Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
DOI: 10.22112/JWWSE.2023.389161.1355

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب

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

پرهام وظیفه دوست صالح[۱]، جعفریزدی[۲*]، علی مریدی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی.
۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی. j_yazdi@sbu.ac.ir
۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و فاضلاب، دانشگاه شهید بهشتی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۱

چکیده

یکی از معضلات شبکه‌های توزیع آب، هدر رفت آب در اثر نشت به دلیل فشار بالا در شبکه است. از این روی لازم است فشار شبکه را در یک بازه مناسب نگه داشت. از موثرترین تجهیزات بدین منظور شیرهای فشارشکن و پمپ‌های معکوس هستند. در این مقاله با استفاده از مرتبط کردن الگوریتم DE[1] 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 بصورت هم‌زمان مکان بهینه پمپ معکوس و نوع پمپ معکوس در شبکه مشخص شود. در گام دوم با استفاده از الگوریتم تک‌هدفه DE، با ثابت نگه داشتن مکان شیرهای فشارشکن و همچنین ثابت نگه‌داشتن مکان و نوع پمپ‌های معکوس (حاصله از گام نخست)، به یافتن سرعت دورانی بهینه پمپ و فشار تنظیمی

بهینه شیر فشارشکن در یک بازه ۲۴ ساعته، به منظور بهره‌برداری و افزایش انرژی تولیدی از شبکه پرداخته شد. نتایج به دست آمده نشان داد که می‌توان از شبکه ۱۶۰ کیلو وات ساعت در ۲۴ ساعت شبانه‌روز، انرژی استحصال نمود.

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

پذیرفته شده / ویرایش نشده

Pressure management in water distribution networks with optimal placement of pressure relief valve and pump as turbine

Prham vazifedoust saleh[1], Jafar yazdi[2*],Ali moridi [3]

1- Master student, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil Engineering, Water and Environment.

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

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

Received: 17/04/2023
Revised: 08/10/2023
Accepted: 23/10/2023

Abstract

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 PAT. 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, have been determined at the same time. In the second step, by using the DE single objective algorithm, by 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, to increase the production energy, Optimized in 24 hours. 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.

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

۱-مقدمه

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 می‌گردد (Lima et al., 2017). آب یک کالای استراتژیک است که باید از هدر رفت آن در طول شبکه جلوگیری نمود. در کشور ایران حدود ۳۰ درصد از آب تصفیه شده در مسیر رسیدن به مصرف کننده از دست می‌رود (تابش و همکاران، ۱۳۸۵). راه حل متداول برای این معضل، استفاده از شیرهای فشار شکن PRV[2] 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 گردد. اگرچه این شیرها در کاهش فشار شبکه و جلوگیری از هدر رفت آب نقش مفید و موثری دارند، اما خود آنها هم دارای معایبی هستند. بعنوان مثال استفاده از این شیرهای کاهش فشار نیازمند هزینه اولیه برای تهیه و نصب هستند و اینکه این شیرها هیچگونه بازگشت سرمایه مستقیم را به همراه ندارند (García Lima et al., 2017). در شرایط دنیای کنونی با توجه به آلودگی‌های زیست محیطی، بخصوص آلودگی‌های ناشی از تولید انرژی به علت 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[3] بهمراه شیرهای فشار شکن یک پاسخ مناسب به این نیاز امروزی است. PAT همان پمپ گریز از مرکزی است که بصورت 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 مکانیکی موجود در شبکه آب را توسط چرخش به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. بنابراین، اگر یک پمپ سانتریفوژ در حالت معکوس عمل کند، می‌تواند به جای توربین فرانسیس مورد استفاده قرار گیرد.

Derakhshan and Nourbakhsh (2008) به مطالعه تجربی منحنی‌های مشخصه پمپ‌های سانتریفیوژی که به عنوان توربین در سرعت های مختلف کار می‌کنند پرداختند، و نیز دو معادله برای تخمین منحنی‌های مشخصه پمپ‌هایی که بعنوان توربین عمل می‌کنند بر اساس بهترین نقطه بازده ارائه کردند.

Motmani et al. (2013) به تحلیل هزینه پمپ معکوس برای مطالعه نیروگاه‌های برق آبی پیکو پرداختند. در این تحقیق یک پمپ معکوس با بازده ۶۰ ٪ و همچنین یک توربین فرانسیس که بازده آن ۸۰٪ بود، مورد بررسی قرارگرفت. نتایج نشان داد در نیروگاه آبی پیکو، هزینه توربین فرانسیس بین ۶ تا ۸ برابر هزینه پمپ معکوس است، اما هزینه برق تولید شده به ازای هر واحد توربین فرانسیس و پمپ معکوس به ترتیب 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) به تحلیل هزینه برای بازیابی انرژی در شبکه توزیع آب با جایگزین کردن پمپ معکوس بجای PRV پرداختند. نتایج نشان داد چنانچه پمپ معکوس در محل مناسبی نصب گردد، دوره بازگشت سرمایه بین ۱ تا ۳ سال بوده حال اگر در محل نامناسب نصب گردد، دوره بازگشت سرمایه به ۱۴ تا ۱۵ سال افزایش خواهد یافت.

Lima et al. (2017) به جایگزینی پمپ معکوس بجای شیر فشار شکن پرداختند. در این پژوهش هدف بیشینه‌سازی انرژی تولیدی بود و قیدهای هیدرولیکی مسئله، محدوده 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) به بهینه‌سازی انتخاب پمپ سرعت متغیر به عنوان توربین PAT برای بازیابی انرژی و مدیریت فشار در شبکه پرداختند. عملکرد پمپ با سرعت متغیر در حالت معکوس نشان داد مقدار انرژی تولید شده برابر با ۱۸۲/۱۵ کیلووات ساعت در روز است.

Kandi et al. (2021) به بررسی عملکرد موازی پمپ‌های معکوس در سه سناریو پرداختند. سناریو اول دو پمپ معکوس بصورت موازی درکنار یکدیگر استفاده شد که برای هرکدام از پمپ‌های معکوس یک شیر تنظیم فشار در ورودی پمپ معکوس لحاظ شد. در سناریو دوم از دو پمپ معکوس موازی استفاده شد و برای هریک از پمپ‌های معکوس از اینورتور برای کنترل سرعت پمپ استفاده شد. در سناریو 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 و نتایج نشان داد سناریو سوم از همه گران‌تر است ولی بالاترین مقدار انرژی را تولید می‌کند.

