

بهینه‌سازی شبکه توزیع آب با استفاده از الگوریتم ترکیبی BB-CFO

علی شاکرمی^۱، حسن ترابی پوده^{۲*}، حجت‌اله یونسی^۳ و آزاده جباری^۴

چکیده

بسیاری از پژوهشگران برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع و انتقال آب از نرم‌افزارهایی مانند EPANET بهره می‌گیرند. این فرآیند به تعداد ارزیابی تابع هدف، نرم‌افزار EPANET را فراخوانی می‌کند. در این پژوهش، برای کاهش زمان حل، با استفاده از روش نیوتن رافسون رفتار هیدرولیکی لوله‌ها در متلب شبیه‌سازی شد. برای بهینه‌سازی از الگوریتم‌های بیگ‌بنگ بیگ‌کرانچ (BB-BC) و بهینه‌یابی نیروی مرکزی (CFO) استفاده شد. با ترکیب این دو الگوریتم با یکدیگر و تشکیل الگوریتم BB-CFO عملکردشان ارتقا یافت. بدین ترتیب برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شبکه هانوی با دو حلقه و ۳۴ لوله و شبکه کادو با نه حلقه و ۳۴ لوله انتخاب و پس از کد نویسی هیدرولیک آن‌ها، با استفاده از روش نیوتن رافسون به همراه الگوریتم BB-BC و BB-CFO نتایج تحلیل شد. پس از ۶۳۶۰ بار ارزیابی تابع هدف در شبکه هانوی هزینه ۶,۲۱۰,۷۸۰ دلار برآورد شد. همچنین روش مذکور توانست با ۲۲۸۸۰ بار ارزیابی تابع هدف شبکه کادو به هزینه ۱۳۰,۶۴۵,۸۹۰ روپیه برسد. نتایج نشان داد می‌توان با شناخت توانایی‌های الگوریتم‌های مختلف آن‌ها را ترکیب و الگوریتم با عملکرد بهتری را ایجاد کرد. همچنین می‌توان بدون استفاده از نرم‌افزارهای هیدرولیکی و تنها با استفاده از قوانین حاکم بر هیدرولیک لوله‌ها، آن‌ها را با سرعت بالاتری حل نمود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم BB-BC، بهینه‌سازی، توزیع آب، قطر لوله.

ارجاع: شاکرمی ع.، ترابی پوده ح.، یونسی ح. و جباری آ. ۱۳۹۹. بهینه‌سازی شبکه توزیع آب با استفاده از الگوریتم ترکیبی BB-CFO. مجله پژوهش آب ایران. ۳۸: ۳۳-۴۴.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

۴- دانش‌آموخته گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

* نویسنده مسئول: torabi.ha@lu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۷

مقدمه

این مطالعه نشان داده شده است که این روش می‌تواند در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها برای بهینه‌سازی مطرح شود. همچنین این الگوریتم در بهینه‌سازی سبد سهام استفاده شده است (علی‌نژاد، ۱۳۹۳). تاکنون گزارشی از کاربرد BB-BC در بهینه‌سازی شبکه‌های انتقال آب ارائه نشده است. الگوریتم بهینه‌یابی نیروی مرکزی^۱ (CFO) را فورماتو (۲۰۰۷) معرفی کرد. CFO قادر است که از بهینه‌های محلی فرار کند (فورماتو، ۲۰۰۹). در مورد کاربرد CFO در سیستم‌های توزیع و انتقال آب نیز مطالعاتی انجام شده است. حقیقی و راموس (۲۰۱۲) روش CFO را برای بهینه‌سازی نشت‌یابی و واسنجی شبکه لوله‌ها به کار برده‌اند. نتایج نشان داد که CFO عملکرد قابل توجهی در حل مسائل تشخیص نشت در لوله‌ها دارد. جباری و همکاران (۱۳۹۶) الگوریتم اصلاح شده CFO را برای حل شبکه‌های توزیع آب به کار گرفتند. روش پیشنهادی آنان نتایج خوبی برای حل مسئله آبرسانی نشان داد. بسیاری از پژوهشگران برای حل شبکه‌های انتقال آب از نرم افزارهایی مانند اپینت بهره می‌گیرند و در نتیجه زمان بسیاری صرف این روند می‌شود؛ اما در پژوهش حاضر در نظر است با استفاده از روش نیوتن رافسون رفتار هیدرولیکی لوله‌ها در متلب شبیه‌سازی شود. در ادامه به کمک الگوریتم‌های CFO و BB-BC، الگوریتم BB-CFO ابداع و عملکرد آن در حل شبکه‌های هانوی و کادو بررسی خواهد شد.

مواد و روش‌ها

هدف از این پژوهش، حل شبکه‌های آبرسانی به گونه‌ای است که هزینه قطر لوله‌ها حداقل و هیدرولیک لوله‌ها شبیه‌سازی شود. از آنجایی که الگوریتم‌ها توانایی تحلیل شبکه را ندارند؛ لذا با استفاده از روش نیوتن رافسون هیدرولیک قطرهای انتخاب شده از الگوریتم‌ها، شبیه‌سازی شده و در صورتی که سرعت و فشار آن‌ها در محدوده مجاز باشد، قطرها پذیرفته خواهند شد.

شبکه‌های توزیع و انتقال آب

خطوط انتقال و شبکه‌های توزیع آب وظیفه رساندن آب به مصرف‌کنندگان را بر عهده دارند. منظور از تحلیل هیدرولیکی محاسبه دبی و فشار در شبکه است. قوانین

