

Journal of Water and Wastewater, Vol. 31, No.3, pp: 12-25

Optimization of Intermittent Water Supply Systems Using Particle Swarm Optimization Algorithm and Pressure Driven Hydraulic Analysis

M. Tabesh¹, R. Safaiee Broujeni², A. Shirzad³, M. Shokoohi²

1. Prof., Center of Excellence for Engineering and Management of Civil Infrastructures, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran (Corresponding Author) mtabesh@ut.ac.ir
2. MSc Student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Assist. Prof., Faculty of Civil Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

(Received Apr. 10, 2019 Accepted July 24, 2019)

To cite this article:

Tabesh, M., Safaiee Broujeni, R., Shirzad, A., Shokoohi, M. 2020. "Optimization of intermittent water supply systems using particle swarm optimization algorithm and pressure driven hydraulic analysis" Journal of Water and Wastewater, 31(3), 12-25. Doi: 10.22093/wwj.2019.108365.2553 (In Persian)

Abstract

In this research, intermittent water supply is optimized using pressure driven hydraulic analysis and particle swarm optimization algorithm with the aim of maximizing the uniformity of water distribution in the network and reliability. In the following, by calculating the resiliency as an efficiency criterion, system performance is evaluated. Obtained results from pressure driven hydraulic analysis and demand driven hydraulic analysis are compared. In this regard, the particle swarm optimization algorithm and the EPANET hydraulic analysis model are linked. Pressure driven hydraulic analysis is performed by applying some modifications on the hydraulic calculation process. The proposed model is evaluated on a sample network in several water shortage scenarios. According to the obtained results, the objective function (uniformity of water distribution) has higher values for the scenarios with lower water shortage, so that the maximum value is relevant to the scenario without water shortage. The values of the objective function for scenarios with pressure driven hydraulic analysis are 20% more than its values for scenarios with demand driven hydraulic analysis. By comparing the values obtained for system efficiency criteria it can be observed that the network resiliency and nodal resiliency for most of the scenarios with demand driven hydraulic analysis are more than their values for scenarios with pressure driven hydraulic analysis. This is because of the independency of nodal discharge from nodal pressure in demand driven hydraulic analysis that leads to unreal values for nodal discharges and therefore, hydraulic failure accrues rarely. The maximum value achieved for resiliency is around 99% which is relevant to efficiency threshold of 70% in nodal form. Uniformity and equity of water distribution between demand nodes and as a result satisfaction of stakeholders can be maximized by using optimization models. Employing pressure driven hydraulic analysis models makes it possible to simulate the behavior of water distribution networks realistically.

Keywords: Water Shortage, Intermittent Supply, Pressure Driven Hydraulic Analysis, Particle Swarm Optimization Algorithm, Resiliency.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۱، شماره ۳، صفحه: ۲۵-۱۲

بهینه‌سازی سامانه‌های تأمین آب نوبتی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار

مسعود تابش^۱، رضا صفایی بروجنی^۲، اکبر شیرزاد^۳، میثم شکوهی^۲

- ۱- استاد دانشکده مهندسی عمران و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌های عمرانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) mtabesh@ut.ac.ir
- ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
- ۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

دریافت ۹۸/۱/۲۱ پذیرش ۹۸/۵/۲

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

تابش، م.، صفایی بروجنی، ر.، شیرزاد، ا.، شکوهی، م.، ۱۳۹۹. "بهینه‌سازی سامانه‌های تأمین آب نوبتی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار" مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۳)، ۲۵-۱۲. Doi: 10.22093/wwj.2019.108365.2553

چکیده

در این پژوهش با استفاده از تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، بهینه‌سازی تأمین آب نوبتی با هدف بیشینه‌سازی یکنواختی توزیع آب در شبکه و قابلیت اطمینان انجام شد. در ادامه با محاسبه برگشت‌پذیری به‌عنوان یک معیار کارایی به ارزیابی عملکرد سیستم پرداخته شد و نتایج حاصل از تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار با تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا مقایسه شد. به این منظور الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و مدل تحلیل هیدرولیکی EPANET تلفیق شد و با اعمال تغییراتی در روند محاسبات هیدرولیکی، امکان تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار نیز مهیا شد. مدل ارائه شده، بر روی یک شبکه نمونه در چندین سناریوی کم‌آبی بررسی شد. مطابق نتایج به‌دست آمده، تابع هدف و یا به‌عبارتی یکنواختی توزیع آب برای سناریوهایی با تنش آبی کمتر، مقدار بیشتری دارد، به طوری که بیشترین مقدار، در حالت بدون کمبود حاصل شد. همچنین مقدار تابع هدف برای سناریوهای با تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار در حدود ۲۰ درصد بیشتر از مقدار آن برای سناریوهای با تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا به‌دست آمد. با مقایسه مقدار به‌دست آمده برای معیارهای کارایی سیستم، مشاهده شد که میزان برگشت‌پذیری شبکه‌ای و گرهی در اکثر سناریوهای با تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا بیشتر از سناریوهای با تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار بود که در توجیه آن می‌توان گفت که در تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا از آنجایی که تأمین آب، بدون در نظرگیری مقدار فشار گرهی انجام می‌شود، بنابراین مقدار دبی‌ها واقعی نیست و حالت شکست در تأمین آب مورد تقاضای گره‌ها به‌ندرت رخ می‌دهد. همچنین معیار برگشت‌پذیری، با بیشترین مقدار در حدود ۹۹ درصد برای آستانه کارایی ۷۰ درصد و در حالت گرهی به‌دست آمد. با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی، یکنواختی و عدالت توزیع آب بین گره‌های مصرف و در نتیجه رضایت ذی‌نفعان بیشینه می‌شود. در این راستا، استفاده از مدل‌های تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار، امکان شبیه‌سازی واقعی‌تر رفتار شبکه‌های توزیع آب را مهیا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: کمبود آب، تأمین نوبتی، تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، برگشت‌پذیری



۱- مقدمه

این روش سعی می‌شود با استفاده از رابطه‌ای مناسب، ارتباط میان دبی خروجی از گره و فشار گرهی به‌طور مستقیم در نظر گرفته شود. در سه دهه اخیر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، کاملاً وابستگی دبی خروجی از گره به فشار موجود در آن را اثبات می‌کنند و در نتیجه روش DDHA به‌خصوص در شرایط بحرانی مانند شکست هیدرولیکی و مکانیکی سیستم کارایی خود را از دست می‌دهد. در شرایط بحرانی استفاده از روش DDHA باعث رسیدن به جواب‌های دور از واقعیت خواهد شد (Shirzad et al., 2013).

تأمین آب به روش نوبتی، خود حالتی از شرایط غیرعادی و بحرانی را در شبکه ایجاد می‌کند، زیرا در این حالت به‌علت کمبود آب یا کمبود انرژی، زمان تأمین آب، کمتر از ۲۴ ساعت است و حتی به ۱ تا ۲ ساعت در شبانه روز می‌رسد. در این شرایط، مصرف‌کنندگان برای تأمین نیاز کامل خود در طول شبانه‌روز، مجبور به برداشت آب از شبکه در آن مدت محدود هستند و تا جایی که امکان دارد به ذخیره آب می‌پردازند. هجوم هم‌زمان مصرف‌کنندگان برای برداشت آب، موجب ایجاد شرایط بحرانی هیدرولیکی در شبکه می‌شود و فشار در شبکه به‌طور محسوسی افت می‌کند. به همین علت در این شرایط مقدار برداشت در هر گره به‌طور مستقیم به میزان فشار موجود در آن گره وابسته است و حتماً باید از تحلیل PDHA استفاده کرد. با این حال در تعداد معدودی از پژوهش‌های گذشته مرتبط با تأمین آب نوبتی، از روش PDHA استفاده شده است (Ingeduld et al., 2006, De Marchis et al., 2010, Ameyaw et al., 2013).

یکی از اولین پژوهش‌ها در زمینه تأمین نوبتی آب در سال ۱۹۹۴ انجام شد که در آن طراحی بهینه با هدف کمینه کردن هزینه در قبال دسترسی به آب کافی با فشار مناسب، با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی^۴ و به روش DDHA انجام گرفت. همچنین در بخش دیگری از این پژوهش، بهینه‌سازی تنظیمات شیرهای کنترل جریان با هدف کمینه کردن تغییرات فشار و ثابت نگه داشتن مقدار فشار در حدود فشار حداقل با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۵ انجام شد (Vairavamoorthy, 1994).

