

Optimization of the water supply network equipped with PATs with an environmental approach

Mohammad Salkhordeh Haghghi¹, Ramin Amini^{2*}, Behrooz Keshtegar³

1-Ph. D. student, Department of Water and Environmental, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2-Associate Professor, Department of Water and Environmental, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3-Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Zabol University, Zabol, Iran

Corresponding Author's E-mail: Web2_ramin.amini@Shahroodut.ac.ir

Received: 31 Oct. 2022



Accepted: 09 Feb 2022

Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Received: Accepted: Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: The most important factor in reducing leakage in water supply networks is pressure management. The use of pressure reducing valves (PRVs) causes excess pressure to be dissipated in the target nodes of the network, thus replacing equipment such as PAT (pump as turbine), reducing leakage as well as increasing excess pressure in the networks, inducing the generation of hydroelectric power, It is essential. In this article, a 25-node network is simulated using EPANET software; And the number and position of PATs are optimized by genetic algorithm. For optimization, a new objective function that simultaneously considers "pressure management in the water supply network, electricity generation from renewable sources and reduction of greenhouse gas effect; It is used to replace renewable energy instead of energy produced by non-renewable fuel power plants such as fossil fuel power plants. "

Keywords: Water Distribution Network, PATs, Social Cost, Payback Period.

Introduction: The most important problem that always exists in the design of water supply networks is leakage from the networks. Pressure management is the first solution to solve this problem (Campisano and Creaco, 2020; Tabesh and Vaseti, 2006. Because, pressure reducing volves (PRVs) make dissipate excess pressure in consumer nodes, it is recommended to use PATs instead of PRVs (Latifi et al., 2021). Moreover, one of the reasons for global warming is the emission of greenhouse gases that have a direct relationship with countries' energy consumption (Kohansal and Bahraminasab., 2020). In most of the research, objective functions consider reducing leakage from networks and increasing electricity generation by renewable energy have been used to determine the optimal placement of PATs in a water supply network. Therefore, the need for environmental terms due to the effect of reducing greenhouse gases production by renewable energies in the optimization objective functions is completely felt.

In the current research, the hydraulic analysis of the 25-node water supply network is performed using the pressure-based analysis methodology with the assistance of EPANET software. The simulated water supply network is integrated with the powerful MATLAB software for applying the genetic algorithm as a powerful optimization approach. The objective function, optimizing PATs, considers three parameters of water pressure management, renewable energy, and environmental effects of greenhouse gases for finding the optimal location and number of equipment within the desired network.

Methodology: To check the performance of the optimization objective function of PATs, the hypothetical 25-node water supply network that has been used by several researchers such as Vairavamoorthy and Lumbers (1998), Fecarotta et al. (2014), Giugni et al. (2014), Garcia and Nabola (2020) and Nguyen et al. (2020) to research the optimization objective functions in water supply networks is evaluated. The hydraulic relations of the desired network are solved in Epanet software by the gradient method and pressure-based hydraulic analysis (Wagner's Eq). Also, this software uses the orifice equation (Germanopoulos (1985)) for the hydraulic analysis of leakage. After drawing and entering the basic info of the desired network in EPANET software and integrating the Epanet library into MATLAB, the new objective function will be optimized with the genetic algorithm's assistance. To define the new objective function and consider the parameters of pressure management and energy production from reverse pumps, the impact of reducing greenhouse gas production as a result of replacement energy made by fossil power plants with clean energy is also investigated. In the end, further to the equations of conservation of energy and conservation of mass, the minimum power made by reverse pumps and also the pressure limit within the nodes of consumers have been introduced as constraints of the problem.

Results and Discussion: For evaluation the new optimization objective function and conducting a comparison between the induced outcomes and the reference results of Giugni et al. (2014), the cost parameters have been eliminated from Eq. 6. Then the production energy of PATs was analysed according to the scenarios defined in Nguyen et al. (2020), including the network equipped with 1 PAT (minimum production power of 400 watts per day), 2 PATs (minimum production power of 1500 watts per day) and 3 PATs (minimum production power of 750 watts per day), Fig. 5.

Optimization approach leads to the best place of installing PATs for the scenario 1 at pipe number 20, scenario 2 at pipe numbers 20 and 18, and scenario 3 at pipe number 20 (PAT1), 1 (PAT2), and 18 (PAT3) and is completely in accordance with the results of Giugni et al. (2014). As shown in Table 2 and Fig. 5 and Fig. 6, the production energy will increase with the increase in PATs from one to three. Also, the leakage in the network decreases, and thus the most optimal response of the desired network is to put in 3 PATs in the place of pipes No. 20, 18, and 1 is determined. As an example, in Fig. 7, the amount of head drop and flow rate passing through PAT located at the situation of pipe number 18 is drawn. In this figure, it will be seen that during the peak consumption times (9:00-18:00), the flow through PAT increased, and the head drop decreased, which might be the result of the slow change of the water level within the reservoir even when there are different consumption patterns. After verifying the optimization function of the desired network with the assistance of the genetic algorithm, the optimization results of the new objective function also introduce the installation of three PATs within the same location of pipes 20, 1, and 18 as the best solution to the problem. Fig. 8 and Fig. 9 show the outturn and production power of every of the PATs, respectively.

Considering the importance of the return-on-investment factor in the final decision of the projects, using the results of the 25-node network of Garcia and Nabola (2020), and assuming the country of Iran, it was observed that the social cost of carbon dioxide gas is approximately equivalent to 15% of the energy tariff. Now, if this approximate number is added to the electricity production income, the investment return period of every PATs will show a decrease of 4. 7, 7. 8, and 32. 7 months, respectively. This reduction within the investment return period shows the importance of considering the environmental dimension of PAT energy.

Conclusion: The evaluated optimization method, using the new objective function, resulted in to placing three reverse pumps at the location of pipes 20, 18 and 1; as the best mode of optimization in the network. Conducted comparison showed, the number of PATs increases, the leakage significantly decreases but the energy production from these renewable sources increases. Furthermore, the impact of the social cost of greenhouse gases in the investment return period indicates a significant decrease in efficiency period for PATs. In general, adding the environmental term in optimization objective function emphasizes the necessity of using renewable energies (PAT) in water supply networks.

© 2022 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بهینه‌سازی شبکه آبرسانی مجهز به پمپ به عنوان توربین با رویکرد زیست‌محیطی

محمد سالخورده حقیقی^۱، رامین امینی^{۲*}، بهروز کشته‌گر^۳

^۱دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۳دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه زابل، زابل، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول Web2_ramin.amini@Shahroodut.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۰

چکیده: مهم‌ترین عامل کاهش نشت در شبکه‌های آبرسانی، مدیریت فشار است. پمپ‌ها (به عنوان توربین، PATs)^۱ علاوه بر کاهش نشت در شبکه، اضافه فشار موجود در شبکه را برای تولید انرژی برق-آبی به عنوان انرژی تجدیدپذیر و دوستدار محیط‌زیست فراهم می‌سازند. در این پژوهش پس از ورود اطلاعات اولیه شبکه معتبر ۲۵-گرهه به نرم‌افزار EPANET، موقعیت بهینه توربین‌های مورد نیاز به کمک الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک با استفاده از نرم‌افزار متلب تعیین گردید. برای این منظور تابع هدف جدیدی با رویکرد هم‌زمان (۱) مدیریت فشار در یک شبکه آبرسانی، (۲) تولید برق از منبع تجدیدپذیر پمپ به عنوان توربین، و (۳) کاهش اثر گازهای گلخانه‌ای معرفی گردید. پس از صحت‌سنجی نتایج بهینه‌سازی شبکه آبرسانی موردنظر به کمک تابع هدف جدید، بهترین حالت جایگذاری سه عدد توربین در محل لوله‌های شماره ۲۰، ۱۸ و ۱ در شبکه ۲۵-گرهه به‌دست آمد. مقدار نشت از ۷۰۱/۲۹ لیتر بر ثانیه در حالت شبکه بدون توربین به مقدار ۴۵۷/۹ لیتر بر ثانیه در حالت نصب هم‌زمان ۳ عدد توربین کاهش و انرژی تولیدی این منابع تجدیدپذیر افزایش یافت. همچنین، تحلیل تأثیر ترم هزینه اجتماعی گازهای گلخانه‌ای بر دوره بازگشت سرمایه نشان داد که دوره بازگشت سرمایه برای هر یک از توربین‌های شماره ۱ تا ۳ به ترتیب ۴/۷، ۷/۸ و ۳۲/۷ ماه کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌گان: شبکه آبرسانی شهری، پمپ به عنوان توربین، هزینه اجتماعی، دوره بازگشت سرمایه

می‌شود. با این وجود، منابع آبی در جهان به دلایلی مانند تقاضای بالای مشتریان، تلفات نشت ناشی از زیرساخت‌ها و

۱- مقدمه

آب به عنوان اصلی‌ترین منبع حیات و بقا بشر شناخته

^۱ Pump As Turbine

فشار علاوه بر کاهش نشت و کاهش خطر نشت‌های جدید، می‌تواند به ۱- مدیریت تقاضا، ۲- کاهش فرسودگی سیستم (افزایش عمر مفید زیرساخت)، ۳- کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری (کاهش دفعات وقفه‌های اصلی)، و ۴- خدمات مشتری مداری (خدمات بهتر به دلیل قطعی آب کمتر) کمک کند (Mahdavi et al., 2010).

