

کاربرد روش بهینه‌سازی نیروی مرکزی در طراحی سامانه‌های توزیع آب

آزاده جباری^۱، حسن ترابی پوده^۲، حجت اله یونسی^۳، امیر حمزه حقی آبی^۴

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران،
و عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
(نویسنده مسئول) ۳۶۸۵۰۹۶۹ (۰۳۱) torabi1976@gmail.com
۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

(دریافت ۹۴/۶/۱۹ پذیرش ۹۴/۱۱/۱۷)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام شود:

Jabbari, A., Torabi Podeh, H., Younesi, H. & Haghiabi, A. H., 2017, "Central force optimization method used to optimize water distribution networks", *Journal of Water and Wastewater* Vol. 28 No. 2 (108), 65-77. (In Persian)

چکیده

شبکه‌های آبرسانی از جمله تأسیسات زیربنایی شهرها و با هزینه‌های اجرا و بهره‌برداری زیاد است، لذا بسیاری از پژوهشگران بر روی حل مسئله بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب متمرکز شده‌اند. در اغلب پژوهش‌های اخیر در این زمینه، الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری تصادفی برای حل این مسئله استفاده شده است. در پژوهش حاضر، به منظور رهایی از نقاط ضعف الگوریتم‌های تصادفی، کاربرد یک الگوریتم جدید غیرتصادفی و قطعی به منظور کمینه‌سازی هزینه لوله‌های سامانه‌های آبرسانی بررسی شد. الگوریتم به کار برده شده در این پژوهش، در واقع روش بهینه‌سازی نیروی مرکزی (CFO) اصلاح شده به منظور حل شبکه‌های توزیع آب است که CFOnet نامیده شده است. عملکرد روش پیشنهادی از طریق بهینه‌سازی قطر لوله‌ها در دو شبکه مرجع آبرسانی (شبکه دو حلقه‌ای و شبکه کادو) بررسی شد. به این منظور هر دو روش CFO و CFOnet در برنامه متلب برنامه‌نویسی و با نرم‌افزار هیدرولیکی ایپانت ارتباط داده شد. با اجرای این دو روش به منظور حل دو شبکه مورد نظر، بهبود عملکرد روش پیشنهادی CFOnet نسبت به CFO نشان داده شد. به این وسیله، با اجرای CFOnet پاسخ بهینه برای طرح شبکه دو حلقه‌ای معادل ۴۱۹،۰۰۰ دلار پس از ۱۲،۴۳۲ مرتبه ارزیابی تابع هدف حاصل شد. همچنین طرح بهینه شبکه کادو با هزینه‌ای معادل ۱۲۶،۵۳۵،۹۱۵ رویه پس از ۲۵۹،۴۷۶ مرتبه ارزیابی تابع هدف، به دست آمد. مقایسه پاسخ‌های به دست آمده با نتایج الگوریتم‌های بهینه‌سازی تصادفی در ادبیات این موضوع، نشان داد که روش پیشنهادی نتایج خوبی برای حل مسئله شبکه‌های آبرسانی یافته است و در عین حال مزایای قطعی بودن یک روش بهینه‌سازی را نیز دارد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی فرا ابتکاری، شبکه‌های توزیع آب، CFOnet، متلب، ایپانت

۱- مقدمه

تقریباً ۸۰ تا ۸۵ درصد از کل هزینه سامانه‌های تأمین آب متعلق به انتقال و شبکه توزیع آب است (Swamee & Sharma 2008). بنابراین یافتن هزینه بهینه اجرای این شبکه‌ها در طراحی سامانه‌های تأمین آب، از نظر اقتصادی، دارای اهمیت بسیار است. مسئله بهینه‌سازی سامانه‌های توزیع آب^۱، یک مسئله غیرخطی است و استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی پویا و سایر روش‌های حل ریاضی و دقیق به منظور حل این مسئله بسیار زمان‌بر است (Savic & Walters 1997; Schaake & Lai 1969;

Alperovits & Shamir 1997). در تحقیقاتی به بررسی عملکرد الگوریتم‌های فرا ابتکاری در طراحی بهینه شبکه‌های آبرسانی پرداخته شده است. به عنوان نمونه در سال ۱۹۹۷ Savic & Walters، در سال ۲۰۱۰ Suribabu، در سال ۲۰۱۳ Moghadam and et al. و در سال ۲۰۱۵ Mohammadi-Aghdam et al. به ترتیب الگوریتم‌های ژنتیک^۲، الگوریتم تکامل تفاضلی^۳، بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۴ و الگوریتم DMPSO^۵ را به منظور بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب به کار برده‌اند. این پژوهش‌ها،

² Genetic Algorithms (GA)

³ Differential Evolution (DE)

⁴ Particle Swarm Optimization (PSO)

⁵ Dynamic Mutated Particle Swarm Optimization

¹ Water Distribution System (WDS)

(Haghighi & Ramos 2012). به‌طور کلی تمامی پژوهش‌های داخلی و خارجی انجام شده در زمینه کاربرد روش CFO، کارایی بالای این روش را نشان داده‌اند. در برخی از این پژوهش‌ها، با ایجاد تغییراتی در رفتار جستجوی این روش، عملکرد CFO بهبود یافته است.

با توجه به محدودیت‌های استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری تصادفی در یافتن طرح بهینه شبکه‌های توزیع آب، و از آنجایی که تاکنون مسئله طراحی این شبکه‌ها با استفاده از یک الگوریتم فراکاوشی قطعی و غیرتصادفی حل نشده است، در این پژوهش روش CFO به‌منظور حل این مسئله ارزیابی شد. در پژوهش حاضر، با اعمال تغییراتی در CFO، الگوریتم اصلاح شده CFOnet به‌منظور بهینه‌سازی هزینه طراحی لوله‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های خاص شبکه‌های آبرسانی، معرفی شد. به این منظور، روش‌های CFO و CFOnet در محیط متلب^۹ کدگذاری و با نرم‌افزار هیدرولیکی ایننت^{۱۰} ارتباط داده شدند و طراحی بهینه دو شبکه مرجع دو حلقه‌ای^{۱۱} و کادو^{۱۲} مورد بررسی قرار گرفت (Rossman 2000) و نتایج به‌دست آمده با نتایج پژوهش‌های دیگر در ادبیات بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی مقایسه شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تابع هدف مسئله و محدودیت‌ها

تابع هدف در مسئله طراحی بهینه سامانه‌های توزیع آب، حداقل‌سازی هزینه سرمایه‌گذاری این شبکه‌هاست [۲].

$$\text{Minimize: } C_t = \sum_{i=1}^{N_i} c(D_i, L_i) \quad (1)$$

که در آن

C_t هزینه کل لوله‌های شبکه، $c(D_i, L_i)$ هزینه لوله i با قطر D_i و طول L_i ، و N_i تعداد لوله‌هاست.

این تابع هدف باید با در نظر گرفتن محدودیت‌های طراحی و هیدرولیکی حاکم بر شبکه‌های آبرسانی، کمینه‌سازی شود. حدود قطرهای تجاری لوله‌های موجود در بازار به‌عنوان محدودیت طراحی و همچنین کرانه بالا و پایین مقدار سرعت در لوله‌ها و فشار در گره‌ها به‌عنوان محدودیت هیدرولیکی در شبکه‌های توزیع آب، به ترتیب به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند

موفقیت الگوریتم‌های به‌کار برده شده را در یافتن اقتصادی‌ترین هزینه شبکه‌های آب نشان داده‌اند ولی به‌دلیل ماهیت تصادفی^۱ این روش‌ها، هیچ‌گونه اطمینانی به یافتن بهینه کلی توسط آنها وجود ندارد و ممکن است پاسخ یافته شده یک بهینه محلی در فضای جستجوی جواب مسئله باشد. همچنین، پاسخ یافته شده در هر مرتبه اجرای الگوریتم متفاوت خواهد بود.

