req} \times CSI_i}{\sum_{i=1}^{NN} Q_i^{req}} \quad (6)$$

۲-۳- روش بهینه سازی

به منظور یافتن مناسب ترین فشار تنظیمی برای شیر فشارشکن با رویکردهای سه گانه ذکر شده، یک مدل بهینه ساز نیز ایجاد شد. در زمینه شبکه های توزیع آب از روش های مختلف بهینه سازی مانند الگوریتم ژنتیک، شبکه های عصبی مصنوعی، الگوریتم بازپخت شبیه سازی شده و ... استفاده شده است. با توجه به پیچیدگی های مسئله و ماهیت غیرخطی آن، استفاده از روش های ریاضی و کلاسیک بهینه سازی امکان پذیر نیست. در چنین مسائلی، استفاده از الگوریتم های فراکوشی مانند الگوریتم ژنتیک می تواند راهگشا باشد. بنابراین در این تحقیق از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی تابع هدف استفاده شده است.

تابع هدف در مدل بهینه ساز، حداکثر نمودن شاخص قابلیت اطمینان پیشنهادی (CSI) است که مقدار آن در مدل شبیه ساز محاسبه می شود. قیود بهینه سازی عبارت اند از: معادلات هیدرولیکی حاکم بر مسئله (که در مدل شبیه ساز گنجانده شده است) و قیود مربوط به محدودیت فشار در گره ها که به طور ضمنی در تعریف شاخص قابلیت اطمینان (روابط ۱ تا ۴) گنجانده شده است. تابع هدف در مسئله بهینه سازی موجود به صورت زیر است:

$$\text{Maximize } f_1(P_{i,t}) = CSI \quad i = 1, \dots, NN$$

$$t = 1, \dots, 24 \quad (7)$$

$$\text{Subject to : } P_{min} < P_{set,i} < P_{max}$$

که NN : تعداد گره های شبکه، $P_{set,i}$: فشار تنظیمی فشارشکن i -ام و P_{min} و P_{max} : به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر فشار تنظیمی شیر فشارشکن و برابر با ۱۲ و ۳۵ متر در نظر گرفته شده اند.

متغیرهای بهینه سازی نیز عبارت اند از فشار تنظیمی شیرهای

فشارشکن. از آنجا که مدل شبیه ساز در محیط نرم افزار MATLAB آماده شده است، برای سهولت کار، بهینه سازی نیز در همین محیط انجام شده است. نرم افزار MATLAB برای بهینه سازی یک جمعیت نمونه را تولید می کند و تابع هدف را به ازای مقادیر آن محاسبه می کند. سپس بر اساس برآزش جمعیت اولیه و با اعمال عملگرهای انتخاب، توزیع و جهش^۸، جمعیت جدید را تولید می کند. این عملیات تا رسیدن به جواب بهینه تکرار می شود. تعداد جمعیت اولیه برای جستجو ۲۰۰ نفر، ضریب توزیع برابر با ۰/۸ و ضریب جهش ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. به منظور بهینه سازی شبکه، کد نوشته شده برای مدل تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار در محیط نرم افزار MATLAB به جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک این نرم افزار متصل شده است.

۳- مطالعه موردی

به منظور ارزیابی عملکرد روش ارائه شده برای بهینه سازی بهره برداری از شبکه های توزیع آب، بخشی از شبکه اصلی توزیع آب شهر تهران، برای مطالعه موردی انتخاب شد. این ناحیه در محدوده خیابان انقلاب تا خیابان شوش و اتوبان امام علی تا خیابان ری واقع شده است و مساحت تحت پوشش آن ۸۵۰ هکتار است. با توجه به برآورد مصارف آب در این بخش، حداکثر مصرف ساعتی این منطقه حدود ۸۵۰ لیتر در ثانیه است. شبکه مورد مطالعه دارای ۵۱ کیلومتر لوله از جنس های آریست و سیمان، چدن داکتیل و پلی اتیلن می باشد. برای مدل سازی شبکه تعداد ۱۰۷ گره در نظر گرفته شده که کل دبی تقاضای شبکه از این گره ها تأمین می شود. شکل ۳ شماتیک شبکه مورد بحث را نشان می دهد. در این شبکه به کمک ۸ دستگاه شیر فشارشکن که در سه ردیف نصب شده، منطقه بندی فشاری انجام شده است. شیرهای موجود از نوع فشار خروجی ثابت هستند. در این تحقیق، اثر به کارگیری سایر رویکردهای تنظیم شیر بررسی می شود.

