



بهینه‌سازی بخشی از شبکه آبرسانی شهر تهران به روش برنامه‌ریزی غیرخطی و تأثیر آن در کمینه‌سازی نشت به عنوان عاملی تأثیرگذار در مدیریت شهری

علیرضا شاه‌حسینی^۱، محسن نجارچی^{۲*}، محمدمهدی نجفی‌زاده^۳، سیدمحمد میرحسینی هزاوه^۴، احسان‌الله ضیغمی^۵

۱. مری، مهندسی عمران - آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد صفادشت، صفادشت

۲. دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک

۳. استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک

۴. استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک

۵. استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک

* اراک - میدان امام خمینی (ره) - بلوار امام خمینی (ره) - کیلومتر ۳ جاده خمین - شهرک دانشگاهی امیرکبیر، m-najarchi@iau-arak.ac.ir، ۰۹۱۸۸۶۲۱۸۳۶

چکیده

آب مهمترین نیاز اولیه انسان است که منابع تجدید شونده آن بر اثر عواملی مانند افزایش جمعیت و بالا رفتن سطح رفاه و بهداشت، رو به کاهش است. بهره‌برداری بهینه از منابع آب، از اصلی‌ترین چالش‌های ایران به عنوان یکی از کشورهای خشک جهان است. یکی از مهمترین ابزارها در این راستا، بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی به عنوان تأسیساتی زیربنایی است که با گذشت زمان، اجزای شبکه دچار فرسودگی شده و تلفات آب در شبکه با نشت از نقاط دارای فشار زیاد، افزایش می‌یابد. تهران، پایتخت و مهمترین شهر ایران است و حوادث شبکه آبرسانی آن که عمدتاً ناشی از نشت و شکست در لوله‌هاست، یکی از مشکلات بسیار جدی مدیریت این کلانشهر است. شبکه مورد بررسی، بخشی از شبکه آبرسانی شمال غربی تهران است که شبیه‌سازی آن با نرم‌افزار WaterGEMS انجام شده و پس از وارد نمودن داده‌های مختلف موردنیاز اعم از تراز ارتفاعی و دبی خروجی گره‌ها، مشخصات لوله‌ها و مخزن‌ها، محل شیرهای فشارشکن و غیره، شرایط موجود شبکه بررسی و محل نقاط بحرانی (نقاطی که به دلیل فشار بیش از حد، احتمال شکست لوله یا نشت در آنها زیاد است) مشخص شده و سپس با استفاده از نتایج شبیه‌سازی به عنوان ورودی مدل بهینه‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP)، شبکه از نظر توزیع فشار بهینه‌سازی شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که روش به‌کار رفته برای بهینه‌سازی، باعث بهبود توزیع فشار و کاهش پتانسیل نشت شبکه شده و در مقایسه با مدل شبیه‌سازی، هزینه کل لوله‌ها، در حدود ۸.۱۲ درصد کاهش یافته است.

کلیدواژگان

بهینه‌سازی، شبکه آبرسانی تهران، نشت، NLP

Optimization of a Part of Tehran Water Supply Network by Non-Linear Programming Method and its Effect on Leakage Minimization as an Effective Factor in Urban Management

Alireza Shahhosseini¹, Mohsen Najjarchi^{2*}, Mohammad Mahdi Najafizadeh³, Mohammad Mirhosseini Hezaveh⁴, Ehsanollah Zeighami⁵

1. Ph.D. Candidate of Water Engineering, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

2. Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

3. Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

4. Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

5. Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

* Islamic Azad University, Arak Branch, 3rd km of Khomein road, Imam Khomeini Square, Arak, Iran, m-najarchi@iau-arak.ac.ir

Abstract

Water is the most important basic human need, and its renewable resources are declining due to factors such as population growth and rising levels of welfare and health. Optimal utilization of water resources is one of the main challenges of Iran as one of the arid countries in the world. One of the most important tools in this regard is the optimization of water distribution networks as infrastructure facilities that over time, network components wear out and water losses in the network increase with leakage from high pressure points. Tehran is the capital and the most important city of Iran and the accidents of its water distribution network, which are mainly due to leaks and failures in pipes, is one of the most serious problems of the management of this metropolis. The study network is a part of water distribution network in the northwest of Tehran, which is simulated with WaterGEMS software and after entering the required data such as height level and output flow of nodes, specifications of pipes and tanks, location of pressure relief valves, etc., the existing conditions of the survey network and the location of critical points (points where the probability of pipe failure or leakage is high due to excessive pressure) are determined and then using the simulation results input to the optimization model based on nonlinear programming (NLP), the network is optimized in terms of pressure distribution. The results show that the method used for optimization improves the

pressure distribution and reduces the leakage potential of the network and compared to the simulation model, the total cost of pipes is reduced by about 8.12%.

