



## مدیریت هوشمند فشار در شبکه‌های آبرسانی برای کاهش نوسانات زمانی و مکانی فشار

نیوشا هدایتی مرزونی<sup>۱</sup>، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده<sup>۱\*</sup>، ایمان مصلحی<sup>۱</sup>، مهدی کمیلی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده عمران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- شرکت فرازیست آب خاوران، مشهد، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۲/۰۸

### کلمات کلیدی:

شبکه توزیع آب

مدیریت فشار

شیرهای فشارشکن

پمپ دور متغیر

الگوریتم ژنتیک

**خلاصه:** شبکه‌های آبرسانی از جمله زیرساخت‌های حیاتی است که بهره‌برداری از آن‌ها همواره با چالش‌های متعددی همراه می‌باشد. در این شبکه‌ها، رخداد مشکلاتی مانند شکستگی لوله‌ها، بروز نشت و توزیع غیریکنواخت فشار جزء معضلات محتمل تلقی می‌گردد. در مطالعه حاضر، ارائه برنامه‌های مبتنی بر زمان جهت بهره‌برداری بهینه از تجهیزات کنترل فشار در شبکه آبرسانی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، دو سناریو بهره‌برداری تعریف شده که در سناریو اول، استفاده از شیرهای فشارشکن به صورت مجزا (سناریو مجزا) و در سناریو دوم نیز بهره‌برداری همزمان از شیرهای فشارشکن و پمپ دور متغیر (سناریو ترکیبی) مورد مطالعه قرار گرفته است. برنامه بهره‌برداری بهینه با هدف دستیابی به مزایای مدیریت فشار بر پایه تأمین کمینه نوسانات زمانی و مکانی فشار گره‌ای و با استفاده از الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه‌سازی تدوین شده است. در مرحله پایانی نیز، روش پیشنهادی مبتنی بر سناریوهای دوگانه، در بستر یک شبکه تئوریک و همچنین یک شبکه واقعی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت و سناریو بهینه مدیریت فشار بر اساس محاسبه شاخص‌های ارزیابی هیدرولیک شبکه تعیین شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که کارایی همزمان شیرهای فشارشکن با پمپ دور متغیر (سناریو ترکیبی) در قیاس با سناریو مجزا، از اثربخشی بیشتری در زمینه کاهش نوسانات فشار گره‌ای و همچنین افزایش درصد پوشش گره‌های با فشار مطلوب همراه است.

### ۱- مقدمه

بود که لازم است تصمیم‌های بازدارنده در ارتباط با آن اتخاذ گردد [۳]. از این رو، مبانی مختلف کنترل فشار در شبکه‌های آبرسانی همواره به عنوان مسئله‌ای مهم مورد توجه قرار گرفته که اجزای آن توسط متخصصین و مدیران در حوزه مدیریت منابع آب، مطالعه شده است. به لحاظ فنی، تنظیم و کنترل مؤثر فشار تنها زمانی رخ می‌دهد که فشار کافی در طول شبانه روز برای کلیه مشترکین فراهم گردد و مصارف مختلف نیز به گونه‌ای مناسب، تأمین شوند؛ بر همین اساس، مدیریت فشار قادر می‌گردد تا مانع از نشت‌های زمینه‌ای در شب شده و نرخ شکست لوله‌ها را نیز با کاهش همراه سازد [۴].

روش‌های مختلف در حوزه مدیریت فشار شامل انتخاب صحیح محل احداث مخازن ذخیره و کنترل سطح آب در آن‌ها، کنترل پمپاژ (تدوین برنامه‌های عملکردی پمپ‌های دور متغیر)، استفاده از پمپ‌ها به عنوان توربین، اجرای طرح ناحیه بندی فشار (پهنه‌های فشاری)، احداث حوضچه‌های تعدیل فشار و استفاده از شیرهای کنترل جریان و شیرهای کنترل فشار می‌باشد [۵]. از بین روش‌های مذکور، در طی سال‌های اخیر به کارگیری شیرهای

پیش‌بینی‌ها نشان از آن دارد که تا سال ۲۰۵۰، تقریباً نیمی از جهان با مشکل کمبود و تنش آبی مواجه خواهد شد [۱]. از آنجایی که دسترسی به منابع جدید، همواره با صرف هزینه‌های بسیاری در حوزه ایجاد زیرساخت‌های لازم همراه است، مدیریت منابع آبی موجود به عنوان بهترین و به صرفه‌ترین راه‌حل معرفی شده و جلوگیری از به هدر رفتن آب تحت تأثیر عوامل مختلف نیز به عنوان یکی از استراتژی‌های مهم در این زمینه مطرح بوده است [۲]. امروزه در سرتاسر جهان حجم آبی که در سامانه‌های آبرسانی به هدر می‌رود، عمدتاً ناشی از کاهش کارایی تجهیزات و همچنین وجود مقادیر فشار اضافی در سطح شبکه می‌باشد. گسترش روزافزون این مسئله و لزوم به کارگیری راهکارهای مناسب جهت مواجهه با آن، از جمله مسائل مورد بحث در مدیریت زیرساخت‌های شهری می‌باشد. در واقع چون شبکه‌های آبرسانی برای مصارف در ساعات پیک طراحی می‌شوند، وجود فشار اضافی در سطح گره‌های شبکه و در ساعات کم مصرف امری گریزناپذیر خواهد

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m\_jalili@sbu.ac.ir



گردید. به عبارتی در این حالت، دو تابع هدف مجزا در نظر گرفته شد تا با تأمین مبانی مدیریت فشار در شبکه‌های آبرسانی، قادر باشد مقدار نشت را کمینه سازد [۱۱]. آلانیک و همکاران روشی را جهت کاهش نشت از طریق کنترل فشار توسط شیرهای فشارشکن مبتنی بر زمان (برای پهنه‌های فشاری تک ورودی یا با ورودی چندگانه) و شیرهای فشارشکن مبتنی بر دبی (برای پهنه‌های فشاری دارای ورودی واحد)، ارائه دادند. به علاوه در این مطالعه، تابع هدف به گونه‌ای تعریف شد که هزینه جریان‌های مرزی که خود مشتمل بر دبی نشت نیز بوده، کمینه گردد و مضافاً، عملکرد بیش از یک شیر فشارشکن در ارتباط با مدول مبتنی بر دبی مورد توجه قرار گیرد [۱۲]. کریکو و همکاران الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II)<sup>۲</sup> را جهت تعیین مقدار بهینه مرتبط با سه پارامتر مکان قرارگیری شیرهای کنترل دبی، قطر لوله‌های ملزم به تعمیر و نوسازی و همچنین وضعیت شیرهای قطع و وصل موجود در لوله‌های شبکه مورد استفاده قرار دادند. برای این منظور مدل برنامه‌ریزی خطی (LP)<sup>۳</sup> (جهت تعیین تنظیمات بهینه شیرهای کنترل دبی) در بستر الگوریتم ژنتیک چند هدفه به اجرا درآمد تا مقادیر متناظر با حجم نشت روزانه و همچنین هزینه نصب و راه‌اندازی تجهیزات کمینه گردد [۱۳]. گوپتا و همکاران روشی را معرفی نمودند که بر مبنای آن، تعیین مقادیر بهینه برای مؤلفه‌های تعداد، مکان و تنظیمات شیرهای فشارشکن به صورت هم‌زمان فراهم گردید. علاوه بر این، در این مطالعه تکنیکی نوین جهت بهینه‌یابی مکان شیرآلات به کار گرفته شد که با توجه به قاعده‌های مبتنی بر فشار مینا (فشار تعریف شده بر اساس شرایط بهره‌برداری و هزینه‌های سرمایه‌گذاری) توسعه یافته و مدنظر قرار گرفت [۱۴].

با توجه به تعدد عوامل اثرگذار در فشار گره‌های شبکه، تحقیقات مختلفی بهره‌برداری همزمان از شیرهای فشارشکن و دیگر تجهیزات کنترل فشار مانند مخازن و پمپ‌های دور متغیر را طی سالیان بعدی مورد توجه قرار دادند. گوپتا و همکاران بهینه‌سازی هم‌زمان تراز آب در مخزن و تنظیمات شیرهای فشارشکن را ارزیابی نمودند. برای این منظور، تراز مورد نیاز آب برای هر ساعت، مبتنی بر تأمین حداقل فشار در سطح گره‌های شبکه، با استفاده از الگوریتمی بر پایه تکرار (مبتنی بر مفاهیم محاسباتی) تعیین گردید. به عبارتی در این حالت، تراز بهینه برای هر گام زمانی با در نظر داشتن وضعیت پر یا تخلیه شدن تانک و همچنین دبی ساعتی مصرف و پمپاژ، حاصل شد. در نهایت نیز، نتایج به دست آمده نشان داد که تأمین تراز بهینه برای مخازن

فشارشکن مورد توجه بسیاری از شرکت‌های آب و فاضلاب، قرار گرفته که این امر ناشی از امکان اجرای مدیریت فشار پیشرفته به واسطه کارایی این تجهیزات است. به علاوه، شیرهای فشارشکن قادرند کاهش فشار زیادی را در شبکه اعمال نموده و از این رو، ابزار مؤثری جهت مدیریت نشت نیز به شمار می‌آیند [۴]. از نقطه نظر اقتصادی نیز، کاربرد شیرهای فشارشکن به جهت مزایای قابل توجه در زمینه‌های مختلف از جمله کاهش مؤلفه‌هایی چون نشت، شکستگی، مصرف آب، مصرف انرژی، عملیات نشت‌یابی فعال و خسارات وارده به ساختمان‌ها و همچنین افزایش رضایت مشترکین قابل توجه بوده است. لازم به ذکر است که می‌توان با توسعه مدل سود/ هزینه، کارایی شیرهای فشارشکن را ارزیابی نمود [۶].

کارایی بهینه شیرهای فشارشکن در شبکه‌های آبرسانی تنها در شرایطی امکان‌پذیر می‌گردد که نخست با تعیین مکان بهینه هر یک از شیرآلات، مرزهای پهنه‌های فشاری به گونه‌ای مناسب انتخاب شود و سپس با تدوین تنظیمات ساعتی هر کدام از شیرهای فشارشکن، برنامه بهره‌برداری بهینه از تجهیزات کنترل فشار توسعه یابد. نکته قابل توجه در این زمینه آن بوده که ماهیت غیرخطی حاکم بر هیدرولیک شبکه و همچنین برهم‌کنش میان اجزاء مختلف آن، تعیین پارامترهای تنظیمی مرتبط با شیرآلات را با پیچیدگی‌هایی مواجه می‌سازد. لذا تحقیق در زمینه دستیابی به مقادیر بهینه هر کدام از این پارامترهای تنظیمی، طی سالیان متمادی و در مطالعات بسیاری مورد توجه بوده و روش‌های مختلفی نیز برای این منظور به کار گرفته شده است. یکی از این روش‌ها، استفاده از برنامه‌ریزی خطی پی‌درپی (SLP)<sup>۱</sup> بوده که برای حل مسئله بهینه‌سازی در مطالعات زیادی مدنظر واقع شده و مبتنی بر اجرای یک فرآیند تکراری، خطی‌سازی تابع هدف و محدودیت‌ها را تا دستیابی به یک برنامه خطی به انجام می‌رساند [۹ و ۸ و ۷].