Stefanizzi et al. (2023) به جایگزینی پمپ معکوس بجای شیر فشار شکن در یک شبکه واقعی در جنوب ایتالیا پرداختند. 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 به لحاظ تولید انرژی جذاب بنظر می‌رسد، لیکن در دبی‌های کم به دلیل 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 بکارگیری 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 فشار شکن در شبکه با درنظرگیری نوسانات ساعتی مصرف آب در شبکه برای مدیریت فشار و تولید انرژی بوده است. بطور هم‌زمان، تعداد شیرهای فشار شکن و پمپ‌های معکوس و فشار تنظیمی شیرهای فشار شکن و سرعت چرخش پمپ‌های معکوس و نوع پمپ‌های معکوس با در نظرگیری نوسانات مصرف آب در نظر گرفته شده و مقادیر این متغیرها با هدف متعادل سازی فشار شبکه و افزایش انرژی بهینه‌سازی شده است. در مطالعات قبلی، به بخشی از این موارد پرداخته شده است. مثلا تاثیر توامان شیر فشارشکن و پمپ معکوس بررسی نشده یا صرفاً مسئله بهره‌برداری مورد توجه بوده، ولی مسئله جانمایی خیر 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 روشی برای همزمان مدیریت فشار، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و افزایش بهره‌وری انرژی در شبکه ارائه شود.

۲-مواد و روش

- **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 بهینه سازی است که اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط Rainer Storn و Kenneth Priceمعرفی شد. این محققان نشان دادند که این الگوریتم توانایی خوبی در بهینه‌سازی توابع غیرخطی مشتق ناپذیر دارد که به عنوان روشی قدرتمند و سریع برای مسائل بهینه‌سازی در فضاهای پیوسته معرفی شده است.

الگوریتم DE جهت غلبه بر عیب اصلی الگوریتم ژنتیک، یعنی نبود جستجوی محلی دراین 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 به عنوان یکی از والدین وابسته به مقدار شایستگی آن می باشد، اما در الگوریتم DE همه جواب‌ها دارای شانس مساوی جهت انتخاب شدن می‌باشند. یعنی شانس انتخاب شدن، وابسته به مقدار شایستگی آن‌ها نمی‌باشد، پس از این که یک جواب جدید

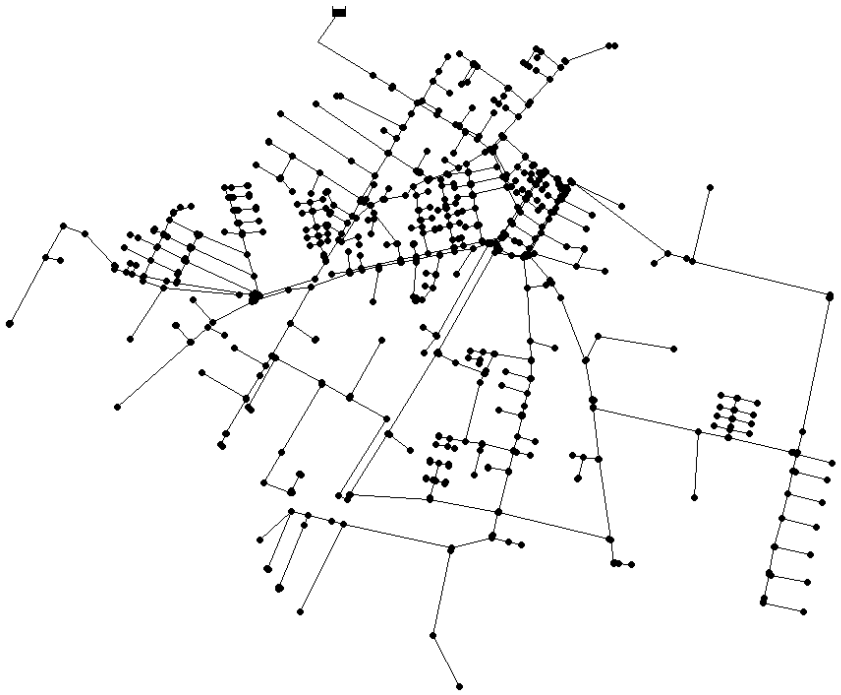
با استفاده از یک عمل‌گر جهش mutation و عمل‌گر crossover تولید شد، جواب جدید با مقدار قبلی مقایسه می‌شود و در صورت بهتر بودن جایگزین می‌گردد.

در الگوریتم تکاملی تفاضلی بر خلاف دیگر الگوریتم‌ها که اول عمل‌گر crossover و سپس عمل‌گر mutation انجام می‌شود به گونه‌ای که ابتدا عمل‌گر جهش اعمال شده و سپس عمل‌گر crossover اعمال می‌شود تا بدینوسیله نسل جدید ایجاد گردد. برای اعمال عمل‌گر mutation از توزیع خاصی استفاده نمی‌شود بلکه طول گام جهش برابر با مقدار از فاصله میان اعضای فعلی تعیین می‌شود.

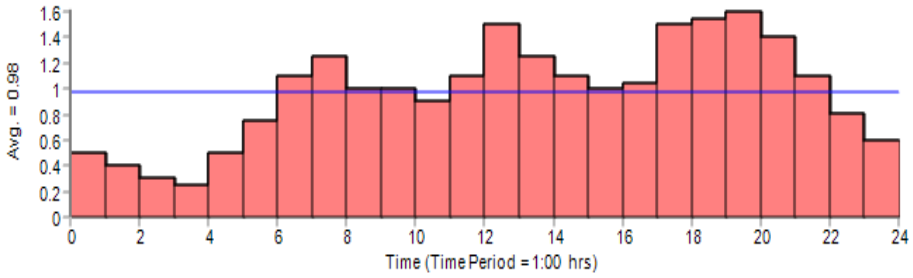
- **منطقه مورد مطالعه**

شبکه مورد مطالعه مربوط به منطقه وردآورد، ناحیه ۳ شهرداری منطقه ۲۱ تهران است (Mahab Ghods Consulting Eng. Co, 2021). بمنظور طراحی شبکه، لایه اطلاعات مسیر لوله‌ها از شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس اخذ شد. نیازهای گرهی با توجه به جمعیت منطقه تا افق ۱۴۲۰ (Shahhoseini and Tavakoli, 2013) و به روش تیسن در نرم‌افزار WATERGMS برآورد شده است. پس از تعیین مسیر لوله‌ها و تخمین نیازهای گرهی، بر اساس دبی عبوری در زمان حداکثر الگوی مصرف شبکه به تعیین قطر بهینه لوله‌ها (از طریق بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی) پرداخته 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 پایین ترین 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 بصورت 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 بر اساس الگوی حداکثر مصرف بوده است رعایت گردیده است ولی در زمان‌هایی که الگوی مصرف تغییر می‌کند فشارهای گره‌ای شبکه از محدوده استاندارد خارج می‌شوند. به عنوان مثال فشارهای گره‌ای حداکثر در (شکل ۳) نشان داده شده است (شکل سه بر اساس تحلیل شبکه مورد مطالعه در نرم افزار EPANET در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز بدست 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 به‌وقوع می‌پیوندد؛ هدف مقاله، این است که به کمک الگوریتم جستجو DE، به تاثیر استفاده هم‌زمان شیرهای فشار شکن و پمپ‌های معکوس بر روی کاهش فشار شبکه و تولید انرژی پرداخته شود. همچنین مکان، تعداد و نوع مناسب پمپ‌های معکوس و شیرهای فشار شکن تعیین می‌گردد تا حداکثر فشار در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز به زیر فشار حداکثر ۶۰ متر بر اساس استاندارد نشریه شماره ۱۱۷ برسد. همچنین فشار حداقل

