



مقایسه قابلیت الگوریتم جهش تصادفی قورباغه با دیگر الگوریتم های فراکاوشی در طراحی شبکه های فاضلاب شهری

فریبرز معصومی^{*}، سینا معصوم زاده^۱، نگین ظفری^۱، سارا اسفندمز^۱

۱- دانشکده عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳

کلمات کلیدی:

الگوریتم فراکاوشی

بهینه سازی

حداقل سازی هزینه

شبکه فاضلاب شهری

الگوریتم جهش تصادفی قورباغه

خلاصه: بهینه سازی طراحی شبکه های جمع آوری و انتقال فاضلاب شهری به دلیل هزینه های بسیار بالای اجرای این زیرساخت ها همواره مورد توجه محققین و کارشناسان بوده است. تعدد متغیرهای تصمیم و پیچیده بودن قیودات حاکم بر مسئله، استفاده از روش های ریاضیاتی را در بهینه سازی این سیستم ها با دشواری های زیادی همراه کرده و این امر استفاده از الگوریتم های فراکاوشی را در حل این مسائل ضروری ساخته است. الگوریتم جهش تصادفی قورباغه یکی از الگوریتم های فراکاوشی جدید است که قابلیت خود را در حل تعداد زیادی از مسائل بهینه سازی نشان داده است. در این تحقیق، قابلیت الگوریتم جهش تصادفی قورباغه در حل مسئله طراحی بهینه شبکه های فاضلاب شهری مورد بررسی قرار گرفته است. قطر لوله ها به عنوان متغیرهای تصمیم گسسته و عمق کارگذاری لوله ها به عنوان متغیرهای تصمیم پیوسته، همزمان در این تحقیق به عنوان مجهولات مسئله مطرح بوده اند. همچنین سه شبکه فاضلاب با ۱۳، ۴۱ و ۶۵ متغیر تصمیم (به صورت ترکیبی از تعداد لوله ها و تعداد گره ها) به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. رعایت قیودات متعدد فنی، اجرایی و هیدرولیکی نیز با تعریف توابع جریمه مناسب کنترل شده است. نتایج نشان داد که نتایج به دست آمده از الگوریتم جهش تصادفی قورباغه در مقایسه با بهترین پاسخ به دست آمده از الگوریتم های ژنتیک، هوش جمعی ذرات و رقابت زیست طبیعی در مسائل اول و سوم به ترتیب منجر به کاهش هزینه به میزان ۰/۴۳ و ۳/۲ درصد شده و در مسئله دوم نیز در مقایسه با دیگر روش ها، با کمترین میزان تعداد فراخوانی تابع هدف به تابع هدفی برابر دست یافته است.

۱- مقدمه

شبکه های جمع آوری و انتقال فاضلاب یکی از مهم ترین زیرساخت های هر جامعه است که نقش مهمی در جلوگیری از شیوع بیماری های واگیردار و نیز حفظ محیط زیست دارد و طراحی بهینه این سیستم ها دارای پیچیدگی های فنی و اجرایی متعددی است. از طرفی ساخت و نگهداری این تأسیسات، مستلزم صرف هزینه های قابل توجه است و هرگونه تلاش برای بهینه کردن هزینه های اجرایی این سیستم ها حائز اهمیت است. بدین جهت طراحی بهینه شبکه های جمع آوری فاضلاب در سال های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. روش های زیادی برای حل مسائل بهینه سازی وجود دارد. از جمله این روش ها می توان به روش برنامه ریزی خطی [۲] و [۱]، برنامه ریزی غیرخطی [۳]، برنامه ریزی پویا [۴] و الگوریتم های فراکاوشی اشاره کرد. در سال های اخیر، الگوریتم های فراکاوشی به دلیل قابلیت های آن ها در حل مسائل پیچیده، غیرخطی و دارای قیودات متعدد در بسیاری از

مسائل بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفته است. اما هنوز یک الگوریتم خاص و غالب که بتوان آن را برای حل تمام مسائل بهینه سازی پیشنهاد داد معرفی نشده است. بنابراین لزوم کشف الگوریتم های جدید و بررسی عملکرد آن ها و نیز ارتقاء عملکرد الگوریتم های پیشین به شدت احساس می شود. بهینه سازی شبکه جمع آوری فاضلاب نیز از جمله مسائل ریاضیاتی پیچیده، غیرخطی، دارای متغیرهای تصمیم زیاد و نیز دارای قیودات متعدد است. برای حل مسائل پیچیده و غیرخطی، دسته خاصی از روش های بهینه سازی موسوم به نام روش های متاهوریستیک^۱ ابداع شدند. لغت هیوریستیک یک کلمه یونانی و به مفهوم شناختن، فهمیدن و کشف کردن است و در فارسی به فراکاوشی ترجمه شده است. به طور کلی، هر الگوریتم فراکاوشی از دو بخش اصلی تشکیل شده است. بخش اول ساختار و روش عملگرها برای تولید جواب های جدید است. بخش دیگر و مهم تر این الگوریتم ها مرحله انتخاب است که در واقع هوشمندی الگوریتم ها در این مرحله اعمال می گردد. منظور

1 Metaheuristic

^{*} نویسنده عهده دار مکاتبات: f_masoumi@uma.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



جدول ۱. مقایسه مشخصات تعدادی از الگوریتم‌های فراکاوشی

Table 1. Comparing properties of a number of meta-heuristic algorithms

ردیف	نام الگوریتم	ارائه دهنده	منبع الهام	نوع متغیر تصمیم
۱	الگوریتم ژنتیک	[6] (Holland 1975)	تکامل ژنتیکی موجودات زنده	پیوسته
۲	الگوریتم جامعه مورچگان	[7] (Dorigo et al. 2006)	جست و جوی غذای مورچه‌ها	گسسته (در تعدادی از مسائل با متغیر تصمیم پیوسته نیز استفاده شده است.)
۳	الگوریتم هوش تجمعی ذرات	(Kennedy and Eberhart 1995) [8]	پرواز پرندگان	پیوسته
۴	الگوریتم رقابت استعماری	(Atashpaz-Gargari and Lucas 2007) [9]	فرآیند تاریخی استعمار	پیوسته
۵	الگوریتم جفت‌گیری زنبور عسل	(Abbass 2001) [10]	جفت‌گیری زنبور عسل	پیوسته

که در این پژوهش مسئله را در دو حالت با تغییر در قیدها حل و نتایج را با هم مقایسه کردند که نتایج حاکی از همگرایی بهتر الگوریتم CACOا با افزایش قیدها بود [۱۲]. افشار در سال ۲۰۱۲ نیز از الگوریتم GAS برای حل مسئله بهینه‌سازی شبکه فاضلاب استفاده کرده و نتایج به دست آمده را با نتایج الگوریتم‌هایی که بر روی همین شبکه اجرا شده بود مقایسه نمودند [۱۳]. شانگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ برای طراحی بهینه شبکه فاضلاب شهر مرکزی تایوان از روش بهینه‌سازی جستجوی تابو^۵ (TS) و شبیه‌سازی بازیخت^۶ (SA) استفاده نموده و نتایج را با طرح اصلی و اولیه مقایسه کردند. نتایج مقایسه نشان داد که SA از لحاظ عملکرد و کارایی برای حل مسائل بهینه‌سازی شبکه فاضلاب نسبت به TS بهتر است [۱۴]. احمدی و همکاران در سال ۲۰۱۸ از الگوریتم تکامل یافته PSO به نام الگوریتم HPSO برای بهینه‌سازی شبکه فاضلاب استفاده کرده‌اند و سپس یک الگوریتم ترکیبی به نام DPHPSO ارائه دادند که ترکیبی از الگوریتم HPSO با برنامه‌ریزی پویا است. نتایج نشان دهنده برتری الگوریتم ترکیبی DPHPSO در حل مسائل پیچیده است [۱۵]. در سال ۲۰۱۹ زهرائی و همکاران از یک روش اتوماتیک سلولی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی دو فاز برای بهینه‌سازی طراحی شبکه فاضلاب خانگی استفاده کردند. در این پژوهش از EPA برای شبیه‌سازی و از CA به عنوان یک ابزار برای بهینه‌سازی استفاده شده است. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی هم از لحاظ تعداد فراخوانی تابع هدف و هم از نظر پاسخ نهایی بهینه نسبت به سایر روش‌های مورد بررسی عملکرد بهتری از خود نشان داد [۱۶].

از مرحله انتخاب، چگونگی انتخاب تعدادی از جواب‌های فعلی برای اعمال عملگرها و تولید جواب‌های جدید است. با تکرار تمرکز تولید جواب‌های جدید با استفاده از جواب‌های برتر و انتقال نسل شایسته‌تر به مرحله بعد، انتظار می‌رود که در هر مرحله کیفیت جواب‌ها از نظر بهینگی ارتقاء یابد. از آنجا که سالانه بر شمار الگوریتم‌های فراکاوشی اضافه می‌گردد و الگوریتم‌های جدید معرفی می‌شود بنابراین امکان ره‌گیری و معرفی تمام این الگوریتم‌ها وجود ندارد. از جمله الگوریتم‌های پرکاربرد می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، الگوریتم جامعه مورچگان (ACO^۱)، الگوریتم جفت‌گیری زنبور عسل (HBMO^۲)، الگوریتم هوش تجمعی ذرات (PSO^۳) و الگوریتم رقابت استعماری (ICA^۴) اشاره کرد [۵]. در جدول ۱ مشخصات این الگوریتم‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

در پژوهش‌های اخیر بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی به دلیل سادگی حل و انعطاف‌پذیری بالا به طور قابل ملاحظه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. در سال ۲۰۰۸ ایزکیردی و همکاران از الگوریتم هوش تجمعی ذرات در بهینه‌سازی شبکه فاضلاب استفاده کردند و نتایج این الگوریتم را با نتایج روش برنامه‌ریزی پویا مقایسه نمودند که نشان دهنده عملکرد بهتر PSO در شرایط گسسته‌سازی با ابعاد ۰/۲ متر بود [۱۱]. همچنین افشار در سال ۲۰۱۰ از الگوریتم بهبود یافته مورچه‌ها (CACOA) برای بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب استفاده کردند

- 1 Ant Colony Optimization
- 2 Honey-bee Mating Optimization Algorithm
- 3 Particle Swarm Optimization
- 4 Imperialist Competitive Algorithm

