

Research Paper

مقاله پژوهشی

Pressure Management in Water Distribution Networks with Optimal Placement of Pressure Relief Valve and Pump as Turbine

مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب با جانمایی بهینه توامان شیر فشار شکن و پمپ معکوس

Parham Vazifedoust Saleh¹, Jafar Yazdi^{2*} and Ali Moridi³

پرهام وظیفه‌دوست صالح^۱، جعفر یزدی^{۲*} و علی مریدی^۳

1- Master Student, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil Engineering, Water and Environment, Tehran, Iran.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

2- Associate Professor, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil Engineering, Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

3- Assistant Professor, Department of Water and Wastewater Engineering, Faculty of Civil Engineering, Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

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

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

Received: 17/04/2023

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸

Revised: 08/10/2023

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶

Accepted: 23/10/2023

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۱

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

One of the problems in the field of water is its wastage in water supply networks due to water leakage due to high pressure. Therefore, keeping the pressure at a suitable range is necessary. The most effective equipment for this purpose is pressure relief valves and PAT². In this article, by linking the DE algorithm with the EPANET hydraulic solver, in the first step, by using the double-objective DE algorithm, the appropriate location of the pressure relief valves and its regulating pressure, as well as the optimal location of the reverse pump and the type of reverse pump, are determined at the same time. In the second step, by using the DE single objective algorithm, keeping the location of the pressure relief valves constant (resulting from the first step) and also keeping the location and type of PAT, the rotational speed of the pump and the regulating pressure of the pressure relief valve constant are optimized in 24 hours, to increase the production energy. The obtained results showed that it is possible to provide 160 kilowatt hours per day of salable energy to the city power grid from the network.

یکی از معضلات شبکه‌های توزیع آب، هدررفت آب در اثر نشت به دلیل فشار بالا در شبکه است. از این‌روی لازم است فشار شبکه را در یک بازه مناسب نگاهداشت. از موثرترین تجهیزات بدین‌منظور شیرهای فشارشکن و پمپ‌های معکوس هستند. در این مقاله با استفاده از مرتبط کردن الگوریتم DE^۱ با حل‌گر هیدرولیکی EPANET تلاش شده است در گام نخست با استفاده از الگوریتم DE دوهدفه، مکان مناسب شیرهای فشارشکن و نیز فشار تنظیمی آن‌ها و همچنین به صورت هم‌زمان مکان بهینه پمپ معکوس و نوع پمپ معکوس در شبکه مشخص شود. در گام دوم با استفاده از الگوریتم تک‌هدفه DE، با ثابت نگاهداشتن مکان شیرهای فشارشکن و همچنین ثابت نگاهداشتن مکان و نوع پمپ‌های معکوس (حاصله از گام نخست)، سرعت دورانی بهینه پمپ و فشار تنظیمی بهینه شیر فشارشکن در یک بازه ۲۴ ساعته، به منظور بهره‌برداری و افزایش انرژی تولیدی از شبکه مشخص می‌شود. نتایج به‌دست آمده نشان داد که می‌توان از شبکه ۱۶۰ کیلو وات ساعت در ۲۴ ساعت شبانه‌روز، انرژی استحصال نمود.

Keywords: Pressure management, Leakage, Pressure reducing valve, Optimal location, Pump as turbine.

کلمات کلیدی: مدیریت فشار، نشت، شیر فشارشکن، مکان بهینه، پمپ معکوس، فشار تنظیمی.

مکانیکی موجود در شبکه آب را توسط چرخش به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. بنابراین، اگر یک پمپ سانتریفیوژ در حالت معکوس عمل کند، می‌تواند به جای توربین فرانسیس مورد استفاده قرار گیرد.

Derakhshan and Nourbakhsh (2008) یک مطالعه تجربی روی منحنی‌های مشخصه پمپ‌های سانتریفیوژی که به‌عنوان توربین در سرعت‌های مختلف کار می‌کنند انجام دادند. هم‌چنین دو معادله برای تخمین منحنی‌های مشخصه پمپ‌هایی که به‌عنوان توربین عمل می‌کنند براساس بهترین نقطه بازده ارائه کردند. (Motmani et al., 2013) هزینه پمپ معکوس برای مطالعه نیروگاه‌های برق آبی پیکو را تحلیل کردند. در این تحقیق یک پمپ معکوس با بازده ۶۰٪ و هم‌چنین یک توربین فرانسیس که بازده آن ۸۰٪ بود، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در نیروگاه آبی پیکو، هزینه توربین فرانسیس بین ۶ تا ۸ برابر هزینه پمپ معکوس است، اما هزینه برق تولید شده به‌ازای هر واحد توربین فرانسیس و پمپ معکوس به‌ترتیب ۶/۸ و ۵/۷ است که استفاده از پمپ معکوس با توجه به هزینه اولیه و هزینه نگهداری پایین‌تر و هم‌چنین در دسترس بودن آن نسبت به توربین فرانسیس را توجیه می‌کند.

De Marchi et al. (2015) هزینه بازیابی انرژی در شبکه توزیع آب با جایگزین کردن پمپ معکوس بجای PRV را تحلیل کردند. نتایج نشان داد چنان‌چه پمپ معکوس در محل مناسبی نصب شود، دوره بازگشت سرمایه بین ۱ تا ۳ سال بوده، حال اگر در محل نامناسب نصب شود، دوره بازگشت سرمایه به ۱۴ تا ۱۵ سال افزایش خواهد یافت. (Lima et al., 2017) جایگزینی پمپ معکوس به‌جای شیر فشارشکن را مطالعه کردند. در این پژوهش هدف، بهینه‌سازی انرژی تولیدی بود و قیدهای هیدرولیکی مسئله، محدود به فشار در هر گره شبکه بود. برای حل این مسئله، از روش بهینه‌سازی PSO استفاده شد. نتایج نشان داد که پمپ معکوس در زمانی که دبی در شبکه بالا باشد، توانایی تولید انرژی و کاهش فشار را دارد و در زمانی که دبی‌های شبکه کم باشد، پمپ‌های معکوس توانایی کنترل فشار و تولید انرژی را ندارند.

Ebrahimi et al. (2021) بهینه‌سازی انتخاب پمپ سرعت متغیر به‌عنوان توربین PAT برای بازیابی انرژی و مدیریت فشار در شبکه را مطالعه کردند. عملکرد پمپ با سرعت متغیر در حالت معکوس نشان‌داد مقدار انرژی تولید شده برابر با ۱۸۲/۱۵ کیلووات ساعت در روز است. (Kandi et al., 2021) عملکرد موازی پمپ‌های معکوس در سه سناریو را بررسی کردند. در سناریوی اول دو پمپ معکوس به‌صورت موازی در کنار یکدیگر استفاده شد

