

Automatic extraction of arrangement and optimal design of an urban water network using modern software (Case study: Torbat-e Heydarieh)

Reyhaneh Sadat Ebrahimi¹, Alireza Moghaddam², Ali Naghi Ziaei^{3*}, Alireza Faridhosseini³

¹ M.Sc. student of water structures, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

² Postdoctoral researcher, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

³ Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*Corresponding Author: an-ziaei@um.ac.ir

Received: 19 March 2022
Accepted: 20 June 2022



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Optimum design of water distribution networks to meet the water needs of consumers with minimum investment and operation costs and maximum uniformity of pressure distribution is one of the important challenges of urban water management. Therefore, the use of suitable design algorithms for water distribution networks is very important and the provision of software tools for their design has been considered. The need for geographic information and extensive spatial changes in water consumption has made it inevitable to use software tools to consider all available information in the shortest possible time to produce an optimal network. In this article, WaterNetGen software and DynaVIBe-Web web system have been used to automatically design the network layout and optimize the suitable pipe diameters. WaterNetGen is an extension of EPANET software that is used for the automatic design of water distribution networks. DynaVIBe-Web web system is also available for free. In this article, the efficiency of these two tools has been tested for the Torbat-e Heydarieh city network. The obtained results show the efficiency of both software to achieve the optimal arrangement and reduce the cost of designing and building the network by 48% compared to the original network.

Keywords: Water Distribution Systems, Optimization, WaterNetGen, DynaVIBe-Web

Introduction: About 70% of total cost of water distribution systems is related to the pipes cost. Reducing these costs requires the right arrangement of pipe diameters from the available commercial diameters. Optimal network design should be accompanied by minimum cost of implementation and operation without reducing hydraulic performance regarding appropriate nodal pressure and demands. Several studies have investigated the optimal design of networks in matter of reducing the cost of investment and operation (Ezzeldin and Djebedjian, 2020).

However, the data needed to design a water and wastewater networks, especially in low-income countries, are often unavailable or of poor quality. Gathering the reliable data is often time-consuming and costly. On the other hand, the growth of modern technologies based on online geographic information systems including Google Earth and OpenStreetMap, has made it possible to use available information in urban communication networks (such as passages, streets and roads) to design water distribution networks (Mair et al., 2012).

Therefore, an automated process for building models with the well-known EPANET tool has been proposed. In this method, with limited input data and a few clicks, the user can create a network topology and assign appropriate pipe diameters. This program which is called WaterNetGen was designed and implemented as an add-on to EPANET software (Muraal et al., 2012).

In this research, after creating the optimal network layout using algorithmic approaches and available free data including satellite images and urban network map (OpenStreetMap), the optimal network design is also prepared.

Material and Methods: The optimal design of the water distribution network in zone 6 of Torbat-e Heydarieh will be conducted in two stages. In the first stage, the optimal network layout is extracted by the DynaVIBe-Web system and then the optimal network design with minimized costs will be made using WaterNetGen software. Finally, the results of the software-based method will be compared and evaluated with the current state of the network.

For optimizing the cost of the water distribution network, we apply equation (1), in which $\Omega = (D_1, \dots, D_n)$, (D_i) and L_i are the diameter and the length of each pipe, respectively, and $c(D_i)$ is the cost per length of the pipe. The optimization constraints are revealed by equations -(2)-(6); where H_k is the pressure head, V_k is the water speed in the pipe.

The study process is conducted based on four scenarios were considered as follows:

S1: Existing status network of the city without any changes

S2: Existing status network of the city with redesign using WaterNetGen software and pressure constraints based on the existing status network (in scenario S1)

S3: Network extracted from DynaVIBe-Web system and designed using WaterNetGen software, pressure constraints based on existing state network (in scenario S1)

S4: Network extracted from DynaVIBe-Web system and designed using WaterNetGen software, pressure constraints based on existing state network (in scenario S1)

Results and Discussion: The results of the method presented in this research (extraction of optimal arrangement by DynaVIBe-Web system and optimal design of network by WaterNetGen software) are presented in 4 scenarios as follows and compared with the current situation. The scenarios include S1: existing layout of the networks without any changes, S2: existing layout of the networks with redesign using WaterNetGen software and pressure constraints based on the existing network (in scenario S1), S3: the network extracted from DynaVIBe-Web system and designed using WaterNetGen software, pressure constraints based on existing network (in scenario S1) and S4: existing network or network extracted from the DynaVIBe-Web system, both of which are designed using WaterNetGen software, which is simplified using WaterNetGen software.

The hydraulic analysis is presented in five different sections including velocity variation in pipes, pressure zoning map, pressure distribution diagram (PDF), surplus pressure, comparison of length distribution versus diameter, and finally, the cost of purchasing network pipes.

In comparing the length distribution against the diameter (Fig. 9); in scenario S1, the maximum allocated network length is 34.24% and 17.01% for 110 and 160 mm diameters, respectively. While in S2, 28.07% and 16.71% of the network pipes are 63 and 75 mm. In S3, 63.47% of the network length is allocated to 63 mm diameter, which has reduced the cost of purchasing and implementing network pipes in this scenario. As a result, S3 made a better result than S1, S2 and S4.

The pipes purchasing cost for 4 scenarios is compared in Fig. 10. In S3 scenario, the network cost is lower than the others, which indicates that this scenario is more cost-effective. In addition, based on Fig. 10, it can be stated that S2 compared to S1 has a cost increase of 3.27%, which is not appropriate. S3 and S4 have reduced costs, which have decreased by 48.19% and 29.44%, respectively. As it turns out, the S3 scenario is superior in this regard.

Conclusion: The purpose of this study was to optimally design the water distribution network of Zone 6 in Torbat-e Heydarieh in two stages of extracting the optimal arrangement by the DynaVIBe-Web system and then designing the optimal network with the aim of cost minimizing using WaterNetGen software. The method help to a complete without any expert opinions intervention.

In Torbat Heydariyeh Zone 6 network, scenario S3 was selected as the best scenario. This scenario was clearly superior to the two scenarios S2 and S4 in terms of surplus pressure, cost and network length, and as a result, scenario S3 was introduced as the superior scenario.

Finally, it can be said that using DynaVIBe-Web free web software and considering some common hydraulic conditions such as velocity and pressure limits, using WaterNetGen software, an efficient network design can be achieved.

© 2022 University of Zabol, Zabol, Iran.



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

استخراج خودکار آرایش و طراحی بهینه شبکه آب شهری با استفاده از نرم‌افزارهای نوین (مطالعه موردی: شهر تربت حیدریه)

ریحانه سادات ابراهیمی^۱، علیرضا مقدم^۲، علی نقی ضیائی^{۳*}، علیرضا فرید حسینی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^{۲*} پژوهشگر پسا دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۳ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

*پست الکترونیکی نگارنده مسئول: an-ziaei@um.ac.ir

وب‌گاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۳۰

چکیده: طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب جهت تامین نیاز آبی مصرف کنندگان با کمینه هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و بیشینه یکنواختی توزیع فشار، یکی از چالش‌های مهم مدیریت آب شهری می‌باشد. از اینرو استفاده از الگوریتم‌های طراحی مناسب شبکه‌های توزیع آب بسیار حائز اهمیت بوده و تهیه ابزارهای نرم‌افزاری برای طراحی آنها مورد توجه بوده است. نیاز به اطلاعات جغرافیایی و تغییرات مکانی گسترده مصرف آب، استفاده از ابزارهای نرم‌افزاری جهت در نظر گرفتن کلیه اطلاعات موجود در کمترین زمان ممکن برای تولید شبکه بهینه را اجتناب ناپذیر نموده است. در این مقاله از نرم‌افزار WaterNetGen و سامانه تحت وب DynaVIBE-Web جهت طراحی خودکار آرایش شبکه و بهینه‌سازی اقطار مناسب لوله‌ها استفاده شده است. WaterNetGen یک افزونه از نرم‌افزار EPANET است که برای طراحی خودکار شبکه‌های توزیع آب به کار می‌رود. سامانه تحت وب DynaVIBE-Web نیز به صورت رایگان در دسترس می‌باشد. در این مقاله کارایی این دو ابزار برای شبکه شهر تربت حیدریه مورد آزمون قرار گرفته است. نتایج به دست آمده کارایی این دو نرم‌افزار برای رسیدن به آرایش بهینه و کاهش ۴۸ درصدی هزینه طراحی و ساخت شبکه نسبت به شبکه اصلی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: سامانه‌های توزیع آب، بهینه‌سازی، WaterNetGen، DynaVIBE-Web

سامانه‌های توزیع آب به هزینه خرید لوله‌ها آنها هدایت می‌شود کاهش این هزینه‌ها مستلزم انتخاب آرایش مناسب لوله‌ها و انتخاب قطرهای مناسب لوله‌های شبکه در میان قطرهای موجود بازار می‌باشد. طراحی بهینه باید با کمینه هزینه اجرا و بهره‌برداری شبکه بدون کاهش عملکرد

۱- مقدمه

هزینه اجرای شبکه‌های توزیع آب، به عنوان یکی از مهم‌ترین پروژه‌های زیرساخت شهری، نیازمند سرمایه‌گذاری عظیمی است. حدود ۷۰ درصد از کل هزینه

مناسب لوله‌ها را اختصاص دهد. برای این منظور، برنامه جدیدی به نام WaterNetGen به صورت یک افزونه به نرم‌افزار EPANET طراحی و پیاده‌سازی شد. در پژوهش‌های Sousa و همکاران (2014 و 2015) دو مدل شبیه‌سازی پیشنهاد شد که در هر دو با اتصال یک مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی (WaterNetGen) و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (Simulated Annealing) راه حل بهینه جهت حداقل‌سازی هزینه کل جستجو شده است.

