



بهینه‌سازی شاخص‌های کمی و کیفی پروژه‌های عمرانی با رویکرد دانش مدیریت پروژه (مطالعه موردی: سد مخزنی قوچم)

بهزاد اسپوتین، سینا فردمرادی‌نیا*

گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۸
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۰۶
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۷/۲۵

کلمات کلیدی:

بهینه‌سازی
هرم بقاء
الگوریتم‌های فراابتکاری
دانش مدیریت پروژه
سد مخزنی قوچم.

خلاصه: در سال‌های اخیر پیچیدگی اجرای پروژه‌ها، فضای رقابتی کسب و کار و محدودیت منابع سازمان‌ها، لزوم توجه به مدیریت پروژه را در دست‌یابی به اهداف پروژه‌ها بیشتر مورد توجه قرار داده است. از این رو در مراحل اجرای پروژه‌ها، کارفرمایان به دنبال افزایش کیفیت، کاهش مدت زمان و هزینه‌های اجرا و ریسک هستند که از اهداف اصلی آنها به شمار می‌روند. در این تحقیق، بهینه‌سازی بین اجزاء هرم بقاء شامل زمان، هزینه، کیفیت و ریسک در پروژه‌های عمرانی و به صورت موردی بر روی سد مخزنی قوچم انجام گرفته است. به این منظور از شش الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری استفاده شده است که سه الگوریتم کلاسیک (ژنتیک، جستجوی ممنوعه و تبرید شبیه‌سازی شده) و سه الگوریتم‌های جدید (پروانه، چرخه بکرزایی و شاهین هریس) می‌باشند. در چهار حالت به بهینه‌سازی هر یک از اجزاء هرم بقاء به طور جداگانه پرداخته شده است و در نهایت هر چهار حالت بطور همزمان بررسی شده است. کدنویسی‌های مربوط به توابع هدف و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در نرم‌افزار متلب انجام گرفته است. نتایج نشانگر عملکرد مناسب الگوریتم ژنتیک است. همچنین در بهینه‌سازی شاخص کیفیت فقط الگوریتم ژنتیک بهترین جواب بهینه را داده است و در بهینه‌سازی مرکب با در نظر گرفتن همزمان تمامی شاخص‌ها، الگوریتم‌های ژنتیک و شاهین هریس بهترین جواب را ارائه داده‌اند.

۱- مقدمه

به مدیریت پروژه را در دست‌یابی به اهداف پروژه‌ها بیشتر مورد توجه قرار داده است [۱]. از این رو در مراحل اجرای پروژه‌ها، کارفرمایان به دنبال افزایش کیفیت، کاهش مدت زمان و هزینه‌های اجرا و ریسک هستند که از اهداف اصلی پروژه‌ها به شمار می‌روند. بنابراین با پیشرفت علم وجود الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری ارائه مدل‌های جدید در راستای این هدف مثمرتر است. تحقیقات مختلفی در مورد بهینه‌سازی بین زمان و بهاء و یا زمان، هزینه و کیفیت انجام شده است.

عبداللهی و خوزین، در راه بهینه‌سازی اجزاء هرم بقاء شامل زمان، کیفیت و ریسک در پروژه‌های عمرانی و طرح‌های سرمایه‌گذاری و به منظور ایجاد توازن بین زمان، هزینه، کیفیت و ریسک از نوعی الگوریتم ژنتیک استفاده کردند [۱]. افشار و همکاران، با استفاده از یک الگوریتم مورچه‌ای چند کلونی فراعلمی جدید^۱ برای بهینه‌سازی سه شاخص زمان، هزینه و کیفیت مدلی ارائه دادند. در حقیقت این مدل به معنای به حداقل رساندن زمان و هزینه پروژه‌ها و همچنین حداکثر کیفیت آن، قادر به سازش بین جنبه مهم پروژه‌های

منظور از بهینه‌سازی ایجاد توازن بین زمان، هزینه، کیفیت و ریسک برای ایجاد بهترین سطح رضایت‌مندی برای مشتریان و استفاده‌کنندگان نهایی و کسب بهینه‌ترین سطح ارزش برای هر سازمان است. ظهور قراردادهای جدید که افزایش کیفیت عملیات اجرایی پروژه‌ها را همزمان با کاهش زمان، هزینه و ریسک آنها در نظر می‌گیرند، نیازمند توسعه مدل‌هایی است که علاوه بر زمان، هزینه و ریسک، عامل کیفیت را نیز در ارزیابی و بهینه‌سازی روش‌های اجرایی پروژه‌ها منظور دارند. کاهش ریسک، هزینه و زمان اجرا و همچنین افزایش کیفیت آن اهداف متفاوت مدیران است که با هم همسویی ندارند و این وظیفه حسابدار مدیریت است که به کمک مهندسی تولید به حل مسأله موازنه زمان، هزینه، ریسک و کیفیت در طرح‌های سرمایه‌گذاری و پروژه‌های عمرانی بپردازد. در سال‌های اخیر پیچیدگی اجرای پروژه‌ها، فضای رقابتی کسب و کار و محدودیت منابع سازمان‌ها، لزوم توجه

1 Multi – objective Ant Colony Optimization(MOACO)

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: farsha212000@gmail.com

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.



CF_{max} (حدکثر نقدینگی ماهانه) با استفاده از برنامه OptQuest (با رعایت محدودیت‌ها) به دست آمد. همچنین با بررسی بیشتر نتایج محاسبه شده توسط این نرم افزار (تفاوت کوچکتر بین حداکثر و حداقل مقدار CF_{max}) مشخص شد [۹]. ماتو و همکاران^۸، برای پروژه‌هایی که شامل چندین واحد مشابه بوده و اصطلاحاً پروژه‌های تکراری نامیده می‌شوند روشی برای برنامه ریزی اینگونه پروژه‌ها با اهداف به حداقل رساندن زمان و هزینه پروژه با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام دادند [۱۰]. عامر فهمی، به بررسی الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی اتخاذ شده نظیر (الگوریتم‌های مورچگان، ژنتیک، جستجوی ممنوعه و شبیه‌سازی ازدحام ذرات) برای حل انواع مختلف مشکل برنامه ریزی پروژه^۹ پرداخت [۱۱]. فرد مرادی نیا و خادمی، با استفاده از روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک به بررسی حل مسأله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع در حالت تک حالت و از نظر نوع روابط تقدمی، پایان به آغاز، پرداختند. هدف اصلی آنها، کاهش زمان انجام کار به حداقل زمان ممکن بود [۱۲]. بینگوی سی و همکاران^{۱۰}، با ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها برای مشکلات بهینه‌سازی انرژی ساختمان با خواص مختلف اقدام کردند [۱۳]. یلدیریم و جمیل آکای^{۱۱}، پیشنهاد مدل بهینه‌سازی هزینه -زمان برای پروژه‌های ساختمانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و رویکرد منطق فازی را ارائه دادند. آنها در مرحله اول، از مجموعه‌های فازی برای در نظر گرفتن تأثیر عدم قطعیت زمان و هزینه در کارهای ساختمانی بهره جسته، سپس از مجموعه‌های فازی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها استفاده نموده و از الگوریتم ژنتیک برای به دست آوردن حداقل هزینه پروژه و مدت زمان استفاده کردند [۱۴]. هشام و همکاران، از طریق آموزش منحنی یادگیری^{۱۲} با محوریت آموزش تمامی پرسنل و تعداد آنها و با هدف تخمین مدت زمان پروژه، بهینه‌سازی زمان و هزینه پروژه، تأثیر تعداد مطلوب پرسنل و اثر آموزش مطلوب پرسنل و اثر فعالیت‌ها بر دیگری، اقدام به بهینه‌سازی زمان و هزینه نمودند [۱۵]. پورنیمیا و مانیشا^{۱۳}، با هدف بررسی دلایل تأخیر در پروژه‌های ساختمانی، رابطه زمان و هزینه یک فعالیت، مفهوم بهینه‌سازی زمان و هزینه، بررسی عوامل هزینه و زمان و همچنین بررسی نرم افزارهای مدیریت در این زمینه به مرور بهینه‌سازی در ساختمان پرداختند [۱۶]. در این مقاله از شش الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری استفاده شده است که