ساده‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین راه‌کار مدیریت فشار در شبکه‌های آبرسانی، استفاده از شیرهای کاهش فشار برای حفظ فشارهای استاندارد بر روی شبکه است. با این حال در حضور این شیرها، تمام انرژی موجود در سیال از طریق افت هد تلف شده و در نتیجه برای تولید انرژی الکتریکی و کنترل فشار می‌توان به‌جای شیرهای کاهش فشار از یک توربین استفاده کرد. به طور کلی توان موجود در این سایت‌ها کمتر از ۱۰۰ کیلووات است، بنابراین استفاده از میکروتوربین‌هایی مانند PAT (پمپ به عنوان توربین) برای کاهش سرمایه‌گذاری توصیه شده است. در سال‌های اخیر، میکروتوربین‌ها به شرط وجود فشار اضافی در شبکه آبرسانی به طور گسترده‌ای برای تولید برق از جریان آب عبوری از لوله‌ها مورد استفاده قرار گرفته و با این عمل بخش‌هایی از هزینه مصرف انرژی در سیستم تأمین آب جبران شده است (Latifi et al., 2021). پمپ‌ها ماشین‌های نسبتاً ساده‌ای هستند که نگهداری آنها آسان است و در اکثر کشورهای در حال توسعه در دسترس هستند.

تحقیقات در مورد استفاده از PATها در حدود سال ۱۹۳۰ آغاز شد. با افزایش تقاضای انرژی، بهره‌برداری از چنین منابع انرژی در آینده مقرون به صرفه‌تر هم خواهد بود. آزمایش‌ها نشان داده است که در سایت‌هایی با خروجی توان نسبتاً کم، PATها می‌توانند با توربین‌های معمولی از نظر حداکثر بازده رقابت کنند (Derakhshan and Nourbakhsh., 2008). از طرفی با توجه به هزینه تولید برق و آلودگی زیست‌محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند PAT در نقاط هدف شبکه‌های آبرسانی به شدت توصیه شده است.

یکی از دلایل گرم شدن کره زمین، انتشار گازهای گلخانه‌ای

مصرف نادرست، کاهش نزولات جوی و برداشت‌های بی‌رویه به شدت در حال کاهش است (Mathye et al., 2022). یکی از مهم‌ترین معضلاتی که همواره در طراحی شبکه‌های آبرسانی وجود دارد نشت در شبکه است. در هر شبکه همواره مقداری از آب تولید شده در مسیر تولید تا مصرف هدر رفته و در اختیار مصرف‌کننده قرار نمی‌گیرد. این مسئله باعث می‌شود علاوه بر کاهش منابع آب قابل شرب، هزینه‌های سنگینی به شرکت‌های آب و فاضلاب تحمیل گردد. در مواقع کمبود و محدودیت منابع آب، حساسیت مسئله بیشتر بوده و لزوم برخورد با نشت را جدی‌تر می‌سازد (Tabesh and Vaseti, 2006).

با توجه به روش‌های متفاوت محاسبه نشت (Avila et al., 2021)، مقادیر متفاوتی برای نشت در شبکه‌های آبرسانی بیان شده است. به عنوان مثال کمیته حفاظت ایتالیا^۱ مقدار نشت در شبکه را بین ۲۰ تا ۶۰ درصد و به طور متوسط ۴۲٪ بیان کرده است (Jafari et al., 2015). Avila et al. (2021) بررسی تعداد ۶۲ شبکه آب برای نیل به تعیین روش‌های محاسبه نشت، روش‌های کالیبراسیون و درصد نشت موجود در شبکه‌ها نشان داد که مقدار نشت آب از شبکه‌ها بین ۵ تا ۵۵ درصد مجموع مصرف است. معضل نشت آب در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه هم همچنان در حال افزایش است، البته این امر برای اکثر کشورهای در حال توسعه که ظرفیت مالی محدودی دارند، بسیار پرهزینه‌تر است. در نتیجه در سال‌های اخیر، تغییر نگرشی در بین مدیران آب ایجاد شده است که مصمم به کاهش نشت آب هستند (Adedeji et al., 2017).

نشت در شبکه‌های آبرسانی تابع عوامل مختلفی از جمله فشار آب، قدمت لوله‌ها، کیفیت آب و خاک، کیفیت اجرا، کیفیت لوله‌ها و متعلقات، ضربه و بارهای جانبی نظیر ترافیک بیان شده است. از مهم‌ترین راه‌کارهای کاهش نشت می‌توان به یافتن مستقیم محل نشت و ترمیم آن، تعویض خطوط لوله آسیب‌دیده، و مدیریت فشار (کاراثرین و مقرون به صرفه‌ترین گزینه) اشاره کرد (Campisano and Tabesh and Vaseti., 2006 - Creaco., 2020). مدیریت

^۱ The Italy Vigilance Committee

با ماهیت کاهش نشت در شبکه و افزایش تولید برق بهره گرفته شده است؛ در حالی که تأثیر گازهای گلخانه‌ای بر محیط زیست و سلامت بشر، ایجاب می‌کند تا تأثیر هر سه پارامتر کاهش نشت در شبکه، افزایش تولید برق توسط انرژی تجدیدپذیر و کاهش اثر مخرب گازهای گلخانه‌ای (با تأکید بر کاهش CO₂) را در تعیین موقعیت بهینه PATها در یک شبکه آبرسانی در نظر گرفته شود.

هدف از پژوهش حاضر، ارائه تابع هدف جدید بهینه‌سازی موقعیت PATها در شبکه آبرسانی با تأکید بر اهمیت کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای در اثر جایگزینی سوخت فسیلی با انرژی پاک است. از این‌رو ابتدا تحلیل هیدرولیکی یک شبکه آبرسانی معتبر به نام شبکه آبرسانی ۲۵-گرهی (Giugni et al., 2014) به روش تحلیل مبتنی بر فشار^۲ (Bhave, 1981; Germanopoulos, 1985; Wagner et al., 1988; Tabesh et al., 2014) و در محیط نرم‌افزار ایپانت^۳ انجام می‌گیرد.

پس از ادغام کتابخانه ایپانت با نرم‌افزار قدرتمند متلب و ورود داده‌های شبکه آبرسانی به نرم‌افزار، با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک (Jafari et al., 2015; Avila et al., 2021; Latifi et al., 2021) و در نظر گرفتن قیدهای مسئله، تابع هدف جدید بهینه‌سازی PATها با منظور نمودن تأثیر هم‌زمان سه پارامتر مدیریت فشار آب (کاهش نشت در شبکه)، انرژی پاک (تولید برق) و زیست‌محیطی (کاهش اثر مخرب گازهای گلخانه‌ای) برای یافتن بهترین موقعیت مکانی این تجهیزات در شبکه موردنظر حل می‌گردد.

در انتها تأثیر پارامتر زیست‌محیطی بر فاکتور دوره بازگشت سرمایه به عنوان یک عامل مهم در تصمیم‌گیری دولت‌ها جهت سرمایه‌گذاری بخش انرژی‌های پاک بررسی می‌شود.

۲- روش‌شناسی

در ابتدای این بخش، شماتیک مراحل انجام پژوهش و روند مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک به ترتیب در شکل ۱ و شکل ۲ شرح داده شده است.

است و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای رابطه‌ای مستقیم با میزان مصرف انرژی کشورها دارد. با توجه به این که انرژی به عنوان یکی از عوامل تولید و موتور محرکه رشد اقتصادی به شمار می‌رود، انتشار گازهای گلخانه‌ای سبب کاهش رشد اقتصادی کشورها شده است (Kohansal and Bahrami Nasab., 2020). با بررسی ۵ نیروگاه حرارتی استان تهران، میزان ورود آلاینده‌ها به هوا در اثر این نیروگاه‌ها در طول یک سال، در حدود ۱۴ میلیون تن محاسبه گردید (Mousavi and Sadatnejad, 2020).