تقریباً ۸۰ تا ۸۵ درصد از کل هزینه‌های تأمین آب، متعلق به انتقال و شبکه توزیع آب است (اسوامی و شارما، ۲۰۰۸). در دهه‌های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه بهینه‌سازی طرح شبکه‌های توزیع آب انجام شده است. اولین بار شایک و لایروش برنامه‌ریزی خطی را برای یافتن قطرهای بهینه لوله‌ها در شبکه توزیع آب نیویورک ارائه دادند (شایک ولای، ۱۹۶۹). از آنجایی که مسئله بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب، یک مسئله غیرخطی است (ساویک و والترز، ۱۹۹۷)، به همین دلیل آلپرویتز و شمیر (۱۹۷۷)؛ پیچیدگی‌های مسئله بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب را کاهش دادند. همچنین برنامه‌ریزی پویا نیز برای حل این مسئله استفاده شد (یاتس و همکاران، ۱۹۸۴). در چند دهه اخیر پژوهشگران برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب به استفاده از الگوریتم‌ها روی آورده‌اند که می‌توان الگوریتم‌های ژنتیک^۱ (GA) (وو ووالسکی، ۲۰۰۵)، بهینه‌سازی کلونی مورچگان^۲ (ACO) (زکینو همکاران، ۲۰۰۵)، شبیه‌سازی تبرید^۳ (SA) (کونا و سوزا، ۱۹۹۹)، جست‌جوی هارمونی^۴ (HS) (جیم، ۲۰۰۶)، تفاضلی^۵ (DE) (سوریابابو، ۲۰۱۰)، ازدحام ذرات^۶ (PSO) (مقدم و همکاران، ۱۳۹۲)، گروه ذرات دینامیکی جهشی^۷ (DMPSO) (محمدی اقدم و همکاران، ۱۳۹۴) را نام برد. الگوریتم بیگ بنگ بیگ کرانچ^۸ (BB-BC) را اولین بار ایرول و اکسین (۲۰۰۵) ارائه دادند. کوباسار و همکاران (۲۰۰۸) از BB-BC به همراه مدل‌های فازی جهت استفاده از مدل سیستم معکوس استفاده کردند. آلاتاس (۲۰۱۱) این الگوریتم را توسعه داد و برای توابع هدف پنج‌مارک آن را مقایسه کرد. نتایج نشان داد که الگوریتم توسعه داده شده، نتایج بهتری را در مقایسه با الگوریتم اصلی ارائه می‌کند. کمپ و هاک (۲۰۱۳) از BB-BC در طراحی قاب‌های بتن مسلح استفاده کردند. نتایج نشان داد این الگوریتم با سرعت پذیرفتنی قادر به یافتن جواب بهینه است. حسسبی و کاظم‌زاده (۲۰۱۲) برای طراحی کد بیس قاب‌های فلزی از این الگوریتم بهره گرفته‌اند. در

1- Genetic Algorithm

2- Ant Colony

3- Simulated Annealing

4- Harmony Search

5- Differential Evolution

6- Particle Swarm Optimization

7- Dynamic Mutated Particle Swarm Optimization

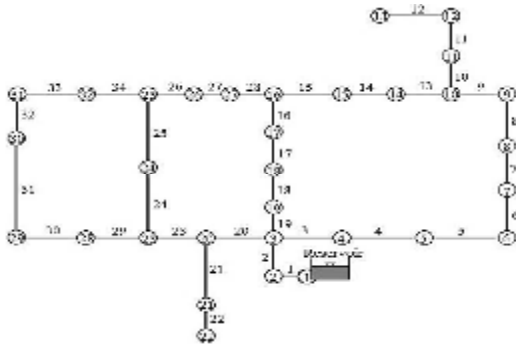
8- Big Bang-Big Crunch

9- Central Force Optimization

با قرار دادن $[x_i + dx_i]$ به جای x_i های جدید می توان کار را ادامه داد تا هنگامی که dx_i ها به صفر یا دقت مورد نظر نزدیک شود که در آن موقع x_i ها جواب های معادلات می شوند. همگرایی روش نیوتن-رافسون از درجه ۲ است و بنابراین خیلی سریع به جواب مورد نظر با دقت لازم می توان دست یافت.

شبکه هانوی

شبکه هانوی را فوجیوارا و خانگ (۱۹۹۰) مطابق شکل ۱ ارائه داده اند. حداقل فشار لازم در تمامی گره ها برابر با ۳۰ متر در نظر گرفته می شود. حداقل سرعت در لوله ها ۰/۱ متر بر ثانیه است.



شکل ۱- نقشه شماتیک شبکه توزیع آب هانوی (فوجیوارا و خانگ، ۱۹۸۷)

طول لوله های شبکه در جدول ۱ آورده شده است. قطر تجاری برای این شبکه وجود دارد (۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۴، ۳۰ و ۴۰ اینچ). هزینه لوله مربوط به هر قطر با استفاده از معادله ذیل محاسبه می شود:

$$C_i = 1.1 \times L_i \times (D_i)^{1.5} \quad (5)$$

که در آن C_i هزینه، L_i طول (متر) و D_i قطر لوله (اینچ) است. دبی گره ها جدول ۲ آورده شده است.

شبکه کادو

شبکه کادو را اولین بار توسط کادو و همکاران (۲۰۰۸) معرفی کردند. این شبکه دارای ۲۶ گره، ۳۴ لوله و ۹ حلقه است. جانمایی طرح شبکه کادو در شکل ۲ نشان داده شده است. اطلاعات تکمیلی این شبکه شامل طول لوله ها در جدول ۳ آورده شده است. ۱۴ قطر تجاری برای لوله های این شبکه به همراه هزینه واحد طول این لوله ها

هیدرولیکی حاکم بر شبکه های توزیع آب عبارتند از: معادله پیوستگی و معادله انرژی. در تحلیل شبکه محدودیت های سرعت جریان و فشار وجود دارد که با توجه به هر شبکه متفاوت است. با داشتن اطلاعات اولیه می توان به تحلیل شبکه پرداخت.

تحلیل شبکه های آبرسانی

در شبکه های آبرسانی قوانین کلی به صورت زیر بیان می شوند: (۱) جمع جبری تمام دبی هایی که از هر گره خارج و یا داخل می شوند، باید برابر صفر شود. (۲) در هر حلقه مجموع جبری افت فشار لوله های آن حلقه، برابر صفر است. با نوشتن این دو قانون برای شبکه به تعداد لوله ها معادله خطی و غیرخطی و به همان تعداد مجهول خواهیم داشت که می بایست به کمک روش های حل معادلات غیر خطی تحلیل شوند.

روش نیوتن رافسون

روش نیوتن رافسون را می توان برای معادلات H یا Q استفاده کرد. در صورتی که x ریشه معادله $f(x)=0$ در نظر گرفته شود می توان با کمک dx که به x افزوده می شود، به ریشه واقعی دست یافت:

$$dx = -\frac{f(x)}{\frac{df}{dx}} \quad (1)$$

به همین ترتیب، در صورتی که N معادله N مجهول غیر خطی به صورت زیر موجود باشد:

$$\begin{cases} f_1(x_1, \dots, x_N) = 0 \\ f_2(x_1, \dots, x_N) = 0 \\ \dots \\ f_N(x_1, \dots, x_N) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

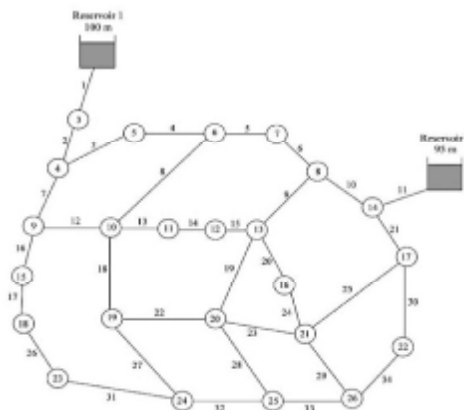
و x_1, x_2, \dots, x_N جواب های تقریبی معادلات هستند. سپس x_1, x_2, \dots, x_N به کمک دستگاه N معادله خطی زیر به دست می آیند:

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_N) + \sum_{j=1}^N \frac{\partial f_i}{\partial x_j} dx_j = 0 \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

$$[J] \times [dx] = -[f(x)] \quad (4)$$

بر حسب روپیه^۱ (Rs) در جدول ۴ آورده شده‌اند. سایر اطلاعات در جدول ۵ آورده شده است. ضریب هیزن-ویلیامز برابر با ۱۳۰ فرض می‌شود. حداقل سرعت در لوله‌ها ۰/۱ متر بر ثانیه است.