در مطالعه Mair و همکاران (2014) یک الگوریتم برای ایجاد خودکار مجموعه‌ای از مدل‌های مجازی توزیع آب مبتنی بر داده‌های ورودی مانند شبکه معابر و خیابان‌ها، و نقشه‌های رقومی ارتفاعی، تقاضای آب ناشی از تراکم جمعیت، موقعیت تانک‌ها یا مخازن و یک چند ضلعی که مساحت مورد نظر را تعیین می‌نماید توسعه داده شد.

تولید سامانه‌های توزیع آب با استفاده از سامانه تحت وب DynaVIBE-Web (Paez and Fillion, 2017) رویکردی ساختارمند برای مطالعات موردی مجازی از کل زیرساخت آب شهری (شامل تامین آب، جمع‌آوری رواناب‌های سطحی و شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب) به منظور بررسی رفتار و تاثیر آن بر محیط شهری و اثرات اقتصادی اجتماعی آنها در طول زمان (در چارچوب چشم‌انداز میان‌مدت و بلند مدت، به عنوان مثال توسعه شهری و تغییر آب و هوا) ایجاد کرده است. با استفاده از این رویکرد مطالعات موردی مجازی را می‌توان تنها با استفاده از چند پارامتر ورودی تا مجموعه دقیقی از داده‌های جزئی ایجاد کرد (Mair, 2015).

Saldarriaga و Robles (2018) با استفاده از DynaVIBE شبکه‌های مجازی برای شهرهای مختلف کلمبیا را بنا و با مقایسه با سامانه‌های واقعی، ارزیابی نمودند آن‌ها پس از ایجاد آرایش بهینه شبکه با استفاده از رویکردهای الگوریتمی و داده‌های رایگان در دسترس شامل تصاویر ماهواره‌ای و نقشه شبکه‌های شهری (OpenStreetMap)، طرح بهینه شبکه استخراج کردند.

هدف از این تحقیق طراحی بهینه شبکه توزیع آب محدوده فشاری ۶ شهر تربت حیدریه در دو مرحله بصورت کامل و بدون دخالت نظرات کارشناسی می‌باشد. در مرحله اول

هیدرولیکی با توجه به فشارها و تقاضاهای گرهی همراه باشد. به منظور طراحی بهینه شبکه جهت کاهش هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری مطالعات متعددی انجام شده است. طرح اولیه عمدتاً به صورت دستی با در نظر گرفتن همه اطلاعات موجود اعم از نقشه‌های توپوگرافی، نقشه‌های عوارض شهری، توزیع جمعیت، و تراکم آماده؛ سپس، با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی اقدام به ترکیب قطره‌های بهینه می‌شود (Ezzeldin and Djebedjian, 2020).

روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید (SA) برای حل مسئله طراحی شبکه توزیع آب، با در نظر گرفتن محدودیت‌های چنددوره‌ای با الگوهای تقاضای متغیر زمانی پیشنهاد شده است (Bermude et al., 2018). همچنین، شبکه توزیع آب همایش کرمان برای رسیدن به اهداف تامین فشار مطلوب و اعمال محدودیت سرعت، بهینه‌سازی گردیده است (Khalifeh et al., 2018).

طراحی شبکه توزیع آب ناحیه پراکاسام آندراپرادش در هند (Anish et al., 2016) و منطقه مایدوگوری در کشور نیجریه (Alkali et al., 2017) با استفاده از نرم‌افزار EPANET نشان داد که این نرم افزار از توانایی بالایی در تحلیل و طراحی شبکه‌های توزیع آب برخوردار است. نرم‌افزار EPANET برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب، به تنهایی (Mazaherizadeh et al., 2019) یا با تلفیق الگوریتم ژنتیک (Gohari et al., 2020)، به کار رفته است.

اما داده‌های لازم برای طراحی شبکه توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب به ویژه در کشورهای کم درآمد، اغلب در دسترس نیستند و یا کیفیت پایینی دارند. جمع‌آوری داده‌های مناسب اغلب زمان‌بر و مستلزم هزینه‌های هنگفت می‌باشد. از طرف دیگر رشد فناوری‌های مدرن مبتنی بر سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی در بستر اینترنت مانند Google-Earth و OpenStreetMap امکان استفاده از اطلاعات موجود در شبکه‌های ارتباطی شهری (مانند معابر، خیابان‌ها و جاده‌ها) و در طراحی شبکه‌های توزیع آب را فراهم آورده است (Mair et al., 2012). از این رو، Muranho و همکاران (2012) یک فرآیند خودکار برای ساخت مدل‌ها با ابزار EPANET پیشنهاد نمودند. در این روش با داده‌های ورودی محدود و چند کلیک، کاربر می‌تواند یک توپولوژی شبکه بسازد و قطر

ترتیب حداقل و حداکثر سرعت در لوله k است و NP : تعداد لوله‌های موجود در شبکه می‌باشد.

قطر لوله‌های موجود

حداقل قطر مورد نیاز به صورت زیر تعریف می‌شود Cunha; (Moghaddam, 2014 and Sousa, 1999):

$$D_k \geq D_{min}, \forall k \in NP \quad (4)$$

در رابطه بالا؛ D_{min} : حداقل قطر مورد نیاز و D_k : قطر لوله k می‌باشد. قطر هر لوله باید متعلق به یک مجموعه قطر تجاری باشد:

$$D_k \in \{D\}, \forall k \in NP \quad (5)$$

در این رابطه؛ $\{D\}$: مجموعه‌ای از قطرهای تجاری می‌باشد.

۲-۲-۲- رابطه‌های حاکم

قانون پیوستگی و بقای انرژی در هر شبکه توزیع آب برقرار می‌باشد، که عبارتند از:

قانون پیوستگی^۱

$$\sum Q_j^{in} - Q_j^{out} = d_j \quad (6)$$

که Q_{in} و Q_{out} به ترتیب جریان ورودی و خروجی به گره می‌باشند، و d_j میزان جریان مصرفی یا تقاضا در هر گره است (Moghaddam et al., 2018 and 2020).

قانون بقای انرژی^۲

در هر حلقه از شبکه، قانون بقای انرژی به صورت زیر تعریف می‌شود (Moghaddam, 1999; Cunha and Sousa, 1999):

$$(7)$$

$$\sum_{k \in Loop} p \Delta H_k = 0, \forall p \in NL$$

در رابطه بالا؛ ΔH_k : افت فشار در لوله k ؛ NL : مجموعه حلقه‌ها؛ p : معرف مجموعه حلقه می‌باشد.

افت هد در هر لوله تفاوت بین هد گره‌ها در هر دو انتها است. اگر معادله Hazen-Williams برای نشان دادن این

افت هد انتخاب شود، پس

$$\Delta H_k = H_{1,k} - H_{2,k} = w \frac{L_k}{C_k^2 D_k^5} Q_k |Q_k|^{\beta-1}, \forall k \in NP \quad (8)$$

آرایش بهینه شبکه توسط سامانه تحت وب DynaVIBe-Web استخراج و سپس طراحی بهینه شبکه با هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها با استفاده از نرم‌افزار WaterNetGen انجام می‌گردد. سپس در ادامه نتایج حاصل از طراحی با روش کاملاً مبتنی بر نرم‌افزار با وضعیت موجود شبکه مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- طراحی بهینه شبکه توزیع آب

در این پژوهش بهینه‌سازی شبکه توزیع آب بر اساس به حداقل رساندن هزینه طراحی با انتخاب قطر لوله‌ها به عنوان متغیر انجام می‌شود. معادله (۱) تابع هدف مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد (Eusuff and Lansey, 2003; Zecchin et al., 2006; Moghaddam, 2014):

$$Min TC(\Omega) = \sum_{i=1}^n L_i c(\omega_i). \quad (1)$$

در این رابطه، ω_i و L_i به ترتیب قطر و طول لوله نام؛ $c(\omega_i)$ هزینه واحد طول برای لوله با قطر ω_i ؛ و $TC(\Omega)$ مجموع هزینه برای شبکه مورد نظر (Ω) که

$$\Omega = (\omega_1, \dots, \omega_n)$$

قیود حاکم بر تابع رامی‌توان به صورت زیر بیان کرد.