امروزه برای درک بهتر اثر مخرب گازهای گلخانه‌ای به خصوص دی‌اکسید کربن از مفهومی به نام هزینه اجتماعی^۱ استفاده می‌شود. مطابق گزارش کنگره آمریکا (۷ ژوئن ۲۰۲۱)، هزینه اجتماعی گازهای گلخانه‌ای برابر برآورد مالی اثر ناشی از انتشار یک تن اضافی از آن گاز در یک سال است. میزان انتشار دی‌اکسید کربن از نیروگاه‌های تجدیدناپذیر (گازی) و تجدیدپذیر (خورشیدی) در مناطق مختلف کشور ایران، به ترتیب برابر ۶۵۸ و ۵/۹ گرم دی-اکسید کربن به ازای هر کیلووات ساعت تولید برق است (Nabi et al, 2021). با افزایش هر یک درصد تولید الکتریسیته از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌توان در بلندمدت و کوتاه‌مدت به ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۰۷ درصد از انتشار دی-اکسید کربن کاست (Sadeghi et al., 2014).

با بررسی یک شبکه آبرسانی کوچک در نزدیکی شهر پالمو ایتالیا بیان کرد که جایگذاری ۲ عدد PAT در محل لوله‌های اصلی شبکه نسبت به نصب یک عدد PAT منجر به تولید انرژی بیشتر و بنابراین کاهش بیشتر انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد (De Marchis et al., 2016). همچنین، جایگزینی شیرهای فشارشکن با PATها در دو شبکه آبرسانی در کشور ایتالیا و محاسبه برق تولیدی از این تجهیزات تجدیدپذیر، میزان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول یک سال برای دو شبکه موردنظر برابر ۳۲۷ و ۲۰ تن محاسبه شد (Balacco et al., 2020).

در بیشتر پژوهش‌های پیشین برای تعیین بهینه موقعیت جای‌گذاری PATها در یک شبکه آبرسانی، از توابع هدفی

³ Epanet Software

¹ Social Cost

² Head Driven Simulation Model(HDSM)



Fig. 2 Genetic Algorithm FlowChart
شکل ۲ نمودار مراحل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

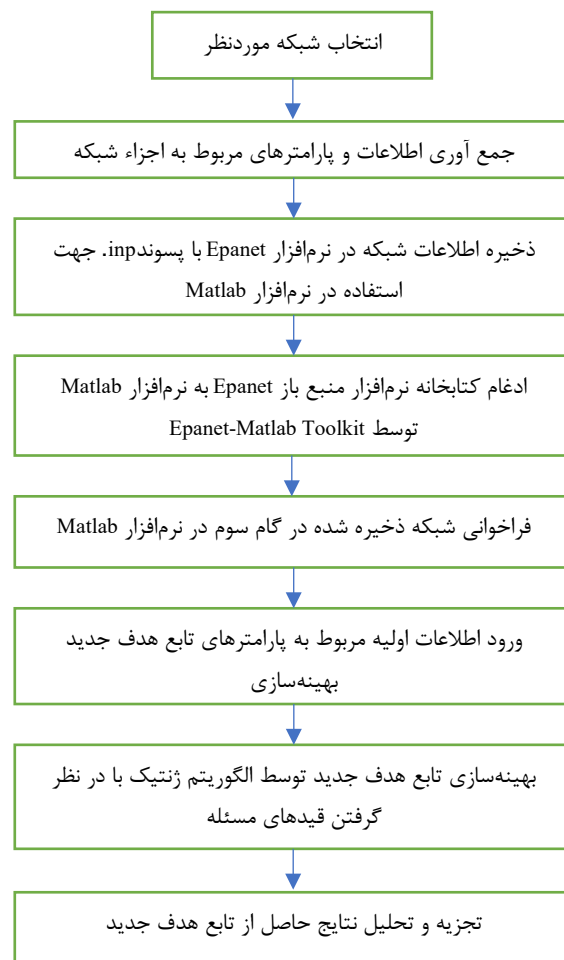


Fig. 1 Research Method Flowchart
شکل ۱ نمودار روش انجام تحقیق

گره‌ها و لوله‌ها به (Giugni et al. (2014) مراجعه شود). طول کل لوله‌های شبکه تقریباً $44/3$ کیلومتر بوده و سطح آب مخازن شماره ۲۳، ۲۴ و ۲۵ به ترتیب $55/6$ ، $55/5$ و 55 متر در نظر گرفته شده است (Giugni et al., 2014) و (Nguyen et al., 2020).

۲-۲- روش گرادیان

اولین قدم در بررسی هر شبکه آبرسانی، تعیین روابط مناسب جهت تحلیل هیدرولیکی شبکه موردنظر می‌باشد. بر خلاف سایر روش‌های تحلیل هیدرولیکی که از معادله‌های مربوط به گره‌ها و حلقه‌ها استفاده می‌کنند در روش گرادیان از معادله‌های لوله‌های شبکه برای محاسبه و

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

برای بررسی عملکرد تابع هدف جدید بهینه‌سازی PATها، یک شبکه معتبر به نام شبکه آبرسانی ۲۵-گره‌ای که قبلاً توسط محققین بسیاری در حوزه آب مانند Vairavamorthy and Lumbers (1998), Fecarotta et al. (2014), Giugni et al. (2014), Garcia and Nabola (2020), Nguyen et al. (2020) مورد استفاده قرار گرفته است، ارزیابی می‌شود. این شبکه دارای ۳۷ لوله، ۲۲ گره مصرف و ۳ عدد مخزن بوده و فرض می‌شود ضریب و توان نشت مورد استفاده در معادله روزنه (معادله (۴)) به ترتیب 10^{-5} و $1/18$ است. شماتیک شبکه و الگوی مصرف روزانه به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است (برای دریافت سایر مشخصات شبکه مانند داده‌های ورودی

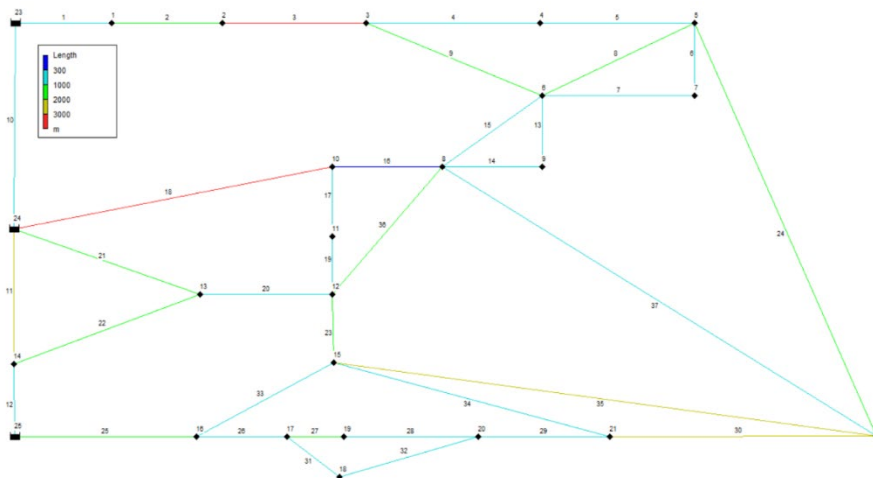


Fig. 3 A schematic of case study including 25-nodes
شکل ۳ ساختار شبکه مورد مطالعه (۲۵-گره‌ی)

اصلاحی در گره‌های i و j در تکرار $t+1$ ، $Q_{t+1,x}$ دبی لوله x در تکرار $t+1$ ، n توان در رابطه هیزن-ویلیامز و q_{oj} دبی برداشت گره j است. با حل هم‌زمان معادله‌های بالا مقادیر تصحیح‌شده دبی لوله‌ها و هد گره‌ها به دست می‌آید.