شکل ۲- جانمایی طرح شبکه کادو (کادو و همکاران، ۲۰۰۸)

جدول ۱- قطرهای مربوط به طول لوله‌های شبکه هانوی (فوجیوارا و خانگ، ۱۹۸۷)

شماره لوله	طول لوله (متر)	شماره لوله	طول لوله (متر)	شماره لوله	طول لوله (متر)
۱	۱۰۰	۱۳	۸۰۰	۲۵	۱۰۳۰۰
۲	۱۰۴۵۰	۱۴	۵۰۰	۲۶	۸۵۰
۳	۹۰۰	۱۵	۵۵۰	۲۷	۳۰۰
۴	۱۰۱۵۰	۱۶	۲۰۷۳۰	۲۸	۷۵۰
۵	۱۰۴۵۰	۱۷	۱۰۷۵۰	۲۹	۱۰۵۰۰
۶	۴۵۰	۱۸	۸۰۰	۳۰	۲۰۰۰۰
۷	۸۵۰	۱۹	۴۰۰	۳۱	۱۰۶۰۰
۸	۸۵۰	۲۰	۲۰۲۰۰	۳۲	۱۵۰
۹	۸۰۰	۲۱	۱۰۵۰۰	۳۳	۸۶۰
۱۰	۹۵۰	۲۲	۵۰۰	۳۴	۹۵۰
۱۱	۱۰۲۰۰	۲۳	۲۰۶۵۰		
۱۲	۳۵۰۰	۲۴	۱۰۲۳۰		

جدول ۳- اطلاعات طول لوله‌ها (بر حسب متر) در شبکه کادو (کادو و همکاران، ۲۰۰۸)

شماره لوله	طول لوله (متر)	شماره لوله	طول لوله (متر)	شماره لوله	طول لوله (متر)
۱	۳۰۰	۱۳	۳۱۰	۲۵	۱۰۰۸۰
۲	۸۲۰	۱۴	۵۰۰	۲۶	۷۵۰
۳	۹۴۰	۱۵	۱۰۹۶۰	۲۷	۹۰۰
۴	۷۳۰	۱۶	۹۰۰	۲۸	۶۵۰
۵	۱۰۶۲۰	۱۷	۸۵۰	۲۹	۱۰۵۴۰
۶	۶۰۰	۱۸	۶۵۰	۳۰	۷۳۰
۷	۸۰۰	۱۹	۷۶۰	۳۱	۱۰۱۷۰
۸	۱۰۴۰۰	۲۰	۱۰۱۰۰	۳۲	۱۰۶۵۰
۹	۱۰۱۷۵	۲۱	۶۶۰	۳۳	۱۰۳۲۰
۱۰	۷۵۰	۲۲	۱۰۱۷۰	۳۴	۳۰۲۵۰
۱۱	۲۱۰	۲۳	۹۸۰		
۱۲	۷۰۰	۲۴	۶۷۰		

جدول ۲- دبی تقاضا (بر حسب لیتر بر ثانیه) در گره‌های شبکه هانوی (فوجیوارا و خانگ، ۱۹۸۷)

شماره گره	قطر (میلی‌متر)	شماره گره	قطر (میلی‌متر)	شماره گره	قطر (میلی‌متر)
۱	-	۱۲	۱۵۵/۵۶	۲۳	۲۹۰/۲۸
۲	۲۴۷/۲۲	۱۳	۲۶۱/۱۱	۲۴	۲۲۷/۷۸
۳	۲۳۶/۱۱	۱۴	۱۷۰/۸۳	۲۵	۴۷/۲۲
۴	۳۶/۱۱	۱۵	۷۷/۷۸	۲۶	۲۵۰/۰۰
۵	۲۰۱/۳۹	۱۶	۸۶/۱۱	۲۷	۱۰۲/۷۸
۶	۲۷۹/۱۷	۱۷	۲۴۰/۲۸	۲۸	۸۰/۵۶
۷	۳۷۵/۰۰	۱۸	۳۷۳/۶۱	۲۹	۱۰۰/۰۰
۸	۱۵۲/۷۸	۱۹	۱۶/۶۷	۳۰	۱۰۰/۰۰
۹	۱۴۵/۸۳	۲۰	۳۵۴/۱۷	۳۱	۲۹/۱۷
۱۰	۱۴۵/۸۳	۲۱	۲۵۸/۳۳	۳۲	۲۲۳/۶۱
۱۱	۱۳۸/۸۹	۲۲	۱۳۴/۷۲		

جدول ۴- قطرهای تجاری و هزینه مربوط به واحد طول لوله‌ها در شبکه کادو (کادو و همکاران، ۲۰۰۸)

قطر (میلی‌متر)	هزینه (Rs)	قطر (میلی‌متر)	هزینه (Rs)
۱۵۰	۱۰۱۱۵	۵۰۰	۶۰۰۹۲
۲۰۰	۱۰۶۰۰	۶۰۰	۸۰۱۸۹
۲۵۰	۲۰۱۵۴	۷۰۰	۱۰۰۶۷۰
۳۰۰	۲۰۷۸۰	۷۵۰	۱۱۰۸۷۴
۳۵۰	۳۰۴۷۵	۸۰۰	۱۳۰۲۶۱
۴۰۰	۴۰۲۵۵	۹۰۰	۱۶۰۱۵۱
۴۵۰	۵۰۱۷۲	۱۰۰۰	۱۹۰۳۹۵

جدول ۵- حداقل فشار لازم و دبی مورد تقاضا در گره‌های شبکه کادو (تقاضا بر حسب مترمکعب در دقیقه)