ساشیکومار و همکاران با تمرکز بر شرایط خاص ایجاد شده در حالت تأمین نوبتی مانند وجود پاکت‌های هوا در لوله‌های توزیع در

روند رو به رشد جمعیت جهان و افزایش نیاز به منابع آب شیرین، بهره‌برداری بیشتر از منابع آب و کاهش ذخایر آب‌های شیرین را به همراه دارد. بدون شک در چندین سال آینده، دغدغه مدیریت منابع آب به مهم‌ترین مسئله جهان تبدیل خواهد شد. هرچند که هم‌اکنون هم اهمیت آن قابل اغماض نیست. وقوع شرایط کم‌آبی به دلیل عدم دسترسی به منابع آب کافی، به‌کارگیری روش تأمین نوبتی^۱ یا متناوب آب را به‌عنوان یک راه‌حل، اجتناب‌ناپذیر می‌کند. تأمین نوبتی، همان‌طور که از اسم آن بر می‌آید قابلیت دسترسی مقطعی به آب است که با توجه به شرایط شبکه، ممکن است این تأمین برابر با نیاز مصرف‌کننده باشد و یا کفایت لازم را نداشته باشد. سیستم‌های آب‌رسانی به‌طور معمول برای قابلیت دسترسی به آب با فشار مداوم ۲۴ ساعته در شبانه‌روز (تأمین پیوسته) و به‌منظور برآورده کردن تقاضا در تمامی زمان‌ها طراحی می‌شوند. در حالی که در حالت تأمین نوبتی، در طول ساعاتی از شبانه‌روز که عرضه آب انجام می‌شود، ممکن است آب به‌طور کامل در دسترس برخی گره‌ها قرار گیرد و یا به‌علت کمبود منابع آب و مشخصات هیدرولیکی شبکه، برخی از نقاط از جمله گره‌های دورتر از منبع تأمین، توانایی دسترسی به آب مورد نیاز خود را نداشته باشند. اعمال روش تأمین نوبتی، مصرف‌کنندگان را به تحمل قطعی آب در ساعاتی از شبانه‌روز وادار می‌کند. همچنین به‌هنگام شروع تأمین آب در لحظات ابتدایی به‌علت هجوم مصرف‌کنندگان برای برداشت آب، میزان فشار در شبکه به‌طور محسوسی افت می‌کند (Vairavamoorthy et al., 2007).

برای تحلیل هیدرولیکی یک شبکه از دو روش تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا^۲ و تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار^۳ استفاده می‌شود. روش DDHA اولین و رایج‌ترین روش تحلیل شبکه است که در بیشتر نرم‌افزارهای تجاری شبیه‌سازی موجود از این روش استفاده می‌شود. در این روش بدون توجه به میزان فشار موجود در گره مصرف، با فرض اینکه مقدار برداشت از گره، ثابت و برابر تقاضای گره است، شبکه تحلیل می‌شود. روش PDHA فرض استقلال بین دبی موجود و فشار در هر گره را کاملاً رد می‌کند و در

¹ Intermittent Supply

² Demand Driven Hydraulic Analysis (DDHA)

³ Pressure Driven Hydraulic Analysis (PDHA)

⁴ Sequential Quadratic Programming (SQP)

⁵ Genetic Algorithm (GA)



است و ستون آب امکان جدا شدن ندارد و به صورت پیوسته حرکت می‌کند، یک مدل غیردائمی برای آنالیز روند پرشدن شبکه آب‌رسانی در حالت توزیع نوبتی و کمبود آب ارائه شد. مدل ارائه شده با یک مطالعه موردی (شبکه توزیع آب پالمو واقع در ایتالیا) کالیبره شد. نتایج به دست آمده نشان داد که مسئله، با وجود تانک‌های خانگی به کارگرفته شده توسط مشترکان پیچیده‌تر می‌شود. در واقع تانک‌ها به طور گسترده الگوی هیدرولیکی شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهند، به طوری که در ابتدای سرویس‌دهی تقاضای مشترکان بسیار بیشتر از مقدار نرمال بود که این امر باعث کاهش فشار شبکه و ناتوان ماندن دیگر مشترکان برای تأمین نیاز آبی خود می‌شود (De Marchis et al., 2010).

آمیوا و همکاران با تلفیق نرم‌افزار EPANET و NSGAI و با تحلیل PDHA به کمینه نمودن هزینه‌های شبکه تأمین آب نوبتی و ایجاد تعادل بیشتر در توزیع آب پرداختند (Ameyaw et al., 2013).

در ایران نیز سلطان‌جلیلی و همکاران جیره‌بندی آب در شبکه‌های توزیع آب شهری را مورد مطالعه قرار دادند و بهینه‌سازی با هدف تأمین آب با فشار کافی، مطلوبیت تأمین و رضایت مصرف‌کنندگان را با استفاده از الگوریتم HBMO و نرم‌افزار EPANET به روش DDHA انجام دادند (Soltanjalili et al., 2013).

در پژوهشی دیگر بزرگ حداد و همکاران بهینه‌سازی چند هدفه تأمین نوبتی در شبکه‌های توزیع آب شهری را با هدف بیشینه‌سازی برگشت‌پذیری تأمین و بیشینه‌سازی اعتمادپذیری مکانیکی با استفاده از الگوریتم HBMO و نرم‌افزار EPANET به روش DDHA انجام دادند (Bozorg-Haddad et al., 2016).

در بیشتر پژوهش‌های گذشته، از روش DDHA استفاده شده است. شبکه‌های نوبتی می‌توانند به دلیل کمبود منابع آب، کمبود ظرفیت تصفیه، دسترسی نوبتی به انرژی الکتریکی برای پمپاژ آب، نرخ نشست زیاد، رشد جمعیت زیاد و یا ترکیبی از این شرایط به وجود آمده باشند. در صورت کمبود منابع آب و عدم امکان کاربرد تأمین پیوسته، به ناچار باید شبکه را به صورت نوبتی مورد استفاده قرار داد، به این صورت که کاربران مختلف در زمان‌های مختلف (ساعتی، روزانه، یا حتی هفتگی) به طور گسسته امکان دسترسی به آب داشته باشند.

ابتدای شروع آب‌رسانی و ضریب حداکثر مصرف متناسب با این شرایط، به بررسی و مدل‌سازی شبکه‌های تأمین نوبتی پرداختند. آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های میدانی در نواحی مختلفی از کشور هند نشان داد ضریب هیزن ویلیامز در چنین سیستم‌هایی در دوره اولیه تأمین (مرتبط با حضور هوا) کم است و پس از مدتی به اندازه واقعی خود می‌رسد. همچنین ضریب حداکثر مصرف در حالت نوبتی بسیار بیشتر از حالت تأمین دائم است (Sashikumar et al., 2003).

در پژوهشی در سال ۲۰۰۳ با استفاده از نرم‌افزار EPANET و به روش DDHA کنترل کیفیت آب در سامانه‌های تأمین نوبتی از جنبه‌های مختلفی بررسی شد. در این پژوهش به مقایسه سه شبکه تأمین نوبتی در اردن، لبنان و فلسطین با دو شبکه تأمین پیوسته در انگلستان و پرغال به منظور درک بهتر عوامل کنترل‌کننده غلظت باکتری‌ها در تانک‌های ذخیره خانگی که از مهم‌ترین جنبه‌های کنترل کیفیت آب در سامانه‌های بهره‌بردار نوبتی هستند، پرداخته شد و بر طبق نتایج حاصل از نمونه‌برداری، پژوهشگران نتیجه گرفتند که وجود مخازن ذخیره خانگی تأثیر قابل توجهی بر کاهش کیفیت آب در سامانه‌های تأمین نوبتی دارد، به طوری که تانک‌های خانگی هرگونه بهبود کیفیت ناشی از عملیات تصفیه بر روی آب را از بین برده‌اند (Coelho et al., 2003).