در ادامه روند مطالعات، کاربرد روش‌های فراکاوشی با گسترش قابل توجهی همراه گردید و در نخستین موارد کاربرد نیز، ساویچ و همکاران الگوریتم ژنتیک را جهت تنظیم شیرهای قطع و وصل، با هدف کمینه نمودن مقادیر فشار در شبکه به کار گرفتند و بدین وسیله امکانی را فراهم نمودند تا مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه، برای تعیین مکان و تنظیم این شیرآلات ایجاد گردد [۱۰]. آراجو و همکاران مدلی جهت تدوین سیستم‌های تصمیم‌گیری در خصوص شبکه‌های آبرسانی معرفی نمودند که بر مبنای آن، تعیین تعداد و مکان شیرهای فشارشکن و همچنین تنظیمات بهینه مربوط به هر یک از آن‌ها، با اجرای دوگانه الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک امکان‌پذیر

2 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

3 Linear Programming

1 Successive Linear Programming

عملکرد توأمان مجموعه مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی هیدرولیکی را با وجود کدنویسی مستقل مدل‌های یاد شده، میسر می‌سازد. در مرحله پایانی نیز، نتایج به دست آمده با استفاده از شاخص‌های ارزیابی شرایط هیدرولیکی شبکه مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند تا سناریو بهینه جهت اجرای مدیریت فشار تعیین گردد. متدولوژی پیشنهادی در این تحقیق، منطبق بر روندنمای ارائه شده در شکل ۱ می‌باشد.

## ۲-۱- مدل شبیه ساز هیدرولیکی

تحلیل هیدرولیک جریان در شبکه‌های آبرسانی مبتنی بر معادلات حاکم بر این شبکه‌ها و حل آن‌ها با بهره‌گیری از روش‌های عددی، صورت می‌پذیرد. از این رو در مطالعه حاضر، مجموعه قوانین پایستگی جریان و همچنین بقای انرژی (رابطه ۱) که معادلات حاکم بر جریان در شبکه می‌باشد، با به کارگیری روش گرادیان سراسری (GGA) و در بستر نرم‌افزار EPANET حل می‌گردد. با اجرای روش گرادیان در بستر مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی، معادلات افت انرژی در حلقه‌ها به صورت تابع هدف و معادلات پیوستگی نیز به صورت قید در یک مسئله بهینه‌سازی تعریف شده و در این حالت با استفاده از ضرایب لاگرانژ، مجموعه قیدها از مسئله بهینه‌سازی حذف گردیده و با مشتق‌گیری از تابع هدف حاصله، معادلات کلی شبکه آبرسانی بر اساس مؤلفه‌های دبی-هد به دست می‌آید که با به کار بردن روش نیوتن-رافسون قابل حل خواهد بود [۱۷].

$$\begin{cases} A_{11}Q + A_{12}H = -A_{10}H_0 \\ A_{21}Q = -q \end{cases} \quad (1)$$

در معادله فوق، بردار  $Q$  شامل مقادیر دبی مجهول در لوله‌ها،  $H$  در بردارنده فشارهای گره‌ای مجهول،  $H_0$  بیانگر فشارهای گره‌ای معلوم و در نهایت بردار  $q$  نیز مشتمل بر تقاضاهای گره‌ای می‌باشد. همچنین ماتریس  $A_{11}$ ، بیانگر ماتریس ضرایب  $Q$  (متناسب با دبی و افت هد لوله‌ها) و ماتریس  $A_{12}$  نیز ماتریس ضرایب  $H$  (دربدارنده اعداد متناظر با جهت چرخش جریان) بوده است و ماتریس  $A_{21}$  برابر ترانهاده ماتریس  $A_{12}$  می‌باشد.

## ۲-۲- مدل بهینه‌سازی

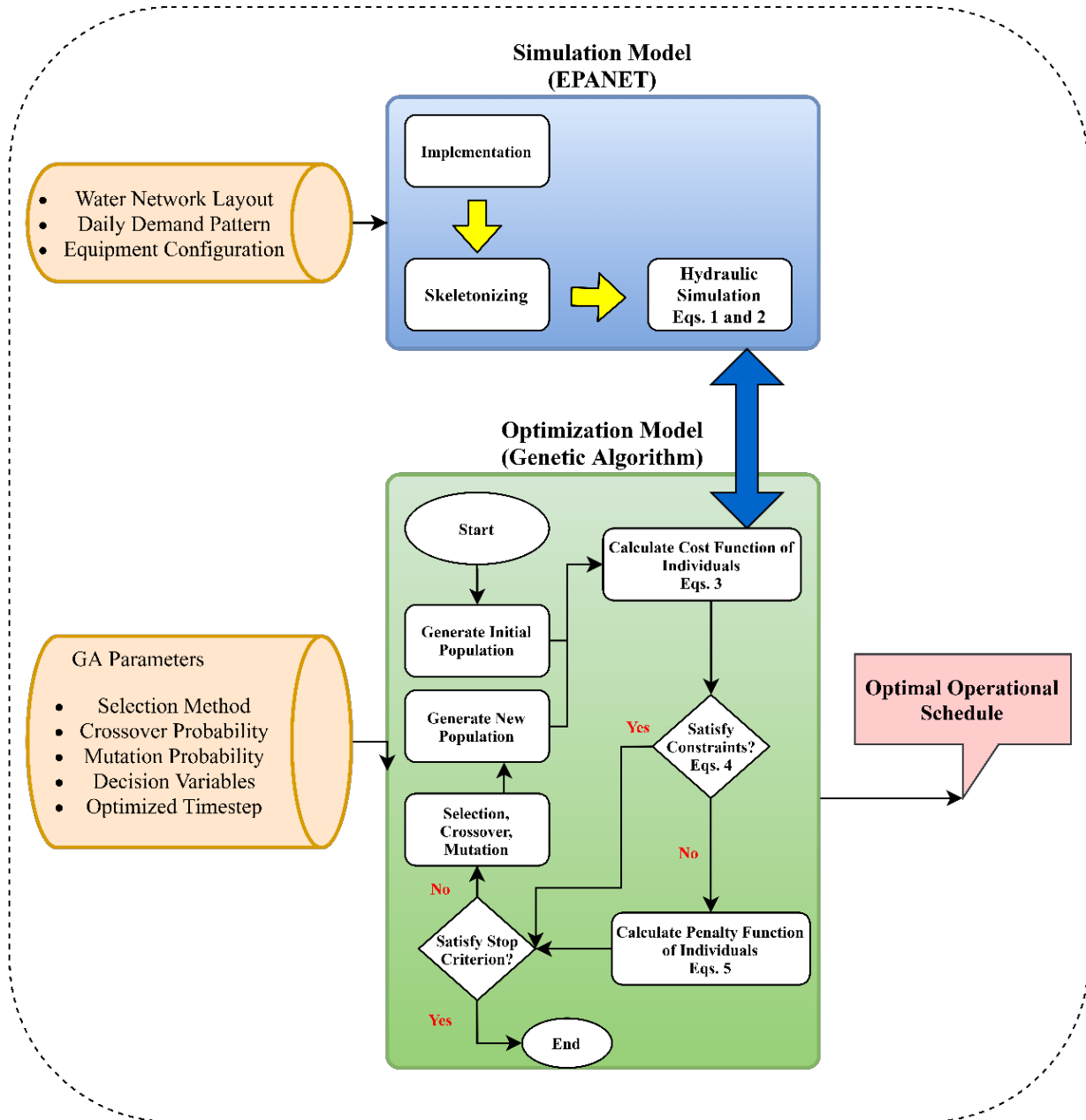
در پژوهش حاضر، از الگوریتم ژنتیک جهت اجرای فرآیند بهینه‌سازی

همگام با بهینه‌سازی عملکرد شیرهای فشارشکن، هم به جهت اقتصادی و هم از لحاظ بهره‌وری اجرایی، با مزایای زیادی همراه است [۱۵]. گوپتا و همکاران مدیریت فشار در شبکه‌های آبرسانی را با کاربرد ترکیبی شیرهای فشارشکن و پمپ‌های دور متغیر نیز مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور، تعیین دور بهینه پمپ‌ها و همچنین فشار تنظیمی شیرهای فشارشکن به ترتیب با بهره‌گیری از اجرای الگوریتم مبتنی بر تکرار (جهت تعیین انحراف بهینه از دور متوسط) و الگوریتم ژنتیک چند هدفه انجام گرفت. در نهایت با بررسی نتایج حاصله مشخص شد که اجرای این روش منجر به کاهش قابل توجهی از مقادیر نشت در شبکه گردیده است [۱۶].

با بررسی مجموعه مطالعات پیشین، می‌توان نتیجه گرفت که تحقیق در حوزه رویکردهای ترکیبی (استفاده از شیرهای فشارشکن همزمان با دیگر تجهیزات کنترل فشار)، تنها به تعداد معدودی از مطالعات منحصر گردیده که از این میان، برخی به اجرای تحلیل هیدرولیکی صرفاً در شرایط خاص (به عنوان مثال شبکه‌های شاخه‌ای) اختصاص داشته و گروه دیگر نیز در بستر شبکه‌های فرضی پیاده‌سازی شده و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در مطالعه حاضر، اجرای مدیریت هوشمند فشار در قالب دو سناریو انجام پذیرفته که به ترتیب تحت عنوان سناریو مجزا (استفاده از شیرهای فشارشکن به صورت مجزا) و سناریو ترکیبی (استفاده همزمان از شیرهای فشارشکن و پمپ دور متغیر) تعریف شده‌اند. سناریوهای مذکور با هدف تعیین مدول مبتنی بر زمان جهت بهره‌برداری بهینه از تجهیزات توسعه یافته و از الگوریتم ژنتیک به عنوان مدل بهینه‌سازی بهره می‌برد. اجرای الگوریتم ژنتیک با هدف دستیابی به کمینه نوسانات زمانی و مکان فشار گره‌ای صورت پذیرفته است. در مرحله صحت‌سنجی نیز، هر یک از برنامه‌های عملکردی بهینه تجهیزات (سناریوهای دوگانه) در بستر یک شبکه تئوریک و یک شبکه واقعی اجرا گردید و با محاسبه شاخص‌های مبتنی بر وضعیت هیدرولیک شبکه، کارایی آن‌ها مورد ارزیابی واقع شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه، متدولوژی پیشنهادی از ۳ بخش تشکیل شده است: ۱- مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی، ۲- مدل بهینه‌سازی و ۳- شاخص‌های ارزیابی شرایط هیدرولیکی شبکه. در این حالت، شبیه‌سازی هیدرولیکی به صورت یکپارچه، همراه با الگوریتم بهینه‌سازی اجرا شده تا دستیابی به برنامه عملکردی بهینه تجهیزات کنترل فشار با در نظر داشتن قوانین حاکم بر هیدرولیک جریان امکان‌پذیر شود. در این زمینه، استفاده از ابزار رابط،



شکل ۱. روندنمای متدولوژی توسعه داده شده برای مدیریت فشار در تحقیق حاضر

Fig. 1. Flowchart of the developed methodology to pressure management in this study

فرآیند بهینه‌سازی امکان‌پذیر می‌باشد. همچنین، از میان مجموعه قیده‌های معرفی شده در این مطالعه، لزوم رعایت قید دوم بهینه‌سازی، از طریق در نظر گرفتن جریمه برای انحراف از شرط حداقل فشار مجاز در شبکه (تجاوز از قید حداقل فشار مجاز) مورد توجه قرار می‌گیرد. در این حالت، با تعیین ضریب پنالتی و همچنین محاسبه انحرافات فشار گره‌ها از حداقل فشار مجاز، مقدار تابع جریمه محاسبه شده و بر همین اساس می‌توان بیان داشت که از این نظر، مسئله بهینه‌سازی مقید به مسئله‌ای نامقید تغییر یافته است. در این مرحله، پس از توسعه مدل‌های هیدرولیکی و بهینه‌سازی بر مبنای پارامترهای مختلف به صورت مجزا، اتصال این دو مدل با بهره‌گیری از رابط برنامه‌نویسی نرم‌افزار EPANET<sup>1</sup> در محیط برنامه‌نویسی MAT-LABr2017b صورت می‌پذیرد.