آبرسانی یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های جامعه امروزی است، که مسئولیت آن بر عهده شبکه‌های آبرسانی است. انتقال آب نیازمند وجود فشار مناسب در شبکه است (Karadirek et al., 2017). اما در مناطقی که دارای اختلاف ارتفاع زیادی در توپوگرافی شبکه هستند، این اختلاف ارتفاع باعث افزایش فشار در شبکه آب شده و در نتیجه منجر به نشت و فرسایش شبکه می‌شود که نیاز به مدیریت فشار شبکه لازم می‌شود (Lima et al., 2017). آب یک کالای استراتژیک است که باید از هدررفت آن در طول شبکه جلوگیری نمود. در کشور ایران حدود ۳۰ درصد از آب تصفیه شده در مسیر رسیدن به مصرف‌کننده از دست می‌رود (تابش و همکاران، ۱۳۸۵). راه‌حل متداول برای این معضل، استفاده از شیرهای فشارشکن PRV³ است. از ویژگی بارز شیرهای فشارشکن این است که صرفاً به پارامتر فشار شبکه وابسته هستند و به سایر پارامترهای دیگر شبکه نظیر دبی و غیره وابستگی ندارند و می‌توانند با هر دبی موجود در شبکه، فشار گره‌های وابسته به خود را به فشار دلخواه تبدیل نمایند. علاوه بر آن، اخیراً این شیرها به دستگاه‌های کنترلی برای تنظیم فشار متغیر در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز مجهز شده‌اند تا عملکرد بهتری برای بهره‌برداری از شبکه حاصل شود. اگرچه این شیرها در کاهش فشار شبکه و جلوگیری از هدررفت آب نقش مفید و موثری دارند، اما خود آن‌ها هم دارای معایبی هستند. به‌عنوان مثال استفاده از این شیرهای کاهش فشار نیازمند هزینه اولیه برای تهیه و نصب هستند و این‌که این شیرها هیچ‌گونه بازگشت سرمایه مستقیم را به‌همراه ندارند (García Lima et al., 2017). در شرایط دنیای کنونی با توجه به آلودگی‌های محیط‌زیستی، به‌خصوص آلودگی‌های ناشی از تولید انرژی به‌علت مصرف سوخت فسیلی، بسیار مهم است که به منابع انرژی‌های پاک توجه ویژه‌ای داشت. یکی از راه‌کارهای موجود برای تولید انرژی پاک، استفاده از پتانسیل انرژی موجود در شبکه‌های انتقال و توزیع آب است (رئیس میرزا قلی و همکاران، ۱۳۹۳). لذا تفکر استفاده از پمپ معکوس PAT به‌همراه شیرهای فشار شکن یک پاسخ مناسب به این نیاز امروزی است. همان پمپ گریز از مرکزی است که به‌صورت معکوس در شبکه استفاده می‌شود. پره‌های چرخان داخل پمپ توسط انرژی جنبشی موجود در جریان شبکه به حرکت در می‌آیند و این چرخش پره‌ها، باعث تولید انرژی الکتریکی می‌شود. PAT در واقع یک پمپ سانتریفیوژ است که تقریباً شبیه به توربین فرانسیس بدون دستگاه کنترل جریان کار می‌کند. توربین فرانسیس انرژی

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی الگوریتم DE

الگوریتم مورد استفاده به منظور یافتن مکان‌های بهینه برای شیرها و پمپ‌ها و همچنین تنظیم آن‌ها الگوریتم تکامل تفاضلی است. الگوریتم تکاملی تفاضلی یا الگوریتم DE یک الگوریتم بهینه‌سازی است که اولین بار توسط Storn and Price (1995) معرفی شد. این محققان نشان دادند که این الگوریتم توانایی خوبی در بهینه‌سازی توابع غیرخطی مشتق ناپذیر دارد که به‌عنوان روشی قدرتمند و سریع برای مسائل بهینه‌سازی در فضاهای پیوسته معرفی شده است.

الگوریتم DE برای غلبه بر عیب اصلی الگوریتم ژنتیک، یعنی نبود جستجوی محلی در این الگوریتم ارائه شده است. تفاوت اصلی بین الگوریتم‌های ژنتیک و الگوریتم DE در عملگر انتخاب Selection Operators است. در عملگر انتخاب الگوریتم GA، شانس انتخاب یک جواب به‌عنوان یکی از والدین وابسته به مقدار شایستگی آن است، اما در الگوریتم DE همه جواب‌ها دارای شانس مساوی برای انتخاب شدن هستند. یعنی شانس انتخاب شدن، وابسته به مقدار شایستگی آن‌ها نیست، پس از این که یک جواب جدید با استفاده از یک عملگر جهش mutation و عملگر crossover تولید شد، جواب جدید با مقدار قبلی مقایسه می‌شود و در صورت بهتر بودن جایگزین می‌شود. در الگوریتم تکاملی تفاضلی برخلاف دیگر الگوریتم‌ها که اول عملگر crossover و سپس عملگر mutation انجام می‌شود، به‌گونه‌ای که ابتدا عملگر جهش اعمال شده و سپس عملگر crossover اعمال می‌شود تا بدینوسیله نسل جدید ایجاد شود. برای اعمال عملگر mutation از توزیع خاصی استفاده نمی‌شود، بلکه طول گام جهش برابر با مقدار از فاصله میان اعضای فعلی تعیین می‌شود.

۲-۲- منطقه مورد مطالعه

شبکه مورد مطالعه مربوط به منطقه وردآورد، ناحیه ۳ شهرداری منطقه ۲۱ تهران است. به‌منظور طراحی شبکه، لایه اطلاعات مسیر لوله‌ها از شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس اخذ شد. نیازهای گرهی با توجه به جمعیت منطقه تا افق ۱۴۲۰ (Shahhoseini and Tavakoli, 2013) و به‌روش تیسن در نرم‌افزار WATERGMS برآورد شد. پس از تعیین مسیر لوله‌ها و تخمین نیازهای گرهی، براساس دبی عبوری در زمان حداکثر الگوی مصرف شبکه قطر بهینه لوله‌ها (از طریق بهینه‌سازی با استفاده از

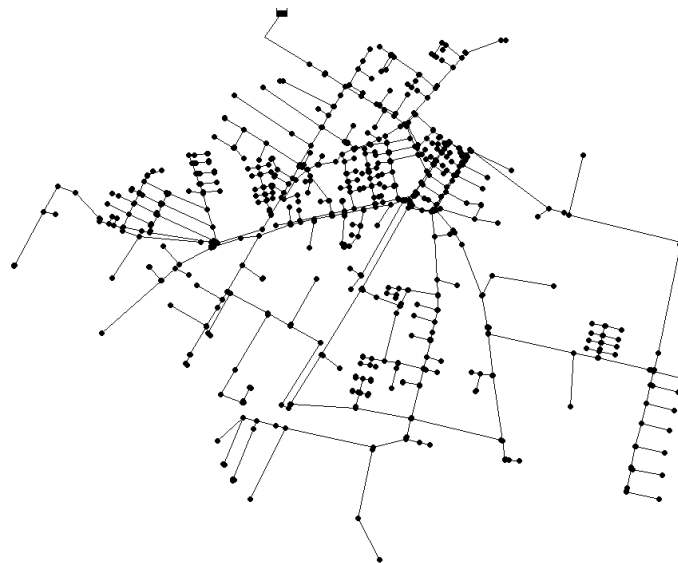
که برای هرکدام از پمپ‌های معکوس یک شیر تنظیم فشار در ورودی پمپ معکوس لحاظ شد. در سناریوی دوم از دو پمپ معکوس موازی استفاده شد و برای هر یک از پمپ‌های معکوس از اینورتور برای کنترل سرعت پمپ استفاده شد. در سناریوی سوم از دو پمپ معکوس موازی استفاده شد و برای هر یک از پمپ‌های معکوس اینورتور و یک شیر تنظیم فشار در ورودی دهانه تعبیه شد. نتایج نشان داد سناریو سوم از همه گران‌تر است ولی بالاترین مقدار انرژی را تولید می‌کند.

(Stefanizzi et al. (2023 جایگزینی پمپ معکوس به‌جای شیر فشار شکن در یک شبکه واقعی در جنوب ایتالیا را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که با جایگزینی پمپ معکوس در شبکه و تنظیم بهینه سرعت چرخش پمپ معکوس می‌توان ۶۰ درصد انرژی‌ای که توسط شیر فشار شکن در شبکه از بین می‌رفت را بازیابی کرد. این مقدار انرژی تولیدی حاصل از شبکه می‌تواند سالانه از انتشار ۳۳۲ تن گاز دی‌اکسیدکربن جلوگیری کند.