شماره گره	میزان (متر) حداقل فشار	تقاضا	شماره گره	میزان (متر) حداقل فشار	تقاضا
۱	۱۰۰	مخزن ۱	۱۴	۸۲	۱۰/۶
۲	۹۵	مخزن ۲	۱۵	۸۵	۱۰/۵
۳	۸۵	۱۸/۴	۱۶	۸۲	۹/۰
۴	۸۵	۴/۵	۱۷	۸۲	۶/۸
۵	۸۵	۶/۵	۱۸	۸۵	۳/۴
۶	۸۵	۴/۲	۱۹	۸۲	۴/۶
۷	۸۲	۳/۱	۲۰	۸۲	۱۰/۶
۸	۸۲	۶/۲	۲۱	۸۲	۱۲/۶
۹	۸۵	۸/۵	۲۲	۸۰	۵/۴
۱۰	۸۵	۱۱/۵	۲۳	۸۲	۲/۰
۱۱	۸۵	۸/۲	۲۴	۸۰	۴/۵
۱۲	۸۵	۱۳/۶	۲۵	۸۰	۳/۵
۱۳	۸۲	۱۴/۸	۲۶	۸۰	۲/۲

الگوریتم BB-BC

الگوریتم BB-BC را اولین بار ایروول و اکسین (۲۰۰۵) ارائه دادند. این الگوریتم از تکامل یکی از تئوری‌های فراگیر فیزیک و اخترشناسی الهام گرفته شده است (دسای و پرازا، ۲۰۱۳). الگوریتم BB-BC به‌طور خلاصه از این گام‌ها تشکیل شده است: تولید جواب اولیه به‌صورت تصادفی، محاسبه تابع تناسب برای همه جواب‌ها، پیدا کردن مرکز چگال از معادله (۶) یا انتخاب عضو با بهترین مقدار تناسب به‌عنوان مرکز چگال، محاسبه جواب‌های جدید حول مرکز چگال با استفاده از توزیع نرمال که به‌صورت زیر فرموله می‌شود و در انتها برگشت به گام ۲ تا زمانی که شرط پایان الگوریتم تحقق یابد.

$$\mathbf{X}_c = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f_i} \mathbf{X}_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f_i}} \quad (6)$$

$$\mathbf{X}_{new} = \mathbf{X}_c + \text{lr}/k \quad (7)$$

در این معادله، \mathbf{X}_i نقطه‌ای است که در فضای n بعدی تولید می‌شود. f_i مقدار تابع تناسب نقطه نام و N جمعیت در فاز BB است. \mathbf{X}_c مرکز چگال، l حد بالای پارامتر، r عدد تصادفی نرمال و k گام تکرار است.

الگوریتم CFO

الگوریتم CFO را اولین بار فورماتو (۲۰۰۷) مطرح کرد. در این الگوریتم ذرات (پروپ‌ها) در فضای مسأله پرواز

می‌کنند و به جست‌وجوی جواب بهینه می‌پردازند. هر پروپ با موقعیت R در گام زمانی شتاب a را تحت تأثیر نیروهای گرانشی ایجاد شده به وسیله سایر پروپ‌ها تجربه می‌کند. معادله شتاب به‌صورت زیر است:

$$\mathbf{a}_{j-1}^p = G \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^{N_p} U \left(\mathbf{M}_{j-1}^k - \mathbf{M}_{j-1}^p \right) \cdot \left(\mathbf{M}_{j-1}^k - \mathbf{M}_{j-1}^p \right)^\alpha \frac{\left(\mathbf{R}_{j-1}^k - \mathbf{R}_{j-1}^p \right)}{\left\| \mathbf{R}_{j-1}^k - \mathbf{R}_{j-1}^p \right\|^\beta} \quad (8)$$

که در آن N_p تعداد پروپ‌ها، p شماره پروپ، z گام زمانی محاسبات و α ، β و G ثابت‌های CFO هستند. M مقدار تابع هدف در گام زمانی $z-1$ است و U تابع پله‌ای یکه است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$U(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \geq 0 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

فاصله بین موقعیت‌های پروپ p و k است. موقعیت جدید پروپ به‌صورت زیر است:

$$\mathbf{R}_j^p = \mathbf{R}_{j-1}^p + \frac{1}{2} \mathbf{a}_{j-1}^p \Delta t^2, \quad j \geq 1 \quad (10)$$

که در آن Δt فاصله زمانی گام‌هاست و مقدار آن یک در نظر گرفته شده است.

الگوریتم ترکیبی BB-CFO

الگوریتم CFO باوجود توانایی‌های بالا دارای عیب‌هایی در محاسبه شتاب است. از طرف دیگر الگوریتم BB-BC باوجود موفقیت در مسائل بهینه‌سازی، دچار ضعف‌هایی است. نقطه قوت الگوریتم BB-BC استفاده از بهترین جواب در هر تکرار و عدم وجود پارامترهای ثابت در الگوریتم است. ضعف‌های دو الگوریتم به‌گونه‌ای است که کاملاً مکمل یکدیگر هستند و سبب مطرح شدن الگوریتم ترکیبی BB-CFO شدند. در الگوریتم مذکور موقعیت ذرات به‌صورت زیر اصلاح شد:

$$\mathbf{X}_{new} = \mathbf{X}_c + a \quad (11)$$

که در این معادله، \mathbf{X}_c مرکز چگال و a شتاب ذره است. برای نرمال‌سازی شتاب معادله زیر پیشنهاد شد:

$$\text{nesbat} = \frac{\text{abs}(\text{normalize}_{\max} - \text{normalize}_{\min})}{(\text{abs}(a_{\max} - a_{\min}))} \quad (12)$$

$$\text{if } a \sim 0$$

$$a = \text{normalize}_{\min} + (a \times \text{nesbat})$$

$$\text{end}$$

ترکیبی BB-CFO و استفاده از روش نیوتن رافسون برنامه اجرا شد. ابتدا آنالیز حساسیت روی جمعیت و میزان جهش صورت گرفت که نتایج آن در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است. مطابق آن، بهترین نتیجه به ازای جمعیت ۱۵ و میزان جهش ۰/۰۵ مشاهده شد. الگوریتم BB-CFO در تکرار ۴۲۴ با جمعیت ۱۵ به عدد ۶,۲۱۰,۷۸۰ رسید. شکل ۳ نتایج الگوریتم‌های BB-BC و BB-CFO را برای شبکه هانوی نشان می‌دهد. نتایج قطره‌های بهینه به دست آمده از الگوریتم‌های مختلف به همراه الگوریتم BB-CFO در جدول ۸ نشان داده شده است. در این جدول نتایج حاصل از الگوریتم‌های GA, ILP, GA, DE, PSO, SCE و CFOnet به همراه BB-CFO مقایسه شده است. الگوریتم BB-CFO با استفاده از ۶۳۶۰ بار ارزیابی تابع هدف به بهینه دست یافته است. تفاوت عمده الگوریتم حاضر با سایر تحقیقات، حل معادلات شبکه در تابع هدف الگوریتم است. بنابراین زمان اجرای برنامه بسیار کمتر از اجرای برنامه به کمک نرم‌افزارهایی مانند ایپنت است. جداول ۹ و ۱۰ مقادیر پارامترهای هیدرولیکی شبکه هانوی متناظر با جواب بهینه BB-CFO را نشان می‌دهند.