قیود فشار

برای هر گره رابطه زیر باید برقرار باشد (Cunha and Sousa, 1999; Moghaddam, 2014):

$$H_k min \leq H_k \leq H_k max, \forall k \in NN \quad (2)$$

در رابطه بالا؛ H_k : هد فشار در گره k ، $H_k min$ و $H_k max$: به ترتیب حداقل و حداکثر فشار مورد نیاز در گره k می‌باشد و NN : تعداد گره‌های کل شبکه است.

قیود سرعت

برای هر لوله رابطه زیر باید برقرار باشد (Cunha and Sousa, 1999; Moghaddam, 2014):

$$V_k min \leq V_k \leq V_k max, \forall k \in NP \quad (3)$$

در این رابطه؛ V_k : سرعت در لوله k ، $V_k min$ و $V_k max$ به

2 The energy conservation law

1 Continuity equation

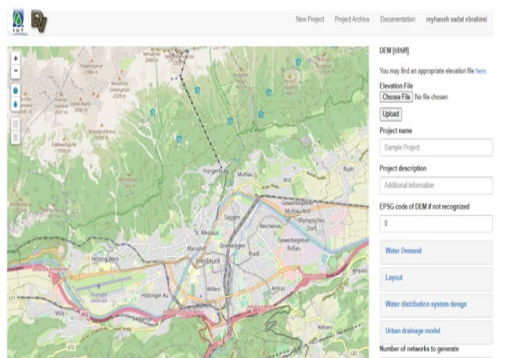


Fig. 1 A view of DynaVIBE-Web
شکل ۱ نمای سامانه DynaVIBE

در این رابطه؛ $H_{1,k}$ و $H_{2,k}$ هد در دو انتهای لوله k می‌باشد؛ w ثابت تبدیل عددی معادله است (بستگی به واحدها دارد)؛ C_k ضریب زبری لوله k (بستگی به جنس لوله دارد)؛ β و γ ضرایب رگرسیون می‌باشند. در این تحقیق با توجه به اینکه برای حل معادله مربوط به برقراری این قید از نرم‌افزار EPANET استفاده شده است، مقدار w برابر 10.667 و β و γ به ترتیب برابر 1.852 و 4.871 می‌باشد.

۳-۲- معرفی سامانه تحت وب DynaVIBE-Web

پروژه DynaVIBE بمنظور توسعه الگوریتم مطالعات تامین آب و سامانه‌های جمع‌آوری رواناب شهری با در نظر گرفتن تمام ساختارهای شهری در واحد مهندسی محیط‌زیست (IUT) دانشگاه اینسبروک توسعه یافته است. در این پروژه ایجاد و شبیه‌سازی سامانه‌های تامین آب و جمع‌آوری رواناب شهری در مقیاس مکانی و زمانی وجود دارد. بنابراین، قابلیت بررسی پویایی زیرساخت‌های آب شهری توسط مدل‌ها و شبیه‌سازی‌های محاسباتی وجود دارد. روش‌ها و الگوریتم‌های توسعه یافته در نرم‌افزار منبع باز DynaMind پیاده‌سازی شده است. نقطه قوت الگوریتم‌ها انعطاف‌پذیری برای استفاده از داده‌های ورودی با جزئیات مختلف است (برای مثال OpenStreetMap).

علاوه بر این، تاریخچه یک شبکه زیرساخت شهری را می‌توان با استخراج داده‌های شبکه خیابان‌ها از عکس‌های هوایی تاریخی بازسازی کرد. همچنین به اثبات رسیده است که رویکرد DynaVIBE می‌تواند در مطالعات موردی واقعی برای یافتن سازوکارهای بهینه برای توسعه و کنترل سامانه‌های زیرساخت آب شهری استفاده شود. با توجه به پیچیدگی بالای مدل‌های DynaVIBE یک نمونه اولیه تحت وب توسعه داده شد که امکان استفاده از مدل‌های DynaVIBE منتخب را بدون نصب هیچ نرم‌افزاری بر روی یک رایانه رومیزی معمولی فراهم می‌کند. این سامانه در آدرس <http://web01-c815.uibk.ac.at/> در دسترس می‌باشد (شکل ۱ نمای سامانه مذکور را نشان می‌دهد) DynaVIBE-Web (Sitzenfrei, 2016)، یک سامانه با دسترسی آزاد و برخط برای ایجاد زیرساخت شبکه‌های توزیع آب برای هر مکان روی زمین است. داده‌های ورودی موردنیاز عبارتند از (Sitzenfrei et al., 2010)

- ◆ داده‌های OpenStreetMap به طور خودکار توسط DynaVIBE قابل دسترسی است
- ◆ نقشه ارتفاع دیجیتال (DEM)،
- ◆ تعریف منطقه سرویس توسط کاربر (با ترسیم چند ضلعی)،
- ◆ تعریف منابع آب توسط کاربر،
- ◆ تعریف پارامترها شامل: تقاضای کل، توزیع تقاضا، چیدمان، شاخص حلقه، تعداد شبکه‌های تولیدی.

همچنین، داده‌های خروجی شامل:

۱. مجموعه پرونده‌های مدل EPANET2 (پرونده‌های با فرمت .inp) است که فقط شامل چیدمان شبکه بدون طراحی می‌باشد.
۲. مجموعه اختیاری از پرونده‌های مدل SWMM5 (پرونده‌های .inp) است که تنها چیدمان بدون طراحی می‌باشد.

در این پژوهش به منظور استخراج آرایش بهینه شبکه توزیع آب محدوده فشاری ۶ شهر تربت حیدریه بر اساس نقشه خیابان‌ها که بصورت برخط در سامانه DynaVIBE در دسترس است، اقدام گردید. شکل ۲ نمای استخراج شده از شبکه را تحت سامانه مذکور نشان می‌دهد.

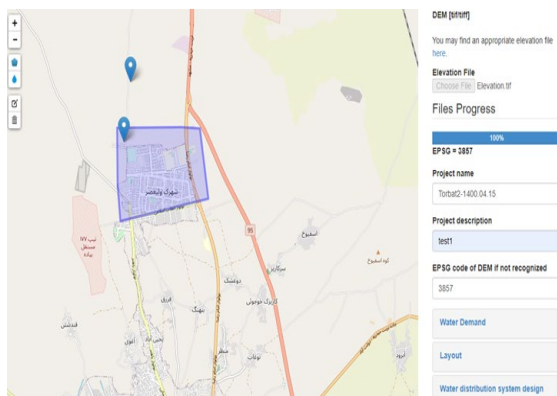


Fig. 2 Plan extracted from the network
شکل ۲ نمای استخراج شده از شبکه

جهانی آن غیر ممکن است. هسته الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نیاز به تعریف راه‌حل اولیه، دمای اولیه، روش ساخت همسایگی، برنامه خنک‌سازی (کاهش دما و تعداد ارزیابی‌ها که باید در هر دما انجام شود)، و معیار توقف دارد. در این روش الگوریتم با یک راه‌حل اولیه که در این مرحله همچنین نقش بهترین راه‌حل پیدا شده تاکنون و راه‌حل فعلی را بازی می‌کند، شروع می‌شود.

سپس از روش همسایگی برای شناسایی یک راه‌حل مطلوب در همسایگی راه‌حل فعلی استفاده می‌شود. رفتار هیدرولیکی این راه حل با مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی EPANET2.0 تخمین زده می‌شود و کیفیت آن ارزیابی می‌شود.

۲-۴- معرفی نرم افزار WaterNetGen

WaterNetGen یک نرم‌افزار توسعه‌یافته بر بستر نرم‌افزار EPANET است که قابلیت ایجاد خودکار مدل‌های ترکیبی شبکه توزیع آب (WDN)، تعیین قطر بهینه لوله بر اساس الگوریتم SA و تابع هدف معادله (۱)، محاسبه شاخص‌های عملکرد فنی، و شبیه‌سازی مبتنی بر تقاضا و بر فشار را دارد. شکل ۳ یک نمای کلی از نرم‌افزار WaterNetGen را نشان می‌دهد (Muranho et al., 2011). این نرم‌افزار به کاربر امکان تعریف مجموعه‌ای از قطره‌های تجاری موجود برای لوله‌ها، تخصیص جنس و کلاس برای یک لوله یا برای مجموعه‌ای از لوله‌ها و تعریف خودکار تخصیص تقاضا به گره‌های شبکه را فراهم می‌کند.