در سال ۲۰۰۷ میلادی، یک روش متاهیوریستیک جدید به نام روش بهینه‌سازی نیروی مرکزی^۲ توسعه یافته است. این روش که بر مبنای علم حرکت و نیروهاست توسط فورماتو به هر یک از عوامل جستجوکننده در الگوریتم CFO یک پروب^۳ یا جستجوگر گفته می‌شود. تفاوت عمده و مهم روش CFO با سایر روش‌های فرا ابتکاری مانند GA و PSO این است که این روش، قطعی^۴ و غیرتصادفی است. به این معنی که در این روش در فرایند جستجو موقعیت پروب‌ها به‌صورت تصادفی تغییر نمی‌کنند و تغییر مکان آنها بر اساس تابع نظام‌مند حاکم بر سینماتیک اجرام استوار است. این الگوریتم در هر مرتبه اجرا پاسخ‌های یکسان نشان می‌دهد (Formato 2007; Formato 2010).

از جمله پژوهش‌های انجام شده در رابطه با کاربرد روش CFO، پژوهش Ding et al. در سال ۲۰۱۲ است. در این پژوهش با اعمال تغییراتی در CFO الگوریتم جدیدی بنام ECFO^۵ معرفی شد که دارای توانایی جستجو و سرعت همگرایی بیشتری نسبت به CFO است. علاوه بر این در سال ۲۰۱۵ Liu & Tian، راهکار چند شروعی^۶ را برای تعریف پروب‌های اولیه استفاده کردند و الگوریتم MCFO^۷ را معرفی کردند. به این وسیله جمعیت اولیه پروب‌ها، با جایگذاری پروب‌ها به‌صورت یکنواخت و غیر تصادفی بر روی هر یک از محورهای مختصات و همچنین بر روی محورهای مورب (قطرها) در فضای تصمیم تعریف شد. نتایج این تحقیق با بررسی ۲۳ تابع مرجع ریاضی، بهبود عملکرد MCFO را نسبت به CFO نشان داد.

Haghighi & Ramos در سال ۲۰۱۲ روش CFO را به‌منظور بهینه‌سازی نشت یابی و واسنجی شبکه لوله‌ها با استفاده از تحلیل معکوس جریان گذرا^۸ به‌کار برده‌اند. نتایج نشان داد که CFO روشی آسان در پیاده‌سازی است و از نظر محاسباتی کارآمد است و عملکرد قابل توجهی در حل مسئله تشخیص نشت در لوله‌ها دارد

¹ Stochastic Nature

² Central Force Optimization (CFO)

³ Probe

⁴ Determinist

⁵ Extended/Enhanced Central Force Optimization

⁶ Multi-start Strategy

⁷ Multi-start Central Force Optimization

⁸ Inverse Transient Analysis (ITA)

⁹ MATLAB

¹⁰ EPANET

¹¹ Two-loop Network

¹² Kadu

می‌باشند. ϑ ضریب جریمه است و نشان‌دهنده میزان افزایش تابع هدف در مواقع تخطی از محدودیت‌هاست. توابع جریمه به صورت زیر در نظر گرفته شد

$$\text{If } P_j > P_{\max} \rightarrow v(P_j) = \text{Max}(0, P_j - P_{\max}) \quad (6)$$

$$\text{If } P_j < P_{\min} \rightarrow v(P_j) = \text{Max}(0, P_{\min} - P_j) \quad (7)$$

$$\text{If } V_i < V_{\max} \rightarrow v(V_i) = \text{Max}(0, V_i - V_{\max}) \quad (8)$$

$$\text{If } V_i < V_{\min} \rightarrow v(V_i) = \text{Max}(0, V_{\min} - V_i) \quad (9)$$

استفاده از روش تابع جریمه مستلزم معلوم بودن مقدار ضریب جریمه می‌باشد. کیفیت جواب مسئله بهینه‌سازی بستگی زیادی به مقدار این ضریب دارد. مقدار مناسب ضریب جریمه از مسئله‌ای به مسئله دیگر فرق می‌کند و لذا مقدار آن از قبل معلوم نیست. روش متداول در تعیین مقدار مناسب این ضریب مبتنی بر سعی و خطاست که مدت زمان فرایند بهینه‌سازی را افزایش خواهد داد (Afshar et al. 2009).

۲-۲- نرم‌افزار هیدرولیکی ایپانت

ایپانت یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای تحلیل شبکه توزیع آب است (Rossman 2000). روابط هیدرولیکی پایه در این نرم‌افزار شامل قوانین بقای جرم و بقای انرژی است. رابطه بقای جرم برای هر گره به صورت زیر اعمال می‌شود

$$\sum Q_{in} - \sum Q_{out} = Q_{ext} \quad (10)$$

که در آن

Q_{in} و Q_{out} به ترتیب جریان ورودی به گره و جریان خروجی از گره و Q_{ext} تقاضای خروجی از گره است. همچنین قانون بقای انرژی در هر حلقه بسته از شبکه به صورت زیر اعمال می‌شود

$$\sum_{i \in \text{loop}} \Delta H_i = 0 \quad \forall i \in N_L \quad (11)$$

که در آن

ΔH_i افت انرژی در لوله i ام و N_L تعداد کل حلقه‌ها در شبکه است. افت انرژی در لوله i که بین دو گره j و k قرار دارد برابر با تفاوت انرژی بین این دو گره است

$$\Delta H_i = H_j - H_k \quad (12)$$

$$D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max} \quad i=1, \dots, N_i \quad (2)$$

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad i=1, N_i \quad (3)$$

$$P_{\min} \leq P_j \leq P_{\max} \quad j=1, \dots, N_j \quad (4)$$

که در این روابط

D_{\min} و D_{\max} به ترتیب حداقل و حداکثر قطرهای تجاری موجود در بازار، V_i سرعت در لوله i ، V_{\min} و V_{\max} به ترتیب حداقل و حداکثر سرعت مجاز در لوله‌ها، P_j فشار در گره j ، P_{\min} و P_{\max} به ترتیب حداقل و حداکثر فشار مجاز در گره‌ها و N_j تعداد کل گره‌های موجود در شبکه است.

از طریق تعریف فضای جستجو برای الگوریتم بهینه‌سازی به صورت بازه $[D_{\min}, D_{\max}]$ ، محدودیت مربوط به قطر لوله‌های موجود در بازار در نظر گرفته می‌شود. حداقل سرعت مجاز با توجه به جلوگیری از رسوب‌گذاری در لوله‌ها و تغییر شرایط کیفی آب محدود می‌شود. در نظر گرفتن محدودیت حداکثر سرعت جریان در لوله‌ها نیز به منظور جلوگیری از افت فشار بیش از حد، حفظ آب‌بندی لوله‌ها و متعلقات و کاهش تنش در محل اتصالات، در مسئله طراحی شبکه‌های توزیع آب ضروری است. با توجه به افت فشار در شبکه، باید برای تأمین حداکثر مصرف در گره‌های شبکه، محدودیت حداقل فشار در نظر گرفته شود. همچنین از آنجایی که اضافه شدن فشار در شبکه‌های توزیع آب موجب ازدیاد مصارف ناخواسته، افزایش نشت، افزایش تنش وارد بر لوله‌ها و ایجاد ترکیدگی در لوله‌ها می‌شود، حداکثر فشار مجاز نیز به عنوان یک محدودیت هیدرولیکی در طراحی این شبکه‌ها در نظر گرفته می‌شود (Desing Criteria 2013).