۳-۲- تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار

در مدل‌سازی هیدرولیکی سیستم‌های آب، در بیشتر موارد برآورد تقاضا با تحلیل مبتنی بر تقاضا و بدون توجه به فشار تعیین می‌شود. این مدل ممکن است نتایج غیرواقعی را به خصوص در شرایط خرابی شبکه ایجاد کند. رویکرد دیگر مدل‌سازی، تقاضای وابسته به فشار است که در آن، اگر فشار بالاتر از یک مقدار آستانه باشد، تصور می‌شود که تقاضای گره تحت تأثیر فشار نیست. تقاضای گره زمانی که فشار به زیر آستانه فشار کاهش می‌یابد کاهش یافته و زمانی که فشار به صفر کاهش می‌یابد تقاضا صفر می‌شود. این رویکرد واقع‌بینانه، تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار نام دارد (Naguib et al., 2019). به منظور اعمال رویکرد مبتنی بر فشار بر روی آنالیز هیدرولیکی سیستم‌ها، اولین گام یافتن معادله مناسبی است که همبستگی بین جریان خروجی گره و فشار گره را در نظر می‌گیرد. در سال‌های اخیر معادله‌های مختلفی برای تعیین رابطه هد-دبی مطرح شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به

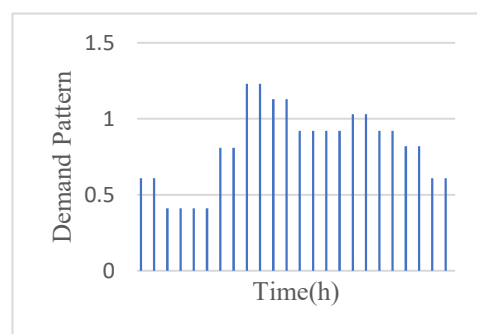


Fig. 4 Daily Demand Factors
شکل ۴ الگوی مصرف روزانه

شبیه‌سازی فشار گرهی و دبی لوله‌ها کمک گرفته می‌شود. به دلیل قدرت محاسباتی بالای این روش از آن در محاسبات هیدرولیکی نرم‌افزارهای معتبری مانند MikeNet، WaterCad، WaterGems، و Epanet بهره می‌گیرند. معادله‌های خطی شده افت لوله و پیوستگی جریان در لوله‌ها (Tabesh (2018)) به ترتیب بدین صورت است:

$$H_{t+1,oi} - H_{t+1,oj} - (nR_{ox}|Q_{t,ox}|^{n-1})Q_{t+1,x} = (1-n)R_{ox}Q_{t,ox}^n \quad x = 1, \dots, NP \quad (1)$$

$$\sum Q_{t+1,x} + q_{oj} = 0 \quad j = 1, \dots, N_j \quad (2)$$

در معادله‌های فوق، $H_{t+1,oi}$ و $H_{t+1,oj}$ به ترتیب هد

(Wagner et al. (1988), Bhave, Tabesh et al. (2014))

تمام لوله‌های شبکه موردنظر نشت کل در شبکه به صورت معادله زیر به دست می‌آید (Meirelles et al., 2019):

$$Q_L^{total} = \sum_{i=1}^{NP} Q_{L,i} \quad (5)$$

۲-۵- الگوریتم ژنتیک

بعد از ترسیم و ورود اطلاعات اولیه شبکه موردنظر در نرم‌افزار ایپانت، توابع کتابخانه‌ای ایپانت در نرم‌افزار قدرتمند متلب جهت بهینه‌سازی تابع هدف به کمک الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند GA، Pseudogenetic Algorithm و Global Gradient Algorithm ادغام می‌گردد (Eliades et al., 2016). این جعبه ابزار یک کتابخانه پیوند پویا با بسیاری از توابع برای انجام تجزیه و تحلیل هیدرولیک در محیط کدگذاری است. در تحقیق حاضر، الگوریتم ژنتیک، به عنوان یکی از شناخته‌شده‌ترین مدل‌های بهینه‌سازی، استفاده خواهد شد. این الگوریتم سعی می‌کند با رعایت قانون انتخاب طبیعی بهترین راه حل ممکن را برای مسائل بهینه‌سازی بیابد. علاوه بر این، این روش به طور گسترده‌ای برای بهینه‌سازی مسائل مربوط به برنامه‌ریزی منابع آب مورد استفاده قرار گرفته است. در واقع الگوریتم ژنتیک دارای قابلیت جستجو در فضای پیوسته و گسسته همراه با سرعت پاسخگویی بالا و سادگی است (Latifi et al., 2021). به طور دقیق‌تر، الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی جمعیت است که از فرآیند تکامل بیولوژیکی الهام گرفته شده است. در این الگوریتم، متغیرهای مسئله به صورت رشته‌های دوتایی که به نام ژن شناخته می‌شوند، تعریف می‌شوند. مجموعه‌ای از ژن‌ها یک کروموزوم را تشکیل می‌دهند که یکی از راه‌حل‌های ممکن برای مشکل است. روش بهینه‌سازی به گونه‌ای انجام می‌شود که جستجو به سمت یک راه حل بهینه‌گرایش پیدا کند. مطابق شکل ۳ ساختار اصلی یک الگوریتم ژنتیک این است که ابتدا جمعیت‌های اولیه کروموزوم‌ها به طور تصادفی ساخته می‌شوند. سپس تناسب هر کروموزوم با تابع هدف تعریف می‌شود. اپراتور انتخاب شده کروموزوم‌هایی را با تناسب بهتر در بین جمعیت انتخاب می‌کند. با استفاده از عملگرهای تزویج و جهش، جمعیت جدیدی تولید می‌شود.

(1981) و (1985) Germanopoulos اشاره کرد. از مقایسه کلیه روابط هد-دبی نتیجه گرفته می‌شود که رابطه واگنر به عنوان بهترین رابطه برای پیش‌بینی جریان خروجی مرتبط با فشار به کار می‌رود. از طرفی این رابطه پیچیده نبوده و به خوبی رفتار هیدرولیکی شبکه را مدل می‌کند (Gupta and Bhawe, 1996).

$$\begin{cases} q_j^{avl} = q_j^{req} & , H_j^{avl} \geq H_j^{des} \\ q_j^{avl} = q_j^{req} \left(\frac{H_j^{avl} - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}} \right)^{\frac{1}{n_j}} & , H_j^{min} < H_j^{avl} < H_j^{des} \\ q_j^{avl} = 0 & , H_j^{avl} \leq H_j^{min} \end{cases} \quad (3)$$

در این رابطه n_j توان رابطه بوده و بین ۱/۵ تا ۲ است. تاکنون با توجه به این که در نرم‌افزارهای تحلیل شبکه‌های آبرسانی، مبنای تحلیل بر پایه تقاضا تعریف شده بود محققین در صورت لزوم بهره‌گیری از تحلیل مبتنی بر فشار نیازمند استفاده از برنامه‌های جانبی (مانند CWSNet، epanet-emitter و EPANET-IMNO) برای ادغام تحلیل مبتنی بر فشار به نرم‌افزار مربوطه بوده‌اند. با ارائه نسخه جدید نرم‌افزار ایپانت (نسخه ۲/۲) در تاریخ ۲۶ فوریه ۲۰۲۰ و اضافه کردن ترم تحلیل مبتنی بر فشار (بر مبنای رابطه واگنر) دیگر نیازی به استفاده از برنامه‌های جانبی نخواهد بود.

۲-۴- نشت

مدل‌های تحلیل هیدرولیکی مختلفی برای تعیین رابطه نشت-فشار وجود دارد. یکی از ساده‌ترین روش‌های شبیه‌سازی نشت در شبکه آبرسانی، فرض در نظر گرفتن مقطع نشت به صورت یک روزنه است (Germanopoulos, 1985).

$$Q_{L,i} = C_L \times L_i \times (P_i^{av})^n \quad (4)$$

در این معادله که در کتابخانه نرم‌افزار ایپانت هم مورد استفاده قرار گرفته است n توان فشار است و با توجه به مشخصات لوله و نوع سوراخ منفذ بین ۰/۵ و ۱/۵ متغیر است (Giustolisi et al., 2008). با فرض وجود نشت در

۲-۷- تابع هدف و محدودیت‌ها

تابع هدف

تابع‌های هدف بهینه‌سازی به کار گرفته شده توسط پژوهش‌گران در جدول ۱ مشاهده می‌شود. برخی از آن‌ها مانند (Nguyen et al. (2020)، (Latifi et al. (2021) و (Fernandez Garcia and nabola (2020) با در نظر گرفتن بعد انرژی تولیدی توسط PATها (معادله‌های (۷) الی (۹)) به تعریف تابع‌های هدف بهینه‌سازی پرداخته‌اند. در برخی از پژوهش‌ها مانند (Tabesh and Hoomehr (2009) و (Jafari et al. (2015) برای بهینه‌سازی تعداد و موقعیت PATها در شبکه‌های آبرسانی از همان توابع هدف کاهش نشت در شبکه (معادله‌های (۱۰) و (۱۱)) بهره گرفته شده است. در این حالت ابتدا موقعیت و تعداد بهینه شیرهای فشارشکن در شبکه مورد نظر به کمک این توابع هدف تعیین گردیده و سپس همه یا تعدادی از شیرهای فشارشکن با PATها جایگزین گردیده است. دقت شود که عملاً قرار دادن PATها در محل‌های بهینه شیرهای فشارشکن ممکن است به حداکثر شدن تولید انرژی در شبکه آبرسانی منجر نشده و بنابراین بهتر است سراغ توابع هدفی با رویکرد هم‌زمان تولید انرژی و کاهش نشت در شبکه ((Giugni et al. (2014) و (Meiralles et al. (2017) رفت (معادله‌های (۱۲) و (۱۳)).

