

Journal of Water and Wastewater, Vol. 32, No. 6, pp: 36-47

# Maximizing the Hydraulic Performance of Khomam Water Distribution Network with Optimal Planning of the Number and Speed of Pumps

M. Dini<sup>1</sup>, M. Hemmati<sup>2</sup>, S. Hashemi<sup>3</sup>

1. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran  
(Corresponding Author) m.dini@azaruniv.ac.ir

2. MSc Student, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

3. PhD. in Hydraulic Modelling Engineer, Jacobs Engineering Group, Toronto, Ontario, Canada

(Received Feb. 25, 2021 Accepted Aug. 13, 2021)

## To cite this article:

Dini, M., Hemmati, M., Hashemi, S. 2022. "Maximizing the hydraulic performance of Khomam water distribution network with optimal planning of the number and speed of pumps"  
Journal of Water and Wastewater, 32(6), 36-47. Doi: 10.22093/wwj.2021.275013.3118. (In Persian)

## Abstract

In recent decades, due to the limitations of water resources, much research has been done in relation to the optimal operation of water distribution networks. In this regard, the use of appropriate methods to control and set the performance of pumps, valves, reservoirs and tanks in these systems are of considerable importance. In this paper, the aim is to regulate the optimal number and speed of pumps in pumping stations to maximize the hydraulic performance of water distribution networks. For this purpose, a new index is presented based on the pump speed optimization process to determine the number of turn-on pumps. In addition, the Nodal Pressure Reliability Index (NPRI) is used to evaluate the hydraulic performance of the network. The hydraulic analysis of the network is performed using EPANET and the optimization process is performed using the Modified Standard Particle Swarm Optimization algorithm (MSPSO), both of which are done in MATLAB code. The proposed method has been implemented in the form of four scenarios on the Khomam water distribution network, Gilan province. Scenarios include current status with Single Speed Pumps (SSP), Best Setting of Rotational Speed Pumps (BSRSP), Best Number of Turn on Single Speed Pumps (BNTSSP) and Best Number and Speed of Turn on Rotational Speed Pumps (BNSTRSP). Comparison of the results shows that the BSRSP and BNSTRSP scenarios with the slightest difference have the highest reliability and the lowest leakage. So that they increase the reliability of the network by 66.10 and 66.06 percent, respectively, and reduce the leakage by 23.53 and 23.48 percent, respectively. However, in the BNSTRSP scenario, the number of turn-on pumps is 13.16 percent less than the BSRSP scenario. Also, in the BNTSSP scenario where the number of turn-on pumps is less than the SSP scenario, the reliability of the network increases 21.36 percent and the leakage rate decreases by 10.36 percent, which emphasizes the efficiency of the NTPI index in improving network performance. In general, determining the number of turn-on pumps in pumping stations and optimizing the speed of variable speed pumps has a significant effect on increasing the hydraulic performance of water distribution networks, which can be very effective in saving energy and water resources and increasing network performance.

**Keywords:** Optimization, Single and Rotational Speed Pumps, Khomam Water Distribution Network, Number of Turn-on Pumps Index, Nodal Pressure Reliability, Leakage.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۲، شماره ۶، صفحه: ۴۷-۳۶

## بیشینه‌سازی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب شهر خمam با برنامه‌ریزی بهینه تعداد و سرعت پمپ‌ها

مهدی دینی<sup>۱</sup>، مژده همتی<sup>۲</sup>، سعید هاشمی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

(نویسنده مسئول) m.dini@azaruniv.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۳- دکترای مدل‌سازی هیدرولیکی، شرکت مهندسی جاکوبز، تورنتو، اونتاریو، کانادا

(دریافت ۹۹/۱۲/۷ پذیرش ۱۴۰۰/۵/۲۲)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

دینی، م.، همتی، م.، هاشمی، س.، ۱۴۰۰، "بیشینه‌سازی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب شهر خمam با برنامه‌ریزی بهینه تعداد و سرعت پمپ‌ها"

مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۶)، ۴۷-۳۶. Doi: 10.22093/wwj.2021.275013.3118

### چکیده

در دهه‌های اخیر، با توجه به محدودیت‌های منابع آب، پژوهش‌های زیادی در ارتباط با بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع آب انجام شده است. در این راستا، به‌کارگیری روش‌های مناسب برای کنترل و تنظیم عملکرد پمپ‌ها، شیرآلات، مخازن و تانک‌ها در این سیستم‌ها اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش، هدف تنظیم بهینه تعداد و سرعت پمپ‌ها در ایستگاه‌های پمپاژ برای بیشینه‌سازی کارایی هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب است. برای این منظور، یک شاخص جدید مبتنی بر فرایند بهینه‌سازی سرعت پمپ‌ها برای تعیین تعداد پمپ‌های روشن ارائه شد که به‌عنوان نوآوری پژوهش به حساب می‌آید. همچنین برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی شبکه از شاخص قابلیت اطمینان فشار گره‌ای شبکه، برای تحلیل هیدرولیکی شبکه از نرم‌افزار EPANET و برای بهینه‌سازی از الگوریتم دسته ذرات استاندارد اصلاح شده در محیط MATLAB استفاده شد. روش پیشنهادی در قالب چهار سناریو بر روی شبکه توزیع آب شهر خمam در استان گیلان پیاده شد. سناریوها شامل وضعیت موجود با پمپ‌های تک‌سرعت، تنظیم بهینه سرعت پمپ‌های دور متغیر، تعیین تعداد بهینه پمپ‌های روشن تک‌سرعت و تنظیم بهینه تعداد و سرعت پمپ‌های روشن دور متغیر است. مقایسه نتایج نشان داد که سناریوهای تنظیم بهینه سرعت پمپ‌های دور متغیر و تنظیم بهینه تعداد و سرعت پمپ‌های روشن دور متغیر با اندکی اختلاف، بیشترین میزان قابلیت اطمینان و کمترین میزان نشست در شبکه را دارند به طوری که به ترتیب میزان قابلیت اطمینان شبکه را ۶۶/۲۰ و ۶۶/۰۶ درصد افزایش و میزان نشست شبکه را به ترتیب ۲۳/۵۳ و ۲۳/۴۸ درصد کاهش می‌دهند، این در حالی است که در سناریوی تنظیم بهینه تعداد و سرعت پمپ‌های روشن دور متغیر تعداد پمپ‌های روشن ۱۳/۱۶ درصد کمتر از سناریوی تنظیم بهینه سرعت پمپ‌های دور متغیر است. همچنین در سناریوی تعیین تعداد بهینه پمپ‌های روشن تک‌سرعت که تعداد پمپ‌های روشن آن کمتر از سناریوی پمپ‌های روشن تک‌سرعت است، میزان قابلیت اطمینان شبکه ۲۱/۳۵ درصد افزایش و میزان نشست ۱۰/۳۷ درصد کاهش یافته است که تأکیدی بر کارایی شاخص تعداد پمپ‌های روشن در بهبود عملکرد شبکه است. به‌طور کلی تعیین تعداد پمپ‌های روشن در ایستگاه‌های پمپاژ و تنظیم بهینه سرعت پمپ‌های دور متغیر در افزایش کارایی هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب تأثیر قابل توجهی دارد که می‌تواند در صرفه‌جویی در منابع آب و انرژی و افزایش عملکرد شبکه بسیار مؤثر باشد.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی، پمپ تک‌سرعت، پمپ سرعت متغیر، شبکه توزیع آب خمam، شاخص تعداد پمپ روشن، قابلیت اطمینان فشار گره‌ای شبکه، نشست



**۱- مقدمه**

راهکارهای مدیریتی کنترل فشار و در نتیجه کنترل نشت در شبکه هستند.