۲-۳- شاخص‌های ارزیابی شرایط هیدرولیکی شبکه مبتنی بر فشار گره‌ای در راستای بررسی متدولوژی توسعه داده شده، مجموعه‌ای از شاخص‌های ارزیابی معرفی شده و مقادیر متناظر آن‌ها نیز محاسبه گردیده تا بدین وسیله، امکان انتخاب سناریو بهینه جهت مدیریت مؤثر فشار در شبکه فراهم آید. از آنجایی که در این پژوهش فرآیند بهینه‌سازی با هدف کمینه نمودن نوسانات مکانی و زمانی فشار توسعه یافته، نخستین و مهم‌ترین شاخص ارزیابی تحت عنوان شاخص نوسانات فشار در نظر گرفته می‌شود. محاسبه مقدار متناظر این شاخص در شرایط قبل و بعد از اجرای سناریوهای دوگانه و محاسبه تغییرات آن، امکانی را فراهم می‌آورد تا رویکرد مناسب جهت کنترل فشار تعیین گردد. افزون بر این، مجموعه‌ای از دیگر شاخص‌های ارزیابی نیز مدنظر قرار گرفته تا اثرگذاری رویکردهای مدیریت فشار از جهات مختلف بررسی شوند. از جمله این شاخص‌ها می‌توان به نرخ نشت ساعتی، درصد پوشش گره‌های با فشار مطلوب و همچنین شاخص شکست هیدرولیکی اشاره نمود.

#### • شاخص نوسانات فشار

شاخص نوسانات فشار عبارت است از توان دوم مقدار متوسط انحرافات زمانی و مکانی فشارهای گره‌ای از فشار مطلوب که منطبق بر رابطه (۲) محاسبه می‌شود. اندازه‌گیری مقدار این شاخص قادر است تا درک روشنی را از میزان کارایی برنامه بهینه بهره‌برداری در راستای بهبود مقادیر فشارهای گره‌ای و کاهش نوسانات آن ارائه نماید.

استفاده شده است. روش ژنتیک به عنوان یکی از پرکاربردترین رویکردهای فراکاوشی جمعیت-پایه، مطرح می‌شود. همچنین، بررسی تاریخچه مطالعات در این زمینه نشان می‌دهد که کارایی مدل بهینه‌سازی مذکور در ترکیب با مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی (تحلیلگر هیدرولیک جریان) از بهره‌وری بالایی جهت دستیابی به همگرایی سریع برخوردار است. لذا در این مطالعه، مدل بهینه‌سازی به گونه‌ای توسعه یافته که در نتیجه به کارگیری آن، برنامه بهینه بهره‌برداری متناظر با هر یک از سناریوهای مجزا و ترکیبی تولید گردد. در این حالت، برنامه‌های بهره‌برداری به صورت مدول‌های مبتنی بر زمان تعریف شده و از این رو، تنظیمات زمانی تجهیزات کنترل فشار در تمامی گام‌های زمانی به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری بهینه‌سازی مطرح می‌باشد. علاوه بر این، مقدار تابع هدف در این مسئله بر اساس توان دوم میانگین زمانی و مکانی انحرافات فشار گره‌ای از فشار مطلوب تعریف شده (رابطه ۲) و محدودیت‌های (قیده‌های) بهینه‌سازی نیز منطبق بر رابطه (۳) مدنظر قرار می‌گیرد.

$$\text{Min } f_1 = \sum_{i=1}^{NPN} \sum_{t=1}^{24} (H_i^t - H^{Des})^2 * (NPN * 24)^{-1} \quad (2)$$

$$\text{Subject to: } \begin{cases} S_{Min} \leq S_{Set} \leq S_{Max} \\ H_{Min} \leq H_i^t \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه (۲)،  $f_1$  برابر با مقدار تابع هدف، NPN تعداد کل گره‌های فشاری موجود در ساختار شبکه،  $H_i^t$  فشار گره  $i$ ام در زمان  $t$  و  $H^{Des}$  نیز بیانگر فشار مطلوب بوده که مقدار آن در این مطالعه، برای هر دو شبکه مورد بررسی برابر ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. در رابطه (۳) نیز،  $H_{Min}$  بیانگر حداقل فشار مجاز در شبکه است که مقدار آن در شبکه تئوریک برابر ۲۵ متر و در شبکه واقعی نیز معادل ۲۸ متر می‌باشد. همچنین،  $S_{Set}$  پارامتر تنظیمی تجهیزات کنترل فشار و  $S_{Min}$  و  $S_{Max}$  نیز به ترتیب بیانگر حداقل و حداکثر مقادیر مجاز جهت تعیین این پارامتر تنظیمی است که مقدار آن به تفکیک برای هر سناریو در بخش‌های بعدی ارائه می‌گردد. علاوه بر رابطه (۳)، قیود دیگری نیز بر فرآیند بهینه‌سازی حاکم بوده که شامل معادلات مرتبط با هیدرولیک جریان در رابطه (۱) می‌باشد. لازم به ذکر است که با توجه به اتصال دو مدل بهینه‌سازی و شبیه‌سازی هیدرولیکی، تأمین قیود مبتنی بر هیدرولیک جریان بدون وارد نمودن صریح معادلات آن در

1 EPANET Toolkit

## • شاخص شکست هیدرولیکی

آخرین شاخص مورد مطالعه، شاخص شکست هیدرولیکی بوده که می‌تواند معیاری از قابلیت اطمینان شبکه در خصوص تأمین حداقل فشار گره‌ای ارائه دهد. مقدار این شاخص در مرحله اول به صورت گره‌ای محاسبه شده (رابطه ۵) و سپس با محاسبه میانگین مقادیر آن برای گره‌های مختلف، میزان شاخص شکست هیدرولیکی در هر گام زمانی با استفاده از رابطه (۶) برآورد می‌گردد.

$$If_{i,t} = \begin{cases} 0 & \forall i : H_{i,t} \geq H_{req} \\ q_{i,t} * (H_{req} - H_{i,t}) & \forall i : H_{i,t} < H_{req} \end{cases} \quad (5)$$

$$If_t = \frac{\sum_{i=1}^{nn} If_{i,t}}{\sum_{i=1}^{nn} q_{i,t} * H_{req}} \quad (6)$$

در معادلات فوق، مقدار تقاضا در گره  $i$  و زمان  $t$ ،  $H_{req}$  حداقل فشار مورد نیاز جهت تأمین دبی تقاضا،  $nn$  تعداد گره‌های دارای فشار پایین‌تر از فشار کمینه،  $H_{i,t}$  مقدار فشار در گره  $i$  و زمان  $t$  و  $If_{i,t}$  و  $If_t$  نیز به ترتیب برابر شاخص شکست هیدرولیکی گره‌ای و مطلق می‌باشند. پارامتر  $H_{req}$  در این پژوهش معادل مقدار مؤلفه  $H_{Min}$  در نظر گرفته شده است. جهت ارزیابی شرایط شبکه بر اساس این شاخص، حداکثر مجاز آن توسط گروهی از مطالعات مورد تحقیق قرار گرفته و مقدار آن تعیین شده است. حداکثر مجاز شاخص شکست هیدرولیکی نشان دهنده شرایطی است که طی آن مقادیر فشار جهت تأمین تقاضای مشترکین در وضعیت مرزی قرار داشته است؛ به این معنی که با کاهش بیشتر فشار حتی در یکی از گره‌های شبکه، فرآیند آبرسانی مختل می‌گردد. در مقاله‌ای که سال ۲۰۱۰ ارائه گردید، حداکثر مجاز شاخص شکست هیدرولیکی معادل ۰/۰۱ تعیین شد. در شبکه مورد بررسی توسط مطالعه مذکور، مقدار متناظر با کمینه فشار مجاز برابر ۳۰ متر مدنظر بوده [۲۰] و این در حالی است که در مطالعه حاضر، پارامتر حداقل مجاز فشار برابر با مقادیر دیگری در نظر گرفته شده که پیشتر، جزئیاتی در این خصوص به تفکیک هر دو شبکه واقعی و فرضی ارائه گردید. همین امر منجر به آن شده که ارزیابی مقدار محاسبه شده برای شاخص شکست هیدرولیکی در مطالعه حاضر، در قیاس با مقدار ۰/۰۱ (حداکثر مقدار مجاز) نیازمند بررسی‌های بیشتر باشد.

## • نرخ نشت ساعتی

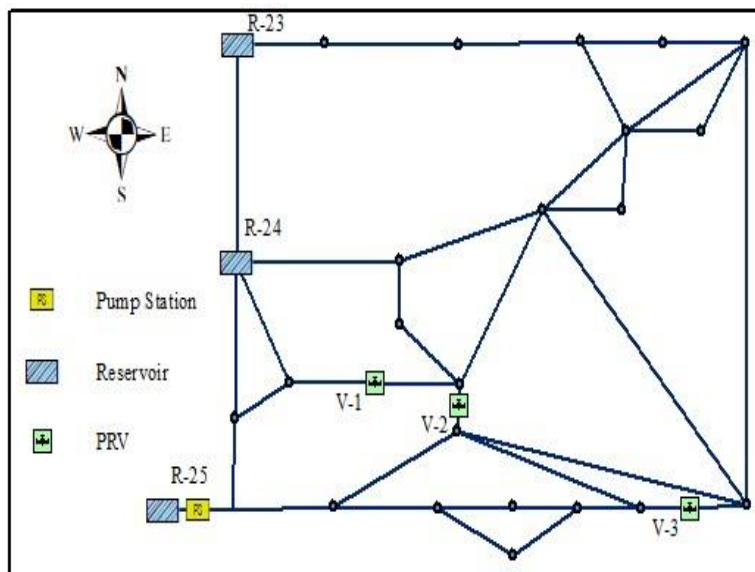
نشت زمینه آن بخشی از نشت تجمعی است که از منافذ ریز اتصالات و لوله‌ها تراوش یافته و قابل شناسایی توسط عملیات نشت‌یابی نیست و همچنین، دبی آن کمتر از دبی آستانه شکستگی می‌باشد. در مطالعات بسیاری ثابت شده که رابطه‌ای توانی میان دبی نشت و فشار گره‌ای وجود دارد. جهت مدل‌سازی نشت زمینه از اجزائی تحت عنوان آشفشان<sup>۱</sup> در مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی بهره برده شده و دبی آن نیز بر پایه رابطه (۴) تعیین می‌گردد [۱۸].

$$Q_{L,i} = \sum_{j \in J_i} \frac{L_{ij}}{2} C_{L,i} \cdot H_i^N = C_{ui} \cdot H_i^N \quad (4)$$

در رابطه فوق،  $C_{L,i}$  ضریب ثابت نشت،  $H_i$  مقدار فشار در محل گره  $i$ ،  $J_i$  تعداد لوله‌های متصل به گره  $i$ ،  $L_{ij}$  طول لوله  $ij$ ،  $Q_{L,i}$  دبی نشت در گره  $i$  و  $C_{ui}$  نیز ضریب نشتی (ضریب آشفشان) بوده که در آن اثرات طول لوله‌ها لحاظ شده است. به علاوه در این معادله،  $N$  توان فشار بوده که مقدار آن بر اساس نوع منفذ نشت و مشخصات لوله از قبیل جنس و صلیبت، از ۰/۵ تا ۱/۵ تغییر می‌کند [۱۹]. لازم به ذکر است که با توجه به اجرای تحلیل هیدرولیکی در دوره زمانی گسترده، دبی نشت زمینه‌ای نیز برای هر ساعت و به فراخور تغییرات دبی تحت الگوی تقاضا، محاسبه شده و در نهایت، مقدار میانگین نشت ساعتی در هر سناریو مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

## • درصد پوشش گره‌های با فشار مطلوب

دومین شاخص مورد بررسی، درصد پوشش گره‌های با فشار مطلوب در شبکه است که مقدار آن برابر نسبت تعداد گره‌های دارای فشار در محدوده مطلوب (بازه فشار ۳۰ تا ۴۰ متری برای شبکه تئوریک و ۲۸ تا ۴۵ متری برای شبکه واقعی) به تعداد کل گره‌های فشاری موجود در شبکه می‌باشد. ارزیابی این شاخص قادر است تا میزان بهره‌وری هر یک از سناریوهای مدیریت فشار جهت نزدیک نمودن فشارهای گره‌ای به مقادیر مطلوب را نشان دهد.