۴- نتایج

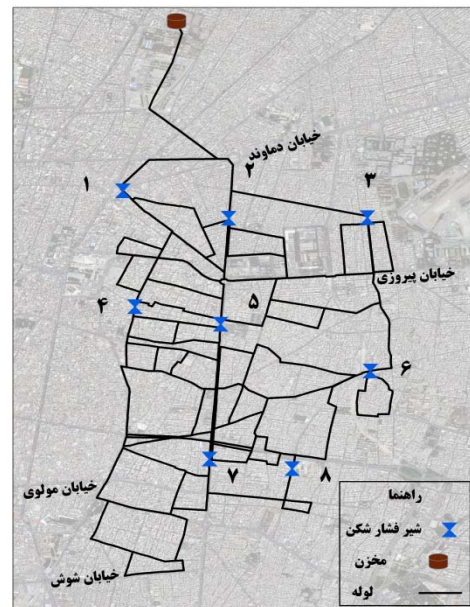
در ابتدا، شبکه با شرایط موجود آن مورد شبیه سازی قرار گرفت. فشار تنظیمی موجود هر یک از شیرهای فشارشکن در مدل اعمال شد. با تحلیل شبکه و اجرای مدل شبیه ساز،

در حالت تنظیمات پیشنهادی با یکدیگر موازی بوده و تنها به مقدار تقریبی $1/3$ متر با یکدیگر فاصله دارند. این موضوع ناشی از ثابت بودن فشار تنظیمی در طول ساعات شبانه‌روز (علیرغم تغییر در مقدار تقاضای ساعتی) است.

برای تعیین تنظیمات شیرهای فشارشکن در حالت نوسانات زمانی، مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز اجرا شد. شکل ۴-ب نمونه‌ای از فشارهای تنظیمی به‌دست‌آمده برای دو شیر نمونه را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که طی ساعات شب (مصرف کمتر) فشار خروجی از شیرها کمتر بوده و طی ساعات روز (مصرف بیشتر) فشار بیشتری از شیرها خارج می‌شود. نمودار فشار متوسط شبکه طی ساعات شبانه‌روز در شکل ۴-الف ترسیم شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که با اعمال تنظیمات ساعتی به شیرها، نوسانات ساعتی فشار به‌خوبی کنترل شده و فشار متوسط بین $22/6$ و $24/2$ متر متغیر است. همچنین فشار متوسط کل شبکه برابر با $25/3$ متر است که در مقایسه با رویکرد قبلی مقداری کاهش یافته است.

نقطه ضعف روش تنظیم دبی بر اساس نوسانات زمانی این است که بر اساس ضرایب دبی تقاضا در طول ۲۴ ساعت تنظیم شده است، حال آنکه ضرایب فوق در طول فصول سال متغیر بوده و به‌خصوص در تابستان و زمستان تفاوت فراوانی با یکدیگر دارند. مثلاً، در ایام ابتدای تابستان آغاز و پایان روز به‌ترتیب در ساعات ۶ و ۲۱ می‌باشد که الگوی مصرفی مخصوص به‌خود را ایجاد می‌کند، درحالی‌که در ایام ابتدایی زمستان آغاز و پایان روز به‌ترتیب در ساعات ۷ و ۱۷ می‌باشد و الگوی مصرف ساعتی آن کاملاً با تابستان متفاوت است. همچنین عادات فرهنگی و اجتماعی مصرف‌کنندگان نیز بر روی الگوی مصرف مؤثر است، به‌نحوی‌که در کشور ما طی یک ماه از سال (ماه رمضان) مصرف عمده آب به ساعات شب و پیش از طلوع آفتاب منتقل می‌شود و با پایان یافتن این ماه الگوی مصرف ساعتی به وضع قبلی باز می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه شیرهای فشارشکن با نوسانات زمانی مزایایی نسبت به شیرهای خروجی ثابت دارند، اما همچنان نقاط ضعفی نیز دارند.