ساختمانی می‌باشد. علاوه بر این، از این مدل برای بهینه‌سازی مبادله هزینه -زمان برای یک مثال موردی و مقایسه با نتایج مثال مدل‌سازی شده با روش MAWA^۱ استفاده شده است که قابلیت‌های مدل حاضر را تأیید می‌کند. این الگوریتم یک جایگزین مناسب برای حل مشکلات بهینه‌سازی ساختاری چندمنظوره می‌باشد [۲]. ابراهیم نژاد و احمدی، یک مدل ریاضی فازی برای شبکه ای از فعالیت‌ها پیشنهاد کردند. بدین منظور برای حل مدل (NSGA-II)^۲ جهت کشف چگونگی موازنه میان سه معیار زمان، هزینه و کیفیت در پروژه، و اینکه صرف هزینه‌های بیشتر در پروژه تا چه حد منجر به کاهش مدت زمان و افزایش کیفیت می‌شود، یک الگوریتم ژنتیک پیشنهاد نمودند [۳]. نگوین^۳ و همکاران، با هدف روشن شدن پیشرفت‌های اخیر و تشریح چالش‌ها و موانع احتمالی در بهینه‌سازی طراحی ساختمان، مروری بر کاربردهای روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی را در بخش ساختمان ارائه کردند [۴]. فائز عزیز و همکاران، توسعه مدلی را پیشنهاد کردند که هدف آن، مفاهیم اصلی روش بحرانی^۴ را با الگوریتم ژنتیکی چند هدفه در ساخت و سازهای بزرگ برای به حداقل رساندن مدت زمان پروژه و هزینه آن با به حداکثر رساندن کیفیت، ارائه می‌داد [۵]. علیخانزاده و همکاران، به دنبال بررسی و بهینه‌سازی موازنه سه فاکتور هزینه، کیفیت و زمان با توجه به نقش کلیدی آن در پروژه‌های عمرانی بودند. در واقع آنها در این مطالعه با استفاده از مدل‌های ریاضی و برنامه ریزی خطی به دنبال یافتن پاسخ‌های کمی برای مدیریت هزینه، زمان و کیفیت پروژه بودند [۶]. سالمی و همکاران، با استفاده از الگوریتم ژنتیکی (NSGA-II)، تحت عنوان موتور بهینه‌سازی یکپارچه با شبیه‌سازی رویداد گسسته^۵ (DES)، مدلی را برای فرآیندهای ساخت پل‌ها پیشنهاد کردند [۷]. فرداد، با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای و میدانی ابتدا نقش مدیریت دانش در کاهش زمان پروژه‌ها را بررسی نمود و سپس ۷ راهکار کاهش زمان پروژه را با استفاده از روش سلسله مراتب تحلیلی^۶، ارائه کرد [۸]. روسلون و ژاویستووسکی^۷، با استفاده از الگوریتم‌های متاخر انتخابی (ژنتیک و جستجوی تابو) با مطالعه موردی، به بررسی بهبود شاخص‌های ساخت و ساز در پروژه‌های ساختمانی پرداختند. آن‌ها تصمیم گرفتند با استفاده از نرم افزارهای موجود، امکان استفاده از الگوریتم‌های GA و TS توسط پیمانکار را بررسی کنند. در همان مثال موردی، کمترین

8 Mathewa, *et al.*

9 project scheduling problem (PSP)

10 Binghui, *et al.*

11 Yildirim & Cemil Akcay

12 Curve Analysis

13 Pomima & Manisha

1 modified adaptive weighting approach

2 Non- dominated sorting genetic algorithm II(NSGA-II)

3 Nguyen, *et al.*

4 Critical path method(CPM)

5 Discrete event simulation(DES)

6 Analytic Hierarchy Process(AHP)

7 Roslon, Zawistowski

بیشترین مقدار برازش را داشته باشند. چنین افرادی در مقام یک مجموعه به عنوان جمعیت اولیه برای مرحله بعدی الگوریتم عمل خواهد کرد [۱۷]. این الگوریتم با پارامترهای اختصاصی، تعداد جمعیت اولیه ۵۰، شاخص تزویج ۰/۸، شاخص جهش ۰/۳، نرخ جهش ۰/۰۲ و شاخص چرخ رولت ۱ تعیین و انجام گرفته است. در شکل ۱ فلوچارت و نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است [۱۷].

۲-۲- الگوریتم جستجوی ممنوعه^۳

الگوریتم جستجوی ممنوعه نخستین بار توسط آقایان گلوور و لاگونا^۴ در سال ۱۹۹۸ ارائه گردید. برای رسیدن به جواب بهینه در یک مسأله بهینه‌سازی، الگوریتم جستجوی ممنوعه ابتدا از یک جواب اولیه شروع به حرکت می‌کند. سپس الگوریتم بهترین جواب همسایه را از میان همسایه‌های جواب فعلی انتخاب می‌کند. در صورتی که این جواب در فهرست ممنوعه قرار نداشته باشد، الگوریتم به جواب همسایه حرکت می‌کند، در غیر این صورت الگوریتم معیاری به نام معیار تنفس را چک خواهد کرد. بر اساس معیار تنفس اگر جواب همسایه از بهترین جواب یافت شده تاکنون بهتر باشد، الگوریتم به آن حرکت خواهد کرد، حتی اگر آن جواب در فهرست ممنوعه باشد. پس از حرکت الگوریتم به جواب همسایه، فهرست ممنوعه بروزرسانی می‌شود، به این معنا که حرکت قبل که به وسیله آن به جواب همسایه حرکت کردیم، در فهرست ممنوعه قرار داده می‌شود تا از بازگشت مجدد الگوریتم به آن جواب و ایجاد سیکل جلوگیری شود. در واقع فهرست ممنوعه ابزاری در الگوریتم جستجوی ممنوعه است که توسط آن از قرار گرفتن الگوریتم در بهینه محلی جلوگیری می‌شود. پس از قرار دادن حرکت قبلی در فهرست ممنوعه، تعدادی از حرکت‌هایی که قبلاً در فهرست ممنوعه قرار گرفته بودند از فهرست خارج می‌شوند. حرکت از جواب فعلی به جواب همسایه تا جایی ادامه می‌یابد که شرط خاتمه دیده شود. شروط خاتمه متفاوتی می‌توان برای الگوریتم در نظر گرفت. بطور مثال محدودیت تعداد حرکت به جواب همسایه می‌تواند یک شرط خاتمه باشد. لازم به ذکر است که این الگوریتم بدون پارامتر اختصاصی می‌باشد. فلوچارت این الگوریتم در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۸].

شامل سه الگوریتم کلاسیک (ژنتیک، جستجوی ممنوعه و تیرید شبیه‌سازی شده) و سه الگوریتم جدید (پروانه، چرخه بکرزایی و شاهین هریس) استفاده گردیده است. به این منظور، پنج حالت مختلف روی مسأله‌ی مورد نظر پیاده سازی شده است که در چهار حالت به بهینه‌سازی هر یک از شاخص زمان، هزینه، کیفیت و ریسک به طور جداگانه پرداخته شده و در آخر هر چهار عامل به طور همزمان در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی می‌گردد.

۲- مواد و روش‌ها

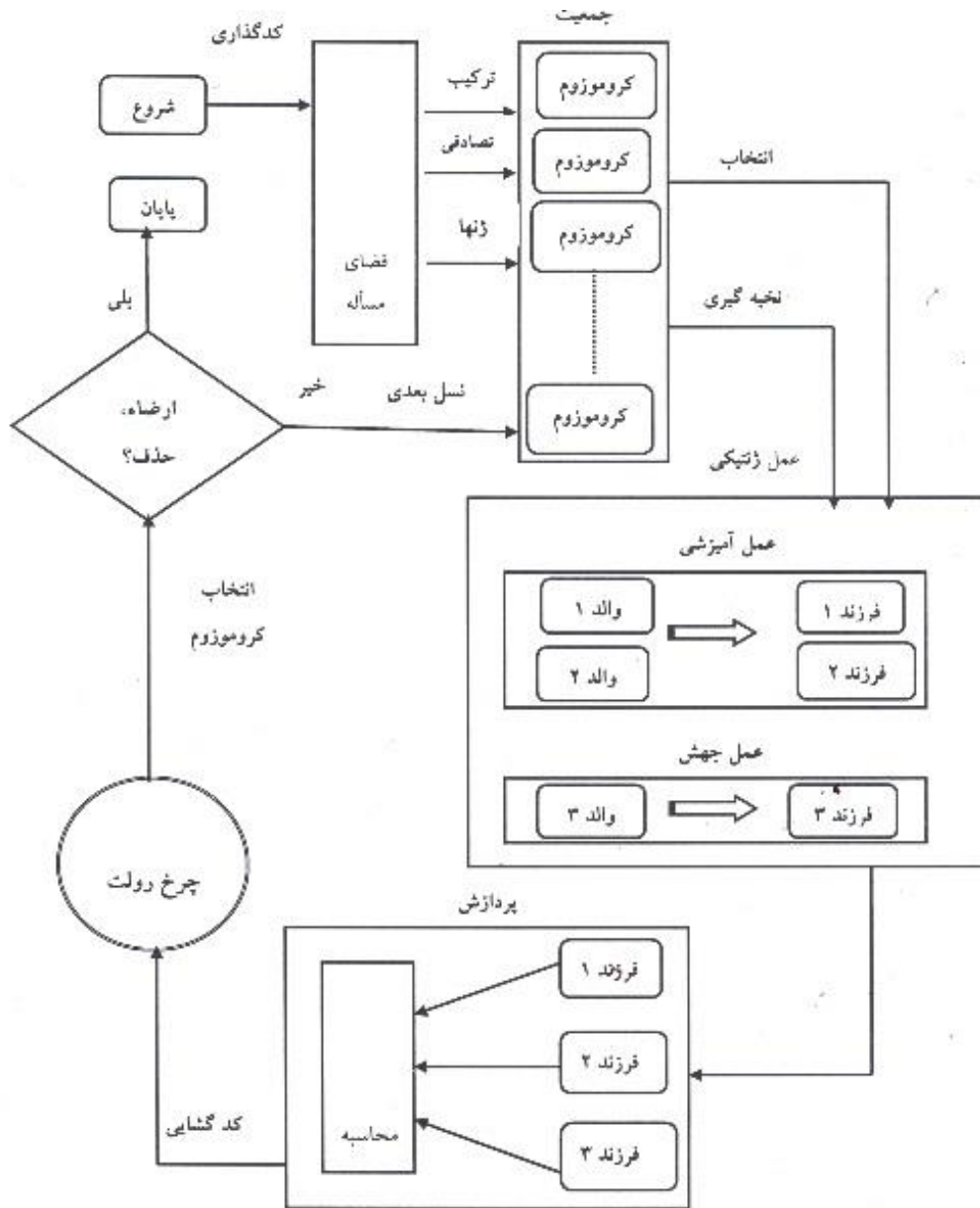
در این بخش، بهینه‌سازی هزینه، زمان، ریسک و کیفیت در پروژه‌های آبی با مطالعه موردی بر روی سد مخزنی قوچم واقع در استان کردستان و در کنار روستای قوچم و ۱۸ کیلومتری شمال غربی شهر دهگلان که بر روی رودخانه چم میرکی از سرشاخه‌های رودخانه تالوار قرار دارد صورت گرفته است. در این تحقیق توابع هدف به صورت انفرادی و ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه الگوریتم‌های مورد استفاده هر کدام به اجمال توضیح داده می‌شود.