شکل ۲. نمای از مدل شبکه تئوریک جهت اجرای تحلیل هیدرولیکی [۸]

Fig. 2. Layout of the theoretical network adopted in the hydraulic analysis [8]

پمپ دور متغیر (دور نسبی) و شیرهای فشارشکن (فشار خروجی) به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در فرآیند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. پمپ دور متغیر کاربردی در این حالت، با دور پایه ۲۹۰۰ دور بر دقیقه مفروض بوده و در نقطه طراحی قادر است تا دبی ۲۳/۷۵ لیتر بر ثانیه را تا ارتفاع ۵۵ متری پمپاژ نماید. همچنین لازم به ذکر است که در این پژوهش، مقدار بهینه هر یک از پارامترهای تنظیمی الگوریتم ژنتیک با کمک فرآیند تحلیل حساسیت تعیین گردید. برای این منظور، تحلیل حساسیت به روش گرافیکی انجام پذیرفت؛ به این معنی که با ترسیم مقادیر تابع هدف به ازای در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای هر یک از پارامترهای تنظیمی در محدوده استاندارد (با فرض ثابت بودن سایر پارامترهای تنظیمی) و تحلیل روند تغییرات منحنی حاصله، مقدار بهینه هر یک از این پارامترها مشخص گردید. به این ترتیب، مقدار بهینه پارامتر تعداد اعضای جمعیت برابر با ۴۵ کروموزوم، نرخ جهش معادل ۷ درصد و احتمال ترکیب نیز برابر ۹۵ درصد مدنظر قرار گرفته شد. علاوه بر این موارد، اجرای فرآیند تکراری مرتبط با الگوریتم ژنتیک در شبکه واقعی و شبکه تئوریک به ترتیب تا ۳۰۰۰ و ۱۲۰ نسل ادامه یافت و ضمن کارایی عملگر انتخاب با روش چرخ رولت<sup>۲</sup>، دستیابی به همگرایی تا پیش از رسیدن به تکرار پایانی محقق شد.

تحلیل هیدرولیکی در شبکه تئوریک طی دوره زمانی گسترده صورت

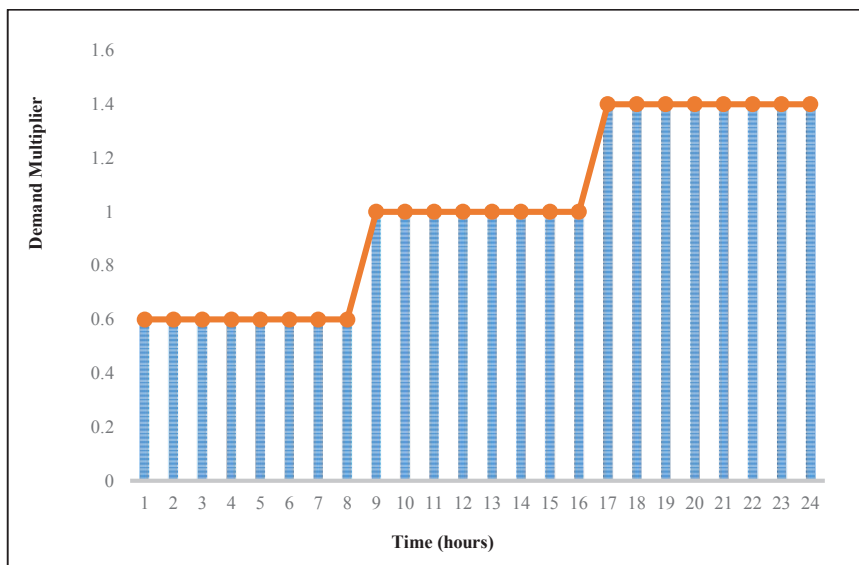
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مطالعه موردی یک: شبکه تئوریک

در مرحله اول، روش پیشنهادی برای یک شبکه تئوریک اجرا گردید که جزئیات آن نخستین بار توسط مرجع [۹] ارائه شد. در تحقیق مذکور، رویکرد مدیریت فشار مبتنی بر بهره‌برداری ترکیبی از شیرهای کنترل جریان و قطع و وصل مورد مطالعه بوده و برای این منظور از روش بهینه‌سازی سیمپلکس پراکنده اصلاح شده<sup>۳</sup>، با هدف کاهش نشت استفاده شد. ساختار این شبکه تئوریک، منطبق بر شکل ۲ و مشتمل بر ۲۵ گره مصرفی، ۳۷ لوله، ۳ مخزن و همچنین ۳ شیر کنترل فشار می‌باشد. سایر اطلاعات فیزیکی و هیدرولیکی مورد نیاز نیز منطبق بر تحقیق [۸] در دسترس قرار گرفته است. علاوه بر این، جهت مدل‌سازی مصرف مبتنی بر فشار و به بیانی اعمال نشت توزیع شده در این مطالعه، ضرایب آبفشان مبتنی بر تحقیق [۱۱] مورد استفاده قرار گرفت. در این شبکه، هر دو سناریو معرفی شده در بخش پیشین (سناریو مجزا و ترکیبی) اجرا شد و جهت پیاده‌سازی سناریو دوم (عملکرد ترکیبی شیرهای فشارشکن و پمپ)، نصب یک پمپ دور متغیر در موقعیت مکانی واقع شده پس از مخزن شماره ۲۵ (R-25) انجام پذیرفت. متغیرهای بهینه‌سازی در سناریو اول، مشتمل بر پارامتر تنظیمی (فشار خروجی) شیرهای فشارشکن در گام‌های زمانی مختلف بوده و در سناریو دوم نیز، ترکیب پارامتر تنظیمی

2 Roulette-Wheel Selection

1 Sparse Revised Simplex Method



شکل ۳. الگوی مصرف شبانه‌روز شبکه تئوریک [۳]

Fig. 3. The daily demand pattern of the theoretical network [3]

نسل‌های متوالی) قابل ارزیابی است. در نهایت نیز، با استفاده از مؤلفه‌های  $CF(x)$  و  $f_{NFE}$  منطبق بر رابطه (۷)، پارامتر کلی سنجش بهینه‌سازی (TOEP) محاسبه شد.

$$TOEP_{TimeStep} = [f_{NFE} * CF(x)]_{TimeStep} \quad (7)$$

در رابطه فوق، TimeStep نشان دهنده گام زمانی مورد بررسی است که در این مطالعه، مقادیر مختلف برای آن در نظر گرفته شده (۸).  $TimeStep \in \{1, 2, 3, 4, 6\}$  تا امکان تعیین مقدار بهینه گام زمانی فراهم گردد. علاوه بر این، مقدار متناظر با پارامتر آستانه تحمل تابع هدف نیز معادل ۰/۰۱ (با در نظر گرفتن دقت ۰/۱ متری برای فشار گره‌ای) مدنظر بوده است. در ادامه، مقادیر هر یک از مؤلفه‌های رابطه (۷)، به ازای گام‌های زمانی مختلف محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۱ ارائه گردیده است.

در جدول فوق، مقدار پارامتر  $NFE_{Final\_IT}$  بیانگر تعداد دفعات سنجش تابع هدف در نسل (تکرار) پایانی بوده که جهت محاسبه مؤلفه  $f_{NFE}$  مورد کاربرد قرار می‌گیرد. در انتها، با بررسی مقادیر پارامتر TOEP، امکانی فراهم شد تا کمینه مقدار این پارامتر شناسایی گردد. در واقع چون کمینه مقدار TOEP نشانگر شرایطی است که کمترین مقدار تابع هدف و

پذیرفت و تغییرات مقادیر تقاضای گره‌ای (مجموعاً برابر ۱۱۳/۵۴ لیتر بر ثانیه) نیز تحت الگوی مصرف ارائه شده در شکل ۳ مدنظر واقع شد. در این حالت، آهنگ مصرف منطبق بر سه وضعیت متناظر با حداقل، میانگین و حداکثر ضریب مصرفی می‌باشد.

در مرحله بعدی، گام زمانی بهینه جهت تدوین برنامه زمانی بهره‌برداری از تجهیزات کنترل فشار یعنی شیرهای فشارشکن و پمپ دور متغیر تعیین گردید. لازم به ذکر است که با توجه به نبود محدودیت در تنظیم زمانی تجهیزات، مقدار به دست آمده برای گام زمانی بهینه در سناریو اول، به مقدار متناظر آن برای سناریو دوم قابل تعمیم می‌باشد. در پژوهش حاضر، از دو پارامتر  $f_{NFE}$  و  $CF(x)$  جهت تعیین گام زمانی بهینه استفاده شده است. مؤلفه  $f_{NFE}$  بیانگر نسبت  $NFE^1$  (تعداد دفعات سنجش مقدار تابع هدف) تکرار پایانی در فرآیند بهینه‌سازی مرتبط با گام زمانی مورد بررسی به حداکثر تعداد NFE محاسبه شده برای همین تکرار و در همه‌ی گام‌های زمانی می‌باشد و  $CF(x)$  نیز نشان دهنده مقدار تابع هزینه متناظر با آن است. در این حالت، تحقق همگرایی با بررسی تغییر نسبی مقدار تابع هدف در قیاس با نسل ما قبل خود و تطابق آن با پارامتر آستانه تحمل تابع هدف<sup>۲</sup> (حداکثر اختلاف قابل قبول در تغییر نسبی میانگین مقدار تابع هزینه در

- 
- 1 Number of Function Evaluation
  - 2 Function Tolerance



جدول ۱. پارامترهای بهینه‌سازی جهت تعیین گام زمانی برای برنامه‌های مدیریت فشار مبتنی بر زمان

Table 1. Optimization parameters to determine the optimum time step for time-based pressure management schemes

ردیف	گام زمانی برنامه‌ریزی	مقدار تابع هدف در تکرار پایانی CF(x)	تعداد دفعات سنجش تابع هدف در تکرار پایانی NFE <sub>Final IT</sub>	وزن محاسباتی تابع هدف f <sub>NFE</sub>	پارامتر کلی سنجش بهینه‌سازی TOEP
۱	۱	۳۵/۶۵	۲۲۰۰۴	۱/۰۰	۳۵/۶۵
۲	۲	۳۳/۷۷	۱۱۵۳۲	-/۵۲	۱۷/۷۰
۳	۳	۳۲/۳۹	۱۵۸۸۴	-/۷۲	۲۳/۳۸
۴	۴	۲۲/۹۷	۱۴۴۲۲	-/۶۵	۱۵/۰۵
۵	۶	۳۳/۳۷	۴۱۲۰	-/۱۹	۶/۲۵
۶	۸	۳۱/۱۶	۵۴۴۶	-/۲۵	۷/۷۱