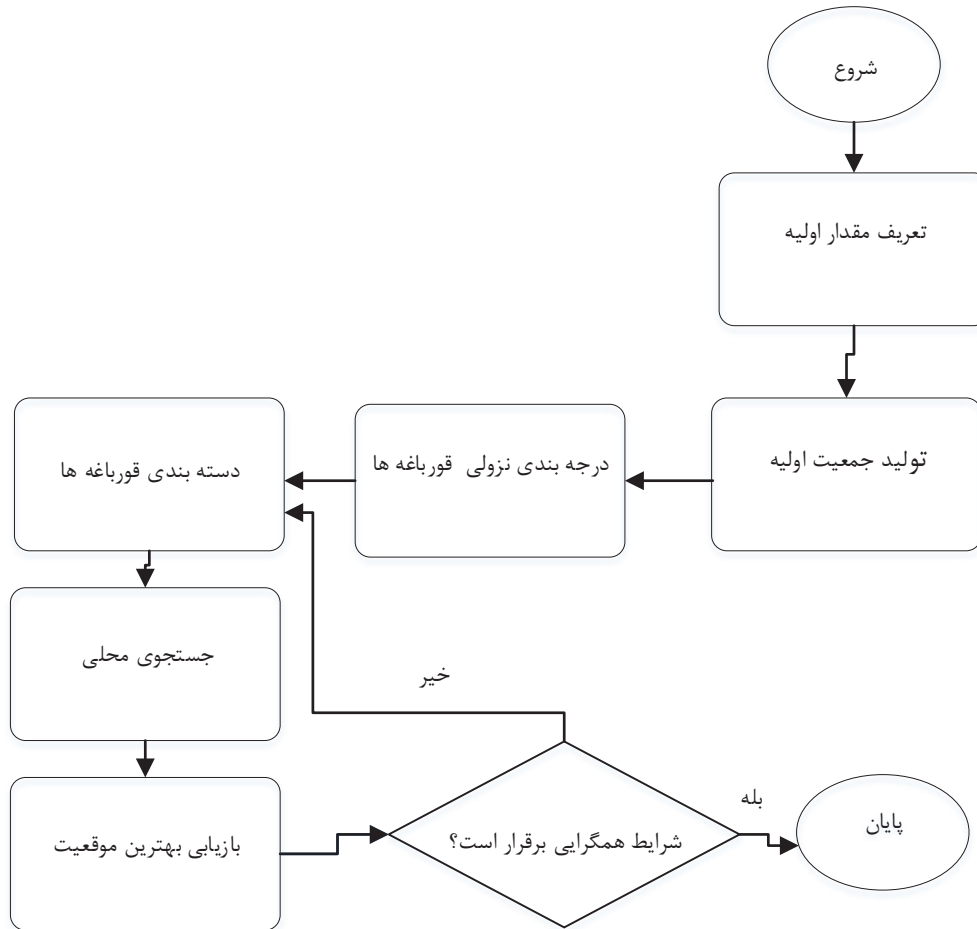
- 5 Tabu Search
- 6 Simulated Annealing

شبکه فاضلاب را بهینه و در نهایت به این نتیجه رسیدند که با بیان قید سرعت و عمق به صورت تابعی از شیب، نتایج نسبت به استفاده از روش جریمه در قیدها، بهتر و سریع‌تر حاصل می‌شود [۲۴]. در سال ۱۳۹۳ نفیسی و احمدی با استفاده از الگوریتم هوش تجمعی ذرات با قابلیت پرواز بازگشتی و مجهز به حافظه هارمونی برای دو نمونه از شبکه‌های فاضلاب، هزینه‌های حفاری و لوله‌های این شبکه‌ها را حداقل کردند [۲۵]. نتایج به دست آمده از این الگوریتم نسبت به نتایج الگوریتم‌های دیگر قابل قبول و همچنین دارای ثبات محاسباتی نیز بوده است. معینی و افشار در سال ۱۳۹۳ با هدف حداقل کردن هزینه طراحی تصفیه‌خانه‌ها و شبکه‌های فاضلاب خانگی، ابعاد شبکه فاضلاب و نیز ابعاد تصفیه‌خانه را بهینه کردند [۲۶]. آن‌ها نتایج حاصل از الگوریتم جامعه مورچگان را با نتایج الگوریتم ژنتیک مقایسه کردند که نتایج مقایسه، برتری الگوریتم جامعه مورچگان را نشان داد. در سال ۲۰۱۸ الطربشه و همکاران روش جدیدی برای حل مسئله بهینه‌سازی شبکه فاضلاب با در نظر گرفتن عدم قطعیت در توزیع مکانی جمعیت ارائه دادند [۲۷]. در این تحقیق از شبیه‌سازی مونت کارلو و الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ژنتیک استفاده شد و یک روش پیشنهادی با در نظر گرفتن نرخ رشد مثبت و منفی جمعیت ارائه گردید.

همانطور که جمع‌بندی و بررسی مطالعات پیشین اشاره شده نیز بر می‌آید، الگوریتم خاصی وجود ندارد که بتوان به طور قاطع برتری آن را در حل مسائل بهینه‌سازی شبکه فاضلاب اثبات کرد. به علاوه، با توجه به گسسته بودن بخشی از فضای تصمیم مسئله بهینه‌سازی طراحی شبکه فاضلاب، تعدادی از الگوریتم‌های فراکاوشی که ماهیت متغیرهای تصمیم مورد مطالعه آن‌ها پیوسته هست در نقطه بهینه محلی گرفتار شده و پاسخ قابل قبولی ارائه نمی‌نمایند. بنابراین جستجوی الگوریتم‌های جدید و متفاوت برای حل مسائل بهینه‌سازی شبکه فاضلاب ضروری به نظر می‌رسد. الگوریتم جهش تصادفی قورباغه یکی از الگوریتم‌های نوین در زمینه بهینه‌سازی است و در زمینه‌های مختلف مدیریت منابع آب از این الگوریتم استفاده شده است [۳۰-۲۸]. از آنجا که در هیچ یک از مطالعات پیشین، قابلیت الگوریتم جهش تصادفی قورباغه SFLA^۲ در بهینه‌سازی شبکه فاضلاب بررسی نشده است، به همین دلیل در این تحقیق عملکرد این الگوریتم در حل مسائل پیچیده طراحی بهینه شبکه فاضلاب با سه نوع شبکه متفاوت از لحاظ نوع جانمایی و نیز تعدد متغیرهای تصمیم بررسی شده است. همچنین در ادامه نتایج این الگوریتم با نتایج الگوریتم‌های شناخته شده PSO، GA و SCE مقایسه شده است.

برای بهینه‌سازی قطر لوله‌ها و عمق گره‌ها در شبکه فاضلاب، لیانگ و همکاران در سال ۲۰۰۴ از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جستجوی ممنوعه استفاده کردند [۱۷]. در سال ۱۳۹۶ معینی با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان ابعاد شبکه فاضلاب را بهینه کرد [۱۸]. در این پژوهش برای حل مسائل، دو فرمول‌بندی با متغیرهای تصمیم متفاوت در نظر گرفته شد. در فرمول‌بندی اول قطر لوله‌ها و در فرمول‌بندی دوم تراز گره‌ها به عنوان متغیرهای تصمیم فرض شدند. برای حل مسائل چهار الگوریتم سیستم مورچه، سیستم مورچه برتر، سیستم مورچه ترتیبی و سیستم مورچه بیشینه - کمینه در نظر گرفته شد و نتایج حاصل از این چهار الگوریتم با هم مقایسه شدند که نتایج، نشان دهنده برتری الگوریتم سیستم مورچه بیشینه-کمینه بود. در شبکه‌های فاضلاب علاوه بر قطر لوله‌ها می‌توان محل قرارگیری ایستگاه‌های پمپاژ را نیز به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفت. کائو و پن در سال ۲۰۰۹ با در نظر گرفتن این متغیرهای تصمیم شبکه فاضلاب را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی پویا مرتبه دوم GP-QP^۱ بهینه کردند [۱۹]. کومر و همکاران در سال ۲۰۱۸ از یک روش احتمالی به نام SA برای بهینه کردن ابعاد شبکه فاضلاب استفاده کردند [۲۰]. به طور کلی نتایج به دست آمده از این مسئله توانایی SA را برای حل مسائل بهینه‌سازی نشان داد. در سال ۲۰۱۹ نگو و همکاران رویکردی جدید مبتنی بر طرح چند سناریویی برای بهینه‌سازی قطر لوله‌ها و عمق گره‌ها یک سیستم فاضلاب شهری پیشنهاد نمودند [۲۱]. نتایج نشان داد که این روش راه‌حلی قوی برای طراحی شبکه‌های فاضلاب است و برای سناریوهای مختلف مقرون به صرفه است.

با توجه به هزینه‌های بالای طراحی و ساخت شبکه‌های فاضلاب و نقش اساسی این شبکه‌ها در ارائه خدمات شهری و حفاظت از محیط زیست، حداقل کردن هزینه‌های ساخت و طراحی در اجرای سریع‌تر و بهتر شبکه‌های فاضلاب بسیار حائز اهمیت است [۲۲]. بسیاری از محققان سعی در طراحی موثر و کارآمد شبکه بهینه برای کاهش هزینه‌ها داشته‌اند. برای حداقل کردن هزینه ساخت شبکه‌های فاضلاب با بهینه کردن مقادیر قطر و عمق کارگذاری لوله‌ها در سال ۱۳۹۳ روحانی و افشار از الگوریتم اتوماتای سلولی انعطاف‌پذیر برای دو مسئله نمونه استفاده کردند [۲۳]. نتیجه مقایسه الگوریتم‌ها نشان داد که الگوریتم اتوماتای سلولی انعطاف‌پذیر یک ابزار مناسبی است که می‌توان با استفاده از آن، شبکه فاضلاب را هم به صورت ثقلی و هم پمپ‌دار طراحی کرد. معینی و افشار در سال ۲۰۱۳ با استفاده از ترکیب الگوریتم جامعه مورچگان با برنامه‌ریزی غیرخطی، هزینه ساخت



شکل ۱. فلوچارت الگوریتم بهینه سازی جهش تصادفی قورباغه

Fig. 1. The Shuffled Frog Leaping Algorithm's flowchart

به کروموزوم دارد و جمعیت کل قورباغه‌ها در دسته‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شوند تا این دسته‌ها در محل‌های اطراف خود به جستجو بپردازند هر دسته از قورباغه‌ها دارای یک نماینده از انواع مختلف قورباغه‌ها است که این نماینده‌ها در محل‌های مختلف پراکنده شده‌اند. از طرفی هر قورباغه در هر دسته تحت تأثیر اعضای گروه خود و نیز گروه‌های دیگر هستند. بعد از چند مرحله، هم در جستجوی محلی و هم در جستجوی سراسری اطلاعات و پیام‌ها پخش می‌شود و جستجو ادامه می‌یابد تا به شرط همگرایی برسد. الگوریتم SFLA قابلیت بالایی برای جستجوی سراسری دارد و می‌تواند بسیاری از مسائل خطی، غیرخطی، عدد صحیح مختلط و غیره را حل کند. فلوچارت الگوریتم تصادفی قورباغه در شکل ۱ آورده شده است.