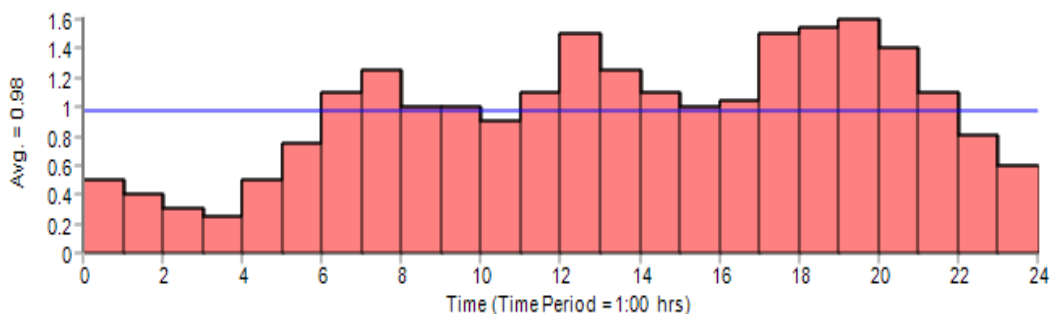
اگرچه استفاده از پمپ معکوس در شبکه به‌لحاظ تولید انرژی جذاب به‌نظر می‌رسد، لیکن در دبی‌های کم به‌دلیل عدم تولید انرژی و همچنین عدم توانایی کنترل فشار توسط پمپ معکوس، استفاده از شیرهای فشارشکن در کنار آن‌ها ضروری است. همچنین از دیگر موارد مهم به‌کارگیری این تجهیزات، جانمایی درست در شبکه است تا بهترین بازده از لحاظ کاهش فشار و تولید انرژی را داشته باشند. لیکن یافتن مکان بهینه برای استقرار این تجهیزات لازم است. نوآوری این مقاله، جانمایی و بهره‌برداری هم‌زمان تعداد و نوع پمپ‌های معکوس و شیرهای فشارشکن در شبکه با در نظرگیری نوسانات ساعتی مصرف آب در شبکه برای مدیریت فشار و تولید انرژی است. به‌طور هم‌زمان، تعداد شیرهای فشارشکن و پمپ‌های معکوس و فشار تنظیمی شیرهای فشارشکن و سرعت چرخش پمپ‌های معکوس و نوع پمپ‌های معکوس با لحاظ کردن نوسانات مصرف آب در نظر گرفته شده و مقادیر این متغیرها با هدف متعادل‌سازی فشار شبکه و افزایش انرژی بهینه‌سازی شده است. در مطالعات قبلی، به بخشی از این موارد پرداخته شده است. مثلاً تاثیر توامان شیر فشارشکن و پمپ معکوس بررسی نشده یا صرفاً مسئله بهره‌برداری مورد توجه بوده، ولی مسئله جانمایی و یا نوسانات مصرف در شبکه در نظر گرفته نشده است. در مقاله حاضر، تمامی فاکتورهای فوق برای مدیریت فشار و انرژی و سرمایه‌گذاری لحاظ شده است. هدف مقاله این است که به‌طور هم‌زمان روشی برای مدیریت فشار، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و افزایش بهره‌وری انرژی در شبکه ارائه شود.

الگوریتم تکامل تفاضلی) تعیین شد تا هزینه خرید لوله‌ها به حداقل خود برسد. مشخصات این شبکه پس از طراحی اولیه شامل ۹۳۴ لوله، با اقطار ۷۵ تا ۵۰۰ میلی‌متر، ۹۱۲ گره و یک مخزن در بالاترین نقطه شبکه با ارتفاع ۱۲۸۳/۴ متری از سطح دریا است و پایین‌ترین قسمت شبکه در ارتفاع ۱۲۰۲/۹۵ متری از سطح دریا قرار دارد که دارای اختلاف ارتفاع ۸۰/۴۵ متری است. این شبکه فاقد پمپاژ بوده و به صورت ثقلی کار می‌کند (شکل ۱). الگوی مصرف شبکه برای ۲۴ ساعت شبانه‌روز با توجه به جمعیت این منطقه و بر اساس نشریه شماره ۱۱۷ انتخاب شده است. در (شکل ۲)، الگوی مصرف شبکه در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز به نمایش درآمده است. شایان ذکر است که فشار حداقل و حداکثر در زمان طراحی که براساس الگوی حداکثر مصرف بوده است رعایت شده است ولی در زمان‌هایی که الگوی مصرف تغییر می‌کند فشارهای گره‌های شبکه از محدوده استاندارد خارج می‌شوند. به عنوان مثال فشارهای گره‌های حداکثر در (شکل ۳) نشان داده شده است (شکل سه براساس تحلیل شبکه مورد مطالعه در نرم‌افزار EPANET در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز به دست آمده است). فشار حداکثر در این شبکه ۷۹/۷۸ متر بدون

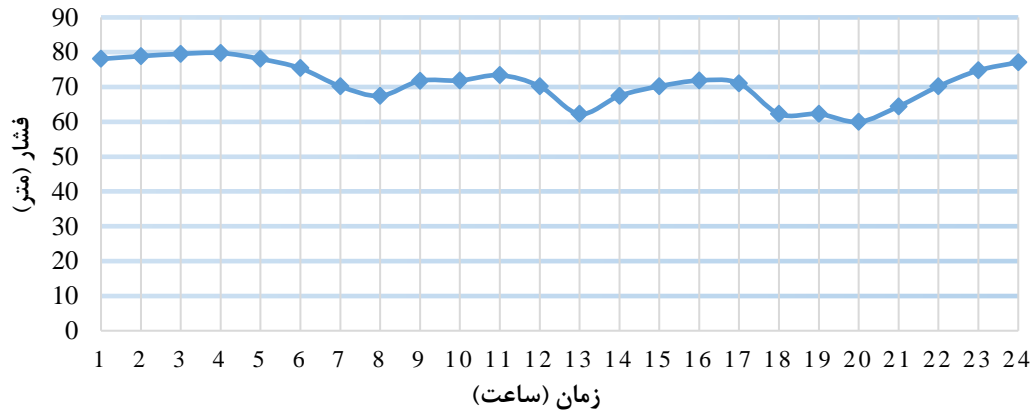
تجهیزات کنترل فشار است، که در ساعت ۴ بامداد مطابق شکل ۳ در کمترین مقدار تقاضای شبکه به وقوع می‌پیوندد. هدف مقاله، این است که به کمک الگوریتم جستجوی DE، تاثیر استفاده هم‌زمان شیرهای فشار شکن و پمپ‌های معکوس بر روی کاهش فشار شبکه و تولید انرژی مطالعه شود. هم‌چنین مکان، تعداد و نوع مناسب پمپ‌های معکوس و شیرهای فشار شکن تعیین می‌شود تا حداکثر فشار در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز به زیر فشار حداکثر ۶۰ متر برسد. هم‌چنین فشار حداقل شبکه، از حداقل فشار مجاز ۱۴ متر کمتر نشود و در عین حال بالاترین میزان تولید انرژی از شبکه حاصل شود. شایان ذکر است که فشار استاندارد حداقل و حداکثر در این مقاله بر اساس نشریه ۱۱۷ انتخاب شده است ولی در شهر تهران حداقل و حداکثر فشار به ترتیب ۲۶ و ۵۰ متر است که برای یک کار عملی می‌بایست این مقدار را در نظر گرفت، با این وجود متدولوژی ارائه شده در این مقاله یک راه‌کار جامع برای به‌کارگیری پمپ‌های معکوس و شیرهای فشار شکن ارائه شده که با هر مقدار استاندارد حداقل و حداکثر شبکه قابل استفاده خواهد بود. روند انجام کار در (شکل ۴) نشان داده شده است.



