

طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه میگوها

زهره حسن پور^۱، بابک شاهی‌نژاد^{۲*}، حسن ترابی‌پوده^۳، آزاده جباری^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان

^۲ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان

^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان

^۴ دانش‌آموخته دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران

(دریافت: ۹۷/۶/۶، پذیرش: ۹۹/۲/۳۱، نشر آنلاین: ۹۹/۲/۳۱)

چکیده

امروزه طراحی اقتصادی و بهینه نمودن شبکه‌های توزیع و انتقال آب به‌گونه‌ای که بتوان با صرف حداقل هزینه کلیه محدودیت‌های موردنظر در شبکه را ارضا نمود از مباحث مهم تحقیقاتی می‌باشد. از جمله روش‌های مؤثر جهت طراحی بهینه، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی می‌باشد که به دلیل دارا بودن عملگرهایی همچون جهش و همچنین بهره‌مندی از مزایای هوش جمعی قدرت بیشتری در یافتن پاسخ‌های بهینه یک مسئله دارند. در پژوهش حاضر بهینه‌سازی قطر لوله‌ها در دو شبکه آبرسانی کادو و خرمشهر با به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی گروه میگوها (Krill Herd Optimization) که یک الگوریتم هوش جمعی با رفتار سراسری هوشمندانه می‌باشد؛ بررسی شده است. تابع هدف که بایستی حداقل گردد شامل هزینه خرید لوله‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های هیدرولیکی حاکم بر شبکه می‌باشد. بدین منظور این الگوریتم در برنامه متلب (MATLAB) کدگذاری شده و با نرم‌افزار هیدرولیکی ایپنت (EPANET) ارتباط داده شده است. اجرای این روش و مقایسه پاسخ به‌دست آمده برای تابع هزینه در شبکه کادو با نتایج الگوریتم‌های GA، GA-ILP و PSO در مطالعات پیشین نشان داد که پاسخ یافته شده توسط الگوریتم گروه میگوها نسبت به GA حدود ۳/۳ درصد، نسبت به GA-ILP حدود ۳ درصد و نسبت به PSO حدود ۲/۶ درصد کاهش داشته است. همچنین نتیجه شبکه خرمشهر در مقایسه با روش LP حدود ۱۰ درصد معادل ۱۵۸،۶۵۸،۰۰۰ ریال کاهش هزینه لوله‌های شبکه را در بر داشته است. این بهبودها در نتایج حاکی از توانایی بیشتر الگوریتم گروه میگوها در فرار از پاسخ‌های بهینه محلی و نزدیک شدن به بهینه سراسری در حل مسئله شبکه‌های توزیع آب می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی، محدودیت‌های هیدرولیکی، الگوریتم فراکاوشی، متلب، ایپنت.

۱- مقدمه

شبکه‌ها به دلیل در نظر گرفتن ملاحظات عملی (کاربردی) یک مسئله پیچیده می‌باشد. محدود بودن به مجموعه قطرهای موجود در بازار در طراحی قطر لوله‌ها و همچنین محدودیت‌های هیدرولیکی باعث افزایش پیچیدگی این مسئله بهینه‌سازی غیرخطی می‌گردد (Surco و همکاران، ۲۰۱۸). با این حال و با وجود سخت بودن این مسئله بهینه‌سازی (از نوع مسائل چندجمله‌ای نامعین سخت NP-Hard)، به دلیل محدودیت‌های اقتصادی، دستیابی به یک طرح بهینه برای این نوع شبکه‌ها از جمله هدف‌های اصلی طراحان سامانه‌های توزیع آب می‌باشد.

بی‌شک در مسیر رشد، توسعه و شکوفایی اقتصادی هر کشور امر دسترسی به آب و نحوه توزیع و انتقال آن از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. باتوجه به هزینه بالای سامانه‌های تأمین و توزیع آب و همچنین وضعیت خاص اقلیمی کشور ما، ضرورت و اهمیت طراحی اقتصادی و بهینه نمودن این شبکه‌های توزیع و انتقال آب به‌گونه‌ای که بتوان با صرف حداقل هزینه، کلیه محدودیت‌های موردنظر در شبکه را تأمین نمود کاملاً روشن است. از طرفی شبکه‌های توزیع آب مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین عنصر در این سامانه‌ها می‌باشند و مسئله بهینه‌سازی هزینه این

یک تابع نظام‌مند نبوده و در هر مرتبه اجرای این روش پاسخ‌های متفاوتی نشان می‌دهد.

از جمله پژوهش‌های انجام‌شده در رابطه با کاربرد روش KH، پژوهش‌های Wang (Wang و همکاران، ۲۰۱۴)؛ Wang و همکاران، (۲۰۱۷) و Asteris و همکاران (۲۰۱۸) می‌باشد. در برخی از این پژوهش‌ها با ایجاد تغییراتی در الگوریتم KH و ترکیب کردن آن با سایر الگوریتم‌های تصادفی یک الگوریتم جدید بر مبنای الگوریتم KH توسعه داده شده است که دارای توانایی جستجو و سرعت همگرایی بیشتری می‌باشد. به‌عنوان نمونه در پژوهش Wang و همکاران (۲۰۱۴) با ترکیب الگوریتم KH با الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) به‌عنوان عملگر جهش یک الگوریتم جدید به نام HS/KH با هدف افزایش سرعت همگرایی در حل مسائل بهینه‌سازی پیشنهاد گردید. همچنین در پژوهش صادقی لاری (۱۳۹۴) کاربرد الگوریتم میگو در بهینه‌سازی ساختار شبکه عصبی مصنوعی بررسی شده است.

با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده قبلی، کاربردهای زیادی از روش KH در مسائل مختلف بهینه‌سازی گزارش شده است، اما در بحث بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی تاکنون هیچ تحقیقی صورت نگرفته است. در پژوهش حاضر سعی شده است عملکرد و میزان توانایی این الگوریتم در حل مسئله شبکه‌های توزیع آب مورد ارزیابی قرار گیرد. بنابراین بهینه‌سازی تابع هزینه طراحی لوله‌های شبکه‌های آبرسانی با در نظر گرفتن محدودیت‌های خاص این شبکه‌ها بررسی شده است. به این منظور روش KH در محیط متلب کدگذاری و با نرم‌افزار شبیه‌ساز هیدرولیکی اپینت مرتبط گردید. در نهایت کم‌ترین هزینه به‌دست‌آمده برای خرید لوله‌ها از روش KH در دو شبکه مرجع کادو (Kadu) و خرمنشهر با نتایج پژوهشگرهای دیگر مقایسه شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- تابع هدف و محدودیت‌ها

در این پژوهش حداقل‌سازی هزینه لوله‌های شبکه‌های توزیع آب به عنوان تابع هدف تعریف شده است. بهترین متغیری که می‌توان بر اساس آن هزینه لوله‌ها و کارگذاری آن‌ها را بیان نمود قطر لوله است که بر اساس آن قیمت هر متر طول لوله مشخص می‌شود. در نتیجه تابع هزینه را می‌توان به‌صورت زیر در قالب کلی یک مسئله بهینه‌سازی ریاضی تعریف کرد (Savic و Walters، ۱۹۹۷):

به‌طور سنتی، قطر لوله با توجه به‌سرعت متوسط اقتصادی معمولاً با استفاده از روش هاردی کراس^۲ انتخاب می‌شود. این روش وقت‌گیر و غیراقتصادی بوده و رسیدن به جواب‌های بهینه فراگیر یا اقتصادی‌ترین طرح ممکن را فراهم نمی‌کند (Mansouri و همکاران، ۲۰۱۵). از آنجایی که حل مسائل NP-Hard توسط روش‌های تحلیلی امکان‌پذیر نیست، روش‌های متفاوت عددی برای حل شبکه‌های توزیع آب توسعه داده شده است. اگرچه روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی مانند رویکردهای برنامه‌نویسی خطی و غیرخطی برای حل این مسائل استفاده شده است، اما روش‌های فراابتکاری^۳ به‌دلیل توانایی بالا برای مقابله با مشکلات بهینه‌سازی مطلق^۴ موردتوجه قرار گرفته‌اند (Reca و همکاران، ۲۰۱۷). این دسته از روش‌های بهینه‌سازی جهت حل مسائل پیچیده، انعطاف‌پذیر و کارآمد می‌باشند (Bozorg-Haddad و همکاران، ۲۰۱۸). از این‌رو استفاده از روش‌ها در حل مسئله حداقل کردن هزینه شبکه‌های آبرسانی که شامل متغیرهای تصمیم‌گسسته (قطرهای لوله‌های موجود در بازار) می‌باشد، نتایج مطلوبی نشان داده است. از جمله این روش‌ها که در حل مسئله شبکه‌های توزیع آب استفاده شده است می‌توان به الگوریتم ژنتیک (GA)^۵ (Syahputra، ۲۰۱۷)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)^۶ (Surco و همکاران، ۲۰۱۸)، بهینه‌سازی جامعه مورچگان (ACO)^۷ (Shirzad و همکاران، ۲۰۱۷)، بهینه‌سازی نیروی مرکزی (CFO)^۸ (Jabbary و همکاران، ۲۰۱۶) جستجوی هارمونی (HS)^۹ (Geem، ۲۰۱۵) و روش GA-ILP^{۱۰} که حاصل ترکیب الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح می‌باشد (Haghighi و همکاران، ۲۰۱۱) اشاره نمود.