Keywords

Optimization, Tehran Water Distribution Network, Leakage, NLP

۱- مقدمه

برای آماده‌سازی رشد جمعیت، توسعه شهرها، کاهش منابع آب در دسترس، تغییر توزیع جمعیت در مناطق مختلف کشورها و تغییرات اقلیمی، از جمله چالش‌های فراوری سیستم‌های تأمین آب در تمام دنیا به ویژه مناطق خشک و نیمه خشک هستند [1]. ارزیابی بازده آب بخش مهمی از مدیریت منابع آب برای به دست آوردن منابع آب پایدار است [2]. افزایش جمعیت توأم با توسعه بسیار چشمگیر شهر تهران، تقاضای آب را به میزان بسیار زیادی افزایش داده است. بنابراین، افزایش کارایی شبکه تأمین آب، اجتناب‌ناپذیر است و بهینه‌سازی یکی از بهترین روش‌ها برای دستیابی به این هدف است. از سوی دیگر، تلفات آب یکی از مهمترین مسائل در مدیریت شبکه‌های آبرسانی است و در تمام شبکه‌ها مقدار زیادی از آب به دلیل نشت‌ها و شکستگی لوله‌ها از دست می‌رود [3]. مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که تلفات آب در کشورهای در حال توسعه بین 40 تا 60 درصد و در کشورهای توسعه‌یافته در حدود 35 درصد است. بنابراین، کاهش نشت در شبکه‌های آبرسانی یکی از مهمترین چالش‌ها برای شرکت‌های آب به خصوص در شبکه‌های قدیمی‌تر و در مناطق با فشار خدمات بالاست [4]. از آنجا که شبکه‌ها شامل هزاران جزء مانند لوله‌ها، گره‌ها، مخازن، پمپ‌ها، دریچه‌ها و غیره هستند، اغلب رفتار غیرخطی دارند [5]. تابش و ضیا از تحلیل عملکرد هیدرولیکی برای مدیریت دینامیکی شبکه استفاده کرده‌اند [6]. فشار به طور مستقیم با تعداد ترکیدگی لوله‌ها و نشت در شبکه مرتبط است و بنابراین، یک متغیر حساس و مهم در شبکه است [7]. مدیریت فشار و دبی (PDM) یکی از مؤثرترین راه‌های افزایش بهره‌وری، کاهش نشت و غلبه بر پیچیدگی شبکه است [8] که ممکن است نیازمند فعالیت‌های زیادی مانند استفاده از شیرهای فشارشکن (PRV) و کنترل پمپ باشد [9]. سلطان جلیلی و همکاران روشی برای تجزیه و تحلیل هیدرولیکی شبکه و ارائه یک رابطه واقعی فشار و تقاضای واقعی در شرایط شکست را ارائه نمودند [10]. در میان توابع هدف مختلف از قبیل کمیته‌سازی نشت کل یا کمیته‌سازی فشار مازاد در گره‌ها، روش اخیر منجر به نتایج بهتری برای بهره‌وری شبکه می‌شود [11, 12]. بلوتی و همکاران دو طیف گسترده از روش‌های حل برنامه‌ریزی غیرخطی با عدد صحیح مختلط (MINLP¹) ارائه دادند: روش تک درختی و روش چند درختی [13]. پچی و همکاران یک حل‌کننده مستقیم و دو روش با فرمول‌بندی جدید برای MINLP ها ارائه داده‌اند که دنباله‌هایی از توالی NLP های معمولی را حل می‌کنند [14]. لیانگ و همکاران یک مدل محدب برای طراحی مطلوب شبکه‌های آبرسانی با استفاده از MINLP پیشنهاد دادند که در آن معادلات افت هد با فرمول‌بندی جدید به نابرابری‌های محدب تبدیل شده‌اند [15]. خیمزن و همکاران روشی برای تعیین محل نشت در شبکه با استفاده از اندازه‌گیری دبی جریان ارائه دادند [16]. هدف این مطالعه، مقایسه نتایج مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی بخشی از شبکه آبرسانی شهر تهران (با استفاده از نرم‌افزار WaterGEMS) با مدل بهینه‌سازی غیرخطی (شامل تابع هدف و محدودیت‌ها) است. سپس، با مقایسه نتایج به‌دست آمده از این دو روش، شرایط بهینه شبکه برای مدیریت فشار در

شبکه به منظور کمیته‌سازی نشت، ارائه خواهد شد. نشت و شکست لوله‌ها مشکلات بسیار زیادی برای مدیریت شهری ایجاد می‌نماید که مهمترین آنها عبارت‌اند از: صرف هزینه‌های بسیار زیاد برای تعمیر خط لوله آسیب‌دیده، مشکلات ترافیکی ناشی از عملیات حفاری و مرمت شبکه، قطعی چند ساعته آب در محدوده لوله آسیب‌دیده. بدیهی است هرچه لوله آسیب‌دیده اهمیت بیشتری داشته باشد، شدت و گستردگی مشکلات ایجاد شده برای مدیریت شهری، بیشتر خواهد بود. بنابراین، کمیته‌سازی نشت، تأثیر قابل‌توجهی در کاهش مشکلات مدیریت شهری خواهد داشت.