اندی و کلکار به بررسی تأثیر دو حالت دائم و نوبتی تأمین آب بر میزان مصرف آب خانگی پرداختند. برای این منظور آن‌ها پژوهشی در چهار شهر هندوستان انجام دادند و با جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز شامل داده‌های مصرف آب، طول مدت تأمین آب، نوع و قطر لوله‌های سیستم توزیع و تعداد خانه‌های متصل به شبکه و با استفاده از روش DDHA به این نتیجه رسیدند که در حالت تأمین نوبتی، مصرف آب خانگی به کفایت تأمین آب بستگی دارد. به عبارت دیگر اگر متقاضیان مصرف آب، در حالت تأمین نوبتی رضایت داشته باشند، مصرف آب در این شرایط در مقایسه با تأمین دائمی تغییر محسوسی ندارد. حتی مدت زمان کوتاه‌تر تأمین آب با فشار کافی نسبت به مدت زمان طولانی‌تر با فشار کمتر، می‌تواند تقاضای مصرف‌کننده را پاسخ دهد (Andey and Kelkar, 2009).

در پژوهشی در سال ۲۰۱۰ به روش PDHA و با فرض این که فشار در داخل لوله‌های شبکه در حالت خالی برابر با فشار اتمسفر



۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل تحلیل هیدرولیکی

در این پژوهش از تحلیل هیدرولیکی PDHA استفاده شد. معادله فشار-دبی به‌کارگرفته شده نیز به‌صورت معادله ۱ است که توسط شیرزاد و همکاران ارائه شده است. این معادله یکی از جدیدترین معادلات موجود در این زمینه است و نسبت به معادلات فشار-دبی قبلی نظیر معادله واگنر و همکاران دقیق‌تر است (Shirzad et al., 2013, Wagner et al., 1988)

$$Q_j^{avl} = \begin{cases} 0 & ; \text{if } H_j \leq 0 \\ 0.176(Q_j^{req} \times H_j^{0.48}) & ; \text{if } 0 < H_j \leq 30 \\ Q_j^{req}(0.5 + 0.0882 \times H_j^{0.48}) & ; \text{if } 30 < H_j \leq 100 \\ 1.424Q_j^{req} & ; \text{if } H_j > 100 \end{cases} \quad (1)$$

که در آن

H_j هد موجود در گره j ، Q_j^{avl} دبی موجود و Q_j^{req} دبی مورد نیاز در گره j هستند.

برای انجام تحلیل PDHA مشابه پژوهش شکوهی و همکاران از توابع کتابخانه‌ای نرم‌افزار EPANET در محیط نرم‌افزار MATLAB استفاده شد، با این تفاوت که به‌جای معادله فشار-دبی واگنر و همکاران از معادله ارائه شده توسط شیرزاد و همکاران استفاده شد (Wagner et al., 1988, Shokoochi et al., 2017).

ابتدا شبکه مورد نظر در محیط MATLAB، فراخوان شد و تحلیل هیدرولیکی انجام شد. سپس فشارهای گرهی محاسبه شد و با توجه به مقدار فشارهای گرهی در حالت تحلیل استاتیکی، مقدار برداشت آب از هر گره با استفاده از معادله ۱ به‌روزرسانی شد و به‌عنوان تقاضای پایه در گره تخصیص داده شد. در حالت تحلیل دینامیکی (تحلیل گسترده زمانی)، به‌روزرسانی به‌جای اعمال بر روی تقاضای پایه، بر روی ضرایب مصرف اعمال شد. سپس این روند تا زمان ارضای شرایط همگرایی ادامه یافت. برای اطلاع بیشتر از جزئیات روش به (Shokoochi et al., 2017) مراجعه شود.

۲-۲- الگوریتم بهینه‌سازی، تابع هدف و قیود

در این پژوهش به‌منظور حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ استفاده شد. علت این انتخاب، عملکرد

اعمال روش تأمین نوبتی مصرف‌کنندگان را به تحمل قطعی آب در ساعات طولانی وادار می‌کند. همچنین به‌هنگام شروع تأمین آب در لحظات ابتدایی به‌علت هجوم مصرف‌کنندگان برای برداشت آب، میزان فشار در شبکه به‌طور محسوسی افت می‌کند. این شرایط نه تنها در رضایتمندی مصرف‌کنندگان تأثیر منفی می‌گذارد بلکه تمایل آنها را به همیاری جامعه در مواجهه با کم‌آبی و صرفه‌جویی در مصرف آب، کاهش می‌دهد. از این‌رو افزایش مطلوبیت در تأمین و به بیان دیگر افزایش قابلیت اطمینان هیدرولیکی سیستم به‌منظور افزایش رضایت مصرف‌کنندگان به‌عنوان هدف در این پژوهش در نظر گرفته شد. از سوی دیگر با توجه به ماهیت تأمین نوبتی، میزان برداشت آب برای گره‌های مختلف با توجه به موقعیت مکانی آنها متفاوت است. به‌گونه‌ای که گره‌های نزدیک‌تر به منبع تأمین، آب بیشتری برداشت می‌کنند و با دور شدن از منبع میزان برداشت آب کاهش می‌یابد. بنابراین هدف دیگر در نظر گرفته شده در این پژوهش، افزایش یکنواختی توزیع آب در شبکه بود که موجب یکنواختی و تعادل مصرف در گره‌های مختلف می‌شود. به‌دلیل محدود بودن تعداد پژوهش‌های انجام شده در این راستا، مراجع قابل استناد و منابع کافی برای پایه‌گذاری فرض‌ها و مبانی پژوهش در دسترس نبود. با این حال فرض اساسی در این پژوهش بر مبنای مجهز بودن شبکه به شیرآلات مخصوص بود، به‌صورتی که در حالت تأمین نوبتی، از شیرهای قطع و وصل استفاده شد که امکان باز و بسته شدن آنها به‌صورت کامل وجود دارد.

همان‌طور که اشاره شد هدف از انجام این پژوهش، استخراج راهکار بهینه برای تأمین نوبتی آب در شرایط کمبود آب با توجه به تبعات هیدرولیکی و اجتماعی است. بر این اساس، نوآوری‌های این پژوهش به شرح زیر است:

۱- با توجه به اهمیت شبیه‌سازی رفتار واقعی جریان به‌علت وابستگی مصرف به فشار در حالت تأمین نوبتی، در این پژوهش تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار استفاده شد. ۲- تعریف تابع هدف به‌گونه‌ای انجام شد که به‌طورهم‌زمان یکنواختی و عدالت تأمین آب در گره‌های مصرف را افزایش می‌دهد و همچنین قابلیت اطمینان هیدرولیکی سیستم را ارتقا می‌بخشد. ۳- منحنی جریمه برای مقدار فشار در گره‌ها ارائه شد به نحوی که با ماهیت تأمین نوبتی سازگار بود و به مدیریت بحران در شرایط کمبود آب کمک می‌کند.

¹ Particle Swarm Optimization (PSO)

$$Q_{sup} = Q_{avl} \quad (۸)$$

$$\alpha_{j,h} + \alpha_{j,h+1} + \alpha_{j,h+2} \geq 1 \quad (۹)$$

که در آن

ژ شماره گره مصرف، h شماره هر یک از بازه‌های شبیه‌سازی در طول دوره بهره‌برداری، J تعداد گره‌های مصرف، H تعداد کل بازه‌های شبیه‌سازی در طول دوره بهره‌برداری، OF تابع هدف، $DP_{j,h}$ میزان مطلوبیت تأمین فشار در بازه h در گره j که با توجه به منحنی جریمه پیشنهادی برای فشار (شکل ۱) و با استفاده از معادله ۳ به دست می‌آید. لازم به ذکر است فرم تغییرات شکل بر اساس پژوهش تابش و ضیا است، ولی مقدار پارامترها بر اساس روش این پژوهش انتخاب شد (Tabesh and Zia 2003). $DQ_{j,h}$ میزان مطلوبیت تأمین دبی در بازه h در گره j که از معادله ۴ به دست می‌آید، $P_{j,h}$ فشار تأمین شده در گره j در بازه زمانی h ، P_{min} حداقل فشار گرهی (صفر)، P_{des} مقدار فشار مجاز طراحی استاندارد شبکه (۳۰ متر)، P_{max} حداکثر فشار مجاز شبکه (۵۰ متر)، $\alpha_{j,h}$ ، $\alpha_{j,h+1}$ و $\alpha_{j,h+2}$ متغیرهای تصمیم نشان‌دهنده میزان تأمین آب در سه بازه متوالی برای گره j که دو مقدار صفر یا یک (برای حالت تأمین کامل) را اختیار می‌کنند، $Q_{j,h}^{avl}$ دبی تأمین شده، $Q_{j,h}^{req}$ دبی مورد نیاز در گره j در بازه h ، Q_N^{req} میزان کل آب مورد نیاز شبکه در طول دوره تأمین آب، Q_N^{avl} میزان کل آب موجود در مخزن برای شبکه در طول دوره تأمین آب، Q_{sup} میزان کل آب تأمین شده برای شبکه در طول دوره تأمین آب و β ضریب اعمال کمبود آب است.

