نشریه علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۷، شماره ویژه ۱، سال ۱۳۹۹، صفحه ۵۳ تا ۷۳

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

بهینه‌سازی کیفیت پروژه‌های عمرانی از طریق تئوری پایایی سیستم‌ها با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه‌گان کمینه بیشینه بهبودیافته

سعید نجفی زنگنه[۱]، ناصر شمس قارنه[۲*]، پرنیان عزیزی[۳]، عبدالحمید اشراق نیا جهرمی[۴]

۱-کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
۲-دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۱-کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

موضوع ساخت‌وساز از مهمترین مسائل تاثیرگذار بر یک جامعه از دیدگاه اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و ... است. اما در این میان، موضوع کیفیت در ساخت پروژه های عمرانی نیاز به بحث و بررسی علمی بیشتری دارد. پژوهش حاضر به بررسی بهینه‌سازی دوهدفه کیفیت پروژه های عمرانی و هزینه‌های ساخت براساس تئوری پایایی سیستم ها می‌پردازد. همچنین یک مثال واقعی برای ارزیابی کارایی مدل بهینه‌سازی پایایی سیستم پیشنهادی استفاده شده است.

به‌منظور دستیابی به این هدف الگوریتم چهارمرحله‌ای تعریف شده و مدل پیشنهادی با استفاده از دو روش AS۲M و الگوریتم کلونی مورچگان کلاسیک حل و نتایج دو روش با یکدیگر مقایسه گردید. پروژه ساخت‌و ساز مجموعه مسکونی ۵ طبقه پرزین-۲ واقع در زعفرانیه تهران مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که روش AS۲M با استفاده از جستجوی محلی که انجام می‌دهد از قابلیت های بیشتری جهت عملیات بهینه سازی نسبت به الگوریتم کلونی مورچگان کلاسیک برخوردار است.

در این مطالعه، مدل بهینه سازی چند هدفه مبتنی بر نظریه قابلیت اطمینان به تصمیم گیرندگان برای تعیین و انتخاب هزینه و کیفیت پروژه های ساختمانی گسترش می یابد. با توجه به اینکه این پروژه ها مهمترین مولفه توسعه کشور هستند، باید با توجه به هزینه و کیفیت به درستی مدیریت شوند.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، تئوری پایایی سیستم‌ها، M3AS، الگوریتم کلونی مورچگان.

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/JSCE.2018.126873.1536
۱۳۹۷/۰۲/۰۱	۱۳۹۷/۰۶/۰۴	۱۳۹۷/۰۹/۰۷	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	doi: 10.22065/JSCE.2018.126873.1536

*نویسنده مسئول: ناصر شمس قارنه

پست الکترونیکی: nshams@aut.ac.ir

Optimizing the quality of construction projects based on system reliability theory using improved Min-Max ant colony algorithm

Saeed Najafi Zangeneh [1] ,Naser Shams Gharneh[*2] ,Parnian Azizi [1] ,Abdolhamid Eshragh [3]

1 MSc of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
2 Associate Professor, Faculty of Industrial Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran
3 Associate Professor, Faculty of Industrial Engineering , Sharif University of Technology Tehran, Iran

ABSTRACT

Construction is one of the most important issues in a society economically, socially, culturally and so on. But the issue of quality in the construction projects requires discussion takes more scientific. The objective of this study is to investigate the optimization of the quality of construction projects and construction costs based on system reliability theory. Also, a real construction project is presented to evaluate the efficiency of the proposed model. In order to achieve this goal, a four-step algorithm is defined and proposed model using two methods M3AS and classic ant colony algorithm is solved. The results of both methods are compared. Parzin five-story residential building located on Zaferanieh Street is studied. The results indicated that M3AS innovative approach through local search is more capable than the classical ant colony algorithm for optimization. Most previous studies have not considered the importance of the quality of project. In this study, quality in the form of reliability at the time of completion of the work is quantified. The proposed model has been so overcome lack of expression and effectively using reliability theory. This model can automatically produce reliability and optimal cost of system with regard to structure function of reliability and non-linear function of cost-reliability. In this study, multi-objective optimization model based on reliability theory extends to decision-makers to determine and choose between cost and quality for construction projects. Since a major part of the annual budget allocated to construction projects, these projects are the most important component of the country's development that must be managed properly in terms of cost and quality and be completed according to the schedule. iT is clear that the status of the construction industry in terms of quality and cost should be much improved.