۲-۱- الگوریتم ژنتیک^۱

ایده اساسی این الگوریتم انتقال خصوصیات موروثی توسط ژن‌هاست که اولین بار توسط جان هالند^۲ در سال ۱۹۹۲ ارائه شد. الگوریتم ژنتیک به عنوان یک الگوریتم محاسباتی بهینه‌سازی با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از نقاط فضای جواب در هر تکرار محاسباتی، به نحو مؤثری نواحی مختلف فضای جواب را جستجو می‌کند. در حالت کلی وقتی یک الگوریتم ژنتیکی اعمال می‌شود. ابتدا یک جمعیت اولیه از افراد به طور اتفاقی و بدون در نظر گرفتن معیار خاصی انتخاب می‌شود. برای تمامی کروموزوم‌های (افراد) نسل صفر مقدار برازش با توجه به تابع پردازش که ممکن است بسیار ساده یا پیچیده باشد تعیین می‌شود. سپس با مکانیزم‌های مختلف تعریف شده برای عملگر انتخاب زیرمجموعه‌ای از جمعیت اولیه انتخاب می‌شود. سپس روی این افراد انتخاب شده عملیات برش و جهش در صورت لزوم با توجه به صورت مسأله اعمال خواهد شد. حال باید این افراد که مکانیزم الگوریتم ژنتیک در موردشان اعمال شده است با افراد جمعیت اولیه (نسل صفر) از لحاظ مقدار برازش مقایسه شوند. (قطعاً توقع داریم که افراد نسل اول با توجه به یکبار اعمال الگوریتم‌های ژنتیک روی آنان از شایستگی بیشتری برخوردار باشند، اما الزاماً چنین نخواهد بود). به هر حال افرادی باقی خواهند ماند که

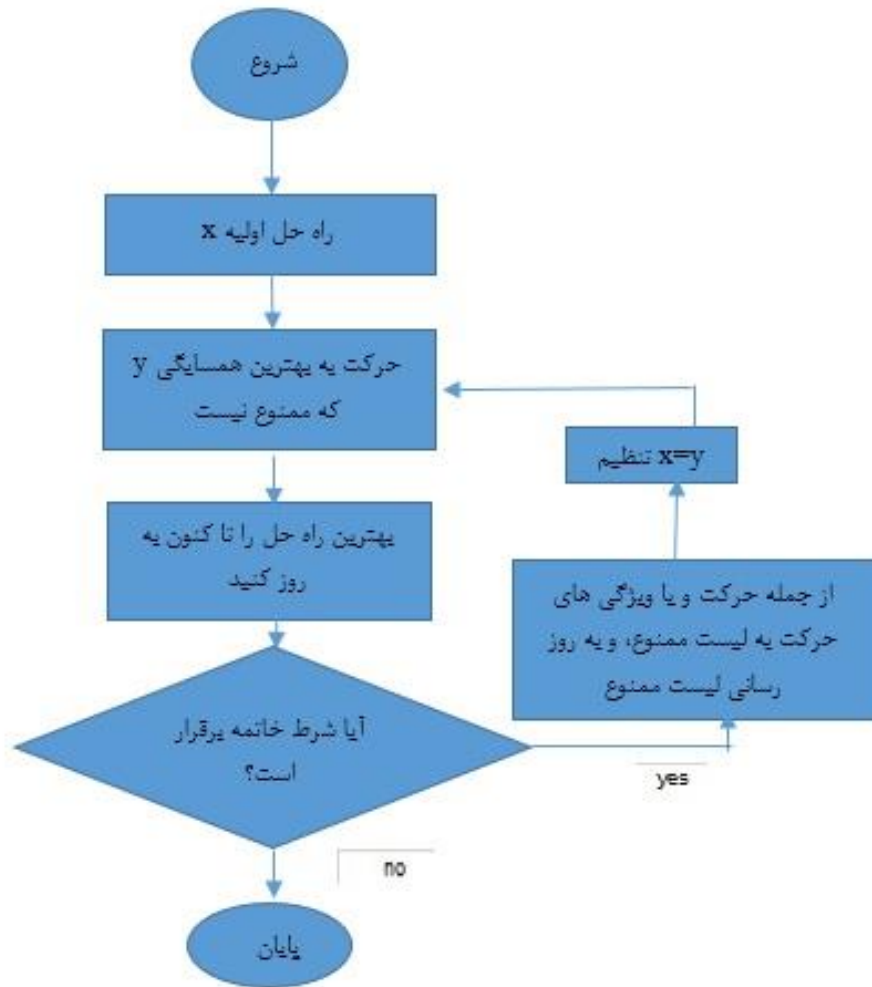
3 Tabu Search (TS)
4 Glover and Laguna

1 Genetic Algorithm (GA)
2 Jan Holland



شکل ۱. فلوچارت الگوریتم ژنتیک [۱۷]

Fig. 1.



شکل ۲. فلوجارت الگوریتم جستجوی ممنوع [۱۸]

Fig. 2.

می‌دهد. بنیان گذاران این الگوریتم برای حل مسائل سخت بهینه‌سازی، روشی مبتنی بر تکنیک تبرید تدریجی و آرام پیشنهاد نمودند. این محققین برای مدل‌سازی تبرید یک سیستم به منظور پیدا کردن پاسخ کمینه کلی، از شبیه‌سازی کامپیوتری استفاده کردند. می‌توان تبرید تدریجی و آرام در این الگوریتم را به عنوان کاهش تدریجی احتمال انتخاب پاسخ‌های بدتر حین جستجو در فضای پاسخ‌ها دانست (انتخاب پاسخ‌های بدتر یک ویژگی اساسی الگوریتم‌های فراابتکاری است و پیدا کردن بهترین پاسخ را ممکن می‌سازد). که این الگوریتم‌ها با صرف یک زمان کافی می‌توانند بهترین جواب کلی را پیدا کنند. این الگوریتم با پارامترهای اختصاصی، تعداد جمعیت ۵۰، تعداد زیرتکرارها ۱۵، حرارت اولیه ۰/۲۵، نرخ کاهش دما ۰/۹۹، تعداد همجواری‌ها ۵ و نرخ جهش ۰/۵ تعیین و انجام شده است. در شکل ۳ فلوجارت این الگوریتم نشان داده شده است [۱۹].

۲-۳- الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده^۱

این روش یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری ساده و اثربخش در حل مسائل بهینه‌سازی در فضاهای جستجوی بزرگ است که توسط آقای وان لارهوون^۲ در سال ۱۹۸۷ ارائه گردید. این الگوریتم بیشتر زمانی استفاده می‌شود که فضای جستجو گسسته باشد. برای مسائلی که پیدا کردن یک پاسخ تقریبی برای بهینه کلی مهم‌تر از پیدا کردن یک پاسخ دقیق برای بهینه محلی در زمان محدود و مشخصی است، تبرید شبیه‌سازی شده ممکن است نسبت به باقی روش‌ها مانند گرادیان کاهشی دارای ارجحیت باشد. شبیه‌سازی تبرید رویکردی است که مسأله کمینه‌سازی که یک تابع با تعداد بسیار زیادی متغیر است را به یک مسأله مکانیک آماری کاهش

1 Simulated Annealing(SA)
2 Van Laarhoven

Algorithm 1 Butterfly optimization algorithm

```

1: Objective function  $f(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_{dim})$ ,  $dim = \text{no. of dimensions}$ 
2: Generate initial population of  $n$  Butterflies  $\mathbf{x}_i= (i=1, 2, \dots, n)$ 
3: Stimulus Intensity  $I_i$  at  $\mathbf{x}_i$  is determined by  $f(\mathbf{x}_i)$ 
4: Define sensor modality  $c$ , power exponent  $a$  and switch probability  $p$ 
5: while stopping criteria not met do
6:   for each butterfly  $bf$  in population do
7:     Calculate fragrance for  $bf$  using Eq. (1)
8:   end for
9:   Find the best  $bf$ 
10:  for each butterfly  $bf$  in population do
11:    Generate a random number  $r$  from  $[0, 1]$ 
12:    if  $r < p$  then
13:      Move towards best butterfly/solution using Eq. (2)
14:    else
15:      Move randomly using Eq. (3)
16:    end if
17:  end for
18:  Update the value of  $a$ 
19: end while
20: Output the best solution found.