۲-۵- الگوریتم شبیه‌سازی تبرید^۱

روش شبیه‌سازی تبرید از فرآیند بازپخت فیزیکی الهام گرفته شده است. این روش، یک روش جستجوی تصادفی است که به سرعت برای یافتن راه‌حل‌های خوب، حتی در فضاهای جستجوی گسترده شناخته می‌شود. اگرچه این روش به لحاظ نظری به جواب بهینه جهانی همگرا می‌شود، در کاربردهای دنیای واقعی، به دلیل نیاز به محدود کردن زمان اجرا و تعداد راه‌حل‌ها برای ارزیابی، تضمین هم‌گرایی

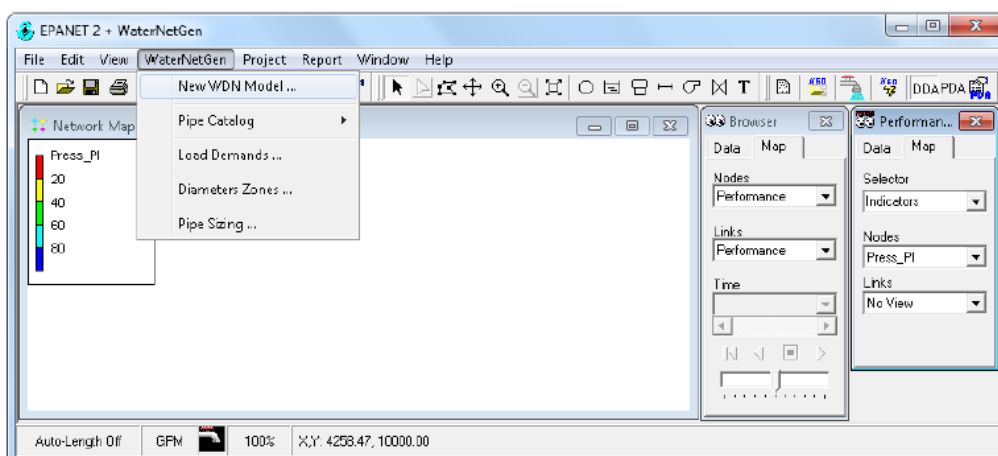


Fig. 3 Overview of EPANET with WaterNetGen extension
شکل ۳ نمای کلی از EPANET با توسعه WaterNetGen

1 Simulated Annealing algorithm (SA)

تلفات ۱۵ لیتر بر نفر بر ثانیه و ضرایب حداکثر روزانه و حداکثر ساعتی به ترتیب برابر ۱ و ۱/۶ بر اساس نشریه ۳-۱۱۷ در بخش‌های ۱-۴-۳-۱ و ۱-۴-۳-۲ تعیین شده است. برای محاسبه دبی در نهایت با جمع نمودن دو مقدار دبی لحظه‌ای و تلفات و ضرب آنها در ضرایب حداکثر ساعتی و روزانه، مقدار دبی برابر ۴۲/۰۹ لیتر بر ثانیه یا به تقریب ۴۲ لیتر بر ثانیه به دست می‌آید.

۷-۲- سناریوهای مورد بررسی

نتایج حاصل از روش ارائه شده در این پژوهش (استخراج آرایش بهینه توسط سامانه DynaVIBe-Web و طراحی بهینه شبکه توسط نرم‌افزار (WaterNetGen) در ۴ سناریو به شرح زیر ارائه و با وضعیت موجود مقایسه می‌شود:

سناریوی اول (S1) که وضعیت موجود شهر بدون اعمال تغییرات را بیان می‌کند.

سناریوی دوم (S2) شبکه وضعیت موجود شهر با طراحی مجدد با استفاده از نرم‌افزار WaterNetGen و قیود فشار بر اساس شبکه وضعیت موجود در سناریوی S1 را نشان می‌دهد.

سناریوی سوم (S3) شبکه استخراج شده از سامانه DynaVIBe-Web و طراحی شده با استفاده از نرم افزار WaterNetGen، قیود فشار بر اساس شبکه وضعیت موجود در سناریوی (S1) است.

سناریوی چهارم (S4) شبکه استخراج شده از سامانه DynaVIBe-Web و طراحی شده با استفاده از نرم افزار WaterNetGen، یا شبکه وضعیت موجود شهر با طراحی مجدد با استفاده از نرم‌افزار WaterNetGen، قیود فشار هر دو شبکه بر اساس شبکه وضعیت موجود در سناریوی (S1)

در این تحقیق در سناریوی S4 هدف انتخاب شبکه‌ای از بین دو شبکه استخراج شده از سامانه DynaVIBe-Web و طراحی شده با استفاده از نرم‌افزار WaterNetGen، یا شبکه وضعیت موجود شهر با طراحی مجدد با استفاده از نرم‌افزار WaterNetGen با طول مشابه با شبکه اصلی است و به این

همچنین محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی، محدودیت‌های هیدرولیکی متداول هستند که به طور ضمنی توسط مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی حل می‌شوند. پذیرش یا رد هر راه‌حل توسط معیار کلان‌شهر^۱ کنترل می‌شود. در این معیار اگر راه‌حل مطلوب بهتر از راه‌حل فعلی باشد، پذیرفته می‌شود، در غیر این صورت ممکن است با احتمال خاصی پذیرفته شود (Sousa et al, 2015).

۶-۲- شبکه مورد مطالعه

تربت حیدریه یکی از شهرهای استان خراسان رضوی است. شبکه وضعیت موجود شهر تربت حیدریه در محدوده فشاری ناحیه ۶ دارای دو مخزن آب، ۵۰۵ عدد گره، و مجموع طول لوله‌ها برابر با ۶۱/۵۲ کیلومتر می‌باشد. قطرهای مورد استفاده در این شبکه در بازه ۳۲ تا ۴۰۰ میلیمتر است. محدوده فشار در شبکه اصلی شهر از ۷/۱۹ مترآب تا ۵۳/۶ مترآب می‌باشد. جمعیت مشترکین تحت پوشش این بخش از شبکه برابر ۴۴۰۰ نفر بوده و تقاضای آنها در حدکثر مصرف ساعتی برابر ۴۲ لیتر بر ثانیه می‌باشد. (شکل ۴).

با در نظر گرفتن دبی لحظه‌ای ۱۱ لیتر بر نفر بر ثانیه و

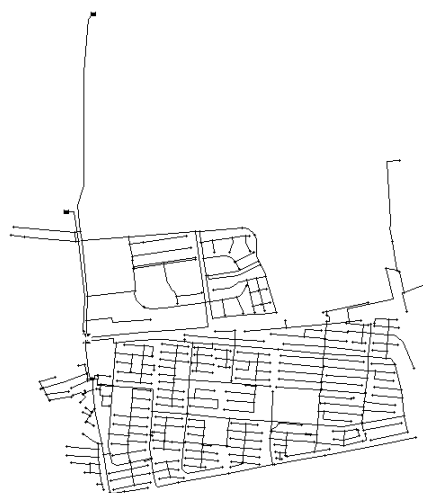


Fig. 4 The plan of existing network of Torbat-e Heydarieh (zone 6)

شکل ۴ نقشه شبکه محدوده فشاری ۶ شهر تربت حیدریه در وضعیت موجود

تعداد کل گره‌های شبکه فشار کمتر از ۱۴ مترآب است. ۲۰ درصد از کل گره‌های شبکه فشاری در محدوده ۱۴ تا ۲۶ مترآب دارند. ۶۳/۹۶ درصد از کل گره‌های شبکه فشاری در محدوده ۲۶ تا ۳۸ مترآب دارند، ۱۵/۲۵ درصد گره‌ها فشاری در محدوده ۳۸ تا ۵۰ مترآب و ۰/۴ درصد از کل گره‌های شبکه فشاری بیشتر از ۵۰ مترآب دارند.

در سناریوی S2، ۰/۵۹ درصد کل گره‌های شبکه فشار کمتر از ۲۰ مترآب دارند. ۶۸/۳۲ درصد کل گره‌های شبکه فشاری در محدوده ۲۰ تا ۳۰ مترآب دارند. ۳۰/۶۹ درصد گره‌های شبکه فشاری در محدوده ۳۰ تا ۴۰ مترآب می‌باشد. ۰/۴ درصد گره‌های شبکه فشاری در محدوده ۴۰ تا ۵۰ می‌باشد و در هیچ گره‌ای فشار بیشتر از ۵۰ وجود ندارد. در سناریوی S3، در هیچ گره‌ای فشار کمتر از ۲۰ مترآب مشاهده نمی‌شود. ۲۷/۸۸ درصد از کل گره‌های موجود در شبکه فشاری در محدوده ۲۰ تا ۳۰ مترآب دارند. ۴۳/۶۳ درصد کل گره‌های موجود در شبکه فشاری در محدوده ۳۰ تا ۴۰ مترآب دارند، ۲۲/۴۲ درصد گره‌های شبکه فشاری در محدوده ۴۰ تا ۵۰ مترآب دارند و در نهایت ۶/۰۶ درصد کل گره‌های شبکه فشاری بیشتر از ۵۰ مترآب می‌باشد.

در سناریوی S4، تنها ۰/۷۳ درصد گره‌های کل شبکه فشار کمتر از ۲۰ مترآب دارند. همچنین ۵۹/۱۹ درصد گره‌ها فشار در محدوده ۲۰ تا ۳۰ مترآب، ۳۸/۹۷ درصد گره‌ها فشاری در محدوده ۳۰ تا ۴۰ مترآب و در نهایت ۱/۱ درصد گره‌ها فشاری در محدوده ۴۰ تا ۵۰ مترآب دارند. در سناریوهای S1 و S3 محدوده قرمز رنگ که فشار بیشتر از ۵۰ مترآب است خارج از محدوده بیشینه فشار استاندارد می‌باشد. اما در سناریوهای S2 و S4 محدوده‌های فشاری کمتر از ۵۰ مترآب می‌باشند که مطلوب می‌باشد. دو سناریوی S2 و S4 از لحاظ درصد گره‌های با فشار کمتر از ۲۰ مترآب تقریباً برابری دارند که می‌توان هر دو سناریو را مطلوب دانست.