ARTICLE INFO

Receive Date: 21 April 2018
Revise Date: 26 August 2018
Accept Date: 28 November 2018

Keywords:
Optimization, System reliability theory, M3AS, Construction ,Ant colony algorithm

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.126873.1536

*Corresponding author: Naser Shams Gharneh
Email address: nshams@aut.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از مشخصه‌های توسعه اقتصادی هر کشور طرح¬های عمرانی آن است که به عنوان معیار و شاخصی عمده در رونق اقتصادی آن کشور مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین پیشرفت، رفاه و تعالی یک ملت تا حد زیادی بستگی به موفقیت طرح های عمرانی کشورش دارد و توفیق در اجرای طرح های عمرانی، ساز و کارها و عواملی را می¬طلبد تا چرخه امور به نحو مطلوب با کمترین هزینه و بالاترین کیفیت و به موقع سامان یابد. در میان اینها، رسیدن به تولید با کیفیت مهمترین چالش است[۱].

آمار¬ها نشان¬دهنده آن است که صنعت ساختمان با مشکلات کیفیتیِ زیادی مواجه است. علاوه براین در شرایط فعلی ثابت بودن بودجه¬ها و انتظارات بالای مشتریان¬، مشارکت‌کنندگان در صنعت ساخت و ساز، برای کنترل کردن هزینه¬ها تحت فشار بیشتری نسبت به گذشته هستند. بدین ترتیب برای دستیابی به صرفه جوئی در هزینه¬ها، افزایش کیفیت تولیدات و رسیدن به سود بیشتر¬، اقدامات مناسبی باید انجام شود تا درحالیکه سطح کیفیت پروژه افزایش می¬یابد، هزینه نهایی ساخت کاهش یابد. چنین اقداماتی به بهینه¬سازی پایایی سیستم ارجاع می¬دهد که برای دستیابی به بهترین تولید نهایی با استفاده از حداقل¬سازی هزینه و حداکثر¬سازی کیفیت یا همان پایایی سیستم به طور همزمان، مناسب است. پایایی، در این مطالعه، به عملکرد کیفی سیستم در طول حیاتش اشاره دارد؛ یعنی توانایی جزء یا سیستم برای انجام عملکردهای مورد نیازش تحت شرایط وضع شده در یک دوره زمانی مشخص. علاوه بر این مفاهیم کیفیت و پایایی به هم نزدیک هستند[۲]. بر طبق مطالعات رزاند و هویلند، کیفیت به انطباق محصول با خصوصیاتش همانطور که تولید شده است، اشاره دارد. درحالیکه پایایی برابر است با توانایی محصول به ادامه و برآوردن خصوصیاتش در طول عمر مفید آن. به عنوان نتیجه، پایایی را می توان بسط و گسترش کیفیت در یک دامنه زمانی دانست[۳] که برای محاسبه کیفیت پروژه ساختمانی در این مطالعه به کار گرفته می شود.

قابلیت اطمینان که در این مطالعه برای بیان کیفیت پروژه ساخت و ساز استفاده می‌شود یک شاخص اساسی برای بیان عملکرد سیستم-های شبکه پیچیده است. قابلیت اطمینان کیفیت نشان¬دهنده درجه کیفیت پروژه ساخت¬و¬ساز است. مسئله بهینه سازی قابلیت اطمینان - هزینه متعلق به حوزه بهینه¬سازی قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد، بنابراین ما می‌توانیم از روش های بهینه سازی قابلیت اطمینان سیستم برای حل آن استفاده کنیم[۴].