```

شکل ۴. شبه کد الگوریتم پروانه [۲۰]

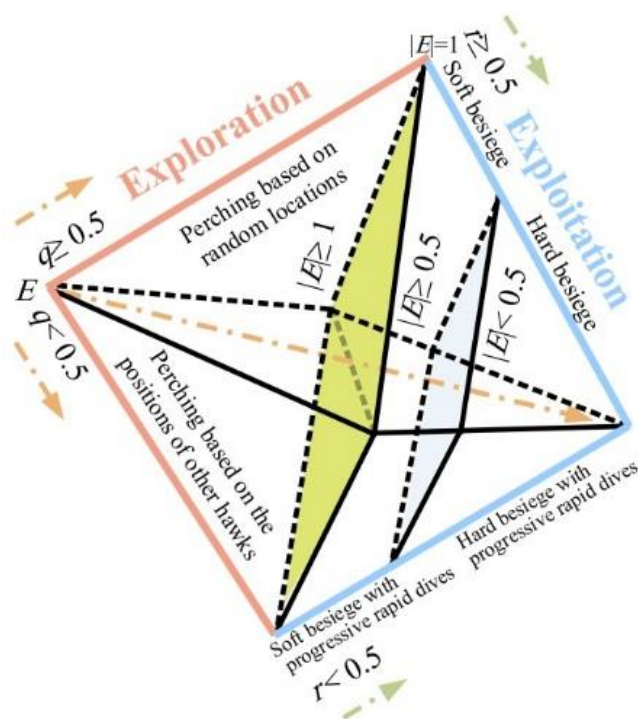
Fig. 4.

استراتژی تغذیه پروانه‌ها است که از حس بویایی برای تعیین موقعیت شهد یا جفت گیری استفاده می‌کنند. یکی از مهم‌ترین بخش زندگی یک پروانه، جمع آوری گرده گل‌ها می‌باشد که به واسطه آن مسیر مشخصی را طی کرده و در ادامه با نشان گذاری نسبت به بهبود مسیر قبلی در سفر های آتی اقدام می‌کند. نحوه پیاده سازی الگوریتم بهینه‌سازی پروانه به این صورت تنظیم شده که ابتدا یک سری جمعیت اولیه ایجاد شده و با مشخص شدن تابع برازش نسبت به تعیین موقعیت پروانه‌ها در فضای هدف اقدام می‌شود. در ادامه با بروزسانی موقعیت پروانه‌ها بر اساس نحوه گرد آفشانی، نسبت به ارزیابی مجدد و رتبه بندی جواب‌ها اقدام می‌شود. در انتها معیار های توقف مسأله کنترل می‌شوند [۲۰]. این الگوریتم با پارامترهای اختصاصی، تعداد جمعیت پروانه ها ۵۰، تغییر احتمالاتی ۰/۸، توان ۰/۱، تغییر حساسیت ۰/۰۱ تعیین و انجام پذیرفته است. به عنوان نمونه در شکل ۴ شبه کد این الگوریتم نشان داده شده است.

۲-۴- الگوریتم بهینه‌سازی پروانه^۱

تاکنون، محققین الگوریتم‌های فراابتکاری مختلفی را که الهام گرفته از طبیعت می‌باشند را برای حل مسائل گوناگون جستجو، ارائه داده‌اند که به عنوان نمونه می‌توان به الگوریتم‌های مورچگان (بارکو دوریگو^۲)، الگوریتم نهنگ (سید علی میرجلیلی و آندرو لوییس^۳)، یا الگوریتم کرم شب تاب (شین یانگ^۴) و ... اشاره کرد. در این تحقیق، یک الگوریتم جدید الهام گرفته شده از طبیعت با عنوان الگوریتم بهینه‌سازی پروانه که توسط آقایان آرورا و سین^۵ در سال ۲۰۱۹ ارائه شده که از رفتار جستجوی غذا و جفت گیری پروانه‌ها برای حل مسائل بهینه‌سازی جهانی تقلید می‌کند. این چارچوب عمدتاً بر مبنای

-
- 1 Butterfly Optimization Algorithm (BOA)
 - 2 Marco Dorigo
 - 3 Seyedali Mirjalili and Andrew Lewis
 - 4 Xin- she Yang
 - 5 Arora and Singh



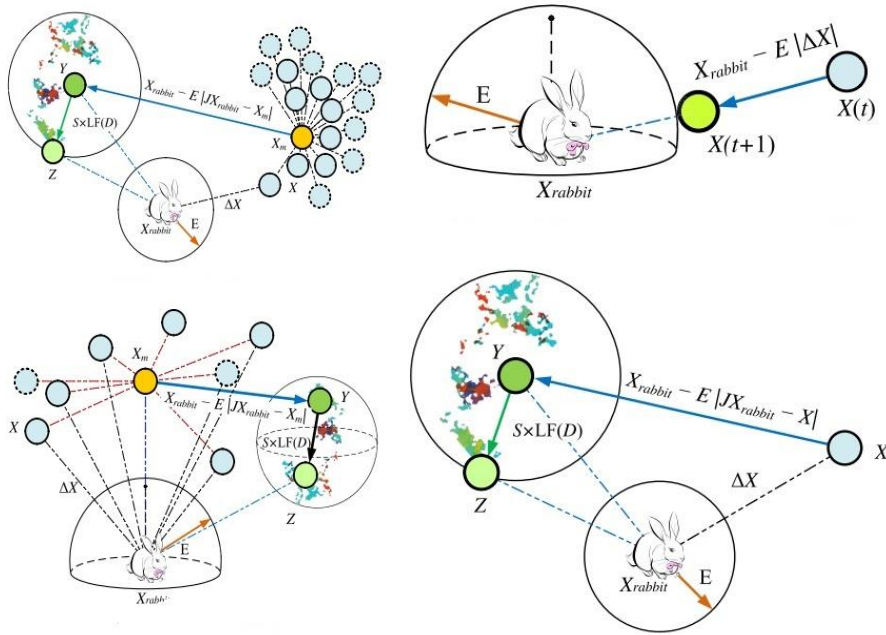
شکل ۶. فازهای مختلف الگوریتم شاهین هریس [۲۲]

Fig. 6.

موقعیت شاهین‌ها اقدام می‌شود. در ادامه نمونه‌های مختلف بر روی جواب‌های پیدا شده پیاده می‌شود؛ به نحوی که با تکرار متوالی به جواب‌های بهتر دست پیدا می‌کنند. در شکل ۶ فازهای مختلف این الگوریتم نشان داده شده است. این الگوریتم در چندین فاز مختلف کار جستجوی تابع هدف در مسأله بهینه‌سازی را انجام می‌دهد. در این راستا ابتدا یک جمعیت اولیه از این شاهین‌ها با مشخصات مختلف تولید می‌شوند. بر اساس نحوه غافلگیری این شاهین‌ها در هنگام شکار نسبت به بروزسانی موقعیت شاهین‌ها اقدام می‌شود. در ادامه نمونه‌های مختلف بر روی جواب‌های پیدا شده پیاده می‌شود؛ به نحوی که با تکرار متوالی به جواب‌های بهتر دست پیدا می‌کنند. با توجه به طبیعت ازدحامی حرکت این شاهین‌ها در هنگام شکار، نمونه‌های مختلفی برای تابع جابه‌جایی موقعیت ذرات می‌توان اعمال کرد که در شکل ۷ این توابع نشان داده شده‌اند [۲۲]. این الگوریتم همانند الگوریتم جستجوی ممنوعه بدون پارامتر اختصاصی می‌باشد. همچنین در شکل ۸ به عنوان نمونه شبه کد الگوریتم شاهین هریس نشان داده شده است [۲۲].

۲-۶- الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس^۱

این الگوی بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت و الهام از طبیعت، توسط آقای حیدری در سال ۲۰۱۹ ارائه شده است که به آن بهینه‌ساز هریس هاوکس یا شاهین هریس گفته می‌شود. الهام بخش اصلی این الگوریتم از رفتار مشارکتی و سبک تعقیب طعمه توسط گروه شاهین هریس در طبیعت با روش گشت و گذار غافلگیرانه استنباط شده است. در این استراتژی هوشمند، چندین شاهین با همکاری و حمله از جهات مختلف تلاش برای غافلگیر کردن طعمه می‌کنند. شاهین هریس می‌تواند الگوهای مختلف تعقیب را بر اساس ماهیت سناریوهای پویا و الگوهای گریز طعمه ارائه دهد. این روش به طور محاسباتی از الگوها و رفتارهای پویا تقلید می‌کند تا یک الگوریتم بهینه‌سازی را به وجود آورد. این الگوریتم در چندین فاز مختلف کار جستجوی تابع هدف در مسأله بهینه‌سازی را انجام می‌دهد. در این راستا ابتدا یک جمعیت اولیه از این شاهین‌ها با مشخصات مختلف تولید می‌شوند. بر اساس نحوه غافلگیری این شاهین‌ها در هنگام شکار نسبت به بروزسانی



شکل ۷. راست (نمونه‌ای از بردارهای کلی در شرایط محاصره شدید) - چپ (شکل فرآیند در فضای دو بعدی و سه بعدی) [۲۲]

Fig. 7.