پمپ‌ها وسیله‌هایی هستند که انرژی مکانیکی را به‌عنوان هد هیدرولیکی به سیال منتقل می‌کنند و هنگامی که شبکه‌های توزیع آب برای غلبه بر اختلاف ارتفاع به انرژی نیاز دارد، استفاده خواهند شد و به دو دسته پمپ‌های تک‌سرعت<sup>۳</sup> و پمپ‌های سرعت متغیر<sup>۴</sup> تقسیم می‌شوند (Coelho et al., 2012).

استفاده از SSP در کنترل فشار و نشت مؤثر است، اما با توجه به تغییرات زمانی الگوی مصرف، برای مدیریت بهتر فشار، نشت و مصرف انرژی، به‌کارگیری RSP پیشنهاد مناسب و کارآمدتری است که پژوهشگران زیادی سعی در بهینه‌سازی ایستگاه‌های پمپاژ به‌منظور کاهش هدررفت آب و مصرف انرژی کرده‌اند (Hemati et al., 2020).

مهزاد و همکاران در پژوهشی به بررسی عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ با توجه به خرابی پمپ‌ها در شبکه‌های توزیع آب و بهینه‌سازی عملکرد آنها با اهداف حداقل کردن هزینه‌های انرژی، حداکثر کردن قابلیت اطمینان کیفی و هیدرولیکی ایستگاه‌های پمپاژ با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان<sup>۵</sup> و ارزیابی کارایی این الگوریتم از طریق توابع آزمون خاص پرداختند (Mehzad et al., 2012, Mehzad et al., 2019, Mehzad et al., 2020).

هاشمی و همکاران برنامه‌ریزی روزانه RSP را با هدف حداقل کردن هزینه‌های انرژی، نشت و فشار اضافی در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان انجام دادند (Hashemi et al., 2013, Hashemi et al., 2014).

بابایی و همکاران برنامه بهینه‌سازی چندهدفه RSP برای بهبود عملکرد شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم ACO را ارائه کردند (Babaei et al., 2015).

دایی به برنامه‌ریزی بهینه پمپ‌ها به‌منظور مدیریت فشار و کاهش نشت آب با استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح<sup>۶</sup> در مقیاس کوچک پرداخته است (Dai, 2017).

آب یکی از مهمترین نیازهای بشر است که همواره یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های انسان است. شکل‌گیری زندگی شهری در کنار این نیاز مهم، موجب پیدایش شبکه‌های توزیع آب شهری شده است. شبکه‌های توزیع آب مجموعه‌ای از تأسیساتی هستند که امکان توزیع آب بین مشترکین را به‌صورت ثقلی یا تحت فشار فراهم می‌سازند. افزایش جمعیت و تقاضا و همچنین گسترش فناوری‌های جدید باعث توسعه و گسترش این شبکه‌ها و روش‌های نوین بهره‌برداری از آنها در سراسر جهان شده است (Ormsbee, 1989).

به‌طوری‌که هدررفت آب، میزان مصرف زیاد انرژی، قابلیت اطمینان کم، توزیع فشار نامناسب و ارائه راهکارهای لازم برای کاهش اثرات آنها به مسئله‌ای مهم و اجتناب‌ناپذیر در بهره‌برداری از شبکه‌ها تبدیل شده است. یکی از بهترین‌ترین راهکارهای تأثیرگذار برای کنترل و کاهش نشت آب، مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب است (Jafari, 2016).

تغییرات فشار بیشتر یا کمتر از محدوده مجاز، باعث مشکلاتی مانند مصرف ناخواسته، هدررفت آب و کاهش سطح رضایتمندی مشترکین می‌شود. بنابراین میزان فشار در شبکه‌های توزیع آب باید به حدی باشد که ضمن کمینه‌سازی میزان نشت، بیشینه‌سازی کارایی سیستم را نیز به همراه داشته باشد (Taebi and Chamani, 2014).

بنابراین با توجه به هزینه‌های زیاد بهره‌برداری شبکه‌های توزیع آب و طراحی پیچیده آنها، پژوهشگران همیشه در تلاش هستند تا روش‌های کارآمدتر نسبت به پژوهش‌های پیشین ارائه دهند. کنترل هد و دبی خروجی شیرآلات (Tabesh and Vaseti, 2006, Dini and Asadi, 2019, Dini and Asadi, 2020, Gupta et al., 2020) استفاده از سیستم مخزن و پمپ قابل تبدیل به توربین<sup>۱</sup> (De Marchis and Freni, 2015)، طراحی بهینه مناطق تحت پوشش (مجزا)<sup>۲</sup> (Güngör et al., 2019)، تنظیم بهینه عملکرد پمپ‌ها (Hashemi et al., 2013, Hashemi et al., 2014, Page et al., 2019) et al., 2017, Paye et al., 2019) و روش‌های مشابه از جمله

<sup>3</sup> Single Speed Pumps (SSP)

<sup>4</sup> Rotational Speed Pumps (RSP)

<sup>5</sup> Ant Colony Optimization (ACO)

<sup>6</sup> Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP)

<sup>1</sup> Pump As Turbines (PAT)

<sup>2</sup> District Metered Areas (DMAs)



زمان گسترده بودن مدل برنامه‌ریزی ایستگاه‌های پمپاژ (۲۴ ساعته) و بالا بودن زمان اجرا در مدل HDSM به دلیل تعداد دفعات سعی و خطا در عمل ترکیب این دو حالت را غیرممکن می‌کند، به طوری که اجرای یک مدل ترکیبی با رایانه‌های معمولی ماه‌ها زمان نیاز دارند. برای تخمین نشت در گره‌های شبکه از معادله ۱ استفاده شده است (Araujo et al., 2006)

$$q_j = (C \sum_{i=1}^M 0.5 L_{ij}) P_j^\beta \quad (1)$$

که در آن

$q_j$  میزان نشت از گره  $j$ ،  $P_j$  فشار در دسترس در گره  $j$ ،  $L_{ij}$  مجموع طول تمام لوله‌های متصل به گره  $j$  و  $\beta$  ضریب توان فشار گره‌ای که مقدار آن در این پژوهش مطابق نتایج پژوهش‌های قبلی برابر ۱/۱۸ در نظر گرفته شد (Tabesh and Vaseti, 2006). همچنین  $C$  ضریب تخلیه از روزنه‌های موجود در اتصالات و لوله‌ها است که برای تطبیق بهتر نتایج با مدل شبکه مورد مطالعه، مقدار آن به روش سعی و خطا و بر اساس داده‌های نشت برآورد شد.