همان گونه که قبل‌تر بیان شد به دلیل اهمیت کاهش اثرات مخرب گازهای گلخانه‌ای بر روی سلامت بشر و محیط زیست، هدف پژوهش حاضر معرفی تابع هدف جدیدی با منظور نمودن ترم زیست‌محیطی (هزینه اجتماعی گازهای گلخانه‌ای) به توابع هدف بهینه‌سازی PATها (معادله (۶)) جهت برآورده کردن هم‌زمان ۱- مدیریت فشار در یک شبکه آبرسانی (با محوریت کاهش نشت در لوله‌ها)، ۲- تولید برق از منبع تجدیدپذیر (با محوریت افزایش درآمد ناشی از تولید انرژی) و ۳- کاهش اثر گازهای گلخانه‌ای در نتیجه جایگزینی انرژی تجدیدپذیر به جای انرژی تولیدی نیروگاه‌هایی مانند نیروگاه‌های فسیلی است.

حلقه تکراری تا زمانی که معیار خاتمه برآورده شود اجرا می‌گردد (Jafari et al., 2015). در واقع الگوریتم ژنتیک سعی می‌کند با رعایت قانون انتخاب طبیعی، بهترین راه حل ممکن را برای مسائل بهینه‌سازی بیابد. علاوه بر این، الگوریتم ژنتیک به طور گسترده‌ای برای بهینه‌سازی مسائل مربوط به برنامه‌ریزی منابع آب به ویژه مدیریت فشار در شبکه‌های آبرسانی مورد استفاده قرار گرفته است (Avila et al., 2021, Jafari et al., 2015, Latifi et al., 2021).

۲-۶- هزینه اجتماعی گازهای گلخانه‌ای

در دهه‌های اخیر، آگاهی از کمبود منابع انرژی و تأثیر فعالیت‌های انسانی بر محیط‌زیست افزایش یافته است. سیستم‌های آب شامل زیرساخت‌های وسیعی بوده که دائماً با چالش ارائه خدمات با کیفیت بالا اما از نظر اقتصادی پایدار مواجه است. به عبارتی پایداری سیستم انتقال آب نیازمند گسترش بازده انرژی، کاهش افت آب و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن است. بدین منظور مطالعات زیادی جهت تحلیل بازده انرژی و اثرات زیست‌محیطی در تولید CO2 صورت گرفته است (Arora et al., 2020, Freni and Sambiti, 2017, Lam et al., 2017, Aberilla et al., 2020, Sambito and Freni, 2017). امروزه برای درک بهتر اثرات مخرب گازهای گلخانه‌ای به خصوص دی‌اکسید کربن از مفهومی به نام هزینه اجتماعی استفاده می‌شود. مطابق گزارش کنگره آمریکا (۷ ژوئن ۲۰۲۱)، هزینه اجتماعی گازهای گلخانه‌ای به صورت برآورد مالی اثرات ناشی از انتشار یک تن اضافی از آن گاز در یک سال است. به عبارت دیگر هزینه اجتماعی یک اثر خارجی است که از فعالیت اقتصادی یا اجتماعی یک گروه از افراد ناشی می‌شود و بر گروه دیگری تأثیر می‌گذارد، در حالی که این اثرات به طور کامل توسط گروه محاسبه یا جبران نشده و به تولیدکننده پرداخت نمی‌شود. در صنعت برق، آلودگی ناشی از تولید برق یک هزینه اجتماعی است، زیرا باعث آسیب به جامعه و محیط زیست می‌شود، بنابراین هزینه‌های زیست‌محیطی اساساً یک هزینه خارجی منفی و یک هزینه واقعی برای اعضای جامعه است که صاحبان نیروگاه‌ها آن را در این هزینه لحاظ نمی‌کنند (Mousavi and Sadatnejad, 2021).

در معادله (۶) فرض می‌شود در تمام ایام سال نشت در لوله‌های شبکه وجود داشته (ndays=365) و تعداد روزهای کارکرد PATها در طول سال، ۳۶۰ روز (ndays_{PAT}) است.

$$\max OF = \frac{1}{1000} (ndays_{PAT} \times (t_e + sc) \times P_{total}) + 3.6 \times ndays \times t_a \times (Q_{lbPAT} - Q_{laPAT}) \quad (6)$$

جدول ۱ توابع هدف بهینه‌سازی PATها

Table 1 Optimization Object Functions of PATs

Ref	OF	Eq.
Nguyen et al. (2020)	$\max F = \sum \gamma \times Q \times \theta \times \eta$	(۷)
Latifi et al. (2021)	$\min C_T = C_P + C_{Pat} - B_{Pat}$	(۸)
Fernandez Garcia and nabola (2020)	$\max E = 1/1000 \sum HP \times \Delta t$	(۹)
Tabesh and Hoomehr.(2009) and Jafari et al. (2015)	$\min \sum [(P_i - P_{min})^2]$	(۱۰)
	$\min \sum Q_L$	(۱۱)
Giugni et al. (2014)	$\max OF = \sum Q_i \Delta H_i - \sum [\alpha (P_i - P_{min})^2]$	(۱۲)
Meirelles et al.(2017)	$\max OF = \sum \left[\frac{t_e \gamma Q H \eta}{1000} + \sum t_a (Q_{j1} - Q_{j2}) 3600 \right]$	(۱۳)

نتایج مرجع (Giugni et al. (2014) بهره گرفته شده است. ابتدا به جهت مقایسه بهتر نتایج و از آنجا که در تابع هدف به کار گرفته شده در پژوهش (Giugni et al. (2014) پارامتر هزینه استفاده نشده است، پارامترهای هزینه شامل تعرفه آب، تعرفه انرژی و هزینه اجتماعی از معادله (۶) هم حذف گردیده و انرژی تولیدی توسط PATها براساس سناریوهای تعریف شده در (Nguyen et al. (2020) شامل شبکه تجهیز به ۱ عدد PAT با حداقل توان تولیدی ۴۰۰ وات در روز (سناریوی ۱)، ۲ عدد PAT با حداقل توان تولیدی ۱۵۰۰ وات در روز (سناریوی ۲) و ۳ عدد PAT با حداقل توان تولیدی ۷۵۰ وات در روز (سناریوی ۳) با نتایج شبکه آبرسانی ۲۵-گره‌ی مرجع (Giugni et al. (2014) در جدول ۲ و شکل ۵ مقایسه گردیده است.

با بهینه‌سازی تابع هدف جدید به کمک الگوریتم ژنتیک، بهترین محل نصب PATها به ازای سناریوی ۱ در محل لوله شماره ۲۰، سناریوی ۲ در محل لوله‌های شماره ۲۰ و ۱۸ و سناریوی ۳ در محل لوله‌های شماره ۲۰ (PAT1)، ۱ (PAT2) و ۱۸ (PAT3) و کاملاً مطابق با نتایج (Giugni et al. (2014) به دست آمد. (Giugni et al. (2014) تولیدی PATها را به ازای راندمان ۱۰۰٪ بررسی کرده است در حالی که در عمل این راندمان هیچ‌گاه اتفاق نمی‌افتد و

محدودیت‌های مسئله بهینه‌سازی

هرگونه مسئله بهینه‌سازی از جمله بهینه‌سازی PATها در شبکه آبرسانی تابع یک سری محدودیت‌هایی است. در یک شبکه آبرسانی ارائه خدمات به مصرف کنندگان با حفظ فشار و جریان آب کافی اصلی‌ترین محدودیت برای طراحان شبکه است. معادله‌های بقای انرژی و بقای جرم (معادله‌های ۱ و ۲) که پیش‌تر در توضیح روش گرادیان بیان شدند به عنوان دو محدودیت اصلی مسائل تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های آبرسانی هستند که توسط نرم‌افزار ایپانت بررسی می‌شوند. علاوه بر قیدهای مذکور، می‌بایست محدودیت فشار حداقل و حداکثر هر گره مصرف (معادله ۱۴) و قید حداقل توان تولیدی هر PAT در بهینه‌سازی اعمال گردد.

$$H_i^{des} - \varepsilon \leq H_i \leq H_i^{min} + 60 = H_i^{max}(m) \quad (14)$$

(Garcia and Nabola, 2020, Moazeni and khazaei, 2021)

در معادله بالا ε برابر ۵ متر فرض می‌شود (Tabesh and Vaseti, 2008).