Algorithm 1 Pseudo-code of HHO algorithm

Inputs: The population size N and maximum number of iterations T
Outputs: The location of rabbit and its fitness value
Initialize the random population $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$
while (stopping condition is not met) **do**
 Calculate the fitness values of hawks
 Set X_{rabbit} as the location of rabbit (best location)
 for (each hawk (X_i)) **do**
 Update the initial energy E_0 and jump strength J ▷ $E_0=2\text{rand}()-1, J=2(1-\text{rand}())$
 Update the E using Eq. (3)
 if ($|E| \geq 1$) **then** ▷ Exploration phase
 Update the location vector using Eq. (1)
 if ($|E| < 1$) **then** ▷ Exploitation phase
 if ($r \geq 0.5$ and $|E| \geq 0.5$) **then** ▷ Soft besiege
 Update the location vector using Eq. (4)
 else if ($r \geq 0.5$ and $|E| < 0.5$) **then** ▷ Hard besiege
 Update the location vector using Eq. (6)
 else if ($r < 0.5$ and $|E| \geq 0.5$) **then** ▷ Soft besiege with progressive rapid dives
 Update the location vector using Eq. (10)
 else if ($r < 0.5$ and $|E| < 0.5$) **then** ▷ Hard besiege with progressive rapid dives
 Update the location vector using Eq. (11)
 Return X_{rabbit}

شکل ۸. شبه کد الگوریتم شاهین هریس [۲۲]

Fig. 8.

۳- نتایج و بحث

این تحقیق در راه بهینه‌سازی هزینه، زمان، ریسک و کیفیت در پروژه‌های آبی انجام یافته که مطالعه موردی بر روی یک سد خاکی صورت گرفته است. داده‌های اولیه از صورت وضعیت نهایی عملیات احداث سد قوچم استخراج شده و سپس اقدام به تهیه جدول ۱ شده است. این جدول پایه و اساس این پژوهش می‌باشد. در تکمیل این جدول از تجربیات افراد مختلف نخبه و کارشناس متخصص در این حوزه استفاده شده است. بر اساس این جدول، تمامی فصل‌های فهرست بهای مربوط به احداث سد قوچم در ۳ حالت از زمان‌های اجرا (که شامل اجرا در زمان کمینه، بیشینه و متوسط هست) بر اساس نظرات نخبگان و کارشناسان متخصص در این حوزه، تقسیم‌بندی شده است. همچنین هر فصل، در ۳ نوع از شاخص‌های کیفی با درصد‌های متفاوت بصورت تصادفی نوشته شده است که کیفیت نهایی در هر سطر از مجموع درصد تأثیرهای آن ۳ حالت کیفی بدست آمده است. هزینه‌های هر فصل بر اساس صورت وضعیت واقعی نوشته شده و همچنین برای هر فصل، درصد‌های ریسکی بصورت تصادفی و بر اساس نظر کارشناسان نخبه و متخصص در این حوضه انتخاب شده است.

۳-۱- فرمول‌بندی مسأله بهینه‌سازی

برای ارزیابی الگوریتم طراحی شده، از یک نمونه‌ی فنی موجود در پروژه‌های عملی استفاده شده و داده‌های مربوط به عامل ریسک، در این پژوهش به آن اضافه شده است. در این تحقیق، پنج حالت مختلف روی مسأله‌ی مورد نظر پیاده سازی شده است. برای این منظور، در چهار حالت به بهینه‌سازی هر یک از عوامل زمان، هزینه، کیفیت و ریسک به طور جداگانه پرداخته می‌شود. در آخر هر چهار عامل به طور همزمان در نظر گرفته می‌شود. مقدار تابع هدف در هر حالت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

حالت اول: بهینه‌سازی زمان

در این حالت، تابع هدف مسأله عبارت است از مجموع زمان انجام کلیه‌ی فعالیت‌ها. این مقدار که برابر با زمان اتمام آخرین فعالیت است، با توجه به فعالیت‌های پیش‌نیازی محاسبه شده و با T نشان داده می‌شود.

حالت دوم: بهینه‌سازی هزینه

در این حالت، تابع هدف مسأله عبارت است از مجموع هزینه انجام کلیه فعالیت‌ها. این مقدار به سادگی و از حاصل جمع هزینه‌ی هر یک از فعالیت‌ها محاسبه شده و با C نشان داده می‌شود.

حالت سوم: بهینه‌سازی کیفیت

در این حالت، تابع هدف مسأله عبارت است از مجموع کیفیت موثر کلیه فعالیت‌ها. برای محاسبه‌ی این مقدار، ابتدا کیفیت موثر هر فعالیت روی کل پروژه، که برابر است با حاصل ضرب درصد تأثیر در کیفیت فعالیت مربوطه، محاسبه می‌شود. سپس مجموع مقادیر به دست آمده، محاسبه شده و با Q نشان داده می‌شود.

حالت چهارم: بهینه‌سازی ریسک

در این حالت (مشابه حالت سوم)، تابع هدف مسأله عبارت است از مجموع ریسک موثر کلیه‌ی فعالیت‌ها. برای محاسبه‌ی این مقدار، ابتدا ریسک موثر هر فعالیت روی کل پروژه، که برابر است با حاصل ضرب درصد تأثیر در ریسک فعالیت مربوطه، محاسبه می‌شود. سپس مجموع مقادیر به دست آمده، محاسبه شده و با R نشان داده می‌شود.

حالت پنجم: بهینه‌سازی زمان، هزینه، کیفیت و ریسک به

طور همزمان

در این حالت برای محاسبه‌ی تابع هدف از رابطه‌ی (۱) استفاده می‌شود:

$$F(x) = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} + \frac{C - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} + \frac{R - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} + \frac{Q - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} \quad (1)$$

در رابطه بالا R, Q, C, T به ترتیب زمان، هزینه، کیفیت و ریسک کل اجرای پروژه برای یک راه حل یا روش اجرای آن است. جزء اول مدت زمان، جزء دوم هزینه، جزء سوم کیفیت و جزء چهارم ریسک اجرا را برای محاسبه مقدار تابع هدف برای هر پاسخ در بر دارد. از آنجایی که که واحد اندازه‌گیری اجزاء هرم بقاء یکسان نیستند، بر اساس رابطه فوق مقدار آنها بین صفر و یک قرار گرفته و بی‌مقیاس می‌گردند، تا قابل مقایسه و یا قابل جمع با یکدیگر شوند. در مسأله فنی این پژوهش، کمترین زمان (T_{min}) و بیشترین زمان (T_{max}) به ترتیب برابر با ۴۷۸ و ۷۴۵ روز، کمترین هزینه (C_{min}) و بیشترین هزینه (C_{max}) به ترتیب برابر با ۵۳۱۲۷۲۶۷۲۰۰۶ ریال و ۸۸۰۲۳۶۰۲۰۶۹۳ ریال، کمترین کیفیت (Q_{min}) و بیشترین کیفیت (Q_{max}) برابر با ۹۸ و ۶۲ و کمترین ریسک (R_{min}) و بیشترین ریسک (R_{max}) به ترتیب برابر با ۰/۲۵ و ۰/۴۴ هستند.

توابع هدف انفرادی به صورت بهینه‌سازی هزینه، زمان، ریسک و

جدول ۱. داده‌های فنی مربوط به سد قوچم

Table 1.