در به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی دو موضوع دست-یابی به طراحی اقتصادی در کنار صرف مدت زمان کوتاه‌تر از اهمیت فراوانی برخوردار است. از این‌رو پژوهشگران همواره در راستای جستجوی روش‌های جدید و یا توسعه و بهبود روش‌های موجود، تلاش می‌کنند. یکی از روش‌های جدید روش بهینه‌سازی گروه میگوها (KH) است که در سال ۲۰۱۲ میلادی، توسط Alavi و Gandomi بر اساس رفتار غذایی میگوها توسعه یافت (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲). روش بهینه‌سازی گروه میگوها (KH) همانند الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، جستجوی ممنوع (TS)^{۱۱} و بهینه‌سازی جامعه مورچگان (ACO) یک روش تصادفی بوده، به این معنی که در فرآیند جستجو، موقعیت میگوها به‌صورت تصادفی تغییر کرده و موقعیت آن‌ها بر اساس

8. Central Force Optimization
9. Harmony Search
10. Genetic Algorithm-Integer Linear Programming
11. Tabu Search

2. Hardy cross
3. Meta-Heuristic
4. Global
5. Genetic Algorithm
6. Particle Swarm Optimization
7. Ant Colony Optimization

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

که در آن ϑ ضریب جریمه و $v(P_j)$ و $v(V_i)$ تابع‌های تخطی از فشار و سرعت مجاز می‌باشند. مناسب بودن جواب مسئله بهینه-سازی بستگی زیادی به مقدار ضریب ϑ 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 فرآیند بهینه-سازی را افزایش خواهد داد (Afschar و همکاران، ۲۰۰۹). در اینجا مقدار ϑ معادل ۱۰۰،۰۰۰،۰۰۰ و تابع‌های جریمه به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

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

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

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

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

همچنین محدودیت مربوط به قطر لوله‌ها (رابطه (۲)) با تعریف محدودیت در مرحله انتخاب متغیر تصمیم در الگوریتم میگو اعمال شده است.

۲-۲- نرم افزار ایپنت

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب مورد بررسی، نرم‌افزار ایپنت (Epanet 2.0) به کار برده شده است (Rossman، ۲۰۰۰). رابطه‌های هیدرولیکی پایه در این نرم‌افزار شامل قانون بقای جرم (پیوستگی) در هر گره، قانون بقای انرژی در هر حلقه بسته و رابطه افت انرژی بین دو گره در شبکه می‌باشد که به ترتیب در رابطه‌های (۱۰) تا (۱۲) بیان شده است:

$$\sum q_i - \sum q_o = q_e \quad (10)$$

$$\sum \Delta H_i = 0 \quad (11)$$

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

که در این رابطه‌ها q_i و q_o به ترتیب جریان ورودی به گره و جریان خروجی از یک گره و q_e میزان تقاضای خارجی شامل مصرف و یا تأمین آب در شبکه از گره است. ΔH_i تغییرات انرژی در لوله‌های یک حلقه بسته، ΔH_i افت انرژی در لوله i که بین دو گره j و k قرار دارد. در نرم‌افزار ایپنت ΔH_i با h_f استفاده از سه رابطه هایزن- ویلیامز، داریسی- ویسباخ و یا شزی قابل محاسبه

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

که در آن، N_i تعداد لوله‌ها، $f(D_i, L_i)$ هزینه لوله i با قطر D_i و طول L_i و C هزینه کل لوله‌های شبکه می‌باشد. این تابع با در نظر گرفتن محدودیت‌های طراحی و هیدرولیکی حاکم بر شبکه‌های آبرسانی، کمینه‌سازی می‌شود. این محدودیت‌ها شامل حدود قطرهای تجاری لوله‌های موجود در بازار برای اندازه لوله‌های شبکه (D_{min} و D_{max})، کرانه بالا و پایین مقدار سرعت مجاز در لوله‌های شبکه (V_{min} و V_{max}) و فشار مجاز در گره‌های شبکه توزیع آب (P_{min} و P_{max}) می‌باشد که به ترتیب به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

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

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

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

که در این رابطه‌ها، V_i سرعت در لوله i ، P_j فشار در گره j و N_j تعداد کل گره‌های موجود در شبکه می‌باشد. در پژوهش حاضر این محدودیت‌ها با توجه به پژوهش‌های گذشته در هر یک از شبکه‌های مرجع مورد مطالعه که در بخش‌های بعدی اشاره شده، تعیین شده است.

چندین دیدگاه برای استفاده از مسائل بهینه‌سازی مقید در روش‌های بهینه‌سازی تصادفی وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

۱- روش‌های مبتنی بر جست‌وجوی ناحیه قابل قبول طراحی که بیشتر در مسائل ساده که تعداد متغیرهای کمی دارند مفید است.

۲- روش‌های مبتنی بر تابع جریمه که در مسائل بزرگ با طبیعت پیچیده و تعداد زیاد متغیرها و قیود مناسب‌تر می‌باشند و در دو روش جمع‌شونده و ضرب‌شونده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

انتخاب تابع جریمه در حل مسائل بهینه‌سازی اختیاری می‌باشد و این تابع بایستی بتواند پاسخ‌های دارای تخطی از محدودیت‌های مسئله را، مشخص کند. بدین منظور و برای در نظر گرفتن محدودیت‌های هیدرولیکی، یک روش ساده جمع-شونده برای تبدیل مسئله مقید به یک مسئله نامقید استفاده شده است که قادر به افزایش تابع هزینه در پاسخ‌های دارای تخطی می‌باشد. به این ترتیب که در جواب‌های دارای تخطی از سرعت و یا فشار مجاز، تابع هدف جریمه خواهد شد. بنابراین تابع هدف نهایی در این مسئله به صورت رابطه ذیل می‌باشد که به عنوان تابع مورد ارزیابی در الگوریتم KH استفاده شده است:

- هر عضو همسایه می‌تواند تأثیر جاذبه و یا دافعه بر هر حرکت عضو تکی داشته باشد، که این خاصیت می‌تواند نوعی جستجوی محلی برای الگوریتم باشد.

- مرکزهای غذا براساس میزان تابع هدف تمام میگوها مشخص می‌شود.
به‌طور کلی در الگوریتم KH موقعیت یک میگو در یک سطح بعدی متأثر از سه عامل اصلی ذیل می‌باشد:

(الف) حرکت ایجادشده توسط میگوهای همسایه

(ب) فعالیت غذایی

(ج) پراکندگی فیزیکی یا حرکت تصادفی

با توجه به این‌که یک الگوریتم بهینه‌سازی بایستی قادر به جست‌وجو در فضایی با هر ابعاد باشد، در نتیجه مدل لاگرانژی در یک فضای تصمیم n بعدی به‌صورت ذیل ارائه گردیده است (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

$$\frac{dx_i}{dt} = N_i + F_i + D_i \quad (14)$$

به‌طوری‌که N_i ، F_i و D_i به‌ترتیب حرکت ایجادشده توسط میگوهای همسایه، حرکت غذایی و پراکندگی فیزیکی i امین میگو را نشان می‌دهد.

۲-۳-۱- حرکت ایجادشده توسط میگوهای همسایه (حرکت القاشده)

حرکت ایجادشده توسط میگوهای همسایه یا حرکت القاشده جدید برای میگو i ام (N_i) به‌صورت ذیل بیان می‌شود (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

$$N_i^{new} = N_i^{max} \alpha_i + \omega_n N_i^{old} \quad (15)$$

در این رابطه، N_i^{max} حداکثر سرعت القاشده است که بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده مقدار $0/01$ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود، ω_n وزن اینرسی برای حرکت القاشده در بازه $[0, 1]$ ، N_i^{old} میزان حرکت القاشده قبلی می‌باشند. همچنین α_i پارامتری است که به‌صورت ذیل بیان می‌شود (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

$$\alpha_i = \alpha_i^{local} + \alpha_i^{target} \quad (16)$$

که در آن α_i^{local} میزان تأثیر موضعی میگوهای همسایه و α_i^{target} میزان تأثیر جهت‌دهی ناشی از بهترین میگو بر میگوی i ام می‌باشند. تأثیر میگوهای همسایه در حرکت یک میگو به‌صورت رابطه ذیل تعیین می‌گردد (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

می‌باشد. در این پژوهش به‌منظور محاسبه افت انرژی در لوله‌ها از رابطه هایزن- ویلیامز به‌صورت ذیل استفاده شده است:

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

که در آن Q_i جریان در لوله i ام (m^3/s)، L_i و D_i به‌ترتیب طول و قطر لوله i ام برحسب متر و C_{HW} ضریب زبری هایزن- ویلیامز است که به جنس لوله بستگی دارد. ω یک ضریب بدون بعد است که بسته به دستگاه آحاد انتخاب‌شده برای شبیه‌سازی جریان تنظیم می‌گردد.