در این پژوهش محدودیت‌های مسئله با توجه به موارد ذکر شده در پژوهش‌های گذشته در هر یک از شبکه‌های مرجع مورد بررسی مشخص شد. به منظور در نظر گرفتن محدودیت‌های هیدرولیکی، یک روش ساده جمع شونده برای تبدیل مسئله مقید به یک مسئله نامقید استفاده شد. به این ترتیب که اگر جواب مسئله دارای تخطی از سرعت و یا فشار مجاز باشد، هزینه تابع هدف جریمه خواهد شد. بنابراین تابع هدف نهایی در این مسئله به صورت زیر تعریف می‌شود که به عنوان تابع مورد ارزیابی در الگوریتم CFO و CFOnet استفاده می‌شود

$$\text{Minimize : } C_t = \left(\sum_{i=1}^{N_i} c(D_i, L_i) \right) + \vartheta * \left(\sum_{j=1}^{N_j} v(P_j) \right) + \sum_{i=1}^{N_i} v(V_i) \quad (5)$$

که در آن

الف) جایگذاری پروب‌ها به صورت یکنواخت بر روی هر یک از محورهای مختصات (ابعاد) در فضای تصمیم (به صورت قطعی و غیر تصادفی).

ب) جایگذاری پروب‌ها به صورت یکنواخت بر روی محورهای مورب (قطرها) در فضای تصمیم (به صورت قطعی).

ج) جایگذاری پروب‌ها در فضای تصمیم به صورت تصادفی.

د) جایگذاری پروب‌ها در فضای تصمیم با استفاده از یک روش تعریف شده توسط کاربر (به صورت تصادفی و یا قطعی و غیر تصادفی).

در زمان اجرای CFO هر پروب تحت تأثیر شتاب ایجاد شده توسط جاذبه گرانشی جرم‌ها (پروب‌ها) در فضای تصمیم حرکت می‌کند. کل شتاب ایجاد شده توسط سایر پروب‌ها بر روی پروب P در گام زمانی j-1 (\hat{a}_{j-1}^p) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$\hat{a}_{j-1}^p = G \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^{N_p} U(M_{j-1}^k - M_{j-1}^p) \cdot (M_{j-1}^k - M_{j-1}^p) \alpha \frac{(\bar{R}_{j-1}^k - \bar{R}_{j-1}^p)}{\|\bar{R}_{j-1}^k - \bar{R}_{j-1}^p\|^\beta} \quad (16)$$

که در این رابطه

M_{j-1}^p برازندگی (مقدار تابع هدف) مربوط به پروب p در زمان j-1 است. برازندگی سایر پروب‌ها با M_{j-1}^k نشان داده شده است که k از یک تا N_p به استثنای p می‌باشد ($k=1, 2, \dots, p-1, p+1, \dots, N_p$). α و β پارامترهای ثابت در CFO می‌باشند که به طور معمول و همچنین در اینجا برابر با 2 در نظر گرفته می‌شوند ($\alpha=\beta=G=2$) (Formato 2009). تابع U تابع یک است که مشخص می‌کند که پروب k بر روی پروب p نیروی جاذبه اعمال می‌کند یا خیر. تابع U در یک مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر تعریف می‌شود که بر طبق آن اگر پروب k جرمی بزرگ‌تر از جرم پروب p داشته باشد ($M_{j-1}^k > M_{j-1}^p$) می‌تواند بر آن نیروی جاذبه اعمال کند

$$U(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

همچنین $\|\bar{R}_{j-1}^k - \bar{R}_{j-1}^p\|$ فاصله بین پروب‌های p و k است که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$\|\bar{R}_{j-1}^k - \bar{R}_{j-1}^p\| = \sqrt{\sum_{m=1}^{N_d} (R_{j-1}^{k,m} - R_{j-1}^{p,m})^2} \quad (18)$$

در این پژوهش برای محاسبه افت انرژی در لوله‌ها از رابطه هایزن- ویلیامز¹ استفاده شد (Savic and Walters 1997)

$$h_f = \omega \frac{L_i}{C_{HW}^{1.85} D_i^{4.87}} Q_i^{1.85} \quad (13)$$

که در آن

Q_i جریان در لوله نام (m^3/s)، L_i و D_i به ترتیب طول و قطر لوله نام بر حسب متر و C_{HW} ضریب زبری هایزن-ویلیامز است که مقدار آن بین 80 تا 150 بسته به جنس لوله متغیر است (Briere 2014). ω یک ضریب بدون بعد تبدیل است که بستگی به واحد سیستم انتخاب شده برای شبیه‌سازی دارد. از آنجا که ω در نرم‌افزار اپینت نسخه دوم² برابر با 10/667 تنظیم شده است در این پژوهش همین مقدار در نظر گرفته شد و مقایسه نتایج نیز با پژوهش‌هایی که دارای ω مشابه بودند، انجام شد (Eusuff & Lansey 2003).

۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی نیروی مرکزی (CFO)

در الگوریتم CFO پروب‌ها در فضای مسئله پرواز کرده و به جستجوی جواب بهینه می‌پردازند. فضای تصمیم در این روش به صورت زیر تعریف شده است

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, i = 1, 2, \dots, N_d \quad (14)$$

که در آن

x_i متغیرهای تصمیم در مسئله مورد نظر، N_d تعداد ابعاد مسئله، x_i^{\max} و x_i^{\min} به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار متغیرهای تصمیم می‌باشند. \bar{R}_j^p به عنوان بردار موقعیت پروب p در فضای مسئله در زمان j به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\bar{R}_j^p = \sum_{i=1}^{N_d} x_i^{p,j} \hat{e}_i \quad (15)$$

که در آن

$x_i^{p,j}$ مختصات پروب p در زمان j و در بعد i و \hat{e}_i بردار یکه در محور (بعد) i است. اندیس j شماره تکرار الگوریتم است که از عدد یک تا N_t (حداکثر تعداد تکرارها) و اندیس p شماره پروب است که از یک تا N_p (تعداد پروب‌ها) است. در روش CFO توزیع پروب‌های اولیه به چهار روش زیر می‌تواند انجام شود:

¹ Hazen-Williams

² EPANET.2

در بخش قبل بیان شد، تنظیم شدند. از آنجایی که حداکثر و حداقل قطرهای تجاری لوله‌های موجود در بازار برای تمامی لوله‌های یک شبکه توزیع آب (تمامی ابعاد مسئله) یکسان است، بنابراین توزیع غیرتصادفی پروب‌های اولیه در CFO با استفاده از روش‌های قطعی «الف» و «ب» اشاره شده در بخش قبل، توزیع نامناسبی ایجاد می‌کند. به منظور رفع این مشکل، در این پژوهش یک روش قطعی تعریف شده توسط کاربر^۳ برای ایجاد پروب‌های اولیه استفاده شد. به این منظور قطرهای تجاری در شبکه مورد نظر به صورت یک جایگشت که تعداد درایه‌های آن برابر با تعداد قطرهای تجاری موجود (n) است در نظر گرفته شد و با تکرار درایه‌های این جایگشت ماتریس بزرگ‌تری به ابعاد [1×10n] ساخته شد و با استفاده از جابه‌جا نمودن مقادیر درایه‌های این ماتریس طبق دستورهای غیرتصادفی و قطعی تعریف شده، پروب‌های اولیه که هر کدام دارای تعداد مشخصی از این درایه‌ها (به تعداد لوله‌های موجود در هر شبکه مورد بررسی) می‌باشند، تعریف شدند.

