dx.doi.org/10.22093/wwj. 2019.152398.2763

Jouranl of Water and Wastewater, Vol. 30, No.6, pp: 18-34

Multi Objective Design of Water Distribution System Using Todini's Resilience Index and Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm

Y. Mazaherizadeh[1], A. R. Faridhosseini[2], K. Davari[3]

1. PhD Student of Water Resources Engineering, Dept. of Water Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran (Corresponding Author) farid-h@um.ac.ir
3. Prof., Dept. of Water Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

(Received Oct. 15, 2018 Accepted Dec. 29, 2019)

To cite this article:
Mazaherizadeh, Y., Faridhosseini, A. R., Davari, K. 2019. "Multi objective design of water distribution system using Todini's resilience index and improving the strength pareto evolutionary algorithm." Journal of Water and Wastewater, 30(6), 18-34. Doi: 10.22093/wwj.2019.152398.2763 (In Persian)

Abstract

Water distribution network, one of the most important and most sensitive urban infrastructures, has recently been observed with regard to population growth and consumers' needs to increase with challenges such as reducing the pressure and discharge that are due to unsuitable design and are based on economic goals. In order to overcome these problems the reliability of the network should always be considered when designing an urban water distribution system. In this research, to optimize the water distribution networks, two main objectives of cost minimization and maximization of network reliability were considered. To calculate network reliability, the Tondini's Resilience Index and its hydraulic simulation EPANET 2.0 model were used. Then, using the second edition of the evolutionary algorithm based on the strength of the Pareto (SPEA2) and creating a dynamic connection with the EPANET 2.0 hydraulic model in the MATLAB software environment, the multi-objectives of the four water distribution networks including Two-Loop, Kadu, Hanoi networks and D zone of Mashhad were optimized. Simultaneous optimization of two main objectives including cost minimization and maximization of the Tondini's Resilience Index led to the production of optimal solutions in the form of the Pareto front. An optimal solution, called Point C, was introduced using Young's bargaining method from the final Pareto front in each of the networks. Selected C solution in two-loop, Hanoi and Kadu networks increased 22.91, 17.13 and 7.41 percent of the network average pressure compared to its lowest cost in this study (point A). Also, the selected C solution in D-zone network of Mashhad, with an increase of 4.23 percent of the network average pressure compared to the initial design of the consulting company (point D), illustrates that the solution designed by the consulting company would be the dominate solution under the final Pareto front of this study. In this research, the Tondini's Resilience Index shows that, based on increasing nodal pressure, it has the ability to increase the reliability of the network, which causes critical condition of the network or failure of the pipes, with high reliability, providing adequate pressure and discharge in other nodes. Also, the satisfactory performance of the SPEA2 multi-objective algorithm in providing the optimal Pareto front for the issues indicated showed that the design pattern developed in this study could provide an optimal set of solutions to the employer to select the points in which the two factors of cost and reliability are combined in a favorable situation.

Keywords: Reliability of the Network, Pareto Front, Water Distribution Systems, Multi-objective Optimization.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۰، شماره ۶، صفحه: ۳۴-۱۸

طراحی چندهدفه شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شاخص تاب‌آوری تودینی و نسخه تکامل یافته الگوریتم فراکاوشی مبتنی بر قوت پارتو

یونس مظاهری‌زاده[۱]، علیرضا فریدحسینی[۲]، کامران داوری[۳]

۱- دانشجوی دکترای آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران
(نویسنده مسئول) farid-h@um.ac.ir
۳- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

(دریافت ۹۷/۷/۲۳ پذیرش ۹۷/۱۰/۸)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
مظاهری‌زاده، ی.، فریدحسینی، ع.ر.، داوری، ک.، ۱۳۹۸، " طراحی چندهدفه شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شاخص تاب‌آوری تودینی و نسخه تکامل یافته الگوریتم فراکاوشی مبتنی بر قوت پارتو " مجله آب و فاضلاب، ۳۰(۶)، ۳۴-۱۸. Doi: 10.22093/wwj.2019.152398.2763

چکیده

شبکه‌های توزیع آب یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین زیرساخت‌های شهری می‌باشند که اخیراً با توجه به رشد جمعیت و افزایش نیاز مصرف‌کنندگان، با چالش‌هایی از قبیل کاهش فشار و شکست لوله‌ها روبرو هستند که همگی به‌علت طراحی‌های نامناسب و مبتنی بر اهداف اقتصادی است. برای رفع این مشکلات در هنگام طراحی یک سامانه توزیع آب شهری همواره باید اطمینان‌پذیری شبکه نیز در نظر گرفته شود. در این پژوهش به‌منظور بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب، دو هدف اصلی کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری شبکه در نظر گرفته شد. برای محاسبه اطمینان‌پذیری شبکه از شاخص تاب‌آوری تودینی و برای شبیه‌سازی هیدرولیکی آن از مدل EPANET 2.0 استفاده شد. سپس با استفاده از نسخه دوم الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو (SPEA2) و ایجاد ارتباط پویا با مدل هیدرولیکی EPANET 2.0 در محیط نرم‌افزار MATLAB، بهینه‌سازی چند هدفه چهار شبکه توزیع آب شامل شبکه‌های دوحلقه‌ای، کادو، هانوی و پهنه D شهر مشهد انجام گرفت. بهینه‌سازی توأمان دو هدف اصلی شامل کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی شاخص تاب‌آوری تودینی منجر به تولید پاسخ‌های بهینه در قالب جبهه پارتو شد. یک پاسخ بهینه تحت عنوان نقطه C با استفاده از روش چانه‌زنی Young از جبهه پارتوی نهایی تولید شده در هریک از شبکه‌ها معرفی شد. پاسخ منتخب C در شبکه‌های دوحلقه‌ای، هانوی و کادو به‌ترتیب ۲۲/۹۱، ۱۷/۱۳ و ۷/۴۱ درصد فشار متوسط شبکه را نسبت به کمترین هزینه آن در این پژوهش (نقطه A)، افزایش داد. همچنین پاسخ منتخب C در شبکه پهنه D شهر مشهد با افزایش ۴/۲۳ درصدی فشار متوسط شبکه نسبت به طراحی اولیه شرکت مشاور (نقطه D) نشان داد گزینه طراحی شده توسط شرکت مشاور به‌عنوان پاسخی مغلوب در زیر جبهه پارتوی نهایی این پژوهش قرار می‌گیرد. در این پژوهش شاخص تاب‌آوری تودینی با تکیه بر افزایش فشار گرهی توانایی خود را در جهت بالا بردن اطمینان‌پذیری شبکه نشان داد که این امر موجب می‌شود شبکه در شرایط بحرانی و یا شکست لوله‌ها، با ضریب اطمینان بالایی قادر به تأمین فشار و دبی مناسب در سایر نقاط باشد. همچنین عملکرد رضایت بخش الگوریتم چند هدفه SPEA2 در ارائه جبهه پارتوی بهینه برای مسائل مورد نظر نشان داد که از الگوی طراحی توسعه داده شده در این پژوهش می‌توان به‌منظور ارائه یک مجموعه جواب بهینه به کارفرما، برای انتخاب نقاطی که در آن‌ها هر دو عامل هزینه و اطمینان‌پذیری توأمان در شرایط مطلوبی هستند، استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: اطمینان‌پذیری شبکه، جبهه پارتو، شبکه توزیع آب، بهینه‌سازی چند هدفه

۱- مقدمه

در بهره‌برداری آب، دو نوع اطمینان‌پذیری مکانیکی و اطمینان‌پذیری هیدرولیکی مورد توجه است. اطمینان‌پذیری مکانیکی به توانایی بهره‌برداری از تجهیزات مربوط می‌شود. اطمینان‌پذیری هیدرولیکی به تأمین پیوسته کمیّت مشخصی از آب با فشارهای مورد نیاز و در زمان و مکان مورد نظر مربوط می‌شود. اطمینان‌پذیری هیدرولیکی به‌صورت توانایی سامانه در تأمین خدمات با سطح قابل قبولی از شکست، با وجود شرایط غیر نرمال تعریف می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که اطمینان‌پذیری

dx.doi.org/10.22093/wwj. 2019.152398.2763

مکانیکی باید صریحاً در تعیین اطمینان‌پذیری هیدرولیکی در نظر گرفته شود. بنابراین ارزیابی اطمینان‌پذیری یک سامانه توزیع آب باید بر اساس مقدار آب تحویل داده شده، فشار باقیمانده‌ای که در آن فشار آب تحویل داده می‌شود، زمانی که آب باید تحویل داده شود و مکانی از سامانه که آب باید به آن تحویل داده شود، صورت گیرد. هنگام توصیف اطمینان‌پذیری مکانیکی تجهیزات بهره‌برداری، تا حدودی شکست دارای ابهام بیشتری نسبت به وقتی است که در مورد عملکرد هیدرولیکی بحث می‌شود. بهترین رویکرد ممکن است بر اساس تعریف شکست در معیار عملکرد باشد. بنابراین شکست هیدرولیکی[1] زمانی رخ می‌دهد که سامانه نتواند مقدار معینی آب را در مکان مشخص، در زمان معلوم و با فشار معین تأمین کند.

برخی از پژوهشگران با استفاده از روش‌های حل چندهدفه و با به‌کارگیری تعاریفی از اطمینان‌پذیری به‌صورت شاخص‌های قطعی، به طراحی شبکه‌های آبرسانی پرداخته‌اند.

تودینی در سال ۲۰۰۰ ادعا کرد که در صورت طراحی شبکه‌های آبرسانی بر مبنای ارضای دقیق (نه بیشتر و نه کمتر) قیودات دبی و فشار گره‌ها، در هنگام بروز نارسایی (مانند شکست یکی از لوله‌ها) به‌علت ایجاد افت اضافی، شبکه قادر به تحویل دبی و فشار کافی به مصرف کننده نخواهد بود. بنابراین، اگر گره‌ها دارای توان و انرژی بیشتری از مقدار حداقل مورد نیاز باشند، احتمال عملکرد مناسب شبکه در شرایط بروز نارسایی افزایش خواهد یافت. وی این انرژی اضافی را به‌عنوان یک شاخص اندازه‌گیری برای انعطاف‌پذیری در شبکه در نظر گرفت. تودینی شاخص تاب‌آوری را به‌عنوان جانشینی برای اطمینان‌پذیری پیشنهاد نمود (Todini, 2000).