## ۲-۲- قابلیت اطمینان

در این پژوهش، متغیر تصمیم مسئله تعیین NTPI و سرعت آنها در هر ساعت و هدف مسئله بیشینه‌سازی NPRI است. تابع هدف مسئله به صورت معادله ۲ است. این معادله برای اولین بار توسط دینی و تابش در سال ۱۳۹۷ ارائه شد و در پژوهش‌های متعدد دیگر به کار برده شده است که در آن NPRI در همسایگی فشار ۳۱ متر بیشترین مقدار و در فشارهای کمتر یا بیشتر از آن قابلیت اطمینان شبکه کاهش می‌یابد (شکل ۱) (Dini and Tabesh, 2019, Dini and Asadi, 2019, Dini and Asadi, 2020)

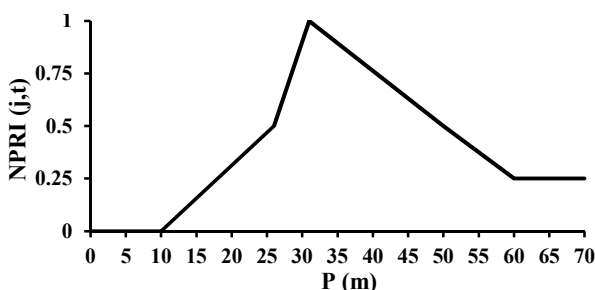


Fig. 1. Utility function of nodal pressure reliability index  
شکل ۱- تابع مطلوبیت شاخص قابلیت اطمینان فشار گره‌ای

در مجموع پژوهش‌های متعددی به موضوع بهینه‌سازی ایستگاه‌های پمپاژ با استفاده از الگوریتم‌های مختلف پرداخته‌اند که در آنها توجه به موضوع کاهش نشت، هزینه‌ها و مصرف انرژی و افزایش کارایی شبکه در اولویت بوده است. رویکردی که در پژوهش‌های قبلی به آن توجه نشده و به عنوان یک نوآوری برای این پژوهش محسوب می‌شود، چالش مربوط به تعداد پمپ‌های روشن و سرعت بهینه چرخش آنها در یک برنامه زمان‌بندی ساعتی در طول شبانه‌روز است که در این پژوهش به آن پرداخته شد.

در این پژوهش هدف بیشینه‌سازی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب شهر خمام با برنامه‌ریزی بهینه تعداد و سرعت پمپ‌ها است. برای این منظور یک شاخص جدید مبتنی بر فرایند بهینه‌سازی سرعت پمپ‌ها برای تعیین حداقل تعداد پمپ‌های روشن در هر ایستگاه پمپاژ ارائه شد. بعد از تعیین تعداد پمپ‌های روشن در هر ساعت شبانه‌روز، سرعت بهینه آنها در قالب فرایند بهینه‌سازی محاسبه و سپس کارایی هیدرولیکی شبکه بر اساس شاخص قابلیت اطمینان فشار گره‌ای شبکه<sup>۲</sup> برآورد شد. روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع آب شهر خمام به عنوان یک شبکه واقعی پیاده‌سازی شد. مدل‌سازی روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم دسته ذرات اصلاح شده<sup>۳</sup> و با کدنویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB و در لینک با شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه EPANET انجام شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مدل‌سازی هیدرولیکی

برای مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب، دو روش تحلیل مبتنی بر فشار<sup>۴</sup> و تحلیل مبتنی بر تقاضا<sup>۵</sup> استفاده می‌شود که در این پژوهش برای مدل‌سازی مصارف در گره‌ها، روش DDSM و برای مدل‌سازی نشت در گره‌ها از روش HDSM استفاده شد. علت عدم استفاده از روش HDSM برای تحلیل هیدرولیکی شبکه، علی‌رغم مزیت بهتر آن در مقایسه با روش DDSM مربوط به مدت زمان اجرای مدل‌ها است که با توجه به بالا بودن زمان اجرا به دلیل

<sup>1</sup> Number of Turn on Pumps Index (NTPI)

<sup>2</sup> Nodal Pressure Reliability Index (NPRI)

<sup>3</sup> Modified Standard Particle Swarm Optimization (MSPSO)

<sup>4</sup> Head Driven Simulation Method (HDSM)

<sup>5</sup> Demand Driven Simulation Method (DDSM)



MSPSO ارائه شده است (Dini, 2019) که منجر به بهبود سرعت همگرایی الگوریتم و افزایش توانایی ذرات در جستجوی کامل‌تر فضای مسئله، شده است. این رابطه در معادله ۵ نشان داده شده است

$$V^i(t+1) = (C_1 R_1 (x^{i,best}(t) - x^i(t)) + C_2 R_2 (x^{g,best}(t) - x^i(t)) (-1)^\alpha + W V_i(t)) (-1)^\alpha \quad (5)$$

که در آن

$V^i(t+1)$  سرعت جدید ذره،  $W$  ضریب اینرسی،  $t_1$ ،  $t_2$  و  $t_3$  تابع رندم که اعداد حقیقی بین صفر تا ۱ تولید می‌کند،  $C_1$  و  $C_2$  اعداد ثابت که  $C_1$  ضریب یادگیری شخصی و  $C_2$  ضریب یادگیری جمعی که مابین صفر تا ۲ قرار دارند. همچنین  $x^{i,best}(t)$  بهترین موقعیت هر ذره،  $x^i(t)$  موقعیت فعلی،  $x^{g,best}$  بهترین موقعیت جمعی همه ذرات،  $x^i(t+1)$  موقعیت جدید ذره،  $\alpha$  ضریبی بین ۱ تا ۲ و  $\beta$  ضریبی بین ۱ تا ۱/۵ است. همچنین برخی دیگر از پارامترهای الگوریتم دسته ذرات به صورت مقدار  $C_1=C_2=2$ ،  $W=1$  و  $\beta=1.42$  استفاده شده است.

### ۲-۵- روش پژوهش

در روند نمای شکل ۲ جزئیات مراحل انجام پژوهش آمده است. به این ترتیب که ابتدا با بهینه‌سازی سرعت دوران تمامی پمپ‌های موجود در هر ایستگاه پمپاژ و جای‌گذاری مقدار به‌دست آمده از آنها در معادله ۴، NTPI در هر ساعت تعیین می‌شود. سپس در داخل یک فرایند بهینه‌سازی دیگر سرعت بهینه هر پمپ روشن تعیین می‌شود. هدف بهینه‌سازی پیشینه‌کردن NPRI است. در ادامه برای مدل بهینه، مقدار فشار گره‌ای، شاخص NPRI و متوسط نشت ساعتی شبکه محاسبه و نتایج برای سناریوهای مختلف مقایسه می‌شود. مدل‌سازی در نرم‌افزار MATLAB با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات و با لینک با شبیه‌ساز هیدرولیکی شبکه انجام می‌شود.

### ۳- مطالعه موردی

شهر خمام به‌عنوان مرکز شهرستان خمام در استان گیلان واقع شده است. شبکه توزیع آب شهر به‌دلیل توپوگرافی مسطح آن دارای کمبود فشار و عدم تأمین تقاضای مورد نیاز مصرف‌کنندگان

$$NPRI = \frac{\sum_{j=1}^{NN} Q_{j,t}^{req} (NPRI(j,t))}{\sum_{j=1}^{NN} Q_{j,t}^{req}} \quad (2)$$

که در آن

$NPRI(j,t)$  میزان شاخص قابلیت اطمینان فشار گره‌ای در گره زدر زمان  $t$ ،  $P$  فشار گره‌ای در گره زدر زمان  $t$ ،  $NPRI$  شاخص قابلیت اطمینان فشار گره‌ای شبکه،  $NN$  تعداد گره‌های موجود در شبکه و  $Q_{req}$  میزان تقاضای فشار مورد نیاز گره زدر زمان  $t$  است.

### ۲-۳- شاخص NTPI

در ایستگاه‌های پمپاژ چندین پمپ به‌طور هم‌زمان روشن و فعال هستند که در بیشتر ساعت‌های شبانه‌روز به‌خصوص در ساعت‌های حداقل مصرف، روشن بودن برخی از آنها ضرورتی ندارد. به‌همین دلیل برای پیدا کردن حداقل تعداد مورد نیاز پمپ‌های روشن در هر ساعت یک شاخص جدید به صورت معادله ۳ ارائه شده است

$$NTPI_t = \text{Round}(\sum_{i=1}^{NP} \left(\frac{V_{it}}{V_m}\right)) \quad (3)$$

که در آن

$NTPI_t$  شاخص تعداد پمپ‌های روشن در زمان  $t$  در یک ایستگاه است که به صورت عدد صحیح است و از گرد کردن عدد به‌دست آمده به نزدیک‌ترین عدد صحیح به‌دست می‌آید.  $NP$  تعداد پمپ‌ها در هر ایستگاه،  $V_{it}$  سرعت بهینه پمپ  $i$ ام در زمان  $t$  و  $V_m$  بیشترین سرعت مشاهداتی در بین پمپ‌های موجود در یک ایستگاه پمپاژ در طول ۲۴ ساعت است. سرعت پمپ به‌صورت نسبت دور موتور پمپ در وضعیت موجود به دور موتور در وضعیت نرمال تعریف می‌شود که یک کمیت بدون بعد است.