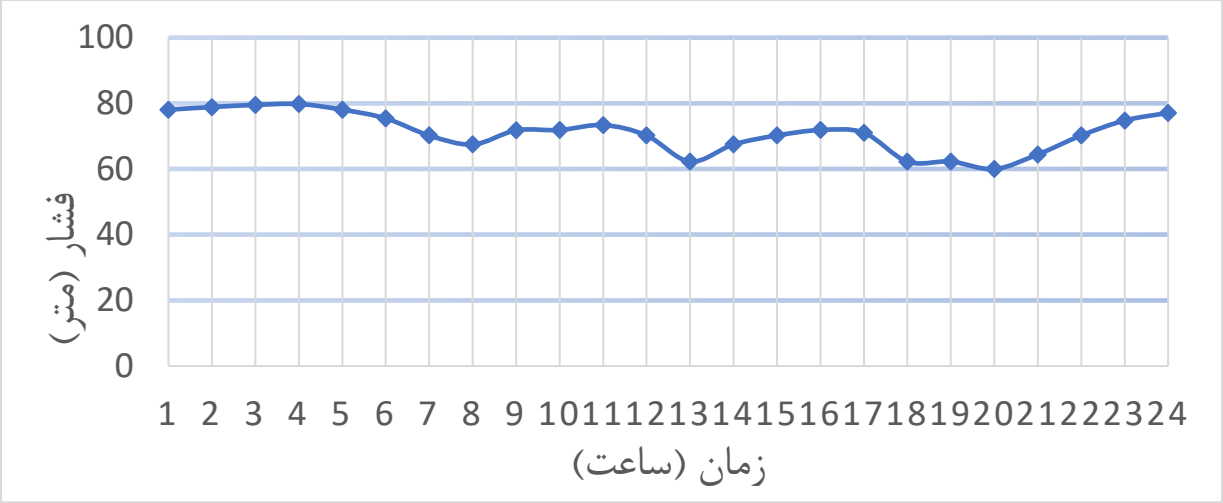
شبکه، از حداقل فشار مجاز ۱۴ متر کمتر نشود و در عین حال بالاترین میزان تولید انرژی از شبکه حاصل گردد شایان ذکر است که فشار استاندارد حداقل و حداکثر در این مقاله بر اساس نشریه ۱۱۷ انتخاب گردیده است ولی در شهر تهران حداقل و حداکثر فشار به ترتیب ۲۶ و ۵۰ متر است که برای یک کار عملی می‌بایست این مقدار را در نظر گرفت، با این وجود متدولوژی ارائه شده در این مقاله یک راهکار جامع برای بکارگیری پمپ‌های معکوس و شیرهای فشار شکن را ارائه داده است که با هر مقدار استاندارد حداقل و حداکثر شبکه قابل استفاده خواهد بود. روند انجام کار در (شکل ۴) نشان داده شده است.



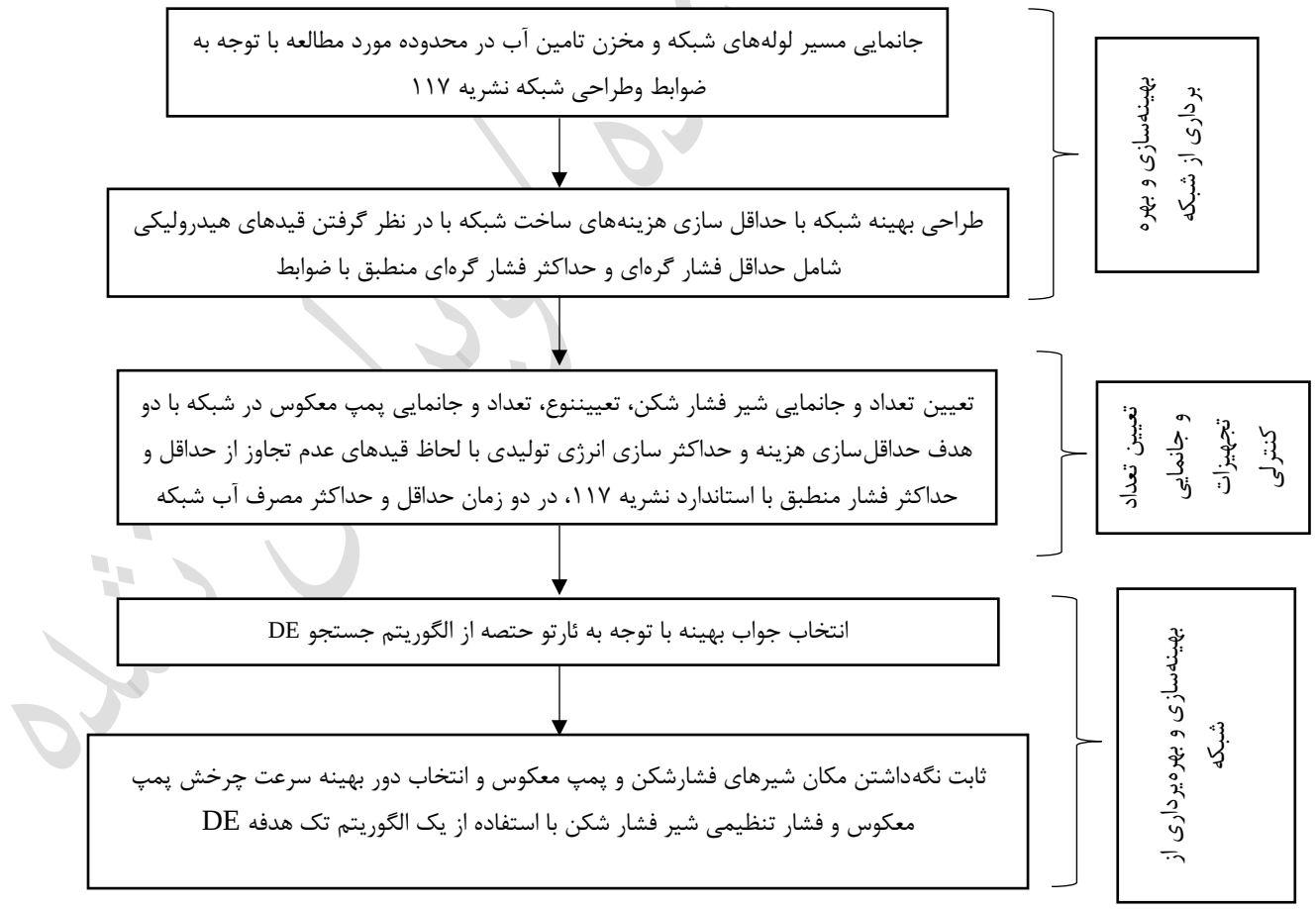
شکل ۱- نمای کلی از شبکه توزیع آب طراحی شده در محیط EPANET