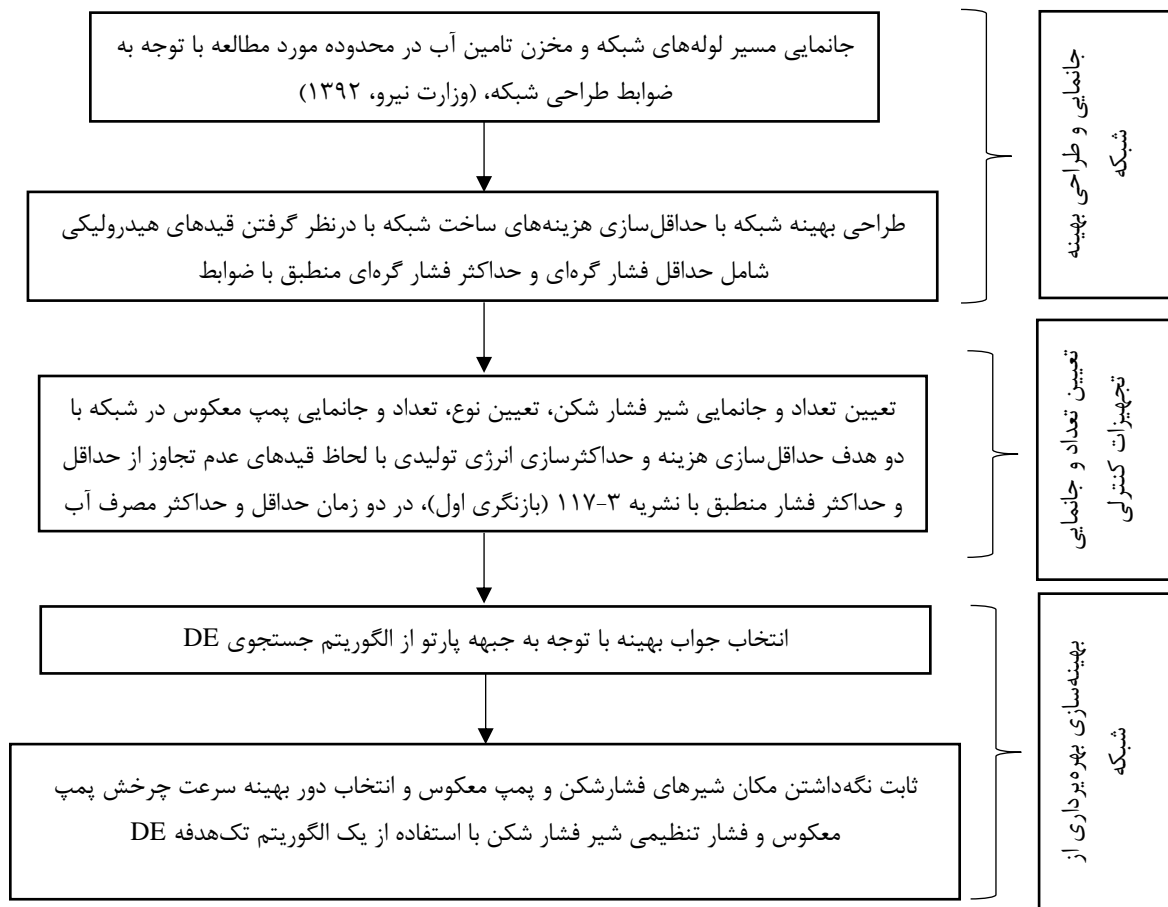
شکل ۱- نمای کلی از شبکه توزیع آب طراحی شده در محیط EPANET



شکل ۲- الگوی مصرف شبکه در طول ۲۴ ساعت (وزارت نیرو، ۱۳۹۲)



شکل ۳- حداکثر فشار شبکه بدون تجهیزات کنترل فشار



شکل ۴- بخش‌های اصلی پژوهش

۲-۳- مدل‌سازی پمپ معکوس

در خصوص پمپ‌های گریز از مرکز روابط تجربی (۱) و (۲)، قبلاً توسط محققان ارائه شده است که می‌توان انرژی قابل استحصال توسط پمپ معکوس را براساس دبی عبوری از پمپ معکوس را محاسبه نمود (Derakhshan and Nourbakhsh, 2008):

$$\frac{H_t}{H_{tb}} = 1.0283 \left(\frac{Q_t}{Q_{tb}} \right)^2 - 0.5468 \left(\frac{Q_t}{Q_{tb}} \right) + 0.5314 \quad (1)$$

$$\frac{P_t}{P_{tb}} = -0.3092 \left(\frac{Q_t}{Q_{tb}} \right)^3 + 2.1472 \left(\frac{Q_t}{Q_{tb}} \right)^2 - 0.8865 \left(\frac{Q_t}{Q_{tb}} \right) + 0.0452 \quad (2)$$

که Q_t : دبی عبوری از PAT، H_t : افت هد در PAT، P_t : توان تولید شده در PAT، Q_{tb} : دبی در بهترین نقطه عملکرد حالت توربینی پمپ، H_{tb} : میزان افت هد در بهترین نقطه عملکرد حالت توربینی پمپ و P_{tb} : توان تولیدی در بهترین نقطه عملکرد حالت توربینی پمپ هستند.

Cost در نظر نگرفته شده است. رابطه (۴) قید مسئله را نشان می دهد.

$$P_{min} < P_i < P_{max} \quad (4)$$

که P_{max} و P_{min} : به ترتیب حداقل و حداکثر فشار مجاز گره های شبکه هستند که براساس استاندارد نشریه ۳-۱۱۷ انتخاب شده است. P_{min} برای این شبکه برابر با ۱۴ متر و P_{max} برابر ۶۰ متر فرض شده است. P_i برابر است با فشار در گره i ام. قیدهای فوق از طریق ترم پنالتی $Penalty$ در مسئله ارضا می شود. علت استفاده از ترم پنالتی این است که در صورتی که جواب های به دست آمده در محدوده مجاز فشار قرار نداشته باشند، مقدار تابع هدف این جواب ها، مقدار بزرگی شود تا در تکرارهای بعدی جستجو، این جواب ها توسط الگوریتم مدنظر قرار نگیرند. تعریف پنالتی در تابع هدف به صورت روابط (۵) و (۶) است:

$$Penalty1i = (P_{min} - P_i) \times 10^6 \quad (5)$$

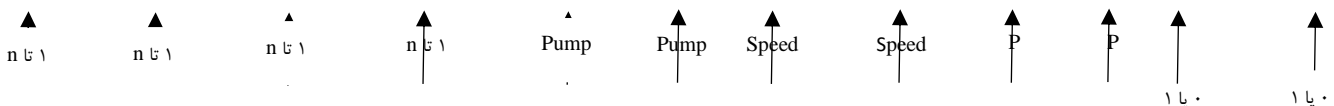
$$Penalty2i = (P_i - P_{max}) \times 10^6 \quad (6)$$

مقدار پنالتی کل به صورت رابطه (۷) تعریف می شود.

$$Penalty = \sum_{i=1}^n (Penalty1i + Penalty2i) \quad (7)$$

رشته بهینه سازی متغیرهای تصمیم مسئله فوق در شکل ۵ ارائه شده است. پس از مشخص شدن مکان شیرهای فشارشکن و پمپ های معکوس و نیز مشخص شدن نوع پمپ های معکوس در گام نخست، یک مسئله بهینه سازی تک هدفه در گام دوم به منظور حداکثرسازی انرژی تولیدی به صورت رابطه (۸) تعریف می شود.

محل پمپ معکوس ۱	..	محل پمپ معکوس ۶	..	محل شیر فشارشکن ۱	...	محل شیر فشارشکن ۶	...	نوع پمپ معکوس ۱	..	نوع پمپ معکوس ۶	..	سرعت پمپ معکوس ۱	..	سرعت پمپ معکوس ۱۲	..	فشار شیر ۱	..	فشار شیر ۱۲	..	تعیین تعداد تجهیزات ۱	...	تعیین تعداد تجهیزات ۱۲
-----------------	----	-----------------	----	-------------------	-----	-------------------	-----	-----------------	----	-----------------	----	------------------	----	-------------------	----	------------	----	-------------	----	-----------------------	-----	------------------------



شکل ۵- رشته متغیرهای تصمیم مسئله بهینه سازی دو هدفه

هستند و $Penalty$: قیدهای مسئله برای این که مقدار فشارهای گره های شبکه در طول بهره برداری از محدوده فشار مجاز مطابق با نشریه ۳-۱۱۷ بیشتر و یا کمتر نشود.

در این مقاله ۱۲ مدل پمپ با توجه به دبی های شبکه، از شرکت پمپیران شامل پمپ های (۴۰-۱۲۵، ۵۰-۲۰۰، ۵۰-۱۶۰، ۵۰-۱۲۵، ۸۰-۲۰۰، ۶۵-۱۲۵، ۶۰-۲۰۰، ۶۵-۱۶۰، ۸۰-۲۰۰، ۱۰۰-۲۵۰ و ۱۰۰-۲۰۰) انتخاب شد و در حالت عملکرد معکوس مدل سازی و در نرم افزار شبیه سازی شد.