شاخص تاب‌آوری تودینی یکی از پر کاربردترین شاخص‌های اطمینان‌پذیری در زمینه شبکه‌های توزیع آب است. اگر در یک سامانه شکستی رخ دهد، رژیم جریان در شبکه تغییر می‌کند و در نتیجه افت افزایش می‌یابد و شبکه لزوماً انرژی بیشتری را مصرف خواهد کرد. بنابراین اگر سیستم دارای فشار مازاد در گره‌ها باشد می‌تواند شکست رخداده را تحمل کند و حداقل هد موردنیاز گره‌ها را تأمین نماید. اما طراحی از دیدگاه تأمین حداقل فشار مورد نیاز، به طراح اجازه می‌دهد تا کوچک‌ترین و ارزان‌ترین قطرهای ممکن را برای لوله‌ها استفاده کند و از این رو طراحی شبکه ارزان‌تر سبب ایجاد حداقل هد مازاد در گره‌های مصرف کننده می‌شود. از طرف دیگر، فشار مازاد در گره‌ها مستلزم استفاده از لوله‌های بزرگ‌تر است که هزینه بیشتری را به دنبال دارد.

در پژوهشی در سال ۲۰۱۳ به بررسی بهینه‌سازی دو هدفه شبکه توزیع آب به‌وسیله الگوریتم ژنتیک[2] و شاخص تاب‌آوری تودینی پرداخته شد. در این پژوهش با ایجاد یک تغییر در الگوریتم ژنتیک و مرتب‌سازی نامغلوب، عملکرد این روش در طراحی دو هدفه سیستم‌های توزیع آب بهبود یافت. راه حل‌هایی با کمترین هزینه و بیشترین تاب‌آوری تحت سناریوهای شکست شبکه و افزایش نیاز مصرف‌کنندگان، از لحاظ تأمین کمینه فشار مجاز گره‌ها، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که راه حل‌های دارای بیشترین تاب‌آوری، ضمن ایجاد هد مازاد در گره‌ها، تحت شرایط بحرانی کارایی بیشتری نیز دارند (Ostfeld et al., 2013).

در پژوهشی در سال ۲۰۱۷ به بررسی مدلی برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب به‌وسیله الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) پرداخته شد. همچنین فشار و سرعت آب در لوله‌های شبکه با استفاده از شبیه‌ساز هیدرولیکی Epanet 2.0 محاسبه شدند. مدل توسعه یافته در این پژوهش نشان داد با بررسی فشار در گره‌ها، تلفات هد و سرعت آب در لوله‌ها می‌توان تعادلی برای شبکه ایجاد نمود. نتایج نشان داد مدل حاصل هزینه شبکه را به مقدار ۲۶ درصد نسبت به هزینه اولیه کاهش می‌دهد و اختلالی در تأمین فشار گره‌ها ایجاد نمی‌شود (Surco et al., 2018).

در پژوهشی در سال ۲۰۱۷ یک رویکرد جدید برای افزایش کارایی روش‌های اکتشافی برای طراحی بهینه سیستم‌های توزیع آب ارائه شد. این رویکرد بر پایه کاهش فضای جستجو استوار است که برای انتخاب هر لوله از شبکه تعریف می‌شود. این روش با یک الگوریتم ژنتیک توسعه داده شد و بر روی چندین شبکه توزیع آب شاخص مورد بررسی قرار گرفت. در انتها نتایج نشان داد این مدل توسعه یافته بسیار سریع‌تر و دقیق‌تر از سایر روش‌ها، مسئله را به سمت پاسخ‌های بهینه سوق می‌دهد(Reca et al., 2017).

هدف از این پژوهش، تدوین و توسعه مدلی دقیق، سریع و مطمئن از لحاظ هیدرولیکی برای طراحی و بهینه‌سازی شبکه‌های

[1] Hydraulic Failure

[2] Genetic Algorithm (GA)

توزیع آب شهری است. در اکثر پژوهش‌های گذشته با بررسی شاخص‌های اطمینان‌پذیری مختلف، سعی در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شده است و مدل‌ها بر روی شبکه‌های فرضی و یا کوچک‌مقیاس تست و نتایج به کل تعمیم شده است. اما در این پژوهش در ابتدا برای مقایسه پاسخ‌های تولید شده با سایر مطالعات و صحت‌سنجی مدل توسعه داده شده، به بررسی سه شبکه شاخص از مطالعات پیشین پرداخته شد و در ادامه، بررسی یک شبکه واقعی در شهر مشهد با شرایط واقعی و محدودیت‌های هیدرولیکی ایران انجام شد. از نکات حائز اهمیت در این پژوهش می‌توان به تشریح کامل بهینه‌سازی دوهدفه شبکه‌های توزیع آب شهری و اتصال مدل هیدرولیکی به یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جبهه پارتو اشاره کرد که این موضوع در نوع خود به‌عنوان نوآوری در پژوهش‌های داخلی محسوب می‌شود. این روش با حفظ شرایط اولیه شبکه توزیع آب شهری (تأمین تقاضای هر گره به‌طور دقیق) با رعایت قوانین هیدرولیکی حاکم بر شبکه و ارائه دامنه وسیعی از قطرهای تجاری برای هریک از لوله‌ها، عملاً گزینه‌های مختلف طراحی را در کمترین زمان ممکن تست می‌کند و یک جبهه نامغلوب از پاسخ‌های بهینه در راستای حفظ هر دو هدف اصلی شبکه (هزینه و اطمینان‌پذیری) که در واقعیت در تضاد باهم هستند را ارائه می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

تابع هدف اول شامل کمینه کردن هزینه، با انتخاب قطر لوله‌ها به‌عنوان متغیر تصمیم محاسبه می‌شود. معادله ۱ تابع هدف کمینه‌سازی هزینه را نشان می‌دهد

$$\text{minimize } F_{obj} = \sum_{i=1}^{npipe} C_i(D_i) \times L_i \qquad (۱)$$

که در این معادله

F_{obj} بیانگر جمع هزینه بر روی تمام لوله‌هایی است که دارای شاخص i هستند، $C_i(D_i)$ هزینه در واحد طول برای لوله‌ای به قطر D_i، L_i طول لوله i و npipe تعداد لوله‌ها در سامانه است.

قیود حاکم بر مسئله به شرح زیر است:

طبق معادله ۲ برای هر گره قانون پیوستگی باید برقرار باشد

$$\sum Q_j^{in} - \sum Q_j^{out} = d_j \qquad (۲)$$

که در این معادله

Q_j^{in} و Q_j^{out} به‌ترتیب جریان ورودی و خروجی به گره می‌باشند و d_j جریان مصرفی یا تقاضا در هر گره است.

در هر حلقه از شبکه قانون بقای انرژی می‌تواند به شکل زیر نوشته شود

$$\sum k \in loopl, \Delta H_k = 0, \forall l \in NL \qquad (۳)$$

که در این معادله

ΔH_k افت فشار در لوله k، NL تعداد کل حلقه‌ها در سامانه و l معرف هر حلقه است. افت فشار در هر لوله تفاوت هد بین گره‌های متصل به همدیگر است و با استفاده از معادله هیزن-ویلیامز محاسبه می‌شود

$$\Delta H_k = H_{1,k} - H_{2,k} = \omega \frac{L_k}{C_k^{\alpha} D_k^{\beta}} Q_k^{\alpha}, \forall k \in npipe \qquad (۴)$$

که در این معادله

$H_{1,k}$ و $H_{2,k}$ هد در دو انتهای لوله k، ω ثابت تبدیل واحدهای معادله که بستگی به واحدها دارد، C_k^{α} ضریب زبری لوله k که وابسته به جنس لوله است و α و β ضرایب رگرسیون می‌باشند. با توجه به اینکه برای حل معادله مربوط به برقراری این قید از نرم‌افزار EPANET 2.0 استفاده شده است، مقدار ω برابر ۱۰/۶۶۷ و α و β به‌ترتیب ۱/۸۵۲ و ۴/۸۷۱ می‌باشند.

همچنین برای هر گره در شبکه باید معادله ۵ برقرار باشد

$$H_j^{min} \le H_j \le H_j^{max}, j = 1,.....ND \qquad (۵)$$

که در این معادله

H_j هد فشار در گره j، H_j^{min} و H_j^{max} به‌ترتیب کمینه و بیشینه فشار مورد نیاز در گره j و ND تعداد گره‌های مصرفی موجود در شبکه است.

همچنین برای محاسبه محدوده سرعت مجاز در لوله‌های شبکه از معادله ۶ استفاده می‌شود

dx.doi.org/10.22093/wwj. 2019.152398.2763

$$V_k^{min} \le V_k \le V_k^{max} \quad (۶)$$

که در این معادله

V_k سرعت در لوله k، V_k^{min} و V_k^{max} به‌ترتیب کمینه و بیشینه سرعت در هر لوله k و NP تعداد لوله‌های موجود در شبکه است. قطر هر لوله باید متعلق به مجموعه قطرهای تجاری موجود باشد که معادله ۷ نشان دهنده این قید مسئله می‌باشد

$$D_k \in \{D\}, \forall k \in npipe \quad (۷)$$

که D_k قطر لوله k و D مجموعه قطرهای تجاری موجود است.