۲-۳-۲ الگوریتم KH

الگوریتم گروه میگوها (KH) یا الگوریتم کریل‌ها^{۱۲} توسط Gandomi و Alavi در سال ۲۰۱۲ ارائه شده است. این الگوریتم از جمله الگوریتم‌های هوش ازدحامی می‌باشد و بر اساس شبیه‌سازی حرکات و رفتار دسته‌ای از میگوها برای یافتن غذا عمل می‌کند. یکی از توانایی میگوها تشکیل گروه‌های بزرگ است. زمانی که شکارچیان (مرغان دریایی و پنگوئن‌ها و...) به آن‌ها حمله می‌کنند تراکم آن‌ها کم می‌شود. درحالی‌که در شرایط عادی میگوها سعی می‌کنند به طرف مراکز تراکم گروه حرکت کنند. علاوه بر این همواره سعی در غذاییابی دارند که فاکتورهای مختلفی بر این حرکت آن‌ها تأثیر می‌گذارد. همچنین مانند همه موجودات حرکات تصادفی در بین میگوها نیز وجود دارد (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲). بنابراین در الگوریتم KH یافتن نقطه بهینه توسط سه مؤلفه اصلی حرکت ایجادشده توسط میگوهای همسایه، حرکت غذایی و حرکت تصادفی یا حرکت پراکندگی فیزیکی انجام می‌شود. جذب میگوها به مکان‌های پر تراکم و یافتن غذا به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود که در نهایت منجر می‌شود میگوها در اطراف بهینه سراسری دور هم متراکم شوند. در این فرایند میگوها زمانی که به دنبال غذا و بیشترین تراکم می‌گردند در حقیقت به سمت بهترین نقطه در حال حرکت می‌باشند.

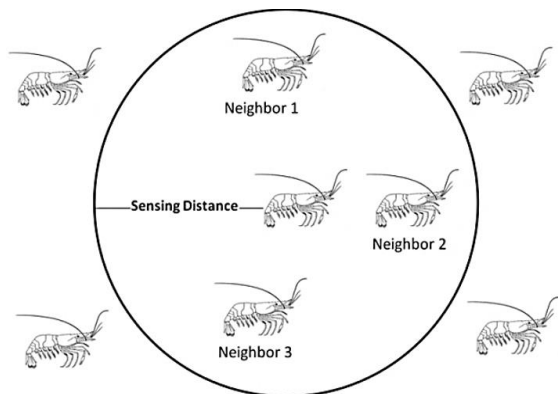
به‌منظور بهتر شدن جواب‌های الگوریتم KH دو اپراتور جهش^{۱۳} و تقاطع^{۱۴} نیز در این الگوریتم مورداستفاده قرار گرفته است. مزیت‌های الگوریتم KH شامل موارد ذیل می‌باشد (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

- هر عضو می‌تواند تأثیر بسزایی در حرکت گروه داشته باشد و این تأثیر بر اساس میزان تابع هدف هر عضو تعیین می‌شود.

بایستی نسبت به اثر دیگر میگوها نظیر میگوهای همسایه، مؤثر تر باشد (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

$$C^{best} = 2(rand + \frac{I}{I_{max}}) \quad (22)$$

I_{max} بیشترین تعداد تکرار و I شماره تکرار فعلی می‌باشد. $rand$ عددی تصادفی بین صفر و یک است.



شکل ۱- طرح‌واره (شماتیک) محدوده سنجش در اطراف یک میگوی منفرد

۲-۳-۲- حرکت غذایی

حرکت غذایی بر اساس دو پارامتر مؤثر شکل می‌گیرد. اولین پارامتر محل غذا و دومین پارامتر تجربه قبلی درباره محل غذا می‌باشد.

میزان حرکت غذایی جدید برای میگوی i ام به صورت ذیل محاسبه می‌شود (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

$$F_i = V_f \beta_i + \omega_f F_i^{old} \quad (23)$$

که در این رابطه V_f سرعت غذایی است که بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده 0.2 متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود، ω_f وزن اینرسی حرکت غذایی در بازه $[0, 1]$ ، F_i^{old} میزان حرکت غذایی قبلی میگوی i ام و β_i میزان جاذبه غذایی است که از رابطه ذیل به دست می‌آید (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

$$\beta_i = \beta_i^{food} + \beta_i^{best} \quad (24)$$

در اینجا β_i^{food} میزان جاذبه غذایی در همان تکرار برای میگوی i ام و β_i^{best} بهترین جاذبه غذایی تاکنون میگوی i ام می‌باشند. تأثیر غذا بر حسب محل یا موقعیت آن تعریف می‌گردد. بنابراین در ابتدا بایستی مرکز غذا پیدا شده و سپس جاذبه غذایی به شکل یک رابطه بیان شود. ولی در حقیقت این مقدار نمی‌تواند مشخص گردد؛ ولی می‌توان آن را تخمین زد. در نتیجه مرکز

$$\alpha_i^{local} = \sum_{j=1}^{NN} \bar{K}_{i,j} \hat{X}_{i,j} \quad (17)$$

$$\hat{X}_{i,j} = \frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\| + \epsilon} \quad (18)$$

$$\bar{K}_{i,j} = \frac{K_i - K_j}{K^{worst} - K^{best}} \quad (19)$$

در این رابطه‌ها $\bar{K}_{i,j}$ فاصله غذایی دو میگو، $\hat{X}_{i,j}$ فاصله موقعیت دو میگو، NN تعداد میگوهای همسایه برای میگوی i ام، عبارت $X_j - X_i$ فاصله خطی بین دو میگوی i و j ، K_i و K_j برازندگی یا مقدار تابع هدف دو میگوی i و j است. به طور کلی X موقعیت نسبی را نشان می‌دهد. K^{best} و K^{worst} به ترتیب بهترین و بدترین مقدار برازندگی تاکنون می‌باشند. طرف راست معادلات (۱۷) تا (۱۹) شامل بردارهای یکه و مقادیر برازندگی نرمال شده می‌باشند. بردارها، جهت‌های القایی توسط همسایه‌های مختلف را نشان می‌دهند و مقادیر، نشان دهنده اثر هر یک از همسایه‌ها می‌باشد. بردار همسایگی می‌تواند به صورت جاذب یا دافع باشد همانطوری که مقادیر نرمال شده می‌توانند مثبت یا منفی باشند. استراتژی‌های متفاوتی می‌تواند برای انتخاب کردن همسایه مورد استفاده قرار گیرد. برای نمونه، یک نسبت همسایگی می‌تواند برای پیدا کردن نزدیک‌ترین میگوهای همسایه تعریف شود. انتخاب همسایه در الگوریتم میگو توسط فاصله سنجش^{۱۵} بیان می‌شود که در شکل (۱) نمایش داده شده است. به این صورت که تعدادی از میگوها که در این شعاع قرار دارند به عنوان میگوی همسایه شناخته شده و بر میگوی i ام تأثیر می‌گذارند و تأثیر سایر میگوها بر این میگو برابر با صفر خواهد شد. فاصله سنجش برای میگوی i ام با تعداد N میگو اطراف آن از رابطه (۲۰) به دست می‌آید (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

$$d_{s,i} = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^N \|X_i - X_j\| \quad (20)$$

عدد ۵ در مخرج به صورت تجربی به دست آمده است. شرط همسایه بودن این است که فاصله بین دو میگو از فاصله سنجش کم‌تر باشد. تأثیر برازندگی بهترین میگو بر روی میگوی i ام توسط معادله (۲۱) مشخص می‌گردد که باعث سوق دادن به سمت بهینه مطلق می‌گردد (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

$$\alpha_i^{target} = C^{best} \bar{K}_{i,best} \hat{X}_{i,best} \quad (21)$$

$\bar{K}_{i,best}$ برازندگی بهترین میگو و $\hat{X}_{i,best}$ موقعیت بهترین میگو می‌باشند. C^{best} ضریب تأثیر میگو با بهترین برازندگی بر روی i امین میگو می‌باشد. این ضریب به گونه‌ای تعیین می‌شود که α_i^{target} حل را به سمت بهینه مطلق سوق دهد و به لحاظ تأثیر

را به صورت خطی با گذشت زمان کاهش دهد (Gandomi و Alavi، ۲۰۱۲).

$$D_i = D^{max}(1 - \frac{I}{I_{max}})\delta \quad (30)$$

۲-۳-۴- فرآیند حرکت در الگوریتم میگو

در الگوریتم KH حرکت غذایی و القایی توسط میگوهای همسایه شامل دو استراتژی سراسری و موضعی می‌باشند که به موازات هم کار کرده و باعث قدرتمندی الگوریتم KH می‌شوند. پراکندگی فیزیکی نیز به صورت یک جست‌وجوی تصادفی در این روش عمل می‌کند. بردار موقعیت هر میگوی i (X_i) در الگوریتم گروه میگوها در طول بازه زمانی t تا $t + \Delta t$ براساس پارامترهای مؤثر بر حرکت به صورت رابطه ذیل تعیین می‌شود (Gandomi و Alavi، ۲۰۱۲):

$$X_i(t + \Delta t) = X_i(t) + \Delta t \frac{dX_i}{dt} \quad (31)$$

که در آن $X_i(t + \Delta t)$ موقعیت جدید میگوی i ام و $X_i(t)$ موقعیت قبلی این میگو می‌باشد. Δt فاصله زمانی و یکی از مهم‌ترین ضرایب ثابت است که توسط رابطه ذیل محاسبه می‌شود (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

$$\Delta t = C_t \sum_{j=1}^{N_{var}} (ub_j - lb_j) \quad (32)$$

که در آن ضریب C_t به صورت تجربی در بازه $[0, 0.2]$ تعیین می‌شود و مقادیر کم‌تر این ضریب باعث می‌شود جست‌وجو در فضای تصمیم دقیق‌تری صورت گیرد. N_{var} تعداد متغیرها، lb حد پایین و ub حد بالای متغیرها می‌باشد.