به منظور ارزیابی روش CFO در حل مسئله شبکه‌های آبرسانی، دو شبکه مرجع دو حلقه‌ای و کادو انتخاب شدند. روش CFO به منظور بهینه‌سازی این دو شبکه اجرا شد. با توجه به نتایج ضعیف به دست آمده از CFO، اعمال تغییرات و اصلاحاتی بر روی این الگوریتم به منظور دست یافتن به طرح مناسب‌تر از شبکه‌ها ضروری است. الگوریتم اصلاح شده که تفاوت آن با CFO در این بخش بیان می‌شود CFOnet نامیده شده است.

به منظور ارزیابی عملکرد روش CFOnet در طراحی دو شبکه مرجع ذکر شده، برنامه این روش در محیط متلب کدگذاری شد. پارامترهای ثابت G, β, α و N_p و همچنین توزیع پروب‌های اولیه و مقدار شتاب اولیه آنها به همان صورت که در مورد CFO تنظیم شده بود، در نظر گرفته شد. همچنین برنامه محاسبه برازندگی پروب‌ها که همان هزینه طرح شبکه است (رابطه ۵) در یک زیربرنامه دیگر (زیربرنامه تابع هدف) در متلب کدگذاری شد. در این زیربرنامه اینت با در نظر گرفتن فایل ورودی شبکه مورد نظر اجرا می‌شود و فایل خروجی آن ساخته می‌شود. به منظور جایگذاری قطرهای جدید لوله‌ها (به ازای هر پروب به تعداد لوله‌های شبکه قطر معرفی می‌شود) در فایل ورودی اینت، یک زیربرنامه (زیربرنامه فایل ورودی) در محیط ویژوال بیسیک^۴ کدگذاری شد و به زیربرنامه تابع هدف ارتباط داده شد. به منظور بررسی محدودیت‌های هیدرولیکی (رابطه‌های ۳ و ۴)، یک زیربرنامه دیگر (زیربرنامه هیدرولیکی) در محیط ویژوال بیسیک کدگذاری شد که فایل نتایج

که در آن

$R_{j-1}^{k,m}$ و $R_{j-1}^{p,m}$ به ترتیب موقعیت پروب‌های k و p در بعد m از فضای مسئله می‌باشند. شتاب \bar{a}_{j-1}^p موجب جابه‌جایی پروب p از موقعیت \bar{R}_{j-1}^p (در زمان j-1) به موقعیت \bar{R}_j^p در زمان j با استفاده از رابطه زیر می‌شود

$$\bar{R}_j^p = \bar{R}_{j-1}^p + \bar{V}_{j-1}^p \Delta t + \frac{1}{2} \bar{a}_{j-1}^p \Delta t^2, \quad j \geq 1 \quad (19)$$

که در این رابطه

\bar{V}_{j-1}^p سرعت پروب p در زمان j-1 و Δt فاصله گام‌های زمانی می‌باشد. در اینجا براساس پیشنهاد فورماتو به منظور افزایش سرعت همگرایی الگوریتم \bar{V}_{j-1}^p و Δt به ترتیب برابر با صفر و یک در نظر گرفته می‌شوند (Formato 2008).

حرکت هر یک از پروب‌ها باید محدود به فضای شدنی مسئله باشد و پروب‌هایی که از این فضا خارج شوند، پروب‌های سرگردان^۱ نامیده می‌شوند. از این رو در CFO الگوی زیر بر روی پروب‌های سرگردان اعمال می‌شود و آنها را به داخل فضای شدنی مسئله برمی‌گرداند

$$\text{if } \bar{R}_{j,i}^p < x_i^{\min} \text{ then } \bar{R}_{j,i}^p = x_i^{\min} + F_{\text{rep}}(x_i^{\min} - \bar{R}_{j-1,i}^p) \quad (20)$$

$$\text{if } \bar{R}_{j,i}^p > x_i^{\max} \text{ then } \bar{R}_{j,i}^p = x_i^{\max} - F_{\text{rep}}(\bar{R}_{j-1,i}^p - x_i^{\max}) \quad (21)$$

که در این روابط

F_{rep} عامل تغییر موقعیت^۲ پروب‌هاست و مقدار آن در بازه صفر تا یک در زمان اجرای مدل تغییر می‌کند ($0 \leq F_{\text{rep}} \leq 1$). در این پژوهش F_{rep} با به کارگیری روش پیشنهادی فورماتو در زمان اجرای CFO افزایش یافت (Formato 2008). همچنین شتاب پروب‌های اولیه در تکرار اول الگوریتم (\bar{a}_0^p) بر اساس پیشنهاد فورماتو و به منظور ساده‌سازی صفر فرض شد (Formato 2008). اطلاعات بیشتر و جزئیات روش CFO را می‌توان در پژوهش Formato در سال ۲۰۱۰ (b, a) مشاهده نمود.

۲-۴- الگوریتم CFOnet

روش CFO در محیط متلب کدگذاری و به جعبه ابزار اینت ارتباط نرم‌افزاری داده شد. همچنین پارامترهای CFO به همان مقادیری که

³ User-Defined

⁴ Visual Basic

¹ Errant Probes

² Repositioning Factor

در پایان هر تکرار الگوریتم، قطرهای جدید برای پروب‌ها ایجاد می‌شود (رابطه ۱۹). قطرهای جدید به‌دست آمده توسط CFOnet به زیربرنامه تابع هدف وارد شده و با اجرای زیربرنامه فایل ورودی و نرم‌افزار اپنت و زیربرنامه هیدرولیکی، مقدار برازندگی پروب‌ها مشخص می‌شوند. با مقایسه برازندگی‌ها در هر تکرار الگوریتم بهترین پروب که دارای کمترین مقدار تابع هدف است انتخاب می‌شود. همچنین در طول اجرای الگوریتم بهینه‌سازی CFOnet، به‌منظور جلوگیری از بدتر شدن بهترین پروب که تا آن زمان به‌دست آمده، این پروب بدون تغییر حفظ خواهد شد مگر اینکه برازندگی آن بهتر شده باشد که در این صورت تغییر ایجاد شده ذخیره می‌شود. این فرایند به تعداد حداکثر تکرارهای تعیین شده برای الگوریتم ادامه می‌یابد.

به‌منظور افزایش توانایی جستجوی کلی^۲ الگوریتم یک عملگر جهش در CFOnet تعریف شد. به این منظور، در طول اجرای الگوریتم هنگامی که بهترین جواب در تعداد تکرار مشخص شده‌ای ثابت بماند، عملگر جهش عمل خواهد کرد. به این صورت که ابتدا ماتریس قطرهای تجاری موجود به اندازه تعداد ابعاد مسئله (تعداد لوله‌های شبکه مورد نظر) تکرار می‌شود و ماتریس جدید بزرگ‌تری به نام ماتریس قطرهای ثانویه به دست می‌آید. با بکارگیری عملگرهای تعویض دو نقطه با یکدیگر^۳، حذف و انتقال^۴ و معکوس‌سازی بخشی از همسایگی^۵ بر روی ماتریس قطرهای ثانویه به‌عنوان یک جایگشت، دسته‌ای از پروب‌های جدید تعریف می‌شوند. با هر مرتبه اعمال عملگر جهش، تعدادی از این پروب‌های جدید جایگزین پروب‌های قبلی می‌شوند. شکل ۱، مراحل اجرای CFOnet که با اپنت ارتباط داده شده است را نشان می‌دهد.