در سناریوی آخر، مدل باید برای تعیین تنظیمات شیر فشارشکن با نوسانات دبی اجرا شود. در این حالت، یک حس‌گر در نقطه‌ای از شبکه که معرف فشار متوسط شبکه^۹ است، نصب شده و بر اساس مقدار فشار به‌دست‌آمده در این نقطه، فشار خروجی از فشارشکن‌ها تنظیم می‌شود. مزیت این رویکرد این



شکل ۳- تصویر شماتیک شبکه مورد استفاده در مطالعه موردی (مناطق ۱۳ و ۱۴ تهران)

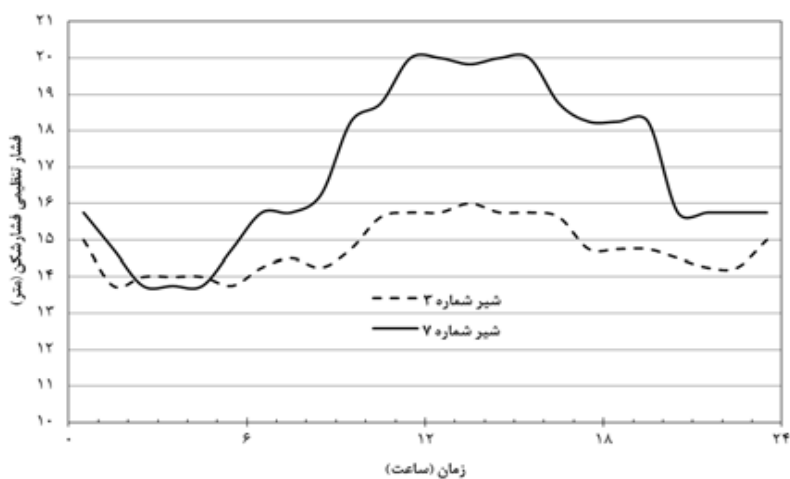
فشار متوسط شبکه در طول ساعات شبانه‌روز به‌دست آمده و مقدار شاخص رضایت مشترکین (CSI) محاسبه شد. مقدار فشار متوسط شبکه در این حالت در شکل ۴-الف نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که فشار متوسط ساعتی بین ۲۲ تا ۲۸ متر در نوسان است. با توجه به نوسان قابل‌توجه فشار در طول ساعات شبانه‌روز، مقدار شاخص رضایت مشترکین برابر با $0/777$ به‌دست آمده است.

با اجرای مدل، نتایج حاصل از بهینه‌سازی شیرهای فشارشکن به‌دست آمده که در این بخش به آن اشاره می‌شود. در شیرهای فشارشکن با خروجی ثابت، بهینه‌سازی فشار تنظیمی در هر یک از شیرها انجام گرفت. نتایج حاکی از آن است که برای بهبود شاخص رضایت مشترکین در شبکه باید مقدار فشار تنظیمی شیرهای فشارشکن نسبت به وضع موجود کاهش یابد. فشار متوسط شبکه در ساعات مختلف شبانه‌روز در شکل ۴-الف نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که با تنظیم جدید، فشار متوسط شبکه بین $23/3$ تا $29/3$ متر در نوسان است. با ملاحظه شکل ۴-الف و مقایسه نتایج با وضع موجود مشاهده می‌شود که در این حالت و با اعمال تنظیمات پیشنهادی، نوسانات زمانی فشار متوسط تغییر چندانی نکرده و تنها با نزدیک‌تر شدن فشار متوسط شبکه به فشار مطلوب، مقدار شاخص رضایت مشترکین افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که نمودار فشار متوسط شبکه در حالت وضع موجود و