حل شبکه کادو

در بهترین حالت هزینه BB-BC برای شبکه کادو ۲۲۲,۰۸۷,۵۴۰ روپیه به دست آمد. در ادامه BB-CFO اجرا شد. ابتدا آنالیز حساسیت روی جمعیت و میزان جهش انجام شده که نتایج آن در جداول ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. مطابق آن بهترین، نتیجه به ازای جمعیت ۱۰ و میزان جهش ۰/۰۵ مشاهده شد. الگوریتم BB-CFO در تکرار ۲۲۸۸ با جمعیت ۱۰ به عدد ۱۳۰,۶۴۵,۸۹۰ رسید. جداول ۱۳ و ۱۴ نتایج فشار و سرعت قطره‌های به دست آمده از BB-CFO را توسط روش نیوتن رافسون را نشان می‌دهد. مطابق آن تمامی فشارها در محدوده مجاز قرار گرفته‌اند. نتایج قطره‌های بهینه به دست آمده از الگوریتم‌های مختلف به همراه BB-CFO در جدول ۱۵ نشان داده شده است. در این جدول نتایج حاصل از الگوریتم‌های GA, ILP, GA, DE, PSO و CFOnet به همراه BB-CFO مقایسه شده است. الگوریتم BB-CFO با استفاده از ۲۲۸۸۰ بار ارزیابی تابع هدف به بهینه دست یافته است.

که در آن $normalize_{max}$ و $normalize_{min}$ به ترتیب حد بالا و حد پایین شتاب نرمال شده است. a_{max} و a_{min} به ترتیب ماکزیمم و مینیمم شتاب ذرات است. از ضعف‌های الگوریتم‌ها، گرفتار شدن در بهینه موضعی است که برای خروج ذرات از بهینه موضعی؛ می‌توان از جهش استفاده کرد. در معادله ارائه شده در مقاله حاضر، تنها یک بُعد از ذره تغییر می‌کند. ابتدا شماره پروب (M_y) و شماره بُعد (M_x) به صورت تصادفی انتخاب و سپس یک مقدار به موقعیت قبلی اضافه می‌شود. تعداد جهش از معادله (۱۳) قابل محاسبه که در آن mutation درصد جهش است.

$$N_{mut} = \left(\frac{mutation}{100} \right) \times N_p \times N_d \quad (13)$$

گام‌های الگوریتم BB-CFO به‌طور خلاصه عبارتند از: گام اول تولید N جواب اولیه به صورت تصادفی با توجه به محدودیت‌های فضای جست‌وجو. گام دوم، محاسبه تابع تناسب برای همه جواب‌ها. گام سوم، پیدا کردن مرکز چگال که برابر است با متغیری که بهترین مقدار تابع هدف را دارد. گام چهارم، محاسبه جواب‌های جدید با استفاده از شتاب محاسبه شده با CFO. گام پنجم، محاسبه مجدد تابع هدف بر اساس موقعیت جدید. گام ششم، به روز رسانی و نرمال‌سازی شتاب با استفاده از معادله (۱۲). گام هفتم، اعمال جهش. گام هشتم، رفتن به گام سوم تا زمانی که شرط پایان الگوریتم تحقق یابد.

نتایج و بحث

در تحقیق حاضر از نرم‌افزارهای رایج در شبیه‌سازی هیدرولیک لوله‌ها استفاده نشده است و به جای آن، با استفاده از روش نیوتن رافسون، معادلات شبکه حل شد. بدین ترتیب روش نیوتن رافسون برای شبکه هانوی و کادو نوشته شد. برای بررسی جواب‌های به دست آمده از تابع جریمه به صورت ضربی در تابع هدف استفاده شد. برای هر دو شبکه آنالیز حساسیت روی جمعیت و میزان جهش صورت گرفت. نتایج به دست آمده از الگوریتم BB-CFO با الگوریتم BB-BC و سایر الگوریتم‌هایی که دیگر پژوهشگران به کمک آن‌ها دو شبکه مذکور را حل کرده‌اند مقایسه شد.

حل شبکه هانوی

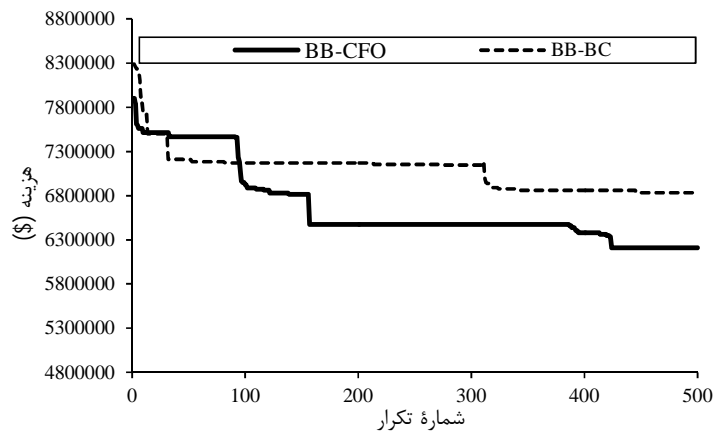
برای شبکه هانوی با استفاده از BB-BC در بهترین حالت هزینه ۶۸۳۱۶۷۹ دلار به دست آمد. با داشتن الگوریتم

جدول ۶- هزینه شبکه‌هائوی به ازای میزان جمعیت‌های مختلف

جمعیت	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
هزینه	۷,۱۲۴,۳۴۹	۶,۷۶۹,۴۸۳	۶,۴۴۶,۴۵۲	۶,۴۷۵,۴۴۲	۷,۱۱۶,۹۴۸	۶,۸۵۴,۸۶۸

جدول ۷- هزینه شبکه‌هائوی به ازای میزان جهش‌های مختلف

نرخ جهش	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۱	۰/۲
تابع هدف	۶,۹۱۶,۷۹۳	۶,۵۸۳,۹۱۲	۶,۴۳۰,۱۱۲	۶,۶۲۷,۳۰۳	۷,۳۲۱,۴۵۹	۷,۰۸۵,۹۶۳