شکل ۲– الگوی مصرف شبکه در طول ۲۴ ساعت (Ministry of Energy, 2014)



شکل ۳– حداکثر فشار شبکه بدون تجهیزات کنترل فشار



شکل ۴– روند انجام کار پژوهش حاضر

- **مدلسازی پمپ معکوس**

در خصوص پمپ‌های گریز از مرکز روابط تجربی زیر، قبلاً توسط محققان ارائه گردیده است که می‌توان انرژی قابل استحصال توسط پمپ معکوس را بر اساس دبی عبوری از پمپ معکوس را محاسبه نمود (Derakhshan and Nourbakhsh 2008):

$$\frac{H_t}{H_{tb}} = 1.0283\left(\frac{Q_t}{Q_{tb}}\right)^2 - 0.5468\left(\frac{Q_t}{Q_{tb}}\right) + 0.5314 \quad (۱)$$

$$\frac{P_t}{P_{tb}} = -0.3092\left(\frac{Q_t}{Q_{tb}}\right)^3 + 2.1472\left(\frac{Q_t}{Q_{tb}}\right)^2 - 0.8865\left(\frac{Q_t}{Q_{tb}}\right) + 0.0452 \quad (۲)$$

که در معادلات بالا Q_t دبی عبوری از PAT، H_t افت هد در PAT، P_t توان تولید شده درPAT، 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 است.

در این مقاله ۱۲ مدل پمپ با توجه به دبی‌های شبکه، از شرکت پمپیران شامل پمپ‌های (۱۲۵-۴۰، ۲۰۰-۵۰، ۱۶۰-۵۰، ۱۲۵-۵۰، ۱۲۵-۵۰، ۲۰۰-۸۰، ۱۲۵-۶۰، ۱۶۰-۶۵، ۲۰-۶۵، ۲۵۰-۶۵، ۲۵۰-۸۰، ۲۵۰-۱۰۰ و ۲۰۰-۱۰۰) انتخاب شد و در حالت عملکرد معکوس مدلسازی و در نرم‌افزار شبیه‌سازی شد.

- **فرمول بندی مسأله بهینه سازی**

بمنظور مدیریت فشار در شبکه، ابتدا شبکه طراحی شده با استفاده از EPANET-toolkit در محیط برنامه‌نویسی متلب اجرا شد، سپس دستورات لازم با استفاده از نرم‌افزار EPANET در محیط متلب اعمال شد. در گام نخست برای الگوریتم جستجوی DE دو هدفه محدوده متغیرهای تصمیم تعریف گردید. که در این گام متغیرهای تصمیم شامل مکان شیرها، فشار تنظیمی آن‌ها، نوع و مکان پمپ‌ها است. تابع هدف برای الگوریتم جستجوی دو هدفه بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} f_1 = max\sum_{i=1}^{2} E_i \\ f_2 = \quad min\, cost \end{cases} \quad (۳)$$

پذیرفته شده / ویرایش نشده

f_1 و f_2 مقادیر تابع دو هدفه، E_i میزان انرژی تولیدی در ساعات بیشترین و کمترین دبی است. *Cost* برابر است با هزینه‌های خرید تجهیزات کنترل فشار، شامل پمپ‌های معکوس و شیرهای فشار شکن. درمورد هزینه‌های نصب و بهره‌برداری، معمولاً این هزینه‌ها ضریبی ثابت از هزینه‌های خرید تجهیزات کنترل فشار در نظر گرفته می‌شوند و این ضریب ثابت، تاثیری درجواب بهینه ندارد و در این مقاله جزء *Cost* در نظر نگرفته شده است.

قید مسئله برابر است با :

$$Pmin < Pi < Pmax \qquad (۴)$$

P_{min} و P_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر فشار مجاز گره‌های شبکه است که بر اساس استاندارد نشریه ۱۱۷ انتخاب شده است، P_{min} برای این شبکه برابر با ۱۴ متر و P_{max} برابر ۶۰ متر است. P_i برابر است با در گره i ام. قیدهای فوق از طریق ترم پنالتی *Penalty* در مسئله ارضا می‌شود. علت استفاده از ترم پنالتی این است که در صورتی که جواب‌های بدست آمده در محدوده مجاز فشار قرار نداشته باشند، مقدار تابع هدف این جواب‌ها، مقدار بزرگی شود تا در تکرارهای بعدی جستجو، این جواب‌ها توسط الگوریتم مدنظر قرار نگیرند. تعریف پنالتی در تابع هدف به صورت زیر است:

مقدار *Penalty1* در تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Penalty1i = (Pmin - Pi) \times 10^6 \qquad (۵)$$

که Pi فشار در گره i ام و P_{min} حداقل فشار مجار گره‌ای شبکه است.

مقدار *Penalty2* نیز در تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Penalty2i = (Pi - Pmax) \times 10^6 \qquad (۶)$$

که Pi فشار در گره i ام و P_{max} حداقل فشار مجار گره‌ای شبکه است.