پروژه¬های عمرانی با توجه به اینکه قسمت اعظمی از بودجه‌های سالیانه¬ی کشور را بخود اختصاص می¬دهند، شاید بتوان گفت جزء مهمترین قسمت¬های برنامه¬های توسعه کشورها می¬باشند که می¬بایست با مدیریت صحیح هزینه و با کیفیت مطلوب و طبق برنامه زمانبندی به اتمام برسند. با توجه به اینکه بتدریج رقم اختصاص یافته به پروژه‌های عمرانی نسبت به سنوات قبل کمتر شده، بنابراین با افزایش کیفیت می‌توان عمر پروژه‌ها را افزایش داد و این کمبود هزینه را جبران کرد. در تحلیلی واقع بینانه از وضعیت پروژه‌های ساختمانی در کشور که در چارچوب این پروژه انجام شده، روشن می¬گردد که وضعیت صنعت ساخت و ساز از منظر کیفیت و هزینه جای تامل و تفکر فراوان دارد.

تا به حال، بیشتر مسائل موازنه در مدیریت ساخت و ساز بر موازنه زمان - کیفیت - هزینه و مسئله موازنه زمان - کیفیت متمرکز شده بود و مطالعات اندکی به موازنه کیفیت - هزینه به عنوان مسئله بهینه‌سازی چند هدفه پرداخته‌اند. برای مدیران پروژه ضروری است کیفیت ساخت و ساز را ارتقاء بخشند و کورکورانه کیفیت ساخت و ساز را با صرفه جویی در هزینه قربانی نکنند[۵].

اگرچه نظریه پایایی سیستم توانایی بالایی در محاسبه میزان کیفیت دارد، بندرت می توان کاربرد¬های آن را در صنعت ساختمان دید. بنابر این در این مطالعه برای کمی سازی و محاسبه کیفیت.

۲- مروری بر ادبیات و پیشینه تحقیق

سه مورد از اهداف اصلی مدیریت پروژه‌های ساخت و ساز تضمین این است که یک پروژه ساخت و ساز به موقع انجام شود، با بودجه معلوم کامل شود و مجموعه استانداردهای کیفیت را تامین کند[۶]. به عبارت دیگر فاکتورهای کلیدی موفقیت (KSF) برای مدیریت پروژه ساخت و ساز زمان، هزینه و کیفیت است [۷]. در نتیجه مرور ادبیات فرایندهای مدیریت پروژه ساخت و ساز به طور عمده روی مدیریت و بهینه سازی این سه فاکتور تمرکز دارد:

مرحله اول بهینه سازی تک هدفه با کمینه کردن هزینه یا بیشینه کردن استفاده از منابع یا کمینه کردن مدت انجام پروژه به عنوان تنها هدف بهینه سازی می‌باشد. مطالعات ایسا[۸]، حجازی[۹]، گومار و همکاران[۱۰] از این دست می باشد.

کلی[۱۱] و گویال[۱۲] توابع خطی بین هزینه پروژه و زمان اتمام را مورد بررسی قراردادند. سپس بعد از دهه ۱۹۷۰ تحقیقات به سمت روابط غیر خطی تغییر مسیر داد[۱۳].

در مرحله دوم، تمرکز تحقیقات به سمت مسائل بهینه سازی چند هدفه تغییر پیدا کرد. هدف بیشتر مطالعات در این مرحله پیدا کردن راه حل بهینه برای کمینه کردن طول مدت انجام پروژه در عین کمینه کردن هزینه های ساخت و ساز بود. برن و همکاران [۱۴]، فنگ و همکاران [۱۵]، لی و لاو[۱۶]، لی و همکاران[۱۷]، فنگ و همکاران [۱۸]، ژنگ[۱۹] و ژنگ و همکاران[۲۰] همگی در مطالعاتشان به موازنه زمان- هزینه پرداخته‌اند.