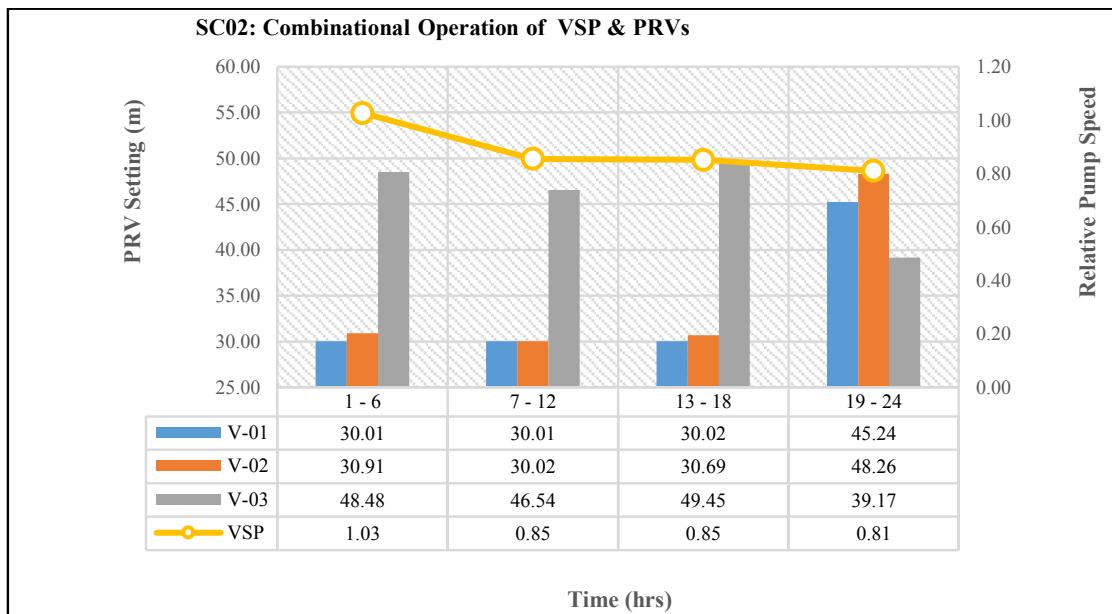
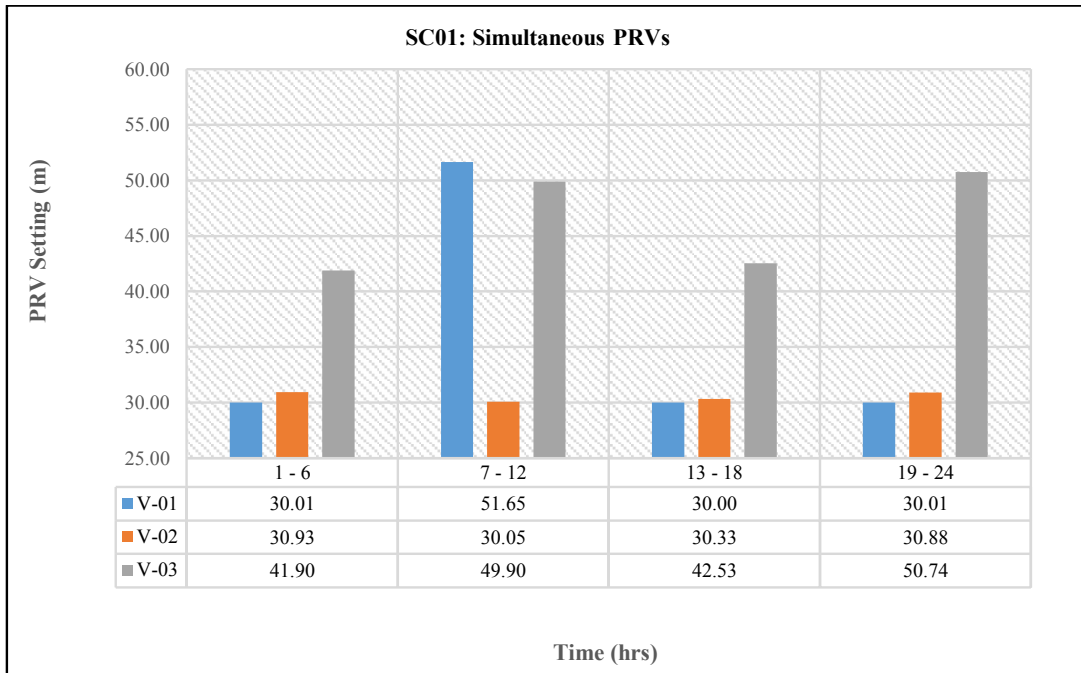
سناریوها مورد سنجش قرار گیرد و بر این مبنای انتخاب مناسب‌ترین رویکرد مدیریت فشار میسر گردد. مقادیر اندازه‌گیری شده برای انواع شاخص‌های ارزیابی در جدول ۲ ارائه گردیده است. با توجه به اعداد ارائه شده در این جدول، می‌توان بیان نمود که هر دو سناریو کنترل فشار توانسته‌اند به صورت قابل توجهی، شرایط هیدرولیکی شبکه را بهبود بخشند.

با بررسی جدول ۲، می‌توان مشاهده نمود که اجرای سناریو دوم یعنی بهره‌برداری از ترکیب شیرهای فشارشکن و پمپ دور متغیر با تأمین نرخ کاهشی بیش‌تر برای شاخص نوسانات (۷۵/۳۴ درصد) و همچنین، نرخ رشد بالاتر برای شاخص درصد پوشش گره‌های با فشار مطلوب (۱۰/۲۰ درصد) همراه بوده و بر این اساس، از بهره‌وری بالاتر در قیاس با سناریو مجزا (استفاده از شیرهای فشارشکن) برخوردار است. با بررسی سایر شاخص‌های ارزیابی نیز مشخص گردید که اجرای سناریو ترکیبی توانسته نرخ کاهشی معادل ۹/۶۴ درصد را برای شاخص میانگین دبی نشت ساعتی فراهم نماید و مقدار شاخص شکست هیدرولیکی برابر صفر را نیز نتیجه دهد. مقدار اندازه‌گیری شده برای شاخص شکست هیدرولیکی در این حالت، نشانگر اطمینان‌پذیری قابل توجه سیستم جهت تأمین حداقل فشار گره‌ای در تمامی گره‌های شبکه می‌باشد. در شکل ۵ نیز، چگونگی توزیع فشار گره‌ای پس اجرای سناریو دوم در مدل هیدرولیکی نشان داده شده که افزایش یکنواختی در لایه‌های فشاری چه در ساعت حداقل مصرف و چه در ساعت حداکثر مصرف مشهود می‌باشد. این موضوع، بر کارآمدی قابل توجه روش پیشنهادی (برنامه بهینه مرتبط با سناریو دوم)، جهت کاهش نوسانات فشار گره‌ای صحت

بیشترین صرفه محاسباتی (کمترین حجم محاسبات) در مسئله بهینه‌سازی تأمین می‌شود، گام زمانی متناظر با این مقدار از TOEP به عنوان گام زمانی بهینه مدنظر قرار می‌گیرد. لذا در مجموع، گام زمانی ۶ ساعته به عنوان گزینه پیشنهادی جهت تدوین برنامه بهره‌برداری مبتنی بر زمان مورد استفاده قرار گرفت.

پس از تعیین پارامترهای تنظیمی الگوریتم ژنتیک به واسطه اجرای تحلیل حساسیت و همچنین، مشخص نمودن گام زمانی بهینه با استفاده از پارامتر TOEP، مدل بهینه‌سازی برای شبکه تئوریک اجرا گردید تا از این طریق، برنامه بهینه بهره‌برداری در هر دو سناریو مجزا و ترکیبی تدوین گردد. در این حالت، بازه تغییرات متغیرهای تصمیم‌گیری جهت تنظیم فشار خروجی شیرهای فشارشکن از ۳۰ تا ۶۰ متر و برای دور نسبی پمپ دور متغیر نیز از ۰/۵ تا ۲ مدنظر بوده است. پس از اجرای بهینه‌سازی، مقادیر بهینه متناظر با هر یک از این متغیرهای تصمیم‌گیری به تفکیک سناریوهای دوگانه به دست آمد که نتایج حاصل آن، یعنی برنامه بهینه بهره‌برداری از شیرهای فشارشکن طی سناریو اول و برنامه بهینه بهره‌برداری از ترکیب شیرهای فشارشکن و پمپ دور متغیر طی سناریو دوم در شکل ۴ نشان داده شده است.

با در اختیار داشتن مدول‌های مبتنی بر زمان جهت بهره‌برداری بهینه از تجهیزات کنترل فشار، این امکان فراهم شد تا با پیاده‌سازی این برنامه‌ها در بستر مدل هیدرولیکی شبکه و اندازه‌گیری شاخص‌های ارزیابی (در شرایط پیش و پس از اعمال رویکردهای مدیریت فشار)، بهره‌وری هر یک از این



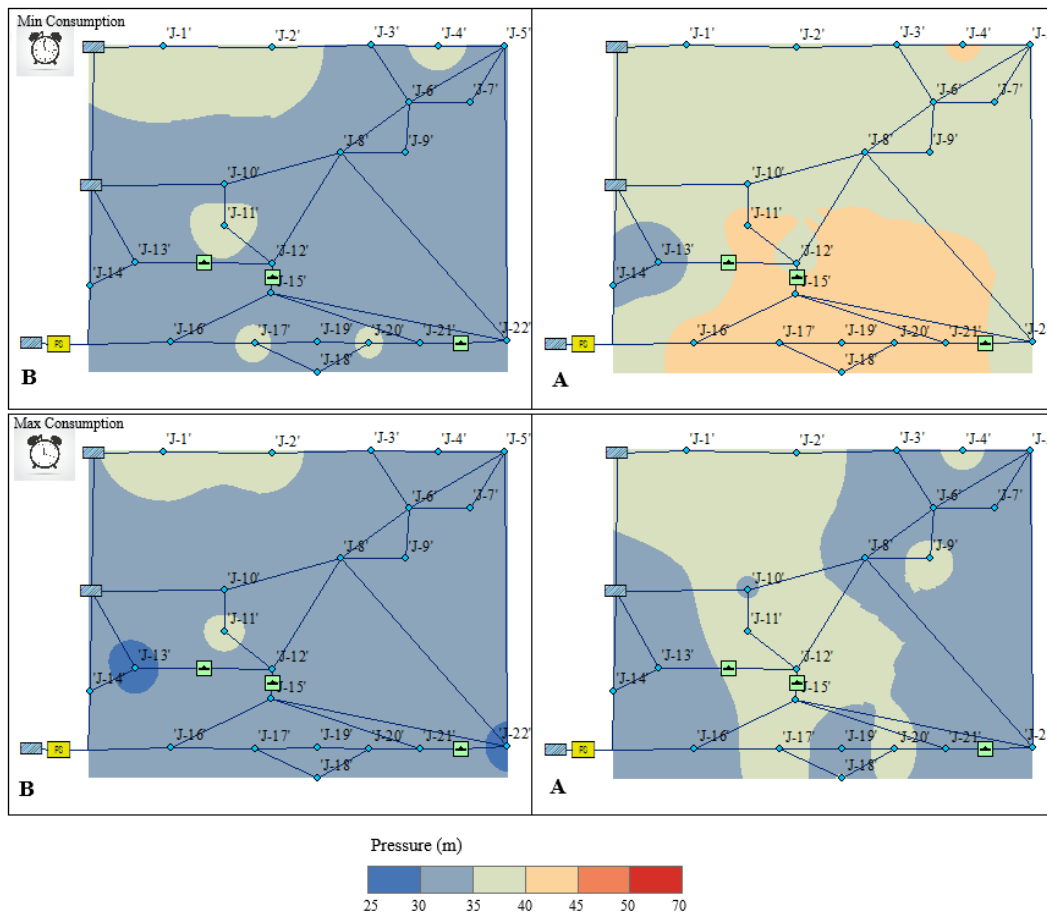
شکل ۴. برنامه عملکردی مبتنی بر زمان شیرهای فشارشکن و پمپ دور متغیر - شبکه تئوریک