۲- الگوسازی نظری

۲-۱- شبیه‌سازی هیدرولیکی

نرم‌افزار WaterGEMS، نرم‌افزاری است بسیار کارآمد برای شبیه‌سازی شبکه‌های آبرسانی و یکی از توانمندی‌های قابل‌توجه آن، انجام دادن تحلیل رابطه فشار-دبی در شبکه (PDD²) است که در آن، دبی تابعی است از فشار. تحلیل رابطه فشار-دبی را می‌توان به دو صورت انجام داد: الف) با استفاده از روابط فشار-دبی به صورت تابعی توانی (ب) با استفاده از منحنی فشار-دبی متشکل از قطعات خطی. نمونه‌ای از توابع توانی به صورت زیر است [17]:

$$\frac{Q_i^s}{Q_{ri}} = \begin{cases} 0 & P_i \leq 0 \\ \left(\frac{P_i}{P_{ri}}\right)^\alpha & 0 \leq P_i \leq P_t \\ \left(\frac{P_t}{P_{ri}}\right)^\alpha & P_i \geq P_t \end{cases} \quad (1)$$

که در آن:

P_i : فشار محاسبه شده در گره i

Q_{ri} : دبی مورد نیاز در گره i

Q_i^s : دبی محاسبه شده در گره i

P_{ri} : فشار مرجع که انتظار می‌رود دبی مورد نیاز در گره i را به‌طور کامل تأمین کند.

P_t : فشار آستانه که برای مقادیر بیشتر از آن، دبی مستقل از فشار گره‌ای است.

α : ضریب رابطه فشار-دبی که معمولاً برابر با 0.5 در نظر گرفته می‌شود [18].

در WaterGEMS، مدل‌سازی جریان و نشت در لوله‌ها امکان‌پذیر است و نشت با استفاده از یک ضریب تخلیه و شاخص فشار محاسبه می‌شود. در این حالت، دبی در هر گره تابعی است از فشار آن گره و از رابطه زیر به دست می‌آید [19]:

$$Q_i = C_i P_i^\gamma \quad (2)$$

² Pressure Dependent Demand (PDD) Analysis

¹ Mixed Integer Non-Linear Programming

که در آن C_i ضریب دبی است که به ویژگی‌های گره i بستگی دارد، P_i فشار در گره i و γ توان بدون بعد مربوط به فشار است. مقدار پیش فرض برای γ برابر است با 0.5 که مقداری است متداول برای یک روزنه (اریفیس). برای جریان ناشی از ترکیبگی لوله با فرض مساحت مقطع ثابت برای روزنه، γ را می‌توان برابر با 0.5 در نظر گرفت. ولی مقدار آن می‌تواند بین 0.5 تا 2.5 تغییر کند [20]. در این تحقیق، بر مبنای موارد مطرح شده در مرجع [21]، مقدار آن ثابت و برابر با 1.18 در نظر گرفته شده است. C_i تابعی است از نشت، فشار در گره و طول لوله و مقدار آن بین 0.5 و 1 متغیر است [22]. در این تحقیق با توجه به موارد مطرح شده در مرجع [22] و در نظر گرفتن مشخصات شبکه آبرسانی، مقدار آن برابر با 0.7 در نظر گرفته شده است.

برای شرایط مختلف در شبکه، سناریوهای محتمل شامل سناریوی ساعتی، روزانه، و سناریوی شبیه‌سازی مصرف در ساعات مختلف شبانه‌روز (EPS^1) در نظر گرفته شده‌اند. سناریوی ساعتی با اعمال ضریبی افزایشی به دبی‌های پایه و سناریوی روزانه با اعمال ضریبی افزایشی به سناریوی ساعتی بدست می‌آیند که مقدار این ضرایب افزایشی می‌تواند یکسان یا متفاوت باشد. در این تحقیق، با توجه به الگوی مصرف حاکم بر شبکه آبرسانی تهران، این ضرایب یکسان و مقدار آنها برابر با 1.3 در نظر گرفته شده است. سناریوی EPS با اعمال ضرایب افزایشی یا کاهش (برای ساعات مختلف شبانه‌روز) به دبی پایه به‌دست می‌آید.

۲-۲- مدل بهینه‌سازی

در این تحقیق، از یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای کمینه‌سازی نشت از طریق مدیریت فشار در شبکه مورد بررسی، استفاده نموده‌ایم. فشار در هر لوله برابر است با میانگین فشار در دو گره انتهایی آن. کاهش فشار در گره‌ها باعث کاهش نشت در شبکه خواهد شد. تابع هدف پیشنهادی برای شبکه مورد بررسی، در رابطه 3 معرفی شده است:

$$Z = B \sum_{j=1}^h \sum_{i=1}^k C_i L_i \left\{ \phi \left(El_i, Q_{ij}, El_{1j}, El_{2j}, \dots, El_{nj} \right) \right\}^{\eta} \quad (3)$$

قیود و محدودیت‌های مسئله عبارت‌اند از:

$$P_{ij} = \phi \left(El_i, Q_{ij}, El_{1j}, El_{2j}, \dots, El_{nj} \right) \quad (4)$$

$$\sum_{m=1}^n V_{mj+1} = \sum_{m=1}^n V_{mj} + \sum_{m=1}^n I_{mj} - QT_j \quad (5)$$

$$P_{\min} < P_{ij} < P_{\max} \quad (6)$$

$$\sum_{m=1}^n \sum_{j=1}^h I_{mj} < I_{day} \quad (7)$$

که در این روابط:

B : ضریب جریمه که در این تحقیق برابر با 10^4 در نظر گرفته شده است.