شکل ۳- نتایج اجرای الگوریتم‌های BB-CFO و BB-BC برای شبکه‌هائوی

جدول ۸- قطرهای بهینه به دست آمده برای شبکه‌هائوی با استفاده از روش‌های مختلف

لوله	قطر (اینچ)							
	BB-CFO	CFOnet	GA-ILP	DE	PSO	SCE	SA	GA
۱	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۲	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۳	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۴	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۵	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۶	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۷	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۸	۴۰	۳۰	۴۰	۴۰	۴۰	۳۰	۴۰	۴۰
۹	۴۰	۳۰	۳۰	۴۰	۴۰	۳۰	۴۰	۴۰
۱۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
۱۱	۲۴	۳۰	۳۰	۲۴	۲۴	۳۰	۲۴	۲۴
۱۲	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴
۱۳	۱۶	۱۲	۱۶	۲۰	۲۰	۱۶	۲۰	۲۰
۱۴	۱۲	۱۲	۱۲	۱۶	۱۶	۱۲	۱۶	۱۶
۱۵	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
۱۶	۱۲	۲۰	۱۶	۱۲	۱۲	۲۴	۱۲	۱۲
۱۷	۱۶	۲۴	۲۰	۱۶	۱۶	۳۰	۱۶	۱۶
۱۸	۲۴	۳۰	۲۴	۲۴	۲۰	۳۰	۲۰	۲۰
۱۹	۲۰	۳۰	۲۴	۲۰	۲۰	۳۰	۲۰	۲۰
۲۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۲۱	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
۲۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
۲۳	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۳۰	۴۰	۴۰

ادامه جدول ۸- قطرهای بهینه به دست آمده برای شبکه هانوی با استفاده از روش‌های مختلف

قطر (اینچ)								لوله
BB-CFO	CFOnet	GA-ILP	DE	PSO	SCE	SA	GA	
۴۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۲۴
۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۲۴	۳۰	۳۰	۲۵
۲۰	۱۶	۲۰	۲۰	۲۰	۱۲	۲۰	۲۰	۲۶
۱۶	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۲۰	۱۲	۱۲	۲۷
۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۲۴	۱۲	۱۲	۲۸
۲۰	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۲۹
۱۶	۱۲	۱۲	۱۲	۱۶	۱۶	۱۲	۱۶	۳۰
۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۳۱
۱۲	۱۶	۱۶	۱۶	۱۲	۱۶	۱۶	۱۲	۳۲
۱۲	۱۶	۲۰	۱۶	۱۶	۲۰	۱۶	۱۶	۳۳
۲۰	۲۰	۲۴	۲۴	۲۰	۲۴	۲۴	۲۰	۳۴
۶,۲۱۰,۷۸۰	۶,۱۹۵,۲۱۸	۶,۱۹۰,۰۰۰	۶,۰۸۱,۰۸۷	۶,۰۹۳,۴۷۰	۶,۲۲۰,۰۰۰	۶,۰۵۶,۰۰۰	۶,۰۷۳,۰۰۰	هزینه (\$)
۶,۳۶۰	۱۵۷,۰۸۰	۱,۳۲۰	۴۸,۷۲۴	۶,۶۰۰	۲۵,۴۰۲	۵۳,۰۰۰	۱,۰۰۰,۰۰۰	تعداد ارزایی‌ها

جدول ۹- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی شبکه‌ی هانوی متناظر با جواب بهینه BB-CFO

گره	فشار (متر)	گره	فشار (متر)	گره	فشار (متر)	گره	فشار (متر)
۱	مخزن	۹	۴۰/۹۶	۱۷	۳۲/۵۵	۲۵	۳۷/۴۲
۲	۹۷/۱۰	۱۰	۴۰/۰۵	۱۸	۴۹/۲۹	۲۶	۳۲/۰۷
۳	۶۱/۱۸	۱۱	۳۸/۴۷	۱۹	۵۴/۵۲	۲۷	۳۱/۲۲
۴	۵۶/۶۵	۱۲	۳۵	۲۰	۴۹/۲۹	۲۸	۳۹/۰۱
۵	۵۱/۰۴	۱۳	۳۰/۷۴	۲۱	۳۹/۸۲	۲۹	۳۲/۷۴
۶	۴۵/۱۶	۱۴	۳۳	۲۲	۳۴/۶	۳۰	۳۰/۰۹
۷	۴۳/۸۰	۱۵	۳۰/۴۸	۲۳	۴۲/۵۳	۳۱	۳۰/۳۵
۸	۴۲/۲۱	۱۶	۳۰/۴۰	۲۴	۴۱/۱۲	۳۲	۳۳/۷۲

جدول ۱۰- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی شبکه‌ی هانوی متناظر با جواب بهینه BB-CFO

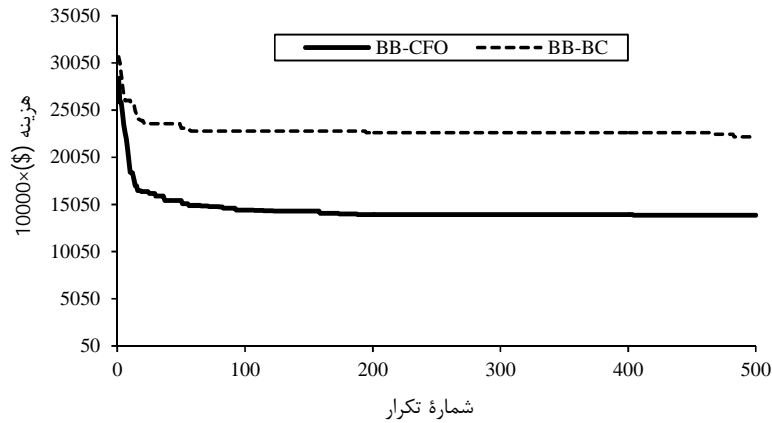
لوله	سرعت (متر بر ثانیه)	لوله	سرعت (متر بر ثانیه)	لوله	سرعت (متر بر ثانیه)	لوله	سرعت (متر بر ثانیه)
۱	۶/۸۳	۱۰	۱/۲۲	۱۹	۳/۲۸	۲۸	۱/۹۴
۲	۶/۵۳	۱۱	۱/۴۳	۲۰	۲/۷۶	۲۹	۰/۵۴
۳	۲/۶۶	۱۲	۰/۸۹	۲۱	۱/۹۴	۳۰	۱/۱۴
۴	۲/۶۱	۱۳	۲/۰۲	۲۲	۱/۸۵	۳۱	۱/۱۵
۵	۲/۳۶	۱۴	۱/۲۵	۲۳	۱/۸۴	۳۲	۰/۶۸
۶	۲/۰۲	۱۵	۰/۱۸	۲۴	۱/۲	۳۳	۰/۶۹
۷	۱/۵۶	۱۶	۰/۴۶	۲۵	۱/۱۴	۳۴	۰/۶۹
۸	۱/۳۷	۱۷	۲/۱۱	۲۶	۱/۶۳		
۹	۱/۱۹	۱۸	۲/۲۲	۲۷	۱/۹۴		

جدول ۱۱- هزینه شبکه کادو به ازای جمعیت مختلف

جمعیت	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
تابع هدف	۱۴۸,۱۹۳,۸۰۵	۱۶۵,۱۲۸,۲۵۵	۱۶۴,۰۷۲,۵۵۵	۱۵۹,۱۳۱,۷۲۵	۱۸۳,۸۸۴,۳۰۵	۲۰۸,۹۹۸,۲۸۵