Fig. 4. Operational schedule for time-modulated PRVs and VSP in theoretical network

جدول ۲. شاخص‌های عملکردی برای سناریوهای مدیریت فشار مبتنی بر زمان (شبکه تئوریک)

Table 2. Performance indicators for time-based pressure management scenarios (theoretical network)

رویکرد مدیریت فشار	تابع هدف	شاخص نوسانات قبل از اعمال مدیریت فشار	شاخص نوسانات پس از اعمال مدیریت فشار	نرخ کاهش شاخص نوسانات (درصد)	درصد پوشش گره‌های با فشار مطلوب قبل مدیریت فشار	درصد پوشش گره‌های با فشار مطلوب بعد مدیریت فشار	نرخ رشد درصد پوشش گره‌های با فشار مطلوب (درصد)	میانگین دبی نشت ساعتی (درصد)
شیرهای فشار شکن	۲۵/۰۷	۶۰/۳۱	۲۰/۱۸	۶۶/۵۴	۸۵/۸۰	۹۳/۴۵	۷/۶۶	۹/۹۳
شیرهای فشار شکن و پمپ دور متغیر	۱۵/۱۱	۶۰/۳۱	۱۴/۸۷	۷۵/۳۴	۸۵/۸۰	۹۶/۰۰	۱۰/۲۰	۹/۶۴



شکل ۵. لایه‌های رستری فشار گره‌های شبکه تئوریک در ساعت حداقل و حداکثر مصرف؛ الف) قبل؛ ب) بعد از اعمال مدیریت فشار به وسیله بهره‌برداری بهینه از ترکیب شیرهای فشار شکن و پمپ دور متغیر

Fig. 5. Nodal pressure (raster) layers in the theoretical network for minimum and maximum consumption hours: a) before, b) after the pressure management by hybrid operation of optimized PRVs & VSP

می‌گذارد.

بررسی لایه‌های فشاری نمایان در این شکل، امکانی را فراهم می‌آورد تا با ارزیابی توزیع فشار چه به صورت مکانی و چه زمانی، روند کاهش نوسانات از طریق اجرای سناریو ترکیبی را به صورت گرافیکی نیز مورد تحقیق قرار گیرد. بر این مبنای می‌توان بیان داشت که ضمن رعایت حدود حداقل و حداکثر فشار مجاز (به ترتیب معادل فشار ۲۵ و ۵۰ متر) در سطح گره‌های شبکه تئوریک، بازه نزدیک به فشار مطلوب یعنی محدوده فشار ۳۰ تا ۳۵ متر، در اکثریت گره‌ها فراهم شده و همین امر منتهی به ایجاد یکنواختی فشار در سطح شبکه برای هر یک از شرایط حداقل و حداکثر مصرف گردیده است. به عبارتی، می‌توان گفت که اجرای سناریو دوم سبب شده تا درصد پوشش گره‌های دارای فشار در محدوده ۳۰ تا ۳۵ متر، از ۹/۰۹ درصد تا ۷۲/۷۳ درصد در ساعت حداقل مصرف و از ۵۴/۵۵ درصد تا ۷۷/۲۷ درصد در شرایط حداکثر مصرف افزایش یابد.

### ۳-۲- مطالعه موردی دو: شبکه واقعی

در بخش دوم، کارایی روش‌های پیشنهادی در شبکه‌ای واقعی مورد آزمایش قرار گرفت تا بدین وسیله، امکان ارزیابی سناریوهای مختلف در مقیاسی بزرگ‌تر که با چالش‌های بهره‌برداری بیشتر همراه است، فراهم گردد. برای این منظور، شبکه آبرسانی پهنه I-1 در شهر مشهد برگزیده شد تا اجرای سناریوهای ترکیبی و مجزا با هدف مدیریت هوشمند فشار میسر گردد. از جهت ارتقاعی، پایین‌ترین و بالاترین گره‌های مصرفی این شبکه در ترازهای ۱۰۷۴ و ۱۲۱۳ متر قرار دارند. افزون بر این، در شبکه مذکور مجموع طول لوله‌ها برابر ۸۹/۱۷۳ کیلومتر (معادل ۱۱۴۹ عدد لوله) می‌باشد. رژیم جریان در وضعیت موجود شبکه I-1 به صورت ثقلی بوده که در مطالعه حاضر، یک پمپ دور متغیر (در تراز ۱۲۱۵ متر) نیز به آن اضافه شده است. علاوه بر این، شبکه مذکور دارای ۱۹ شیر فشارشکن است که از این میان، ۱۷ شیر فشارشکن به صورت فعال عمل نموده و مجموعه شیرآلات کاربردی در دو نوع شیرهای فشارشکن مرزی (مرز پهنه‌های فشاری) و داخلی (داخل پهنه‌های فشاری) مورد استفاده بوده‌اند. افزون بر این، با توجه به وسعت و گستردگی شبکه توزیع آب در این پهنه، فرآیند اسکلت‌بندی نیز برای آن اجرا گردید تا امکانی جهت ارتقاء کارایی و استفاده‌پذیری و همچنین افزایش تمرکز مدل بر اهداف بهینه‌سازی فراهم شود. برای این منظور، فرآیند اسکلت‌بندی با بهره‌گیری از ابزار متناظر<sup>۱</sup> آن در نرم‌افزار Water-

1 Skelebrator Skeletonizer

GEMS صورت پذیرفت و مکانیسم‌هایی همچون حذف شاخه‌ها<sup>۲</sup> (حذف انشعابات حداکثر تا یک سطح و همراه با انتقال مصارف)، حذف لوله‌های موازی و ایجاد لوله معادل مبتنی بر قطر<sup>۳</sup> (حذف لوله‌های موازی حداکثر تا یک سطح) و حذف لوله‌های سری و ایجاد لوله معادل مبتنی بر قطر<sup>۴</sup> (حذف لوله‌های سری حداکثر تا یک سطح) به کار گرفته شدند. در این شرایط، با از میان بردن عناصری که از اثرگذاری پایین در دقت مدل‌سازی برخوردارند، حجم و زمان اجرای محاسبات به صورت قابل توجهی کاهش یافت. ساختار شبکه پس از اجرای اسکلت‌بندی در شکل ۶ نمایان گردیده است.

از سوی دیگر، اجرای سناریوهای دوگانه مدیریت فشار در این شبکه با ویژگی‌های مشابه حالت پیشین در خصوص شبکه تئوریک (مانند سازوکار سناریوها، تعداد و محدوده تغییرات متغیرهای تصمیم‌گیری) انجام گرفت. تنها نکته قابل توجه در این زمینه، ویژگی‌های متمایز ایستگاه پمپاژ در شبکه I-1 است که از دو پمپ موازی (یک پمپ فعال و یک پمپ رزرو) با دور پایه ۱۴۵۰ دور بر دقیقه، تشکیل شده و قادر است دبی ۱۵۸ لیتر بر ثانیه را تا ارتفاع ۱۷ متری پمپاژ نماید. در شبکه واقعی، حداکثر دبی روزانه برابر ۱۴۴/۴۳ لیتر بر ثانیه است که نوسانات مصرف ساعتی متناظر با آن برحسب الگوی مصرف ارائه شده در شکل ۷ می‌باشد. مدل‌سازی دبی نشت ساعتی نیز در این حالت، با فرض مقداری ثابت برای ضریب آفشان ( $L \cdot S^{-1} \cdot m^{-0.5}$ ) صورت پذیرفته است.

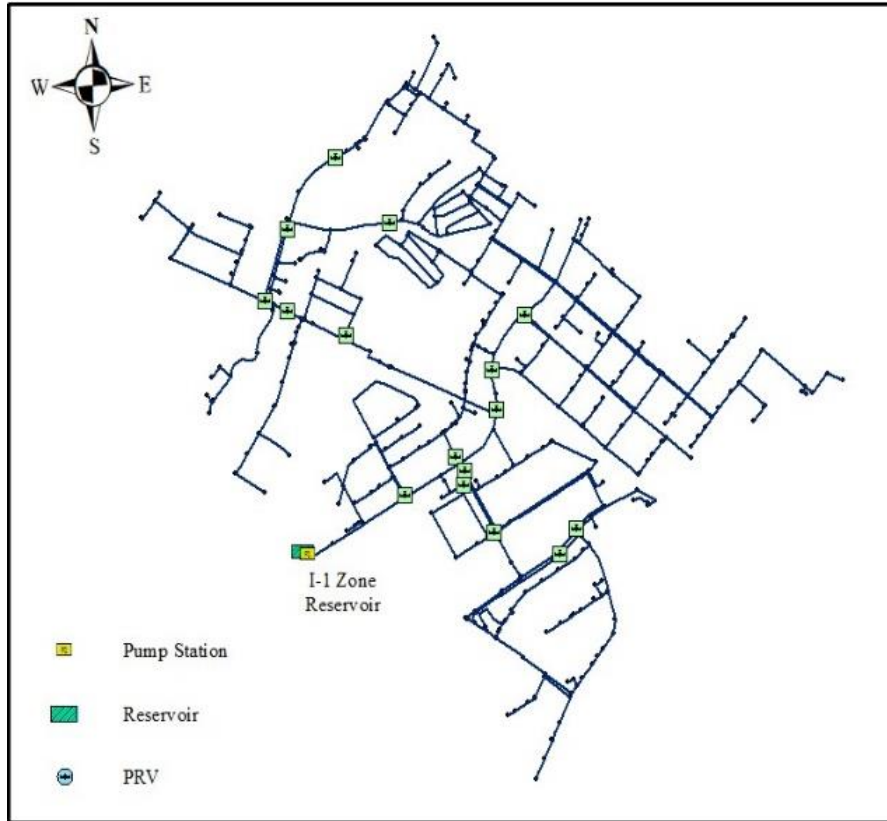
در شبکه واقعی، مقادیر بهینه پارامترهای تنظیمی الگوریتم ژنتیک با اجرای تحلیل حساسیت تعیین گردید و گام زمانی بهینه جهت تدوین مدول‌های مبتنی بر زمان نیز برابر مقدار متناظر آن در شبکه تئوریک مدنظر قرار گرفت. لذا در مجموع، برنامه‌های بهره‌برداری مرتبط با هر یک از سناریوهای مجزا و ترکیبی به صورت مدول‌های چهار فازی (با گام زمانی ۶ ساخته) حاصل شد که جزئیات آن در شکل ۸ منعکس گردیده است.