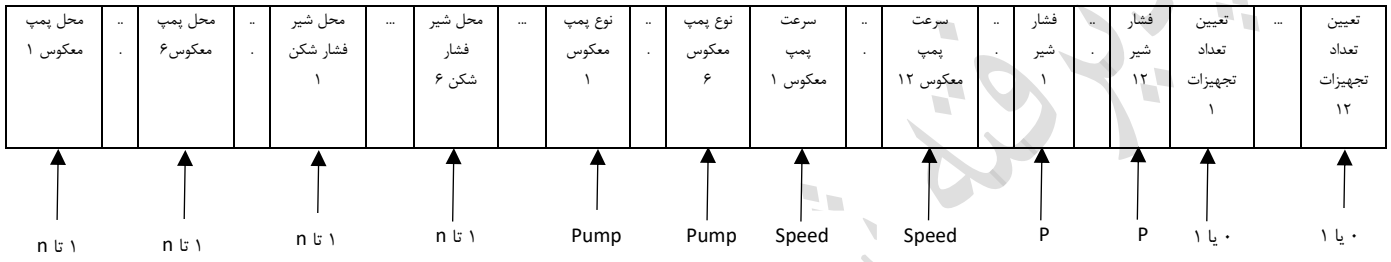
مقدار پنالتی کل بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Penalty = \sum_{i=1}^{n} (Penalty1i + Penalty2i) \qquad (۷)$$

رشته بهینه‌سازی متغیرهای تصمیم مسئله فوق در (شکل ۵) ارائه شد. پس از مشخص شدن مکان شیرهای فشارشکن و پمپ‌های معکوس و نیز مشخص شدن نوع پمپ های معکوس در گام نخست، یک مسئله بهینه‌سازی تک هدفه در گام دوم بمنظور حداکثرسازی انرژی تولیدی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$Min(F) = Max \sum_{t=1}^{24} E_t - Penalty \qquad (۸)$$

که E_t مقدار انرژی تولیدی در زمان بهره‌برداری در شبکه است.و F مقدار تابع تک هدفه برای حداکثر کردن انرژی تولیدی در شبکه است و $Penalty$ قیدهای مسئله برای اینکه مقدار فشارهای گره‌ای شبکه در طول بهره برداری از محدوده فشار مجاز مطابق با نشریه ۱۱۷بیشتر و یا کمتر نشود.



شکل۵- رشته متغیرهای تصمیم مسئله بهینه‌سازی دو هدفه

۳- نتایج و بحث

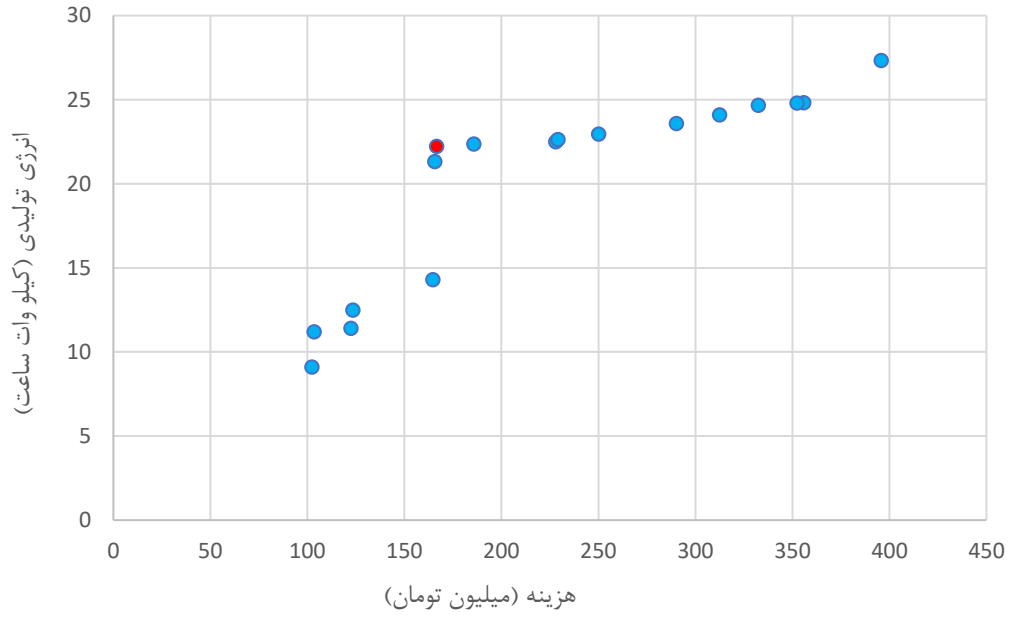
در گام نخست برای مشخص شدن تعداد پمپ‌ها و شیرهای فشار شکن و همچنین مکان بهینه آن‌ها و مشخص کردن نوع مناسب پمپ معکوس، یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه DE که در بخش قبل توضیح داده شد، حل گردید؛ با این هدف که با حل این مسئله، چیدمان تجهیزات کنترل فشار منجر به تولید بیشترین میزان انرژی با کمترین هزینه شوند.

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 هرکدام از شیرهای فشارشکن و پمپ‌های معکوس شش عدد در رشته متغیر تصمیم در نظر گرفته شد. این تعداد، با سعی و خطا بر اساس شبیه‌سازی هیدرولیکی و تحلیل حساسیت نتایج حاصله و درنظرگیری محدودیت‌های