C_i : ضریب ثابت رابطه فشار-نشت در گره i ام

L_i : طول لوله i ام

h : تعداد ساعات در نظر گرفته شده در دوره عملکرد مورد نظر

i : شماره گره در شبکه که از 1 تا k تغییر می‌کند.

n : تعداد مخازن ذخیره در شبکه
 z : اندیس زمان در دوره عملکرد مورد نظر که از 1 تا h تغییر می‌کند.
 m : اندیس مخزن ذخیره
 El_i : تراز گره i ام (متر)
 Q_{ij} : دبی مورد نیاز در گره i ام در ساعت j ام (لیتر بر ثانیه)
 El_{mj} : هد مخزن m ام در ساعت j ام
 η : توان فشار در رابطه فشار-نشت که مقدار آن ثابت و برابر با 1.18 در نظر گرفته شده است [21].

P_{ij} : فشار در گره i ام در ساعت j ام

V_{mj} : حجم آب در مخزن m ام در ساعت j ام (متر مکعب)

QT_j : دبی کل مورد تقاضا در ساعت j ام (متر مکعب بر ساعت)

Q_{mj} : دبی خروجی از مخزن m ام در ساعت j ام (لیتر بر ثانیه)

P_{\min} : فشار کمینه مورد نیاز در هر گره (متر)

P_{\max} : فشار بیشینه مجاز در هر گره (متر)

I_{mj} : دبی ورودی به مخزن m ام در ساعت j ام

I_{day} : مقدار بیشینه آب مورد نیاز روزانه (متر مکعب)

تابع هدف ارائه شده در رابطه 3 در شرایطی که قیود آن برآورده نشوند، در یک ضریب جریمه (که عددی است بزرگ در حدود 10^4) ضرب می‌شود تا از جواب‌های غیرمنطقی یا غیربهینه پرهیز شود. فشار در هر گره از مدل شبیه‌سازی (نرم‌افزار WaterGEMS) به دست می‌آید و تابعی است از تراز ارتفاعی گره، دبی مورد تقاضا، و تراز سطح آب در هر مخزن. آب ورودی روزانه به مخازن و فشارهای گره‌ها، الگوریتم پیشنهادی را محدود می‌کنند. در این مطالعه، نقاط نشت احتمالی (گره‌هایی با فشار بیش از حداکثر مجاز) توسط مدل شبیه‌سازی مشخص می‌شوند و سپس، برای رسیدن به وضعیت بهینه، با تغییر جنس و قطر برخی لوله‌ها در مدل بهینه‌سازی غیرخطی، فشار کنترل می‌شود.

۳- مطالعه موردی: بخشی از شبکه آبرسانی شهر تهران

تهران، پایتخت ایران، شهری است با جمعیتی در حدود 8.9 میلیون نفر [24] که بیش از 700 کیلومتر مربع وسعت دارد و بین طول‌های جغرافیایی $41^{\circ}51'$ شرقی تا $47^{\circ}51'$ شرقی و بین عرض‌های جغرافیایی $31^{\circ}35'$ شمالی تا $57^{\circ}35'$ شمالی قرار گرفته [25] و به لحاظ سیاسی، اجتماعی و اقتصادی مهمترین و پرجمعیت‌ترین شهر ایران است. از این رو، مدیریت مؤثر شبکه گسترده آب آن که دارای مخازن متعدد و هزاران لوله، پمپ و دریچه و غیره است، برای عملیات شهری مناسب و جلوگیری از چالش‌های اجتماعی و سیاسی در تهران ضروری است. با توجه به عدم امکان دسترسی به اطلاعات کل شبکه آبرسانی تهران، بخشی از شبکه آبرسانی تهران واقع در شمال غربی تهران برای استفاده در مدل شبیه‌سازی و مدل بهینه‌سازی انتخاب شد و نهایتاً نتایج این مدل‌ها مقایسه گردید. شکل 1 محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

¹ Extended Period Simulation

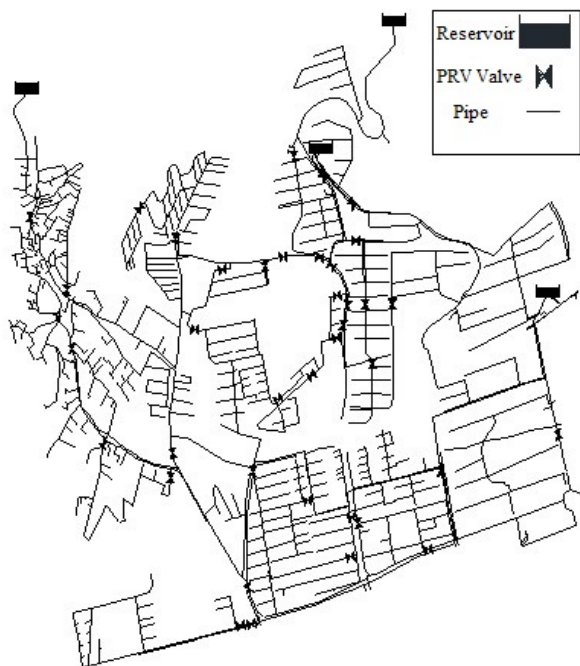


Fig. 2 Model created in Water GEMS software to simulate the study area

شکل ۲ مدل ایجاد شده در نرم‌افزار Water GEMS برای شبیه‌سازی محدوده مورد مطالعه



Fig. 1 Location of the studied part of Tehran Water Distribution Network (WDS)

شکل ۱ موقعیت بخش مورد مطالعه از شبکه آبرسانی شهر تهران

شبکه انتخاب شده، واقع در شمال غرب تهران با مساحتی در حدود 546 هکتار و جمعیتی در حدود 180000 نفر را پوشش می‌دهد و شامل 1124 لوله و 988 گره است و آب را به صورت ثقلی از 4 مخزن تأمین می‌کند.