با ایجاد برنامه‌های بهینه جهت بهره‌برداری از تجهیزات کنترل فشار در هر دو سناریو و همچنین پیاده‌سازی آن‌ها در مدل هیدرولیکی شبکه واقعی، مقادیر شاخص‌های ارزیابی در شرایط پیش و پس از اجرای سناریوهای مدیریت فشار، محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. با بررسی مقادیر موجود در این جدول، می‌توان اثربخشی سناریوهای مختلف را مقایسه نمود و از این طریق، مناسب‌ترین رویکرد جهت کنترل فشار در

2 Branch Collapsing

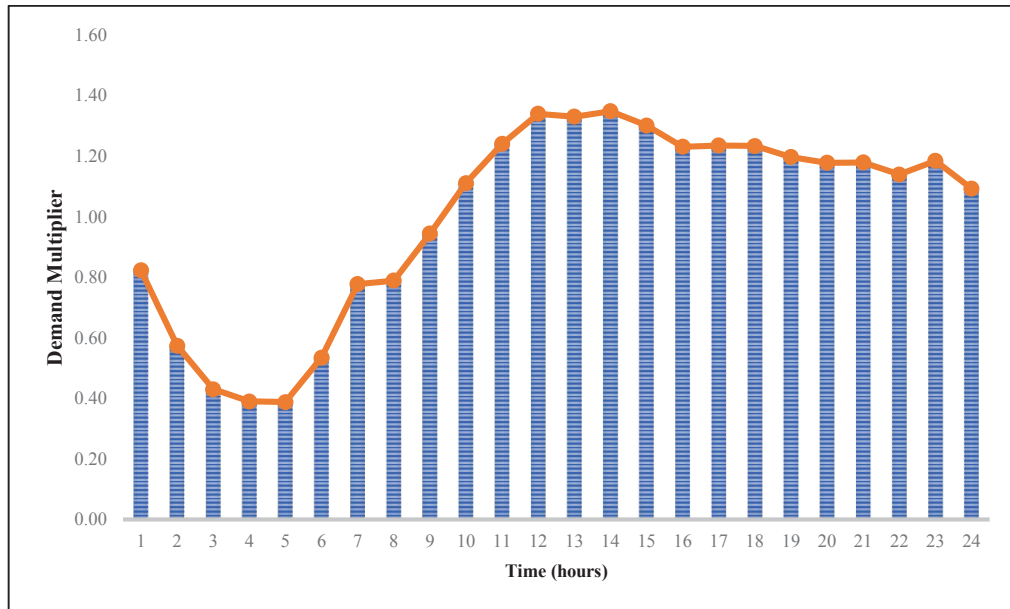
3 Parallel Pipe Merging

4 Series Pipe Merging



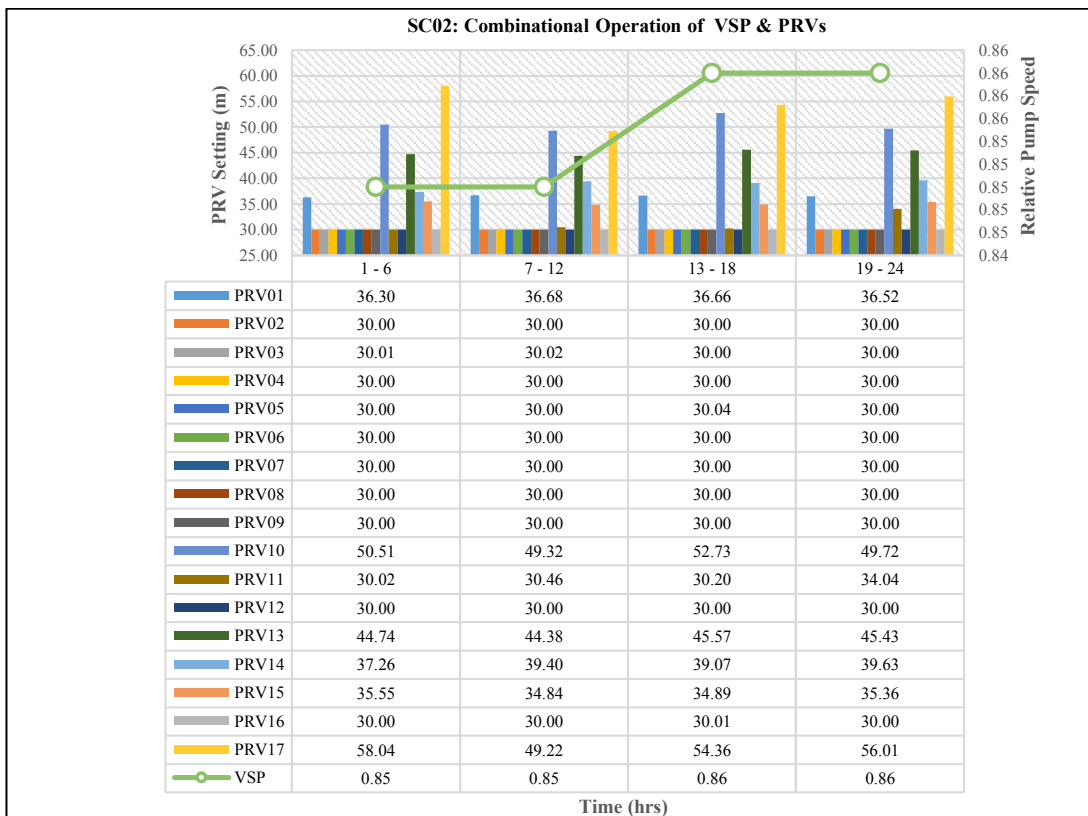
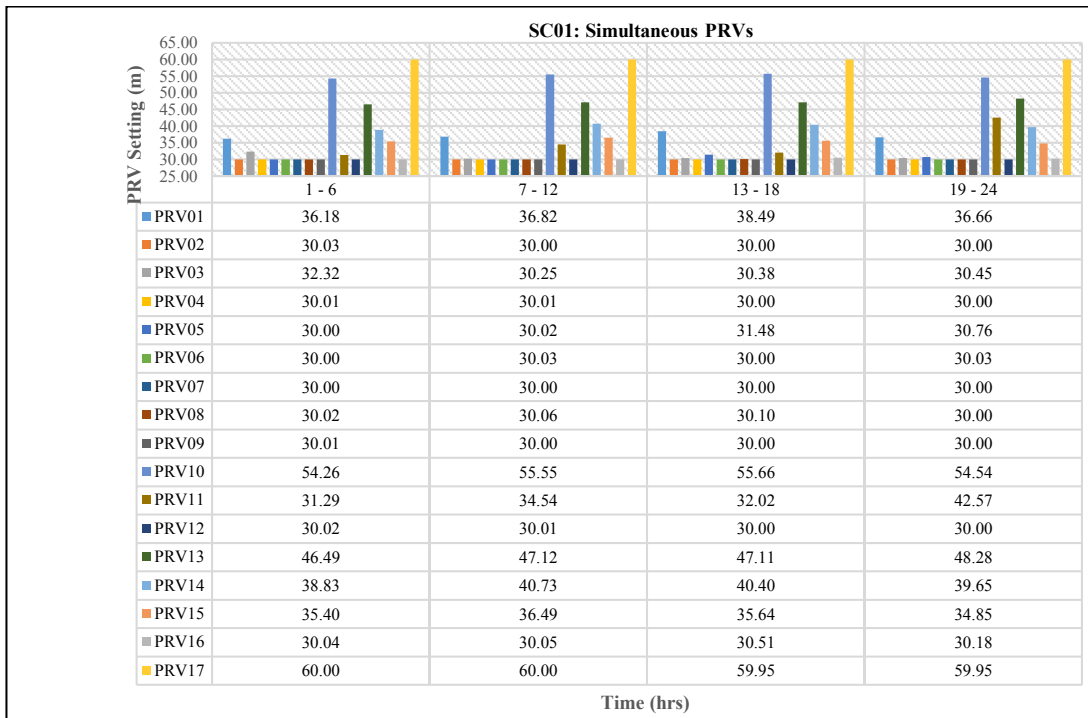
شکل ۶. نمایی از مدل شبکه واقعی (زون I-1 شهر مشهد) جهت اجرای تحلیل هیدرولیکی

Fig. 6. Layout of the real network (I-1 zone in Mashhad city) adopted in the hydraulic analysis



شکل ۷. الگوی مصرف شبانه روز شبکه واقعی

Fig. 7. The daily demand pattern of the real network



شکل ۸. برنامه عملکردی مبتنی بر زمان شیرهای فشارشکن و پمپ دور متغیر - شبکه واقعی

Fig. 8. Operational schedule for time-modulated PRVs and VSP in the real network

جدول ۳. شاخص‌های عملکردی برای سناریوهای مدیریت فشار مبتنی بر زمان (شبکه واقعی)

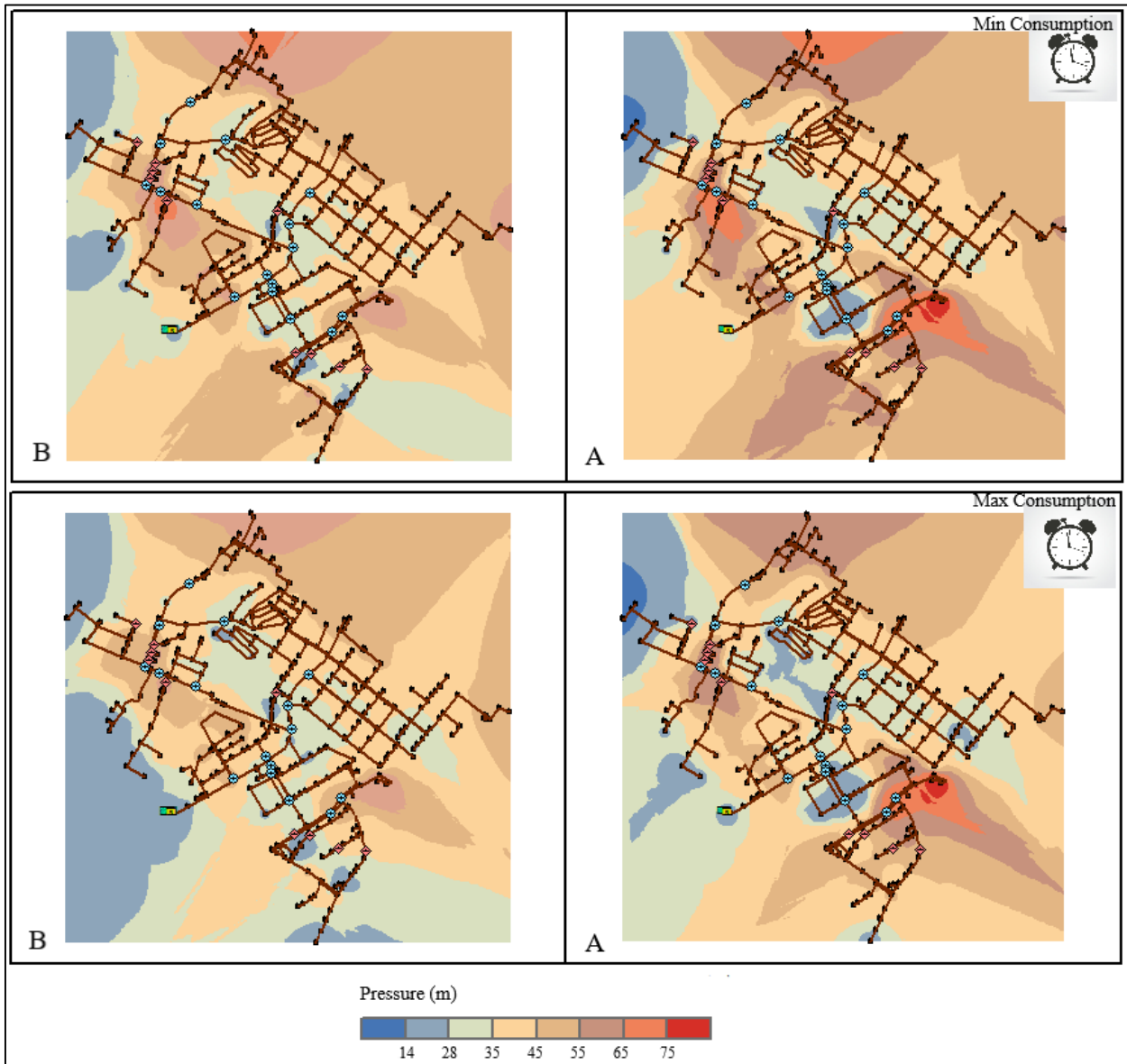
Table 3. Performance indicators for time-based pressure management scenarios (real network)