۲- الگوسازی نظری و تجربی

۲-۱- معرفی الگوریتم بهینه‌سازی جهش تصادفی قورباغه (SFLA)
 الگوریتم جهش تصادفی قورباغه یکی از الگوریتم‌های بهینه‌ساز فراکاوشی است که برای اولین بار در سال ۲۰۰۳ توسط Eusuff و همکاران ارائه شد [۳۱]. الگوریتم SFLA از رفتار اجتماعی قورباغه‌ها برای جستجوی غذا الهام گرفته شده است. این الگوریتم، نسخه توسعه یافته الگوریتم روش تکامل تصادفی جوامع (SCE) است که با افزودن قابلیت نخبه‌گرایی و هوش جمعی به الگوریتم SCE، الگوریتم جهش قورباغه به دست آمده است. الگوریتم SFLA با الگوی رفتاری دو الگوریتم GA و PSO ترکیب شده است به این صورت که هر قورباغه ساختاری شبیه

شایستگی در کل جمعیت F_g جایگزین F_b در معادله ۳ شده و قورباغه جدید تولید می‌شود. این فرآیند تا همگرایی کامل یا رسیدن به یکی از معیارهای توقف ادامه پیدا می‌کند.

۲-۲- فرمولاسیون مسئله طراحی بهینه شبکه‌های فاضلاب

در این پژوهش، تابع هدف عبارتست از حداقل کردن هزینه‌های کل شبکه که شامل هزینه لوله‌گذاری و هزینه خاک‌برداری است که با استفاده از الگوریتم SFLA به حداقل می‌رسد. این تابع هدف به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود:

$$F = \sum_{i=1}^N L_i K_p (d_i \bar{E}_i) + \sum_{j=1}^M K_j (h_j) \quad (5)$$

در این رابطه، F تابع هزینه اجرای شبکه جمع‌آوری فاضلاب، K_p تابع هزینه لوله‌گذاری، d_i قطر لوله i ام، \bar{E}_i عمق متوسط کارگذاری لوله i ام، L_i طول لوله i ام، تعداد کل لوله‌ها، K_j تابع هزینه آدمرو، h_j ارتفاع آدمروی j ام و M تعداد کل آدمروها است. در این تحقیق هزینه‌های مربوط به پمپاژ و آدمروها در نظر گرفته نشده است. تابع هزینه لوله‌گذاری و تابع هزینه آدمرو نیز برای حل تابع هدف برای مطالعه موردی اول و دوم از روابط ۶ و ۷، برای مطالعه موردی سوم از روابط ۸ و ۹ استفاده شده است:

$$K_{p_{1,2}} = \begin{cases} 1098d_i + 0.8\bar{E}_i - 5.98 & \text{if } d_i \leq 3 \ \& \ \bar{E}_i \leq 10 \\ 5.84d_i + 1.66\bar{E}_i + 0.504d_i\bar{E}_i - 9.64 & \text{if } d_i \leq 3 \ \& \ 10 \leq \bar{E}_i \\ 30d_i + 4.9\bar{E}_i - 105.9 & \text{if } d_i \leq 3 \ \& \ 10 \leq \bar{E}_i \end{cases} \quad (6)$$

$$K_{j_{1,2}} = 250 + h_m^2 \quad (7)$$

$$K_{p_3} = 10.93 \exp(3.43d_i) + 0.012\bar{E}_i^{1.53} + 0.437\bar{E}_i^{1.47}d_i \quad (8)$$

$$K_{j_3} = 41.46h_m \quad (9)$$

قیودات مسئله نیز شامل موارد متعددی همچون رعایت حداقل و حداکثر سرعت در لوله‌ها، قید پیوستگی، قید قاعده تلسکوپ لوله‌ها، قید پر شدگی

جمعیت اولیه قورباغه‌ها در این الگوریتم به صورت تصادفی بین بازه‌های تعریف شده مسئله تولید می‌شود. این جمعیت طبق رابطه ۱ تولید می‌شود:

$$x_i = x_i^l + \alpha(x_i^h - x_i^l) \quad (1)$$

در این رابطه X_i مقدار معادل هر عضو از جمعیت، X_i^l کران پائین متغیر X_i ، X_i^h کران بالای متغیر X_i و α یک مقدار تصادفی بین ۰ و ۱ است. هر قورباغه نمایانگر یک راه حل قابل قبول در مسئله بهینه‌سازی است که دارای یک مقدار شایستگی است.

قورباغه‌ها به صورت نزولی و بر اساس شایستگی که دارند مرتب شده و سپس به چند دسته مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند. تقسیم‌بندی قورباغه به m مجموعه بدین صورت خواهد بود که قورباغه اول در مجموعه اول، قورباغه دوم در مجموعه دوم، قورباغه ام در مجموعه ام و قورباغه $m+1$ ام در مجموعه اول قرار می‌گیرد. نهایتاً هر مجموعه m شامل n عضو مطابق رابطه ۲ خواهد بود:

$$P = m \times n \quad (2)$$

در هر مجموعه موقعیت قورباغه i ام، بر اساس اختلاف بین قورباغه بهتر (با بهترین شایستگی F_b) و قورباغه بدتر (با بدترین شایستگی F_w) با استفاده از معادله ۳ زیر به دست می‌آید:

$$F_g = \alpha(F_b - F_w) \quad (3)$$

در رابطه ۳، α یک مقدار تصادفی یکنواخت بین ۰ و ۱ است. موقعیت جدید قورباغه توسط رابطه ۴ به دست می‌آید در آن حداکثر تغییراتی است که در موقعیت قورباغه می‌توان اعمال کرد.

$$F_w = p_c F_w + F_g \quad D_{\max} \leq F_g \leq -D_{\max} \quad (4)$$

اگر این تغییر موقعیت، قورباغه‌ای با شایستگی بهتر تولید کرد این قورباغه جایگزین قورباغه بدتر می‌شود. در غیر این صورت، قورباغه با بهترین

لوله‌ها و غیره است که به طور کامل در زیر آورده شده است:

$$E_{\min} \leq \bar{E}_l \leq E_{\max} \quad \forall l = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

قید پیوستگی جریان در گره‌های شبکه: طبق این قید مجموع دبی ورودی و خروجی در هر گره باید برابر باشد.

$$\sum_{j=1}^{N_i} \pm Q_i = -q_i \quad \forall_i = 1, 2, \dots, K \quad (10)$$

E_l عمق متوسط کارگذاری لوله l ام، که در رابطه فوق E_{\max} حداکثر مقدار عمق کارگذاری لوله‌ها و E_{\min} حداقل مقدار عمق کارگذاری لوله‌ها است.

در رابطه ۱۰، N_i تعداد لوله‌های متصل به گره i ، مقدار دبی جریان فاضلاب در لوله l ام (مابین گره و گره) که دبی ورودی به گره مثبت و دبی خروجی از گره منفی است، مقدار دبی موضعی جریان فاضلاب ورودی به گره k و تعداد گره‌های شبکه است.

قید عمق جریان فاضلاب در لوله‌ها: این قید را می‌توان بر اساس عمق نسبی جریان (نسبت پر شدگی جریان) به شکل روابط ۱۴ و ۱۵ تعریف کرد:

قید سرعت جریان: در لوله‌های فاضلاب‌روها، سرعت حداکثر مانع از فرسایش و سائیدگی لوله‌های فاضلاب می‌شود و سرعت حداقل نیز برای جلوگیری از ته‌نشینی مواد جامد و مسدود شدن لوله‌ها تعریف می‌شود (رابطه ۱۱):

$$\beta_{\min} \leq \beta_l \leq \beta_{\max} \quad \forall l = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

$$V_{\min} \leq V_l \leq V_{\max} \quad \forall l = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

$$\beta_l = \left(\frac{y}{d} \right)_l \quad \forall l = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

در روابط فوق β_l نسبت پر شدگی جریان در لوله l ام، β_{\min} حداقل نسبت پر شدگی جریان در لوله‌ها، β_{\max} حداکثر مقدار نسبت پر شدگی جریان در لوله‌ها و y_l عمق جریان لوله l ام است.

قید قاعده تلسکوپی لوله‌ها: قطر لوله‌های خروجی از هر گره لازم است که بزرگ‌تر یا مساوی قطر لوله‌های ورودی به آن گره باشد:

در رابطه ۱۱، V_l سرعت جریان در لوله l ام، V_{\max} حداکثر مقدار سرعت جریان در لوله‌ها، V_{\min} حداقل مقدار سرعت جریان در لوله‌ها و N تعداد کل لوله‌های شبکه است.

$$d_l \geq \bar{d}_l \quad \forall l = 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

قید شیب حداقل لوله‌های فاضلاب‌رو: برای تأمین سرعت حداقل، شیب لوله‌های فاضلاب باید از شیب حداقل مجاز بیشتر باشند. این قید به صورت رابطه ۱۲ تعریف می‌شود:

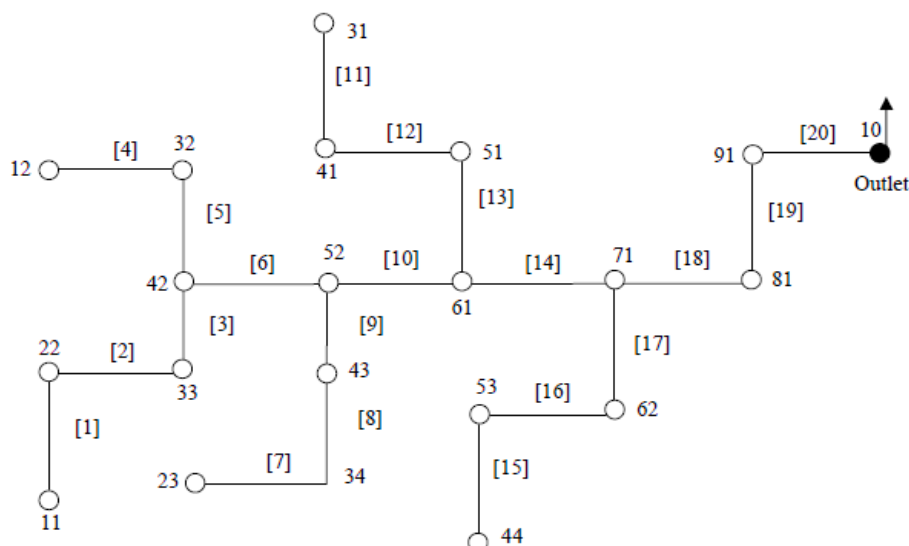
در رابطه ۱۶، \bar{d}_l مجموعه قطرهای تجاری بالادست لوله l ام است. معادله هیدرولیکی مانینگ: با توجه به این که دبی طراحی در این پژوهش جزء مفروضات مسئله است، لذا صرفاً محاسبه قطر و عمق حفاری به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. همچنین در این پژوهش استفاده از دیگر روابط هیدرولیکی همچون دارسی و ایسباخ یا هیزن ویلیامز مدنظر نبوده و از معادله هیدرولیکی مانینگ برای محاسبه سرعت جریان در لوله‌ها و سایر پارامترهای جریان استفاده می‌شود:

$$S_l \geq S_{\min} \quad \forall l = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

در رابطه ۱۲، S_l مقدار شیب در لوله l ام، S_{\min} شیب حداقل مجاز و تعداد کل لوله‌های شبکه است.