۴-۲- فرمول بندی مسأله بهینه سازی

به منظور مدیریت فشار در شبکه، ابتدا شبکه طراحی شده با استفاده از EPANET-toolkit در محیط برنامه نویسی متلب اجرا شد. سپس دستورات لازم با استفاده از نرم افزار EPANET در محیط متلب اعمال شد. در گام نخست برای الگوریتم جستجوی DE دو هدفه، محدوده متغیرهای تصمیم تعریف شد. در این گام متغیرهای تصمیم شامل مکان شیرها، فشار تنظیمی آنها، نوع و مکان پمپ ها است. تابع هدف برای الگوریتم جستجوی دو هدفه به صورت رابطه (۳) تعریف می شود.

$$\begin{cases} f_1 = \max \sum_{i=1}^2 E_i \\ f_2 = \min cost \end{cases} \quad (3)$$

که f_1 و f_2 : مقادیر تابع دو هدفه، E_i : میزان انرژی تولیدی در ساعات بیشترین و کمترین دبی هستند. $Cost$: برابر است با هزینه های خرید تجهیزات کنترل فشار، شامل پمپ های معکوس و شیرهای فشار شکن.

معمولاً هزینه های نصب و بهره برداری ضریبی ثابت از هزینه های خرید تجهیزات کنترل فشار در نظر گرفته می شوند و این ضریب ثابت، تاثیری در جواب بهینه ندارد و در این مقاله جزء

$$Min(F) = Max \sum_{t=1}^{24} E_t - Penalty \quad (8)$$

که E_t : مقدار انرژی تولیدی در زمان بهره برداری در شبکه و F : مقدار تابع تک هدفه برای حداکثر کردن انرژی تولیدی در شبکه

شیرهای فشارشکن (۶ متغیر در شرایط حداقل مصرف شبکه و ۶ متغیر برای حداکثر مصرف شبکه) و ۱۲ متغیر برای سرعت چرخش پمپ معکوس (۶ متغیر در شرایط حداقل مصرف شبکه و ۶ متغیر برای حداکثر مصرف شبکه) تعریف شد. همچنین برای تعیین ترکیب تعداد شیرهای فشارشکن و پمپ معکوس نیز ۱۲ متغیر باینری در نظر گرفته شد که مجموعاً تعداد پمپ و شیرهای نصبی را از صفر تا ۱۲ عدد تعیین می‌کنند. در مجموع تعداد متغیرهای تصمیم در این مسئله بهینه‌سازی ۵۴ عدد است. تعداد تکرار الگوریتم دوهفته برای این که به همگرایی برسد برابر ۲۰۰ در نظر گرفته شد و تعداد جمعیت الگوریتم با توجه به تعداد متغیرهای تصمیم مسئله ۲۰۰ در نظر گرفته شد. بعد از اجرای مدل بهینه‌سازی کنترل شد که الگوریتم با تعداد تکرارهای در نظر گرفته شده به همگرایی رسیده باشد. همچنین بررسی شد تا در چندین نسل انتهایی تکرارهای آخر تغییری در مقدار تابع هدف اتفاق نیفتاده باشد تا اطمینان حاصل شود که الگوریتم به همگرایی رسیده باشد. شایان ذکر است به دلیل وجود ترم‌های پنالتی در تابع هدف اگر جواب‌های بدست آمده، قیدهای حداقل فشار و حداکثر فشار را تأمین نکند این جواب‌ها در تکرارهای بعدی از جمعیت حذف می‌شوند. برای حل این الگوریتم جستجو از سیستم کامپیوتری با یک پردازنده ۴ هسته‌ای و ۸ رشته پردازشی با ۱۶ گیگابایت رم استفاده شده است. زمان پردازش ۶۲۴ ساعت طول کشید.

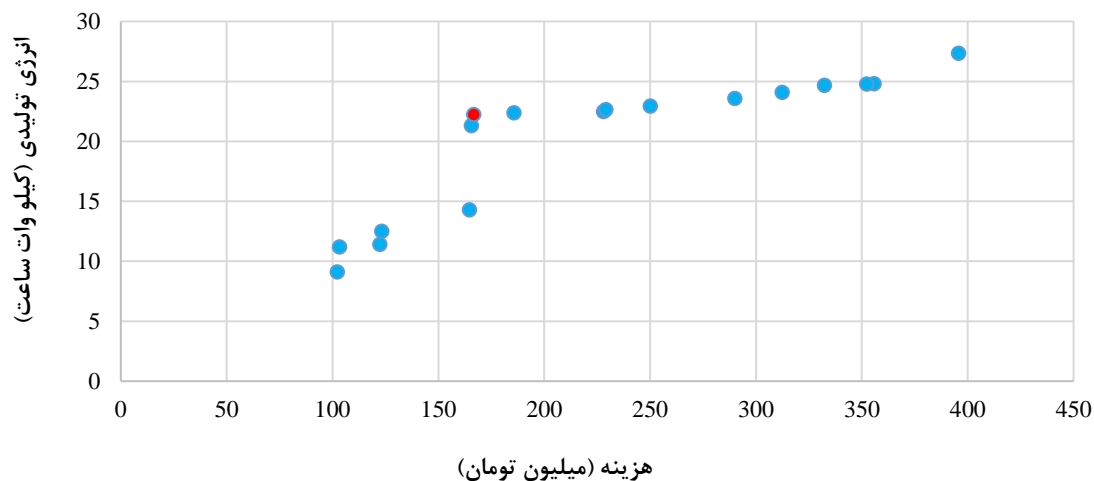
جبهه پارتوی به دست آمده از حل مسئله بهینه‌سازی در شکل ۶ نشان داده شده است. این جبهه پارتو نشانگر مصالحه بین مقدار انرژی تولیدی و هزینه خرید تجهیزات است. در این شکل موقعیت جواب بهینه منتخب نیز نشان داده شده است. علت انتخاب این جواب این است که پس از این نقطه یک شکست در روند جبهه پرتو وجود دارد. شکست در روند به این معنا است که با افزایش هزینه فقط مقدار جزئی به انرژی تولیدی اضافه می‌شود. همچنین روند قبل از این شکست نشان‌دهنده این است که با افزایش جزئی هزینه تجهیزات، انرژی شبکه به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. لذا نقطه منتخب دارای بالاترین مقدار انرژی تولیدی با افزایش جزئی هزینه است و بنابراین این جواب انتخاب شده است. در طی مسئله بهینه‌سازی برای یافتن تعداد و مکان تجهیزات در شبکه، الگوریتم جستجو جواب‌های مختلف در یک شبکه را شبیه‌سازی و به صورت تصادفی تجهیزات کنترل فشار را در بخش‌های مختلف شبکه جانمایی می‌کند. پس از حل هیدرولیکی شبکه، جواب‌ها براساس تابع هدف (معیارهای فشار و انرژی) ارزیابی می‌شوند.

در گام نخست برای مشخص شدن تعداد پمپ‌ها و شیرهای فشار شکن و همچنین مکان بهینه آن‌ها و مشخص کردن نوع مناسب پمپ معکوس، یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه DE که در بخش قبل توضیح داده شد، حل شد؛ با این هدف که با حل این مسئله، چیدمان تجهیزات کنترل فشار منجر به تولید بیشترین میزان انرژی با کمترین هزینه شوند. در این مسئله بهینه‌سازی برای کاهش بار محاسباتی، تحلیل هیدرولیکی شبکه در دو زمان حداقل میزان تقاضا و حداکثر میزان تقاضای آب انجام می‌شود، علت انتخاب این دو زمان، این است که در زمان حداقل تقاضای گره‌ای شبکه، فشار شبکه به حداکثر مقدار خود می‌رسد، لذا تجهیزات باید به گونه‌ای عمل کنند که فشار شبکه در این زمان را به زیر فشار حداکثر ۶۰ متر برسانند. همچنین در زمان حداکثر تقاضای گره‌ای، فشار شبکه به حداقل میزان خود می‌رسد. بنابراین تجهیزات باید به گونه‌ای عمل کنند که باعث کاهش فشار، از فشار حداقل شبکه یعنی ۱۴ متر نشوند.