در این پژوهش از تعریف شاخص تاب‌آوری تودینی به‌عنوان شاخص جایگزین اطمینان‌پذیری شبکه استفاده شد. تاب‌آوری فاکتوری قطعی است که بیانگر توانمندی شبکه در تأمین دبی گره‌ها در مواقع شکست است. تابع هدف دوم به‌صورت بیشینه‌سازی شاخص تاب‌آوری تودینی طبق معادله ۸ تعریف می‌شود

$$RI = \frac{\sum_j^N q_j(ha_j - hr_j)}{(\sum_{r=1}^R Q_r H_r + \sum_b^B \frac{P_b}{\gamma}) - \sum_{j=1}^N q_j hr_j} \quad (۸)$$

که در این معادله

N تعداد گره‌های تقاضا، q_j دبی تقاضا (برداشتی یا مصرفی) در گره j، ha_j هد موجود و قابل دسترس در گره j، hr_j مینیمم هد مجاز برای گره j، R تعداد مخازن، Q_r دبی مخزن r هنگام تغذیه شبکه، H_r هد مخزن r، B تعداد پمپ موجود در شبکه، P_b انرژی تولید شده توسط پمپ b و γ وزن مخصوص آب است.

لازم به ذکر است این شاخص در سال ۲۰۱۶ مورد بازبینی قرار گرفت (Creaco et al., 2016) و با تکیه بر رویکرد مبتنی بر فشار، مقادیر شاخص دستخوش تغییراتی جزیی از قبیل اعمال تأثیر فشار گرهی بر دبی تقاضای آن گره و تأثیر نشت در شبکه قرار گرفت و تعریف جامع‌تری از آن ارائه شد. اما در این پژوهش به‌دلیل ساده‌سازی مسئله و در نظر نگرفتن تأثیر نشت بر دبی تقاضای گرهی و مستقل بودن تأمین دبی تقاضا از فشار گرهی، تعریف قدیمی تودینی مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۱- نسخه دوم الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو[1] (SPEA2)

این روش همانند روش‌های مشابه علاوه بر جمعیت جواب‌ها از جمعیت دیگری برای حفظ جواب‌های بهینه در طول نسل‌های الگوریتم استفاده می‌کند(Zitzler et al., 2001). در ادامه گام‌های الگوریتم SPEA2 بیان می‌شود؛ حلقه اصلی این الگوریتم شامل ورودی: تعداد جمعیت N، اندازه آرشیو $\bar{N}$، تکرار T و خروجی: مجموعه نامغلوب A است.

گام ۱) آماده‌سازی: تولید جمعیت اولیه P_0 و جمعیت آرشیو خالی ($\bar{P}_0 = \emptyset$) و قراردادن $t = 0$.

گام ۲) محاسبه برازندگی: محاسبه مقدار برازندگی اعضا در مجموعه P_t و $\bar{P}_t$.

گام ۳) انتخاب: انتقال اعضای نامغلوب P_t و $\bar{P}_t$ به $\bar{P}_{t+1}$. اگر تعداد اعضای نامغلوب $\bar{P}_{t+1}$ از $\bar{N}$ بیشتر شود، آنگاه با استفاده از عملگرهای حذف، تعداد اضافی اعضا می‌شوند و اگر اندازه $\bar{P}_{t+1}$ کمتر از $\bar{N}$ باشد، آنگاه کمبود تعداد اعضا در $\bar{N}$ با اعضای مغلوب شده در P_t و $\bar{P}_t$ جبران می‌شود.

گام ۴) شرایط خاتمه: درصورتی که شرایط توقف محقق شود، آنگاه معرفی اعضای نامغلوب $\bar{P}_{t+1}$ به‌عنوان پاسخ‌های نهایی.

گام ۵) انتخاب مسابقه‌ای: استفاده از انتخاب مسابقه‌ای، جهت انتخاب والدین از مجموعه $\bar{P}_{t+1}$.

گام ۶) متنوع‌سازی: استفاده از عملگرهای ترکیب و جهش بر روی والدین به‌منظور ایجاد مجموعه P_{t+1}.

افزایش یک واحد به شمارنده t ($t = t + 1$) و رفتن به گام ۲ (شکل ۱).

۲-۲- مدل هیدرولیکی EPANET

در ابتدا پس از پیاده‌سازی شبکه مورد نظر در نرم‌افزار EPANET 2.0 از آن یک خروجی با محتوای فایل شبکه گرفته شد و در محیط متلب[2] فراخوانی شد. با اجرای دستورات خاص در محیط برنامه متلب، مدل هیدرولیکی فراخوانی شد و فایل شبکه مورد نظر در آن

[1] Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2
[2] MATLAB

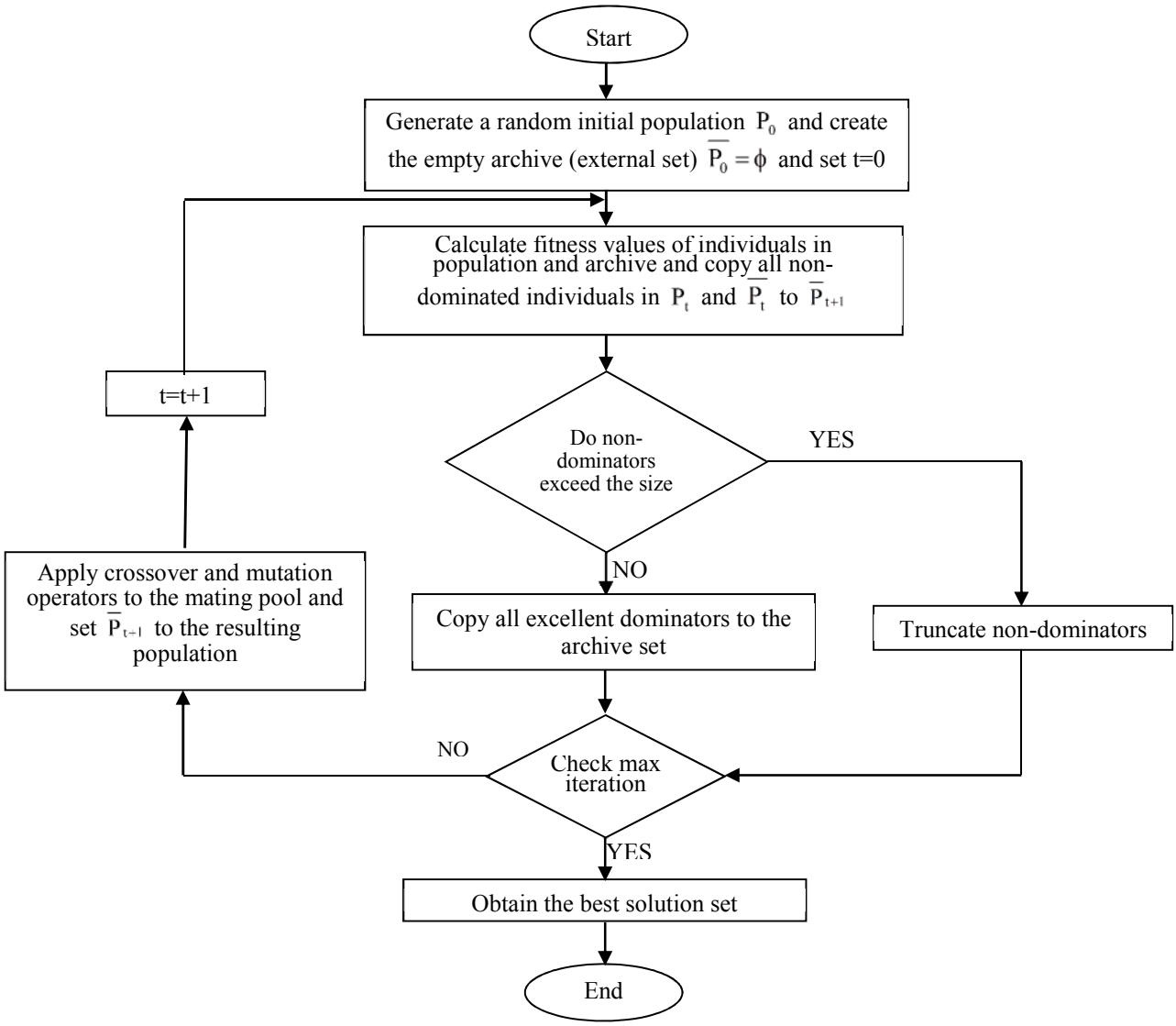


Fig. 1. Overall flowchart of improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA2)

شکل ۱- فلوچارت مراحل اجرای نسخه تکامل یافته الگوریتم فراکاوشی مبتنی بر قوت پارتو (SPEA2)

اجرا شد. در ادامه با برنامه‌نویسی الگوریتم SPEA2 در محیط متلب و ایجاد ارتباط بین مدل هیدرولیکی و کد الگوریتم، مراحل انجام کار به‌طور دقیق اجرا شد. الگوریتم پس از هر تکرار تمامی پاسخ‌های حاصل را در مدل هیدرولیکی اجرا می‌کند و پس از محاسبه مقادیر توابع هدف به مرحله بعدی می‌رود.

۳- نتایج و بحث

در ابتدا روش پیشنهادی مورد نظر با استفاده از توابع هدف تعریف شده برای طراحی و بهینه‌سازی، شبکه‌های مرجع و شناخته شده دوحلقه‌ای[1]، کادو[2] و هانوی[3] مورد آزمون قرار گرفت. سپس در ادامه به بررسی و بهینه‌سازی شبکه واقعی پهنه D شهر مشهد پرداخته شد که نتایج آن در هر بخش به‌صورت جداگانه ارائه می‌شود.