برای محاسبه تابع هدف، ابتدا مجموع میانگین هندسی میزان مطلوبیت تأمین فشار و میزان مطلوبیت تأمین دبی برای تک تک گره‌ها در بازه‌های زمانی مختلف به دست آمد. سپس از آن‌ها میانگین هندسی گرفته شد و با تقسیم مقدار حاصل شده بر تعداد کل بازه‌های شبیه‌سازی، مقدار تابع هدف به دست آمد. با بیشینه‌سازی این تابع هدف، فشارهای گرهی به مقدار فشار مجاز طراحی استاندارد شبکه نزدیک‌تر شد و میزان تأمین آب گرهی به بیشینه مقدار خود رسید.

قید تعریف شده در معادله ۸ به این معنی است که میزان کل آبی که در اختیار شبکه قرار خواهد گرفت باید برابر با میزان کل آب موجود در مخزن باشد. در واقع در یک سیستم نوبتی شرایط اضطراری حاکم است و عملاً برای جبران کمبود آب

بهتر الگوریتم PSO در مقایسه با الگوریتم‌هایی نظیر الگوریتم ژنتیک است (Samsami, 2013, Karimi et al., 2017).

الگوریتم PSO، یکی از الگوریتم‌های قدرتمند در حل مسائل بهینه‌سازی است که بر مبنای حرکت و هوش ذرات کار می‌کند و مفهوم تعامل اجتماعی را برای حل مسائل بهینه‌سازی به کار می‌گیرد. این الگوریتم که اولین بار توسط ابرهات و کندی معرفی شد، با الهام از رفتار اجتماعی حیواناتی نظیر ماهی‌ها و پرندگان، که در گروه‌هایی کوچک و بزرگ کنار هم زندگی می‌کنند، طراحی شده است (Eberhart and Kennedy, 1995).

ماهیت فرایند تأمین نوبتی به این‌گونه است که در طول مدت بهره‌برداری در بازه‌های زمانی مختلف، میزان آب در دسترس برای برخی گره‌های مصرف کاملاً قطع می‌شود و برای برخی دیگر تأمین آب به صورت کامل انجام می‌شود. در این شرایط مهم‌ترین چالش ایجاد شده، بحث یکنواختی زمانی و مکانی تأمین و ایجاد عدالت برای مصرف‌کنندگان است. از طرف دیگر در هر سامانه آب‌رسانی ایجاد مطلوبیت‌های هیدرولیکی از جمله ملزومات اساسی برای بهره‌برداری بهینه از شبکه است. بر این اساس، تابع هدف (معادله ۲) و قیود بهینه‌سازی (معادلات ۵ تا ۹) به صورت زیر در نظر گرفته شد.

(۲)

$$\text{Maximize: } OF = \frac{1}{H} \times \sqrt{\prod_{j=1}^J [\sum_{h=1}^H (2\sqrt{DP_{j,h}} \times DQ_{j,h})]} \quad (۳)$$

$$DP_{j,p} = \begin{cases} 0 & \text{if } P_{j,h} \leq P_{min} \\ \left(\frac{P_{j,h} - P_{min}}{30}\right)^{0.48} & \text{if } P_{min} < P_{j,h} \leq P_{des} \\ 1 - \frac{P_{j,h} - P_{des}}{40} & \text{if } P_{des} < P_{j,h} \leq P_{max} \\ 0.25 & \text{if } P_{j,h} > P_{max} \end{cases}$$

$$DQ_{j,h} = \alpha_{j,h} \quad (۴)$$

$$\text{Subjected to: } Q_N^{req} = \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H Q_{j,h}^{req} \quad (۵)$$

$$Q_N^{avl} = \beta \times Q_N^{req} \quad (۶)$$

$$Q_{sup} = \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H Q_{j,h}^{avl} \quad (۷)$$



مشخصه‌های مختلفی برای تشریح کارایی این سیستم‌ها بهره گرفته می‌شود. در این پژوهش برای بررسی عملکرد سیستم و مقایسه نتایج تحلیل PDHA و DDHA، از معیار برگشت پذیری استفاده شد.

طبق تعریف هاشیموتو و همکاران، برگشت پذیری نشان‌دهنده احتمال بازگشت سیستم به حالت مطلوب پس از یک شکست است. اگر شکست‌های اتفاق افتاده به‌طور متوالی یا پیوسته، طولانی مدت باشند و برگشت سیستم به حالت رضایت بخش به کندی صورت گیرد، در این صورت این وضعیت می‌تواند یک هشدار برای عدم توانایی برنامه بهره‌برداری در تأمین نیاز آبی در طول دوره‌های متوالی باشد (Hashimoto et al., 1982). با لحاظ آستانه‌های کارایی مختلف برای محاسبه این شاخص، حالت مطلوب به مفهوم شرایطی است که نسبت تأمین به مقدار نیاز، بزرگ‌تر و یا مساوی مقدار آستانه کارایی در نظر گرفته شده باشد. در محاسبه این شاخص نیز دو روش که اولی نشان‌دهنده برگشت پذیری شبکه‌ای و دومی نشان‌دهنده برگشت پذیری گرهی است مورد بررسی قرار گرفت. در روش اول، محاسبه این شاخص برای ارزیابی وضعیت تأمین نیاز کل شبکه در دوره بهره‌برداری انجام شد و در روش دوم، هدف ارزیابی وضعیت تأمین نیاز گره‌های مصرف در دوره بهره‌برداری بود. برگشت پذیری شبکه‌ای و برگشت پذیری گرهی در این پژوهش به صورت معادلات ۱۰ و ۱۱ برگرفته از پژوهش سلطان جلیلی و همکاران محاسبه شد (Soltanjalili et al., 2013)

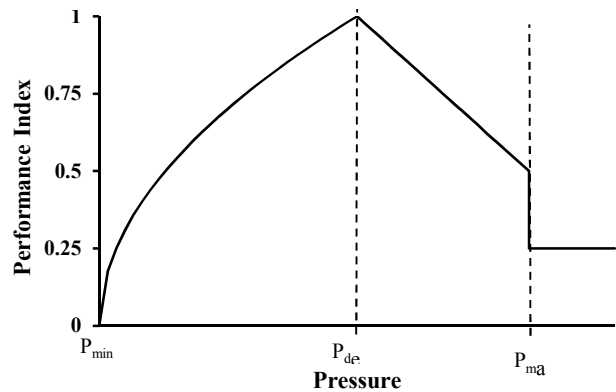


Fig. 1. Penalty curve for nodal pressures

شکل ۱- منحنی جریمه برای فشارهای گرهی

مصرف‌کنندگان از کل حجم مخزن از جمله حجم ذخیره اضطراری استفاده می‌کنند. معادله ۹ نیز قیدی است که به‌منظور افزایش میزان رضایتمندی و جلوگیری از قطعی‌های متوالی و طولانی مدت در طول دوره بهره‌برداری تعریف شده است و به این معنی است که برای تمامی گره‌های مصرف در ۳ بازه متوالی حداقل یک دوره تأمین آب صورت می‌گیرد.