۲-۵- شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای

شبکه دو حلقه‌ای یک شبکه توزیع آب حلقه‌ای ثقلی است که توسط Alperovits & Shamir در ۱۹۷۷ طراحی شده است. این سامانه دو حلقه‌ای از ۷ گره تشکیل شده است که از طریق ۸ لوله بهم متصل شده‌اند و به‌صورت ثقلی از یک مخزن با ۲۱۰ متر بار هیدرولیکی تغذیه می‌شود و تمامی لوله‌ها دارای طول ۱۰۰۰ متر می‌باشند. طراحی بهینه این شبکه در پژوهش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است (Suribabu 2010; Moghaddam et al. 2013; Liong and Atiquazzaman 2004). C_{HW} برای تمام لوله‌ها برابر با ۱۳۰ فرض شد. حداقل فشار لازم در تمامی گره‌ها به‌ترتیب

خروجی اپنت را می‌خواند و مقدار فشار در گره‌ها و سرعت در لوله‌ها را مشخص می‌کند. این زیربرنامه نیز به زیربرنامه تابع هدف ارتباط داده شد و مقادیر تخطی از محدودیت‌های هیدرولیکی (رابطه‌های ۶ تا ۹) محاسبه شد. لازم به ذکر است که برآورده شدن محدودیت‌های بقای جرم و انرژی (رابطه‌های ۱۰ و ۱۱) در نرم‌افزار اپنت در نظر گرفته می‌شوند (Liong & Atiquazzaman 2004). در CFOnet در هر تکرار با استفاده از رابطه ۱۶ مقادیر شتاب برای هر پروب محاسبه می‌شوند. با این تفاوت که از آنجایی که مسئله طراحی بهینه شبکه‌های آبرسانی یک مسئله کمینه‌سازی است، تابع پله‌ای U به‌صورت زیر تعریف می‌شود

$$U(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

همچنین در این مسئله شتاب‌های محاسبه شده در رابطه ۱۶ نسبت به قطرهای تجاری لوله‌ها بسیار بزرگ می‌باشند و با توجه به رابطه ۱۹ موجب سرگردان شدن پروب‌ها خواهند شد. به‌همین دلیل به‌منظور کاهش شتاب پروب‌ها یک عملگر نرمال‌سازی^۱ در CFOnet به‌کار برده شد. حدود حداکثر و حداقل شتاب‌ها به قطرهای لوله‌های تجاری موجود در شبکه مورد نظر بستگی دارد. به‌منظور تعیین این حدود ابتدا قطرهای تجاری در شبکه مورد نظر به ترتیب صعودی مرتب شدند، سپس دو برابر حداکثر فاصله بین دو قطر متوالی به عنوان حداقل شتاب (a_{min}) در نظر گرفته شد. حداکثر شتاب (a_{max}) از رابطه زیر تعیین می‌شود

$$a_{max} = \frac{5}{4}(a_{min}) \quad (23)$$

شتاب‌هایی که مقدار آنها صفر باشد در فرایند نرمال‌سازی وارد نشده و تغییر نمی‌کنند. با در نظر گرفتن شتاب‌های نرمال شده، موقعیت پروب‌ها با استفاده از رابطه ۱۹ تغییر می‌کند و سپس قطرهای جدید به‌دست می‌آیند. اگر برخی پروب‌ها از فضای شدنی مسئله خارج شده باشند به فضای شدنی بازگردانده می‌شوند. به این منظور با توجه به گسسته بودن مسئله شبکه‌های آبرسانی از پارامتر F_{rep} در رابطه‌های ۲۰ و ۲۱ صرف‌نظر شد و پروب‌های سرگردان با استفاده از رابطه‌های زیر بازسازی شدند

$$\text{if } \bar{R}_{j,i}^p < x_i^{\min} \text{ then } \bar{R}_{j,i}^p = x_i^{\min} \quad (24)$$

$$\text{if } \bar{R}_{j,i}^p < x_i^{\max} \text{ then } \bar{R}_{j,i}^p = x_i^{\max} \quad (25)$$