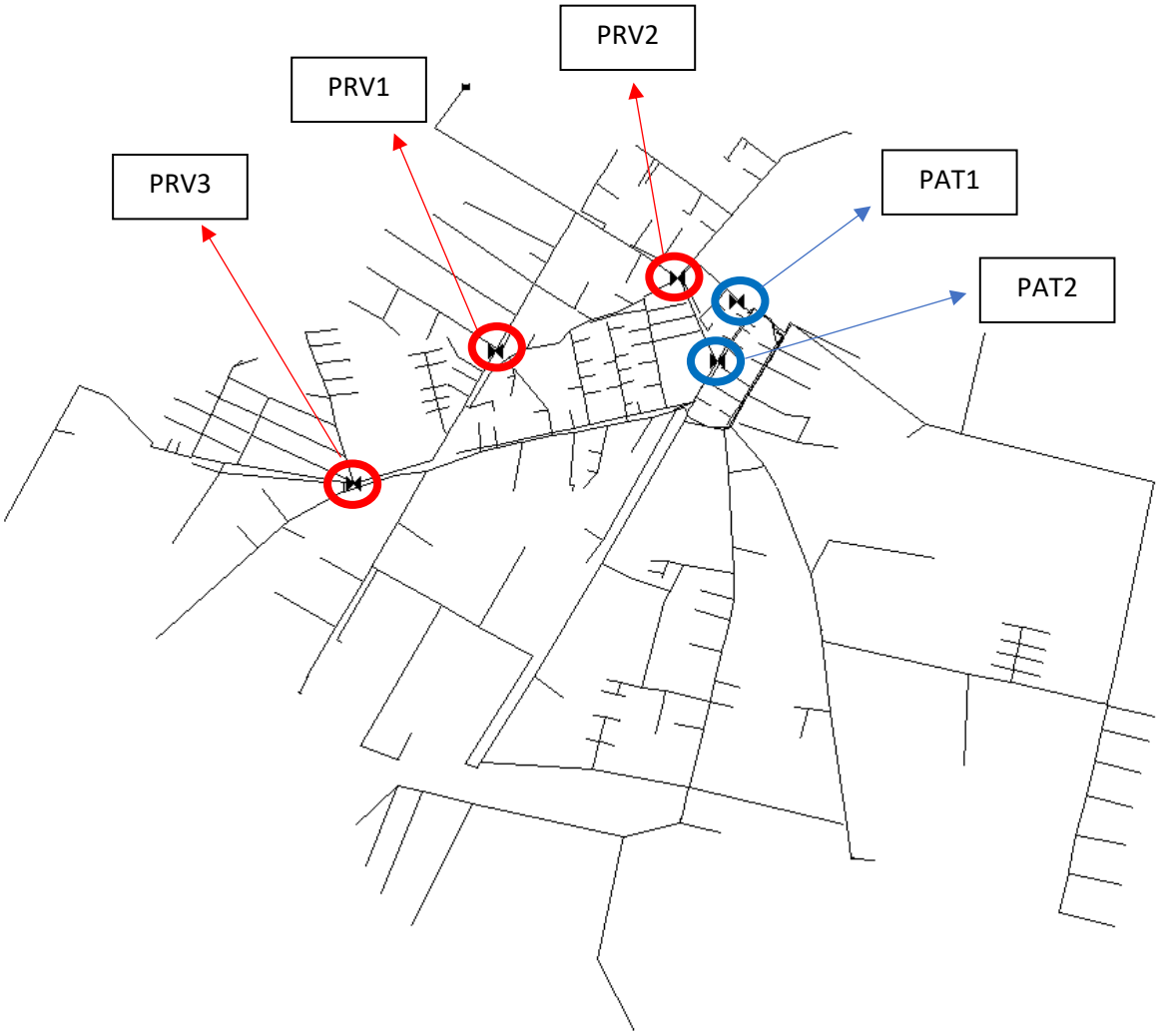
هزینه انتخاب شده است. با استفاده از حل‌گر هیدرولیکی EPANET و در طی چند اجرای آزمایشی مشخص شد که اگر تعداد هر یک از این تجهیزات در شبکه بیشتر از شش عدد باشد، کاهش حداکثر فشار شبکه خیلی محسوس نیست، لذا این افزایش هزینه برای کاهش بسیار کم فشار توجیه اقتصادی ندارد. برای حل این مسئله بهینه‌سازی به الگوریتم اجازه داده شده است تا با یک رشته متغیر باینری و عدد صحیح تعداد و مکان بهینه پمپ‌ها و شیرها را انتخاب بکند، متغیرهای باینری می‌تواند تعداد تجهیزات کنترل فشار را از صفر تا شش عدد برای هر یک از تجهیزات (پمپ مکوس و شیرفشارشکن) تغییر دهد تا بهینه‌ترین تعداد تجهیزات مشخص شود. همچنین، متناسب با متغیرهای باینری که مقدار یک اخذ کرده‌اند، متغیرهای عدد صحیح محل بهینه تجهیزات را مشخص می‌کنند به نحوی که بهترین حالت چیدمان تجهیزات کنترل فشار بدست آید. بنابراین تعداد متغیرهای تصمیم شامل شش متغیر تصمیم برای مکان پمپ‌های معکوس (مکان هر یک از پمپ‌ها)، شش متغیر تصمیم برای مکان شیرهای فشارشکن (برای هر شیرفشارشکن)، شش متغیر تصمیم برای انتخاب نوع پمپ‌های معکوس، دوازده متغیر تصمیم برای فشار تنظیمی شیرهای فشارشکن (شش متغیر در شرایط حداقل مصرف شبکه و شش متغیر برای حداکثر مصرف شبکه) و دوازده متغیر تصمیم برای سرعت چرخش پمپ معکوس (شش متغیر در شرایط حداقل مصرف شبکه و شش متغیر برای حداکثر مصرف شبکه) تعریف شد. همچنین برای تعیین ترکیب تعداد شیرهای فشارشکن و پمپ معکوس نیز دوازده متغیر باینری در نظر گرفته شده است که مجموعاً تعداد پمپ و شیرهای نصبی را از صفر تا داوزده عدد تعیین می‌کنند. در مجموع تعداد متغیرهای تصمیم در این مسئله بهینه‌سازی ۵۴ عدد است. تعداد تکرار الگوریتم دوهدفه برای اینکه 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 درنظر گرفته شده به همگرایی رسیده باشد و مشاهده شد در چندین نسل انتهایی تکرارهای آخر تغییری در مقدار تابع هدف اتفاق نیفتاده باشد تا اطمینان حاصل گردد که الگوریتم به همگرایی رسیده باشد. شایان ذکر است بدلیل 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. در نهایت جبهه پارتوی بدست آمده از حل مسئله بهینه‌سازی در شکل شش نشان داده شده است. این جبهه پارتو نشانگر مصالحه بین مقدار انرژی تولیدی و هزینه خرید تجهیزات است. تغییرات جبهه پارتو دو تابع هدف در شکل ۶ نشان داده شده است و جواب بهینه با رنگ قرمز مشخص شده 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 می‌گردد. همچنین روند قبل از این شکست نشان دهنده 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.



شکل۶- جبهه پرتوی بدست آمده در۲۰۰ تکرار برای شبکه مورد بررسی که جواب منتخب با رنگ متفاوت مشخص شده است

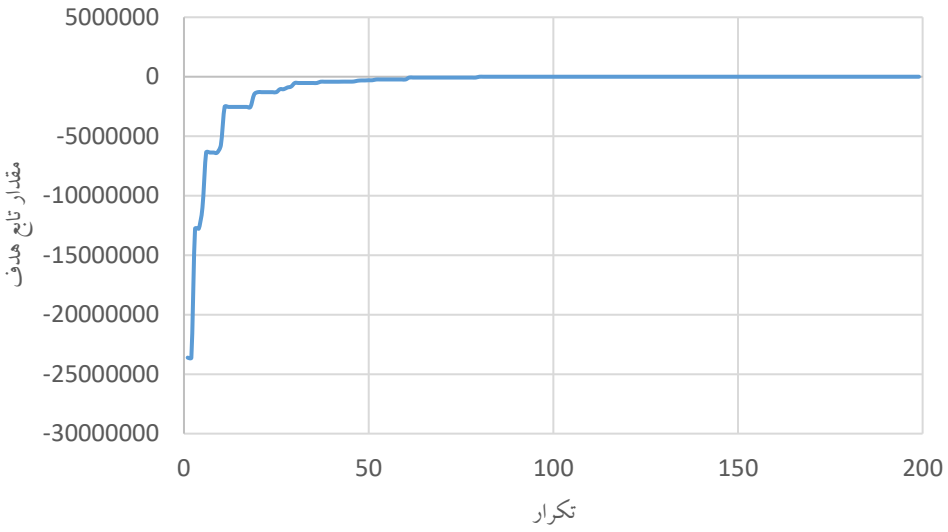
در طی مسئله بهینه سازی برای یافتن تعداد و مکان تجهیزات در شبکه، الگوریتم جستجو جواب‌های مختلف در یک شبکه را شبیه‌سازی می‌کند و بصورت تصادفی تجهیزات کنترل فشار را در بخش‌های مختلف شبکه جانمایی می‌کند و پس از حل هیدرولیکی شبکه، جواب‌ها بر اساس تابع هدف (معیارهای فشار و انرژی) ارزیابی می‌شوند و جواب‌های برتر در نسل‌های بعدی الگوریتم شانس بیشتری برای تولید جواب‌های جدید و بهتر دارند. در نهایت بهترین جواب‌ها بر اساس تابع هدف بصورت یک جبهه پارتو نشان داده شده است. با توجه به جواب منتخب جبهه پارتو، شبکه بهینه در شکل ۷ نشان داده شده است. که این شبکه داری دو عدد پمپ معکوس که هر دو از نوع پمپ ۲۰۰-۱۰۰ کارخانه پمپیران است و سه عدد شیر فشار شکن که شیر شماره یک به قطر ۸ اینچ شیر شماره دو به قطر ۱۲ اینچ و شیر شماره سه به قطر ۶ اینچ است.