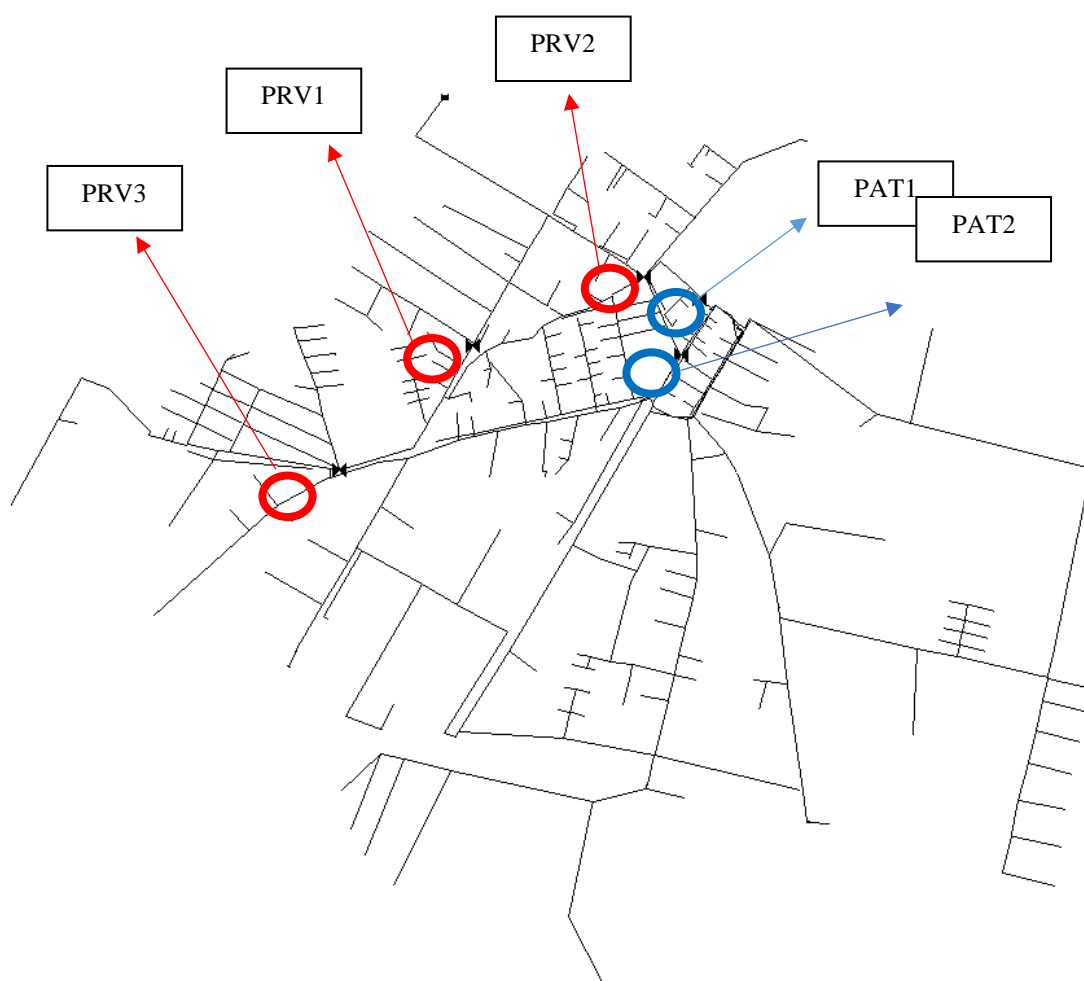
حداکثر تعداد تجهیزات کنترل برای هر کدام از شیرهای فشارشکن و پمپ‌های معکوس ۶ عدد در رشته متغیر تصمیم در نظر گرفته شد. این تعداد، با سعی و خطا براساس شبیه‌سازی هیدرولیکی و تحلیل حساسیت نتایج حاصله و در نظرگیری محدودیت‌های هزینه انتخاب شده است. با استفاده از حل‌گر هیدرولیکی EPANET و در طی چند اجرای آزمایشی مشخص شد که اگر تعداد هریک از این تجهیزات در شبکه بیشتر از ۶ عدد باشد، کاهش حداکثر فشار شبکه خیلی محسوس نیست، لذا این افزایش هزینه برای کاهش بسیار کم فشار توجیه اقتصادی ندارد. برای حل این مسئله بهینه‌سازی به الگوریتم اجازه داده شده است تا با یک رشته متغیر باینری و عدد صحیح تعداد و مکان بهینه پمپ‌ها و شیرها را انتخاب کند. متغیرهای باینری می‌تواند تعداد تجهیزات کنترل فشار را از صفر تا ۶ عدد برای هر یک از تجهیزات (پمپ معکوس و شیرفشارشکن) تغییر دهد تا بهینه‌ترین تعداد تجهیزات مشخص شود. همچنین، متناسب با متغیرهای باینری که مقدار ۱ را اخذ کرده‌اند، متغیرهای عدد صحیح محل بهینه تجهیزات را مشخص می‌کنند، به نحوی که بهترین حالت چیدمان تجهیزات کنترل فشار به دست آید. بنابراین تعداد متغیرهای تصمیم شامل ۶ متغیر تصمیم برای مکان پمپ‌های معکوس (مکان هریک از پمپ‌ها)، ۶ متغیر تصمیم برای مکان شیرهای فشارشکن (برای هر شیرفشارشکن)، ۶ متغیر تصمیم برای انتخاب نوع پمپ‌های معکوس، ۱۲ متغیر تصمیم برای فشار تنظیمی

در شکل ۷ نشان داده شده است. این شبکه دارای ۲ عدد پمپ معکوس که هر دو از نوع پمپ ۱۰۰-۲۰۰ کارخانه پمپیران است و ۳ عدد شیر فشارشکن که شیر شماره ۱ به قطر ۸ اینچ شیر، شماره ۲ به قطر ۱۲ اینچ و شیر شماره ۳ به قطر ۶ اینچ است.

جواب‌های برتر در نسل‌های بعدی الگوریتم، شانس بیشتری برای تولید جواب‌های جدید و بهتر دارند. در نهایت بهترین جواب‌ها براساس تابع هدف به صورت یک جبهه پارتو نشان داده شده است. با توجه به جواب منتخب جبهه پارتو، شبکه بهینه



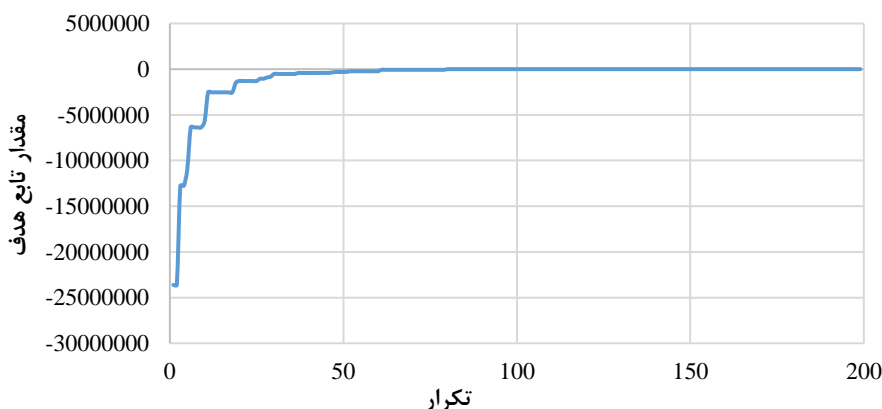
شکل ۶- جبهه پرتوی به دست آمده در ۲۰۰ تکرار برای شبکه مورد بررسی و موقعیت جواب منتخب در جبهه پارتو