۳-۱- مدل شبیه‌سازی

بهبودسازی شبکه موردنظر با استفاده از نرم‌افزار Water GEMS v8 انجام شده که یکی از کارآمدترین نرم‌افزارهای موجود در این زمینه است. دیده شد که در بین سناریوهای به کار رفته برای شبیه‌سازی، EPS سناریوی حاکم بر شبکه است و مقدار بیشینه و کمینه دبی در این سناریو به ترتیب 822.7 (در ساعت 4 بعدازظهر) و 421.8 لیتر بر ثانیه (در ساعت 4 صبح) است. در شکل 2، مدل ایجاد شده در نرم‌افزار Water GEMS برای شبیه‌سازی محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.

شکل 3 تغییرات دبی جریان در سناریوی EPS را در ساعات مختلف شبانه‌روز نشان می‌دهد. در شکل 4، حداکثر فشار شبکه در مدل شبیه‌سازی برای سناریوهای مختلف مقایسه شده است. بیشینه مقدار فشار در گره‌ها برابر با 91 متر در سناریوی EPS است. مقایسه بین شکل‌های 3 و 4 نشان می‌دهد که حداکثر فشار زمانی رخ می‌دهد که تقاضای جریان حداقل باشد و بالعکس. فشار بیشینه مجاز بر اساس استانداردهای منطقه‌ای برای طراحی شبکه آب، 60 متر است. همچنین، میانگین دبی پایه مورد تقاضا در این شبکه در حدود 495.3 لیتر بر ثانیه است. با توجه به ویژگی‌های اصلی لوله‌ها و کیفیت آب، ضریب زبری لوله‌ها (ضریب هیزن ویلیامز) بر مبنای مرجع [26] برآورد گردید.

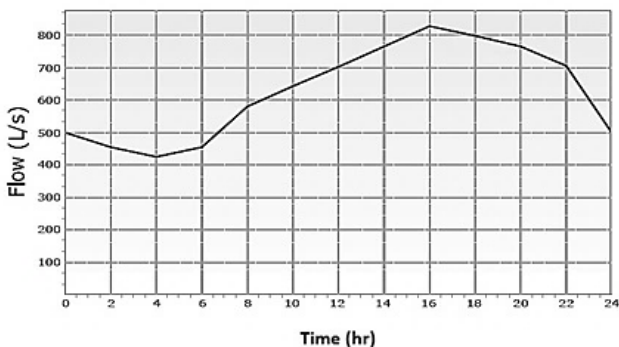


Fig. 3 Flow changes in the EPS scenario at different times of the day

شکل ۳ تغییرات دبی جریان در سناریوی EPS در ساعات مختلف شبانه‌روز

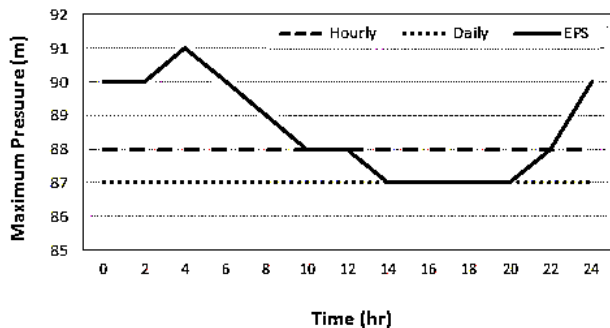


Fig. 4 Maximum network pressure in the simulation model for different scenarios

شکل ۴ حداکثر فشار شبکه در مدل شبیه‌سازی برای سناریوهای مختلف

جدول ۱ مقایسه مشخصات شبکه در مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی

Table 1 Comparison of network specifications in simulation and optimization models

مدل بهینه‌سازی (NLP)	مدل شبیه‌سازی	مشخصه
	چدن نشکن (DI)	جنس لوله‌ها
چدن نشکن (DI)	پلی اتیلن (PE)	
پلی اتیلن (PE)	فولادی (Steel)	
	پی وی سی (PVC)	
92.8, 150, 200, 300, 400, 500, 700	92.8, 100, 141, 150, 176, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 600, 700, 800, 900	قطر لوله‌ها (میلی‌متر)
77	91	فشار بیشینه (متر)
472.10	541.74	هزینه کل لوله‌ها (۱۰ ^۹ ریال)
+12.85	-----	تغییر سود (درصد)