۲-۳-۵- عملگرهای ژنتیک

عملگرهای ژنتیک به صورت پیوند (Crossover) و جهش (Mutation) به الگوریتم میگو القا می‌شود. عملگر پیوند توسط یک ضریب احتمال پیوند (Cr) کنترل می‌گردد. علاوه بر آن یک عدد تصادفی برای بعد m ام از میگوی i ام ($rand_{i,m}$) ایجاد می‌شود. درایه‌های تصادفی که کم‌تر از ضریب Cr باشند مقدارشان را از یک میگو دیگر (که می‌تواند بهترین میگو یا میگوی تصادفی باشد) می‌گیرند در غیر این صورت با همان مقدار قبلی برابر خواهند بود. این عملگر به صورت زیر تعریف می‌شود (Gandomi و Alavi، ۲۰۱۲):

$$X_{i,m} = \begin{cases} X_{r,m} & rand_{i,m} < Cr \\ X_{i,m} & else \end{cases} \quad (33)$$

که در اینجا $X_{i,m}$ عضو m ام از میگوی i ام می‌باشد. r در بازه $[1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, N_{pop}]$ قرار دارد. Cr برای بهترین

مجازی تراکم غذایی براساس توزیع برازندگی میگوها تخمین زده می‌شود که از مفهوم مرکز جرم الهام گردیده است. موقعیت مرکز غذا برای هر تکرار از رابطه زیر به دست می‌آید (Gandomi و Alavi، ۲۰۱۲):

$$\bar{X}_{i,food} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{pop}} \frac{X_i}{K_i}}{\sum_{i=1}^{N_{pop}} \frac{1}{K_i}} \quad (25)$$

جذابیت غذایی برای میگوی i ام به صورت زیر تعریف می‌گردد که از رابطه‌های ذیل به دست می‌آیند (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

$$\beta_i^{food} = C^{food} \bar{K}_{i,food} \bar{X}_{i,food} \quad (26)$$

که در رابطه‌های بالا $\bar{K}_{i,food}$ برازندگی منطقه غذایی (مقدار تابع هدف به ازای $\bar{X}_{i,food}$) و C^{food} ضریب غذایی است. با توجه به این که تأثیر غذا با گذشت زمان کاهش می‌یابد، در نتیجه به صورت زیر تعریف می‌گردد (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

$$C^{food} = 2(1 - \frac{I}{I_{max}}) \quad (27)$$

در این رابطه I شماره تکرار فعلی و I_{max} حداکثر تعداد تکرار می‌باشد. همچنین تأثیر بهترین برازندگی میگوی i ام با به کار بردن معادله ذیل اعمال می‌شود (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

$$\beta_i^{best} = \bar{K}_{i,best} \bar{X}_{i,best} \quad (28)$$

که $\bar{K}_{i,best}$ بهترین برازندگی میگوی i ام که تاکنون داشته است، و $\bar{X}_{i,best}$ بهترین موقعیت میگوی i ام می‌باشد.

۲-۳-۲- پراکندگی فیزیکی یا حرکت تصادفی

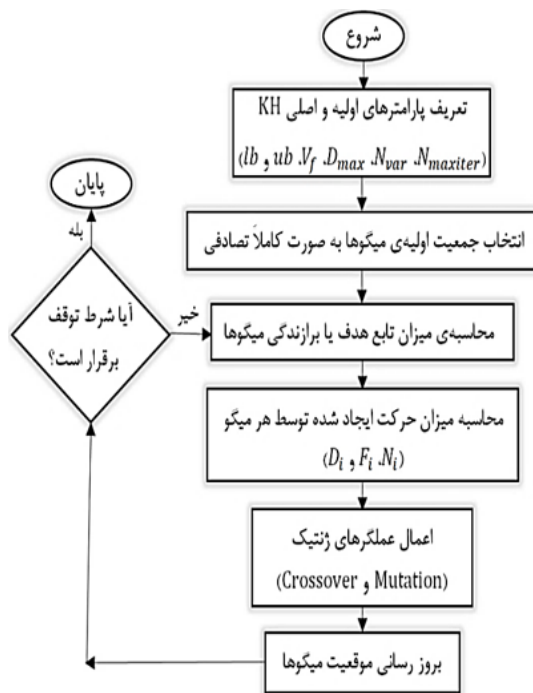
پراکندگی فیزیکی هر میگو (D_i) را نیز می‌توان به صورت یک فرایند تصادفی در نظر گرفت. این حرکت می‌تواند بر حسب حداکثر سرعت پراکندگی و یک بردار جهت تصادفی به شکل ذیل بیان گردد (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

$$D_i = D^{max} \delta \quad (29)$$

که در اینجا D^{max} حداکثر سرعت پراکندگی و δ بردار جهت تصادفی است که آراییه‌های آن مقادیر تصادفی در بازه $[-1, 1]$ می‌باشد. D^{max} در بازه $[0.01, 0.02]$ پیشنهاد شده است (Macready و Wolpert، ۱۹۹۷).

تأثیر حرکت القایی توسط میگوهای همسایه و حرکت غذایی با گذشت زمان (افزایش تکرارها) به تدریج کاهش می‌یابد. درحالی‌که در رابطه بالا پراکندگی فیزیکی یک بردار تصادفی می‌باشد و با گذشت زمان به صورت یکنواختی کاهش نمی‌یابد. در نتیجه ترم $(1 - \frac{I}{I_{max}})$ به آن اضافه می‌گردد تا سرعت فیزیکی

- ۷- به روزرسانی موقعیت میگوها در فضای جست و جو
- ۸- تکرار عملیات از مرحله سوم در صورت نرسیدن به شرط همگرایی (توقف) الگوریتم
- الگوریتم تا برآورده شدن شرط همگرایی و یا تا اتمام تعداد کل تکرارها، ادامه می یابد (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲). شکل (۲) مراحل اجرای الگوریتم KH را نشان می دهد.



شکل ۲- مراحل الگوریتم گروه میگوها (KH)

۴-۲- شبکه های توزیع آب مورد مطالعه

در این پژوهش طراحی دو شبکه توزیع آب به نام های شبکه Kadu (Kadu و همکاران، ۲۰۰۸) و شبکه خرمشهر (Samani و Zanganeh، ۲۰۱۰) مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور طراحی شبکه Kadu، ۱۴ گزینه لوله تجاری در نظر گرفته می شود که به همراه هزینه یک متر طول آن ها برحسب روپیه (Rs) در جدول (۱) آورده شده است. طرح واره این شبکه در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین به منظور طراحی شبکه خرمشهر ۹ گزینه لوله تجاری معرفی می شود که به همراه هزینه یک متر طول آن ها برحسب هزار ریال در جدول (۲) آورده شده است. طرح واره این شبکه در شکل (۴) نشان داده شده است. اطلاعات تکمیلی شبکه کادو و خرمشهر و همچنین محدودیت های هیدرولیکی در نظر گرفته شده برای طراحی این دو شبکه به- ترتیب در مرجع های (Kadu و همکاران، ۲۰۰۸) و (Samani و Zanganeh، ۲۰۱۰) در دسترس می باشد.

برازندگی صفر می باشد و با کاهش برازندگی مقدار آن افزایش می یابد. مقدار Cr با استفاده از رابطه ذیل به دست می آید (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

$$Cr = 0.2\bar{K}_{i,best} \quad (34)$$

عملگر جهش نیز توسط ضریب احتمال جهش (Mu) کنترل می گردد به این صورت که با ایجاد یک عدد تصادفی ($rand_{i,m}$) الگوی جهش به شکل ذیل عمل می کند (Alavi و Gandomi، ۲۰۱۲):

$$X_{i,m} = \begin{cases} X_{g,best,m} + \mu(X_{p,m} - X_{q,m}) & rand_{i,m} < Mu \\ X_{i,m} & else \end{cases} \quad (35)$$

$$Mu = 0.05/\bar{K}_{i,best} \quad (36)$$

$$\bar{K}_{i,best} = K_i - K^{best} \quad (37)$$

که در اینجا p و q در بازه $[1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, k]$ و μ در بازه $[0, 1]$ قرار دارند. Mu برای بهترین برازندگی صفر می باشد و با کاهش برازندگی مقدار آن افزایش می یابد.