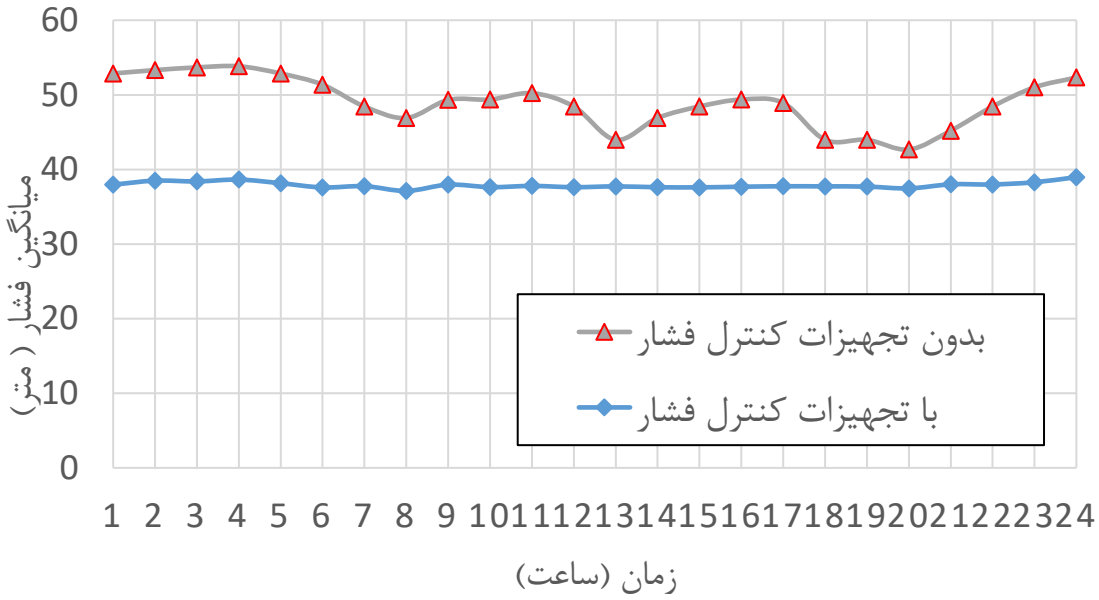
شکل۷- مکان سه شیر فشارشکن و دو پمپ معکوس پیشنهاد شده توسط الگوریتم DE در محیط EPANET

در گام دوم برای اینکه بالاترین میزان انرژی از شبکه در در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز از شبکه بدست آید و در عین‌حال 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 به بهینه سازی فشار تنظیمی شیر فشار شکن و سرعت بهینه دور موتور پمپ معکوس پرداخته شد. در این گام، یک الگوریتم تک هدفه DE گسترش داده شد تا با توجه به وجود دو عدد پمپ معکوس، ۴۸ متغیر تصمیم (۲۴×۲) برای بهینه کردن دور موتور دو پمپ معکوس در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز اعمال گردد.

با توجه به وجود سه شیر فشار شکن، ۷۲ متغیر تصمیم (۲۴×۳) برای بهینه کردن فشار تنظیمی سه شیر فشارشکن 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 مساله جستجو، از سیستم کامپیوتری با یک پردازنده ۴ هسته‌ای و ۸ رشته پردازشی با ۱۶ گیگابایت رم استفاده شده است. زمان پردازش ۲۱۶ ساعت طول کشید. در شکل ۸ روند همگرایی بهینه‌سازی تابع تک هدفه نشان داده شده است. در این شکل، محور عمودی بر اساس رابطه ۸ محاسبه می‌گردد. در زمان‌هایی که فشارهای گره‌ای در محدوده استاندادر قرار نگیرند یک ترم منفی پنالتی به تابع هدف وارد می‌شود که سبب می‌شود مقدار تابع هدف بصورت منفی به نمایش درآید. با جلو رفتن تکرارهای الگوریتم و پس از خارج شدن تابع هدف از ترم پنالتی، مقدار تابع هدف عدد مثبت خواهد بود که نشان دهنده انرژی تولیدی شبکه است. این مقدار در شکل ۸ به ۱۶۰ کیلوات 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، بیشینه‌سازی 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.