۳-۲- شاخص ارزیابی کارایی سیستم

در بسیاری از پژوهش‌ها، نحوه عملکرد سیستم‌های منابع آب به‌صورت‌های رضایت بخش یا نامطلوب توصیف می‌شود. برای این منظور از شاخص‌های کارایی استفاده می‌شود که در آن‌ها از

$$\gamma_{\theta} = 100 \times \frac{\sum_{h=1}^H \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{j=1}^J Q_{j,h}^{avl} < \theta \times \sum_{j=1}^J Q_{j,h}^{req}, \sum_{j=1}^J Q_{j,h+1}^{avl} \geq \theta \times \sum_{j=1}^J Q_{j,h+1}^{req} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}}{\sum_{h=1}^H \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{j=1}^J Q_{j,h}^{avl} < \theta \times \sum_{j=1}^J Q_{j,h}^{req} \\ 0 & \text{if } \sum_{j=1}^J Q_{j,h}^{avl} \geq \theta \times \sum_{j=1}^J Q_{j,h}^{req} \end{cases}} \quad (10)$$

$$\gamma'_{\theta} = 100 \times \sqrt{\prod_{j=1}^J \frac{\sum_{h=1}^H \begin{cases} 1 & \text{if } Q_{j,h}^{avl} < \theta \times De_{j,h}, Q_{j,h+1}^{avl} \geq \theta \times Q_{j,h+1}^{req} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}}{\sum_{h=1}^H \begin{cases} 1 & \text{if } Q_{j,h}^{avl} < \theta \times Q_{j,h}^{req} \\ 0 & \text{if } Q_{j,h}^{avl} \geq \theta \times Q_{j,h}^{req} \end{cases}}} \quad (11)$$

۳-۲- سناریوهای تعریف شده و شاخص‌های شبیه‌سازی

سناریوهای تعریف شده در این پژوهش مطابق جدول ۱ است. تقسیم‌بندی سناریوها بر دو مبنای میزان آب در دسترس و نوع تحلیل هیدرولیکی، انجام شد. شاخص اول، کمبود آب در سیستم و به معنای عدم تعادل میان مقدار عرضه و تقاضای آب برای مصرف‌کنندگان و شاخص دوم، روش تحلیل مورد استفاده یعنی PDHA یا DDHA بود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود سناریوهای ۱ تا ۳ مربوط به تحلیل PDHA و سناریوهای ۴ تا ۶ مربوط به تحلیل DDHA بود و همچنین میزان آب در دسترس در سیستم در سه حالت بدون کمبود، کمبود ۲۵ درصد و کمبود ۵۰ درصد تعریف شد.

جدول ۱- سناریوهای مختلف تعریف شده

Table 1. Different scenarios defined

Scenario No.	Supplied discharge		Analysis type
	Required discharge		
1	1		PDHA
2	0.75		PDHA
3	0.5		PDHA
4	1		DDHA
5	0.75		DDHA
6	0.5		DDHA

در همه سناریوها، شبیه‌سازی برای مدت یک شبانه روز و بازه‌های تأمین آب برابر گام زمانی هیدرولیکی و برابر با ۱ ساعت در نظر گرفته شد. سناریوهای تعریف شده با نسبت (دبی مورد نیاز / دبی موجود) برابر با یک، سناریوهای بدون بحران بود و برای مقایسه مقدار تابع هدف در حالت‌های بحرانی با شرایط مطلوب و بدون بحران در نظر گرفته شد.

ضرایب مصرف در طول شبانه‌روز با توجه به نشریه ۳-۱۱۷ (بازنگری اول) به صورت شکل ۳ در نظر گرفته شد (IRIVSPS, 2011).

طبق تعریف‌های ارائه شده برای هر سناریو، شاخص‌های ورودی به مدل به ازای سناریوهای مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.

که در آن

γ_0 برگشت پذیری شبکه ای، γ'_0 برگشت پذیری گرهی شبکه در تمامی بازه‌های شبیه‌سازی متوالی دوره بهره‌برداری، θ آستانه کارایی مورد نظر برای محاسبه مقدار شاخص برگشت پذیری، $Q_{j,h}^{avl}$ میزان دبی تأمین شده در گره j در بازه شبیه‌سازی h و $Q_{j,h}^{req}$ میزان دبی مورد نیاز در گره j در بازه شبیه‌سازی h است، که در این بازه‌ها نسبت دبی تأمین شده به مقدار دبی مورد نیاز کمتر از آستانه کارایی در نظر گرفته شده به دست آمد، J تعداد کل گره‌های شبکه و H تعداد کل بازه‌های شبیه‌سازی است. شایان ذکر است که در این پژوهش محاسبه شاخص برگشت پذیری برای آستانه‌های کارایی ۷۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد انجام شد.

۳- مطالعه موردی

۳-۱- شبکه مورد مطالعه

در این پژوهش، شبکه دو حلقه‌ای (شکل ۲) به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شد. این شبکه که اولین بار توسط آلپروویتز و شمیر ارائه شد، دارای هشت لوله و شش گره مصرف آب است. طول همه لوله‌ها برابر ۱۰۰۰ متر و ضریب هیزن-ویلیام برای همه لوله‌ها برابر ۱۳۰ در نظر گرفته شد (Alperovits and Shamir 1977).

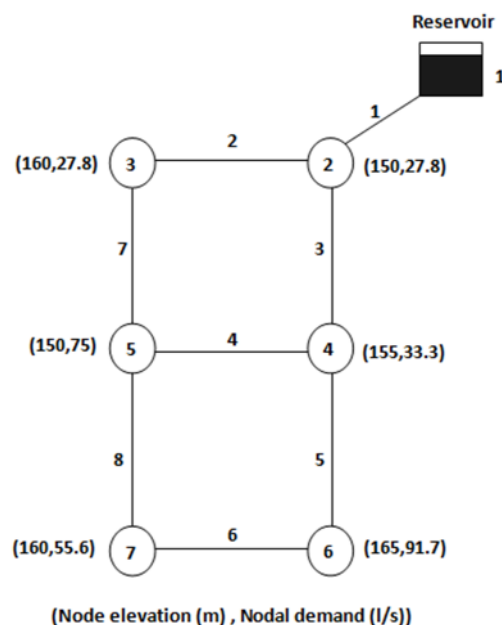


Fig. 2. Two-Loop network

(Alperovits and Shamir, 1977)

شکل ۲- شبکه دو حلقه‌ای (Alperovits and Shamir, 1977)



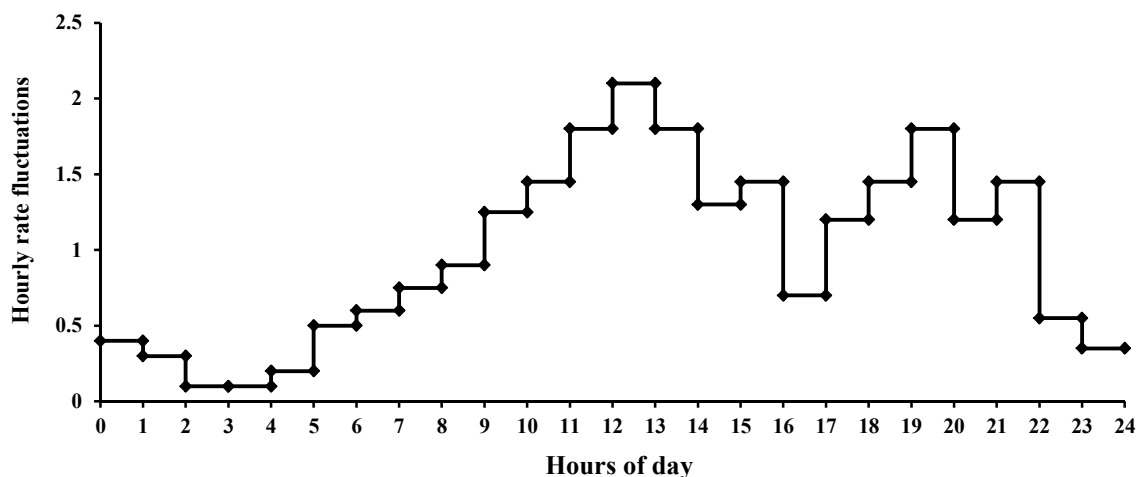


Fig. 3. The consumption coefficients (IRIVSPS, 2011)

شکل ۳- ضرایب مصرف (IRIVSPS, 2011)

جدول ۳- مقادیر تابع هدف برای سناریوهای ۱ تا ۶

Table 3. Values of objective function for scenarios 1 to 6

Scenario No.	Objective function value	Analysis type
1	0.78	PDHA
2	0.54	PDHA
3	0.39	PDHA
4	0.68	DDHA
5	0.51	DDHA
6	0.36	DDHA

واقعیت شبکه در تحلیل PDHA است که در آن مقدار بزرگ‌تری برای فشارهای گرهی به‌دست آمده و در نتیجه مقدار تابع هدف افزایش پیدا کرد.