۴- نتایج و بحث

در این تحقیق، بخشی از شبکه آبرسانی تهران در نرم‌افزار Water GEMS شبیه‌سازی شده و سپس، با استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) مدل بهینه‌سازی شبکه موردنظر ایجاد شده و به منظور همگرایی سریعتر، مقادیر به دست آمده برای پارامترهای شبکه در مدل شبیه‌سازی، به عنوان ورودی‌های مدل بهینه‌سازی به کار رفته‌اند. نتایج حاصل از مقایسه این دو مدل عبارت‌اند از:

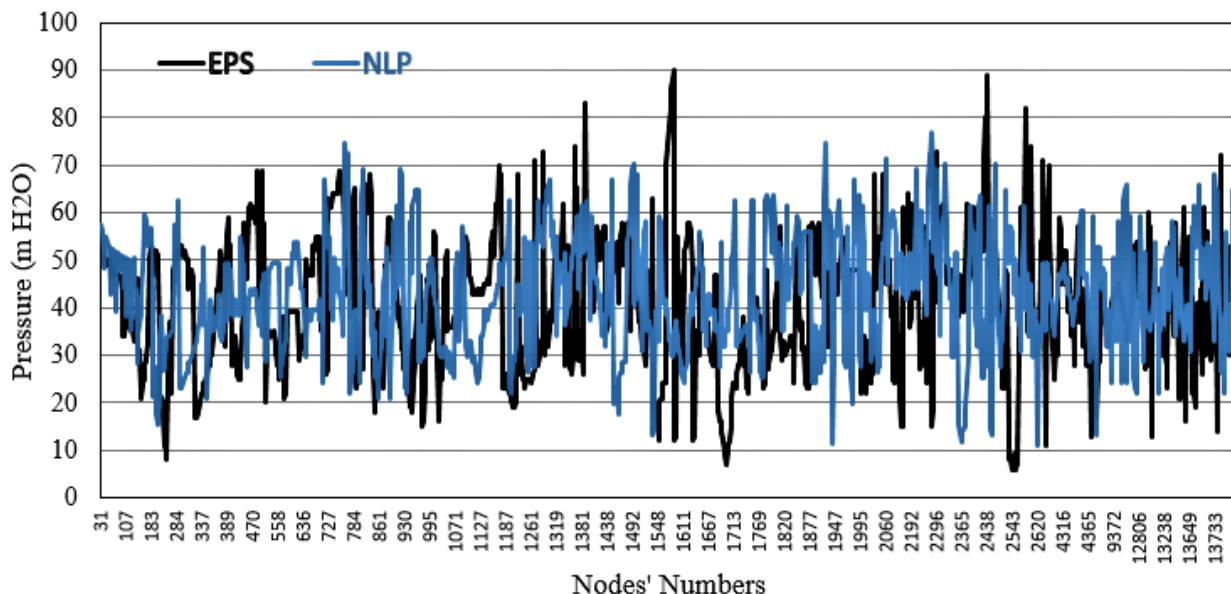
۴-۱- مدل NLP با تابع هدف مشخص شده و قیود مربوط به آن و با در نظر گرفتن متغیرهایی شامل فشار در گره‌ها، جنس و قطر لوله‌ها، منجر به دستیابی به نتایجی بهتر و شبکه‌ای اقتصادی‌تر شده است.

در شکل ۴، دیده می‌شود که بیشترین مقدار فشار در شبکه، در سناریوی EPS رخ می‌دهد. بنابراین، سناریوی EPS، سناریوی غالب است و به همین دلیل، به منظور همگرایی سریعتر، نتایج آن را به عنوان داده‌های ورودی برای روش بهینه‌سازی غیرخطی به کار برده‌ایم.

۳-۲- مدل بهینه‌سازی

در این تحقیق، بهینه‌سازی به روش برنامه‌ریزی غیرخطی با عدد صحیح مختلط (MINLP) انجام شده که به طور عمده چالش برانگیز هستند و برای حل آنها از چندین روش استفاده شده است. در شبکه‌های آبرسانی، از آنجا که مسأله غیر محدب است، تمام روش‌ها با مفروضات مناسب فقط به نقاط مینیمم محلی همگرا هستند و کیفیت راه حل بستگی به نقطه‌ی اولیه دارد. بنابراین، این موضوع باید در مقایسه بین رویکردهای مختلف، در نظر گرفته شود [14]. بنابراین، اگر یک راه حل با چند حدس اولیه تصادفی به دست آید و فشار متوسط را نزدیک به جواب بهینه ارائه دهد، می‌تواند قابل قبول باشد. برای انجام بهینه‌سازی تابع هدف به روش غیرخطی، از نرم‌افزار Lingo استفاده شده و به منظور همگرایی سریعتر، مقادیر به دست آمده برای پارامترهای شبکه در سناریوی EPS در مدل شبیه‌سازی، به عنوان ورودی‌های مدل بهینه‌سازی به کار رفته است. در جدول ۱، جزئیات لوله‌ها، حداکثر فشار و هزینه کل لوله‌ها در مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی، مقایسه شده است. دیده می‌شود که قطر لوله‌ها از ۱۵ اندازه مختلف قطر در مدل شبیه‌سازی، به ۷ اندازه مختلف در روش NLP کاهش یافته است. به علاوه، هزینه کل لوله‌ها در روش NLP، حدود ۸.۱۲ درصد کمتر از مدل شبیه‌سازی است.