۳-۱- شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای

این شبکه ساده و بدون پمپ و تانک ذخیره است و شمای کلی آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود (Alperovits and Shamir, 1977). این شبکه دارای دوحلقه است که از ۷ گره و ۸ لوله تشکیل شده

[1] Two-Loop
[2] Kadu
[3] Hanoi

dx.doi.org/10.22093/wwj. 2019.152398.2763

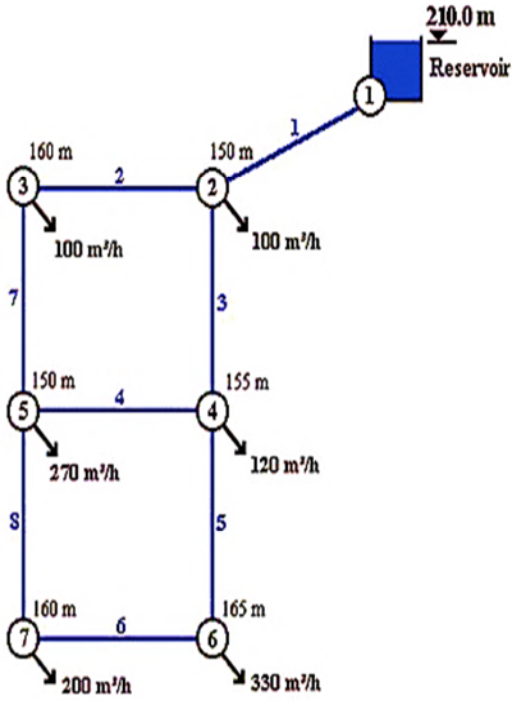


Fig. 2. Two-loop water distribution network

شکل۲- شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای

است و از یک مخزن با هد ثابت ۲۱۰ متر تغذیه می‌شود. طول همه لوله‌های به‌کار رفته در شبکه با هم برابر بود و معادل ۱۰۰۰ متر هستند. ضریب هیزن- ویلیامز برای محاسبه افت تمامی لوله‌ها برابر ۱۳۰ و ضریب ω نیز برابر ۱۰/۶۷۴۴ (برابر ضریب ω به کار رفته در نرم‌افزار EPANET 2.0) فرض شده‌اند. همچنین حداقل و حداکثر سرعت مجاز در لوله‌ها بین ۰/۲ تا ۲/۵ متر در ثانیه در نظر گرفته شده است.

مقدار دبی مورد نیاز هر گره معلوم بوده و میزان کمینه و بیشینه فشار مجاز در هر گره نیز به‌ترتیب برابر ۳۰ و ۶۰ متر آب فرض گردید. مصارف و ارتفاع گره‌ها در جدول ۱ آورده شده است. همچنین ۱۴ قطر تجاری برای طراحی شبکه معرفی شده‌اند که به همراه هزینه در واحد طول آن‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

برای طراحی این شبکه از الگوریتم SPEA2، ۱۰ اجرای جداگانه گرفته شد سپس با ترکیب این ۱۰ پارتو و حذف جواب‌های مغلوب، جبهه پارتوی نهایی به دست آمد که در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

نقاط موجود در دو سر پارتوی شکل ۳ (نقاط A و B)، از طراحی تک هدفه شبکه دو حلقه‌ای با هر یک از توابع هدف و با استفاده از الگوریتم SPEA2 به دست می‌آیند. از طرف دیگر همان طور که مشاهده می‌شود الگوریتم چند هدفه SPEA2 نیز توانسته است به خوبی ناحیه بین این دو نقطه مرزی را پوشش دهد که این نشان از توانایی الگوریتم و همچنین انتخاب مناسب پارامترهای آن دارد. ملاحظه می‌شود که با افزایش هزینه، مقدار شاخص تودینی افزایش می یابد. اما هدف از طراحی چند هدفه یک شبکه آبرسانی، دسترسی به طراحی‌ای است که از نظر هر دو تابع هدف، وضعیت نسبتاً بهینه‌ای داشته باشد. بنابراین باید بتوان با روشی یکی از نقاط موجود در پارتو را انتخاب نمود و آن را به‌عنوان نتیجه نهایی

جدول ۱- مشخصات گره‌ها برای شبکه دوحلقه‌ای

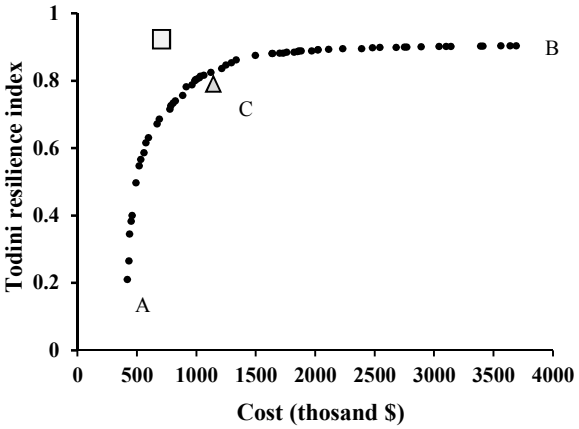
Table 1. Node details of two-loop network

Node number	2	3	4	5	6	7	1 (Reservoir)
Elevation (m)	150	160	155	150	165	160	210
Discharge(m^3/h)	100	100	120	270	330	200	-1120

جدول ۲- اندازه و هزینه لوله‌های قابل انتخاب برای شبکه دوحلقه‌ای

Table 2. Available pipe sizes and their unit costs for two-loop network

Pipe number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Diameter (inch)	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Cost ($/m)	2	5	8	11	16	23	32	50	60	90	130	170	300	550



شکل ۳- جبهه پارتوی حاصل از بهینه‌سازی شبکه دوحلقه‌ای

Fig. 3. Pareto front of two-loop network optimization

طراحی دو هدفه این شبکه معرفی کرد. برای این منظور مدل‌های حل اختلاف مختلفی وجود دارد که در این پژوهش از مدل حل اختلاف Young استفاده شد (Young, 1993). در این روش به هر یک از توابع هدف، تابع مطلوبیتی برازش داده می‌شود و با استفاده از بیشینه‌سازی یک رابطه ریاضی بر مبنای شیب نقاط مختلف پارتو، نقطه مطلوب انتخاب می‌شود.

با استفاده از این روش، نقطه C که با علامت مثلث در شکل ۳ مشخص شده است، انتخاب می‌شود. اگر طراحی به‌دست آمده با تابع هدف کمینه کردن هزینه (نقطه پایینی پارتو) A، طراحی به‌دست آمده با تابع هدف بیشینه کردن شاخص تودینی (نقطه بالایی پارتو) B و نقطه انتخاب شده با مدل Young، C باشد، قطر لوله‌ها، فشار گره‌ها و همچنین شاخص تودینی آن‌ها به‌صورت جدول‌های ۳ و ۴ است.

همچنین مقادیر مربوط به هزینه و شاخص تودینی برای این سه پاسخ نیز در این جدول‌ها آورده شده است. با مقایسه مقادیر مذکور، می‌توان گفت که شبکه C با هزینه‌ای در حدود ۲/۵ برابر شبکه A می‌تواند به اطمینان‌پذیری حدود ۴ برابر آن دست یابد. همچنین با انجام مقایسه مشابه با نقطه B می‌توان گفت که طراحی C با صرف هزینه‌ای در حدود ۰/۳۳ هزینه شبکه B می‌تواند حدود ۸۰ درصد از اطمینان‌پذیری این شبکه را تأمین کند.

اما واضح است که مطلوب‌ترین نقطه ممکن در بین نقاط موجود بر روی جبهه پارتو، نقطه‌ای است که از نظر هر دو تابع هدف به مقادیر بهینه تک هدفه آن‌ها رسیده باشد. به این معنا که مطلوب‌ترین طراحی ممکن برای شبکه دو حلقه‌ای، شبکه‌ای با هزینه ساخت ۴۱۹.۰۰۰ دلار و شاخص تودینی معادل ۰/۹۰۳۶ است. این یک شبکه فرضی است اما نمایش آن با نماد مربع در شکل ۳ به ارزیابی عملکرد الگوریتم SPEA2 در یافتن یک پارتوی مناسب کمک می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود پارتوی به‌دست آمده با استفاده از الگوریتم SPEA2 دارای تحدب مناسبی به سمت مربع نمایش داده شده در شکل ۳ است. به این معنا که برخی از نقاط موجود در روی منحنی توانسته‌اند تا حد نسبتاً مطلوبی خود را به این نقطه بهینه فرضی نزدیک کنند و مشاهده می‌شود که نقطه انتخاب شده C نیز در همین محدوده قرار دارد.

فشار متوسط شبکه در نقاط A و B و C به‌ترتیب برابر ۳۶/۹۹، ۴۶/۱۶ و ۴۵/۴۷ است. همانگونه که ملاحظه می‌شود پاسخ C نسبت به نقطه A توانسته است با افزایش تقریباً ۲۲/۹۱ درصدی فشار متوسط شبکه، میزان تاب‌آوری آن را به حد قابل قبولی افزایش دهد. همچنین با توجه به تفاوت اندک در فشار متوسط شبکه در نقاط C و B، می‌توان گفت پاسخ B علی‌رغم افزایش هزینه در شبکه نتوانسته است تغییر ملموسی در افزایش متوسط فشار گرهی شبکه نسبت به نقطه C ایجاد نماید.