پس از محاسبه مقدار تابع هدف، به‌منظور ارزیابی عملکرد شبکه تحت سناریوهای تعریف شده، مقدار معیارهای کارایی سیستم (برگشت‌پذیری شبکه‌ای (γ) و برگشت‌پذیری گرهی (γ')) با آستانه‌های ۱۰۰، ۹۰ و ۷۰ درصد برای سناریوهایی که کمبود آب دارند، محاسبه شد (جدول ۴). همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود مقدار برگشت‌پذیری، با کاهش آستانه کارایی از ۱۰۰ به ۷۰ افزایش یافت و برای حالت کمبود آب ۲۵ درصد (سناریوهای ۲ و ۵) بیشتر از حالت کمبود ۵۰ درصد (سناریوهای ۱ تا ۶) به‌دست آمد. همچنین برای تمامی آستانه‌ها، مقدار برگشت‌پذیری در سناریوی ۵ بیشترین و بهترین جواب را به خود اختصاص داد.

جدول ۲- مقدار در نظرگرفته شده برای پارامترهای ورودی در

سناریوهای ۱ تا ۶

Table 2. Values of input parameters in scenarios 1 to 6

Scenario No. *	Available water in the tank (m^3)	Network demand (m^3)
1	26544	26544
2	19908	26544
3	13272	26544

* The values for scenarios 4 to 6 are similar to those for scenarios 1 to 3.

۴- نتایج و بحث

روش پژوهش ارائه شده بر روی شبکه نمونه، در سناریوهای مختلف اعمال شد و همچنین تأثیر نوع تحلیل هیدرولیکی بر روی نتایج به‌دست آمده بررسی و تحلیل شد. مقدار مطلوب به‌دست آمده برای شاخص‌های الگوریتم PSO عبارت‌اند از: جمعیت برابر با ۳۰، شاخص شناختی (ضریب C_1) برابر با ۲، شاخص اجتماعی (ضریب C_2) برابر با ۲، اینرسی وزنی (ضریب w) برابر با ۰/۹ و بیشترین تکرار برابر با ۱۰۰۰.

نتایج به‌دست آمده مدل بهینه‌سازی و مقدار تابع هدف در سناریوهای مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود مقدار تابع هدف در سناریوهایی که تحلیل PDHA انجام شده است (سناریوهای ۱ تا ۳) بزرگ‌تر از مقدار آن در سناریوهایی است که تحلیل DDHA انجام شده است (سناریوهای ۴ تا ۶). علت این موضوع، شبیه‌سازی نزدیک به



بدون در نظرگیری مقدار فشار گرهی انجام می‌شود، بنابراین مقدار دبی‌ها واقعی نیست و حالت شکست در تأمین آب مورد تقاضای گره‌ها به ندرت رخ می‌دهد.

با بررسی مجموع دبی‌های تأمین شده برای کل شبکه در هر ساعت در مدت بهره‌برداری، یکنواختی زمانی توزیع آب در سناریوهای مختلف مقایسه شد. شکل‌های ۴ و ۵ درصد نسبی آب تأمین شده به نیاز شبکه را در هر ساعت به ترتیب برای سناریوهایی با کمبود آب ۲۵ درصد و ۵۰ درصد نشان می‌دهند. نکته قابل توجه این است که برای سناریوهای PDHA امکان تأمین آب حتی بیشتر از نیاز به علت مبتنی بر فشار بودن دبی تأمین شده برای برخی از ساعات وجود دارد. این امر در شکل ۴ برای سناریوی ۲ و در شکل ۵ برای سناریوی ۳ قابل مشاهده است.

با بررسی مجموع دبی‌های تأمین شده در هر گره در مدت

جدول ۴- مقدار شاخص‌های کارآیی سیستم برای سناریوهای مختلف

Table 4. Values of system performance indicators for different scenarios

Index	Scenario No. *			
	2	3	5	6
γ_{100}	21.2	4.3	<u>22.1</u>	0
γ'_{100}	47.7	47.5	<u>93.5</u>	67.1
γ_{90}	18.8	5	<u>40</u>	9.1
γ'_{90}	57.6	60.5	<u>93.5</u>	67.1
γ_{70}	50	16.7	<u>75</u>	26.3
γ'_{70}	80.3	66.3	<u>98.9</u>	66.2

* The underlined values are the best solutions

سناریوی ۵ مربوط به حالتی است که کمبود آب ۲۵ درصد و تحلیل به صورت DDHA است. علت این امر را هم می‌توان این‌گونه بیان کرد که در تحلیل DDHA از آنجایی که تأمین آب،

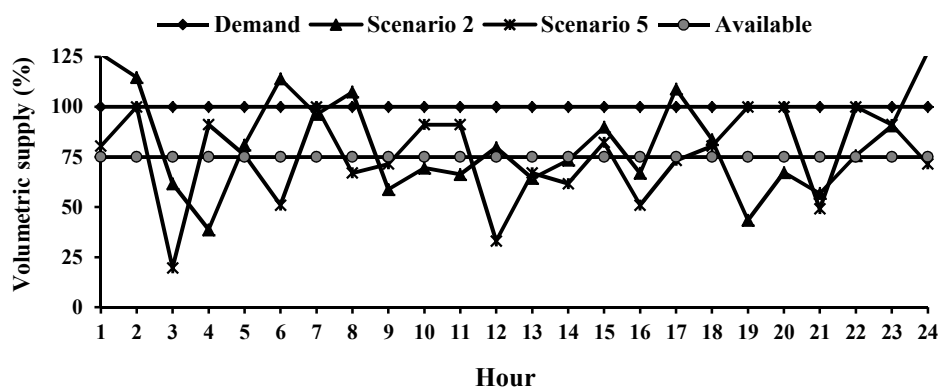


Fig. 4. Percentage of supplied water relative to hourly demand of network for scenarios with 25% water shortage

شکل ۴- درصد نسبی آب تأمین شده به نیاز شبکه در هر ساعت برای سناریوهایی با کمبود آب ۲۵ درصد

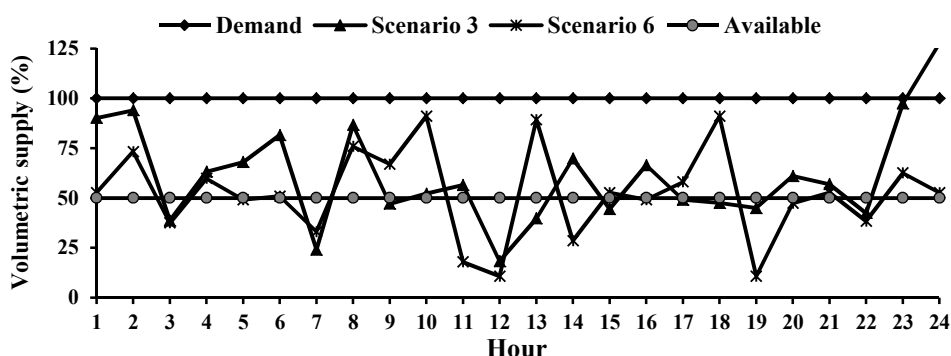


Fig. 5. Percentage of supplied water relative to hourly demand of network for scenarios with 50% water shortage

شکل ۵- درصد نسبی آب تأمین شده به نیاز شبکه در هر ساعت برای سناریوهایی با کمبود آب ۵۰ درصد



آب (شکل‌های ۶ و ۷) نسبت به پراکندگی زمانی تأمین آب کل شبکه (شکل‌های ۴ و ۵) کمتر است. این امر به علت نوع تعریف تابع هدف مدل بهینه‌سازی است. در واقع فرمول تابع هدف طوری در نظر گرفته شده است که با بیشینه نمودن مقدار آن، غیریکنواختی تأمین آب بین گره‌ها به حداقل برسد. به منظور نشان دادن تأثیر نوع تحلیل هیدرولیکی بر میزان دبی

بهره‌برداری، یکنواختی مکانی توزیع آب در طول شبکه در سناریوهای مختلف نیز بررسی شد. شکل‌های ۶ و ۷، درصد آب تأمین شده در هر گره نسبت به نیاز آبی آن گره را به ترتیب برای سناریوهایی با کمبود آب ۲۵ درصد و ۵۰ درصد نشان می‌دهند. نکته قابل توجه در مورد یکنواختی تأمین آب در گره‌ها این است که پراکندگی تأمین آب در گره‌ها و یا به عبارتی پراکندگی مکانی تأمین