### ۲-۴- الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات اصلاح شده

در سال ۱۹۹۵ ابرهارت و کندی برای اولین بار PSO را به‌عنوان یک روش جستجو غیرقطعی و فرا ابتکاری برای بهینه‌سازی مطرح کردند (Eberhard and Kennedy, 1995). PSO یک الگوریتم جستجو جمعی است که از روی رفتار اجتماعی دسته پرندگان مدل شده است و بر اساس قوانین احتمالی عمل می‌کند. با توجه به ساختار احتمالاتی این الگوریتم با اصلاح معادله سرعت حرکت دسته ذرات استاندارد و ارائه رابطه‌ای جدید برای آن، الگوریتم



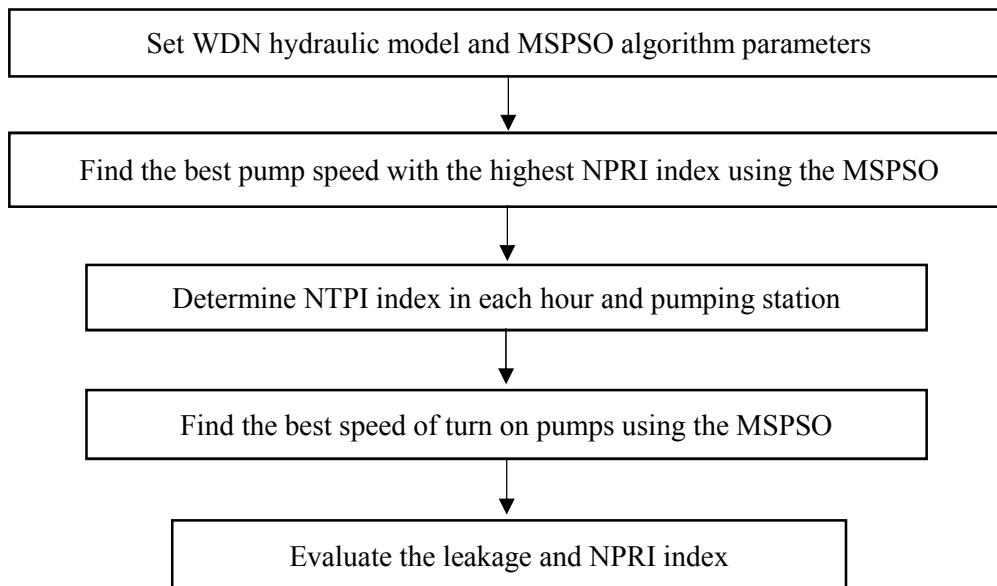


Fig. 2. Procedure flowchart

شکل ۲- روند نمای پژوهش

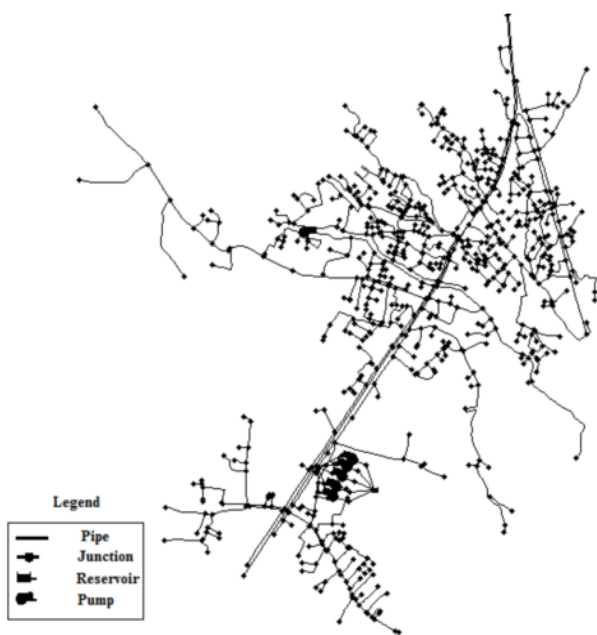


Fig. 3. Khomam WDN

شکل ۳- شبکه توزیع آب شهر خمام

به خصوص در ساعت پیک مصرف است و در این پژوهش بر اساس پیشنهاد شرکت آب و فاضلاب استان گیلان، به عنوان یک مطالعه موردی واقعی برای بهبود وضعیت توزیع فشار شبکه با برنامه ریزی ایستگاه پمپاژ انتخاب شد. شبکه شهر خمام، یک مخزن اصلی به همراه ۴ پمپ و یک مخزن کمکی به همراه یک شیر کنترل جریان، ۷۴۹ گره و ۷۸۶ لوله دارد. بررسی عملکرد شبکه برای اولین بار در پژوهش دیگری به صورت ارزیابی تأثیر اندازه و تعداد پمپها در کارایی هیدرولیکی شبکه انجام شده است (Hemmati et al., 2021).

با توجه به عملکرد نامناسب شبکه در وضعیت موجود بر اساس نتایج این پژوهش با افزودن دو پمپ به شبکه، یک پمپ به ایستگاه پمپاژ اصلی با مشخصات مشابه پمپهای موجود و یک پمپ دیگر به عنوان جایگزین شیر کنترل جریان با ظرفیت یک سوم پمپهای موجود، ایستگاه پمپاژ شبکه اصلاح شد و روش پیشنهادی بر روی آن بررسی شد. ساختار کلی شبکه در شکل ۳ نشان داده شده است.

#### ۴- نتایج و بحث

برای ارزیابی تأثیر روش پیشنهادی در شبکه توزیع آب شهر خمام چهار سناریوی مختلف شامل وضعیت موجود با پمپهای

SSP، تنظیم بهینه سرعت پمپهای دور متغیر<sup>۱</sup>، تعیین تعداد بهینه پمپهای روشن تک سرعت<sup>۲</sup> و تنظیم بهینه تعداد و سرعت

<sup>1</sup> Best Setting of Rotational Speed Pumps (BSRSP)

<sup>2</sup> Best Number of Turn on Single Speed Pumps (BNTSSP)



وضعیت موجود با پمپ‌های تک‌سرعتی نشان می‌دهد که شبکه به‌طور متوسط در زمان حداقل مصرف ساعتی از مازاد فشار و در زمان حداکثر مصرف ساعتی از کمبود فشار نسبت به مقدار بهینه (۳۱ متر)، مشکل دارد و همین عامل باعث می‌شود که قابلیت اطمینان شبکه نیز در این زمان‌ها بسیار کم و مقدار نشت شبکه در زمان حداقل مصرف، زیاد باشد. لازم به توضیح است که در شبکه در حال سرویس خمام هیچ برنامه‌ریزی بهره‌برداری از شبکه انجام نمی‌شود که نتایج آن در پژوهش همتی و همکاران آمده است و در این سناریو نسبت به شبکه موجود شهر خمام تغییراتی در ایستگاه‌های پمپاژ شبکه انجام شده است که شامل افزودن یک پمپ به ایستگاه پمپاژ اصلی و یک پمپ دیگر به‌عنوان جایگزین شیر کنترل جریان است. عملکرد شبکه در این سناریو نسبت به شبکه در حال سرویس خمام بهتر شده است، به‌طوری که مقایسه نتایج این سناریو با نتایج شبکه در حال سرویس خمام در پژوهش همتی و همکاران نشان می‌دهد که متوسط قابلیت اطمینان روزانه شبکه از ۰/۳۳ به ۰/۵۵ افزایش یافته است که نشان‌دهنده تأثیر مثبت تغییرات پیشنهادی در این سناریو در عملکرد شبکه خمام است (Hemmati et al., 2021). با این وجود عملکرد سناریوهای پیشنهادی بعدی با عملکرد شبکه در حال سرویس خمام مقایسه نمی‌شود بلکه با سناریوی وضعیت موجود با SSP مقایسه می‌شود.