۳-۲- شبکه توزیع آب هانوی

مثال دوم مربوط است به شبکه آبرسانی شهر هانوی در کشور ویتنام که در شکل ۴ شمای کلی آن مشاهده می‌شود. این شبکه اولین بار

جدول ۳- مقادیر قطر لوله‌ها برای نقاط A، B و C

Table 3. Pipe diameter for A, B and C solutions

Pipe number	1	2	3	4	5	6	7	8	Cost ($)
Solution A	18	10	16	4	16	10	10	1	419,000
Solution B	18	24	24	24	24	24	24	24	3,980,000
Solution C	18	20	20	14	18	18	20	18	1,090,000

dx.doi.org/10.22093/wwj. 2019.152398.2763

جدول ۴- مقادیر فشار گره‌ها و شاخص تودینی برای نقاط A، B و C

Table 4. Nodal pressures and Todini's resilience index for A, B and C solutions

Pipe number	2	3	4	5	6	7	Todini's Resilience Index
Solution A	53.25	30.46	43.45	33.81	30.44	30.55	0.2103
Solution B	53.25	42.93	47.78	52.74	37.64	42.64	0.9036
Solution C	53.25	42.41	47.19	51.88	36.55	41.55	0.7997

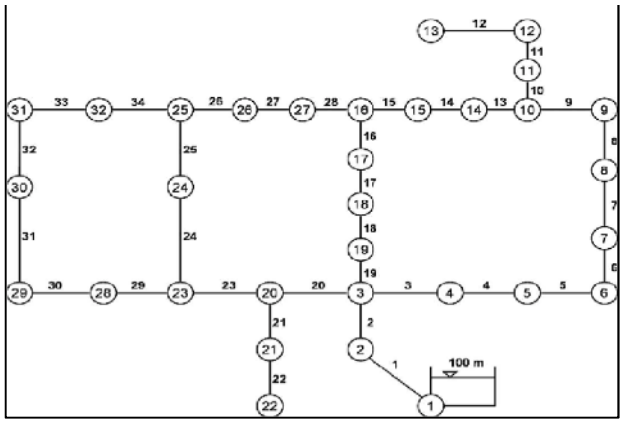


Fig. 4. Hanoi water distribution network

شکل ۴- شبکه توزیع آب هانوی

توسط (Fujiwara and Khang, 1990) مورد بررسی قرار گرفت. شبکه هانوی دارای ۳۲ گره با تراز ارتفاعی صفر، ۳۴ لوله و یک مخزن در ارتفاع ۱۰۰ متری است که برای تأمین فشار از هیچ پمپی استفاده نمی‌کند. همچنین میزان کمینه و بیشینه فشار مجاز در هر گره به‌ترتیب برابر ۳۰ و ۶۰ متر آب است. به‌علاوه ضریب هیزن-ویلیامز برای محاسبه افت تمامی لوله‌ها برابر ۱۳۰ و ضریب ω نیز برابر ۱۰/۵۰۸۸ در نظر گرفته شده است. همچنین حداقل و حداکثر سرعت مجاز در لوله‌ها بین ۰/۲ تا ۲/۵ متر در ثانیه در نظر گرفته شده است. مشخصات گره‌ها و لوله‌های شبکه توزیع آب هانوی در جدول ۵ به تفکیک آورده شده است.

شش قطر تجاری برای طراحی شبکه معرفی شده‌اند که به همراه هزینه در واحد طول آن‌ها در جدول ۶ ارائه شده‌اند.

در این قسمت نیز از الگوریتم SPEA2 به‌طور متوالی ۱۰ اجرای جداگانه گرفته شد. سپس با ترکیب این ۱۰ پارتو و حذف جواب‌های مغلوب، پارتوی نهایی به‌دست آمد که در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

نقاط مرزی موجود در پارتوی شکل ۵ همان طراحی‌های به‌دست آمده از کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی شاخص تودینی هستند. هزینه طراحی نقطه A معادل ۶،۰۰۰،۴۴۴ دلار و مقدار شاخص آن برابر ۰/۱۷۲۳ بوده و در مورد نقطه B نیز مقادیر مذکور به‌ترتیب برابر ۱۰،۱۹۱،۵۹۷ دلار و ۰/۳۵۳۴ می‌باشند. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود الگوریتم SPEA2 توانسته است به خوبی ناحیه بین دو نقطه مرزی را پوشش دهد که این نشان از توانایی این الگوریتم و همچنین انتخاب مناسب پارامترهای آن دارد. در این قسمت نیز با استفاده از روش Young، یکی از نقاط موجود در پارتوی بالا انتخاب گردید که این نقطه با علامت مثلث در شکل ۵ مشخص شده است (نقطه C). مقادیر هزینه طراحی و شاخص تودینی برای این نقطه به‌ترتیب برابر ۷،۲۴۴،۴۷۹ دلار و ۰/۳۱۱۹ می‌باشند. نقطه C با هزینه‌ای در حدود ۱/۲ هزینه نقطه A قادر است اطمینان‌پذیری در شبکه هانوی را تقریباً دو برابر کند. در مقایسه با نقطه B نیز نقطه انتخاب شده با صرف ۰/۷ هزینه این نقطه می‌تواند در حدود ۸۰ درصد اطمینان‌پذیری آن را تأمین کند. مقادیر قطر لوله‌های شبکه انتخاب شده نقطه C در جدول ۷ و فشار گره‌ها و شاخص تودینی نیز در جدول ۸ مشاهده می‌شود.

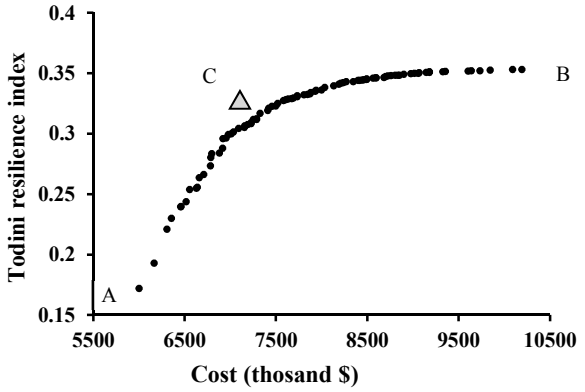


Fig. 5. Pareto front of Hanoi network optimization

شکل۵- جبهه پارتوی حاصل از بهینه‌سازی شبکه هانوی

جدول ۵- مشخصات گره‌ها و لوله‌های شبکه هانوی

Table 5. Node and link details of Hanoi network

Pipe number	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**
Pipe length	100	1350	900	1150	1450	450	850	850	800	950	1200	3500	800	500	550	2730	1750
Pipe number	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**
Pipe length	800	400	2200	1500	500	2650	1230	1300	850	300	850	1500	2000	1600	150	860	950
Node number	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**
Discharge (m^3/h)	-19940	890	850	130	725	1005	1350	550	525	525	500	560	940	615	280	310	865
Node number	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**			
Discharge (m^3/h)	60	1275	930	485	1045	820	170	900	370	290	360	360	105	805			

جدول ۶- اندازه و هزینه لوله‌های قابل انتخاب برای شبکه هانوی

Table 6. Available pipe sizes and their unit costs for Hanoi network

Pipe number	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Diameter (inch)	12	16	20	24	30	40
Cost ($/m)	45.726	70.400	98.378	129.333	180.748	278.280

جدول ۷- قطر لوله‌های نقطه انتخاب شده از پارتوی طراحی شبکه هانوی (نقطه C)

Table 7. Pipe diameter of Hanoi network for C solutions

Pipe number	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**
Diameter (inch)	40	40	40	40	40	40	40	40	30	40	40	24	16	12	12	24	24
Pipe number	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**
Diameter (inch)	24	30	40	20	20	40	40	40	20	20	24	20	20	12	16	16	40

جدول ۸- فشار گره‌ها برای نقطه انتخاب شده از پارتوی طراحی شبکه هانوی (نقطه C)

Table 8. Nodal pressure of Hanoi network for C solutions

Node number		**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**
Pressure (m)		97.21	62.55	58.56	53.63	48.51	47.35	46.04	45.04	42.16	41.78	41.51	37.39	39.5	39.57	42.26
Node number	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**
Pressure (m)	45.41	52.23	61.01	52.19	43.06	42.64	46.62	45.47	44.77	42.16	42.15	44.18	42.99	42.8	42.97	44.61

dx.doi.org/10.22093/wwj. 2019.152398.2763

فشار متوسط شبکه در نقاط A و B و C به‌ترتیب برابر ۴۰/۷۱، ۴۸/۲۳ و ۴۷/۶۹ می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌شود پاسخ C نسبت به نقطه A توانسته است با افزایش تقریباً ۱۷/۱۳ درصدی فشار متوسط شبکه، میزان تاب‌آوری آن را به حد قابل قبولی افزایش دهد. همچنین با توجه به تفاوت اندک در فشار متوسط شبکه در نقاط C و B، می‌توان گفت پاسخ B علی‌رغم افزایش هزینه در شبکه نتوانسته است تغییر ملموسی در افزایش متوسط فشار گرهی شبکه نسبت به نقطه C ایجاد نماید.

۳-۳- شبکه توزیع آب کادو

سامانه توزیع آب کادو با دو مخزن، ۲۶ گره، ۳۴ لوله و ۹ حلقه در شکل ۶ نشان داده شده است که در ابتدا توسط کادو و همکاران(Kadu et al., 2008) معرفی و بهینه شد. تراز ارتفاعی برای گره‌های شبکه برابر صفر بوده و دو مخزن با هدهای ۱۰۰ و ۹۵ متر شبکه را به‌ترتیب از طریق گره‌های ۱ و ۲ تغذیه می‌کنند. شماره گره‌ها، لوله‌ها و دبی مصرفی هر گره بر حسب متر مکعب در دقیقه در شکل نشان داده شده است و ضریب هیزن- ویلیامز برای تمامی لوله‌ها ۱۳۰ می‌باشد. سایر اطلاعات از قبیل لوله‌ها و مصرف گره‌ها در جدول ۹ ارائه شده است. در این شبکه حداقل فشار مجاز برای گره‌های شبکه متفاوت است. همچنین حداقل و حداکثر سرعت مجاز در لوله‌ها بین ۰/۲ تا ۲/۵ متر در ثانیه در نظر گرفته شده است.

مشخصات گره‌ها و لوله‌های شبکه توزیع آب کادو در جدول ۹ به تفکیک آورده شده است.