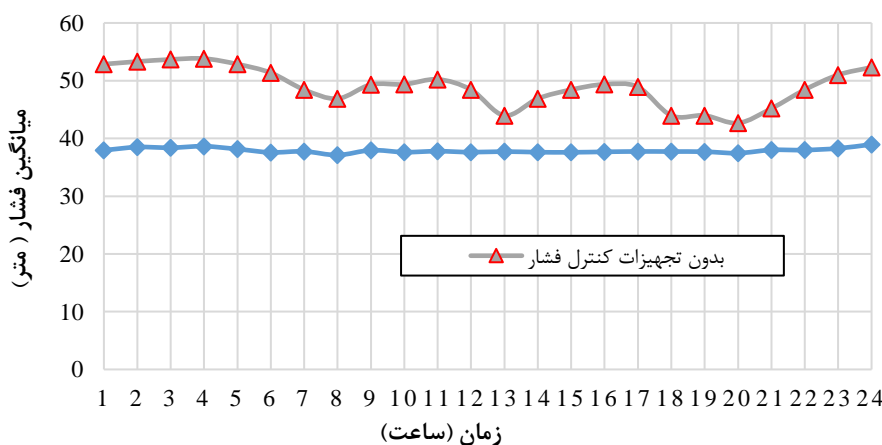
شکل ۷- مکان سه شیر فشارشکن و دو پمپ معکوس پیشنهاد شده توسط الگوریتم DE در محیط EPANET

روند همگرایی بهینه‌سازی تابع تک هدفه نشان داده شده است. محور عمودی شکل ۸ براساس رابطه (۸) محاسبه می‌شود. در زمان‌هایی که فشارهای گره‌ای در محدوده استاندارد قرار نگیرند یک ترم منفی پنالتی به تابع هدف وارد می‌شود که سبب می‌شود مقدار تابع هدف به صورت منفی به نمایش درآید. با جلو رفتن تکرارهای الگوریتم و پس از خارج شدن تابع هدف از ترم پنالتی، مقدار تابع هدف مثبت خواهد بود که نشان‌دهنده انرژی تولیدی شبکه است. این مقدار در شکل ۸ به ۱۶۰ کیلووات ساعت در روز می‌رسد که به علت بزرگ بودن مقدار منفی تابع پنالتی، این مقدار مثبت به خوبی نشان داده نشده است. یادآور می‌شود هدف نهایی در این گام، پیشینه‌سازی میزان تولید انرژی طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز است، ضمن حفظ قیدهای هیدرولیکی فشارهای گره‌ای که باید در محدوده مطلوب خود باشند. در شکل ۹ ماکزیمم فشار گره‌ای در دو حالت بدون تجهیزات و با تجهیزات کنترل فشار هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت بهینه، نوسانات فشار شبکه بسیار کمتر از حالت بدون تجهیزات کنترل فشار است که این نشان‌دهنده عملکرد مطلوب تجهیزات شبکه است.

در گام دوم برای این‌که بالاترین میزان انرژی از شبکه در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز از شبکه به دست آید و در عین حال فشارهای گره‌ای در محدوده مطلوب خود قرار بگیرند، با ثابت نگه داشتن مکان پمپ‌های معکوس و شیرهای فشار شکن و همچنین ثابت نگه داشتن نوع پمپ‌های معکوس، بهینه‌سازی فشار تنظیمی شیر فشار شکن و سرعت بهینه دور موتور پمپ معکوس انجام شد. در این گام، یک الگوریتم تک هدفه DE گسترش داده شد تا با توجه به وجود ۲ عدد پمپ معکوس، ۴۸ متغیر تصمیم (۲×۲۴) برای بهینه کردن دور موتور ۲ پمپ معکوس در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز اعمال شود. با توجه به وجود ۳ شیر فشار شکن، ۷۲ متغیر تصمیم (۳×۲۴) برای بهینه کردن فشار تنظیمی ۳ شیر فشار شکن در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز در نظر گرفته شد. تعداد تکرار الگوریتم برابر ۲۰۰ تکرار در نظر گرفته شد تا اطمینان حاصل شود الگوریتم به همگرایی رسیده باشد و نیز تعداد جمعیت الگوریتم با توجه به تعداد متغیرهای تصمیم ۲۰۰ در نظر گرفته شد. برای حل این مسئله جستجو، از سیستم کامپیوتری با یک پردازنده ۴ هسته‌ای و ۸ رشته پردازشی با ۱۶ گیگابایت رم استفاده شد. زمان پردازش ۲۱۶ ساعت طول کشید. در شکل ۸



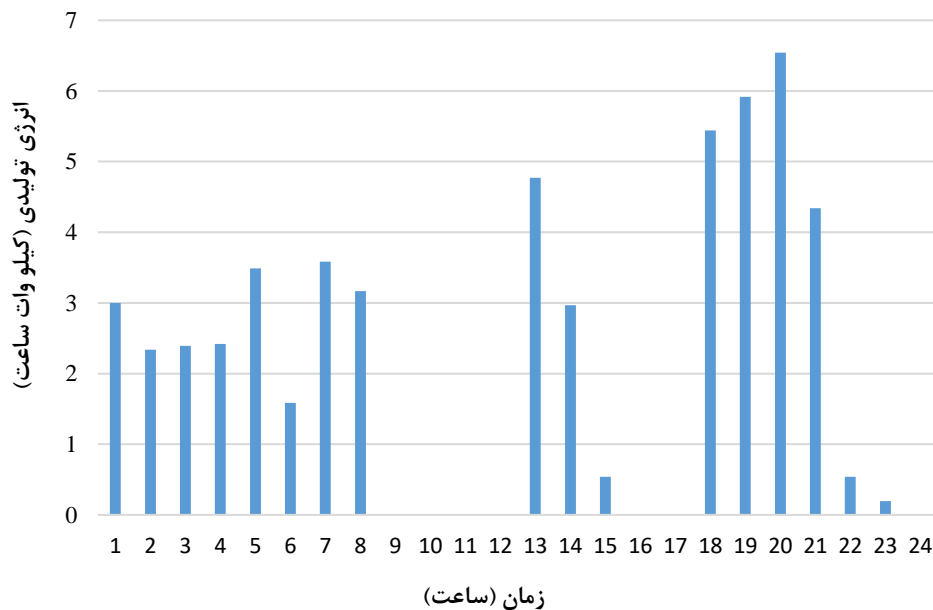
شکل ۸- مقدار تابع هدف در گام دوم



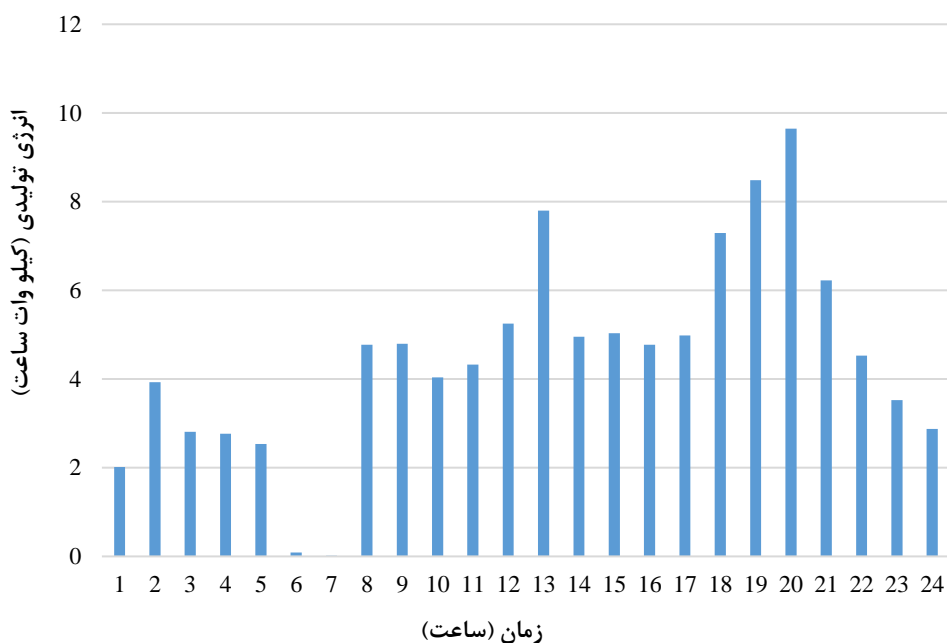
شکل ۹- میانگین فشار حداکثر شبکه با ترکیب ۳ شیر فشار شکن و ۲ پمپ معکوس

نشان دهنده انرژی تولیدی است و محور افقی نشان دهنده زمان است. به عنوان مثال در شکل ۱۰ برای پمپ معکوس اول در ساعت ۱ با مقدار سه کیلو وات ساعت برق تولید شده است. همان طور که در شکل های ۱۰ و ۱۱ مشهود است ماکزیمم انرژی تولیدی در ساعت ۲۰ تولید شده است که در این ساعت بیشترین مقدار دبی در شبکه جریان دارد. هم چنین در بعضی از ساعات شبانه روز هیچ انرژی ای تولید نشده است و دلیل آن این است که در این ساعات، دبی جریان در شبکه کم است.