#### ۲-۴- تنظیم BSRSP

در سناریوی دوم فرض بر این بود که همه پمپ‌های موجود در ایستگاه پمپاژ اصلی و فرعی شبکه توزیع آب خمام از نوع RSP باشند. با به‌کارگیری MSPSO، مقدار سرعت هر یک از پمپ‌ها به‌صورت ساعتی و در طول روز تنظیم شده است که نتایج سرعت پمپ‌ها در شکل ۴ آمده است. در این شکل پمپ‌های RSP1 تا RSP5 مربوط به ایستگاه پمپاژ اصلی و RSP6 مربوط به ایستگاه پمپاژ فرعی شبکه است. همان طوری که از شکل ۳ مشخص است، در مجموع برآیند سرعت پمپ‌ها در زمان‌های حداکثر مصرف از شبکه زیاد و در زمان‌های حداقل مصرف از شبکه کم است که هم‌خوانی مناسب بین سرعت پمپ‌ها و ضریب الگوی مصرف شبکه را نشان می‌دهد. نوسان مقدار سرعت پمپ‌ها در شکل ۴ مربوط به دو عامل می‌تواند باشد که اولی مربوط به برنامه بهینه‌سازی است که در ارتباط با مقدار NPRI در هر ساعت، ده‌ها ترکیب از سرعت

پمپ‌های روشن دور متغیر<sup>۱</sup> در نظر گرفته شد که در ادامه نتایج آنها به‌صورت کامل تشریح می‌شود. در تمامی بخش‌های مربوط به نتایج این سناریوها عبارت Min نشان‌دهنده زمان حداقل مصرف ساعتی در روز، Max نشان‌دهنده زمان حداکثر مصرف ساعتی در روز، Ave نشان‌دهنده متوسط مصرف ساعتی در طول روز، P نشان‌دهنده مقدار فشار گره‌ای در شبکه و Imp<sup>۲</sup> نشان‌دهنده میزان بهبود در مقایسه با سناریوی پایه یعنی وضعیت موجود است.

#### ۴-۱- وضعیت موجود با SSP

در این سناریو کارایی هیدرولیکی شبکه در وضعیت موجود بررسی شد. برای این منظور ۵ پمپ موجود در ایستگاه پمپاژ اصلی و همچنین تک‌پمپ موجود در ایستگاه پمپاژ فرعی با سرعت ثابت و به‌صورت ۲۴ ساعته روشن در نظر گرفته شده است. شبکه شهر به‌صورت دینامیکی و دوره‌گسترده در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز اجرا شده و مقدار قابلیت اطمینان، نشت ساعتی و فشار محاسبه شده است. در جدول ۱ نتایج مربوط به مقدار قابلیت اطمینان، نشت و فشار در زمان‌های حداقل، حداکثر مصرف ساعتی و همچنین به‌صورت متوسط روزانه گزارش شده است.

جدول ۱- مقدار قابلیت اطمینان، نشت و فشار گره‌ای شبکه برای

سناریوی SSP

Table 1. The reliability, leakage and nodal pressure of the network for the SSP scenario

Status	P(m)	NPRI	NPRI Imp (%)	Leak (l/s)	Leak Imp (%)
Min	60.77	0.250	0	47.83	0
Max	19.25	0.266	0	12.37	0
Ave	39.58	0.548	0	29.21	0

مطابق نتایج جدول ۱، مقدار قابلیت اطمینان شبکه در زمان‌های حداقل، حداکثر مصرف ساعتی و متوسط روزانه به‌ترتیب برابر با ۰/۲۵۰، ۰/۲۶۶ و ۰/۵۴۸ و مقدار نشت شبکه خمام نیز به‌ترتیب برابر با ۴۷/۸۳، ۱۲/۳۷ و ۲۹/۲۱ لیتر در ثانیه است. همچنین مقدار متوسط فشار شبکه در زمان‌های فوق به‌ترتیب برابر ۶۰/۷۷، ۱۹/۲۵ و ۳۹/۵۸ متر است. در مجموع بررسی عملکرد شبکه در

<sup>1</sup> Best Number of Turn on Rotational Speed Pumps (BNSTRSP)

<sup>2</sup> Improving



جدول ۲- مقدار قابلیت اطمینان، نشت و فشار گره‌ای شبکه برای

سناریوی BSRSP

**Table 2.** The reliability, leakage and nodal pressure of the network for the BSRSP scenario

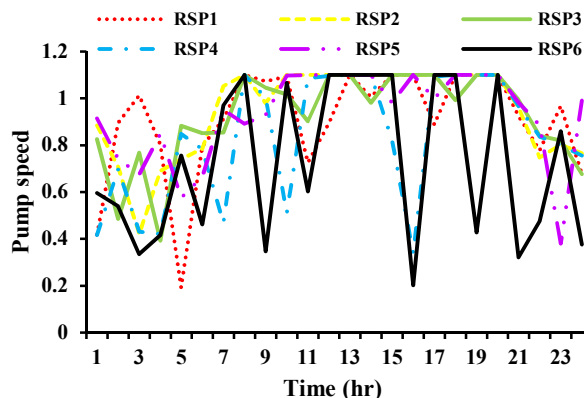
Status	P(m)	NPRI	NPRI Imp (%)	Leak (l/s)	Leak Imp (%)
Min	31.14	0.966	286.40	21.71	54.60
Max	28.92	0.738	177.44	19.96	-61.36
Ave	31.87	0.911	66.20	22.33	23.55

شده است. به طوری که متوسط روزانه قابلیت اطمینان و نشت شبکه به ترتیب ۶۶/۲۰ و ۲۳/۵۵ درصد بهتر شده است.

### ۳-۴- تعیین BNTSSP

در این سناریو فرض شد که همه پمپ‌های موجود در شبکه از نوع SSP باشند. با به کارگیری شاخص NTPI، تعداد پمپ‌های روشن در هر ساعت تعیین شده است که به طور متوسط ۳ پمپ در هر ساعت به دست آمد. در نهایت با تنظیم NTPI در هر ساعت در طول شبانه روز، سرعت ثابت برای همه آنها در نظر گرفته شد. در شکل ۵، NTPI در هر ساعت و برنامه تنظیم سرعت آنها به ترتیب برای ایستگاه پمپاژ اصلی و فرعی نشان داده شده است. همان طور که مشخص است در طول ساعات‌های ۱ تا ۴ تعداد ۳ پمپ، در ساعات‌های ۵، ۶، ۷، ۲۲، ۲۳ و ۲۴ تعداد ۴ پمپ و در ساعات‌های ۸ تا ۲۱، تعداد ۵ پمپ در ایستگاه پمپاژ اصلی روشن هستند که همگی با سرعت ثابت کار می‌کنند. همچنین در ایستگاه پمپاژ فرعی در ساعات‌های ۷ تا ۲۱ تنها پمپ موجود در ایستگاه روشن و در سایر ساعات خاموش است که در زمان‌های روشن بودن، با سرعت ثابت کار می‌کند.