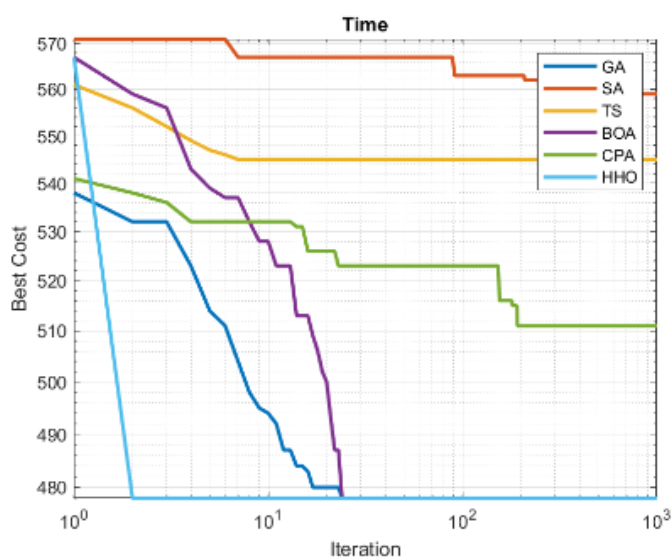
داده‌های نمونه فنی مورد بررسی (سد مخزنی قوچم) - فهرست بهای سدسازی																	
ریسک	کیفیت نهایی	شاخص کیفیت ۳		شاخص کیفیت ۲		شاخص کیفیت ۱		میزان هزینه هر متر (ریال)	زمان اجرا (ماه)	گزینه اجرا	درصد تأثیر	مبلغ کل ردیف (ریال)	شرح فعالیت	ردیف			
		عملکرد	درصد تأثیر	عملکرد	درصد تأثیر	عملکرد	درصد تأثیر										
0.5	98	98	0.2	96	0.3	100	0.5	413,230,765,915	14	1	78.775	531,296,699,033	فصل اول	1			
0.3	83	84	0.2	77	0.3	86	0.5	472,263,732,474	16	2	1.428				9,634,075,543	فصل چهارم	2
0.25	62.5	65	0.2	60	0.3	63	0.5	708,395,598,711	24	3							
0.5	97	99	0.2	94	0.4	98	0.4	6,375,491,168	15	1	1.130	7,620,774,094	فصل پنجم	3			
0.3	86	85	0.2	92	0.4	81	0.4	8,500,654,891	20	2							
0.25	62.2	59	0.2	66	0.4	60	0.4	10,625,818,614	25	3							
0.4	99	98	0.2	97	0.2	100	0.7	4,970,070,061	15	1	0.309	2,087,217,746	فصل ششم	4			
0.3	80	81	0.2	82	0.2	80	0.7	7,289,436,090	22	2							
0.27	61.85	63	0.15	60	0.15	62	0.7	10,934,154,135	33	3							
0.6	96.85	94	0.15	95	0.35	99	0.5	1,565,413,310	12	1	3.160	21,309,551,623	فصل هفتم	5			
0.25	73.3	76	0.15	71	0.35	74	0.5	2,087,217,746	16	2							
0.15	61.15	64	0.15	63	0.35	59	0.5	2,609,022,183	20	3							
0.45	99.2	99	0.2	97	0.2	100	0.6	18,752,405,428	22	1	0.472	3,180,886,681	فصل هشتم	6			
0.3	91	89	0.2	89	0.2	93	0.6	20,457,169,558	24	2							
0.25	65.2	72	0.2	71	0.2	61	0.6	25,571,461,948	30	3							
0.45	96	93	0.4	99	0.3	97	0.3	1,908,532,009	9	1	0.468	3,180,886,681	فصل نهم	7			
0.3	71	71	0.4	73	0.3	70	0.3	3,180,886,681	15	2							
0.25	63.7	67	0.4	62	0.3	61	0.3	3,817,064,017	18	3							
0.45	95					95		2,600,604,638	14	1							

0.2	64	67	0.4	62	0.3	61	0.3	251,293,738	18	3	18	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل سیزدهم	16
	71	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.132					
	71	89	0.2	71	0.2	93	0.6	178,584,525	24	2	24	1.489					
	64	72	0.2	71	0.2	61	0.6	223,230,656	30	3	30	0.763	5,147,956,655	10,044,950,381	887,091,129	فصل چهاردهم	17
	64	72	0.2	71	0.2	61	0.6	125,646,869	9	1	9	0.027	183,545,206	10,044,950,381	887,091,129	فصل پنزدهم	18
	71	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	96	93	0.4	99	0.3	97	0.3	125,646,869	9	1	9	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل شانزدهم	19
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.027	183,545,206	10,044,950,381	887,091,129	فصل هفدهم	20
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	71	93	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل هیجدهم	21
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل نوزدهم	22
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیستم	23
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	71	93	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و یکم	24
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و دو	25
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و سه	26
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	71	93	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و چهار	27
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و پنج	28
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و شش	29
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	71	93	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و هفتم	30
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و هشت	31
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و نهم	32
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	71	93	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و دهم	33
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و یازدهم	34
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و دوازدهم	35
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	71	93	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و سیزدهم	36
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و چهارم	37
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و پنجم	38
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	71	93	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و ششم	39
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و هفتم	40
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و هشتم	41
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	71	93	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و نهم	42
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و دهم	43
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و یکم	44
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	71	93	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و دو	45
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و سه	46
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و چهار	47
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	71	93	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و پنجم	48
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و ششم	49
	67	89	0.2	71	0.2	89	0.9	163,702,481	22	1	22	0.132					
	64	71	0.4	73	0.3	70	0.3	209,411,449	15	2	15	0.0300	202,431,067	10,044,950,381	887,091,129	فصل بیست و هفتم	50

جدول ۲. نتایج الگوریتم‌های مختلف در بهینه‌سازی برای سناریوی اول (زمان)

Table 2.

الگوریتم	زمان	درصد خطا
GA	478	0
SA	559	0.169456
TS	545	0.140167
BOA	478	0
CPA	511	0.069038
HHO	478	0



شکل ۹. نمودار همگرایی برای بهینه‌سازی زمان در سد مخزنی

Fig. 9.

بهینه یعنی ۴۷۸ روز همگرا شده؛ در حالی که سرعت همگرایی الگوریتم‌های دیگر کمتر می‌باشد. همچنین بیشترین درصد خطا مربوط به الگوریتم SA با ۱۶ درصد و کمترین خطا مربوط به الگوریتم‌های CPA می‌باشد که دارای خطای ۶ درصد می‌باشند.

در جدول ۳ نتایج بهینه‌سازی برای سناریوی دوم (هزینه) با استفاده از الگوریتم‌های مختلف نشان داده شده است. در این جدول درصد تغییرات یا درصد خطا نسبت به بهترین جواب گزارش شده توسط بهترین الگوریتم‌ها که در این سناریو الگوریتم‌های GA، HHO و CPA می‌باشند نیز ارائه شده است.

در شکل ۱۰ نمودار همگرایی برای سناریوی اول (زمان) با استفاده

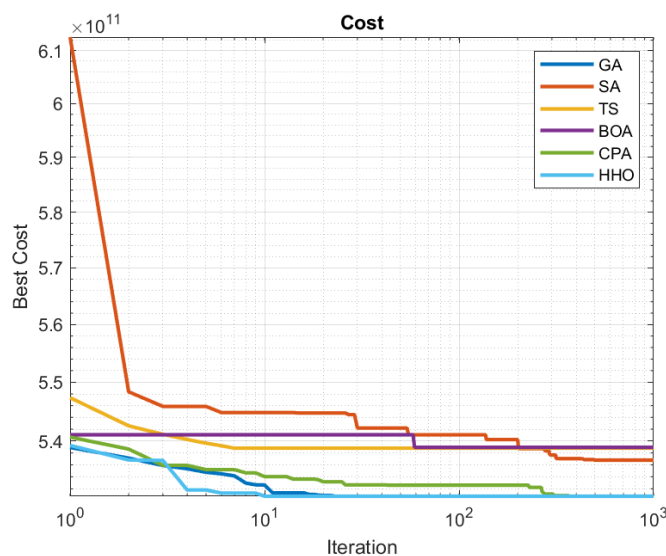
کیفیت در نظر گرفته شده؛ به نحوی که در هر بار پروسه بهینه‌سازی، فقط کمینه‌سازی یا بیشینه‌سازی یکی از توابع فوق مدنظر می‌باشد. تعداد متغیرهای بهینه‌سازی در هر سناریو ۲۳ عدد می‌باشد که متناظر با ۲۳ ردیف از نمونه صورت وضعیت سدهای خاکی می‌باشد. در جدول ۲ نتایج بهینه‌سازی برای سناریوی اول (زمان) با استفاده از الگوریتم‌های مختلف نشان داده شده است. در این جدول درصد تغییرات یا درصد خطا نسبت به بهترین جواب گزارش شده توسط بهترین الگوریتم‌ها که در این سناریو الگوریتم‌های GA، HHO و BOA می‌باشند نیز ارائه شده است.

در شکل ۹ نمودار همگرایی برای سناریوی اول (زمان) با استفاده از الگوریتم‌های مختلف نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که الگوریتم‌های GA، HHO و BOA در تکرارهای اول به سرعت به مقدار

جدول ۳. نتایج الگوریتم‌های مختلف در بهینه‌سازی برای سناریوی دوم (هزینه)

Table 3.

الگوریتم	هزینه	درصد خطا
GA	530773130016.2500	0
SA	536788583955.3500	0.011333
TS	538797077389.3500	0.015117
BOA	538940274531.5500	0.015387
CPA	530773130016.2500	0
HHO	530773130016.2500	0



شکل ۱۰. نمودار همگرایی برای بهینه‌سازی هزینه در سد مخزنی

Fig. 10.

از الگوریتم‌های مختلف نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که الگوریتم GA در تکرارهای اول به سرعت به مقدار بهینه همگرا شده؛ در حالی که سرعت همگرایی الگوریتم‌های دیگر کمتر می‌باشد. همچنین بیشترین درصد خطا مربوط به الگوریتم SA با ۶۴ درصد و کمترین خطا مربوط به الگوریتم‌های HHO می‌باشد که دارای خطای ۶۲ درصد می‌باشند.

در جدول ۵ نتایج بهینه‌سازی برای سناریوی چهارم (ریسک) با استفاده از الگوریتم‌های مختلف نشان داده شده است. در این جدول درصد تغییرات یا درصد خطا نسبت به بهترین جواب گزارش شده توسط بهترین الگوریتم‌ها که در این سناریو الگوریتم‌های GA و HHO می‌باشند نیز ارائه شده است.