رویکرد مدیریت فشار	تابع هدف	شاخص نوسانات قبل از اعمال مدیریت فشار	شاخص نوسانات پس از اعمال مدیریت فشار	نرخ کاهش شاخص نوسانات (درصد)	درصد پوشش گره‌های با فشار مطلوب قبل از اعمال مدیریت فشار	درصد پوشش گره‌های با فشار مطلوب بعد از اعمال مدیریت فشار	نرخ رشد درصد پوشش گره‌های با فشار مطلوب (درصد)	میانگین دبی نشت ساعتی (درصد)
شیرهای فشارشکن	۳۰۶/۵۳	۳۵۲/۵۹	۲۶۶/۹۱	٪۲۴/۳۰	٪۵۰/۳۵	٪۵۸/۲۷	٪۷/۹۲	٪۲/۵۳
شیرهای فشارشکن و پمپ دور متغیر	۲۸۰/۲۱	۳۵۲/۵۹	۲۲۵/۵۰	٪۳۶/۰۴	٪۵۰/۳۵	٪۵۹/۸۹	٪۹/۵۴	٪۶/۶۷

شبکه را تعیین نمود. معرفی شده در تحقیق مذکور تلقی گردد و بر همین مبنا، رشد قابل توجه شاخص شکست هیدرولیکی قابل انتظار باشد. در ادامه، چگونگی توزیع فشار در گره‌های شبکه از طریق نمایش لایه‌های رستری فشار گره‌ای متناظر با ساعات حداقل و حداکثر مصرف، در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که در این تصویر مشاهده می‌شود، اجرای سناریو ترکیبی مدیریت فشار نه تنها منجر به کاهش نوسانات زمانی و مکانی فشار گردیده، بلکه یکنواختی مناسبی را نیز جهت تأمین فشار مطلوب در گره‌های مختلف شبکه فراهم نموده است.

با توجه به نحوه توزیع فشار گره‌ای نمایان در این شکل، می‌توان بیان نمود که پس از پیاده‌سازی روش پیشنهادی، مقادیر فشار گره‌ای بالاتر از حد بیشینه (فشار معادل ۶۰ متر) و همچنین فشارهای پایین‌تر از حداقل فشار مورد نیاز برای ساختمان‌های یک طبقه (فشار معادل ۱۴ متر)، در سطح شبکه از میان رفته و مضاف بر این، سطح متناظر با دامنه فشار مطلوب (فشار معادل ۲۸ تا ۴۵ متر) نیز چه در شرایط حداقل مصرف و چه در ساعت حداکثری آن، با گسترش قابل توجهی همراه شده است؛ یعنی، درصد پوشش گره‌های با فشار مطلوب طی ساعت حداقل مصرف از ۴۹/۳۲ درصد به ۵۶/۶۲ درصد رسیده و در ساعت حداکثر مصرف نیز از ۵۲/۰۵ درصد به ۶۰/۹۶ درصد افزایش پیدا نموده است.

با مشاهده جدول فوق، می‌توان بیان نمود که به کارگیری هر دو سناریو مدیریت فشار در این شبکه با بهره‌وری قابل توجهی چه در زمینه کاهش نوسانات و چه افزایش درصد پوشش گره‌های با فشار مطلوب همراه بوده است؛ با این وجود، سناریو دوم مبتنی بر استفاده همزمان از شیرهای فشارشکن و پمپ دور متغیر منتهی به ایجاد نرخ کاهشی بیشتر برای شاخص نوسانات (۳۶/۰۴ درصد) و نرخ رشد بالاتر برای شاخص درصد پوشش گره‌های با فشار مطلوب (۹/۵۴ درصد) گردیده است. از این رو، مقایسه نتایج به دست آمده مؤید کارایی بیشتر سناریو دوم در مقایسه با استفاده از شیرهای فشارشکن در سناریو اول می‌باشد و در مجموع، سناریو ترکیبی به عنوان روش پیشنهادی این مطالعه جهت تنظیم فشار در شبکه واقعی مطرح می‌گردد. در خصوص دیگر شاخص‌های ارزیابی نیز می‌توان مشاهده کرد که پیاده‌سازی سناریو دوم توانسته نرخ کاهشی بیشتر برای شاخص میانگین دبی نشت ساعتی (۶/۶۷ درصد) فراهم کند و مقدار شاخص شکست هیدرولیکی را نیز برابر ۱۸ درصد نتیجه دهد. عدد اندازه‌گیری شده برای این شاخص در مقایسه با حداکثر مجاز آن (که معادل ۰/۰۱ معرفی شد) [۲۰]، مقداری بیشتر است و با این حال، میزانی مطلوب برای شبکه مورد مطالعه ارزیابی می‌گردد؛ چرا که در این حالت، تعدد گره‌های مصرفی و همچنین وجود پهنه‌های فشاری منجر به آن شده که شبکه واقعی در مقیاسی کاملاً متفاوت با شبکه



شکل ۹. لایه‌های رستری فشار گره‌های شبکه واقعی در ساعت حداقل و حداکثر مصرف؛ الف) قبل؛ ب) بعد از اعمال مدیریت فشار به وسیله بهره‌برداری بهینه از ترکیب شیرهای فشارشکن و پمپ دور متغیر

**Fig. 9. Nodal pressure (raster) layers in the real network for minimum and maximum consumption hours: a) before, b) after the pressure management by hybrid operation of optimized PRVs & VSP**

#### ۴- نتیجه‌گیری

از جمله شاخص نوسانات فشار، نرخ نشت ساعتی، درصد پوشش گره‌های با فشار مطلوب و همچنین شاخص شکست هیدرولیکی انجام پذیرفت. الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه‌سازی جهت دستیابی به مدول‌های مبتنی بر زمان با هدف بهره‌برداری بهینه از تجهیزات کنترل فشار به کار گرفته شد. طی مرحله صحت‌سنجی نیز، دو شبکه تئوریک و واقعی جهت پیاده‌سازی سناریوهای مدیریت فشار انتخاب گردید. نتایج به دست آمده در خصوص شاخص‌های ارزیابی (پس از پیاده‌سازی هر یک از سناریوهای

در این مطالعه، سناریوهای مختلف مدیریت هوشمند فشار در شبکه آبرسانی با استفاده از تجهیزات تنظیم فشار و با هدف کاهش نوسانات زمانی و مکانی مقادیر فشار گره‌های مورد تحقیق قرار گرفت. مدیریت فشار با استفاده از شیرهای فشارشکن در سناریو اول و بهره‌برداری از ترکیب شیرهای فشارشکن و پمپ دور متغیر در سناریو دوم طراحی و بهره‌وری هر کدام از این سناریوها نیز بر اساس شاخص‌های ارزیابی هیدرولیک شبکه



planning and management, 116(4) (1990) 455–472.

[9] M. J. H. Sterling, A. Bargiela, Leakage reduction by optimised control of valves in water networks,

Transactions

of the Institute of Measurement and Control, 6(6) (1984) 293–298.

[10] D. A. Savić, G. A. Walters, Integration of a model for hydraulic analysis of water distribution networks

with an evolution program for pressure regulation, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,

11(2) (1996) 87–97.

[11] L. S. Araujo, H. Ramos, S. T. Coelho, Pressure control for leakage minimisation in water distribution

systems management, Journal of water resources planning and management, 20(1) (2006) 133-149.

[12] B. Ulanicki, H. AbdelMeguid, P. Bounds, R. Patel, Pressure control in district metering areas with

boundary and internal pressure reducing valves, in: Proceeding of Water Distribution Systems Analysis, (2009)

1–13.

[13] E. Creaco, G. Pezzinga, Multiobjective optimization of pipe replacements and control valve installations

for leakage attenuation in water distribution networks, Journal of water resources planning and management,

141(3) (2015) 04014059.

[14] A. Gupta, N. Bokde, D. Marathe, K. Kulat, Leakage reduction in water distribution systems with efficient

placement and control of pressure reducing valves using soft computing techniques, Engineering, Technology

& Applied Science Research, 7(2) (2017) 1528–1534.

[15] A. D. Gupta, N. Bokde, D. Marathe, K. Kulat, Optimization techniques for leakage management in urban

water distribution networks, Water Science and Technology: Water Supply, 17(6) (2017) 1638–1652.

[16] A. D. Gupta, K. Kulat, Leakage reduction in water distribution system using efficient pressure

دوگانه) نشان داد که استفاده از ترکیب شیرهای فشارشکن و پمپ دور متغیر در هر دو شبکه با بیشترین سودمندی همراه بوده است. به عبارت دیگر، اجرای این سناریو در شبکه‌های تئوریک و واقعی به ترتیب با کاهش ۷۵/۴ و ۳۶ درصدی شاخص نوسانات و رشد ۱۰/۲ و ۹/۵ درصدی شاخص درصد پوشش گره‌های با فشار مطلوب همراه گردید؛ لذا به عنوان رویکرد بهینه مدیریت فشار در شبکه‌های مورد مطالعه، معرفی می‌شود.

## منابع

[1] America, V. W. N., Finding the blue path for a sustainable economy, (2011) 1–12.

[2] A. Gupta, S. Mishra, N. Bokde, K. Kulat, Need of smart water systems in India, International Journal of Applied Engineering Research, 11(4) (2016) 2216–2223.

[3] M. Nicolini, L. Zovatto, Optimal location and control of pressure reducing valves in water networks,

Journal of water resources planning and management, 135(2) (2009) 178–187.

[4] D. J. Vicente, L. Garrote, R. Sánchez, D. Santillán, Pressure management in water distribution systems:

current status, proposals, and future trends, Journal of water resources planning and management, 142(2) (2016) 04015061.

[5] H. Nasirpour, A. Nasirian, A. Akbarpour, Number and location of pressure reducing valves in water

distribution networks by WaterGEMs software, in: Fifth International Conference on Civil Engineering,

Architecture and Urban Development, (2017) 1-192 (in Persian).

[6] I. Moslehi, M. R. Jalili Ghazizadeh, E. Yousefif Khoshghalb, Economic analysis of pressure management

in water distribution networks, Journal of Water and Wastewater, 31(2) (2019) 100–117.

[7] G. Germanopoulos, P. W. Jowitt, Leakage reduction by excess pressure minimization in a water supply

network, in: Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 87(2) (1989) 195–214.

[8] P. W. Jowitt, C. Xu, Optimal valve control in water-distribution networks, Journal of water resources

- Engineering and Surveying (Faculty of Engineering), 44(1) (2010) 1–12 (in Persian).
- [19] O. Giustolisi, D. Savic, Z. Kapelan, Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks, *Journal of Hydraulic Engineering.*, 134(5) (2008) 626–635.
- [20] S. Nazif, M. Karamouz, M. Tabesh, A. Moridi, Pressure management model for urban water distribution networks, *Water Resources Management*, 24(3) (2010) 437–458.
- management techniques. Case study: Nagpur, India, *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(6) (2018) 2015–2027.
- [17] E. Todini, S. Pilati, A gradient method for the analysis of pipe networks, in: *International Conference on Computer Application for Water Supply and Distribution*, (1987).
- [18] A. A. Yekta and M. Tabesh, Comprehensive integrated model for calculating and managing leakage in urban water distribution networks, *Journal of Civil*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*N. Hedaiaty Marzouny, M. R. Jalili Ghazizadeh, I. Moslehi, M. Komeily, Smart Pressure Management to Reduce the Spatial and Temporal Pressure Variations in Water Distribution Networks, Amirkabir J. Civil Eng., 54(10) (2023) 3657-3674.*

DOI: 10.22060/ceej.2022.19743.7250