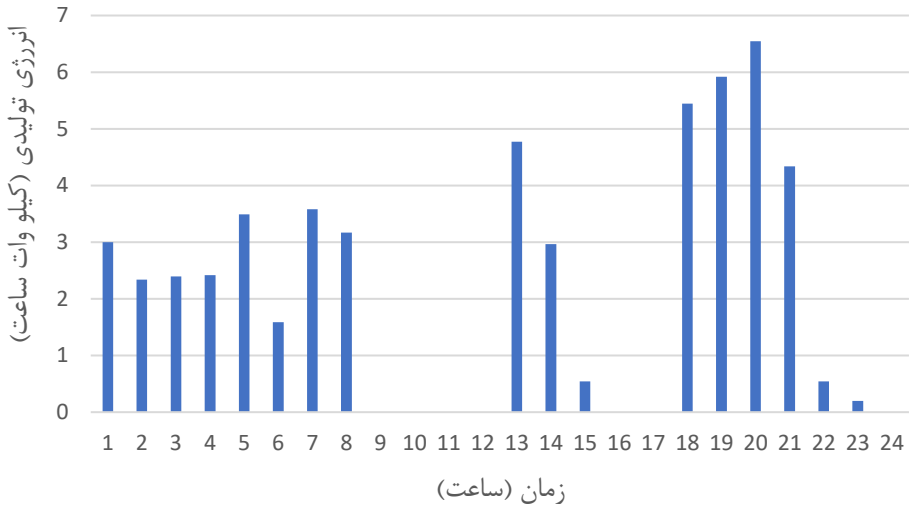


شکل ۸- مقدار تابع هدف در گام دوم

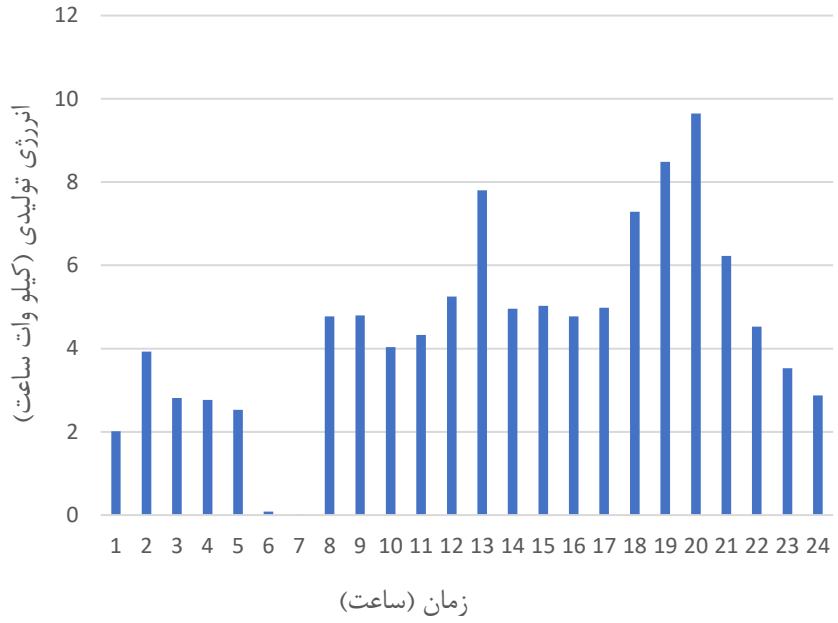


شکل ۹- میانگین فشار حداکثر شبکه با ترکیب ۳ شیر فشارشکن و ۲ پمپ معکوس

نتایج حاصله در این گام نشان داد که ۱۶۰ کیلو وات ساعت در روز می‌توان از شبکه انرژی استحصال نمود. این میزان انرژی از رابطه (۲) بدست آمده است. این مقدار تولید انرژی در این رابطه وابسته به دبی گذرا از پمپ معکوس است و با توجه به اینکه دبی گذرا در طول ۲۴ ساعت متغیر می‌باشد انرژی تولیدی در طول ۲۴ ساعت متغیر است که مجموع دو پمپ در طول ۲۴ ساعت شبانه روز این مقدار انرژی را تولید می‌کند. میزان انرژی تولیدی در پمپ اول و دوم به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ برای ۲۴ ساعت شبانه‌روز نشان داده شده است که محور عمودی نشان دهنده انرژی تولیدی است و محور افقی نشان دهنده زمان است. به عنوان مثال در شکل ۱۰ برای پمپ معکوس اول در ساعت یک بامداد سه کیلو وات ساعت برق تولید شده است. همانطور که در شکل 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. همچنین در بعضی از ساعات شبانه‌روز هیچ انرژی تولید نشده است و دلیل آن این است که در این ساعات، دبی جریان در شبکه کم است.



شکل ۱۰- نمودار میله‌ای انرژی تولیدی در پمپ معکوس اول



شکل ۱۱- نمودار میله‌ای 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 بطور همزمان بررسی شد. نتایج نشان داد با بکارگیری بهینه سه عدد شیر فشار شکن، مجهز به دستگاه‌های کنترل تنظیم هوشمند در کنار دو پمپ معکوس با سرعت متغیر (با توجه به شکل ۱۰ و ۱۱) در مجموع، ۱۶۰ کیلو وات ساعت انرژی در شبانه‌روز فراهم می‌گردد 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. بر اساس نرخ تورم کشور و قیمت خرید برق توسط دولت 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 به همراه ندارند.

۵- پی‌نوشت‌ها

1-Differential Evolution (DE)

2-Pressure Reducing Valve (PRV)

3- Pump As Turbine (PAT)

۶- مراجع

تابش، م.، (۱۳۸۵)، "مدیریت هدررفت در سیستم‌های توزیع آب ایران به روایت استاندارد - ۳۰۸ الف"، اولین همایش سازگاری با کم آبی، تهران، https://civilica.com/doc/39592.

درخشان، ش.، امین‌نیا، ن.، هاشمی، م.، (۱۳۹۴)، "تحلیل فنی اقتصادی کاربرد پمپ به عنوان توربین جهت استحصال انرژی درشبکه‌های توزیع آب"، سومین همایش ملی هیدرودینامیک کاربردی، دانشگاه علم و صنعت، https://civilica.com/doc/596809.

رئیس‌میرزاقلی، م.، زمانیان، ع.، (۱۳۹۳)، "نیروگاه برق آبی مقیاس کوچک برروی خطوط انتقال آب"، ششمین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد، https://civilica.com/doc/596809.

شاه‌حسینی، پ.، توکلی، ه.، (۱۳۹۲)، "تحلیل شاخص‌های کیفیت زندگی شهری مورد: محله وردآورد منطقه ۲۱ تهران"، فصل‌نامه آمایش تهران شماره ۲۴، ص ۱۲۷-۱۴۴، https://ebtp.malayer.iau.ir/article_526443.html.

نوربخش، ا.، درخشان، ش.، (۱۳۸۴)، "تحلیل رفتار پمپ و ارائه بهترین نقطه کارکرد آن در حالت چرخش به عنوان توربین"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۹، شماره ۶، ص ۷۵۶ – ۷۷۱، https://www.sid.ir/paper/14060/fa.

وزارت نیرو دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا.، (۱۳۹۲)، "ضوابط طراحی سامانه های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی"، نشریه شماره ۱۱۷–۳، https://waterstandard.wrm.ir/cs/WRMResearch/278/220.

پیرو نسخه شده / ویرایش نشده

Carravetta, A., Giudice, G., Fecarotta, O., Ramos, H., (2012), "Energy Production in Water Distribution Networks: A PAT Design Strategy", *Water Resour Manage*, 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 waterdistribution 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.

Jafari, R., Khanjani, M., Esmaeilian, 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 Resour. Plann. Manage*, 147(10), 04021065. 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 Reduction in a Water Distribution Network", *Water Resour. Plann. Manage*, 43(8), 1-12, 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-E_ective Pressure Control Device for More SustainableWaterSupply 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 Resour. Plann. Manage*, 144(1), 1-14, 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.

پذیرفته شده / ویرایش نشده