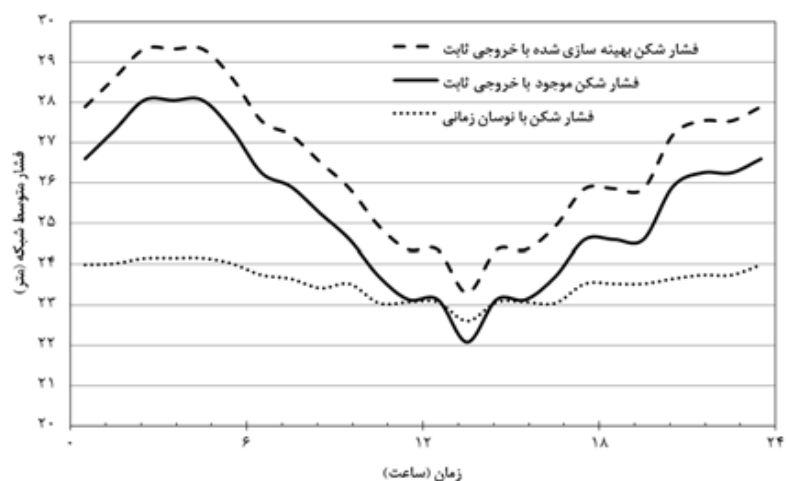
۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نتایج به‌کارگیری سه رویکرد مختلف در تنظیم فشار خروجی از شیر فشارشکن مورد بررسی قرار گرفت. به‌همین منظور، یک مدل شبیه‌ساز برای تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار شبکه توزیع آب و یک مدل بهینه‌ساز برای یافتن مقادیر بهینه فشار تنظیمی ایجاد شده و به‌نحو مناسبی به یکدیگر متصل شدند. همچنین یک شبکه توزیع آب دارای منطقه‌بندی فشاری برای انجام مطالعه موردی انتخاب شد.

است که فشار خروجی از فشارشکن تابعی از ساعات روز نبوده و به نحوی تغییر می‌کند که فشار متوسط شبکه با کمترین تغییر مواجه شود، بنابراین این رویکرد فاقد نقاط ضعف رویکرد قبلی است. مدل فوق بر اساس روش پیشنهادی Abdel Meguid et al. (2011) اجرا می‌شود و تنظیمات مربوطه به‌دست می‌آید. ویژگی این رویکرد قابلیت انعطاف آن نسبت به تغییرات ساعتی تقاضا در طی فصول سال و همچنین مصارف پیش‌بینی نشده (مانند تقاضای آتش‌نشانی در ساعات نیمه‌شب) است.



(الف)



(ب)

شکل ۴- الف) مقدار فشار متوسط شبکه در هریک از سناریوها؛ ب) فشار تنظیمی دو فشارشکن نمونه در رویکرد نوسان زمانی

- (2011), "Mathematical modelling of a hydraulic controller for PRV flow modulation", *Journal of Hydroinformatics*, 13(3), 374-389.
- Awad, H., Kapelan, Z., and Savic, D., (2008), "Analysis of pressure management economics in water distribution systems", *Proceedings of Conference on Water Distribution Systems Analysis*, August 17-20, Kruger National Park, South Africa, 1-12.
- Chandramouli, S., (2015), "Reliability based optimal design of a municipal water supply pipe network", *Urban Water Journal*, 12(5), 353-361.
- Ciaponi, C., Franchioli, L., Murari, E., and Papiri, S., (2015), "Procedure for defining a pressure-outflow relationship regarding indoor demands in pressure-driven analysis of water distribution networks", *Water Resources Management*, 29(3), 817-832.
- Costa, L., Ramos, H., and Castro, M., (2010), "Hybrid genetic algorithms with advanced search for optimized operation of water supply networks", *Integrating Water Systems*, Boxall & Maksimović (eds.), Taylor & Francis Group, London, 621-626.
- Kurek, W., and Ostfeld, A., (2013), "Multi-objective optimization of water quality, pumps operation, and storage sizing of water distribution systems", *Journal of Environmental Management*, 115, 189-97.
- Liserra, T. Maglionico, M., Ciriello, V., and Di Federico, V., (2014), "Evaluation of reliability indicators for WDNs with demand-driven and pressure-driven models", *Journal of Water Resources Management*, 28(5), 1201-1217.
- Nicolini, M., and Zovatto, L., (2009), "Optimal location and control of pressure reducing valves in water networks", *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 135(3), 178-187.
- Ostfeld, A., Kogan, D., and Shamir, U., (2002), "Reliability simulation of water distribution systems – single and multiquality", *Urban Water Journal*, 4(1), 53-64.
- Tabesh, M., (1998), "Implication of the pressure dependency of outflows on data management, mathematical modeling and reliability assessment of water distribution systems", Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Liverpool, England.
- Tabesh, M., and Hoomehr, S., (2009), "Consumption management in water distribution systems by optimizing pressure reducing valves' settings using genetic algorithm", *Journal of Desalination and Water Treatment*, 2(1-3), 95-100.
- Tabesh, M., Azadi, B., and Roozbahani, A., (2011), "Quality management of water distribution networks by optimizing dosage and location of chlorine injection", *International Journal of Environ-*