نمودار توزیع فشار

شکل ۷ نمودار توزیع فشار را در شبکه مورد مطالعه برای سناریوهای S1، S2، S3 و S4 را نشان می‌دهد. همان طور

دلیل که طول شبکه استخراج شده از سامانه DynaVIBE-Web کمتر از طول شبکه اصلی می‌باشد، برای سناریوی S4 مناسب نبوده و از شبکه وضعیت موجود استفاده شده است. سپس شبکه وضعیت موجود با استفاده از نرم‌افزار WaterNetGen ساده‌سازی شده است.

در این تحقیق براساس نشریه ۱۱۷-۳، محدوده فشار در بازه ۱۴ تا ۵۰ مترآب و محدوده سرعت در بازه ۰ تا ۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج هیدرولیکی

تغییرات سرعت در لوله‌ها

شکل ۵ تغییرات سرعت در لوله‌های شبکه را برای سناریوهای S1، S2، S3، و S4 را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، در تمامی سناریوها کمینه سرعت برابر با صفر می‌باشد اما بیشینه سرعت برای سناریوهای S1، S2، S3، و S4 به ترتیب برابر ۰/۹، ۲، ۲ و ۱/۸ متر بر ثانیه می‌باشد.

از طرفی اگر سرعت بیشینه ۱/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شود می‌توان بیان نمود در سناریوهای S1، S2، S3، و S4 به ترتیب ۱۰۰، ۹۹/۶۱، ۹۸/۸۵ و ۹۹/۶۴ درصد سرعت در لوله‌ها کمتر از سرعت بیشینه می‌باشد. در نتیجه سناریوهای S3 و S4 که کاملاً مبتنی بر ابزار طراحی شده‌اند با دقت بسیار خوبی سرعت را در محدوده سرعت مناسب رعایت کرده‌اند. در سناریوی S2 هم وضعیت موجود با مدل WaterNetGen بهینه شده است نیز عملکرد از لحاظ رعایت قیود سرعت مجاز و حفظ سرعت بهینه بسیار عالی است.

نقشه پهنه‌بندی فشار

شکل ۶ نقشه پهنه‌بندی فشار را در شبکه مورد مطالعه برای سناریوهای S1، S2، S3 و S4 را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، در سناریوی S1، تنها ۰/۴ درصد از

نتیجه به ترتیب ۷ مترآب، ۲/۳۷ مترآب و ۳/۶ مترآب، اختلاف فشار با فشار بهینه وجود دارد. در سناریوی S3، انحراف معیار داده‌ها ۸/۵۶، میانگین داده‌ها ۳۵/۲۶ و میانه آنها ۳۵/۳۲ مترآب می‌باشد.

که مشاهده می‌شود، سناریوهای S1، S2 و S4 به ترتیب دارای میانه فشارهایی برابر با ۳۲ مترآب، ۲۷/۳۷ مترآب و ۲۸/۶ مترآب می‌باشد. فشار بهینه برای کلیه شبکه‌های مورد بررسی عدد ۲۵ مترآب در نظر گرفته شده است، در

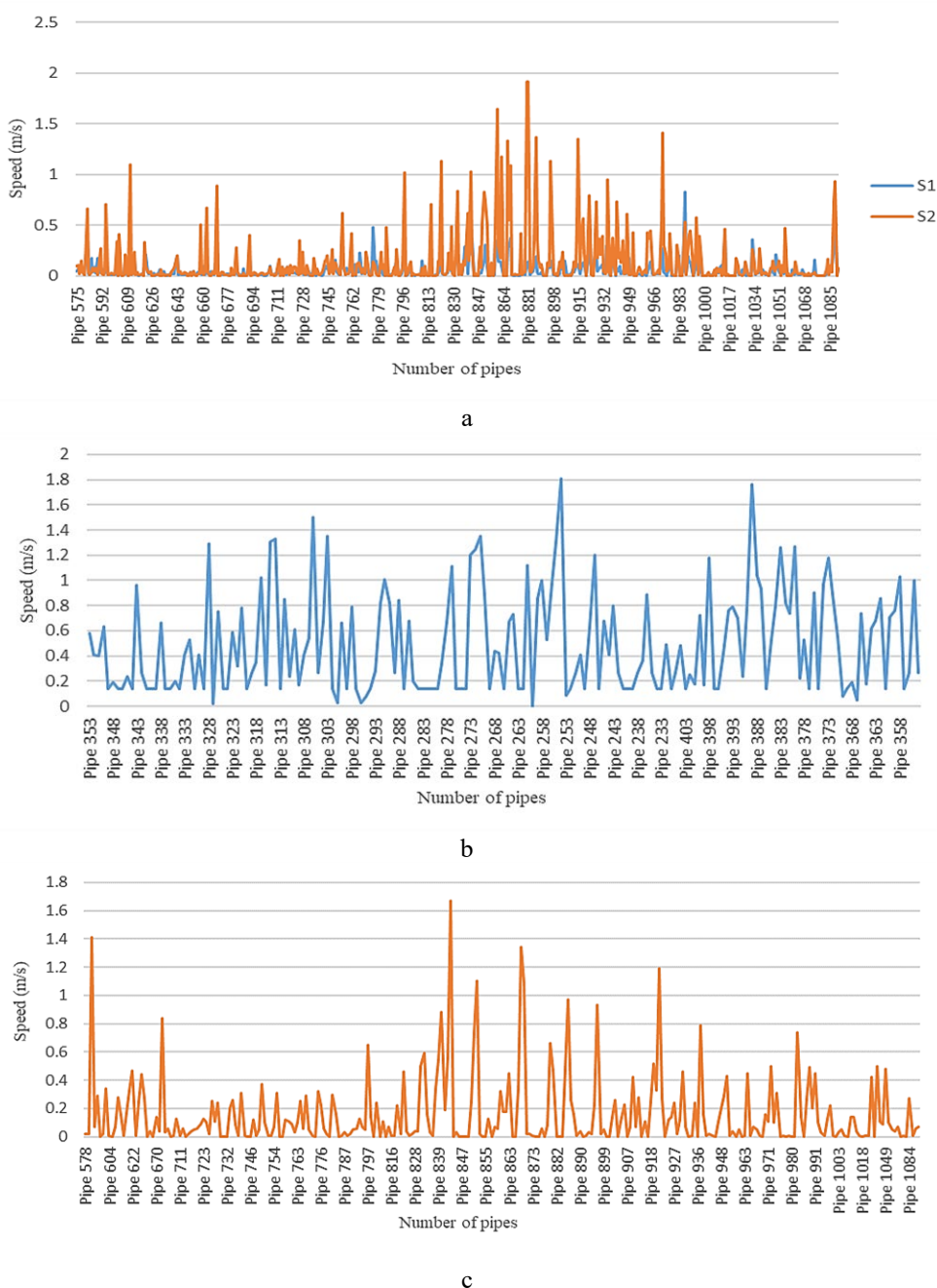


Fig. 5 Velocity variations in the network pipes for scenarios a) S1 and S2, b) S3, and c) S4
شکل ۵ تغییرات سرعت در لوله‌های شبکه مورد مطالعه برای سناریوی S1 و S2 (a)، S3 (b) و S4 (c)