۲-۳-۶- مراحل الگوریتم KH

به طور کلی مراحل اجرای الگوریتم KH و رسیدن به پاسخ بهینه، به شرح ذیل است:

- ۱- تعریف پارامترهای اولیه و اصلی: پارامترهای اولیه شامل تعداد متغیرها (N_{var})، حد پایین (lb) و حد بالا (ub) می باشد. پارامترهای اصلی به دو بخش پارامترهای کمی و پارامترهای کیفی تقسیم می شوند. پارامترهای کمی شامل تعداد میگوها (N_{pop}) و حداکثر تعداد تکرار ($N_{maxiter}$) می باشد و با افزایش مقدار آن ها به احتمال زیاد دقت و جواب الگوریتم بهبود می یابد. پارامترهای کیفی شامل حداکثر سرعت غذاییابی (V_f)، حداکثر سرعت پراکندگی (D_{max})، حداکثر سرعت القاشده (N_{max}) می باشد. این پارامترها بایستی با استفاده از روش های تنظیم پارامتر مانند سعی و خطا یا تاگوچی^{۱۶} تنظیم شوند یعنی ممکن است با کاهش یا افزایش آن ها جواب الگوریتم بهبود یابد.
- ۲- انتخاب جمعیت اولیه میگوها به صورت کاملاً تصادفی در فضای جست و جو ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$)
- ۳- محاسبه میزان تابع هدف یا برازندگی میگوها (ارزیابی هر میگو براساس موقعیت آن)
- ۴- تعیین میزان حرکت ایجاد شده توسط هر میگو (D_i و F_i, N_i)
- ۵- محاسبه بردار موقعیت هر میگو در زمان $t + \Delta t$
- ۶- اعمال عملگرهای ژنتیک

جدول ۱- قطرهای تجاری و هزینه واحد طول لوله‌ها در شبکه کادو

قطر (mm)	هزینه (Rs)	قطر (mm)	هزینه (Rs)
۱۵۰	۱/۱۱۵	۵۰۰	۶/۰۹۲
۲۰۰	۱/۶۰۰	۶۰۰	۸/۱۸۹
۲۵۰	۲/۱۵۴	۷۰۰	۱۰/۶۷۰
۳۰۰	۲/۷۸۰	۷۵۰	۱۱/۸۷۴
۳۵۰	۳/۴۷۵	۸۰۰	۱۳/۲۶۱
۴۰۰	۴/۲۵۵	۹۰۰	۱۶/۱۵۱
۴۵۰	۵/۱۷۲	۱۰۰۰	۱۹/۳۹۵

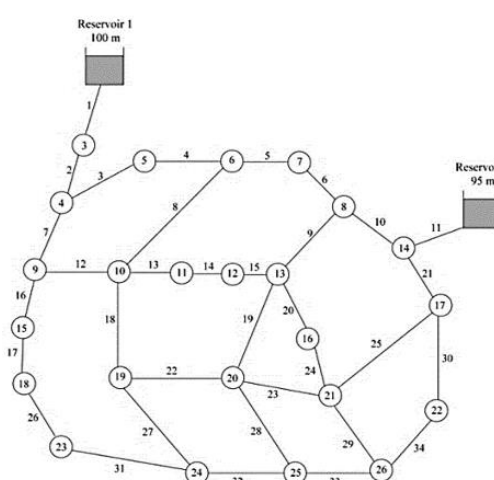
جدول ۲- قطرهای تجاری و هزینه واحد طول لوله‌ها در شبکه خرمشهر

قطر (mm)	هزینه (Rs)	قطر (mm)	هزینه (Rs)
۲۵	۲۰۵	۱۶۰	۴۹۰
۷۵	۴۱۱	۲۲۲	۵۹۰
۱۱۱	۴۳۰	۲۴۸	۶۱۰
۱۲۴	۴۵۰	۲۷۲	۷۰۰
۱۴۲	۴۷۰		

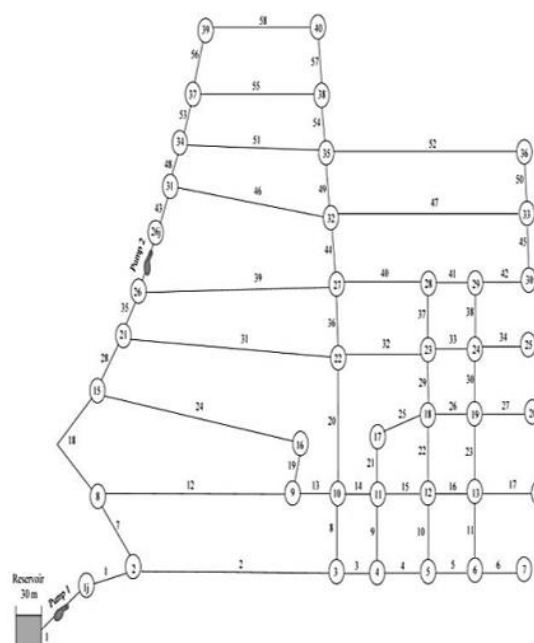
۳- نتایج و بحث

نرم‌افزار اپینت از طریق جعبه‌ابزار^{۱۷} رابط برنامه‌نویسی به متلب ارتباط داده شده است. به منظور محاسبه تابع هدف به‌ازای هر میگو زیر برنامه تابع هدف که در محیط متلب کدگذاری شده است اجرا می‌شود. در این زیر برنامه موقعیت میگوها که شامل قطر لوله‌های شبکه می‌باشد با به‌کارگیری زیر برنامه‌ای در برنامه ویژوال بیسیک در فایل ورودی اپینت وارد می‌شوند و این نرم‌افزار اجرا می‌شود. به منظور بازرسی تخطی‌ها از محدودیت‌های هیدرولیکی شبکه، یک زیر برنامه دیگر که در ویژوال بیسیک کدگذاری شده استفاده می‌شود. این زیر برنامه فایل نتایج خروجی اپینت را که شامل پارامترهای هیدرولیکی سرعت در لوله‌ها و فشار در گره‌ها می‌باشد، می‌خواند و دو فایل متنی شامل مقادیر مربوط به این پارامترها را ایجاد می‌کند. سپس در زیر برنامه تابع هدف این دو فایل متنی خوانده می‌شوند و مقادیر تخطی از محدودیت‌های هیدرولیکی تعیین شده، تابع هزینه محاسبه می‌شود و به برنامه الگوریتم میگو ارجاع داده می‌شود. به منظور اجرای الگوریتم KH برای شبکه کادو مقدار پارامترهای واسنجی شده KH عبارت‌اند از $N_{pop} = 170$ ، $N_{max} = 0.02$ ، $D_{max} = 0.02$ ، $V_f = 0.002$ ، $C_t = 0.005$ این پژوهش تعداد میگوها با انجام آنالیز حساسیت در بازه (۲۰۰-۲۰) میگو مشخص شده است.

همچنین به منظور تعیین ضریب μ در عملگر جهش، بازه (۰-۱) در نظر گرفته شد که با انجام حساسیت‌سنجی، الگوریتم در مقدار μ برابر با ۰/۸ بهترین عملکرد را نشان داده است. میانگین مقدار به‌دست‌آمده برای تابع هزینه شبکه کادو در تعداد ۵ مرتبه اجرای KH با حداکثر تکرار ۴۰۰ تکرار، به ترتیب ۹۱۰، ۱۱۴، ۱۲۷ می‌باشد. همچنین نتیجه بهترین پاسخ به‌دست‌آمده در این پژوهش به همراه پاسخ‌هایی که برای این شبکه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تصادفی (GA، GA-ILP و PSO) به‌دست‌آمده است در جدول (۳) آورده شده است. با توجه به این جدول الگوریتم KH پس از ۴۴،۲۰۰ مرتبه ارزیابی تابع هدف به



شکل ۳- طرح‌واره شبکه کادو



شکل ۴- طرح‌واره شبکه خرمشهر

بودن این الگوریتم به طور هم زمان از مزایای هوش جمعی و عملگرهای پیوند و جهش در فرایند جست و جو دانست. در واقع الگوریتم KH علاوه بر مزایای یک الگوریتم هوش جمعی از فواید عملگرهای پیوند و جهش نیز برخوردار می باشد و بدین ترتیب توانایی جست و جوی بهتر فضای تصمیم مسئله را دارا می باشد. همچنین روش GA-ILP با ترکیب GA و برنامه ریزی خطی اعداد صحیح (ILP) یک روش هیبریدی می باشد که با اینکه از نظر تعداد تکرار مطلوب است دارای پیچیدگی مدل سازی و پیاده سازی رایانه ای می باشد (حقیقی، ۱۳۹۲).

بهترین مقدار تابع هزینه معادل ۱۲۷،۳۳۰،۸۵۵ روپیه دست یافته است که در مقایسه با پژوهش های گذشته کاهش یافته است. باتوجه به این جدول میزان بهبود تابع هزینه شبکه کادو در الگوریتم KH نسبت به الگوریتم GA حدود ۳/۳ درصد و نسبت به روش GA-ILP حدود ۳ درصد بهبود یافته است. همچنین این کاهش هزینه نسبت به پاسخ روش PSO به میزان ۲/۶ درصد می باشد.