در شکل ۵، فشار در گره‌ها در مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی NLP مقایسه شده‌اند. این مقایسه نشان می‌دهد که در مدل NLP حداکثر فشار گره‌ها در حدود ۱۵.۳۸ درصد کاهش یافته است. علاوه بر این، شکل ۵ نشان می‌دهد که روش NLP نوسانات فشار را در گره‌ها کاهش می‌دهد و بنابراین،



خطر شکست لوله‌ها کمتر خواهد بود.

Fig. 5 Mean and maximum network pressure in the simulation model for different scenarios

شکل ۵ مقایسه نوسانات فشار در گره‌ها بین مدل شبیه‌سازی و مدل بهینه‌سازی NLP

- ۴-۲- مدل NLP نوسانات فشار در گرہ‌ها را نسبت به مدل شبیه‌سازی کاهش داده است. همچنین، بیشینه فشار در گرہ‌ها نیز در مدل بهینه‌سازی ۱۵/۳۸ درصد کاهش یافته که باعث کاهش نشت و افزایش بهره‌وری شبکه خواهد شد.
- ۴-۳- هزینه کل لوله‌ها در مدل NLP، ۱۲/۸۵ درصد کمتر از مدل شبیه‌سازی است.
- ۴-۴- مدل بهینه‌سازی، شبکه مورد بررسی را با تغییر قطر و جنس برخی لوله‌ها (از بین قطره‌های تجاری تعیین شده و جنس‌های مشخص شده در نرم‌افزار) بهینه نموده است. پس از بهینه‌سازی، تعداد اندازه (قطر) لوله‌ها از ۱۵ اندازه (در مدل شبیه‌سازی) به ۷ اندازه کاهش یافته‌اند. همچنین جنس لوله‌ها از چهار نوع در مدل شبیه‌سازی (چدن نشکن، پلی اتیلن، فولادی، و پی وی سی) به دو نوع (چدن نشکن و پلی اتیلن) کاهش یافته‌اند.
- ۴-۵- با وجود بهبود شرایط شبکه در روش NLP، به دلیل اینکه فشار بیشینه به دست آمده در این روش بیش از مقدار مجاز (تعریف شده به عنوان یکی از قیود مسأله) است، به جواب بهینه مطلق نرسیده‌ایم و می‌توان گفت به جوابی نزدیک به جواب بهینه دست یافته‌ایم.
- ۴-۶- نشت و شکست لوله‌ها مشکلات بسیار زیادی برای مدیریت شهری ایجاد می‌نماید که مهمترین آنها عبارت‌اند از: صرف هزینه‌های بسیار زیاد برای تعمیر خط لوله آسیب‌دیده، مشکلات ترافیکی ناشی از عملیات حفاری و مرمت شبکه، و قطعی چندساعته آب در محدوده لوله آسیب‌دیده. بدیهی است هرچه لوله آسیب‌دیده اهمیت بیشتری داشته باشد، شدت و گستردگی مشکلات ایجاد شده برای مدیریت شهری، بیشتر خواهد بود. بنابراین، کمینه‌سازی نشت، تأثیر قابل‌توجهی در کاهش مشکلات مدیریت شهری خواهد داشت.
- ۴-۷- پیشنهاد می‌شود تا با برگزاری جلسات مستمر با مدیران شهری، لزوم انجام دادن چنین تحقیقاتی در تمام مناطق شهر تهران و سپس، یکپارچه‌سازی نتایج تحقیقات انجام شده را برای مدیران تبیین نمود. بدیهی است اجرای چنین تحقیق جامعی برای کلانشهر تهران یکی از ضروریات مدیریت شهری است که باعث افزایش بهره‌وری شبکه و کاهش مشکلات ناشی از شکست لوله‌ها در شهر خواهد گردید و صرفه‌جویی چشمگیری در هزینه‌های مدیریت شهری را در پی خواهد داشت.
- ### ۵- تشکر و قدردانی
- نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از مسؤولان و کارشناسان سازمان آب منطقه‌ای تهران و وزارت نیرو به دلیل ارائه داده‌های موردنیاز برای انجام دادن این تحقیق و از مسؤولان دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک به دلیل همکاری بسیار صمیمانه و هماهنگی‌های لازم برای اجرای این تحقیق، سپاسگزاری نمایند.
- ### ۶- مراجع
- [1] World Health Organization (WHO), "Drinking Water", <http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>, February 7, 2018.
- [2] H. Mahsafar, M. Najarchi, M. M. Najafzadeh, M. Mirhoseini Hezaveh, "Conjunctive effect of water productivity and cultivation pattern on agricultural water management", *Water Science and Technology: Water Supply*, 17 (6), pp. 1515-1523, December, 2017.
- [3] M. Farley, S. Trow, "Losses in water distribution networks", IWA Publishing, London, 2003.
- [4] R. Gomes, J. Sousa, A. S. Marques, "The influence of pressure/leakage relationships from existing leaks in the benefits yielded by pressure management", *Water Utility Journal*, 5: pp. 25-32, 2013.
- [5] R. Burrows, G. S. Crowder, J. Zhang, "Utilization of network modelling in the operational management of water distribution systems", *Urban Water*, 2 (2), pp. 83-95, June, 2000.
- [6] M. Tabesh, A. Zia, "Dynamic management of water distribution networks based on hydraulic performance analysis of the system", *Water Science and Technology: Water Supply*, 3 (1), pp. 95-102, March, 2003.
- [7] A. Lambert, "What do we know about pressure: leakage relationships in distribution systems?", Iwa Conference on "System Approach To Leakage Control and Water Distribution Systems Management", 2001.
- [8] S. Hajebi, S. Temate, S. Barrett, A. Clarke, S. Clarke, "Water distribution network sectorization using structural graph partitioning and multi-objective optimization", 16th Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA 2014 *Procedia Engineering*, 89, pp. 1144 - 1151, 2014.