نتایج مربوط به مقدار قابلیت اطمینان، نشت و فشار در زمان‌های حداقل، حداکثر مصرف ساعتی و به صورت متوسط روزانه در جدول ۳ آمده است. در این سناریو، مقدار قابلیت اطمینان شبکه در زمان‌های حداقل، حداکثر مصرف ساعتی و متوسط روزانه به ترتیب برابر با ۰/۴۹۸، ۰/۲۹۵ و ۰/۶۶۵ و مقدار نشت شبکه خمام نیز به ترتیب برابر با ۳۷/۵۳، ۱۳/۰۳ و ۲۶/۱۸ لیتر در ثانیه است. همچنین مقدار متوسط فشار شبکه در زمان‌های فوق به ترتیب برابر ۴۹/۴۸، ۲۰/۱۳ و ۳۶/۲۴ متر است. مقایسه



**Fig. 4.** The optimal pumps speed with the highest NPRI index for the BSRSP scenario

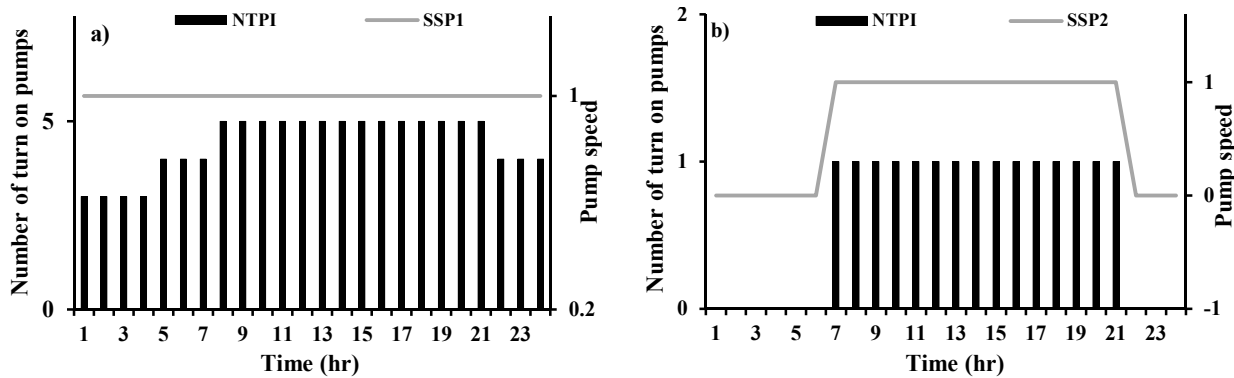
شکل ۴- سرعت بهینه پمپ‌های موجود با بیشترین شاخص NPRI در سناریوی BSRSP

پمپ‌ها در کنار هم وجود دارد که می‌تواند مقدار بیشینه بسیار نزدیک به هم را برای قابلیت اطمینان ایجاد کند و در اجرای مدل بهینه‌سازی، مدل به یکی از آنها می‌رسد و باعث نوسان‌های موجود می‌شود. دومی مربوط به ظرفیت اضافی پمپاژ در برخی ساعات‌ها در شبکه است که در عمل، وقتی چند پمپ با ظرفیت کامل کار می‌کنند، پمپ‌های دیگر می‌توانند با ظرفیت کم کار کنند که باعث نوسان موجود می‌شود. برای کاستن از این مشکل در این پژوهش شاخص تعیین NTPI بهینه در هر ساعت تعریف شده است.

بعد از BSRSP، مقدار قابلیت اطمینان، نشت و فشار در زمان‌های حداقل، حداکثر مصرف ساعتی و به صورت متوسط روزانه محاسبه شد که نتایج در جدول ۲ آمده است. بر اساس نتایج جدول ۲، مقدار قابلیت اطمینان شبکه در زمان‌های حداقل، حداکثر مصرف ساعتی و متوسط روزانه به ترتیب برابر با ۰/۷۳۸، ۰/۹۶۶ و ۰/۹۱۱ و مقدار نشت شبکه خمام نیز به ترتیب برابر با ۲۱/۷۱، ۱۹/۹۶ و ۲۲/۳۳ لیتر در ثانیه است. همچنین مقدار متوسط فشار شبکه در زمان‌های فوق به ترتیب برابر ۳۱/۱۴، ۲۸/۹۲ و ۳۱/۸۷ متر است. مقایسه نتایج سناریوی BSRSP و SSP نشان می‌دهد که در سناریوی BSRSP با تنظیم BSRSP، در کارایی شبکه بهبود قابل توجهی ایجاد شده است. به طوری که فشار شبکه در زمان‌های حداقل، حداکثر مصرف و متوسط روزانه به فشار بهینه (۳۱ متر) بسیار نزدیک شده است و ناشی از همین موضوع در قابلیت اطمینان و نشت شبکه در آن زمان‌ها نیز بهبود قابل توجهی ایجاد







**Fig. 5.** The optimal number of turn on SSP pumps for the BNTSSP scenario in a) the main and b) subsidiary pumping station

شکل ۵- تعداد BNTSSP برای سناریوی BNTSSP در (a) ایستگاه پمپاژ اصلی و (b) فرعی

در ساعت‌های حداکثر مصرف، برایند سرعت‌ها زیاد و در ساعت‌های حداقل مصرف برایند سرعت‌ها کم است. نتایج مقدار قابلیت اطمینان، نشت و فشار در زمان‌های مختلف در جدول ۴ آمده است. مطابق این جدول، قابلیت اطمینان در سه حالت حداقل و حداکثر مصرف و متوسط روزانه به ترتیب برابر ۰/۹۶۶، ۰/۷۳۸، ۰/۹۱۰ و میانگین نشت شبکه به ترتیب برابر ۰/۲۱/۷۱، ۰/۱۹/۹۶ و ۰/۲۲/۳۵ لیتر در ثانیه و میانگین فشار شبکه به ترتیب برابر ۳۱/۱۳، ۲۸/۹۱ و ۳۱/۸۸ متر است. نتایج مشابه سناریوی BSRSP است با این تفاوت که در این سناریو برعکس سناریوی BSRSP همه پمپ‌ها روشن نیستند، بلکه مطابق برنامه، تعدادی از آنها در برخی ساعت‌ها خاموش هستند. همچنین مقایسه این سناریو با سناریوی SSP نشان می‌دهد که عملکرد شبکه بر اساس شاخص قابلیت اطمینان و نشت به طور متوسط ۶۶/۰۶ و ۲۳/۴۹ درصد بهتر شده است. که نشان‌دهنده تأثیر مثبت شاخص

نتایج سناریوی BNTSSP و SSP نشان می‌دهد که بدون بهینه‌سازی سرعت پمپ‌ها در ساعت‌های مختلف و تنها با بهینه کردن NTPI در هر ساعت عملکرد شبکه بهبود یافته است. به طوری که متوسط قابلیت اطمینان و نشت شبکه به ترتیب ۲۱/۳۵ و ۱۰/۳۷ درصد بهتر شده است که نشان‌دهنده کارایی مؤثر شاخص ارائه شده است.