قید عمق کارگذاری لوله‌ها: عمق کارگذاری لوله‌ها لازم است که در یک محدوده مجاز حداکثر و حداقل قرار گیرد. حداقل عمق متوسط برای جلوگیری از یخ زدگی و همچنین به دلیل مشکلات ناشی از آب‌های زیرزمینی تعریف می‌شود. به همین دلیل طبق رابطه ۱۳ تعریف می‌شود:

$$Q_l = \frac{1}{n} \alpha_l r_l^{3/2} S_l^{1/2} \quad \forall l = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$



شکل ۲. شبکه فاضلاب مطالعه موردی اول [۱۸]

Fig.2. First case study sewer network [18]

انجام شده در این زمینه استفاده شده است، انتخاب شدند که در شکل‌های (۲-۴) نشان داده شده‌اند.

مطالعه موردی شماره ۱: همانطور که در شبکه ۲ نشان داده شده است، شبکه دارای ۲۰ لوله و ۲۱ گره است. در این شبکه اعداد مجاور لوله‌ها، شماره گره‌ها و اعداد داخل کروشه، شماره لوله‌ها را نشان می‌دهد.

در این مطالعه موردی، برای طراحی شبکه فاضلاب از معادله مانینگ استفاده شده است. در شرایط پر، ضریب زبری برابر با 0.013 می‌باشد. همچنین، حداقل و حداکثر سرعت به ترتیب 2 و 12 فوت بر ثانیه، حداقل و حداکثر نسبت پر شدگی به ترتیب 0.1 و 0.9 و حداقل پوشش 8 فوت در نظر گرفته شده است. قطرهای تجاری 12 ، 15 ، 18 ، 21 ، 24 ، 30 ، 36 ، 42 و 48 اینچ است. تمامی پارامترهای مربوط به شبکه مطالعه موردی اول برای حل مسئله در جدول ۲ آورده شده است.

مطالعه موردی شماره ۲: همانطور که در شکل ۳ آورده شده است، این شبکه دارای ۶ لوله و ۷ گره است. در این شبکه نیز اعداد مجاور لوله‌ها، شماره گره‌ها و اعداد داخل کروشه، شماره لوله‌ها را نشان می‌دهد.

در این شبکه حداکثر سرعت 4 متر بر ثانیه، حداکثر نسبت پرشدگی 0.8 ، حداکثر پوشش یک متر، شیب حداقل و حداکثر به ترتیب صفر و 5 درصد در نظر گرفته شده است. قطرهای تجاری در این مسئله 0.15 ، 0.2 ، 0.3 ، 0.4 ، 0.5 ، 0.6 ، 0.7 ، 0.8 ، 1 ، 1.2 و 1.4 متر است. تمامی پارامترهای مربوط به شبکه مطالعه موردی دوم در جدول ۳ آورده شده است.

در رابطه 17 ، n ضریب مانینگ، α_l سطح مقطع لوله l در عمق جریان Y_l و شعاع هیدرولیکی لوله l در عمق جریان می‌باشد. همچنین به عنوان یک فرض از افت اصطکاکی در لوله‌ها نیز صرف نظر شده است.

قید اقطار تجاری لوله‌ها؛ از آنجا که قطرهای لوله‌ها پیوسته نیستند به همین دلیل مقدار این قطرها از اقطار تجاری انتخاب می‌شود. بنابراین:

$$d_l \in \bar{D} \quad \forall l = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

در رابطه 18 \bar{D} مجموعه اقطار تجاری لوله‌های فاضلاب است. متغیرهای تصمیم در مسئله طراحی بهینه شبکه فاضلاب توأمأ از دو نوع پیوسته و گسسته هستند (قطر لوله‌ها از جنس متغیرهای گسسته و عمق کارگذاری لوله‌ها از جنس متغیرهای پیوسته). در این پژوهش، قطر لوله‌ها و تراز گره‌های شبکه به عنوان متغیرهای تصمیم مسئله در نظر گرفته شده است.

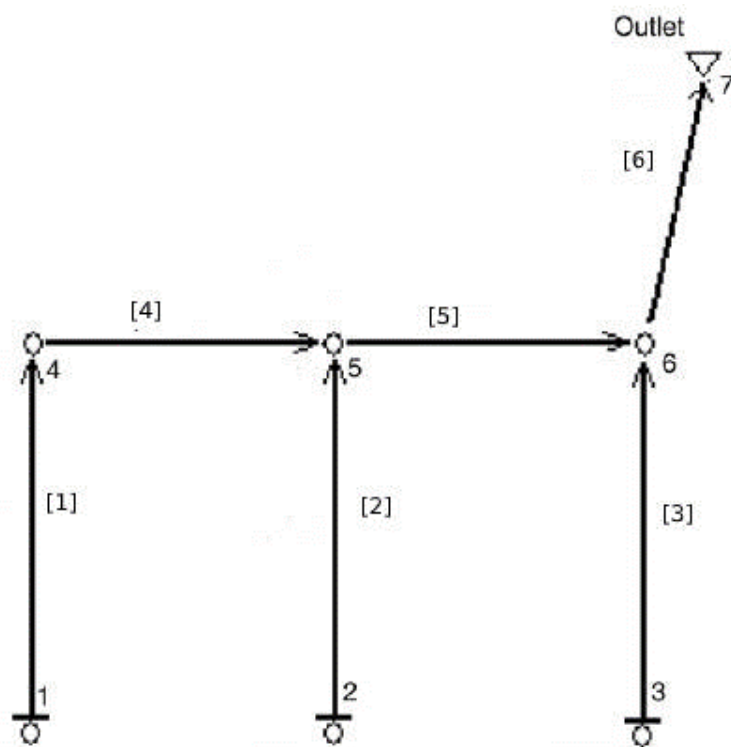
۲-۳- معرفی مطالعه موردی

با توجه به اینکه جزئیات طراحی شبکه‌های فاضلاب به صورت عمومی در دسترس نمی‌باشد، به منظور بررسی عملکرد الگوریتم SFLA، شبکه‌هایی فرضی با اندازه‌های متفاوت که به صورت معمول در پژوهش‌های

جدول ۲. پارامترهای شبکه فاضلاب مطالعه موردی اول

Table 2. Parameters of the first sewer network

شماره لوله	شماره گره پایین دست	شماره گره بالادست	ارتفاع بالادست (فوت)	ارتفاع پایین دست (فوت)	طول لوله (فوت)	دبی طراحی (فوت مکعب بر ثانیه)	دبی تجمعی طراحی
۱	۲۲	۱۱	۵۰۰	۴۹۵	۳۵۰	۴	۴
۲	۳۳	۲۲	۴۹۵	۴۸۷	۴۰۰	۳	۷
۳	۴۲	۳۳	۴۸۷	۴۸۰	۳۵۰	۲	۹
۴	۳۲	۱۲	۴۹۰	۴۸۵	۴۰۰	۴	۴
۵	۴۲	۳۲	۴۸۵	۴۸۰	۴۳۰	۴	۸
۶	۵۲	۴۲	۴۸۰	۴۷۰	۵۵۰	۵	۲۲
۷	۳۴	۲۳	۴۹۰	۴۸۵	۵۰۰	۸	۸
۸	۴۳	۳۴	۴۸۵	۴۷۵	۴۵۰	۴	۱۲
۹	۵۲	۴۳	۴۷۵	۴۷۰	۳۵۰	۴	۱۶
۱۰	۶۱	۵۲	۴۷۰	۴۶۵	۵۰۰	۶	۳۸
۱۱	۴۱	۳۱	۴۸۵	۴۷۵	۵۰۰	۹	۹
۱۲	۵۱	۴۱	۴۷۵	۴۷۰	۳۵۰	۷	۱۶
۱۳	۶۱	۵۱	۴۷۰	۴۶۵	۳۵۰	۴	۲۰
۱۴	۷۱	۶۱	۴۶۵	۴۵۵	۵۶۵	۷	۶۵
۱۵	۵۳	۴۴	۴۶۸	۴۶۴	۴۰۰	۴	۴
۱۶	۶۲	۵۳	۴۶۴	۴۶۰	۳۰۰	۲	۶
۱۷	۷۱	۶۲	۴۶۰	۴۵۵	۳۴۵	۳	۹
۱۸	۸۱	۷۱	۴۵۵	۴۵۱	۴۰۰	۷	۸۱
۱۹	۹۱	۸۱	۴۵۱	۴۴۸	۵۰۰	۲	۸۳
۲۰	۱۰	۹۱	۴۴۸	۴۴۵	۶۱۲	۵	۸۸