۳- نتایج و بحث

برای صحت سنجی نتایج بهینه‌سازی تابع هدف جدید، از

اکسید کربن $0.153 \$/Kwh$ (ترازنامه انرژی ایران) در نظر گرفته می‌شود. نتایج بهینه‌سازی تابع هدف جدید (آب - انرژی - محیط زیست) نیز نصب ۳ عدد PAT در همان محل لوله‌های شماره ۲۰ (PAT1)، ۱ (PAT2) و ۱۸ (PAT3) را به عنوان بهترین پاسخ مسئله معرفی می‌کند. شکل ۸ و شکل ۹ به ترتیب دبی عبوری و توان تولیدی هر کدام از PATها را در شبانه‌روز نشان می‌دهد. در شکل ۸ مشاهده می‌شود محدوده عبور جریان برای PAT1 بین ۸۶-۲۸/۵، PAT2 بین ۲۳/۳-۱۰/۵ و PAT3 بین ۶۷-۲۳/۸ لیتر بر ثانیه متغیر است و بنابراین با توجه به این اعداد و کاتالوگ سازنده پمپها می‌توان نوع پمپ مورد استفاده به عنوان توریین برای هر کدام را تعیین کرد.

آنالیز اقتصادی

دوره بازگشت سرمایه (معادله (۱۵)) یکی از اساسی‌ترین موارد در تصمیم‌گیری دولت‌ها و سازمان‌ها جهت انجام پروژه‌های عمرانی است. روشن است که هرچه دوره بازگشت سرمایه کوتاه‌تر باشد، سرمایه‌گذاری در پروژه مورد نظر توجیه‌پذیرتر خواهد بود.

$$PP = \frac{TC}{E \times ndays_{pat} \times te} \quad (15)$$

arcia and Nabola (2020) با توجه به هزینه‌های خرید، نصب، کارهای عمرانی، تعمیر و نگهداری PATها به تحلیل اقتصادی شبکه ۲۵-گرهه پرداخت و دوره بازگشت سرمایه هر یک از PATهای واقع در لوله‌های شماره ۲۰، ۱ و ۱۸ را به ترتیب ۳، ۵ و ۲۱ سال تعیین کرد. با توجه به تعرفه انرژی و هزینه اجتماعی گاز دی اکسید کربن در کشور ایران مشاهده می‌شود که هزینه اجتماعی گاز دی اکسید کربن تقریباً معادل ۱۵٪ تعرفه انرژی است.

بنابراین مطابق با (Nguyen et al. (2020) راندمان ۶۵٪ برای تابع هدف جدید منظور گردیده است.

همان‌طور که در جدول ۲ و شکل ۵ و شکل ۶ نیز مشخص است با افزایش تعداد PATها از ۱ به ۳ عدد، انرژی تولیدی افزایش و نشت در شبکه کاهش می‌یابد و بنابراین بهینه‌ترین پاسخ شبکه مورد نظر نصب ۳ عدد PAT در محل لوله‌های شماره ۲۰، ۱۸ و ۱ تعیین می‌گردد. جدول ۲ مجموع انرژی تولیدی و نشت کل شبکه را به ازای هر یک از سناریوها با نتایج (Giugni et al. (2014) مقایسه نموده است. اختلاف ناچیز نتایج پژوهش حاضر با Giugni et al. (2014) به دلیل ثابت فرض نمودن هد تنظیمی شیرهای فشارشکن (۲۵ متر) در این پژوهش بوده در حالی که مرجع مذکور از هدهای تنظیمی متغیر بهره گرفته است.

پس از صحت‌سنجی نتایج و مشاهده پاسخ یکسان تابع هدف جدید در تعیین مناسب‌ترین محل نصب PATها در هر سه سناریوی موجود نسبت به نتایج مرجع، در شکل ۷ به عنوان نمونه افت هد و دبی عبوری از PAT واقع در محل لوله شماره ۱۸ (PAT3) ترسیم شده است. در این شکل مشاهده می‌گردد در زمان‌های اوج مصرف (۰۰:۰۹ - ۰۰:۱۸) جریان عبوری از PAT افزایش و افت هد کاهش یافته که این می‌تواند در نتیجه تغییر آرام سطح آب مخزن (حتی زمانی که الگوهای مصرف متفاوتی وجود دارد) باشد.

از آنجا که تابع هدف جدید (معادله (۶)) از جنس تابع هزینه تعریف شده است، فرض می‌شود شبکه مورد بررسی در کشور ایران واقع شده و بنابراین با توجه به نرخ ارز نیمایی در زمان نگارش پژوهش (هر \$۱ معادل ۲۴۰۰۰۰ ریال)، تعرفه آب $0.125 \$/m^3$ ، تعرفه انرژی $0.153 \$/Kwh$ (Latifi et al. (2021)) و هزینه اجتماعی کاهش گاز دی

جدول ۲ مقایسه نتایج انرژی تولیدی و نشت در شبکه

Table 2 Comparisons of energy production and leakage

Scenarios	This study		Giugni et al. 2014	
	Energy (Kwh)	Leakage (L/s)	Energy (Kwh)	Leakage (L/s)
No PAT	-	701.29	-	-
1 PAT	87.83	503.05	84.04	495.2
2 PAT	174.49	490.34	178.95	485.6
3 PAT	209.69	457.90	212.5	456.6

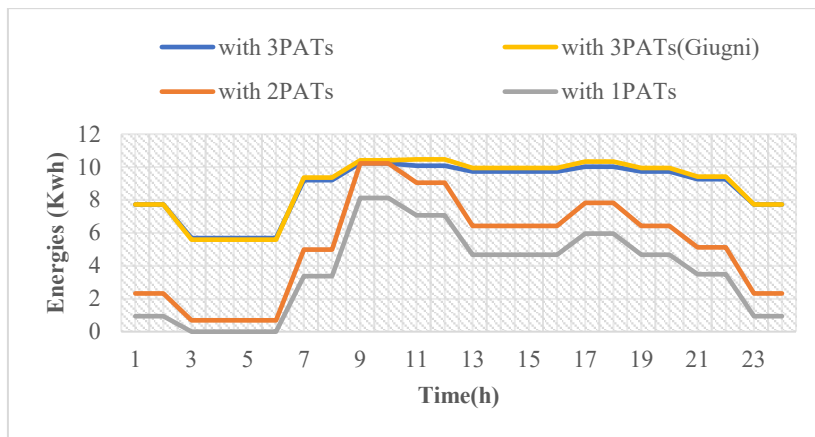


Fig. 5 Comparisons of Energy Production in WDN during 24h
 شکل ۵ مقایسه نتایج انرژی تولیدی شبکه آبرسانی در شبانه‌روز

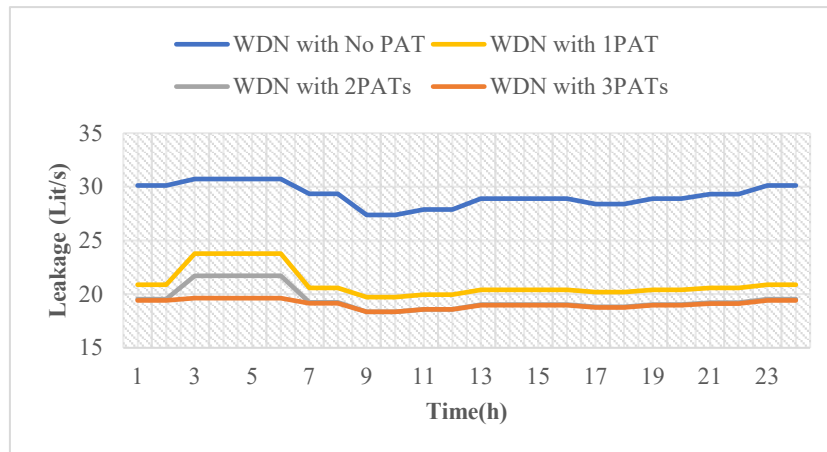


Fig. 6 Comparisons of Leakage in WDN during 24h
 شکل ۶ مقایسه نتایج نشت شبکه آبرسانی در شبانه‌روز

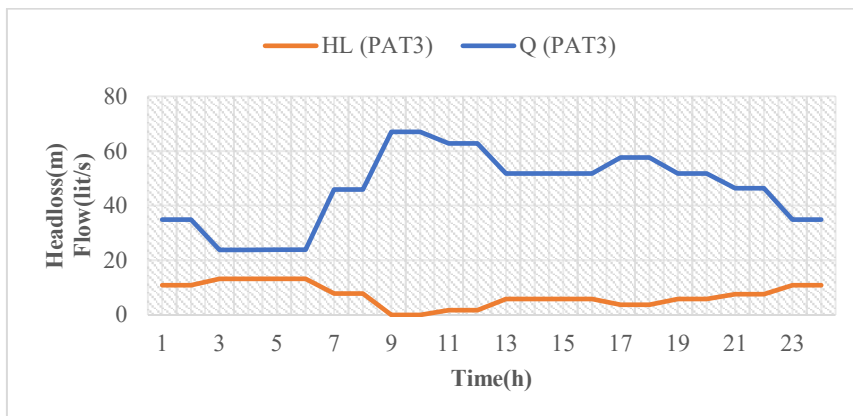


Fig. 7 Headloss and flow across PAT3
 شکل ۷ افت هد و جریان عبوری از پمپ به عنوان توربین شماره ۳