جدول ۳- مقدار قابلیت اطمینان، نشت و فشار گره‌ای شبکه برای سناریوی BNTSSP

**Table 3.** The reliability, leakage and nodal pressure of the network for the BNTSSP scenario

Status	P(m)	NPRI	NPRI Imp (%)	Leak (l/s)	Leak Imp (%)
Min	49.48	0.498	99.20	37.52	21.53
Max	20.13	0.295	10.91	13.03	-5.43
Ave	36.24	0.665	21.35	26.18	10.37

#### ۴-۴- تنظیم بهینه BNSTRSP

در این سناریو فرض شد که پمپ‌های موجود در شبکه از نوع دور متغیر هستند و در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز با استفاده از شاخص NTPI، تعداد پمپ‌های روشن تعیین شده و سپس برنامه زمان‌بندی بهینه RSP با به کارگیری الگوریتم MSPSO تعیین شده است. برنامه ساعتی تعداد و سرعت پمپ‌های روشن در شکل ۶ آمده است. همان‌طور که مشخص است برنامه NTPI مشابه سناریوی BNTSSP است ولی سرعت پمپ‌های روشن ثابت نیست و در این حالت با بهینه‌سازی به دست آمده است. در مجموع

جدول ۴- مقدار قابلیت اطمینان، نشت و فشار گره‌ای شبکه برای

سناریوی BNSTRSP

**Table 4.** The reliability, leakage and nodal pressure of the network for the BNSTRSP scenario

Status	P(m)	NPRI	NPRI Imp (%)	Leak (l/s)	Leak Imp (%)
Min	31.13	0.966	286.40	21.71	54.61
Max	28.91	0.738	177.44	19.96	-61.36
Ave	31.88	0.910	66.06	22.35	23.49



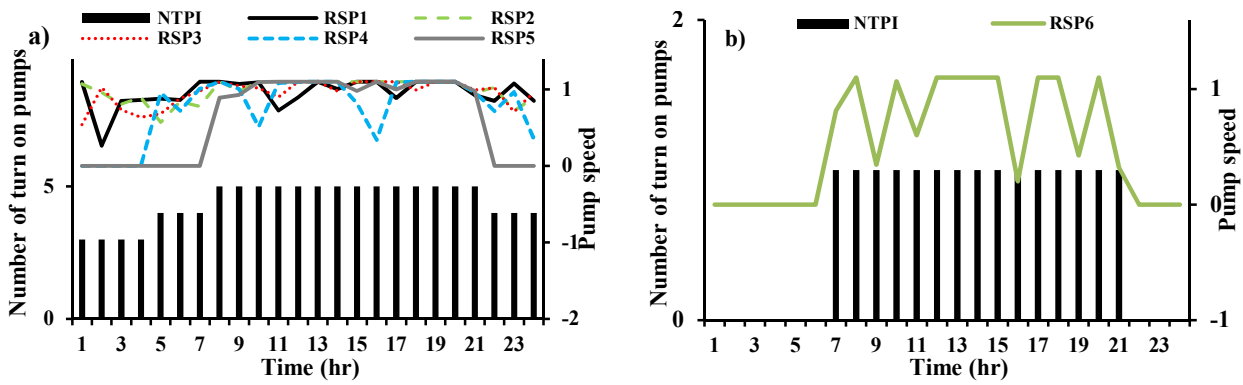


Fig. 6. The optimal number and speed of turn on RSP for the BNSTRSP scenario in a) the main and b) subsidiary pumping station

شکل ۶- تعداد و سرعت بهینه پمپ‌های روشن دور متغیر برای سناریوی BNSTRSP در (a) ایستگاه پمپاژ اصلی و (b) فرعی

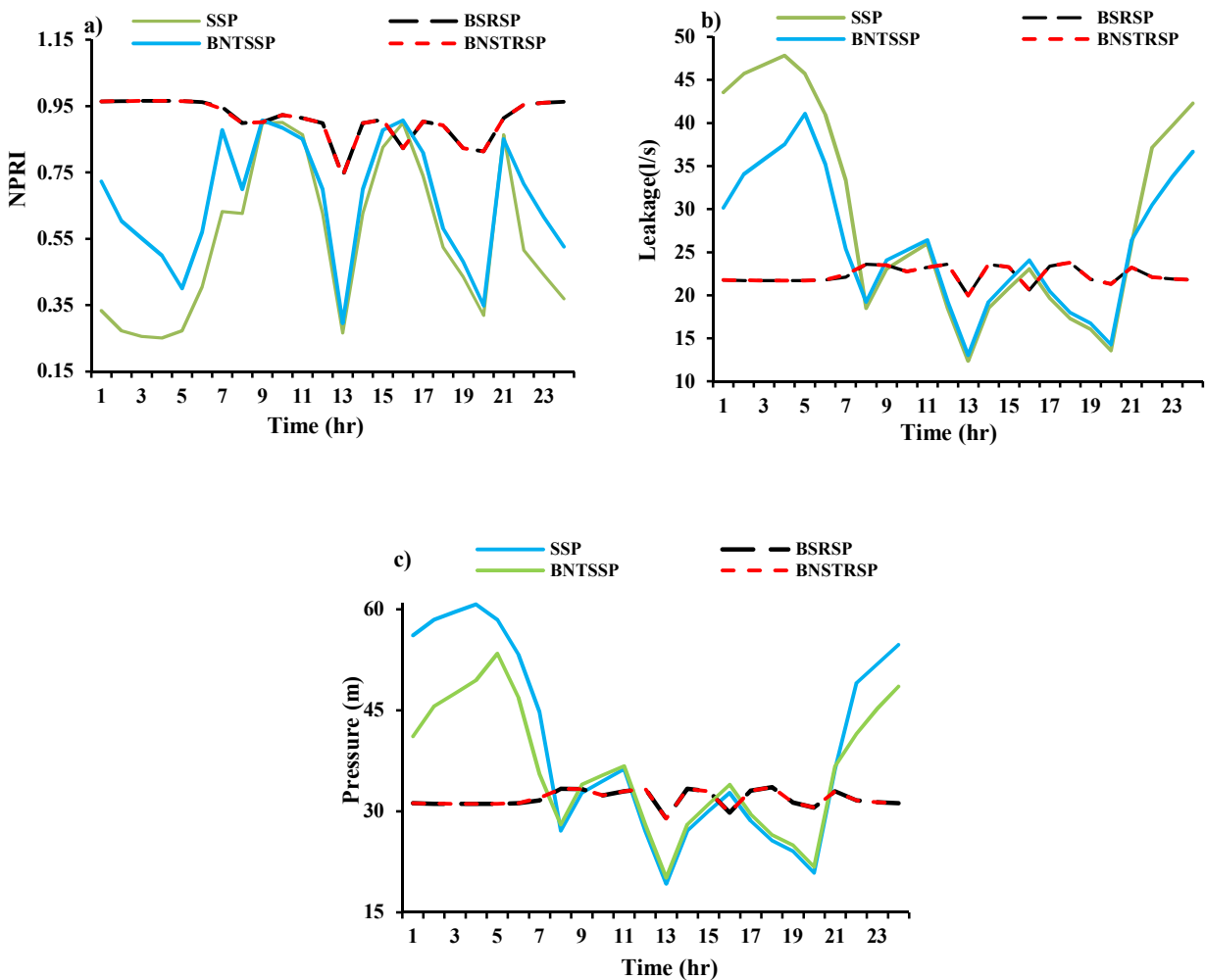


Fig. 7. Comparison of a) reliability, b) leakage and c) pressure for 4 scenarios

شکل ۷- مقایسه تغییرات (a) قابلیت اطمینان، (b) نشت و (c) فشار در ۴ سناریو



مختلف شامل تعداد و سرعت پمپ‌های روشن و هدف مسئله بهینه‌سازی، بیشینه کردن NPRI است و برای ارزیابی عملکرد شبکه از شاخص قابلیت اطمینان، نشت و فشار گره‌ای استفاده شد. روش پیشنهادی با برنامه‌نویسی در MATLAB و ایجاد لینک بین الگوریتم MSPSO به‌عنوان بهینه‌ساز و EPANET به‌عنوان شبیه‌ساز هیدرولیکی شبکه پیاده شد و برای نشان دادن عملکرد روش پیشنهادی ۴ سناریو به صورت SSP، BSRSP، BNTSSP و BNSTRSP انتخاب شد. بررسی نتایج نشان داد که سناریوهای تعریف شده از نظر هر سه شاخص قابلیت اطمینان، نشت و فشار گره‌ای نسبت به سناریوی SSP عملکرد بهتری دارند. همچنین استفاده از شاخص تعیین NTPI در سناریوهای BNTSSP و BNSTRSP تأثیر مثبت این شاخص در بهبود عملکرد شبکه را بیشتر آشکار می‌کند، به طوری که در آنها تنها با تنظیم NTPI برای پمپ‌های سرعت ثابت، ضمن کاهش NTPI در برخی ساعت‌ها، عملکرد شبکه نسبت به سناریوی SSP بهتر می‌شود و در حالت تنظیم تعداد و سرعت پمپ‌های دورمتغیر با اینکه عملکرد شبکه نسبت به سناریوی BSRSP تغییر نمی‌کند ولی این عملکرد با تعداد پمپ‌های روشن کمتر حاصل می‌شود که از نظر بهره‌برداری حائز اهمیت است.