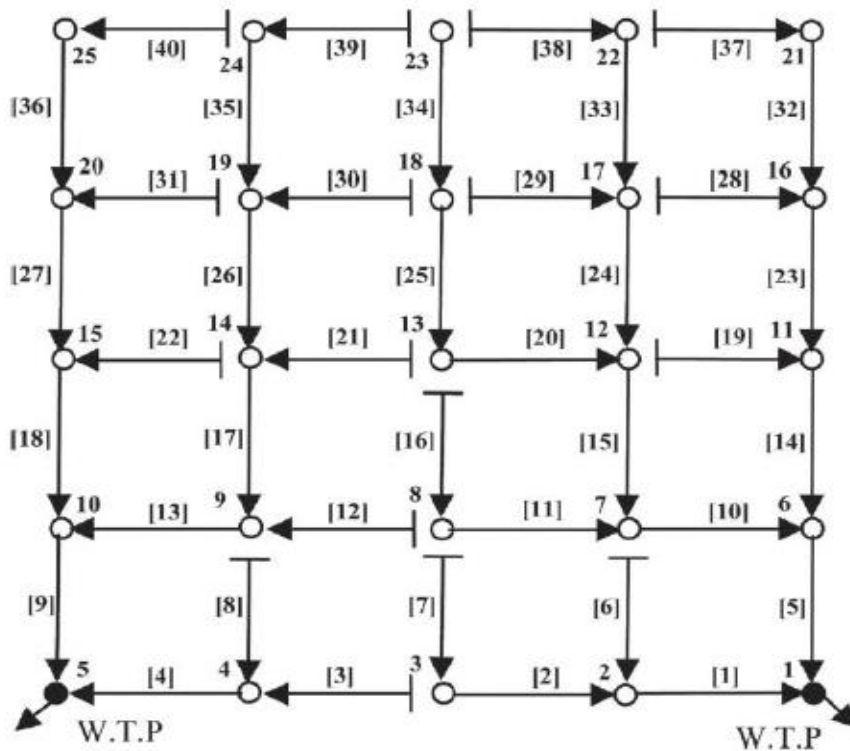
شکل ۳. شبکه فاضلاب مطالعه موردی دوم [۱۱]

Fig. 3. Second case study sewer network [11]

جدول ۳. پارامترهای شبکه فاضلاب مطالعه موردی دوم

Table 3. Parameters of the second sewer network

دبی تجمعی طراحی (لیتر بر ثانیه)	طول لوله (متر)	شماره گره بالادست	ارتفاع پایین- دست (متر)	ارتفاع بالادست (متر)	شماره گره پایین دست	شماره لوله
۰/۳	۲۰۰	۱	۷/۵	۹	۴	۱
۰/۳	۲۰۰	۲	۶/۳۳	۶/۷۵	۵	۲
۰/۳	۲۰۰	۳	۵/۳۵	۶/۹۵	۶	۳
۰/۶	۱۸۰	۴	۶/۳۳	۷/۵	۵	۴
۱/۲	۱۸۰	۵	۶/۳۵	۶/۳۳	۶	۵
۱/۸	۱۰۰	۶	۵	۵/۳۵	۷	۶



شکل ۴. شبکه فاضلاب مطالعه موردی سوم [۲۴]

Fig. 4. Third case study sewer network [24]

جدول ۴. پارامترهای شبکه فاضلاب مطالعه موردی سوم

Table 4. Parameters of the third sewer network

$k = 1 \frac{m^3}{s}$	$n = 0.015$	$V_{\max} = 6 \frac{m}{s}$
$E_{\max} = 10m$	$E_{\min} = 2.5m$	$V_{\min} = 0.75 \frac{m}{s}$
$\beta_{\max} = 0.83$	$\beta_{\min} = 0.1$	$S_{\min} = 0.0005$

طول تمامی لوله‌ها ۱۰۰ متر است. مجموعه‌ای از قطرهای لوله‌ها از ۱۰۰ میلی‌متر تا ۱۵۰۰ میلی‌متر با فاصله ۵۰ میلی‌متر از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر و فاصله ۱۰۰ میلی‌متر از ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر به عنوان قطرهای تجاری معرفی شده‌اند. سایر پارامترهای شبکه مطالعه موردی سوم در جدول ۴ آورده شده است.

مطالعه موردی شماره ۳: همانطور که در شکل ۴ آورده شده است، این شبکه دارای ۴۰ لوله و ۲۵ گره است. در این شبکه نیز اعداد مجاور لوله‌ها، شماره گره‌ها و اعداد داخل کروشه، شماره لوله‌ها را نشان می‌دهد. در گوشه‌های پایین چپ و راست این شبکه، تصفیه خانه‌های فاضلاب قرار دارد که ارتفاع از سطح زمین به ترتیب ۹۸۹/۵، ۹۸۳/۵ و ۹۷۱/۵ است.

جدول ۵. نتایج بهینه سازی سه نمونه شبکه فاضلاب در ۲۰ اجرا

Table 5. Optimization results of the three case studies I 20 consecutive runs

شماره شبکه	نوع الگوریتم	تابع هدف حداقل کردن هزینه‌ها			انحراف معیار	میانگین تعداد ارزیابی تابع هدف
		حداقل	حداکثر	میانگین		
۱	SCE	۲۲۵۴۸۰	۳۱۸۸۳۹	۲۵۴۴۶۰	۲۷۴۱۵/۸۱	۶۴۰۰۰
	SFLA	۲۰۳۲۴۹	۳۲۵۵۳۲	۲۰۸۳۲۱	۵۴۶۶/۴۸	۳۷۷۷۴
	GA	۲۰۹۱۱۶	۲۷۲۱۶۹	۲۲۸۳۸۱	۱۷۷۱۷/۷۵	۵۷۰۶۳
	PSO	۲۰۴۱۳۸	۲۴۰۸۸۹	۲۰۸۸۶۲	۸۰۱۸/۶۴	۶۰۰۰۰
۲	SCE	۱۴۰۴۵۴	۱۸۵۲۴۲	۱۵۷۹۳۱	۱۲۱۳۸/۱۲	۶۴۰۰۰
	SFLA	۱۲۹۵۸۸	۱۶۴۹۸۹	۱۵۰۶۳۶	۱۱۴۰۲/۳	۳۷۷۷۴
	GA	۱۲۹۵۸۸	۱۵۳۷۱۶	۱۴۱۳۸۸	۹۶۰۳/۸۸	۵۷۰۶۳
	PSO	۱۲۹۵۸۸	۱۶۸۳۴۱	۱۴۲۸۸۰	۹۳۴۶/۳۷	۶۰۰۰۰
۳	SCE	۹۷۷۵۱/۱۹۱	۱۴۶۰۱۰/۱۴۰	۱۱۵۹۴۲/۶۶۴	۱۴۹۶/۰۲۸۵	۶۸۰۸۸
	SFLA	۷۹۰۷۹/۵۳۰	۸۴۶۶۳/۰۲۱	۸۱۰۵۴/۴۳۷	۱۰۱۱/۴۹۷۵	۶۰۶۸۰
	GA	۸۱۶۹۲/۷۹۹	۸۶۶۸۵/۱۴۵	۸۳۵۳۲/۵۵۲	۱۵۶۸/۱۷۱	۱۲۳۱۳۷
	PSO	۸۲۶۰۶/۳۹۴	۸۶۱۳۳/۵۳۶	۸۴۵۳۸/۴۹۰	۱۴۵۶/۳۷۳	۱۳۲۱۳۲

۳- نتایج و بحث

جدول ۵ الگوریتم SFLA نسبت به سایر الگوریتم‌ها انحراف معیار کمتری دارد. در نتیجه از نظر رسیدن به جواب بهینه نسبت به سه الگوریتم دیگر قابل اعتمادتر است.

همچنین در جدول ۶ متغیرهای تصمیم به دست آمده توسط الگوریتم SFLA برای مطالعه موردی اول آورده شده است.

در شبکه دوم مقدار کمینه سراسری به دست آمده توسط سه الگوریتم PSO، GA و SFLA برابر است به همین دلیل از میانگین نتایج ۲۰ اجرای متوالی جهت مقایسه عملکرد الگوریتم استفاده می‌شود. طبق نتایج حاصله، میانگین پاسخ‌های نهایی به دست آمده از الگوریتم‌های PSO و GA به ترتیب ۲۷ و ۱۷ درصد از میانگین پاسخ‌های نهایی به دست آمده توسط الگوریتم SFLA بهتر است. البته با توجه به اینکه الگوریتم SFLA دقیقاً به مقدار کمینه سراسری دست یافته توسط الگوریتم‌های PSO و GA رسیده است. بیشترین میانگین پاسخ‌های به دست آمده از این الگوریتم صرفاً نشانگر این است که از لحاظ پایداری و قابلیت اعتماد این الگوریتم در رتبه سوم قرار می‌گیرد. علاوه بر این با توجه به تعداد کمتر ارزیابی تابع هدف در الگوریتم SFLA این الگوریتم عملکرد قابل توجهی از خود نشان داده است. با توجه به جدول ۵ الگوریتم PSO نسبت به سایر الگوریتم‌ها

همانطور که گفته شد در این پژوهش، برای بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب از الگوریتم جهش تصادفی قورباغه (SFLA) استفاده شده است و نتایج به دست آمده از این الگوریتم با نتایج حاصل از الگوریتم‌های GA، PSO و SCE مقایسه شده است. تمامی کدها در محیط برنامه‌نویسی MatlabR2017a کدنویسی شده است و در همه مدل‌ها سعی شده که با انجام سعی و خطاها، تعداد تکرار و پارامترهای تنظیمی الگوریتم‌ها، به گونه‌ای اعمال شود که الگوریتم‌ها بهترین عملکرد خود را داشته باشند. تابع هدف حداقل کردن هزینه‌ها برای شبکه فاضلاب مطالعه موردی اول توسط چهار الگوریتم GA، PSO، SCE و SFLA بررسی شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی مسائل حل شده سه شبکه نمونه فاضلاب در ۲۰ اجرای متوالی در جدول ۵ آورده شده است.