^۱ Normalization Operator

^۲ Global Exploration

^۳ Swap

^۴ Insertion

^۵ Reversion

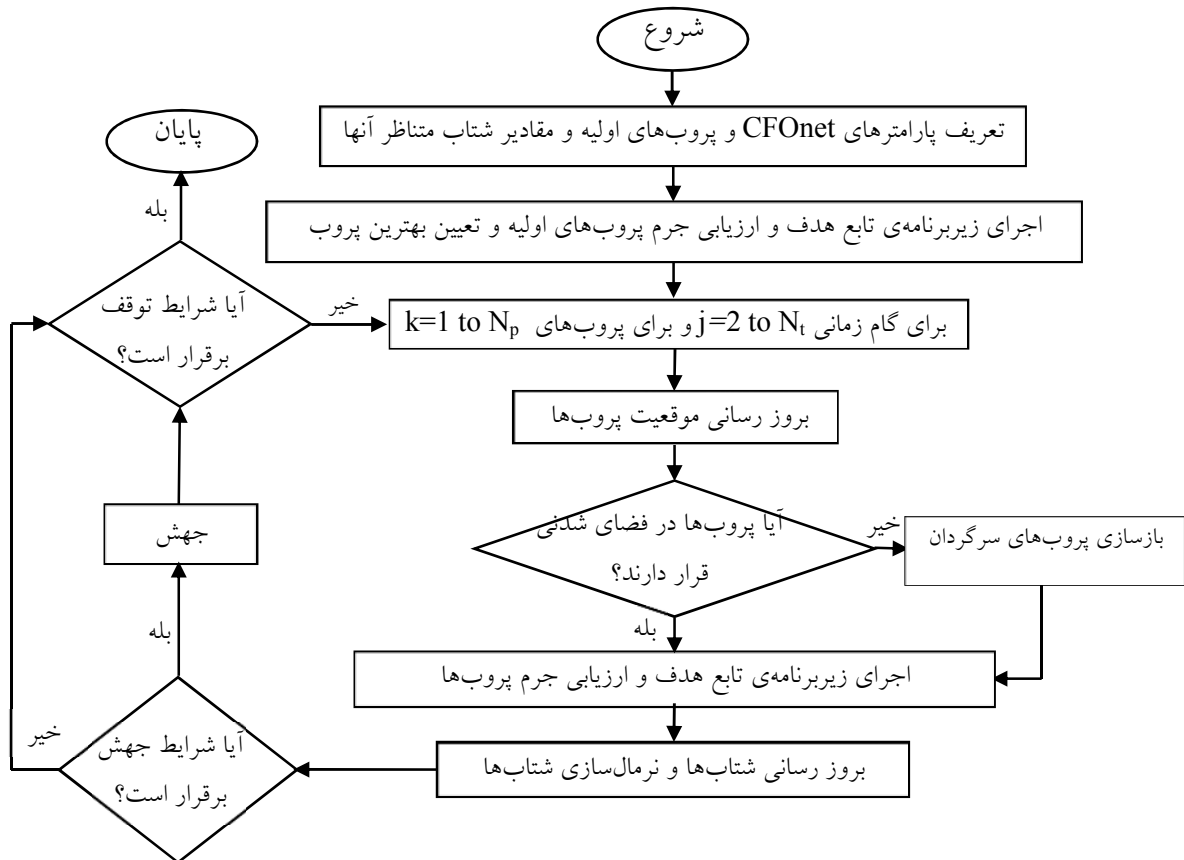


Fig. 1. CFOnet process flowchart
شکل ۱- نمودار اجرای CFOnet

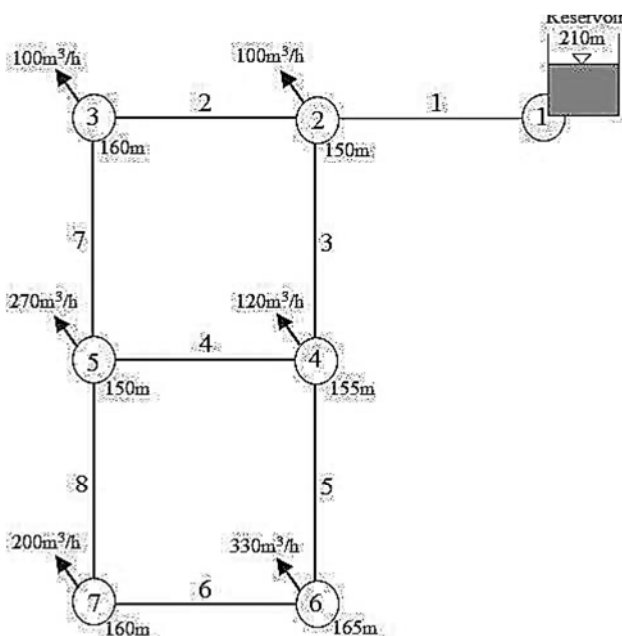


Fig. 2 . Location of the double-loop network design (Alperovits and Shamir 1997)
شکل ۲- جانمایی طرح شبکه دو حلقه‌ای (Alperovits and Shamir 1997)

برابر با ۳۰ متر و حداقل و حداکثر سرعت جریان در لوله‌ها به ترتیب ۰/۳ و ۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. طرح جانمایی این شبکه در اینپنت به همراه ارتفاع گره‌ها و مقادیر دبی مورد تقاضا در هر گره در شکل ۲ نشان داده شده است. ۱۴ قطر تجاری برای لوله‌های این شبکه وجود دارد که در جدول ۱ آورده شده است و بنابراین ۱۴^۸ انتخاب برای طراحی این شبکه وجود دارد.

۲-۶- شبکه توزیع آب کادو

شبکه کادو یک شبکه حلقه‌ای دو مخزنی است که اولین بار در ۲۰۰۸ توسط کادو معرفی شده است (Kadu, Gupta & Bhave 2008). این شبکه دارای ۲۶ گره، ۳۴ لوله و ۹ حلقه است که به منظور نشان دادن توانایی روش بهینه‌سازی پیشنهادی انتخاب شده است. جانمایی طرح شبکه کادو در شکل ۳ نشان داده شده است. طراحی بهینه این شبکه در پژوهش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است (Moghaddam et al. 2013; Kadu, Gupta & Bhave 2008; Haghghi, Samani 2011). ارتفاع سطح آب در مخزن‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب ۱۰۰ و ۹۵ متر است.

Table 2 . Commercial diameters and the associated costs per unit of pipe length in the Kadu network (Kadu et al. 2008)

Diameter (mm)	Cost (Rs)	Diameter (mm)	Cost (Rs)
150	1,115	500	6,092
200	1,600	600	8,189
250	2,154	700	10,670
300	2,780	750	11,874
350	3,475	800	13,261
400	4,255	900	16,151
450	5,172	1,000	19,395

جدول ۲- قطرهای تجاری و هزینه مربوط به واحد طول لوله‌ها در شبکه کادو (Kadu et al. 2008)

$(N_p=42)$. تعداد پروب‌ها با انجام آنالیز حساسیت در بازه (۲۰-۶۰) پروب مشخص شده است. به طوری که در تعداد کمتر و بیشتر از این تعداد همگرایی الگوریتم مناسب نبوده است. در اینجا با توجه به اندازه شبکه‌های مورد بررسی و مطالعات پیشین، برای شبکه دو حلقه‌ای حداکثر ۱۰,۰۰۰ تکرار و برای شبکه کادو ۱۰,۰۰۰ تکرار برای اجرای الگوریتم‌ها تعیین شده است. همچنین به منظور تعیین نرخ جهش در الگوریتم CFONet، بازه (۲۰-۵) درصد در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج آنالیز حساسیت، نرخ جهش ۱۵ به منظور افزایش کارایی الگوریتم پیشنهادی تعیین شد.

مقدار ضریب جریمه (9) در رابطه ۵ معادل ۱۰۰,۰۰۰,۰۰۰ منظور شده است. این مقدار با انجام آنالیز حساسیت و بکارگیری مقادیر مختلف در بازه (۲۰۰,۰۰۰,۰۰۰-۵۰,۰۰۰,۰۰۰) به دست آمد. در مقادیر کوچک 9، مقدار تابع هدف برای جواب‌های خارج از فضای شدنی مسئله به اندازه کافی جریمه نمی‌شود و عدم رعایت فشار و سرعت مجاز به طور کامل تشخیص داده نمی‌شود. لذا با استفاده از مقدار ضریب جریمه بزرگ (۱۰۰,۰۰۰,۰۰۰) این مشکل رفع شده و جواب‌های بهینه با رعایت کامل قيود مسئله به دست می‌آید. همچنین استفاده از مقدار بزرگ‌تر موجب بزرگ شدن برازندگی پروب‌ها و در نتیجه تضعیف سرعت همگرایی الگوریتم می‌شود.

نمودار همگرایی الگوریتم‌های CFO و CFONet در شبکه دو حلقه‌ای در شکل ۴ نشان داده شده است. به دلیل بزرگ بودن مقدار هزینه‌ها در شروع اجرای الگوریتم‌ها، این مقادیر برای ۴ تکرار اول نشان داده نشده است. همچنین در جدول ۳ نتایج به دست آمده برای قطرهای بهینه این شبکه با استفاده از CFO و CFONet به همراه نتایج پژوهش‌های گذشته آورده شده است. با توجه به نمودار همگرایی CFO در شکل ۴ و نتایج این روش در جدول ۳، CFO با بهترین جواب معادل ۴۷۸,۰۰۰ دلار پس از ۹,۱۹۶ مرتبه ارزیابی تابع هدف، عملکرد نسبتاً ضعیفی در حل این مسئله نشان داده است. این نتیجه می‌تواند به دلیل سرعت همگرایی بالا در CFO

Table 1 . Commercial diameters and the associated costs per unit of pipe length in a double-loop network (Alperovits and Shamir 1997)

Diameter (inch)	Cost (\$)	Diameter (inch)	Cost (\$)
1	2	12	50
2	5	14	60
3	8	16	90
4	11	28	130
4	16	20	170
8	23	22	300
10	32	24	550

جدول ۱- قطرهای تجاری و هزینه مربوط به واحد طول لوله در شبکه دو حلقه‌ای (Alperovits and Shamir 1997)

است. اطلاعات تکمیلی این شبکه شامل طول لوله‌ها، حداقل فشار لازم در گره‌های مختلف و همچنین دبی مورد تقاضا در گره‌های این شبکه در پژوهش Kadu et al در سال ۲۰۰۸ در دسترس است. C_{HW} برای تمام لوله‌ها برابر با ۱۳۰ فرض شد. ۱۴ قطر تجاری برای لوله‌های این شبکه وجود دارد که به همراه هزینه واحد طول این لوله‌ها بر حسب روپیه در جدول ۲ آورده شده‌اند. بنابراین با توجه به تعداد لوله‌ها تعداد 14^{34} انتخاب احتمالی برای طراحی این شبکه وجود دارد.