## ۶- قدردانی

به این وسیله از مدیریت و کارکنان شرکت آب و فاضلاب استان گیلان که در تهیه و جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز شبکه آب خمام همکاری لازم را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌شود.

تعیین NTPI و بهینه‌سازی سرعت پمپ‌های روشن است. این سناریو با اینکه از نظر عملکرد شبیه سناریوی BSRSP عمل می‌کند ولی چون با تعداد پمپ‌های کمتر همان کارایی را دارد، می‌تواند از نظر بهره‌برداری ارجعیت داشته باشد. در انتها برای مقایسه سناریوهای تعریف شده مقدار متوسط ساعتی قابلیت اطمینان، نشت و فشار شبکه در شکل ۷ مقایسه شده است که بر اساس سه شاخص فوق سناریوی BNSTRSP مشابه سناریوی BSRSP عمل می‌کند، به طوری که منحنی تغییرات آنها در هر سه شاخص برهم منطبق هستند. همچنین عملکرد آنها بهتر از دو سناریوی دیگر است.

از طرفی سناریوی BNTSSP در هر سه شاخص عملکرد بهتری به سناریوی SSP دارد و در مجموع عملکرد مناسب شاخص انتخاب NTPI برای SSP و RSP را نشان می‌دهد. به طوری که در SSP، با NTPI کمتر عملکرد بهتر و در RSP، با تعداد پمپ‌های کمتر عملکرد برابر را ایجاد می‌کند.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک شاخص جدید برای تعیین NTPI در هر ساعت شبانه‌روز ارائه شد. برای بررسی اثربخشی شاخص پیشنهادی از SSP و RSP استفاده شد به طوری که در SSP، سرعت پمپ ثابت است و تنظیم نمی‌شود ولی در RSP سرعت پمپ متغیر است و در طول فرایند بهینه‌سازی برنامه‌ریزی پمپ تنظیم می‌شود. شبکه توزیع آب خمام با توجه به مشکلات توزیع آب در آن به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. متغیرهای تصمیم مسئله در سناریوهای

## References

- Araujo, L., Ramos, H. & Coeho, S. 2006. Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water Resources Management*, 20, 133-149.
- Babaei, N., Tabesh, M. & Nazif, S. 2015. Optimum reliable operation of water distribution networks by minimising energy cost and chlorine dosage. *African Journals Online (AJOL), African Research*, 41(1), 149-156.
- Coelho, B., Tavares, A. & Andrade-Campos, A. 2012. Analysis of diverse optimisation algorithms for pump scheduling in water supply systems. *3<sup>rd</sup> International Conference on Engineering Optimization*, July 1-5, Rio de Janeiro, Brazil.
- Dai, P. 2017. Optimal pump scheduling to pressure management for large-scale water distribution systems. *Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences: Theory and Application*, 465(5), 532-541.
- De Marchis, M. & Freni, G. 2015. Pump as turbine implementation in a dynamic numerical model: cost analysis for energy recovery in water distribution network. *Journal of Hydroinformatics*, 17(3), 347-360.



- Dini, M. 2019. Hybrid modified particle swarm optimization algorithm for adjustment of water distribution network coefficients. *Journal of Water and Wastewater*, 30(5), 44-60. (In Persian)
- Dini, M. & Asadi, A. 2019. Pressure management of large-scale water distribution network using optimal location and valve setting. *Water Resources Management*, 33(14), 4701-4713.
- Dini, M. & Asadi, A. 2020. Optimal operational scheduling of available partially closed valves for pressure management in water distribution networks. *Water Resources Management*, 34(8), 2571-2583.
- Dini, M. & Tabesh, M. 2019. Optimal renovation planning of water distribution networks considering hydraulic and quality reliability indices. *Urban Water Journal*, 16(4), 249-258.
- Eberhard, R. C. & Kennedy, J. 1995. A new optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Micro Machine and Human Science*, IEEE, Oct 4-6, Nagoya, Japan.
- Güngör, M., Yazar U., Cantürk Ü. & Fırat M., 2019. Increasing performance of water distribution network by using pressure management and database integration. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 10(2), 1-8.
- Gupta, A., Bokde, N., Kulat, K. & Yaseen, Z. M. 2020. Nodal matrix analysis for optimal pressure-reducing valve localization in a water distribution system. *Energies*, 13(8), 2-17.
- Hashemi, S. S., Tabesh, M. & Ataekia, B. 2013. Scheduling and operating costs in water distribution networks. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management*, 166(8), 432-442.
- Hashemi, S. S., Tabesh, M. & Ataekia, B. 2014. Ant-colony optimization of pumping schedule to minimize the energy cost using variable-speed pumps in water distribution networks. *Urban Water Journal*, 11(5), 335-347.
- Hemmati, M., Dini, M. & Hashemi, S. S. 2021. Evaluation of the effect of size and number of pumps on the hydraulic efficiency of Khomam water distribution network. *19<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference*. Feb 16-18, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (In Persian)
- Jafari, J. A. 2016. Optimal control pressure for leakage minimization in water distribution systems management using meta heuristic techniques. MSc Thesis, Civil Engineering Water Resources Management and Engineering. Yasouj University, Iran. (In Persian)
- Mehzad, N., Asghari, K. & Chamani, M. 2020. Application of clustered-NA-ACO in three-objective optimization of water distribution networks. *Urban Water Journal*, 17(1), 1-13.
- Mehzad, N., Tabesh, M., Ataekia, B. & Hashemi, S. S. 2019. Optimum reliable operation of water distribution network considering pumping station and tank. *Iranian Journal of Science and Technology*, 43, 413-427.
- Mehzad, N., Tabesh, M., Hashemi, S. S. & Ataekia, B. 2012. Reliability of water distribution networks due to pumps failure: comparison of VSP and SSP application. *Drinking Water Engineering and Science*, 5, 351-373.
- Ormsbee, L. E. 1989. Implicit network calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 115(2), 243-257.
- Page, P., Abu-Mahfouz, A. & Mothetha, M. 2017. Pressure management of water distribution systems via the remote real-time control of variable speed pumps. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(8), 2143-2154.
- Page, P., Zulu, S. & Mothetha, M. 2019. Remote real-time pressure control via a variable speed pump in a specific water distribution system. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 68(1), 20-28.
- Tabesh, M. & Vaseti, M. M. 2006. Leakage reduction in water distribution network by minimizing the excess pressure. *Iran-Water Resources Research*, 2(2), 53-66. (In Persian)
- Taebi, A. & Chamani, M. R. 2014. *Water distribution network*. Isfahan University of Technology, Publishing Center, Iran. (In Persian)



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