در شبکه اول، الگوریتم SFLA مقدار پاسخ کمینه به دست آمده را به میزان ۲ درصد نسبت به الگوریتم PSO، به میزان ۴ درصد نسبت به الگوریتم GA و به میزان ۳۷ درصد نسبت به الگوریتم SCE بهبود بخشیده است. این بدان معنی است که SFLA تقریباً با نصف تعداد ارزیابی‌های تابع هدف به جوابی بهتر نسبت به سه الگوریتم دیگر برسد. همچنین با توجه به

جدول ۶. مقادیر به دست آمده برای متغیرهای تصمیم مطالعه موردی اول توسط الگوریتم SFLA

Table 6. Optimum decision variables derived by the SFLA for case study number 1

شماره لوله	شماره گره		قطر لوله (اینچ)	عمق حفاری (فوت)		شماره لوله	شماره گره		قطر لوله (اینچ)	عمق حفاری (فوت)	
	بالادست	پایین دست		بالادست	پایین دست		بالادست	پایین دست		بالادست	پایین دست
۱	۲۲	۱۱	۱	۸/۰۵	۸/۱۶	۱۱	۴۱	۳۱	۱/۲۵	۸/۰۹	۸/۰۵
۲	۳۳	۲۲	۱/۲۵	۸/۱۶	۸/۰۲	۱۲	۵۱	۴۱	۱/۷۵	۸/۰۵	۸/۰۴
۳	۴۲	۳۳	۱/۲۵	۸/۰۲	۸/۰۱	۱۳	۶۱	۵۱	۱/۷۵	۸/۰۴	۱۰/۸۹
۴	۳۲	۱۲	۱	۸/۰۲	۸/۲۸	۱۴	۷۱	۶۱	۳	۱۰/۸۹	۸/۰۲
۵	۴۲	۳۲	۱/۵	۸/۲۸	۸/۰۱	۱۵	۵۳	۴۴	۱	۸/۱	۹/۱۴
۶	۵۲	۴۲	۱/۷۵	۸/۰۱	۸/۶۶	۱۶	۶۲	۵۳	۱/۲۵	۹/۱۴	۸/۰۲
۷	۳۴	۲۳	۱/۵	۸/۴۶	۸/۱۲	۱۷	۷۱	۶۲	۱/۵	۸/۰۲	۸/۰۲
۸	۴۳	۳۴	۱/۵	۸/۱۲	۸/۰۳	۱۸	۸۱	۷۱	۳/۵	۸/۰۲	۸
۹	۵۲	۴۳	۱/۷۵	۸/۰۳	۸/۶۶	۱۹	۹۱	۸۱	۳/۵	۸	۸/۹
۱۰	۶۱	۵۲	۲/۵	۸/۶۶	۱۰/۸۹	۲۰	۱۰	۹۱	۳/۵	۸/۹	۱۱/۲

جدول ۷. مقادیر به دست آمده برای متغیرهای تصمیم مطالعه موردی دوم توسط الگوریتم SFLA

Table 7. Optimum decision variables derived by the SFLA for case study number 2

شماره لوله	شماره گره		قطر لوله (میلی متر)	عمق حفاری (متر)	
	بالادست	پایین دست		بالادست	پایین دست
۱	۱	۴	۴۰۰	۱	۵
۲	۲	۵	۵۰۰	۵	۱
۳	۳	۶	۴۰۰	۱	۵
۴	۴	۵	۶۰۰	۵	۱
۵	۵	۶	۷۰۰	۱	۵
۶	۶	۷	۸۰۰	۵	۱/۸۶

الگوریتم SCE نیز به میزان ۱۹/۱ درصد بهتر است. همچنین از نظر میانگین پاسخ‌های بهینه به دست آمده، الگوریتم SFLA به میزان ۳/۰ درصد نسبت به الگوریتم GA، به میزان ۴/۱ درصد نسبت به الگوریتم PSO و به میزان ۴۰ درصد نسبت به الگوریتم SCE عملکرد بهتری دارد. این امر نشان دهنده این است که الگوریتم SFLA از نظر پایداری جواب‌های تولید شده وضعیت مناسب‌تری نسبت به دیگر الگوریتم‌ها دارد. همچنین این قضیه در مقایسه شاخص انحراف معیار نیز خود را نشان می‌دهد به نحوی که انحراف معیار جواب‌های تولید شده توسط SFLA از دیگر الگوریتم‌ها کمتر است.

انحراف معیار کمتری دارد در نتیجه نسبت به سه الگوریتم دیگر پایدارتر است. همچنین در جدول ۷، متغیرهای تصمیم به دست آمده از الگوریتم SFLA برای مطالعه موردی دوم آورده شده است.

در شبکه سوم که تعداد متغیرهای تصمیم آن نسبت به دو شبکه مورد مطالعه دیگر بیشتر است، الگوریتم SFLA عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های دیگر در پیدا کردن مقدار کمینه مطلق دارد. به طوری که پاسخ بهینه مطلق به دست آمده توسط این الگوریتم نسبت به الگوریتم GA به میزان ۳/۲ درصد، نسبت به الگوریتم PSO به میزان ۴/۳ درصد و نسبت به

جدول ۸. مقادیر به دست آمده برای متغیرهای مطالعه متصمیم وردی سوم توسط الگوریتم SFLA

Table 8. Optimum decision variables derived by the SFLA for case study number 3

شماره لوله	شماره گره		شماره لوله	شماره گره		شماره لوله	عمق حفاری (فوت)		قطر لوله (میلی متر)	شماره گره		شماره لوله
	بالادست	پایین دست		بالادست	پایین دست		بالادست	پایین دست		بالادست	پایین دست	
۱	۲	۱	۲۱	۱۳	۱۴	۲۱	۳/۱۴	۵/۱۳	۱۵۰	۱	۲	۱
۲	۳	۲	۲۲	۱۴	۱۵	۲۲	۵/۱۳	۴/۹۹	۱۵۰	۲	۳	۲
۳	۳	۴	۲۳	۱۶	۱۱	۲۳	۴/۹۴	۴/۹۹	۱۰۰	۴	۳	۳
۴	۴	۵	۲۴	۱۷	۱۲	۲۴	۵/۰۸	۴/۹۴	۱۵۰	۵	۴	۴
۵	۶	۱	۲۵	۱۸	۱۳	۲۵	۳/۱۴	۴/۱۵	۲۵۰	۱	۶	۵
۶	۷	۲	۲۶	۱۹	۱۴	۲۶	۵/۱۳	۲/۹۹	۱۵۰	۲	۷	۶
۷	۸	۳	۲۷	۲۰	۱۵	۲۷	۴/۹۹	۳/۰۱	۱۵۰	۳	۸	۷
۸	۹	۴	۲۸	۱۷	۱۶	۲۸	۴/۹۴	۴/۳۱	۱۵۰	۴	۹	۸
۹	۱۰	۵	۲۹	۱۸	۱۷	۲۹	۵/۰۸	۳/۶۵	۳۰۰	۵	۱۰	۹
۱۰	۷	۶	۳۰	۱۸	۱۹	۳۰	۴/۱۵	۲/۹۹	۲۵۰	۶	۷	۱۰
۱۱	۸	۷	۳۱	۱۹	۲۰	۳۱	۲/۹۹	۳/۰۱	۱۵۰	۷	۸	۱۱
۱۲	۸	۹	۳۲	۲۱	۱۶	۳۲	۴/۳۱	۳/۰۱	۱۵۰	۹	۸	۱۲
۱۳	۹	۱۰	۳۳	۲۲	۱۷	۳۳	۳/۶۵	۴/۳۱	۲۰۰	۱۰	۹	۱۳
۱۴	۱۱	۶	۳۴	۲۳	۱۸	۳۴	۴/۱۵	۳/۱۴	۱۵۰	۶	۱۱	۱۴
۱۵	۱۲	۷	۳۵	۲۴	۱۹	۳۵	۲/۹۹	۳/۴۴	۲۰۰	۷	۱۲	۱۵
۱۶	۱۳	۸	۳۶	۲۵	۲۰	۳۶	۳/۰۱	۴/۵۳	۱۵۰	۸	۱۳	۱۶
۱۷	۱۴	۹	۳۷	۲۲	۲۱	۳۷	۴/۳۱	۳/۶۹	۲۰۰	۹	۱۴	۱۷
۱۸	۱۵	۱۰	۳۸	۲۳	۲۲	۳۸	۳/۶۵	۵/۱۴	۱۵۰	۱۰	۱۵	۱۸
۱۹	۱۲	۱۱	۳۹	۲۳	۲۴	۳۹	۳/۱۴	۳/۴۴	۱۵۰	۱۱	۱۲	۱۹
۲۰	۱۳	۱۲	۴۰	۲۴	۲۵	۴۰	۳/۶۹	۴/۵۳	۱۵۰	۱۲	۱۳	۲۰

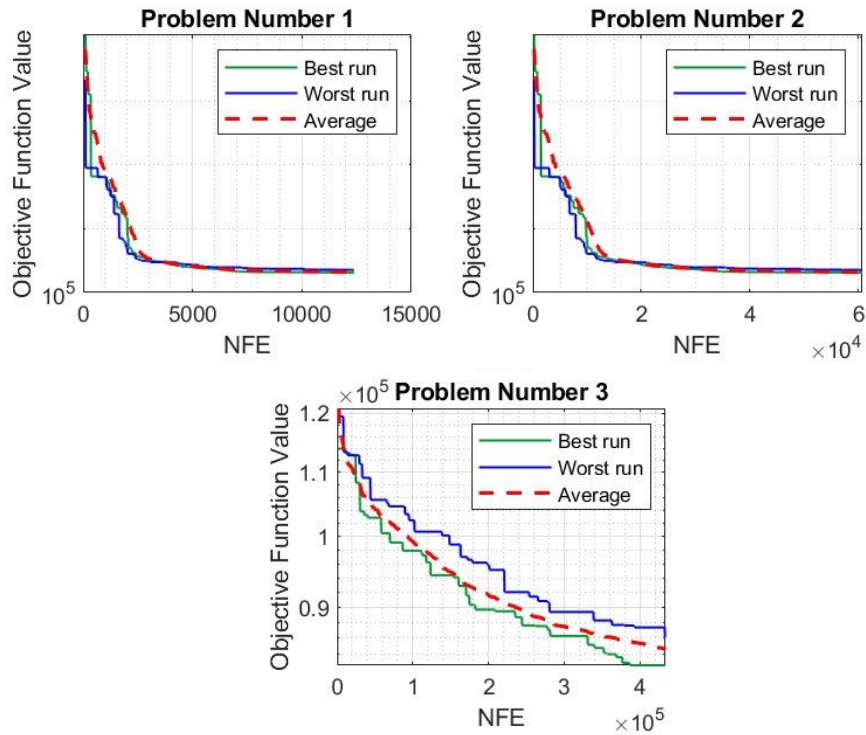
افزایش جمعیت افزایش تکرارهای موجود در هر بار تکرار سراسری می‌تواند قابلیت اعتماد این الگوریتم را بهبود بخشد. همچنین در شبکه سوم که تعداد متغیرهای تصمیم بیش‌تری دارد میانگین، بهترین و بدترین جواب‌های تولید شده فاصله بیش‌تری از هم دارند.