می توان بهتر بودن نتیجه الگوریتم KH نسبت به دیگر الگوریتم های فرا ابتکاری مانند PSO و GA را به دلیل برخوردار

جدول ۳- قطرهای بهینه به دست آمده برای شبکه کادو با استفاده از روش های مختلف

قطر (میلی متر)				لوله
KH	PSO (مقدم و همکاران، ۱۳۹۲)	GA-ILP (Haghighi و همکاران، ۲۰۱۱)	GA (Kadu و همکاران، ۲۰۰۸)	
۹۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱
۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۲
۳۵۰	۵۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۳
۳۰۰	۲۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۴
۲۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۵
۳۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۲۵۰	۶
۸۰۰	۹۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۷
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۸
۶۰۰	۶۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۹
۶۰۰	۷۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۱۰
۸۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۱
۷۵۰	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰	۱۲
۵۰۰	۵۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۱۳
۴۵۰	۴۵۰	۴۰۰	۴۰۰	۱۴
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵
۵۰۰	۴۵۰	۵۰۰	۵۰۰	۱۶
۳۵۰	۳۰۰	۳۵۰	۳۵۰	۱۷
۴۰۰	۴۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۱۸
۴۵۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۹
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۰
۶۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۷۰۰	۲۱
۲۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۲۲
۱۵۰	۱۵۰	۴۵۰	۴۰۰	۲۳
۳۵۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۲۴
۶۰۰	۵۰۰	۷۰۰	۷۰۰	۲۵
۲۵۰	۱۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۶
۲۵۰	۳۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۷
۳۰۰	۳۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۸
۲۰۰	۱۵۰	۳۰۰	۳۰۰	۲۹
۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰
۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۳۱
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۳۲
۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۳
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۳۴
۱۲۷۳۳۰۸۵۵	۱۳۰۶۶۶۰۴۳	۱۳۱۳۱۲۸۱۵	۱۳۱۶۷۸۹۳۵	Cost (Rs)
۴۴۲۰۰	۴۵۱۵۰	۴۴۴۰	۳۶۰۰۰	Evaluation

جدول ۴- فشار در گره‌ها در شبکه کادو متناظر با جواب بهینه

گره	فشار (متر)	گره	فشار (متر)	گره	فشار (متر)	گره	فشار (متر)
۱	مخزن ۱	۸	۸۸/۷۴	۱۵	۸۷/۹۴	۲۲	۸۵/۰۰
۲	مخزن ۲	۹	۹۱/۰۵	۱۶	۸۲/۵۹	۲۳	۸۲/۹۶
۳	۹۸/۲۸	۱۰	۸۸/۹۹	۱۷	۸۹/۴۶	۲۴	۸۰/۲۰
۴	۹۵/۰۳	۱۱	۸۷/۱۵	۱۸	۸۵/۳۹	۲۵	۸۰/۳۵
۵	۸۸/۰۴	۱۲	۸۵/۰۷	۱۹	۸۶/۳۵	۲۶	۸۰/۱۳
۶	۸۶/۵۵	۱۳	۸۴/۵۳	۲۰	۸۲/۰۸		
۷	۸۷/۲۶	۱۴	۹۳/۵۰	۲۱	۸۶/۴۸		

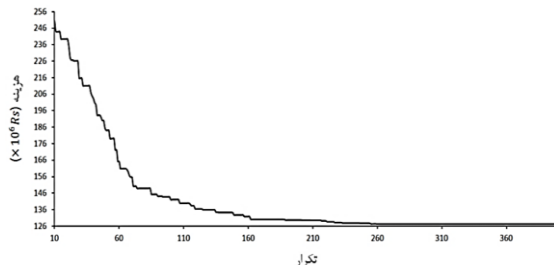
جدول ۵- قطرهای بهینه به دست آمده برای شبکه خرمشهر

لوله	KH (Zanganeh و Samani) LP (۲۰۱۰)	لوله	KH (Zanganeh و Samani) LP (۲۰۱۰)
۱	۲۲۲	۳۰	۱۱۱
۲	۱۶۰	۳۱	۲۵
۳	۱۴۲	۳۲	۲۵
۴	۱۲۴	۳۳	۲۵
۵	۱۱۱	۳۴	۷۵
۶	۲۵	۳۵	۱۲۴
۷	۱۴۲	۳۶	۷۵
۸	۷۵	۳۷	۱۱۱
۹	۷۵	۳۸	۷۵
۱۰	۷۵	۳۹	۲۵
۱۱	۱۱۱	۴۰	۷۵
۱۲	۷۵	۴۱	۷۵
۱۳	۷۵	۴۲	۱۱۱
۱۴	۲۵	۴۳	۱۱۱
۱۵	۲۵	۴۴	۱۱۱
۱۶	۷۵	۴۵	۱۱۱
۱۷	۲۵	۴۶	۲۵
۱۸	۱۴۲	۴۷	۷۵
۱۹	۲۵	۴۸	۱۱۱
۲۰	۷۵	۴۹	۲۵
۲۱	۷۵	۵۰	۲۵
۲۲	۷۵	۵۱	۱۱۱
۲۳	۱۱۱	۵۲	۲۵
۲۴	۷۵	۵۳	۱۱۱
۲۵	۷۵	۵۴	۲۵
۲۶	۲۵	۵۵	۱۱۱
۲۷	۲۵	۵۶	۱۱۱
۲۸	۱۲۴	۵۷	۲۵
۲۹	۷۵	۵۸	۱۲۴

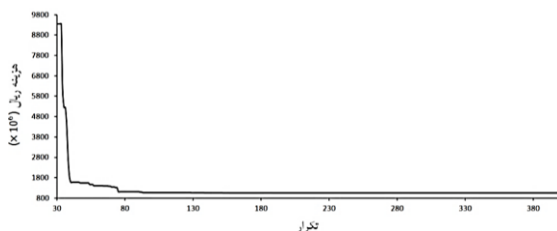
نحوه همگرایی بهترین اجرای روش KH به منظور حل شبکه کادو در شکل (۵) نشان داده شده است. به دلیل تصادفی بودن جمعیت اولیه در این الگوریتم و بزرگ بودن مقدار هزینه‌ها در شروع اجرای الگوریتم، از نشان دادن مقدار تابع هدف در ۹ تکرار اول صرف نظر شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد که

الگوریتم KH از سرعت همگرایی مناسبی برخوردار است به طوری که در تکرارهای پایین خیلی سریع به سمت جواب بهینه حرکت می‌کند. با شبیه‌سازی این شبکه با استفاده از قطرهای بهینه به دست آمده، مقدار فشار در گره‌های مختلف در جدول (۴) آورده شده است که با توجه به محدودیت‌های فشار تعیین شده

هیدرولیکی فشار در گره‌های این شبکه در جدول (۶) آورده شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که در این طرح، محدودیت حداقل فشار ۳۰ متر در گره‌های این شبکه برآورده شده است.



شکل ۵- نمودار همگرایی KH در شبکه کادو



شکل ۶- نمودار همگرایی KH در شبکه خرمشهر

در مرجع (Kadu و همکاران، ۲۰۰۸) فشار به‌دست‌آمده برای هر گره در بازه فشار مجاز آن گره قرار دارد. بنابراین پاسخ بهینه به‌دست‌آمده توسط الگوریتم یک پاسخ شدنی می‌باشد. به‌منظور اجرای الگوریتم KH برای شبکه خرمشهر مقدار پارامترهای KH مشابه مقدارهای تنظیم‌شده برای شبکه کادو در نظر گرفته شده است. میانگین مقدار به‌دست‌آمده برای تابع هزینه شبکه خرمشهر در تعداد ۵ مرتبه اجرای KH با حداکثر تکرار ۵۰۰ تکرار، به‌ترتیب ۱،۳۹۷،۰۴۵ هزار ریال می‌باشد. نمودار همگرایی الگوریتم KH در شبکه خرمشهر برای بهترین نتیجه به‌دست‌آمده در شکل (۶) نشان داده شده است. به‌دلیل بزرگ بودن مقدار تابع هدف در شروع اجرای الگوریتم، از نشان دادن نتیجه ۲۹ تکرار اول صرف‌نظر شده است.

همچنین نتیجه به‌دست‌آمده برای قطرهای بهینه این شبکه با استفاده از KH به همراه نتیجه پژوهش (Samani و Zanganeh، ۲۰۱۰) در جدول (۵) آورده شده است. پاسخ بهینه به‌دست‌آمده در پژوهش (Samani و Zanganeh، ۲۰۱۰) معادل ۱،۵۳۵،۳۷۱ هزار ریال می‌باشد درحالی‌که الگوریتم KH به بهترین پاسخ معادل ۱،۳۷۶،۷۱۳ هزار ریال پس از ۲۷،۷۱۰ مرتبه ارزیابی تابع هدف، دست یافته است و عملکرد خیلی خوبی در حل شبکه خرمشهر نشان داده است. با شبیه‌سازی طرح بهینه به‌دست‌آمده برای این شبکه در نرم‌افزار اپینت، مقدار پارامتر

جدول ۶- فشار در گره‌ها در شبکه خرمشهر متناظر با جواب بهینه

گره	فشار (متر)	گره	فشار (متر)	گره	فشار (متر)
۱	معزن	۱۴	۳۴/۰۸	۲۷	۳۷/۷۱
۱	۵۰/۳۴	۱۵	۴۴/۰۴	۲۸	۳۵/۸۱
۲	۵۰/۳۰	۱۶	۴۵/۵۰	۲۹	۳۳/۴۸
۳	۴۸/۵۴	۱۷	۴۱/۲۵	۳۰	۳۲/۴۱
۴	۴۷/۱۳	۱۸	۴۳/۶۹	۳۱	۳۸/۹۸
۵	۴۶/۵۴	۱۹	۴۳/۰۸	۳۲	۳۵/۹۴
۶	۴۶/۰۷	۲۰	۳۲/۴۳	۳۳	۳۱/۳۱
۷	۳۶/۷۶	۲۱	۴۲/۵۳	۳۴	۳۷/۴۴
۸	۴۸/۵۲	۲۲	۴۱/۷۱	۳۵	۳۵/۲۰
۹	۴۵/۹۸	۲۳	۴۳/۲۸	۳۶	۳۰/۰۰
۱۰	۴۶/۵۵	۲۴	۴۲/۷۳	۳۷	۳۵/۸۵
۱۱	۴۵/۶۲	۲۵	۴۲/۳۹	۳۸	۳۴/۳۱
۱۲	۴۴/۷۲	۲۶	۴۱/۳۰	۳۹	۳۳/۸۲
۱۳	۴۳/۴۰	۲۶ز	۴۰/۴۸	۴۰	۳۲/۲۹