۳- نتایج و بحث

به منظور اجرای الگوریتم‌های CFO و CFONet برای بهینه‌سازی شبکه‌های دو حلقه‌ای و کادو، با استفاده از روش پیشنهادی، ۴۲ پروب اولیه به صورت غیر تصادفی در فضای تصمیم ایجاد شد

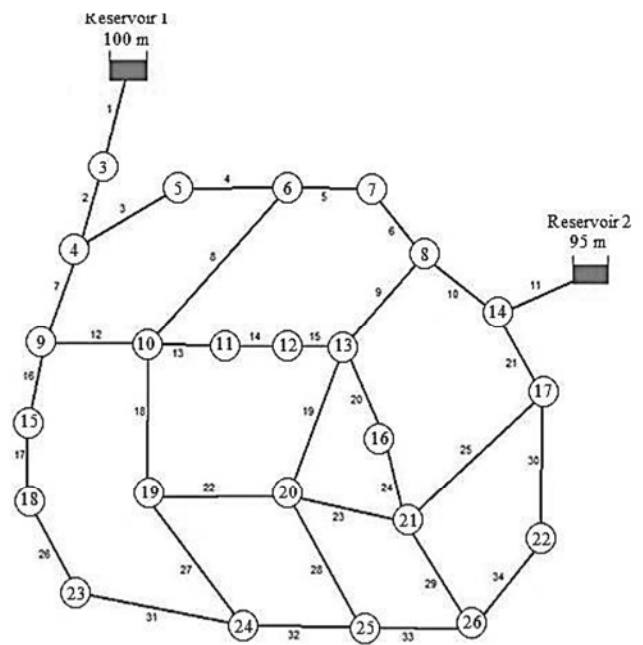


Fig. 3 : Location of the Kadu network design (Kadu et al. 2008)

شکل ۳- جانمایی طرح شبکه کادو

روش پیشنهادی با این روش‌ها وجود ندارد. با شبیه‌سازی طرح بهینه به دست آمده برای شبکه دو حلقه‌ای در نرم‌افزار اپینت، مقدار پارامترهای هیدرولیکی این شبکه در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که در این طرح، محدودیت‌های هیدرولیکی مورد نظر در شبکه در تمامی لوله‌ها و گره‌ها برآورده شده است. نتایج اجرای روش CFO و CFONet به منظور حل شبکه کادو در شکل ۵ نشان داده شده است و از آوردن مقدار مربوط به ۱۰ تکرار اول صرف نظر شده است. همچنین مقایسه پاسخ به دست آمده با بهترین پاسخ‌هایی که برای این شبکه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تصادفی به دست آمده است در جدول ۵ آورده شده است. CFO پس از ۲۵,۴۵۲ مرتبه ارزیابی تابع هدف پاسخ ۲۸۲,۴۷۴,۷۲۰ روپیه را برای هزینه لوله‌های شبکه به دست آورد و نتوانست بیشتر از این آن را کاهش دهد. این مقدار هزینه با بهترین پاسخ‌های موجود در ادبیات بهینه‌سازی این شبکه تفاوت زیادی دارد، به همین دلیل از آوردن نتایج CFO در جدول ۵ صرف نظر شده است. با توجه به جدول ۵، با به‌کارگیری روش CFONet، پس از ۲۵۹,۴۷۶ مرتبه ارزیابی تابع هدف، بهترین هزینه به دست آمده برابر با ۱۲۶,۵۳۵,۹۱۵ روپیه می‌باشد که در مقایسه با نتایج پژوهش‌های گذشته بهبود قابل توجهی داشته است. همان‌طوری که در بخش نتایج شبکه دو حلقه‌ای بیان شد، مقایسه مستقیم تعداد ارزیابی‌های تابع هدف در روش قطعی CFONet با نتایج متناظر در روش‌های تصادفی نمی‌تواند امکان‌پذیر باشد. همچنین الگوریتم پیشنهادی طرح بهینه شبکه دو حلقه‌ای با استفاده از رایانه کیفی هفت هسته‌ای با سرعت 2.8GHz و حافظه چهار گیگابایت با صرف زمانی در حدود ۴۰ دقیقه به دست آمد و این زمان برای شبکه بزرگ‌تر کادو (با تعداد ارزیابی بیشتر) به حدود ۱۴ ساعت رسید. با توجه به قطعی بودن الگوریتم و صرفاً یک

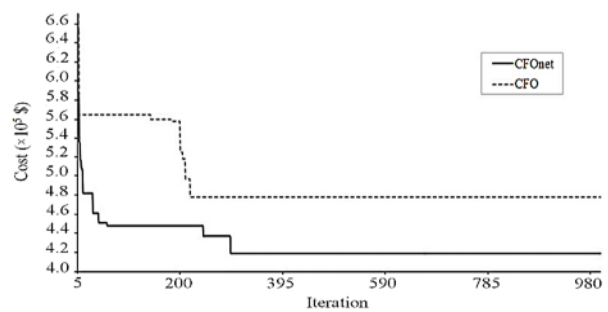


Fig. 4. Convergence graph of CFO and CFONet for the optimization of a double-loop network

شکل ۴- نمودار همگرایی الگوریتم‌های CFO و CFONet برای بهینه‌سازی شبکه دو حلقه‌ای

باشد که موجب می‌شود تمام پروب‌ها به سرعت به سمت مرکز گرانس در فضای تصمیم حرکت کنند و در آنجا متوقف شوند. بنابراین CFO به‌طور اجتناب‌ناپذیری دیگر نمی‌تواند هزینه را بیشتر از این کاهش دهد.

با توجه به شکل ۴، رفتار همگرایی الگوریتم پیشنهادی CFONet در مقایسه با CFO به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است، به طوری که مقدار بهترین جواب به ۴۱۹,۰۰۰ دلار پس از ۱۲,۴۳۲ مرتبه ارزیابی تابع هدف کاهش یافته است. با توجه به جدول ۳، جواب طرح بهینه به دست آمده برای شبکه دو حلقه‌ای در بازه جواب‌های به دست آمده توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی تصادفی در ادبیات این مسئله قرار دارد. با توجه به این که روش CFONet ماهیت قطعی داشته و فقط یک مرتبه اجرا می‌شود، عملکرد این روش به لحاظ تعداد ارزیابی‌های تابع هدف، قابل مقایسه با نتایج روش‌های تصادفی نمی‌باشد. در واقع، روش‌های تصادفی چندین مرتبه اجرا می‌شوند تا بهترین نتیجه به دست آید و از آنجایی که تعداد اجراهای الگوریتم‌های تصادفی اشاره شده در این جدول، به‌طور دقیق مشخص نیست، امکان مقایسه هزینه محاسباتی

Table 3. Estimated optimum diameters for a double-loop network in different methods

جدول ۳- قطرهای بهینه به دست آمده برای شبکه دو حلقه‌ای با استفاده از روش‌های مختلف