در شکل ۱۲ نمودار همگرایی برای سناریوی چهارم (ریسک) با استفاده

از الگوریتم‌های مختلف نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که الگوریتم‌های GA، HHO و CPA در تکرارهای اول به سرعت به مقدار بهینه همگرا شده؛ در حالی که سرعت همگرایی الگوریتم‌های دیگر کمتر می‌باشد. همچنین بیشترین درصد خطا مربوط به الگوریتم TS با ۱/۵ درصد و کمترین خطا مربوط به الگوریتم‌های SA می‌باشد که دارای خطای ۱/۱ درصد می‌باشند.

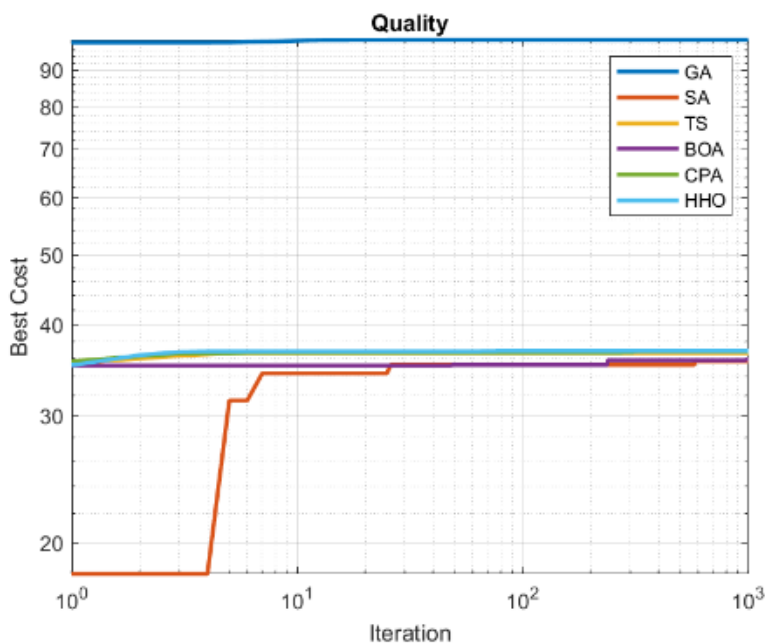
در جدول ۴ نتایج بهینه‌سازی برای سناریوی سوم (کیفیت) با استفاده از الگوریتم‌های مختلف نشان داده شده است. در این جدول درصد تغییرات یا درصد خطا نسبت به بهترین جواب گزارش شده توسط بهترین الگوریتم‌ها (که در این سناریو الگوریتم‌های GA می‌باشند) نیز ارائه شده است.

در شکل ۱۱ نمودار همگرایی برای سناریوی سوم (کیفیت) با استفاده از

جدول ۴. نتایج الگوریتم‌های مختلف در بهینه‌سازی برای سناریوی سوم (کیفیت)

Table 4.

الگوریتم	کیفیت	درصد خطا
GA	99.1063	0
SA	35.6934	0.639847
TS	36.6334	0.630363
BOA	35.8923	0.63784
CPA	36.8308	0.628371
HHO	36.8736	0.627939



شکل ۱۱. نمودار همگرایی برای بهینه‌سازی کیفیت در سد مخزنی

Fig. 11.

در جدول ۶ نتایج بهینه‌سازی برای سناریوی پنجم (کلی) با استفاده از الگوریتم‌های مختلف نشان داده شده است. در این جدول درصد تغییرات یا درصد خطا نسبت به بهترین جواب گزارش شده توسط بهترین الگوریتم‌ها که در این سناریو الگوریتم‌های GA و HHO می‌باشند نیز ارائه شده است.

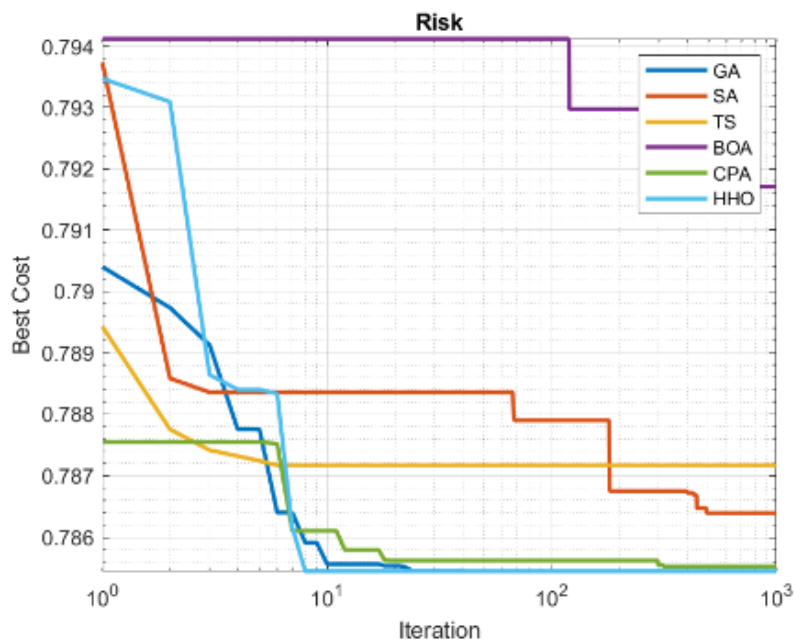
در شکل ۱۳ نمودار همگرایی برای سناریوی پنجم (کلی) با استفاده

از الگوریتم‌های مختلف نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که الگوریتم GA و HHO در تکرارهای اول به سرعت به مقدار بهینه همگرا شده؛ در حالی که سرعت همگرایی الگوریتم‌های دیگر کمتر می‌باشد. همچنین بیشترین درصد خطا مربوط به الگوریتم BOA با ۰/۷ درصد و کمترین خطا مربوط به الگوریتم‌های CPA می‌باشد که دارای خطای ۰/۰۱ درصد می‌باشند.

جدول ۵. نتایج الگوریتم‌های مختلف در بهینه‌سازی برای سناریوی چهارم (ریسک)

Table 5.

الگوریتم	ریسک	درصد خطا
GA	0.785451	0
SA	0.786394	0.001201
TS	0.787170	0.002189
BOA	0.791712	0.007971
CPA	0.785531	0.000102
HHO	0.785451	0



شکل ۱۲. نمودار همگرایی برای بهینه‌سازی ریسک در سد مخزنی

Fig. 12.

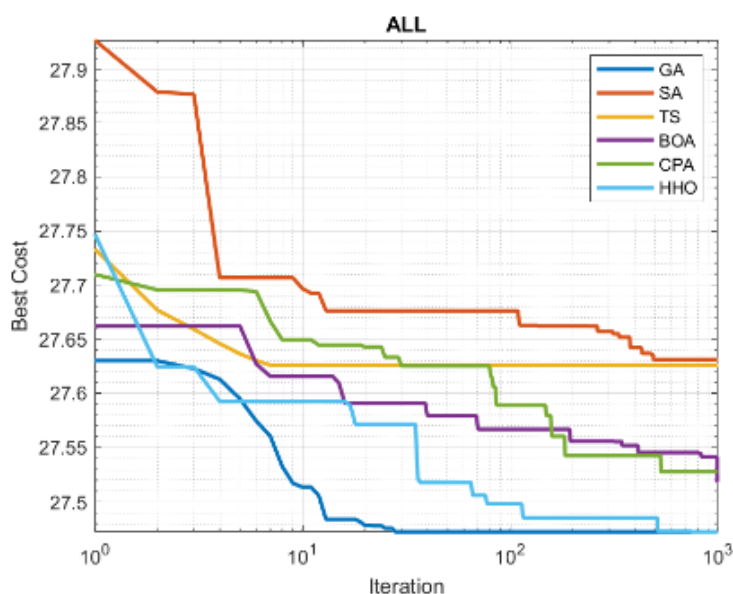
درصد و کمترین خطا مربوط به الگوریتم‌های BOA می‌باشد که دارای خطای ۰/۱۶ درصد می‌باشند.

از الگوریتم‌های مختلف نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که الگوریتم GA و HHO در تکرارهای اول به سرعت به مقدار بهینه همگرا شده؛ در حالی که سرعت همگرایی الگوریتم‌های دیگر کمتر می‌باشد. همچنین بیشترین درصد خطا مربوط به الگوریتم SA با ۰/۵۷

جدول ۶. نتایج الگوریتم‌های مختلف در بهینه‌سازی برای سناریوی پنجم (کلی)

Table 6.