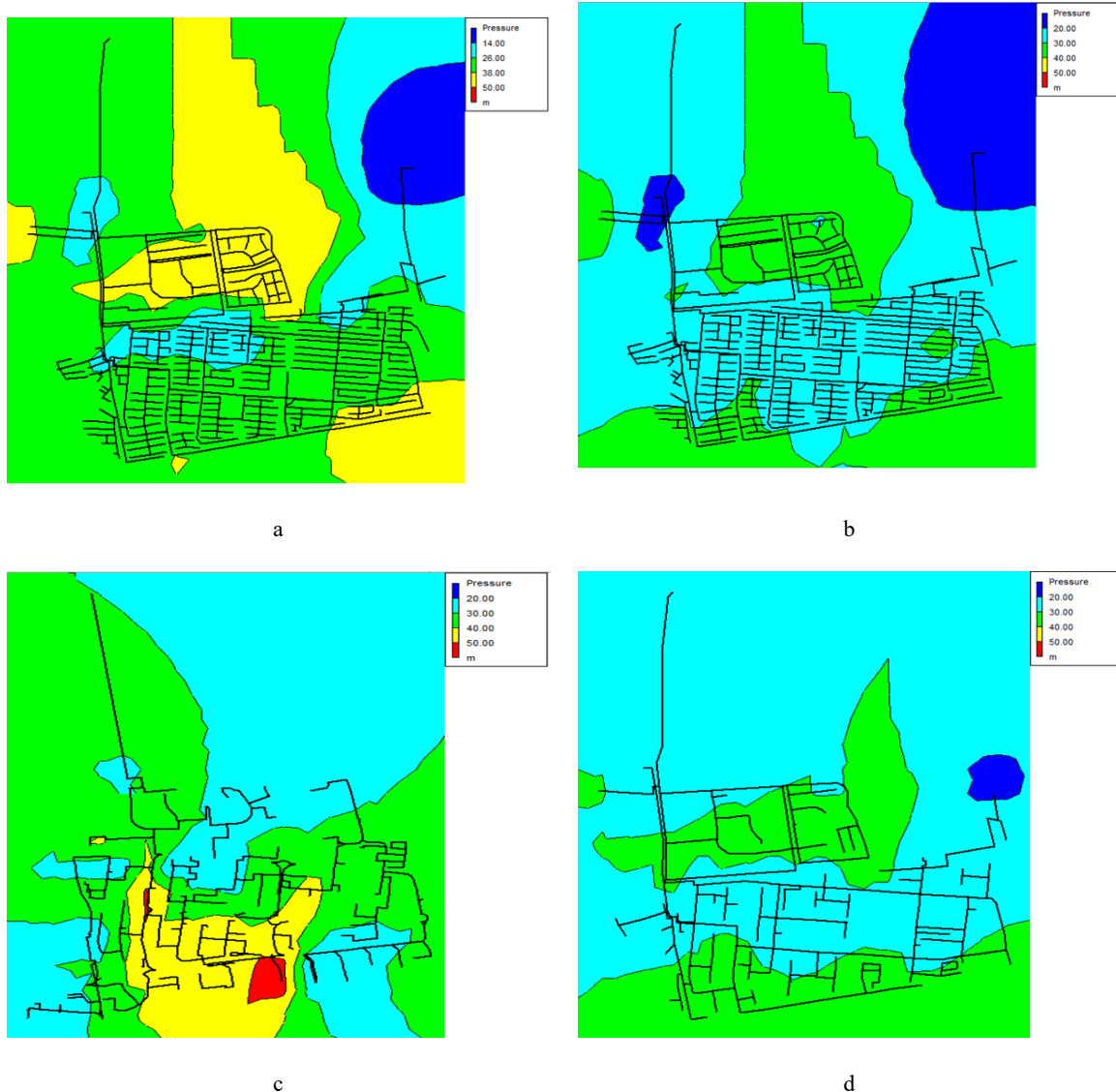


Fig. 6 Pressure zoning map of the network nodes for scenarios a) S1, b) S2, c) S3 and d) S4
شکل ۶ نقشه پهنه‌بندی فشار گره‌های شبکه مورد مطالعه برای سناریوی (a) S1، (b) S2، (c) S3، و (d) S4

در شهر تربت حیدریه را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، سناریوی S3 نسبت به سایر سناریوها مناسب تر است زیرا در فشار مازاد هر چه این عدد کمتر باشد نشان دهنده عملکرد بهتر شبکه است. زیرا فشار مازاد در شبکه موجب افزایش نشت، مصرف آب، تعداد حوادث و همچنین فرسودگی بیشتر شبکه می‌گردد.

شکل ۹ نمودار مقایسه توزیع طول در برابر قطر در سناریوهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در سناریوی S1 بیشترین طول اختصاص

با توجه به اینکه $10/32$ متر آب اختلاف فشار با فشار بهینه وجود دارد و فشار بهینه برابر با میانه نمی‌باشد، در نتیجه توزیع فشارها یکنواخت نیست طبق توضیحات بالا، در سناریوی S2 اختلاف فشار بهینه و میانه فشارها برابر $2/37$ متر آب می‌باشد که این مقدار نسبت به مابقی سناریوها کمتر می‌باشد. در نتیجه می‌توان سناریوی S2 را به عنوان سناریوی برتر انتخاب کرد.

منظور از فشار مازاد اختلاف فشار هر گره با فشار مینیمم می‌باشد. شکل ۸ فشار مازاد را در ۴ سناریوی مورد بررسی

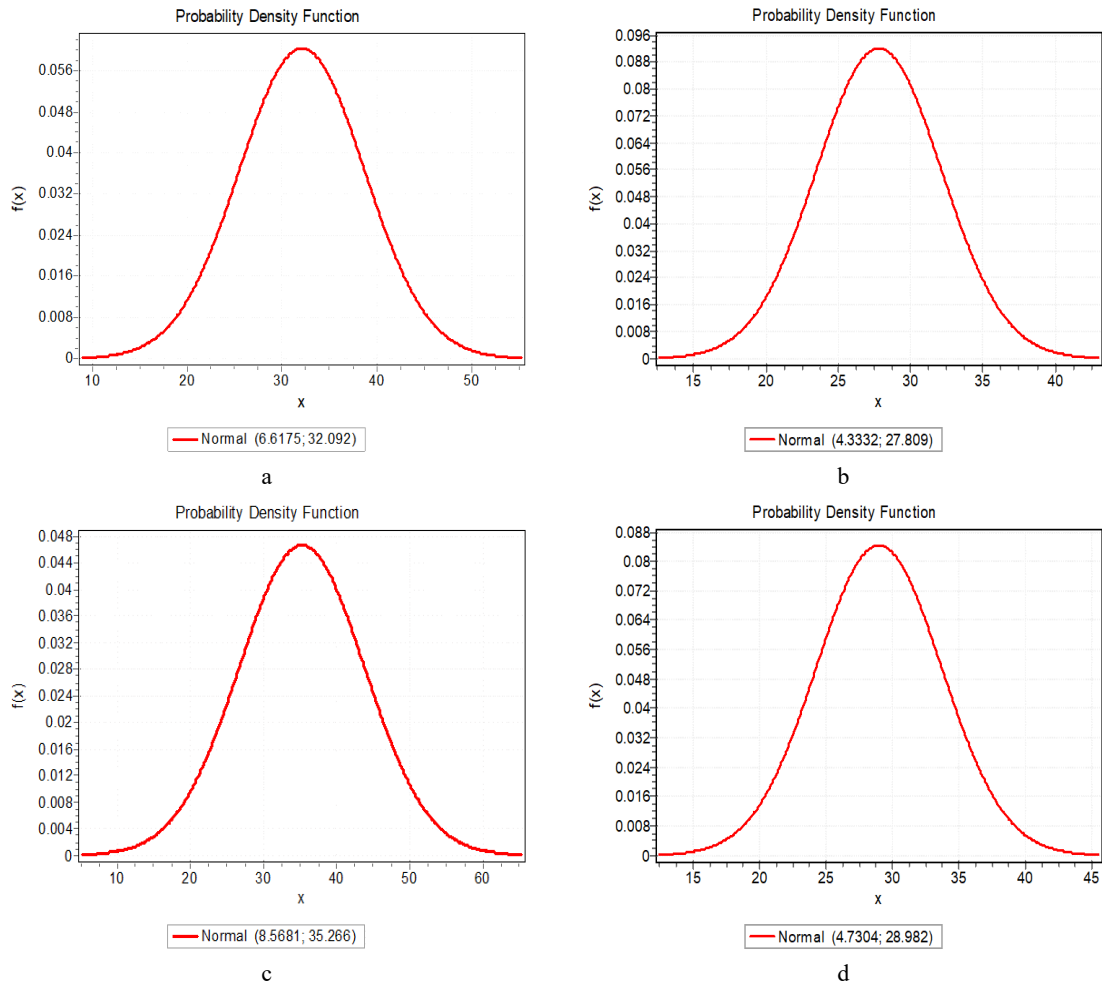


Fig. 7 Diagram of the normal pressure distribution of the network for scenarios a) S1, b) S2, c) S3, and d) S4
 شکل ۷ نمودار توزیع نرمال فشار گره‌های شبکه مورد مطالعه برای سناریوی (a) S1، (b) S2، (c) S3 و (d) S4

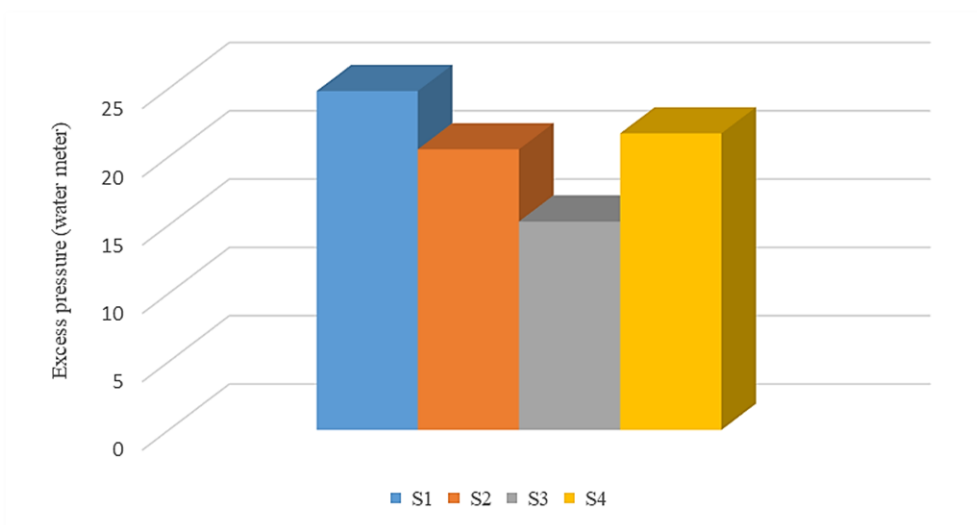


Fig. 8 Surplus nodal pressure in for the studied scenarios
 شکل ۸ فشار مازاد در گره‌های شبکه برای سناریوهای مورد مطالعه