خرمشهر حداقل‌سازی شده است. نتیجه به‌دست‌آمده توسط الگوریتم KH برای تابع هزینه لوله‌های شبکه کادو نسبت به بهترین نتیجه توسط روش‌های تصادفی بهینه‌سازی در پژوهش‌های گذشته (GA، GA-ILP و PSO) حدود ۲/۶ درصد معادل ۳،۳۳۵،۱۸۸ روپیه بهبود نشان داده است. همچنین پاسخ بهینه

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی گردید توانایی و کارایی الگوریتم بهینه‌سازی فراکوشی گروه میگوها (KH) در حل مسئله شبکه‌های توزیع آب موردبررسی و ارزیابی قرار گیرد. بدین منظور تابع هزینه لوله‌ها به‌عنوان تابع هدف برای دو شبکه کادو و

- (ASO) to the optimal operation of water distribution networks", *Water Science and Technology: Water Supply*, 2018, 18 (1), 318-332.
- Gandomi AH, Alavi AH, "Krill herd: a new bio-inspired optimization algorithm", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012, 17 (12), 4831-4845.
- Geem ZW, "Multiobjective optimization of water distribution networks using fuzzy theory and harmony search", *Water*, 2015, 7 (7), 3613-3625.
- Haghighi A, Samani HMV, Samani ZMV, "GA-ILP method for optimization of water distribution networks", *Water Resources Management*, 2011, 25 (7), 1791-1808.
- Jabbary A, Poteh HT, Younesi H, Haghiabi AH, "Development of central force optimization for pipe-sizing of water distribution networks", *Water Science and Technology: Water Supply*, 2016, 16 (5), 1398-1409.
- Kadu MS, Gupta R, Bhavne PR, "Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space", *Water Resource Planning and Management*, 2008, 134 (2), 147-160.
- Mansouri R, Torabi H, Hoseini M, Morshedzadeh H, "Optimization of the Water Distribution Networks with Differential Evolution (DE) and Mixed Integer Linear Programming (MILP)", *Journal of Water Resource and Protection*, 2015, 7, 715-729.
- Reca J, Martínez J, López-Luque R, "A new efficient bounding strategy applied to the heuristic optimization of the water distribution networks design", *Congress on Numerical Methods in Engineering CMN*, Valencia, Spain, 3-5 July, 2017.
- Rossman LA, *EPANET 2 User's Manual*, EPA/600/R-00/057, 2000.
- Samani HMV, Zanganeh A, "Optimization of water networks using linear programming", *Water Management*, 2010, 163, 9, 475-485.
- Savic DA, Walters GA, "Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks", *Water Resource Planning and Management*, 1997, 123 (2), 67-77.
- Shirzad A, Tabesh M, Atayikia B, "Multiobjective Optimization of Pressure Dependent Dynamic Design for Water Distribution Networks", *Water Resources Management*, 2017, 31 (9), 2561-2578.
- Surco DF, Vecchi TP, Ravagnani MA, "Optimization of water distribution networks using a modified particle swarm optimization algorithm", *Water Science and Technology: Water Supply*, 2018, 18 (2), 660-678.
- Syahputra R, "Distribution Network Optimization Based on Genetic Algorithm", *Journal of Electrical Technology UMY*, 2017, 1 (1), 1-9.
- Wang GG, Gandomi AH, Alavi AH, Gong D, "A comprehensive review of krill herd algorithm: variants hybrids and applications", *Artificial Intelligence Review*, 2019, 51 (1), 119-148.
- Wang G, Guo L, Wang H, Duan H, Liu L, Li J, "Incorporating mutation scheme into krill herd algorithm for global numerical optimization", *Neural Computing and Applications*, 2014, 24 (3-4), 853-871.

KH برای تابع هدف در شبکه خرمشهر نسبت به نتیجه پژوهش گذشته حدود ۱۰ درصد معادل ۱۵۸،۶۵۸،۰۰۰ ریال کاهش هزینه نشان می‌دهد. نتیجه به‌دست‌آمده برای دو شبکه مورد مطالعه نشان‌دهنده عملکرد مطلوب الگوریتم KH در حل مسئله طراحی شبکه‌های توزیع آب حلقه‌ای می‌باشد. در تبیین نتایج بالا می‌توان گفت که در واقع در الگوریتم KH با به‌کارگیری عملگرهای جهش و پیوند توانایی رهایی از به تله افتادن در پاسخ‌های بهینه محلی افزایش یافته و به جست‌وجوی بیشتر در فضای تصمیم می‌پردازد. همچنین از دیگر مزایای این روش می‌توان به سرعت همگرایی بالای آن در تکرارهای اولیه اشاره نمود به طوری که ساختار الگوریتم باعث شده است که تحت تأثیر حرکت‌های مختلف (به‌صورت موضعی و سراسری) خیلی سریع به سمت جواب بهینه همگرا گردد.

پژوهش حاضر اولین تلاش برای استفاده از الگوریتم گروه میگوها به منظور حل مسئله شبکه‌های توزیع آب می‌باشد. به همین دلیل تنها بهینه‌سازی تک‌هدفه این شبکه‌ها با در نظر گرفتن تابع قطر لوله‌ها به‌عنوان تابع هدف بررسی شده است. با توجه به عملکرد مطلوب الگوریتم KH در حل این مسئله، سنجش توانایی این الگوریتم در بهینه‌سازی چند هدفه شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن سایر توابع هدف از جمله کیفیت آب، هزینه مخزن و هزینه پمپاژ در پژوهش‌های آتی قابل بررسی می‌باشد.

۵- مراجع

- حقیقی ع، "طراحی اقتصادی شبکه‌های آب‌رسانی با استفاده از عملگر مفهومی آستانه پویا در الگوریتم ژنتیک (GA-DTO)", *هیدرولیک*، ۱۳۹۲، ۸ (۱)، ۱۹-۳۷.
- صادقی لاری ن، "استفاده از الگوریتم میگوها جهت بهبود ساختار شبکه عصبی مصنوعی"، پایان‌نامه دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، ۱۳۹۴.
- مقدم ع، علیزاده ا، فرید حسینی ع، ضیایی ع ن، فلاح هروی د، "کاربرد یک الگوریتم اصلاح شده بهینه‌سازی ازدحام ذرات در طراحی سیستم‌های توزیع آب"، *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۳۹۲، ۷ (۳)، ۳۸۹-۴۰۱.
- Afshar MH, Afshar A, Marino MA, Hon M, "An iterative penalty method for the optimal design of pipe networks", *International Journal of Civil Engineering*, 2009, 7 (2), 109-123.
- Asteris PG, Nozhati S, Nikoo M, Cavaleri L, Nikoo M, "Krill herd algorithm-based neural network in structural seismic reliability evaluation", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2019, 26 (13), 1146-1153.
- Bozorg-Haddad O, Latifi M, Bozorgi A, Rajabi MM, Naeni ST, Loáiciga HA, "Development and application of the anarchic society algorithm

Wolpert DH, Macready WG, "No free lunch theorems for optimization", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1 (1), 67-82.

EXTENDED ABSTRACT

Optimum Design of Water Distribution Networks Utilizing Optimization Krill Herd Algorithm

Zahra Hasanpour^a, Babak Shahinejad^b, Hasan Torabi Podeh^{c*}, Azadeh Jabbari^d

^a *Hydraulic-Structures, Department of Water Engineering, Lorestan University, Khoramabad, Iran*

^b *Department of Water Engineering, Lorestan University, Khoramabad, Iran*

^c *Department of Water Engineering, Lorestan University, Khoramabad, Iran*

^d *Elites Club, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran*

Received: 29 August 2018; Accepted: 21 May 2020

Keywords:

Metaheuristic algorithm, Hydraulic constraints, Matlab, Epanet.

1. Introduction

An effective way to achieve an economical design of water distribution networks (WDNs) is to utilize the metaheuristic optimization algorithms profited by swarm intelligence. In this research, Krill Herd (KH) Optimization algorithm was applied to obtain the optimum design of water distribution networks (WDNs). For this purpose, the KH algorithm was linked with EPANET hydraulic software (Rossman 2000) in MATLAB. The capital cost was considered as the objective function in Kadu and Khorramshahr WDNs herein. The obtained optimum design cost for two WDNs was compared with the solutions published using other approaches.

2. Methodology

2.1. Objective function

The overall objective function was formulated as:

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

Where $v(V_i)$ and $v(P_j)$ are penalty functions for violation of velocity and pressure constraints, respectively, and ϑ is the violation factor. Herein C_t is computed with calibrated $\vartheta = 100,000,000$, and penalty functions are considered as below:

$$\text{If } P_j > P_{max} \quad \rightarrow v(P_j) = \text{Max}(0, P_j - P_{max}) \quad (2)$$

$$\text{If } P_j < P_{min} \quad \rightarrow v(P_j) = \text{Max}(0, P_{min} - P_j) \quad (3)$$

$$\text{If } V_i > V_{max} \quad \rightarrow v(V_i) = \text{Max}(0, V_i - V_{max}) \quad (4)$$

* Corresponding Author

E-mail addresses: zahrahassanpour1371@gmail.com (Zahra Hasanpour), shahinejad.b@lu.ac.ir (Babak Shahinejad), torabi.ha@lu.ac.ir (Hasan Torabi Podeh), jabary.az@gmail.com (Azadeh Jabbari).

$$\text{If } V_i < V_{min} \rightarrow v(V_i) = \text{Max}(0, V_{min} - V_i) \tag{5}$$

2.2. KH algorithm

The Krill herd algorithm performs based on the herding behavior of krill individuals (Gandomi & Alavi, 2012). The position of an individual krill at each time is governed by three factors involves movement induced by other krill individuals, foraging activity and random diffusion. A sensing distance (d_s) should be considered around each krill individual to find the neighbors (Fig. 1). The main steps of the KH algorithm are as follows:

- I) Defining the problem and KH parameters and initial krill herd population, etc.
- II) Evaluating all krill individual fitness based on its current position.
- III) Calculating motion for each krill based on the position of other individuals, foraging motion and physical diffusion.
- IV) Implement the mutation and crossover operators.
- V) Updating the krill individual position in the population.
- VI) Going to step III and repeating the steps until termination criteria are met.