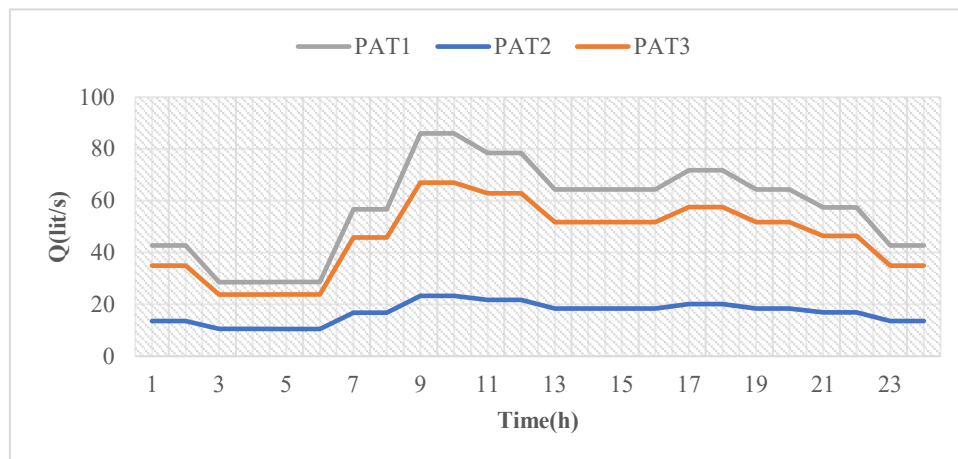


Fig. 8 Flow across PATs

شکل ۸ دبی عبوری از پمپ به عنوان توربین

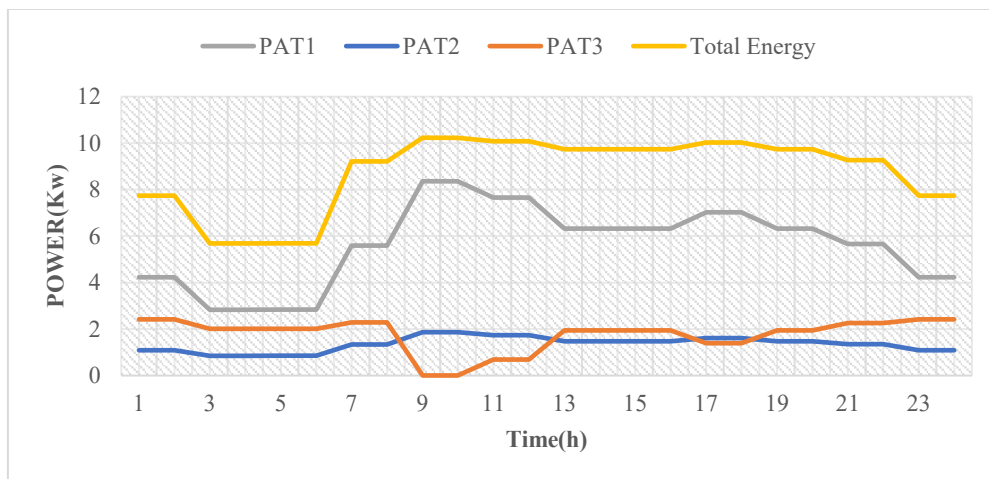


Fig. 9 Power Generations by every PATs

شکل ۹ توان تولیدی توسط هر پمپ به عنوان توربین

نرم‌افزار متلب، بهینه‌سازی موقعیت PATها به کمک الگوریتم ژنتیک انجام گرفت. برای این منظور تابع هدف جدیدی با رویکرد هم‌زمان مدیریت فشار در یک شبکه آبرسانی (با محوریت کاهش نشت در لوله‌ها)، تولید برق از منبع تجدیدپذیر (با محوریت افزایش درآمد ناشی از تولید انرژی) و کاهش اثر گازهای گلخانه‌ای در نتیجه جایگزینی انرژی تجدیدپذیر به جای انرژی تولیدی نیروگاه‌هایی مانند نیروگاه‌های سوخت فسیلی معرفی گردید. به منظور صحت‌سنجی نتایج بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، ابتدا پارامترهای هزینه (تعرفه آب، تعرفه انرژی و هزینه اجتماعی گاز دی اکسید کربن) از تابع هدف جدید حذف گردید و نتایج حاصل با نتایج Giugni et al. (2014) مقایسه شد.

اگر این عدد تقریبی به درآمد تولید برق انرژی تجدیدپذیر (مخرج کسر معادله بالا) اضافه شود، دوره بازگشت سرمایه هر یک از PATها به ترتیب ۴/۷، ۷/۸ و ۳۲/۷ ماه کاهش را نشان خواهد داد. این میزان کاهش در دوره بازگشت سرمایه، اهمیت در نظر گرفتن بعد زیست‌محیطی انرژی PATها را بیش از پیش نمایان می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پس از ورود اطلاعات اولیه شبکه آبرسانی ۲۵-گرهه (با فرض قرار داشتن شبکه در کشور ایران) به نرم‌افزار منبع‌باز ایپانت و ادغام کتابخانه این نرم‌افزار به

H_j^{min}	حداقل هد در گره j (m)
H_j^{des}	حداقل هد مورد نیاز در گره j (m)
$Q_{L,i}$	دبی خروجی محل نشت در لوله i (Lit/s)
C_L	ضریب ثابت نشت (-)
L_i	طول لوله i (m)
P_i^{av}	فشار متوسط در طول لوله i (m)
γ	وزن مخصوص آب (N/m^3)
θ	افت هد عبوری از هر PAT (m)
η	راندمان PAT (-)
C_P	هزینه انرژی مصرفی جهت پمپاژ (\\$)
C_{Pat}	مجموع هزینه‌های خرید، نگهداری و ... PATها (\\$)
B_{Pat}	سود حاصل از تولید انرژی توسط PAT (\\$)
E	مجموع انرژی تولیدی توسط PATها در شبکه (Kwh/days)
HP	توان تولیدی (Watt)
Δt	فاصله زمانی (h)
P_i	فشار موجود در گره i (m)
P_{min}	حداقل فشار در گره (m)
Q_i	دبی عبوری از PAT شماره i (Lit/s)
ΔH_i	افت فشار ناشی از PAT شماره i (m)
α	ضریب جریمه فشار اضافه در گره‌ها (-)

پس از حصول اطمینان از عملیات بهینه‌سازی، تابع هدف جدید به منظور تعیین مناسب‌ترین موقعیت نصب PATها در شبکه ۲۵-گره‌ای تحلیل گردید و در نهایت نصب سه عدد PAT در محل لوله‌های شماره ۲۰، ۱۸ و ۱ به عنوان بهترین حالت بهینه‌سازی در شبکه معرفی شد.

همان گونه که انتظار می‌رود با افزایش تعداد PATها نشت به میزان قابل توجهی کاهش یافته (از ۷۰۱/۲۹ در حالت بدون PAT تا ۴۵۷/۹ لیتر بر ثانیه در حالت نصب ۳ عدد PAT هم‌زمان) و همچنین انرژی تولیدی این منابع تجدیدپذیر افزایش می‌یابد.

از طرفی اهمیت بسیار بالای مسائل زیست‌محیطی در حفظ منابع طبیعی و سلامت بشر و از طرف دیگر مشکلات مالی دولت‌ها (به خصوص کشورهای در حال توسعه) یکی از چالش‌های اساسی در خصوص جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر به جای انرژی تولیدی ناشی از سوخت‌های فسیلی و ... است. در پایان با توجه به این که دوره بازگشت سرمایه یکی از پارامترهای مهم در تصمیم‌گیری پروژه‌های عمرانی است، تأثیر ترم هزینه اجتماعی گازهای گلخانه‌ای (با تأکید بر گاز دی اکسید کربن) بر دوره بازگشت سرمایه مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج حاصل کاهش قابل توجه دوره بازگشت سرمایه را برای PATهای نصب‌شده در شبکه مورد بحث نشان داد و در نتیجه، اضافه کردن ترم زیست‌محیطی به توابع هدف بهینه‌سازی شبکه‌ها، بر لزوم به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر (مانند پمپ به عنوان توربین‌ها) در شبکه‌های آبرسانی تأکید خواهد کرد.