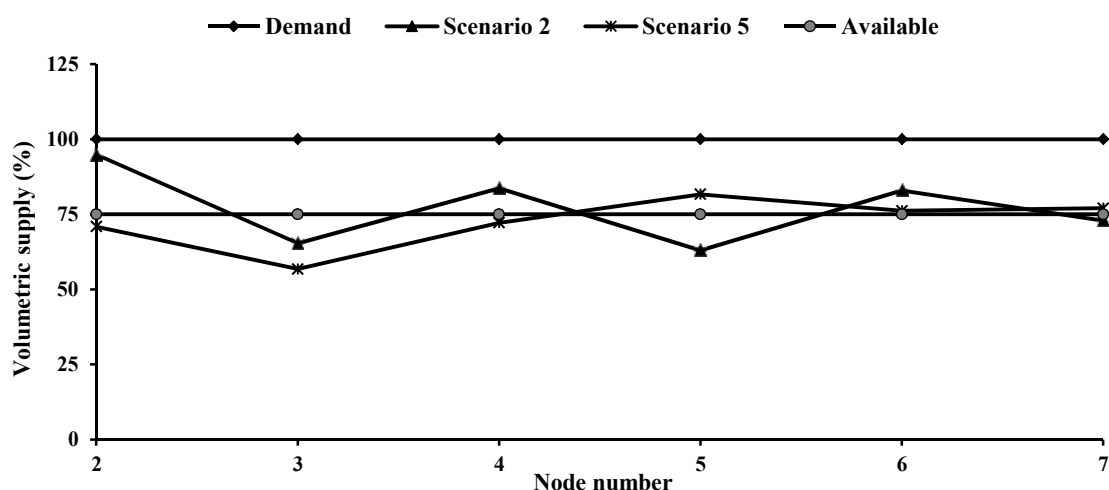


Fig. 6. Percentage of supplied water et each node relative to nodal water demand in total operating life for scenarios with 25% water shortage

شکل ۶- درصد نسبی آب تأمین شده گرهی به نیاز آبی گرهی در کل مدت بهره‌برداری برای سناریوهایی با کمبود آب ۲۵ درصد

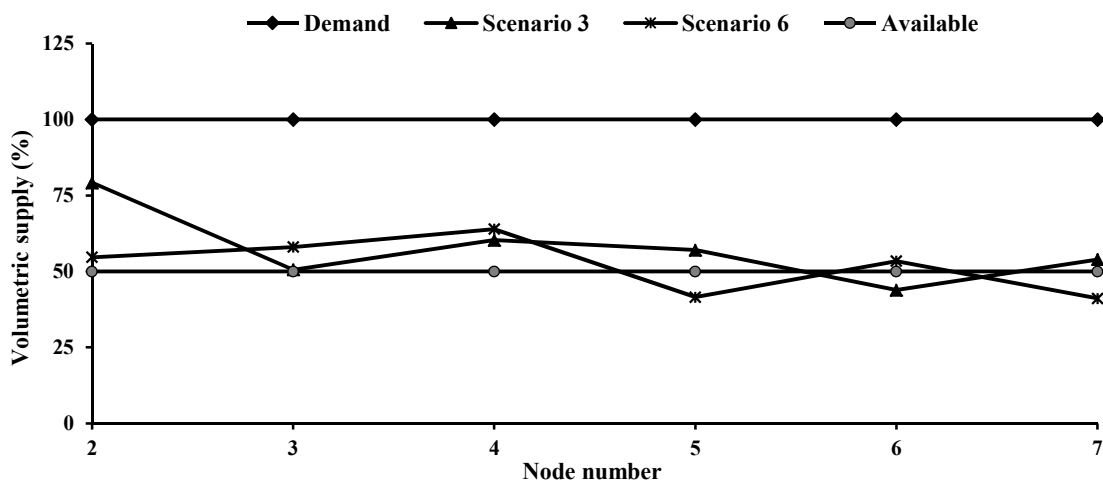


Fig. 7. Percentage of supplied water et each node relative to nodal water demand in total operating life for scenarios with 50% water shortage

شکل ۷- درصد نسبی آب تأمین شده گرهی به نیاز آبی گرهی در کل مدت بهره‌برداری برای سناریوهایی با کمبود آب ۵۰ درصد



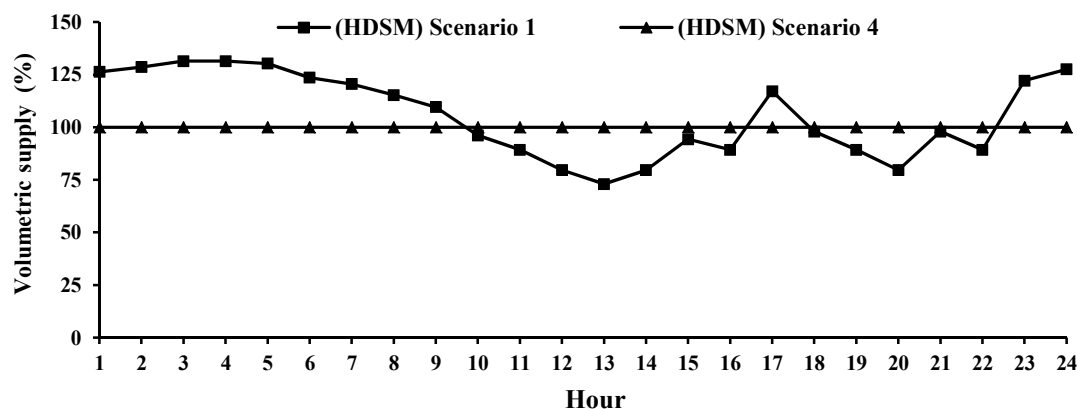


Fig. 8. Impact of hydraulic analysis type on the results obtained for network

شکل ۸- تأثیر نوع تحلیل هیدرولیکی بر نتایج به دست آمده برای کل شبکه

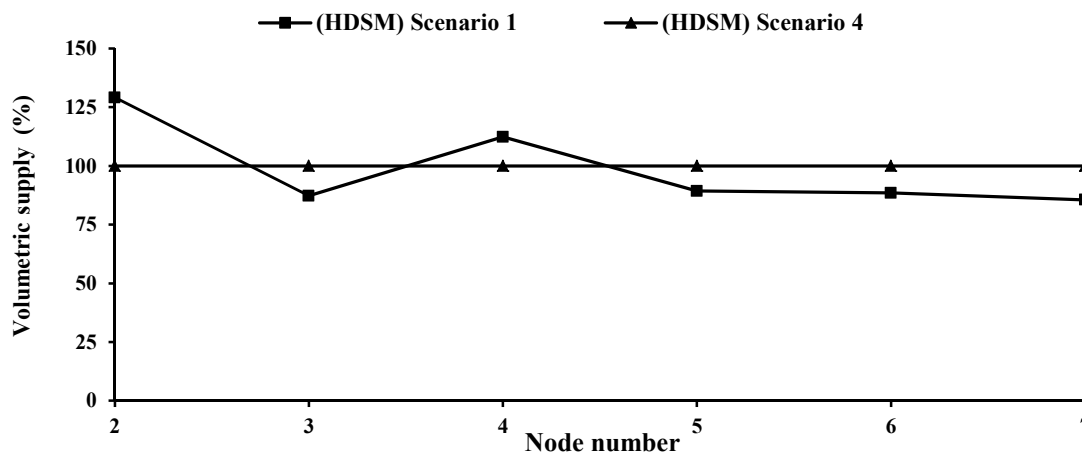


Fig. 9. Impact of hydraulic analysis type on the results obtained for nodes

شکل ۹- تأثیر نوع تحلیل هیدرولیکی بر نتایج به دست آمده برای گره‌ها

به دست آمده‌اند نیز بیان‌کننده این موضوع هستند (Shirzad et al. 2013). این در حالی است که در سناریوی ۴ که تحلیل به صورت DDHA بود، مجموع مقدار دبی تأمین شده برای گره‌ها بدون توجه به مقدار فشارهای گرهی همواره برابر با نیاز آن‌ها بود که با واقعیت نمی‌تواند مطابقت داشته باشد. در واقع در حالت تأمین نوبتی آب، برای مشخص کردن مقدار دبی گرهی تأمین شده و ارزیابی کارایی سامانه آب‌رسانی، استفاده از تحلیل DDHA کارساز نیست و استفاده از تحلیل PDHA امری ضروری به نظر می‌رسد.