نتایج حاصله در این گام نشان داد که ۱۶۰ کیلو وات ساعت در روز می توان از شبکه انرژی استحصال نمود. این میزان انرژی از رابطه (۲) به دست آمده است. این مقدار تولید انرژی در این رابطه وابسته به دبی گذرا از پمپ معکوس است و با توجه به این که دبی گذرا در طول ۲۴ ساعت متغیر است انرژی تولیدی در طول ۲۴ ساعت متغیر است، که مجموع دو پمپ در طول ۲۴ ساعت شبانه روز این مقدار انرژی را تولید می کند. میزان انرژی تولیدی در پمپ اول و دوم به ترتیب در شکل های ۱۰ و ۱۱ برای ساعت شبانه روز نشان داده شده است که محور عمودی



شکل ۱۰- نمودار میله ای انرژی تولیدی در پمپ معکوس اول



شکل ۱۱- نمودار میله ای انرژی تولیدی در پمپ معکوس دوم

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تاثیر جانمایی و نحوه بهره‌برداری از تجهیزات کنترلی هوشمند شبکه آب شامل شیرهای فشار شکن و پمپ‌های معکوس به‌طور هم‌زمان بررسی شد. نتایج نشان داد با به‌کارگیری بهینه ۳ عدد شیر فشارشکن، مجهز به دستگاه‌های کنترل تنظیم هوشمند در کنار ۲ پمپ معکوس با سرعت متغیر (با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱) در مجموع، ۱۶۰ کیلو وات ساعت انرژی در شبانه‌روز فراهم می‌شود که این انرژی تولیدی، قابلیت فروش به شبکه برق شهری را دارا است. درآمد حاصل از فروش انرژی تولیدی منجر به بازگشت سرمایه هزینه‌های تجهیزات مدیریت فشار در این شبکه خواهد شد. براساس نرخ تورم کشور و قیمت خرید برق توسط دولتریال بازگشت سرمایه در مدت ۴ سال طول خواهد کشید. این بازگشت سرمایه، برتری این مدیریت فشار نسبت به استفاده تنها از شیرهای فشار شکن است که هیچ‌گونه بازگشت سرمایه‌ای مستقیم را به‌همراه ندارند.

۵- پی‌نوشت‌ها

- 1- Differential Evolution (DE)
- 2- Pressure Reducing Valve (PRV)
- 3- Pump As Turbine (PAT)

۶- مراجع

- نوربخش، ا.، و درخشان، ش.، (۱۳۸۴)، "تحلیل رفتار پمپ و ارائه بهترین نقطه کارکرد آن در حالت چرخش به‌عنوان توربین"، نشریه دانشکده فنی، ۳۹(۶)، ۷۵۶-۷۷۱، <https://www.sid.ir/paper/14060/fa>
- وزارت نیرو دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا، (۱۳۹۲)، "ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی"، نشریه شماره ۳-۱۱۷ (بازنگری اول)، https://waterstandard.wrm.ir/cs/WRMResearch/278/2_20
- Carravetta, A., Giudice, G., Fecarotta, O., Ramos, H., (2012), "Energy production in water distribution networks: A PAT design strategy", *Water Resources Management*, 26, 3947-3959, <https://doi.org/10.3390/en12152908>.
- Carravetta, A., Fecarotta, O., Del Giudice, G., Ramos, H., (2014), "Energy recovery in water systems by PATs: A comparisons among the different installation schemes", *Procedia Engineering*, 70, 275-284, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.031>.
- De Marchis, M., Fontanazza, C., Freni, G., (2014), "Energy recovery in water distribution networks, Implementation of pumps as turbine in a dynamic numerical model", *Procedia Engineering*, 70, 439-448, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.049>.
- De Marchis, M., Freni, G., (2015), "Pump as turbine implementation in a dynamic numerical model: Cost analysis for energy recovery in water distribution network", *Journal of Hydroinformatics*, 17 (3), 347-360, <https://dx.doi.org/10.2166/hydro.2015.018>.
- Derakhshan, S., Nourbakhsh, A., (2008), "Experimental study of characteristic curves of centrifugal pumps working as turbines in different specific speeds", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 800-807, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2007.10.004>.
- Ebrahimi, S., Riasi, A., Kandi, A., (2021), "Selection optimization of variable speed pump as turbine (PAT) for energy recovery and pressure management", *Energy Conversion and Management*, 213, 113586, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001430](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001430).
- Jafari, R., Khanjani, M., Esmailian, H., (2015), "Pressure management and electric power production using pumps as turbines", *American Water Works Association*, 107, 7, 351-363, <http://dx.doi.org/10.5942/jawwa.2015.107.0083>.
- Kandi, A., Moghimi, M., Tahani, M., Derakhshan, S., (2021), "Efficiency increase in water transmission systems using optimized selection of parallel pumps running as turbines", *Water Resources Planning and Management*, 147(10), 04021065, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001430](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001430).
- Karadirek, I., Muhammetoglu, A., Ozen, O., Muhammetoglu, H., (2017), "Full-scale PAT application for energy production and pressure
- تابش، م.، (۱۳۸۵)، "مدیریت هدررفت در سیستم‌های توزیع آب ایران به روایت استاندارد ۳۰۸-الف"، اولین همایش سازگاری با کم‌آبی، تهران، <https://civilica.com/doc/39592>
- درخشان، ش.، امین‌نیا، ن.، و هاشمی، م.، (۱۳۹۴)، "تحلیل فنی اقتصادی کاربرد پمپ به‌عنوان توربین برای استحصال انرژی در شبکه‌های توزیع آب"، سومین همایش ملی هیدرودینامیک کاربردی، دانشگاه علم و صنعت، <https://civilica.com/doc/596809>
- رئیس‌میرزاقلی، م.، و زمانیان، ع.، (۱۳۹۳)، "نیروگاه برق آبی مقیاس کوچک بر روی خطوط انتقال آب"، ششمین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد، تهران، <https://civilica.com/doc/596809>
- شاه‌حسینی، پ.، و توکلی، ه.، (۱۳۹۲)، "تحلیل شاخص‌های کیفیت زندگی شهری مورد: محله وردآورد منطقه ۲۱ تهران"، فصل‌نامه آمایش تهران، ۲۴، ۱۲۷-۱۴۴، https://ebtp.malayer.iau.ir/article_526443.html

- reduction in a water distribution network", *Water Resources Planning and Management*, 43(8), 1-12, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000795](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000795).
- Lea García, I., Novara, D., Mc Nabola, A., (2019), "A model for selecting the most cost-effective pressure control device for more sustainable water supply networks", *Water*, 11(6), 1297-1316, <https://doi.org/10.3390/w11061297>.
- Lima, G., Junior, E., Brentan, B., (2017), "Selection of pumps as turbines substituting pressure reducing valves", *Procedia Engineering*, 186, 676-683, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.249>.
- Lima, G., Luvizotto, E., Brentan, B., Ramos, H., (2017), "Leakage control and energy recovery using variable speed pumps as turbines", *Water Resources Planning and Management*, 144(1), 1-14, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000852](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000852).
- Motwani, K., Jain, S., Patel, R., (2013), "Cost analysis of pump as turbine for pico hydropower plants, A case Study", *Procedia Engineering*, 51, 721-726, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.103>.
- Stefanizzi, M., Filannino, D., Capurso, T., Camporeale, S., Torresi, M., (2023), "Optimal hydraulic energy harvesting strategy for PAT installation in water distribution networks", *Applied Energy*, 344, 121246, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121246>.
- Tahani, M., Kandi, A., Moghimi, M., Derakhshan, S., (2020), "Rotational speed variation assessment of centrifugal pump-as-turbine as an energy utilization device under water distribution network condition", *Energy*, 213, 118502, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118502>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.