در شکل ۶ منحنی تغییرات بهترین تابع هدف الگوریتم‌های مختلف به ازای تکرارهای مختلف برای شبکه اول آورده شده است. که نمودار همگرایی بهترین پاسخ است نشان می‌دهد که برخلاف SFLA سایر الگوریتم‌ها قبل از رسیدن به میزان بهینه سراسری همگرا شده‌اند. همگرایی با تأخیر الگوریتم SFLA می‌تواند ناشی از کم بودن تعداد ارزیابی تابع هدف در هر تکرار باشد.

این در حالی است که این الگوریتم با تعداد ارزیابی‌های کمتر به جواب بهینه همگرا شده است که این امر زمان اجرای پایین‌تر محاسبات توسط این الگوریتم را می‌رساند. در جدول ۸، متغیرهای تصمیم به دست آمده از الگوریتم SFLA برای مطالعه موردی سوم آورده شده است.

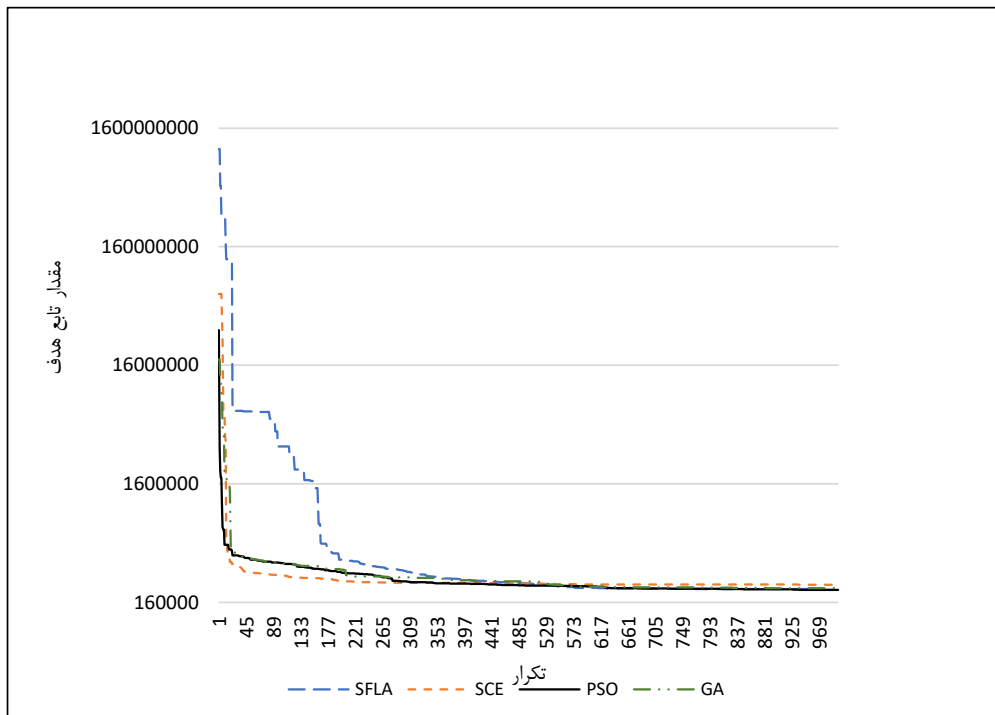
در شکل شماره ۵، منحنی تغییرات بهترین، بدترین و میانگین جواب‌های تولید شده برای هر سه شبکه آورده شده است.

در شبکه اول، نزدیکی بدترین و بهترین پاسخ به دست آمده از الگوریتم SFLA قابلیت اعتماد بودن این الگوریتم در حل مسئله مطرح شده را تأیید می‌کند. نمودار شکل ۵ در شبکه دوم نشان می‌دهد که الگوریتم SFLA در تکرارهای ابتدایی همگرا می‌شود. با توجه به اختلاف نسبتاً قابل توجه بین منحنی‌های بهترین و بدترین پاسخ، و همگرایی سریع این الگوریتم،



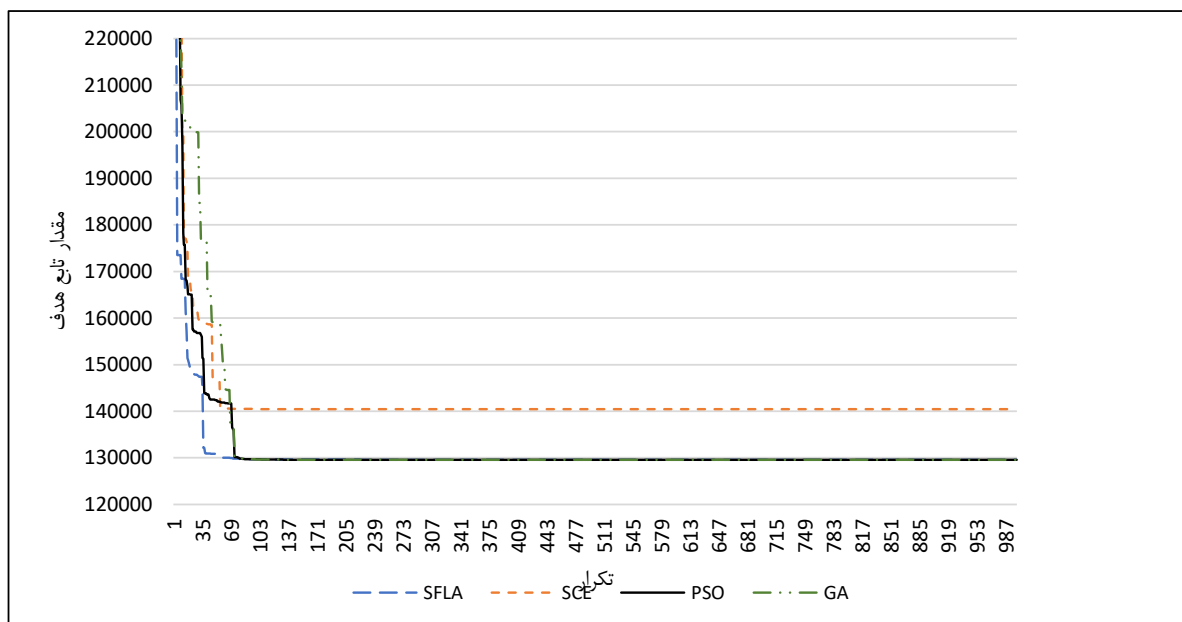
شکل ۵. منحنی تغییرات بهترین، بدترین و میانگین جواب های تولید شده توسط الگوریتم SFLA برای هر سه شبکه

Fig. 5. Convergence curves of the SFLA for the best, worst and average results



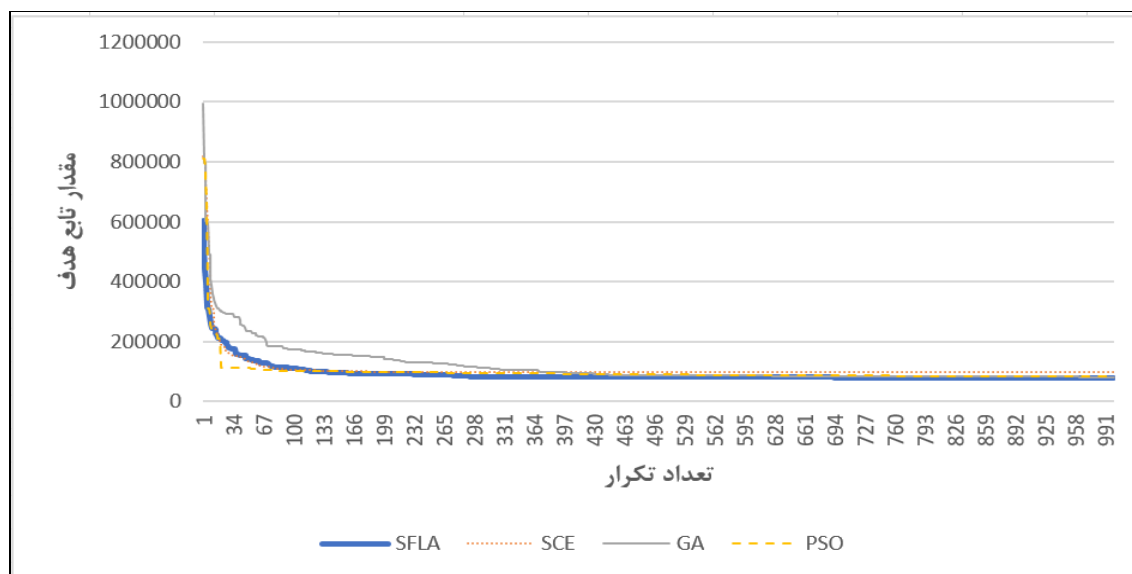
شکل ۶. منحنی تغییرات بهترین تابع هدف الگوریتم ها به ازای تکرارهای مختلف در شبکه فاضلاب مطالعه موردی اول

Fig. 6. Convergence curves of the employed algorithms for case study number 1



شکل ۷. تغییرات بهترین تابع هدف الگوریتم‌ها به ازای تکرارهای مختلف در شبکه فاضلاب مطالعه موردی دوم

Fig. 7. Convergence curves of the employed algorithms for case study number 2



شکل ۸. تغییرات بهترین تابع هدف الگوریتم‌ها به ازای تکرارهای مختلف در شبکه فاضلاب مطالعه موردی سوم

Fig. 8. Convergence curves of the employed algorithms for case study number 3

در شکل ۸ منحنی تغییرات بهترین تابع هدف الگوریتم‌های مختلف به ازای تکرارهای مختلف برای شبکه سوم آورده شده است. برای شبکه سوم نیز که تعداد متغیرهای تصمیم بیش‌تری دارد، مشاهده می‌شود که همگرایی سریع‌تر اتفاق افتاده است.

در شکل ۷ منحنی تغییرات بهترین تابع هدف الگوریتم‌های مختلف به ازای تکرارهای مختلف برای شبکه دوم آورده شده است. که نشان می‌دهد الگوریتم SFLA سریع‌تر از سایر الگوریتم‌ها همگرا شده است.