همچنین نحوه توزیع آب در طول گره‌های شبکه در شکل ۹ نشان داده شده است. در حالت PDHA (سناریوی ۱) برای گره‌های ۲ و ۴، درصد تأمین بیشتر از ۱۰۰ درصد نیاز است و برای گره‌های

تأمین شده، سناریوی ۱ با سناریوی ۴ مقایسه شد. شکل ۸، درصد آب تأمین شده نسبت به نیاز شبکه را در هر ساعت برای این سناریوها نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در سناریوی ۱ که تحلیل به صورت PDHA بود، در ساعاتی که مصرف، کم و فشار در شبکه زیاد است، مجموع مقدار دبی تأمین شده برای گره‌ها در این ساعت‌ها از ۱۰۰ درصد نیاز آن‌ها بیشتر شد. آن‌چه که در واقعیت اتفاق می‌افتد این است که آن بخش از مصارف آب که وابسته به فشار هستند، نظیر مصارف آب برای استحمام و شست‌وشوی دست و صورت، با افزایش فشار، افزایش می‌یابند و ممکن است حتی بیشتر از نیاز آبی، از شبکه آب برداشت شود. معادلات فشار-دبی مانند معادله فشار-دبی ارائه شده توسط شیرزاد و همکاران که با استفاده از داده‌های میدانی و آزمایشگاهی



مقدار نزدیک به واقعیت، به خود می‌گیرد. از این رو سطح فشار در شبکه نسبت به حالت تحلیل DDHA بیشتر می‌شود و میزان مطلوبیت فشار که یکی از پارامترهای تابع هدف است، افزایش می‌یابد.

با مقایسه مقدار به‌دست آمده برای معیارهای کارایی سیستم مشاهده می‌شود که میزان برگشت‌پذیری شبکه‌ای و گرهی در اکثر سناریوهای با تحلیل DDHA بیشتر از سناریوهای با تحلیل PDHA است که در توجیه آن می‌توان گفت که در تحلیل DDHA از آنجایی که تأمین آب بدون در نظرگیری مقدار فشار گرهی انجام می‌شود، بنابراین مقدار دبی‌ها واقعی نیست و حالت شکست در تأمین آب مورد تقاضای گره‌ها به‌ندرت رخ می‌دهد. همچنین معیار برگشت‌پذیری، با بیشترین مقدار در حدود ۹۹ درصد برای آستانه کارایی ۷۰ درصد و در حالت گرهی به‌دست آمد.

در این پژوهش هر دوره یا بازه شبیه‌سازی برابر با یک ساعت در نظر گرفته شد. همچنین به‌منظور افزایش میزان رضایت‌مندی و جلوگیری از قطعی‌های متوالی و طولانی مدت در طول دوره بهره‌برداری قیدی در نظر گرفته شد تا برای تمامی گره‌های مصرف در ۳ بازه متوالی حداقل یک دوره تأمین آب صورت گرفته و هر نوبت قطعی آب بیش از ۳ ساعت طول نکشد. برای کاربردی‌تر نمودن نتایج این پژوهش در مطالعات بعدی می‌توان با بررسی شرایط واقعی شبکه‌های توزیع آب، دوره‌های زمانی مناسب را انتخاب کرد.

دورتر از محل مخزن، تأمین آب کمتری صورت گرفته است. طبق این شکل نیز تحلیل DDHA قادر به نمایش شرایط واقعی سامانه آبرسانی نیست و تقاضاهای آب گرهی را همواره، تأمین شده نشان داده است که ناشی از عدم در نظر گرفتن وابستگی دبی جریان گرهی به فشار گرهی در این نوع تحلیل است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی PSO و مدل تحلیل هیدرولیکی EPANET، یک مدل بهینه‌سازی با هدف بهینه‌سازی یکنواختی و عدالت توزیع آب بین گره‌های مصرف و همچنین بهینه‌سازی قابلیت اطمینان در تأمین نوبتی آب ارائه شد. مدل مذکور بر روی شبکه دو حلقه‌ای اعمال شد و نتایج حاصل برای دو حالت شبیه‌سازی PDHA و DDHA و سناریوهای مختلف کم‌آبی بررسی شد.

مطابق نتایج به‌دست آمده، تابع هدف و یا به‌عبارتی یکنواختی توزیع آب برای سناریوهای با تنش آبی کمتر، مقدار بیشتری دارد، به‌طوری که برای حالت بدون کمبود بیشترین مقدار را داشت. همچنین مقدار تابع هدف برای سناریوهای با تحلیل PDHA در حدود ۲۰ درصد بیشتر از مقدار آن برای سناریوهای با تحلیل DDHA به‌دست آمد، زیرا در حالت استفاده از تحلیل PDHA مقدار دبی تأمین شده با توجه به معادله در نظر گرفته شده برای بیان ارتباط دبی خروجی و فشار گرهی، مبتنی بر فشار گرهی است و

References

- Alperovits, E., & Shamir, U. 1977. Design of optimal water distribution systems. *Water Resource Research*, 13(6), 885-900.
- Ameyaw E. E., Memon F. A., & Bicik J. 2013. Improving equity in intermittent water supply systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 62(8), 552-562.
- Andey, S. P., & Kelkar, P. S. 2009. Influence of intermittent and continuous modes of water supply on domestic water consumption. *Water Resources Management*, 23(12), 2555-2566.
- Bozorg-Haddad, O., Hoseini-Ghafari, S., Solgi, M., & Loaiciga, H. A. 2016. Intermittent urban water supply with protection of consumers' welfare. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 7(3), 04016002.
- Coelho, S. T., James, S., Sunna, N., Jaish, A. A., & Chatila, J. 2003. Controlling water quality in intermittent supply systems. *Water Supply*, 3(1-2), 119-125.
- De Marchis, M., Fontanazza, C. M., Freni, G., La Loggia, G., Napoli, E., & Notaro V. 2010. Modelling analysis



- of distribution network filling process during intermittent supply. *In Proceedings of Computing and Control in the Water Industry*, Boxal and Maksimovic, Taylor and Francis Group, London, 189-194.
- Eberhart, R. C., & Kennedy, J. 1995. A new optimizer using particle swarm theory. *In Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, 1, 39-43.
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., & Loucks, D. P. 1982. Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation. *Water Resources Research*, 18(1), 14-20.
- Ingeduld, P., Pradhan, A., Svitak, Z., & Terrai, A. 2006. Modelling intermittent water supply systems with EPANET. *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium*, Cincinnati, USA, 1-8.
- Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision (IRIVSPSPS). 2011. *Guidelines for design of urban and rural water supply and distribution systems, Report No. 117-3 (First Revision)*, Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision Press. (In Persian)
- Karimi, M., Ahrar Yazdi, B., & Ahrar Yazdi, B. 2017. Comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm for optimization of CGAM problem. *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, 33.3(1), 129-136. (In Persian)
- Samsami, R. 2013. Comparison between genetic algorithm (GA), particle swarm optimization (PSO) and ant colony optimization (ACO) techniques for NO_x emission forecasting in Iran. *World Applied Sciences Journal*, 28(12), 1996-2002.
- Sashikumar, N., Mohankumar, M. S., & Sridharan, K. 2003. Modeling an intermittent water supply. *In Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress*, USA, June, 23-26.
- Shirzad, A., Tabesh, M., Farmani, R., & Mohammadi, M. 2013. Pressure-discharge relations with application in head driven simulation of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(6), 660-670.
- Shokoohi, M., Tabesh, M., & Nazif, S. 2017. Water quality based multi-objective optimal design of water distribution systems. *Water Resources Management*, 31(1), 93-108.
- Soltanjalili, M., Bozorg Haddad, O., & Marino, M. A. 2013. Operating water distribution networks during water shortage conditions using hedging and intermittent water supply concepts. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(6), 644-659.
- Tabesh, M., & Zia, A. 2003. Dynamic management of water distribution networks based on hydraulic performance analysis of the system. *Journal of Water Science and Technology: Water Supply*, 3(1-2), 95-102.
- Vairavamoorthy, K. 1994. Water distribution networks: design and control for intermittent supply. PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London UK.
- Vairavamoorthy, K., Gorantiwar, S. D., & Mohan, S. 2007. Intermittent water supply under water scarcity situations. *Water International*, 32(1), 121-132.
- Wagner, J., Shamir, U., & Marks, D. 1988. Water distribution reliability: simulation methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(3), 276-294.