۵- فهرست علائم

$Q_{j1} (Q_{ibPAT})$	نشت در گره j قبل از نصب PAT (Lit/s)	NP	تعداد لوله‌ها (-)
$Q_{j2} (Q_{iaPAT})$	نشت در گره j بعد از نصب PAT (Lit/s)	NJ	تعداد گره‌ها (-)
t_e	تعرفه انرژی (\\$/Kwh)	R_{ox}	ثابت معلوم مقاومت لوله x (-)
t_a	تعرفه آب (\\$/ m^3)	q_j^{avl}	مقدار برداشت ممکن در گره j (Lit/s)
sc	هزینه اجتماعی انتشار گازهای گلخانه‌ای (\\$/Kwh)	q_j^{req}	مقدار برداشت مورد نیاز در گره j (Lit/s)
		$H_j^{avl} (H_j)$	هد موجود در گره j (m)

Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing.

De Marchis, M., Milici, B., Volpe, R. and Messineo, A. (2016). Energy saving in water distribution network through pump as turbine generators: Economic and environmental analysis. *Energies* 9(11): 877.

Derakhshan, S. and Nourbakhsh, A. (2008). Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation. *Experimental thermal and fluid science* 32(8): 1620-1627.

Eliades, D. G., Kyriakou, M., Vrachimis, S. and Polycarpou, M. M. (2016). EPANET-MATLAB toolkit: An open-source software for interfacing EPANET with MATLAB. *Proc. 14th international conference on computing and control for the water industry (ccwi)*.

Fecarotta, O., Aricò, C., Carravetta, A., Martino, R. and Ramos, H. M. (2015). Hydropower potential in water distribution networks: Pressure control by PATs. *Water resources management* 29(3): 699-714.

Fernández García, I. and Mc Nabola, A. (2020). Maximizing hydropower generation in gravity water distribution networks: Determining the optimal location and number of pumps as turbines. *Journal of Water Resources Planning and Management* 146(1): 04019066.

Germanopoulos, G. (1985). A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models. *Civil Engineering Systems* 2(3): 171-179.

Giugni, M., Fontana, N. and Ranucci, A. (2014). Optimal location of PRVs and turbines in water distribution systems. *J. Water Resour. Plan. Manag* 140(9): 6014004.

Giustolisi, O., Savic, D. and Kapelan, Z. (2008). Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks, *American Society of Civil Engineers*.

Gupta, R. and Bhave, P. R. (1996). Reliability-based design of water-distribution systems. *Journal of Environmental Engineering* 122(1): 51-54.

Jafari, R., Khanjani, M. J. and Esmacilian, H. R. (2015). Pressure management and electric power production using pumps as turbines. *Journal-American Water Works Association* 107(7): E351-E363.

Kohansal, M. and Bahraminasab, M. (2020).

$ndays_{PAT}$ تعداد روزهای کارکرد PATها در طول سال (-)

$ndays$ تعداد روزهای سال که نشت در شبکه وجود دارد (-)

P_{total} مجموع توان تولیدی توسط PATها در شبکه (Watt)

ε انحراف مجاز فشار در گره‌ها از فشار هدف (m)

PP دوره بازگشت سرمایه (Year)

TC مجموع هزینه‌های خرید، نصب و نگهداری PATها (\$)

References

منبع‌ها

Adedeji, K. B., Hamam, Y., Abe, B. T. and Abu-Mahfouz, A. M. (2017). Towards achieving a reliable leakage detection and localization algorithm for application in water piping networks: An overview. *IEEE Access* 5: 20272-20285.

Arora, M., Nair, S., Malano, H. and George, B. (2020). A combined simulation-optimisation modelling framework for assessing the energy use of urban water systems. *Journal of Environmental Management* 274: 111166.

Ávila, C. A. M., Sánchez-Romero, F.-J., López-Jiménez, P. A. and Pérez-Sánchez, M. (2021). Leakage management and pipe system efficiency. Its influence in the improvement of the efficiency Indexes. *Water* 13(14): 1909.

Balacco, G., Binetti, M., Capurso, T., Stefanizzi, M., Torresi, M. and Piccinni, A. F. (2020). Pump as Turbine for the Energy Recovery in a Water Distribution Network: Two Italian (Apulian) Case Studies. *Environmental Sciences Proceedings* 2(1): 1.

Bhave, P. R. (1981). Node flow analysis distribution systems. *Transportation engineering journal of ASCE* 107(4): 457-467.

Campisano, A. and Creaco, E. (2020). Advances in modeling and management of urban water networks, *MDPI*. 12: 2956.

Chabalala, D. T., Ndambuki, J. M., Salim, R. W. and Rwanga, S. S. (2019). Impact of climate change on the rainfall pattern of Klip River catchment in Ladysmith, KwaZulu Natal, South Africa. *IOP*

- Distribution Networks. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. ISSN: 2278-0181, Vol. 8 Issue 08.
- Nguyen, K. D., Duc Dai, P., Quoc Vu, D., Cuong, B. M., Tuyen, V. P. and Li, P. (2020). A MINLP model for optimal localization of pumps as turbines in water distribution systems considering power generation constraints. *Water* 12(7): 1979.
- Sadeghi, H. and Biabany Khameneh, K. (2014). Electricity Generation From Renewable Sources And Environmental Emissions In Iran. *Iranian Journal of Energy* 17(3): 0-0.
- Sambito, M. and Freni, G. (2017). LCA methodology for the quantification of the carbon footprint of the integrated urban water system. *Water* 9(6): 395.
- Tabesh, M. (2018). Advanced modeling of water distribution networks, University of Tehran Press, Tehran, Iran. (In Persian).
- Tabesh, M. and Vaseti, M. (2006). "Leakage reduction in water distribution networks by minimizing the excess pressure. " *Iran-Water Resources Research* 2(2): 53-66.
- Tabesh, M. and Hoomehr, S. (2009). "Consumption management in water distribution systems by optimizing pressure reducing valves' settings using genetic algorithm. " *Desalination and Water Treatment* 2(1-3): 96-102.
- Tabesh, M., Shirzad, A., Arefkhani, V. and Mani, A. (2014). "A comparative study between the modified and available demand driven based models for head driven analysis of water distribution networks. " *Urban Water Journal* 11(3): 221-230.
- Vairavamorthy, K. and Lumbers, J. (1998). "Leakage reduction in water distribution systems: Optimal valve control. " *Journal of hydraulic Engineering* 124(11): 1146-1154.
- Wagner, J. M., Shamir, U. and Marks, D. H. (1988). "Water distribution reliability: simulation methods. " *Journal of Water Resources Planning and Management* 114(03).
- Evaluating the relationship between energy consumption and pollution with economic growth in line with overall environmental policies. *Quarterly Journal of The Macro and Strategic Policies* 7(28): 500-525.
- Latifi, M., Farahi Moghadam, K. and Naeeni, S. T. (2021). Pressure and energy management in water distribution networks through optimal use of Pump-As-Turbines along with pressure-reducing valves. *Journal of Water Resources Planning and Management* 147(7): 04021039.
- Lima, G. M., Junior, E. L. and Brentan, B. M. (2017). Selection of pumps as turbines substituting pressure reducing valves. *Procedia Engineering* 186: 676-683.
- Mahdavi, M. M., Hosseini, K., Behzadian, K., Ardehsir, A. and Jalilsani, F. (2010). Leakage control in water distribution networks by using optimal pressure management: A case study. *Water Distribution Systems Analysis*: 1110-1123.
- Mathye, R. P., Scholz, M. and Nyende-Byakika, S. (2022). Optimal Pressure Management in Water Distribution Systems: Efficiency Indexes for Volumetric Cost Performance, Consumption and Linear Leakage Measurements. *Water* 14(5): 805.
- Moazeni, F. and Khazaei, J. (2021). Optimal energy management of water-energy networks via optimal placement of pumps-as-turbines and demand response through water storage tanks. *Applied Energy* 283: 116335.
- Mousavi, R. S. M. and SADATINEJAD, S. J. (2021). Calculation of environmental costs of electricity generation (Case study of thermal power plants in Tehran).
- Nabi Bid Hendi, G., Daryabeigi Zand, A. and Rabiee Abyaneh, M. (2021). Assessing the Life-cycle Greenhouse gas (GHG) Emissions of Renewable and Fossil Fuel Energy Sources in Iran. *Environmental Energy and Economic Research* 5(2): 1-9.
- Naguib, A. H., Razik, M. H. A., Fergala, M. A. and Elagroudy, S. A. (2019) Reliability of Water