بهینه‌سازی دوهدفه شبکه توزیع آب کادو با استفاده از ۱۴ قطر تجاری قابل انتخاب پیشنهادی برای این شبکه که به همراه هزینه در

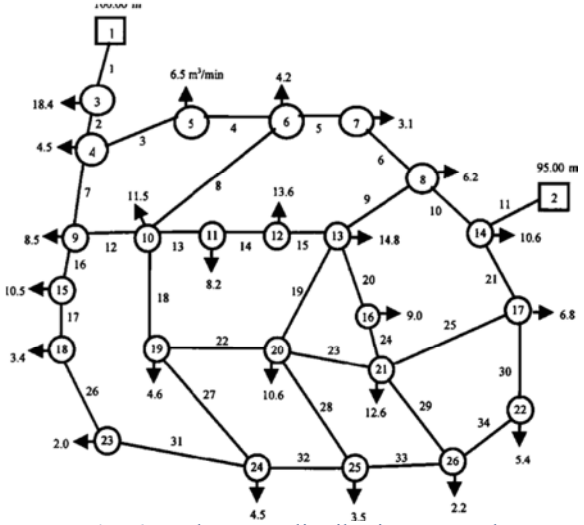


Fig. 6. Kadu water distribution network

شکل ۶- شبکه توزیع آب کادو

واحد طول آن‌ها در جدول ۱۰ آمده است، انجام شد. پس از ۱۰ اجرای جداگانه از الگوریتم SPEA2 با تلفیق جبهه‌های پارتوی حاصل و حذف پاسخ‌های مغلوب، جبهه پارتوی نهایی حاصل شد که در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

نقاط مرزی موجود در پارتوی شکل ۷ همان طراحی‌های به‌دست آمده از کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی شاخص تودینی هستند. هزینه طراحی نقطه A معادل ۱۳۱،۳۱۲،۸۱۵ روپیه و مقدار شاخص تودینی آن برابر ۰/۴۰۳۶ بوده و در مورد نقطه B نیز مقادیر مذکور به‌ترتیب برابر ۲۹۷،۹۱۶،۲۲۵ روپیه و ۰/۸۹۲۶ می‌باشند. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود الگوریتم SPEA2 توانسته است به‌خوبی ناحیه بین دو نقطه مرزی را پوشش دهد که این نشان از توانایی این الگوریتم و همچنین انتخاب مناسب پارامترهای آن دارد.

جدول ۹- مشخصات گره‌ها و لوله‌های شبکه کادو

Table 9. Node and link details of Kadu network

Pipe number	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Pipe length	300	820	940	730	1620	600	800	1400	1175
Pipe number	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**
Pipe length	750	210	700	310	500	1960	900	850	650
Pipe number	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**
Pipe length	760	1100	660	1170	980	670	1080	850	900
Pipe number	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**		
Pipe length	650	1540	730	1170	1650	1320	3250		

ادامه جدول ۹- مشخصات گره‌ها و لوله‌های شبکه کادو

Cont. table 9. Node and link details of Kadu network

Node number	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Discharge (L/s)	--	-	306.54	74.97	108.29	69.97	51.64
Node number	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
Discharge (L/s)	103.3	141.61	191.6	136.61	226.57	246.5	176.6
Node number	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**
Discharge (L/s)	175	150	113.3	56.64	76.63	176.6	209.9
Node number	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**		
Discharge (L/s)	90	33.32	75	58.31	36.65		

جدول ۱۰- اندازه و هزینه لوله‌های قابل انتخاب برای شبکه کادو

Table 10. Available pipe sizes and their unit costs for Kadu network

Pipe number	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
Diameter (mm)	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	750	800	900	1000
Cost (Rupees/m)	1115	1600	2154	2780	3475	4255	5172	6092	8189	10670	11874	13261	16151	19395

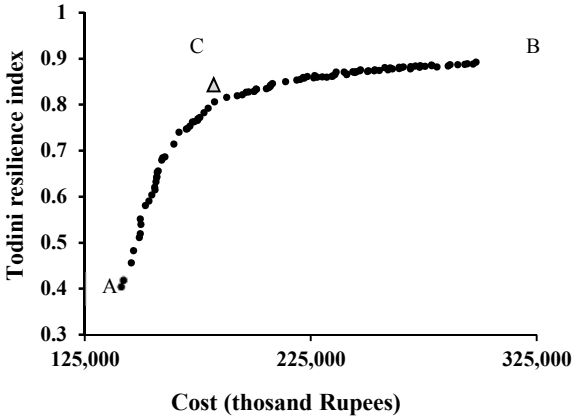


Fig. 7. Pareto front of Kadu network optimization

شکل ۷- جبهه پارتوی حاصل از بهینه‌سازی شبکه کادو

در این شبکه حداقل فشار مجاز برای هر گره به‌طور جداگانه در نظر گرفته شده است و محاسبات بر اساس آن انجام گرفته است. در این قسمت نیز با استفاده از روش Young، یکی از نقاط موجود در پارتوی بالا انتخاب شد که این نقطه با علامت مثلث در شکل ۷ مشخص شده است (نقطه C). مقدار هزینه طراحی و شاخص تودینی برای این نقطه به‌ترتیب برابر ۱۸۱،۲۳۲،۰۳۵ روپیه و ۰/۸۰۳۴ می‌باشند. نقطه C با هزینه‌ای در حدود ۱/۴ هزینه نقطه A قادر است اطمینان‌پذیری در شبکه کادو را تقریباً دو برابر کند.

در مقایسه با نقطه B نیز نقطه انتخاب شده با صرف ۰/۶ هزینه این نقطه می‌تواند در حدود ۹۰ درصد اطمینان‌پذیری آن را تأمین کند. به علاوه مقدار قطر لوله‌های شبکه انتخاب شده نقطه C در جدول ۱۱ و فشار گره‌ها و شاخص تودینی نیز در جدول ۱۲ مشاهده می‌شود.

فشار متوسط شبکه در نقاط A و B و C به‌ترتیب برابر ۸۶/۸۳، ۹۴/۱۱ و ۹۳/۲۷ می‌باشد. پاسخ C نسبت به نقطه A توانسته است با افزایش تقریباً ۷/۴۱ درصدی فشار متوسط شبکه، میزان تاب‌آوری آن را به حد قابل قبولی افزایش دهد. همچنین با توجه به تفاوت اندک در فشار متوسط شبکه در نقاط C و B، می‌توان گفت پاسخ B علی رغم افزایش هزینه در شبکه نتوانسته است تغییر ملموسی در افزایش متوسط فشار گرهی شبکه نسبت به نقطه C ایجاد نماید. لازم به ذکر است در این مسئله حداقل فشار مجاز برای هر یک از گره‌های شبکه تعریف شده بود که میانگین آن برابر ۸۲/۹۲ می‌باشد.

dx.doi.org/10.22093/wwj. 2019.152398.2763

۳-۴- شبکه توزیع آب پهنه D شهر مشهد

شهر مشهد از ۲۳ پهنه جهت مطالعات و آبرسانی سامانه توزیع آب تشکیل شده است. در این مطالعه از پهنه D شهر مشهد برای بهینه‌سازی سامانه توزیع آب استفاده شد. این سامانه شامل ۲۶۵ خط لوله اصلی به‌طول کلی ۳۸۱۶۱ متر و ۲۱۷ گره تقاضا است. یک منبع به ارتفاع آب ۱۰۸۷ متر، تغذیه کننده اصلی این سامانه می‌باشد. مساحت تحت پوشش این پهنه ۶۶۶ هکتار، حداقل ارتفاع ۱۰۲۴، حداکثر ارتفاع ۱۰۵۹، جمعیت سال ۱۳۹۵ تحت پوشش پهنه ۴۷۰۱۳ است. شکل ۸ جانمایی پهنه D را در نقشه پهنه‌بندی سامانه‌های توزیع آب شهر مشهد نشان می‌دهد. برای طراحی این شبکه از لوله‌های پلی‌اتیلن (PE-80) با ضریب هیزن-ویلیامز ۱۳۰ استفاده شده است. در جدول ۱۳ محدوده‌ای از قطرهای تجاری لوله‌های پلی‌اتیلن موجود در بازار که در طراحی شبکه‌های آبرسانی استفاده می‌شوند به همراه هزینه در واحد طول آن‌ها ارائه شده است.

جدول ۱۱- قطر لوله‌های نقطه انتخاب شده از پارتوی طراحی شبکه کادو (نقطه C)

Table 11. Pipe diameter of Kadu network for C solutions

Pipe number	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**
Diameter (mm)	1000	1000	600	600	200	300	900	450	900	1000	1000	750	800	600	350	500	500
Pipe number	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**
Diameter (mm)	300	600	150	800	150	200	600	750	600	150	400	250	600	350	200	200	150

جدول ۱۲- فشار گره‌ها برای نقطه انتخاب شده از پارتوی طراحی شبکه کادو (نقطه C)

Table 12. Nodal pressure of Kadu network for C solutions

Node number	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
Allowable pressure (m)	85	85	85	85	82	82	85	85	85	85	82	82
Computed pressure (m)	98.99	97.09	95.66	95.20	93.40	94.05	95.34	94.12	93.93	93.39	93.34	94.48
Node number	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**
Allowable pressure (m)	85	82	82	85	82	82	82	80	82	80	80	80
Computed pressure (m)	91.30	92.28	93.53	90.45	91.34	92.37	92.57	93.38	90.33	89.32	91.65	90.99

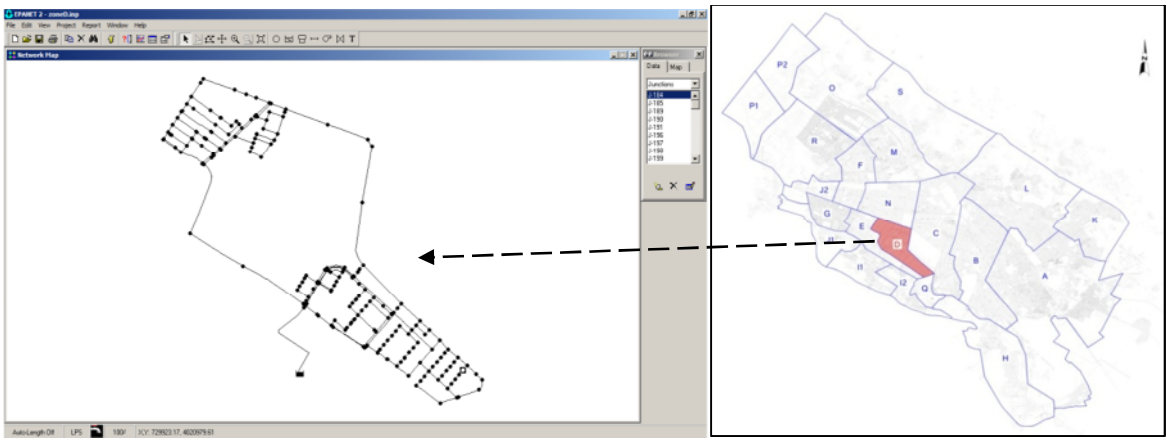


Fig. 8. D zone of Mashhad City water distribution network

شکل ۸- شبکه توزیع آب پهنه D شهر مشهد

جدول ۱۳- اندازه و هزینه لوله‌های قابل انتخاب برای شبکه پهنه D شهر مشهد

Table 13. Available pipe sizes and their unit costs for D zone network

Pipe number	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Diameter (mm)	63	75	90	110	125	140	160	200
Rial/m (Cost)	23436	34720	49560	73360	94360	118160	154000	239680
Pipe number	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	
Diameter (mm)	225	250	280	315	355	400	450	
Rial/m (Cost)	305200	375200	470400	593600	753200	954800	1209600	