به‌علاوه شاخصی برای سنجش قابلیت اطمینان مشترکین معرفی شده و به‌عنوان تابع هدف بهینه‌سازی اختیار شد. شبکه مورد بررسی دارای شیرهای فشارشکن از نوع خروجی ثابت هستند. مقدار شاخص برای وضع موجود شبکه محاسبه شد. سپس به کمک مدل بهینه‌ساز، تنظیمات بهینه شیرها با خروجی ثابت برای دستیابی به حداکثر رضایت مشترکین محاسبه و ملاحظه شد که مقدار شاخص اندکی بهبود یافت. در مرحله بعد، مقدار فشار تنظیمی شیرها با رویکرد نوسانات زمانی محاسبه شد. در این رویکرد مقدار فشار خروجی از شیرها تابعی از ساعات شبانه‌روز بوده و بر اساس تغییر مصرف در شبکه متغیر است. در این حالت مقدار قابلیت اطمینان نسبت به رویکرد قبل بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته است. در نهایت تنظیم فشار خروجی براساس رویکرد نوسانات دبی انجام گرفت. در این رویکرد با نصب حس‌گر فشار در نقاطی از شبکه و تهیه منحنی‌های فرمان، فشار خروجی از فشارشکن‌ها به‌صورت تابعی از فشار قرائت شده در حس‌گر تنظیم می‌شود. ملاحظه می‌شود که رویکرد مذکور نسبت به سایر رویکردها از اطمینان‌پذیری بالاتری برخوردار بوده و می‌تواند رضایت مشترکین را بالاتر ببرد.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Time Modulation
- 2- Flow Modulation
- 3- Fixed Outlet
- 4- Head-Driven Simulation Method (HDSM)
- 5- Consumers' Satisfaction Index (CSI)
- 6- Selection
- 7- Crossover
- 8- Mutation
- 9- Average Zone Pressure (AZP)

۷- مراجع

- لطیفی، م.، غیبی، م.ا.، و نائینی، س.ت.ا.، (۱۳۹۴)، «مدیریت فشار در سیستم‌های توزیع آب با استفاده از شیرهای فشارشکن و در نظر گرفتن شاخص قابلیت اطمینان فازی»، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۱۷-۱۵ اردیبهشت، تبریز، ایران.
- Abdel Meguid, H., Skworcow, P., and Ulanicki, B.,

- mental Research*, 5(2), 321-332.
- Tabesh, M., Shirzad, A., Arefkhani, V., and Mani, A., (2013), "A comparative study between the modified and available demand driven based models for head driven analysis of water distribution networks", *Urban Water Journal*, 11(3), 221-230.
- Tanyimboh, T.T., and Templeman, A.B., (2010), "Seamless pressure-deficient water distribution system model", *Journal of Water Management*, ICE 163(8), 389-396.
- Todini, E., and Pilati, S., (1987), "A gradient algorithm for the analysis of pipe network", In: *International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution*, Leicester Polytechnic, UK.
- Wagner, J.M., Shamir, U., and Marks, D.H., (1988), "Water distribution reliability: simulation methods", *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 114(3), 276-294.