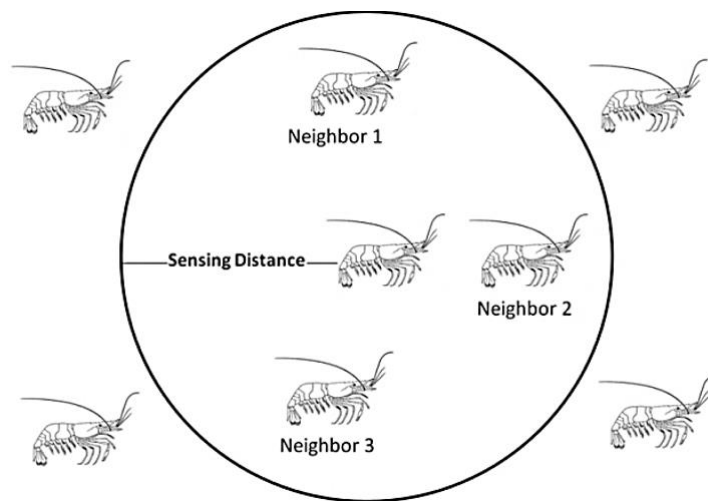


Fig. 1. A schematic of the swarm krill individual behavior in typical decision space

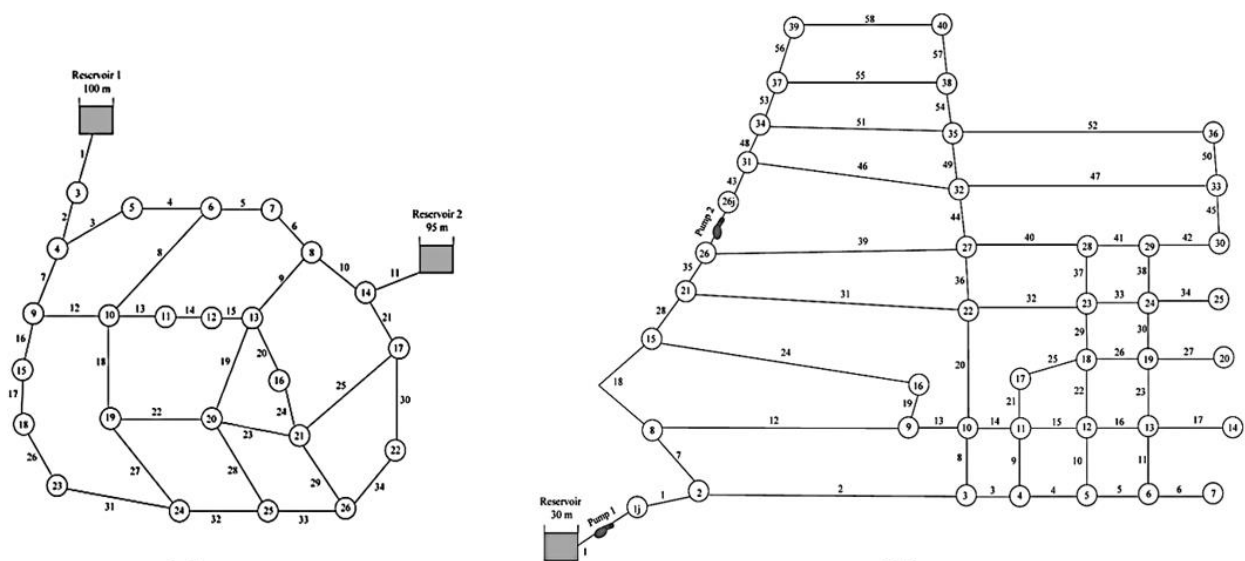


Fig. 2. Studied Networks: a) Kadu Network design, b) Khorramshahr Network design

2.3. Studied Networks

The Kadu Network is a looped WDN (Fig. 2-a) fed by two reservoirs. Further information and hydraulic constraints about the Kadu network could be found in Kadu et al. (2008). Also, the Khorramshahr network (Fig. 2-b) is a looped WDN with two booster pumps. Further information about this network could be found in Samani and Zanganeh (2010). Hydraulic constraints and further information about this network could be found in Samani and Zanganeh (2010).

3. Results and discussion

The convergence behavior of the KH methods to optimize pipes design in Kadu and Khorramshahr networks are shown in Fig. 3-a and 3-b, respectively (Regarding the huge amount of the initial 9 iteration cost values in Kadu network and initial 29 iterations in Khorramshahr network, it is decided not to show them in this figure). Here in the calibrated KH parameters are as $N_{pop} = 170$, $C_t = 0.005$, $V_f = 0.002$, $D_{max} = 0.02$, $N_{max} = 0.02$ and $\mu = 0.02$. The Comparison of the KH results for these two networks with those obtained using other optimization techniques in the literature is presented in Table 1 and Table 2.

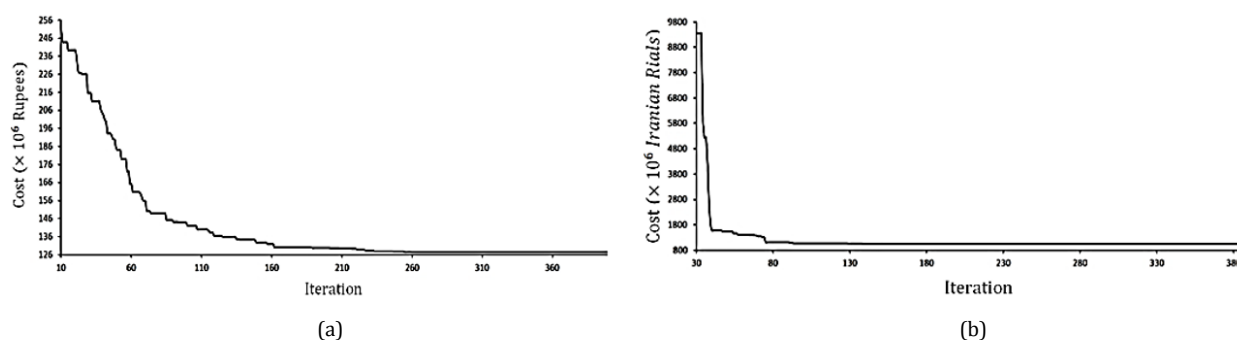


Fig. 3. Convergence behavior of KH for Studied Networks: a) Kadu network, b) Khorramshahr network

Table 1. Comparison of the solutions of Kadu network

Authors	Kadu et al. (2008)	Haghighi et al. (2011)	Moghadam et al. (2013)	Present work
Method used	GA	GA-ILP	PSO	KH
Cost (Rupees)	131,678,935	131,312,815	130,666,043	127,330,855
Evaluation	36,000	4,440	22,000	44,200

Table 2. Comparison of the solutions of Khorramshahr network

Authors	Samani and Zanganeh (2010)	Present work
Method used	LP	KH
Cost (Thousands Iranian Rials)	1,535,371	1,376,713
Evaluation	14	27,710

With regard to Table 1 the optimum cost obtained by KH for Kadu network compared with GA, GA-ILP and PSO algorithm shows an approximate improvement of 3.30%, 3.03% and 2.55%, respectively. Also, the optimum cost obtained by KH for the Khorramshahr network as compared with the LP method (Table 2) shows an approximate improvement of 10.33%.

4. Conclusions

The obtained optimum design cost for two WDNs was compared with the solutions published using other approaches. This comparison shows that the KH method is more efficient in obtaining lower piping-cost rather than other methods. It seems that this high ability of KH to find optimum solutions has come from the swarm behavior of krill herds and sharing their own global and individual information. Also, the mutation and crossover operators enhance increasing the global exploration ability and convergence velocity of this approach. So, the assessment of KH performance to select the optimum rehabilitation alternatives of WDNs is recommended for future studies.

5. References

- Gandomi AH, Alavi AH, "Krill herd: a new bio-inspired optimization algorithm", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012, 17 (12), 4831-4845.
- Haghighi A, Samani HMV, Samani ZMV, "GA-ILP method for optimization of water distribution networks", *Water Resources Management*, 2011, 25 (7), 1791-1808.
- Kadu MS, Gupta R, Bhave PR, "Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space", *Water Resource Planning and Management*, 2008, 134 (2), 147-160.
- Moghaddam A, Alizadeh A, Farid Hosseini A, Ziaei AN, Fallah D, "The application of an improved Particle Swarm Optimization algorithm in design of water distribution systems", *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 7 (3), 389-401 (In Persian).
- Rossman LA, *EPANET 2 User's Manual*, EPA/600/R-00/057, 2000.
- Samani HMV, Zanganeh A, "Optimization of water networks using linear programming", *Water Management*, 2010, 163, 9, 475-485.