جدول ۹. مقایسه نتایج حاصل از تحقیق حاضر با سایر تحقیقات

Table 9. Comparing results of current study with other studies

مقدار بهینه تابع هدف	مدل	شماره شبکه استفاده شده
۲۶۵۷۷۵	میز و ونزل [۳۲]	۱
۲۴۵۸۷۴	مایلز و هینی [۳۳]	
۲۴۱۴۹۶	افشار - ACOA [۳۴]	
۲۴۱۱۶۲	افشار - RPSO [۳۵]	
۲۵۳۴۸۳	افشار و همکاران - CA [۳۶]	
۲۴۰۰۸۴	ظاهری و همکاران - CA [۱۱]	
۲۰۳۲۴۹	پژوهش حاضر - SFLA	۲
۲۰۳۰۵۵	ایزکیردی و همکاران [۶]	
۱۲۹۵۸۸	پژوهش حاضر - SFLA	۳
۸۹۵۶۸	معینی و افشار - ACO-TGA [۳۷]	
۸۶۲۰۴	معینی و افشار - ACOA3 [۱۹]	
۸۶۲۰۴	معینی و افشار - CACOA-TGA3 [۳۸]	
۷۹۰۷۹	پژوهش حاضر - SFLA	

افزایش متغیرهای تصمیم شبکه‌های بررسی شده و عملکرد الگوریتم‌های مورد استفاده نشان داد که الگوریتم SFLA در مسائل بزرگ مقیاس، هم از نظر نتیجه نهایی عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد و هم با داشتن میانگین و انحراف معیار پایین نسبت به پاسخ به دست آمده قابلیت اعتماد و پایداری بیشتری ارائه کرده است. پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی در مدل‌سازی مربوط به بهینه‌سازی شبکه فاضلاب، اثرات پمپاژ نیز بررسی شود. همچنین ماهیت گسسته استفاده شده در الگوریتم SFLA به سایر الگوریتم‌های فراکاوشی نیز تعمیم داده شود.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با عنوان "بررسی قابلیت الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه در طراحی بهینه شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب" می‌باشد که بدین ترتیب از حمایت‌های مادی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی به عنوان کارفرمای طرح تقدیر و تشکر می‌شود.

همانطور که مشاهده شد الگوریتم SFLA توانست عملکرد مناسبی را نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورد تحقیق در این مطالعه به دست آورد. در ادامه در جدول ۹، نتایج حاصل از این مطالعه در این تحقیق با نتایج سایر تحقیقات انجام شده بر روی سه شبکه مورد مطالعه در این تحقیق مقایسه شده است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش کارایی الگوریتم SFLA مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصل از این الگوریتم با سه الگوریتم GA، PSO و SCE مقایسه شده است. نتایج مطالعه قابلیت الگوریتم SFLA در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها نشان داد که این الگوریتم توانسته با تعداد ارزیابی تابع هدف کمتر نسبت به نتایج الگوریتم‌های GA، PSO، SCE و PSO تابع هدف را به میزان مناسبی بهبود بخشد. همچنین به دلیل کم بودن تعداد ارزیابی و فراخوانی تابع هدف نسبت به سایر الگوریتم‌ها از لحاظ زمان اجرا، مقرون به صرفه و مطلوب‌تر است از این رو می‌توان این الگوریتم را یک الگوریتم موفق دانست.

conference on neural networks. IEEE, pp 1942–1948

- [11] J. Izquierdo, I. Montalvo, R. Pérez, VS. Fuertes, Design Optimization of Wastewater Collection Networks by Pso, Computers & Mathematics with Applications, 56 (2008), 777-84.
- [12] MH. Afshar, A Parameter Free Continuous Ant Colony Optimization Algorithm for the Optimal Design of Storm Sewer Networks: Constrained and Unconstrained Approach, Advances in Engineering Software, 41 (2010), 188-95.
- [13] MH. Afshar, Rebirthing Genetic Algorithm for Storm Sewer Network Design, Scientia Iranica, 19 (2012), 11-19.
- [14] SF. Yeh, CW. Chu, YJ. Chang, MD. Lin, Applying Tabu Search and Simulated Annealing to the Optimal Design of Sewer Networks, Engineering Optimization, 43 (2011), 159-74.
- [15] A. Ahmadi, MA. Zolfagharipoor, M. Nafisi, Development of a Hybrid Algorithm for the Optimal Design of Sewer Networks, Journal of Water Resources Planning and Management, 144 (2018), 04018045.
- [16] MM. Zaheri, R. Ghanbari, MH. Afshar, A Two-Phase Simulation–Optimization Cellular Automata Method for Sewer Network Design Optimization, Engineering Optimization (2019).
- [17] LY. Liang, RG. Thompson, DM Young, Optimising the Design of Sewer Networks Using Genetic Algorithms and Tabu Search, Engineering, Construction and Architectural Management, 11 (2004), 101-12.
- [18] R. Moeini, Optimal Design of Sewer Network Size Using Ant Colony Optimization Algorithm: Comparing Performance of Four Different Algorithms, Computational Methods in Engineering, 36 (2017), 115-36. (In Persian)
- [19] TC. Pan, JJ. Kao, Ga-QP Model to Optimize Sewer System Design, Journal of environmental engineering, 135 (2009), 17-24.
- [20] S. Kumar, PK. Navin, YP. Mathur, Optimization [1] AA. Elimam, C. Charalambous, FH. Ghobrial, Optimum Design of Large Sewer Networks, Journal of Environmental Engineering, 115 (1989), 1171-90.
- [2] M. Hsie, MY. Wu, CY Huang, Optimal Urban Sewer Layout Design Using Steiner Tree Problems, Engineering Optimization, 51 (2019), 1980-96.
- [3] RK. Price, Design of Storm Water Sewers for Minimum Construction Cost, in Proc. 1st International Conference on Urban Storm Drainage (1978), pp. 636-47.
- [4] GA. Walters, AB. Templeman, Non-Optimal Dynamic Programming Algorithms in the Design of Minimum Cost Drainage Systems, Engineering Optimization, 4 (1979), 139-48.
- [5] H. Sharifzadeh, N. Amjady. A review of metaheuristic algorithms in optimization. Journal of Modeling in Engineering 12, no. 38 (2014): 27-43. (In Persian)
- [6] Abbass HA (2001) MBO: Marriage in honey bees optimization a haplometrosis polygynous swarming approach. In: Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, ICEC. IEEE, pp 207–214
- [7] Atashpaz-Gargari E, Lucas C (2007) Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. In: 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2007. Ieee, pp 4661–4667
- [8] Dorigo M, Birattari M, Stutzle T (2006) Ant colony optimization. IEEE Comput Intell Mag 1:28–39
- [9] Holland JH (1975) Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. Ann Arbor Univ. Michigan Press 1975 viii, 183 p.
- [10] Kennedy J, Eberhart R (1995) Particle swarm optimization. In: Proceedings of ICNN'95-international

- [29] G. Fang, Y. Guo, X. Wen, X. Fu, X. Lei, Y. Tian, T. Wang, Multi-Objective Differential Evolution-Chaos Shuffled Frog Leaping Algorithm for Water Resources System Optimization, *Water Resources Management*, 32 (2018), 3835-52.
- [30] Y. Guo, X. Tian, G. Fang, YP. Xu, Many-Objective Optimization with Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm for Inter-Basin Water Transfers, *Advances in Water Resources*, 138 (2020), 103531.
- [31] MM. Eusuff, KE Lansey, Optimization of Water Distribution Network Design Using the Shuffled Frog Leaping Algorithm, *Journal of Water Resources planning and management*, 129 (2003), 210-25.
- [32] LW. Mays, HG. Wenzel, Optimal design of multilevel branching sewer systems. *Water Resour Res* 12(1976)913-917.
- [33] SW. Miles, JP .Heaney Better Than “Optimal” Method for Designing Drainage Systems. *J Water Resour Plan Manag* 114 (1988) 477-499.
- [34] MH. Afshar. Improving the efficiency of ant algorithms using adaptive refinement: Application to storm water network design. *Adv Water Resour* 29 (2006) 1371-1382.
- [35] MH. Afshar. Rebirthing particle swarm optimization algorithm: application to storm water network design. *Can J Civ Eng* 35 (2008) 1120-1127.
- [36] MH. Afshar, M. Shahidi, M. Rohani, M. Sargolzaei. Application of cellular automata to sewer network optimization problems. *Sci Iran* 18(2011) 304-312.
- [37] R. Moeini, MH. Afshar. Layout and size optimization of sanitary sewer network using intelligent ants. *Adv Eng Softw* 51(2012) 49-62.
- [38] R. Moeini, MH. Afshar. Sewer network design Optimization problem using ant Colony Optimization Algorithm and Tree Growing Algorithm. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer Verlag, (2013) pp 91-105.
- of Sewerage System Using Simulated Annealing, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6 (2018), 1-6.
- [21] TT. Ngo, D. Jung, JH. Kim, Robust Urban Drainage System: Development of a Novel Multiscenario-Based Design Approach, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145 (2019), 04019027.
- [22] S. Akhoondian, M. Tabesh, Optimal Design Based on Wastewater Collection System, *Journal of civil and surveying engineering*, 45 (2012), 267-78. (In Persian)
- [23] MH. Afshar, M. Rohani, Optimal Design of Gravitational Sewer Networks with General Cellular Automata, *Journal of Water and Wastewater*, 90 (2012), 12-25. (In Persian)
- [24] R. Moeini, MH. Afshar, Constrained Ant Colony Optimisation Algorithm for the Layout and Size Optimisation of Sanitary Sewer Networks, *Urban Water journal*, 10 (2013), 154-73.
- [25] M. Nafisi, A. Ahmadi, Sewer Networks Optimization by Particle Swarm Optimization with Abilities of Fly-Back Mechanism and Harmony Memory, *J. Water Wastewater*, 25 (2014), 76-87. (In Persian)
- [26] R. Moeini, MH. Afshar, Optimization of Integrated Design of Wastewater Treatment and Sanitary Sewer Network Using Ant Colony Optimization Algorithm, *Journal of Water and Wastewater*, 25 (2014), 14-24. (In Persian)
- [27] A. Altarabsheh, M. Ventresca, A. Kandil, Evolutionary Algorithm for Selecting Wastewater System Configuration, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 32 (2018), 04018048.
- [28] D. Mora-Melia, PL. Iglesias-Rey, FJ. Martínez-Solano, P. Muñoz-Velasco, The Efficiency of Setting Parameters in a Modified Shuffled Frog Leaping Algorithm Applied to Optimizing Water Distribution Networks, *Water*, 8 (2016), 182.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Masoumi, S. Masoumzadeh, N. Zafari, S. Esfandmaz, Comparison of the Capability of Shuffled Frog Leaping Algorithm with Other Metaheuristic Algorithms in Design of Urban Sewage Network, Amirkabir J. Civil Eng., 54(6) (2022) 2375-2394.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19609.7215](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19609.7215)