جدول ۱۲- هزینه شبکه کادو به ازای میزان جهش‌های مختلف

نرخ جهش	۰/۱	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۱	۰/۲
تابع هدف	۲۰۸,۹۹۸,۲۸۵	۱۵۹,۱۳۱,۷۲۵	۱۴۸,۷۰۰,۸۰۵	۱۷۰,۰۴۹,۴۵۵	۱۹۶,۷۸۳,۱۴۵	۲۲۰,۲۲۷,۶۷۵



شکل ۴- نتایج اجرای الگوریتم‌های BB-CFO و BB-BC برای شبکه کادو

جدول ۱۳- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی در شبکه کادو متناظر با جواب بهینه BB-CFO

گره	فشار (متر)	گره	فشار (متر)	گره	فشار (متر)	گره	فشار (متر)
۱	مخزن ۱	۸	۸۸/۰۶	۱۵	۸۷/۶۸	۲۲	۸۴/۴۳
۲	مخزن ۲	۹	۹۲/۶۹	۱۶	۸۱/۵۹	۲۳	۸۱/۹
۳	۹۸/۶۳	۱۰	۸۹/۱۲	۱۷	۸۹۲/۱۲	۲۴	۸۲/۵۸
۴	۹۵/۹۲	۱۱	۸۸/۷۴	۱۸	۸۵/۶۲	۲۵	۸۰/۴۷
۵	۸۷/۳	۱۲	۸۴/۷۱	۱۹	۸۴/۷۶	۲۶	۸۰/۲۴
۶	۸۴/۸۹	۱۳	۸۲/۱۵	۲۰	۸۱/۹۷		
۷	۸۱/۷۶	۱۴	۹۳/۴۲	۲۱	۸۵/۹۳		

جدول ۱۴- پارامترهای هیدرولیکی در شبکه کادو متناظر با جواب بهینه BB-CFO (سرعت بر حسب متر بر ثانیه)

لوله	سرعت	لوله	سرعت	لوله	سرعت	لوله	سرعت
۱	۲/۴۸	۱۰	۲/۰۴	۱۹	۰/۱۵	۲۸	۰/۸
۲	۲/۰۸	۱۱	۲/۷۱	۲۰	۰/۲۳	۲۹	۰/۸۴
۳	۱/۸۷	۱۲	۲/۲	۲۱	۲/۱۸	۳۰	۱/۴
۴	۰/۹۸	۱۳	۰/۹۸	۲۲	۱/۱۳	۳۱	۰/۲۵
۵	۰/۴۷	۱۴	۱/۸۹	۲۳	۰/۷	۳۲	۰/۳۸
۶	۱/۴۱	۱۵	۰/۳۸	۲۴	۱/۵۵	۳۳	۰/۲۳
۷	۲/۱۷	۱۶	۱/۶۷	۲۵	۱/۴۲	۳۴	۰/۴
۸	۰/۶	۱۷	۰/۹۱	۲۶	۰/۹۴		
۹	۱/۵۸	۱۸	۱/۹۷	۲۷	۰/۹۱		

جدول ۱۵- قطرهای بهینه به دست آمده برای شبکه کادو با استفاده از روش‌های مختلف

لوله	GA	GA-ILP	PSO	CFOnet	BB-CFO
۱	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰
۲	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰
۳	۴۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۳۵۰	۳۵۰
۴	۳۵۰	۳۵۰	۲۵۰	۳۵۰	۳۰۰
۵	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
۶	۲۵۰	۲۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
۷	۸۰۰	۸۰۰	۹۰۰	۸۰۰	۹۰۰
۸	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
۹	۴۰۰	۴۰۰	۶۰۰	۶۰۰	۴۵۰

جدول ۱۵- قطرهای بهینه به دست آمده برای شبکه کادو با استفاده از روش‌های مختلف

قطر (میلی‌متر)					لوله
BB-CFO	CFOnet	PSO	GA-ILP	GA	
۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۱۰
۷۵۰	۹۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۱
۷۵۰	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰	۱۲
۷۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۱۳
۴۰۰	۵۰۰	۴۵۰	۴۰۰	۴۰۰	۱۴
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵
۴۵۰	۵۰۰	۴۵۰	۵۰۰	۵۰۰	۱۶
۳۵۰	۳۵۰	۳۰۰	۳۵۰	۳۵۰	۱۷
۵۰۰	۴۰۰	۴۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۱۸
۱۵۰	۴۵۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۹
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۰
۶۰۰	۶۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۷۰۰	۲۱
۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۲۲
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۴۵۰	۴۰۰	۲۳
۳۵۰	۴۵۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۲۴
۶۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۷۰۰	۷۰۰	۲۵
۲۰۰	۲۵۰	۱۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۶
۳۵۰	۳۰۰	۳۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۷
۳۰۰	۳۰۰	۳۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۸
۲۰۰	۲۵۰	۱۵۰	۳۰۰	۳۰۰	۲۹
۳۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰
۱۵۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۳۱
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۳۲
۱۵۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۳
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۳۴
۱۳۰,۶۴۵,۸۹۰	۱۲۵,۸۳۲,۹۶۵	۱۳۰,۶۶۶,۰۴۳	۱۳۱,۳۱۲,۸۱۵	۱۳۱,۶۷۸,۹۳۵	هزینه (Rs)
۲۲,۸۸۰	۲۵۹,۶۰۲	۴۵,۱۵۰	۴,۴۴۰	۳۶,۰۰۰	تعداد ارزیابی‌ها

نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش، بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع و انتقال آب بود. به همین منظور، شبکه‌های هانوی و کادو که از مشهورترین شبکه‌های آبرسانی هستند، انتخاب شدند. همچنین برای بهینه‌سازی الگوریتم BB-BC که تاکنون گزارشی از کاربرد آن در بهینه‌سازی شبکه‌های انتقال آب ارائه نشده است، انتخاب شد. از آنجایی که الگوریتم‌ها توانایی تحلیل شبکه را ندارند؛ لذا برای حل شبکه، روش نیوتن رافسون برای تحلیل هیدرولیکی لوله‌ها کدنویسی شد. در این روش هیدرولیک، قطرهای انتخاب شده از الگوریتم، شبیه‌سازی شده و در صورتی که سرعت و فشار آنها در محدوده مجاز باشد، قطرهای پذیرفته شدند. با این کار زمان حل شبکه کاهش یافت. ابتدا الگوریتم BB-BC با وجود سرعت بالا، جواب‌های مناسبی ارائه نکرد و در بهینه‌های محلی گرفتار می‌شد. برای حل این مشکل