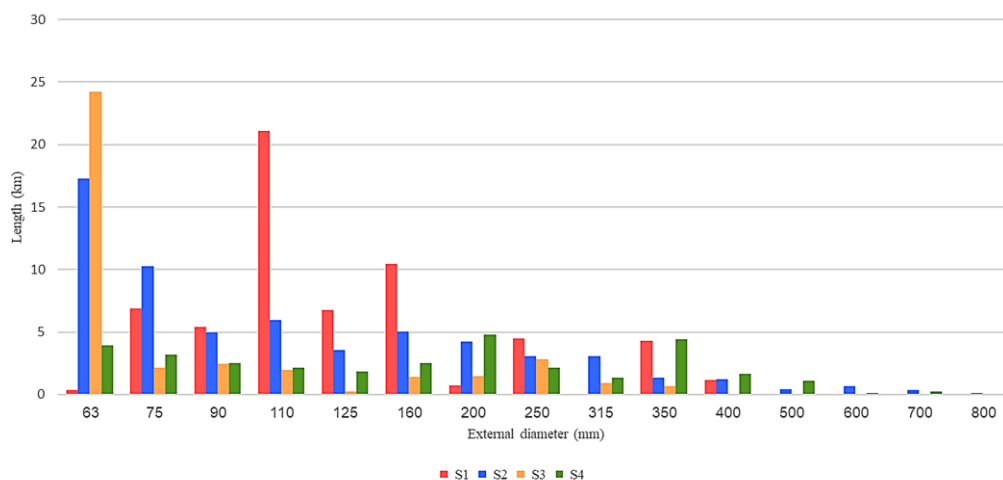


Fig. 9 Comparison of length distribution versus diameter in the studied scenarios

شکل ۹ نمودار مقایسه توزیع طول در برابر قطر در سناریوهای مورد مطالعه

کمر شده است که نشان‌دهنده مقرون به صرفه‌تر بودن این سناریو می‌باشد.

علاوه بر این بر اساس شکل ۱۰ می‌توان بیان نمود سناریوی S₂ نسبت به سناریوی S₁ افزایش هزینه ۳/۲۷ درصدی را داشته است که مناسب نمی‌باشد. سناریوی S₃ و S₄ کاهش هزینه داشته‌اند که هزینه آنها به ترتیب ۴۸/۱۹ و ۲۹/۴۴ درصد کاهش یافته است. همان طور که مشخص است سناریوی S₃ کاهش هزینه بیشتری را داشته است و از این نظر نیز برتر می‌باشد.

با توجه مطالب بیان شده، می‌توان سناریوی S₃ را سناریوی برتر انتخاب کرد. اگر چه این سناریو از لحاظ تغییرات سرعت در لوله‌ها، نقشه پهنه‌بندی فشار و توزیع فشار نسبت به دو سناریوی S₂ و S₄ نتایج ضعیف‌تری داشته است، اما اختلاف بین سناریوهای S₂ و S₄ و S₃ در موارد ذکر شده اندک می‌باشد و قابل صرف نظر کردن می‌باشد. سناریوی S₃ در بخش فشار مازاد، هزینه و طول شبکه نسبت به دو سناریوی S₂ و S₄ برتری بسیار واضحی داشته و می‌توان در این موارد با قاطعیت سناریوی S₃ را انتخاب نمود. در نهایت، می‌توان بیان نمود استفاده از سامانه تحت وب-DynaVIBE در استخراج آرایش بهینه شبکه و به کارگیری نرم‌افزار WaterNetGen در طراحی بهینه باعث برتری شبکه استخراج شده نسبت به شبکه وضعیت موجود شده است.

داده شده شبکه به ترتیب با مقادیر ۳۴/۲۴ و ۱۷/۰۱ درصد برای قطرهای ۱۱۰ و ۱۶۰ میلیمتر می‌باشد. بطور مشابه در سناریوی S₂، به ترتیب ۲۸/۰۷ و ۱۶/۷۱ درصد از طول لوله‌های شبکه مربوط به قطر ۶۳ و ۷۵ میلیمتر است. اما در سناریوی S₃، ۶۳/۴۷ درصد از طول شبکه به قطر ۶۳ میلیمتر اختصاص یافته است که همین موضوع سبب کاهش هزینه خرید لوله‌های شبکه در این سناریو شده است. لازم به ذکر است در سناریوی S₄ از تمامی اقطار شبکه در محدوده ۶۳ تا ۵۰۰ تقریباً بطور یکنواخت استفاده شده است. در نتیجه می‌توان بیان نمود، سناریوی S₃ نتیجه مناسب‌تری را نسبت به سناریوهای S₁، S₂ و S₄ به دست می‌دهد.

شکل ۱۰ هزینه مربوط به خرید لوله‌های شبکه توزیع آب تربت حیدریه در سناریوهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد که بر اساس فهرست بهای سال ۱۳۹۹ شبکه توزیع آب برآورد شده است. جهت محاسبه هزینه مربوط به خرید لوله‌ها برای هر سناریو، مجموع طول اختصاص داده شده به هر قطر را محاسبه نموده و در هزینه مربوط به قطر مورد نظر ضرب می‌گردد. این روند برای همه قطرهای موجود در شبکه انجام شده و در نهایت تمام مقادیر فوق را جمع نموده و هزینه نهایی خرید لوله‌های شبکه برای سناریوی مورد نظر محاسبه می‌گردد. همان طور که مشاهده می‌شود، در سناریوی S₃ هزینه تمام شده برای شبکه از سایر سناریوها

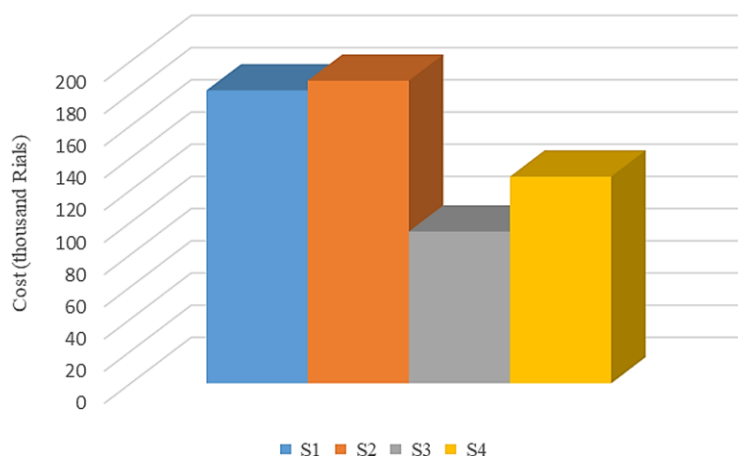


Fig. 10 Costs of network pipes in the studied scenarios
 شکل ۱۰ هزینه مربوط به خرید لوله‌های شبکه در سناریوهای مورد مطالعه

و رایگان DynaVIBe-Web و رعایت برخی شرایط هیدرولیکی مرسوم مانند حدود سرعت و فشار با استفاده از نرم افزار WaterNetGen می‌توان به طراحی شبکه ای کارا تر از شبکه اصلی شهر دست یافت. از دیگر فواید این روش می‌توان به عدم نیاز به استفاده از نرم افزارهای مجزا جهت دانلود تصاویر ماهواره‌ای و خطوط ارتفاعی جهت ورود به نرم افزارهای هیدرولیکی پیچیده طراحی شبکه توزیع آب مانند WaterGEMS جهت ترسیم آرایش شبکه، صرفه جویی در زمان طراحی شبکه، دقت بالا در استخراج آرایش شبکه و طراحی بهینه شبکه با رعایت قیود هیدرولیکی اشاره نمود.