الگوریتم	کلی	درصد خطا
GA	27.4727	0
SA	27.6311	0.005766
TS	27.6259	0.005576
BOA	27.5185	0.001667
CPA	27.5277	0.002002
HHO	27.4727	0



شکل ۱۳. نمودار همگرایی برای بهینه‌سازی کلیه مؤلفه‌های در سد مخزنی

Fig. 13.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان بر اساس مدیریت پروژه تحت عنوان برنامه‌ریزی، هدایت و کنترل منابع برای دستیابی به اهداف خاصی در سایر پروژه‌های عمرانی اقدام نمود و در این راه بهینه‌سازی شاخص‌های زمان، هزینه، کیفیت و ریسک مورد توجه می‌باشد. بنابراین با توجه به مدل ارائه شده می‌توان علاوه بر افزایش کیفیت، عملیات اجرایی پروژه‌ها را همزمان با کاهش ریسک، هزینه و زمان آنها در نظر گرفت. منظور نمودن

عامل کیفیت، علاوه بر زمان، ریسک و هزینه در بهینه‌سازی فعالی‌های اجرایی یک پروژه، با وجود مشکلاتی که در جهت کمی ساختن آن برای فعالیت‌های پروژه وجود دارد از عوامل تأثیرگذار در انتخاب روش‌های اجرایی بوده و به رقابت‌پذیری منجر می‌شود. هدف کاربردی این تحقیق کمک به برنامه‌ریزی اجرای پروژه با هدف حداقل‌سازی هزینه، زمان و بطور همزمان حداکثرسازی کیفیت و اجرای پروژه بوده که نهایتاً منجر به ارائه مدل برای انجام بهینه‌سازی می‌باشد. با توجه به پیشینه تحقیق، در اکثر موارد جهت

در نظر گرفتن شرایط پروژه‌های عمرانی کشور و نیز مدیریت پروژه علی‌الخصوص بحث PMBOK^۱ از نظر حوزه دانش مدیریت منابع پروژه و حوزه دانش مدیریت ذی‌نفعان پروژه، می‌توان اثر تأثیر پرداخت‌ها و تأمین مالی پروژه توسط کارفرما را در بهینه‌سازی مطلوب شاخص‌های هزینه، زمان، کیفیت و ریسک مد نظر قرار داد. از طرف دیگر می‌توان اثر میزان دانش فنی، سطح آگاهی، میزان یادگیری و تجربه عوامل اجرای پروژه (از قبیل مدیر پروژه، رییس کارگاه، عوامل اجرایی، انباردار، مسئول خرید و غیره) را با در نظر گرفتن حوزه‌های دانش مدیریت منابع، حوزه دانش مدیریت ارتباطات، حوزه دانش مدیریت تدارکات و حوزه دانش مدیریت یکپارچگی پروژه مورد بررسی قرار داد.

منابع

- [1] Ahmad Abdullahi, Ali Khozin “Using Genetic Algorithm to Optimize Balance, Time, Price, Quality and Risk in Construction Projects and Investment Projects” - Journal of Accounting and Auditing Studies, Issue 20, 2016, pp. 104-123.
- [2] Afshar, A., et al. (2007). “Multi-objective optimization of time-cost-quality using multi-colony ant algorithm.”
- [3] Ebrahimnezhad, S., et al. (2013). “Time-cost-quality trade-off in a CPM1 network using fuzzy logic and genetic algorithm.” International Journal of Industrial Engineering & Production Management 24(3): 361-376.
- [4] Nguyen, A.-T., et al. (2014). “A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis.” Applied Energy 113: 1043-1058.
- [5] Aziz, R. F., et al. (2014). “Smart optimization for mega construction projects using artificial intelligence.” Alexandria Engineering Journal 53(3): 591-606.
- [6] Vahid Alikhanzadeh, Mustafa Kazemi, Mohammad Legions “Optimizing the Balance of Cost, Time and Quality in Construction Projects with an Approach to Investigating the Effect of Materials and Workforce Selection” International Conference on Management and Industrial Engineering - March 4, 2015.
- [7] Salimi, S., et al. (2018). “Performance analysis of simulation-based optimization of construction projects

بهینه‌سازی حداکثر از ۳ شاخص هزینه، زمان و کیفیت با استفاده از یک روش و یا دو روش بهینه‌سازی استفاده شده است. لکن جنبه نوآوری این مقاله به این دلیل است که همزمان از شش الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری در این خصوص استفاده شده است که این مهم علاوه بر هدف اصلی این مقاله که بهینه‌سازی می‌باشد، منجر به نوعی رتبه بندی و مقایسه نحوه عملکرد بین الگوریتم‌های کلاسیک و نوین می‌شود. به این منظور در این تحقیق، بهینه‌سازی شاخص‌های هزینه، زمان، ریسک و کیفیت در پروژه‌های آبی با مطالعه موردی بر روی سدهای خاکی هم به صورت مجزا و هم با لحاظ کردن همزمان هر چهار شاخص صورت گرفته است و توابع هدف به صورت انفرادی و ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته و کدنویسی‌های مربوط به توابع هدف و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است. با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان اذعان داشت تابع هدف ارائه شده و الگوریتم‌های ژنتیک (GA) و شاهین هریس (HHO) می‌تواند به عنوان الگویی مناسب برای سایر ارگان‌ها و سازمان‌ها جهت بهینه‌سازی شاخص‌های کمی و کیفی صنعت ساختمان و یا سایر پروژه‌های آبی به کار روند. با توجه به این نتایج، دو الگوریتم GA و HHO نتایج بهینه‌تر و مناسب‌تری ارائه داده‌اند و نتایج کلی به شرح زیر می‌باشند:

- استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی GA، BOA و همچنین HHO منجر به کاهش تقریباً ۱۵٪ زمان اجرای پروژه یعنی کمترین حد ممکن (۴۷۸ روز) می‌شود.
- الگوریتم‌های دیگر نظیر SA، TS و CPA به مقادیر بیشتری از زمان که بیشینه آنها ۵۵۹ روز می‌باشد، همگرا می‌شوند که نشان از عدم عملکرد صحیح این الگوریتم‌ها دارد.
- بهترین عملکرد در کاهش هزینه‌های جاری پروژه مربوط به الگوریتم‌های GA، HHO و CPA می‌باشد؛ در حالی که الگوریتم‌های دیگر هزینه‌های بیشتری محاسبه می‌کنند که مقرون به صرفه نیست.
- الگوریتم GA به عنوان تنها الگوریتمی که در سناریوی سوم با محوریت کیفیت بهترین عملکرد را با محاسبه شاخص کیفیت ۹۹ درصدی ایفا می‌کنند؛ در حالی که سایر الگوریتم‌ها عملکرد مناسبی ندارند.
- در بهینه‌سازی مرکب، که الگوریتم GA و HHO در تکرارهای اول به سرعت به مقدار بهینه همگرا شده؛ در حالی که سرعت همگرایی الگوریتم‌های دیگر کمتر می‌باشد.
- مدل بکار رفته می‌تواند، در بهینه‌سازی سایر پروژه‌های عمرانی و مخصوصاً پروژه‌های مشابه آبی نیز مورد استفاده قرار گیرد. همچنین با

- Revista de la construction 18(3): 554-567.
- [15] Hesham A. Abdelkhalik, Hesham S. Refaie, Remon F. Aziz. "Optimization of time and cost through learning curve analysis". Ain Shams Engineering Journal, 26 December 2019.
- [16] Pornima M. Kashid & Manisha Jamgade. "Time and Cost Optimization of Construction Projects: A Review". International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, 8(4), April, 2019.
- [17] Holland, J. H. (1992). "Genetic algorithms." Scientific American 267(1): 66-73.
- [18] Glover, F. and M. Laguna (1998). Tabu search. Handbook of combinatorial optimization, Springer: 2093-2229.
- Van Laarhoven, P. J., & Arts, E. H. Simulated annealing. In simulated annealing: Theory and applications (pp. 7-15). (1987), Springer, Dordrecht.
- [19] Arora, S., & Singh, S. (2019). Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization. Soft Computing, (2019) 23(3), 715-734.
- [20] Kaveh, A. and A. Zolghadr (2017). "Cyclical parthenogenesis algorithm: A new meta-heuristic algorithm."
- [22] Heidari, A. A., et al. (2019). "Harris hawks optimization: Algorithm and applications." Future Generation Computer Systems 97: 849-872.
- using high performance computing." Automation in Construction 87: 158-172.
- [8] Mehrdad Far dad "Thesis on the Role of Knowledge Management in Reducing the Time of Construction Projects by Case Study of Kayson Company Projects" Islamic Azad University, Noor Branch, Winter 2016.
- [9] Roslon, J. and J. Zawistowski (2016). "Construction projects' indicators improvement using selected metaheuristic algorithms." Procedia Engineering 153: 595-598.
- [10] Mathew, J., et al. (2016). "Multi objective optimization for scheduling repetitive projects using GA." Procedia Technology 25: 1072-1079.
- [11] Amer M. Fahmy "Optimization Algorithms in Project Scheduling" Intec Open Limited, Chapter 8, September 21st 2016.
- [12] Sina Fard Moradi nia, Ali Reza Khademy, "Resource-Constrained Project Scheduling Optimization by Genetic Algorithm", ASAS Scientific Research Quarterly, Volume 20 (2018) 58-73.
- [13] Si, B., et al. (2019). "Performance assessment of algorithms for building energy optimization problems with different properties." Sustainability 11(1): 18.
- [14] Acar Yildirim, H. and C. Akcay (2019). "Time-cost optimization model proposal for construction projects with genetic algorithm and fuzzy logic approach."

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Espoutin, S. Fard Moradinia, Optimization of Quantitative and Qualitative Indicators of Construction Projects with a Project Management Knowledge Approach (Case study: Qucham Reservoir Dam), Amirkabir J. Civil Eng., 53(11) (2022) 5033-5052.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18694.6929