- [9] D. J. Vicente, L. Garrote, R. Sánchez, D. Santillán, "Pressure management in water distribution systems: current status, proposals, and future trends", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142 (2), pp. 1-13, October, 2015.
- [10] M. Soltanjilili, O. Bozorg Haddad, S. Seifollahi Aghmiuni, M. A. Mariño, "Water distribution network simulation by optimization approaches", *Water Science and Technology: Water Supply*, 13(4), pp. 1063-1079, August, 2013.
- [11] K. Vairavamoorthy, J. Lumbers, "Leakage reduction in water distribution systems: Optimal valve control", *Journal of Hydraulic Engineering*, 124 (11), pp. 1146-1154, 1998.
- [12] H. E. Mutikanga, S. K. Sharma, K. Vairavamoorthy, "Methods and tools for managing losses in water distribution systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139 (2), pp. 166-174, March, 2013.
- [13] P. Belotti, C. Kirches, S. Leyffer, J. Linderoth, J. Luedtke, A. Mahajan, "Mixed-Integer Nonlinear Optimization", supported by the office of advanced scientific computing research, Office of Science, U.S. Department of Energy, under contract DE-AC02-06CH11357, Preprint ANL/MCS-P3060-1121, November 22, 2012.
- [14] F. Pecci, E. Abraham, L. Stoianov, "Mathematical programming methods for pressure management in water distribution systems", 13th Computer Control for Water Industry Conference, CCWI 2015, *Procedia Engineering*, 119, pp. 937 - 946, September, 2015.
- [15] Y. Liang, E. Pahija, C. W. Huia, "Convex Model for Global Optimization of Water Distribution System", *Proceedings of the 26th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, Volume 38, pp. 493-498, 2016.
- [16] J. Jimenez-Cabas, E. Romero-Fandino, L. Torres, M. Sanjuan, R. F. Lopez-Estrada, "Localization of leaks in water distribution networks using flow readings", *IFAC Papers OnLine*, 51 (24), pp. 922-928, January, 2018.
- [17] Z. Y. Wu, T. Walski, "Pressure Dependent Hydraulic Modelling for Water Distribution Systems under Abnormal Conditions", IWA World Water Congress and Exhibition, 10-14, Beijing, China, September, 2006.
- [18] J. Muranho, A. Ferreira, J. Sousa, A. Gomes, A. Sa Marques, "Pressure-dependent demand and leakage modelling with an EPANET extension-Water Net Jen", 16th conference on water distribution analysis, WDSA 2014, *procedia engineering*, 89, pp. 632 - 639, 2014.
- [19] S. Nazif, M. Karamouz, M. Tabesh, A. Moridi, "Pressure management model for urban water distribution networks", *Water Resources Management*, 24(3), pp. 437-458, DOI: 10.1007/s11269-009-9454-x, February, 2010.
- [20] A. Lambert, "Pressure management/leakage relationships: theory, concepts and practical applications" In: *Proceedings of minimizing leakage in water supply/distribution systems*, IQPC Seminar, London, April, 1997.
- [21] G. Germanopoulos, "A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models", *Civil Engineering Systems*, 2, pp. 171-179, September, 1985.

- [22] M. Tabesh, A. H. Asadiyani Yekta, R. Burrows, "An integrated model to evaluate losses in water distribution systems", *Water Resources Management*, 23 (3), pp. 477-492, February, 2009.
- [23] Z. Y. Wu, R. H. Wang, T. M. Walski, S. Y. Yang, D. Bowdler, C. Baggett, "Efficient Pressure Dependent Demand Model for Large Water Distribution System Analysis", proceedings of the 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA, 27-30, Cincinnati, USA: University of Cincinnati: ISBN: 978-0-7844-0941-1, August, 2006.
- [24] United Nations, UN Data, "Popular statistical tables, country (area) and regional profiles", Iran (Islamic Republic of), <http://data.un.org/en/iso/ir.html>, 2018.
- [25] Tehran municipality, Information and communication technology organization, "TehranStatisticalYearBook", http://tmicto.tehran.ir/Portals/0/Document/Amarname/NEW_PDF/AmarShahr/96-TehranStatisticalYearBook.pdf, in Persian, 2017.
- [26] K. Behzadian, A. Ardeshir, "Optimal Sampling Design for Model Calibration Using Genetic Algorithm: a Case Study", IWA World Water Congress and Exhibition, Austria, 3rd - 5th Sep, 2007.