تصمیم به توسعه الگوریتم BB-BC با استفاده از الگوریتم CFO گرفته شد که از ویژگی‌های بارز آن، خارج شدن از بهینه محلی و قدرت جست‌وجوی بالای آن است. با استفاده از نقاط قوت الگوریتم CFO، الگوریتم ترکیبی BB-CFO پیشنهاد شد. در ادامه بار دیگر شبکه‌های هانوی با ۳۴ لوله و ۲ حلقه و کادو با ۲۶ گره، ۳۴ لوله و ۹ حلقه بررسی شد. برای هر دو شبکه آنالیز حساسیت روی جمعیت و میزان جهش صورت گرفت. بهترین نتیجه برای شبکه هانوی به ازای جمعیت ۱۵ و میزان جهش ۰/۰۵ و برای شبکه کادو به ازای جمعیت ۱۰ و میزان جهش ۰/۰۵ مشاهده شد. پس از ۶۳۶۰ بار ارزیابی تابع هدف در شبکه هانوی هزینه ۶,۲۱۰,۷۸۰ دلار برآورد شد. روش مذکور توانست با ۲۲۸۸ بار ارزیابی تابع هدف در شبکه کادو به هزینه ۱۳۰,۶۴۵,۸۹۰ روپیه برسد. گفتنی است که تمامی فشارها و سرعت‌ها در محدوده مجاز قرار داشت و نتایج

- Journal of Water Resources Planning and Management. 125(4): 215-221.
9. Desai R. and Prasad R. 2013. A novel order diminution of LTI systems using Big Bang Big Crunch optimization and Routh Approximation. *Applied Mathematical Modelling*. 37(15): 8016-8028.
 10. Erol O. K. and Eksin I. 2005. A new optimization method: Big Bang–Big Crunch. *Advances in Engineering Software*. 37(2): 106-111.
 11. Formato R. A. 2007. Central force optimization: a new metaheuristic with applications in applied electromagnetic. *Progress in Electromagnetic Research*. 77(1): 425-491.
 12. 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.
 13. Fujiwara O. and Kang D. B. 1990. A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks. *Journal of Water Resources Research*. 26(4): 539-549.
 14. Geem Z. W. 2006. Optimal cost design of water distribution networks using harmony search. *Engineering Optimization*. 38(3): 259-277.
 15. Haghghi A. and Ramos H. M. 2012. Detection of leakage freshwater and friction factor calibration in drinking networks using central force optimization. *Water Resources Management*. 26(8): 2347-2363.
 16. Hasançebi O. S. and Kazemzadeh A. 2012. An exponential big bang-big crunch algorithm for discrete design optimization of steel frames. *Computers and Structures*. 110: 167-179.
 17. Kadu M. S. Gupta R. and Bhav 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(2): 147-160.
 18. Kumbasar T. Yesil E. Eksin I. and Guzelkaya M. 2008. Inverse fuzzy model control with online adaptation via big bang-big crunch optimization. *Communications, Control and Signal Processing*, 2008. ISCCSP 2008. 3rd International Symposium on IEEE.
 19. Savic D. A. and Walters G. A. 1997. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Water Resources Planning Management*. 123(2): 67-77.
 20. Schaake J. and Lai D. 1969. Linear programming and dynamic programming
- بهتری در مقابل الگوریتم‌های توانمندی همچون GA و PSO گرفته شد. همچنین به علت استفاده نکردن از نرم‌افزار هیدرولیکی، زمان اجرای برنامه کمتر از سایر تحقیقات انجام شد. از جمله مزایای روش مطرح شده در تحقیق حاضر، می‌توان به سرعت بالا، استفاده نکردن از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز هیدرولیکی، نبود پارامترهای ثابت و سادگی کاربرد الگوریتم پیشنهادی اشاره کرد. تحقیق حاضر نشان داد می‌توان با شناخت توانایی‌های الگوریتم‌های مختلف آن‌ها را ترکیب و الگوریتم با عملکرد بهتری را ایجاد کرد. همچنین می‌توان بدون استفاده از نرم‌افزارهای هیدرولیکی و تنها با استفاده از قوانین حاکم بر هیدرولیک لوله‌ها، آن‌ها را با سرعت بالاتری حل کرد.
- ### منابع
۱. جباری آ.، ترابی پوده ح.، یونسی ح. ا. و حقی آبی ا. ح. ۱۳۹۶. کاربرد روش بهینه‌سازی نیروی مرکزی در طراحی سامانه‌های توزیع آب. دو ماهنامه علمی - پژوهشی آب و فاضلاب. ۲(۲۸): ۶۵-۷۷.
 ۲. علی‌نژاد ع. ۱۳۹۳. بهینه‌سازی سید سهم با استفاده از الگوریتم Big Bang-Big Crunch. فصلنامه مدیریت. ۱۱(۳۵): ۴۹-۶۱.
 ۳. محمدی اقدام ک.، میرزایی ا.، پورمحمد ن. و پورمحمد آقابابا م. ۱۳۹۴. الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات دینامیکی جهشی برای طراحی شبکه‌های توزیع آب. ۲۶(۴): ۸۸-۹۹.
 ۴. مقدم ع.، علیزاده ا.، فریدحسینی ع.، ضیائی ع. ن. و فلاح هروی د. ۱۳۹۲. کاربرد یک الگوریتم اصلاح شده بهینه‌سازی ازدحام ذرات در طراحی سیستم‌های توزیع آب. آبیاری و زهکشی ایران. ۷(۳): ۳۸۹-۴۰۱.
 5. Alatas B. 2011. Uniform big bang-chaotic bigcrunch optimization. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 16(9): 3696-3703.
 6. Alperovits E. and Shamir U. 1977. Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research*. 13(6): 850-900.
 7. Camp C. V. and Huq F. 2013. Optimization of reinforced concrete frames using a big bang-big crunch algorithm. *Engineering Structures*. 48: 363-372.
 8. Cunha M. D. C. and Sousa J. 1999. Water distribution network design optimization: simulated annealing approach.

- application of water distribution network design. Report 116. MIT Press: Cambridge, MA.
21. Suribabu C. R. 2010. Differential evolution algorithm for optimal design of water distribution networks. *Journal of Hydroinform.* 12(1): 66-82.
 22. Swamee P. K. and Sharma A. K. 2008. *Design of water supply pipe networks.* John Wiley and Sons, Inc, Hoboken.
 23. Wu Z. Y. and Walski T. 2005. Self-adaptive penalty approach compared with other constraint-handling techniques for pipeline optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management.* 131(3): 181-192.
 24. Yates D. E. Templeman A. B. and Boffey T. B. 1984. The computational complexity of the problem of determining least capital cost designs for water supply networks. *Engineering Optimization.* 7(2): 142-155.
 25. Zecchin A. C. Simpson A. R. Maier H. R. and Nixon J. B. 2005. Parametric study for an ant algorithm applied to water distribution system optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation.* 9(2): 175-191.