Pipe	Diameter (mm)				
	DE (Suribabu 2010)	PSO (Moghaddam et al. 2013)	SCE (Liong et al. 2004)	CFO	CFONet
1	18	18	18	18	18
2	10	10	10	8	10
3	16	16	16	18	16
4	4	4	4	8	4
5	16	16	16	16	16
6	10	10	10	12	10
7	10	10	10	6	10
8	1	1	1	6	1
Cost (Rs)	419,000	419,000	419,000	478,000	419,000
Evaluations	4,750	3,100	1,091	9,196	12,432

Table 4. Values for the hydraulic parameters in a double-loop network with the corresponding optimum CFONet solutions

جدول ۴- مقدار پارامترهای هیدرولیکی در شبکه دو حلقه‌ای متناظر با جواب بهینه CFONet

Pipe/node	Pressure (m)	Velocity (m/s)	Pipe/node	Pressure (m)	Velocity (m/s)
1	Reservoir	1.90	5	33.80	1.14
2	53.25	1.85	6	30.44	1.10
3	30.46	1.46	7	30.55	1.30
4	43.45	1.12	8	-	0.31

Table 5. Estimated optimum diameters for a Kadu network in different methods

جدول ۵- قطرهای بهینه به دست آمده برای شبکه کادو با استفاده از روش‌های مختلف

Pipe	Diameter (mm)			
	GA (Kadu et al. 2008)	GA-ILP (Haghighi et al. 2011)	PSO (Moghaddam et al. 2018)	CFONet
1	1,000	1,000	900	900
2	900	900	900	900
3	400	400	500	350
4	350	350	250	300
5	150	150	150	150
6	250	250	200	300
7	800	800	900	800
8	150	150	150	150
9	400	400	600	600
10	500	500	700	600
11	1,000	1,000	900	900
12	700	700	700	700
13	800	800	500	500
14	400	400	450	500
15	150	150	150	150
16	500	500	450	500
17	350	350	300	350
18	350	350	450	400
19	150	150	500	500
20	200	150	150	150
21	700	700	600	600
22	150	150	150	150
23	400	450	150	150
24	400	400	400	450
25	700	700	500	500
26	250	250	150	200
27	250	250	350	350
28	200	200	350	250
29	300	300	150	250
30	300	300	300	250
31	200	200	200	150
32	150	150	150	150
33	250	200	200	150
34	150	150	150	150
Cost (Rs)	131,678,935	131,312,815	130,666,043	126,535,915
Evaluations	36,000	4,440	45,150	259,476

کاهش یابد.

۵- قدردانی

به این وسیله از آقای دکتر علی حقیقی عضو هیئت علمی دانشگاه شهید چمران اهواز برای راهنمایی‌های ارزشمندشان سپاسگزاری می‌شود. همچنین نویسندگان از گروه داوری محترم برای مطالعه دقیق این مقاله و ارائه نظرات کلیدی و پیشنهادات سازنده که موجب افزایش کیفیت این مقاله شده است کمال تشکر را دارد.

فرا ابتکاری قطعی به منظور حل مسئله شبکه‌های توزیع آب است. از این رو تنها بهینه‌سازی قطر لوله‌ها در دو شبکه مرجع ثقلی بررسی شده است. بهینه‌سازی شبکه‌های دارای پمپ و سایر تجهیزات شبکه با توابع چند هدفه با استفاده از این روش قطعی در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود. همچنین به نظر می‌رسد در صورت انجام محاسبات مربوط به تحلیل هیدرولیکی شبکه به صورت مستقیم در الگوریتم پیشنهادی و در نتیجه عدم نیاز به اجرای نرم‌افزار هیدرولیکی ایپست و زیربرنامه‌های مربوط به آن در هر مرتبه ارزیابی تابع هدف، زمان محاسباتی این روش در یافتن طرح بهینه شبکه‌های توزیع آب

۶- مراجع

- Afshar, M. H., Afshar, A., Marino, M. A. & Hon, M., 2009, "An iterative penalty method for the optimal design of pipe networks", *International Journal of Civil Engineering*, 7(2), 109-123.
- Alperovits, E. & Shamir, U., 1977, "Design of optimal water distribution systems", *Water Resource. Research*, 13(6), 885-900.
- Briere, F. G., 2014, *Drinking-water distribution, sewage, and rainfall collection*, Presses Internationales Polytechnique, Paris.
- Design Criteria of Urban and Rural Water Supply and Distribution Systems, 2013, Publication No. 117-3, 1st Ed., Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, A project to provide the guidelines and technical criteria of Iran's water industry, Ministry of Energy. 168 pages. (In Persian)
- Ding, D., Qi, D., Luo, X., Chen, J., Wang, X., Du, P. & Guo, Y., 2012, "Convergence analysis and performance of an extended central force optimization algorithm", *Journal of Applied Mathematices Computation*, 219(4), 2246-2259.
- Eusuff, M. M., & Lansey, K. E., 2003, "Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm", *Journal of Water Resource Planning Management*, 129(3), 210-225.
- Formato, R. A., 2007, "Central force optimization: A new metaheuristic with applications in applied electromagnetic", *Journal of Progress in. Electromagnetics Research*, 77 (1), 425-491.
- Formato, R. A., 2009, "Central force optimization: A new gradient-like metaheuristic for multidimensional search and optimization", *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 1(4), 217-238.
- Formato, R. A., 2010a, "Improved CFO algorithm for antenna optimization", *Progress Electromagnetics Research*, 19, 405-425.
- Formato, R. A., 2010b, "Central force optimization applied to the PBM suite of antenna benchmarks", Computing Research Repository. <http://arxiv.org/abs/1003.0221>.
- Haghighi, A. & Ramos, H. M., 2012, "Detection of leakage freshwater and friction factor calibration in drinking networks using central force Optimization", *Water Resource Management*, 26(8), 2347-2363.
- Haghighi, A., Samani, M.V.H. & Samani, M.V. Z., 2011, "GA-ILP method for optimization of water distribution networks", *Water Resource Management*, 25, 1791-1808.
- Kadu, M. S., Gupta, R., & Bhawe, P. R., 2008, "Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space", *Journal of Water Resource Planing Management* 134(2), 147-160.

- Liong, S. & Atiquazzaman, M. D., 2004, "Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution", *J. Inst Eng.*, 44(1), 93-107.
- Liu, Y., & Tian, P., 2015, "A multi-start central force optimization for global optimization", *Journal Applied Soft Computing*, 27, 92-98.
- Moghaddam, A. R., Alizadeh, A., Fardi Hoseini, A. R., Ziaei, A. N. & Fallah Heravi, D., 2013, "The application of an improved particle swarm optimization algorithm in design of water distribution systems", *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 7(3), 389-401. (In Persian)
- Mohammadi-Aghdam, K., Mirzaei, I., Pourmahmood, N. and Pourmahmood-Aghababa, M., 2015, "Application of dynamic mutated particle swarm optimization algorithm to design water distribution networks", *Journal of Water and Wastewater*, 26(4), 88-99. (In Persian)
- Rossman, L.A., 2000, *EPANET 2 User's Manual*, EPA/600/R-00/057.
- Savic, D. A. & Walters, G. A., 1997, "Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks", *Journal of Water Resource Planning, Management*, 123(2), 67-77.
- Schaake, J. & Lai, D., 1969, *Linear programming and dynamic programming –application of water distribution network design*, Report 116. MIT Press: Cambridge, MA.
- Suribabu, C. R., 2010, "Differential evolution algorithm for optimal design of water distribution networks", *Journal of Hydroinform*, 12(1), 66-82.
- Swamee, P. K. & Sharma, A. K., 2008, *Design of water supply pipe networks*, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, N.T.