۴- فهرست نشانه‌ها

ω_i	قطر لوله i (m)
L_i	طول لوله i (m)
$c(\omega_i)$	هزینه واحد طول برای لوله با قطر ω_i (IRR)
H_k	هد فشار در گره k (m)
$H_{k \min}$	حداقل فشار مورد نیاز در گره k (m)
$H_{k \max}$	حداکثر فشار مورد نیاز در گره k (m)
V_k	سرعت در لوله k (m/s)
$V_{k \min}$	حداقل سرعت در لوله k (m/s)

نتیجه گیری

هدف این پژوهش طراحی بهینه شبکه توزیع آب محدوده فشاری ۶ شهر تربت حیدریه در دو مرحله استخراج آرایش بهینه توسط سامانه تحت وب DynaVIBe-Web و سپس طراحی بهینه شبکه با هدف کمینه کردن هزینه‌ها با استفاده از نرم افزار WaterNetGen، بوده است که این روش سبب طراحی بصورت کامل و بدون دخالت نظرات کارشناسی می‌گردد. نتایج حاصل از طراحی با روش کاملاً مبتنی بر نرم افزار با وضعیت موجود تحت چهار سناریو مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت.

در هر سناریو نتایج هیدرولیکی مانند تغییرات فشار، تغییرات سرعت، نقشه پهنه‌بندی فشار، نمودار توزیع فشار (PDF) و فشار مازاد و طول و نتایج هزینه بررسی شدند و برتری هر سناریو نسبت به سناریوهای دیگر شرح داده شد.

در شبکه محدوده فشاری ۶ شهر تربت حیدریه، سناریوی S3 به عنوان سناریوی برتر انتخاب شد. این سناریو در بخش فشار مازاد، هزینه و طول شبکه نسبت به دو سناریوی S2 و S4 برتری واضحی داشته و با توجه نزدیک بودن نتایج در بخش های تغییرات فشار در گره‌ها، تغییرات سرعت در لوله‌ها، نقشه پهنه‌بندی فشار و توزیع فشار به دو سناریوی S2 و S4، سناریوی S3 به عنوان سناریوی برتر معرفی شد. در نهایت می‌توان بیان کرد با استفاده از نرم افزار تحت وب

Redundant Water Distribution Networks with Fuzzy Demands. *J. Irrigation and Water Engineering of Iran*. 10 - 113-125, DOI: 10.22125/IWE.2020.107096. (In Persian)

Khalifeh, S., Esmaili, K. and Khalifeh, H. (2018). Optimization of Water Distribution Systems by Maximizing the Profit (Case Study: Homashahr). *J. Water and Wastewater Science and Engineering*. 3, 35-43, DOI: 10.22112/JWWSE.2018.128930.1083. (In Persian)

Mair, M., Sitzenfrei, R., Möderl, M., and Rauch, W. (2012). Identifying multi utility network similarities. *World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries.*, Albuquerque, New Mexico, United States.

Mair, M., Rauch, W., and Sitzenfrei, R. (2014). Spanning Tree-Based Algorithm for Generating Water Distribution Network Sets by Using Street Network Data Sets. *World Environmental and Water Resources Congress 2014: Water without Borders.*, Portland, Oregon, United States.

Mair, M. (2015). DYNAMIBE Dynamic Virtual Infrastructure Benchmarking, PhD Thesis, University of Leopold Franzens Innsbruck, Austria, 145p.

Mazaherizadeh, Y., Faridhosseini, A. and Davari, K. (2019). Multi Objective Design of Water Distribution System Using Todini's Resilience Index and Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. *J. Water and Wastewater*. 30(6), 18-34, DOI: 10.22093/WWJ.2019.152398.2763. (In Persian)

Moghaddam, A. (2013). The Comparison and Assessment of Genetic and Particle Swarm Optimization Algorithms in Optimal Design of Water Distribution Network, MSc Thesis, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, 133p.

Moghaddam, A., Alizadeh, A., Faridhosseini, A., Ziaei, A., and Heravi, D. (2018). Optimal design of water distribution networks using simple modified particle swarm optimization approach. *J. Desalination and Water Treatment*, 104, 99-110, DOI: 10.5004/dwt.2018.21911.

Moghaddam, A., Alizadeh, A., Faridhosseini, A., Ziaei, A., Fallah Heravi, D. and Peirovi Minaee, R. (2020). Water distribution networks optimization using GA, SMPPO, and SHGAPSO algorithms based on engineering approach: a real case study. *J. Desalination and Water Treatment*, 193, 321-334, DOI: 10.5004/dwt.2020.25822.

Muranho, J., Ferreira, A., Sousa, J., Gomes, A., and Marques, A. (2011). *WaterNetGen Water Distribution Network Models Generator and Pipe Sizing- User's Manual*,

$V_{k\max}$ حداکثر سرعت در لوله k (m/s)
 NP تعداد لوله‌های موجود در شبکه (-)

۵- سپاسگزاری

در انتها از شرکت سهامی سازمان آب و برق خوزستان که تأمین‌کننده مالی مطالعات تعیین حد بستر و حریم تالاب بامدثر بوده و مقاله حاضر بخشی از اقدامات انجام‌شده در قالب این پروژه پس از تصویب است، قدردانی می‌شود. ضمناً از مهندسين مشاور سازه‌پردازی ایران که بستر این مطالعات را در اختیار محققین این مقاله قرار داده است، تشکر می‌شود..

References

منبع‌ها

- Alkali, A, N., Yadima, S, G., Usman, B., Ibrahim, U, A. and Lawan, A, G. (2017). Design of Water Supply Distribution Network Using EPNAET 2.0: A Case Study of Maiduguri Zone 3, Nigeria. *J. Engineering, Technology and Environment*. 13(3), 347-355.
- Anisha, G., Kumar, A., Ashok Kummur, J. and Suvarna Raju, P. (2016). Analysis and Design of Water Distribution Network Using EPANET for Chirala Municipality in Prakasam District of Andhra Pradesh. *J. Engineering and Applied Sciences*. 3, 53-60, DOI:10.13140/RG.2.1.3131.4320.
- Bermudez, C., Salto, C., Minetti, G, F. (2018). SA to optimize the Multi-Period Water Distribution Network Design. *Argentino de Ciencias de la Computación Tandil, La Plata, Argentino*.
- Cunha, M. d. C. and Sousa, J. (1999). Water distribution network design optimization: simulated annealing approach. *J. Water Resources Planning and Management*, 125(4), 215-221, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:4(215).
- Eusuff, M, M. and Lansey, K, E. (2003). Optimization of Water Distribution Network Design Using the Shuffled Frog Leaping Algorithm. *J. Water Resources Planning and Management* 129(3), 10-25, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:3(210).
- Ezzeldin, R. M. and Djebedjian, B. (2020). Optimal design of water distribution networks using whale optimization algorithm. *J. Urban Water*, 17(1), 14-22, DOI: 10.1080/1573062X.2020.1734635.
- Gohari, S., Rahimpour, M., Qaderi, K. and Ahmadi, M, M. (2020). Optimal Design of Level-1

- Sitzenfrei, R. Mair, M. (2016). Dynamic Virtual Infrastructure Benchmarking (DynaVIBe). <https://www.uibk.ac.at/umwelttechnik/research/projects/dynavibe.html.en>.
- Sousa, J., Muranho, J., Marques, A. , and Gomes, R. (2014). WaterNetGen Helps C-Town. 16th Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA 2014, Bari, Italy.
- Sousa, J., Muranho, J., Marques, A., and Gomes, R. (2015). Optimal Management of Water Distribution Networks with Simulated Annealing: The C-Town Problem. *J. Water Resources Planning and Management*, 142, C4015010-1- C4015010-9, DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000604.
- Sousa, J., Ribeiro, L., Muranho, J., and Marques, A. (2015). Locating Leaks in Water Distribution Networks with Simulated Annealing and Graph Theory. 13th Computer Control for Water Industry Conference, CCWI 2015, Leicester, United Kingdom.
- Zecchin, A. C., Simpson, A. R., Maier, H. R., Leonard, M., Roberts, A. J., and Berrisford, M. J. (2006). Application of two ant colony optimisation algorithms to water distribution system optimisation. *J. Mathematical and Computer Modelling*, 44(5), 451-468 , DOI: 10.1016/j.mcm.2006.01.005.
- <https://dokumen.tips/reader/f/waternetgen-users-manual-universidade-de-waternetgenmanualwaternetgenchapter>.
- Muranho, J., Ferreira, A., Sousa, J., Gomes, A., and Marques, A. (2012). WaterNetGen: An EPANET extension for automatic water distribution network models generation and pipe sizing. *J. Water Science & Technology: Water Supply*, 12, 117-123, DOI: 10.2166/ws.2011.121.
- Paez, D. and Filion, Y .(2017). Generation and Validation of Synthetic WDS Case Studies Using Graph Theory and Reliability Indexes. XVIII International Conference on Water Distribution Systems Analysis, WDSA2016, Cartagena, Columbia.
- Robles, J. and Saldarriaga, J. (2018). Generation of Virtual WDS to Complete Cadastral Information of Existing Systems. World Environmental and Water Resources Congress 2018: Hydraulics and Waterways, Water Distribution Systems Analysis, and Smart Water., Minneapolis, Minnesota, United States.
- Sitzenfrei, R., Fach, S., Kleidorfer, M., Urich, C. and Rauch, W. (2010). Dynamic Virtual Infrastructure Benchmarking: DynaVIBe. *J. Water Science and Technology: Water Supply*. 10, 600-609, DOI: 10.2166/ws.2010.188.