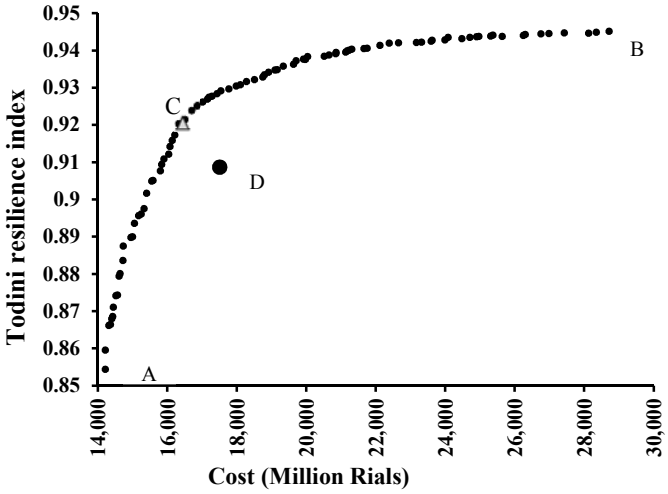


Fig. 9. Pareto front of D zone network optimization

شکل ۹- جبهه پارتوی حاصل از بهینه‌سازی شبکه پهنه D

پس از ۱۰ اجرای جداگانه برنامه نتایج به‌صورت جبهه پارتوی نهایی با حذف پاسخ‌های مغلوب در هر اجرا، در شکل ۹ نمایش داده شده است.

شکل ۹ متشکل از ۹۰ پاسخ نامغلوب منتخب از جبهه‌های پارتوی ۱۰ اجرا است که در آن گزینه طراحی شده توسط مشاور، نقطه D، در زیر جبهه پارتو به‌صورت جداگانه مشخص شده است.

همانطور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود پاسخ و یا گزینه طراحی شده توسط شرکت مشاور با هزینه‌ای معادل ۱۷،۵۰۰،۰۲۴،۳۲۷ ریال و شاخص تودینی ۰/۹۰۸۶ در زیر جبهه پارتوی نهایی قرار گرفته است و این امر نشانگر این موضوع است که پاسخ شرکت مشاور مغلوب بوده و از جمع پاسخ‌های بهینه پیشنهادی در این تحقیق حذف می‌شود. بر اساس نتایج حاصل و نمودار جبهه پارتوی نهایی می‌توان با قطعیت گفت که طراحی شرکت مشاور برای این شبکه مناسب نبوده و پاسخی بهینه محسوب نمی‌شود لذا طبق نمودار نهایی جبهه پارتو، پاسخ‌هایی در این برنامه تولید شده است که با همان هزینه طراحی شرکت مشاور قابلیت اطمینان‌پذیری بالاتری را برای شبکه فراهم می‌آورد و این امکان را به کارفرما می‌دهد تا در صورت کاستن هزینه به پاسخی با همان شاخص اطمینان‌پذیری دست یابد. همانطور که ملاحظه می‌شود این برنامه قدرت بالایی در جستجوی پاسخ‌های بهینه دارد و با تولید جبهه پارتوی محدب توانسته دامنه وسیعی از پاسخ‌های بهینه را تولید کند. در حال حاضر با در دست داشتن این جبهه پارتو، کارفرما می‌تواند بنا به محدودیت‌های خود یکی از پاسخ‌های نهایی را با اطمینان به‌عنوان راه حل و طراحی نهایی شبکه انتخاب کند. جدول ۱۴ برای مقایسه بهتر پاسخ‌های تولید شده با یکدیگر آورده شده است.

در ادامه با رسم نمودار قطر لوله‌ها در مقابل طول آن‌ها برای هر یک از پاسخ‌های بهینه معرفی شده در پژوهش حاضر به مقایسه این مقادیر در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ پرداخته شد. در ابتدا خط لوله‌هایی که طول آن‌ها بیش از ۴۰۰ متر بود در مقابل قطرهای حاصل ترسیم شد که در شکل ۱۰ مقدار آن مشاهده می‌شود. در ادامه خط لوله‌هایی که طول آن‌ها بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ متر بود، در مقابل قطرهای حاصل مطابق شکل ۱۱ رسم شدند. فشارهای حاصل در ۲۱۷ گره شبکه پس از تولید پاسخ‌های منتخب حاصل از بهینه‌سازی با یکدیگر مقایسه شدند که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مقادیر آن‌ها نمایش داده شده است.

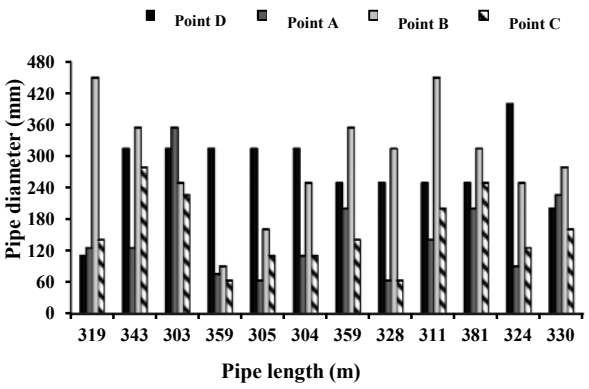


Fig. 11. Comparison of Pipe Diameter selected Pareto solution for D zone network (Pipe length between 300 and 400 meters)

شکل ۱۱- نمودار مقایسه قطر لوله‌های نقاط منتخب حاصل از بهینه‌سازی شبکه پهنه D شهر مشهد (طول لوله‌های بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ متر)

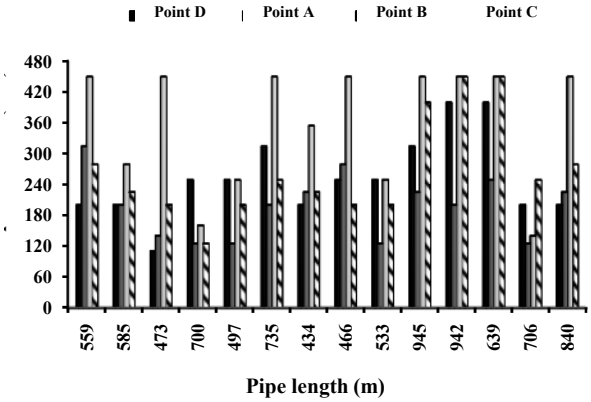


Fig. 10. Comparison of Pipe Diameter selected Pareto solution for D zone network (Pipe length more than 400 meters)

شکل ۱۰- نمودار مقایسه قطر لوله‌های نقاط منتخب حاصل از بهینه‌سازی شبکه پهنه D شهر مشهد (طول لوله‌های بیش از ۴۰۰ متر)

جدول ۱۴- مقایسه پاسخ‌های مختلف بهینه‌سازی شبکه پهنه D شهر مشهد

Table 14. Comparison of selected Pareto solution for D zone network

Solution title	A	B	C	D
Cost (Rials)	14,200,532,768	28,708,968,069	16,685,852,354	17,500,024,327
Todini's resilience index	0.8544	0.9452	0.9240	0.9086

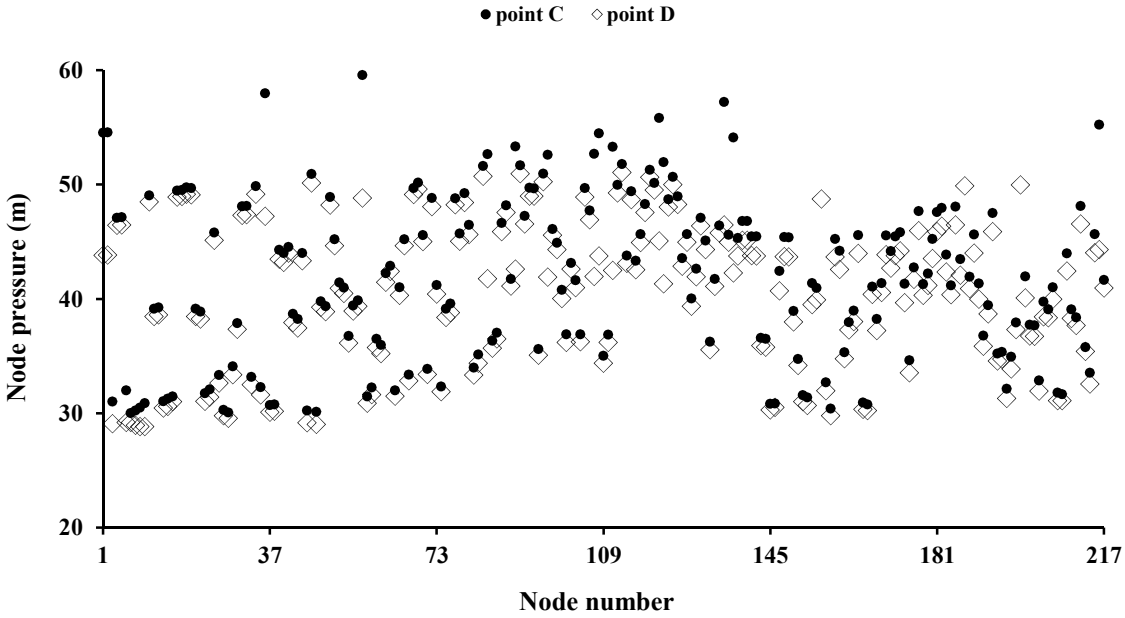


Fig. 12. Comparison of nodal pressure for C and D solution D zone network

شکل ۱۲- نمودار مقایسه فشار آب گره‌های شبکه پهنه D شهر مشهد در نقاط منتخب C و D

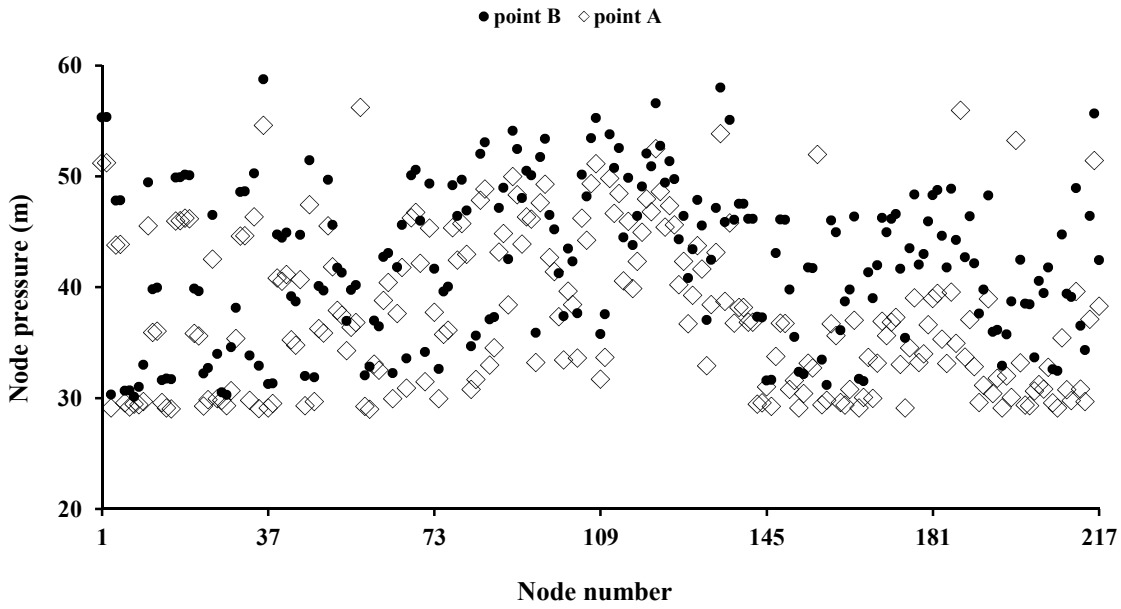


Fig. 13. Comparison of nodal pressure for A and B solution D zone network

شکل ۱۳- نمودار مقایسه فشار آب گره‌های شبکه پهنه D شهر مشهد در نقاط منتخب A و B

فشار متوسط شبکه در نقاط A، B، C و D به‌ترتیب برابر ۳۷/۶۶، ۴۲/۷۷، ۴۲/۱۴ و ۴۰/۴۳ بود. همانگونه که ملاحظه می‌شود پاسخ C نسبت به نقطه A توانسته است با افزایش تقریباً ۱۱/۹۰ درصدی فشار متوسط شبکه، میزان تاب‌آوری آن را به حد قابل قبولی افزایش دهد. همچنین پاسخ C نسبت به نقطه D توانسته است با افزایش تقریباً ۴/۲۳ درصدی فشار متوسط شبکه میزان فشار در گره‌های شبکه را نسبت به طراحی اولیه شرکت مشاور افزایش دهد. با توجه به تفاوت اندک در فشار متوسط شبکه در نقاط C و B، می‌توان گفت پاسخ B علی‌رغم افزایش هزینه در شبکه نتوانسته است تغییر ملموسی در افزایش متوسط فشار گرهی شبکه نسبت به نقطه C ایجاد نماید. همانطور که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود، مقادیر فشار گره‌ها در پاسخ نقطه C نسبت به فشار گره‌ها در پاسخ نقطه D افزایش یافته است. این موضوع نشان دهنده این است که شاخص انعطاف‌پذیری تودینی به شکل قابل ملاحظه‌ای توانسته است شبکه را تحلیل و بهینه نماید. این شاخص با افزایش فشار در گره‌ها موجب می‌شود تا در شرایط بحرانی و شکست در شبکه میزان تقاضا در سایر گره‌ها با قابلیت اطمینان بالایی حفظ گردد و شبکه دچار کمبود فشار و دبی در سایر نقاط نشود.

این شاخص با افزایش فشار در گره‌ها در حد نرمال از کاهش فشار در شرایط بحرانی و افزایش ناگهانی تقاضا جلوگیری می‌نماید. همانگونه که ملاحظه می‌شود مدل پیشنهادی با توانایی و دقت بالا توانسته است قیود هیدرولیکی مسئله را رعایت نماید و با افزایش متعادل فشار گره‌ها در جهت کاهش قطر لوله‌ها نتایج را به سمت پاسخ‌های بهینه سوق دهد. اصلی‌ترین نکته در نتایج حاصل این است که مدل با تولید پاسخ‌های بهینه مانند نقطه C توانسته است گزینه پیشنهادی شرکت مشاور نقطه D را مغلوب کند و به کارفرما این امکان را بدهد که با دید وسیع‌تری نسبت به گذشته در انتخاب گزینه‌های مطلوب‌تر بکوشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با اعمال محدودیت‌های هیدرولیکی و تعریف توابع هدف به بهینه‌سازی سه شبکه شاخص در تحقیقات پیشین پرداخته شد و نتایج آن در غالب معرفی گزینه‌های پاسخ مرزی در هر مسئله و معرفی یک پاسخ بهینه منتخب به روش Young منجر شد. پاسخ منتخب C در شبکه‌های دوحلقه‌ای، هانوی و کادو به‌ترتیب ۲۲/۹۱، ۱۷/۱۳ و ۷/۴۱ درصد فشار متوسط شبکه را نسبت به کمترین هزینه آن در این پژوهش (نقطه A)، افزایش داد.

dx.doi.org/10.22093/wwj. 2019.152398.2763

در ایـن پـژوهش بررسـی شـبکه واقعـی پهنـه D شـهر مشـهد و بهینه‌سازی آن با مدل توسعه داده شده انجام شد. پاسخ منتخب C در شبکه پهنه D شهر مشهد بـا افـزایش ۴/۲۳ درصـدی فشـار متوسـط شبکه نسبت به طراحی اولیه شرکت مشاور (نقطـه D) نشـان داد کـه گزینه طراحی شده توسط شرکت مشاور به‌عنوان پاسخی مغلـوب در زیر جبهه پارتوی نهایی این پژوهش قرار می‌گیرد.

نتایج نشان داد مدل پیشنهادی با افزایش فشار گرهی و کـاهش توأمـان هزینـه شـبکه توانسـته اسـت گـامی نـو در طراحـی هدفمنـد شبکه‌های توزیع آب در ایران بردارد و گزینـه‌هـای معرفـی شـده در این پژوهش مـی‌توانـد بـه‌عنـوان پاسـخ‌هـای غیـر پسـت در اختیـار کارفرمایان قرار گیرد. همچنین نتایج نشـان داد شـاخص تـاب‌آوری تودینی علاوه بر ایجاد انرژی مازاد در هر گـره و افـزایش فشـار آن می‌تواند با در نظر گرفتن یکنواختی در قطرهای متصـل شـده بـه هـر گره و طراحی حلقه‌های قابل اطمینان، عملکرد شبکه را تحت شرایط شکست بهبود دهد. در پایان پیشنهاد می‌شود در پـژوهش‌هـای آتـی به بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری در ایـران کـه دارای پمـپ هستند و به‌صورت ثقلی آبگیری نمی‌شوند، پرداخته شود زیرا در آن شبکه‌ها، این امکان وجود دارد کـه بـا تحلیـل هیـدرولیکی مبتنـی بـر فشار، میزان افت ناشی از افزایش بیش از حد فشار در شـبکه مـورد بررسی قرار گیرد. همچنـین پیشـنهاد مـی‌شـود بـرای بهبـود نتـایج و مقایسه کیفیت آن‌ها از چندین الگوریتم فراکاوشـی مبتنـی بـر جبهـه پارتو استفاده شود.

References

Alperovits, E. & Shamir, U. 1977. Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research,* 13**,** 885-900.

Creaco, E., Franchini, M. & Todini, E. 2016. Generalized resilience and failure indices for use with pressure-driven modeling and leakage. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 142**,** 04016019.

Fujiwara, O. & Khang, D. B. 1990. A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks. *Water Resources Research,* 26**,** 539-549.

Kadu, M. S., Gupta, R. & Bhave, P. R. 2008. Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 134**,** 147-160.

Ostfeld, A., Oliker, N. & Salomons, E. 2013. Multiobjective optimization for least cost design and resiliency of water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 140**,** 04014037.

Reca, J., Martínez, J. & López, R. 2017. A hybrid water distribution networks design optimization method based on a search space reduction approach and a genetic algorithm. *Water,* 9**,** 845.

Surco, D. F., Vecchi, T. P. & Ravagnani, M. A. 2018. Optimization of water distribution networks using a modified particle swarm optimization algorithm. *Water Science and Technology: Water Supply,* 18**,** 660-678.

Todini, E. 2000. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water,* 2**,** 115-122.

Young, H. P. 1993. An evolutionary model of bargaining. *Journal of Economic Theory*, 59**,** 145-168.

Zitzler, E., Laumanns, M. & Thiele, L. 2001. *SPEA2: improving the strength pareto evolutionary algorithm*. TIK-Report, 103, Swiss Federal Intitute of Technology, Zurich.