مرحله سوم، مدیریت پروژه ساخت و ساز با تمرکز بر موازنه زمان – هزینه - کیفیت (TCQT) پدیدار شده است. بر طبق مطالعات بابو و سورش[۷] مسائل TCQT به یکی از مهمترین موضوعات مدیریت پروژه ساخت و ساز تبدیل شده¬اند و روند تحقیقات را به سمت مرحله سوم هدایت کرده اند. خنگ و مینت [۲۱] نیز مدل های بابو و سورش را برای حل برخی مسائل عملی و به کار بردن آنها در یک پروژه ساخت و ساز واقعی، توسعه داده اند. ال رایس و خندیل [۲۲] به موازنه زمان- هزینه-کیفیت در ساخت و ساز بزرگراه پرداختند. نبی پور افروزی و همکاران[۲۳]، توانا و همکاران[۲۴]، منقسمی و همکاران[۲۵] و دوک هوک ترن و همکاران[۲۶] در سال های اخیر مطالعاتی در زمینه موازنه زمان- هزینه-کیفیت انجام داده اند.

مساله موازنه بین ارکان مختلف پروژه به اشکال مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است؛ به عنوان مثال موازنه "زمان - هزینه"؛ "کیفیت - هزینه"؛ "زمان - هزینه - کیفیت" و غیره. روش های حل متعددی نیز برای این مسایل ارائه شده است. حجازی[۹] روش های حل ارائه شده را در قالب سه گروه ۱) ابتکاری، ۲) برنامه ریزی ریاضی و ۳) الگوریتم ژنتیک دسته بندی کرده است. البته بر طبق تحقیقات جدیدتر، الگوریتم ارائه شده برای حل مسائل بهینه‌سازی برنامه ریزی ساخت و ساز به سه روش طبقه بندی می شود:

ریاضیاتی: روش مسیر بحرانی ۱۹۵۰ (کلی و واکر)، برنامه ریزی عدد صحیح ، برنامه ریزی خطی و الگوریتم های IP / LP بیسلی [۲۷]، کارلف [۲۸] و جانگر و همکاران [۲۹] مطالعات گستردهتری در این زمینه انجام دادند.

هیوریستیک: روش فوندهل [۳۰] ، روش ساختاری محاسبه هزینه پروژه توسط پراگر[۳۱]، مدل شیب هزینه مؤثر[۳۲] و روش سختی مصلحی[۳۳] از جمله روش های ابتکاری ارائه شده هستند.

متاهیوریستیک: چن و همکاران، فنگ و همکاران [۳۴]، لئو و یانگ[۳۵]، لی و لاو [۱۶]، حجازی[۹]، هوشیار و همکارانش [۳۶]، ژِنگ و مائو [۳۷] از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده اند.

بهینه سازی انبوه ذرات: الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات بوسیله کندی و ابرهارت [۳۸] ، ژَنگ و لی [۳۹] ، لیو و همکارانش[۴۰] استفاده شده است.

بهینه سازی کلونی مورچگان : یاپینگ و همکاران[۴۱] از الگوریتم کلونی مورچگان چندهدفه برای حل مساله موازنه زمان- هزینه استفاده نموده اند. نینگ و ژنگ [۴۲] از الگوریتم کلونی مورچگان چندهدفه به منظور حل مساله موازنه کیفیت - هزینه پیوسته استفاده نموده¬اند. نینگ و ژنگ[۴۲] برای بهینه سازی هم زمان زمان و هزینه پروژه یک رویکرد چندهدفه بر پایه کلونی مورچگان را پیاد ه سازی کرده اند. هوئی مین و ژوفو [۴۳] برای حل مساله موازنه هزینه - زمان به صورت گسسته، از الگوریتم کلونی مورچگان خودتنظیم استفاده نموده اند. افشار و همکارانش [۴۴] یک الگوریتم فرا ابتکاری جدید برای حل مساله بهینه سازی (MOACO) چند گانه زمان - هزینه- کیفیت بر پایه الگوریتم کلونی مورچگان چند گانه ارائه داده اند.

در این مقاله، پس از بررسی ادبیات موضوع و با توجه به اینکه مسئله هزینه - کیفیت با استفاده از الگوریتم ژنتیک، انبوه ذرات و الگوریتم کلونی مورچگان حل شده است، در ادامه حل مسئله هزینه - پایایی با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان کمینه - بیشینه بهبود یافته ارائه خواهد شد.

۳- مدل‌سازی

۳-۱- فرضیات:

۱- تمام پروژه ساختمانی به عنوان سیستمی متشکل از اجزای مختلف در نظر گرفته شود،

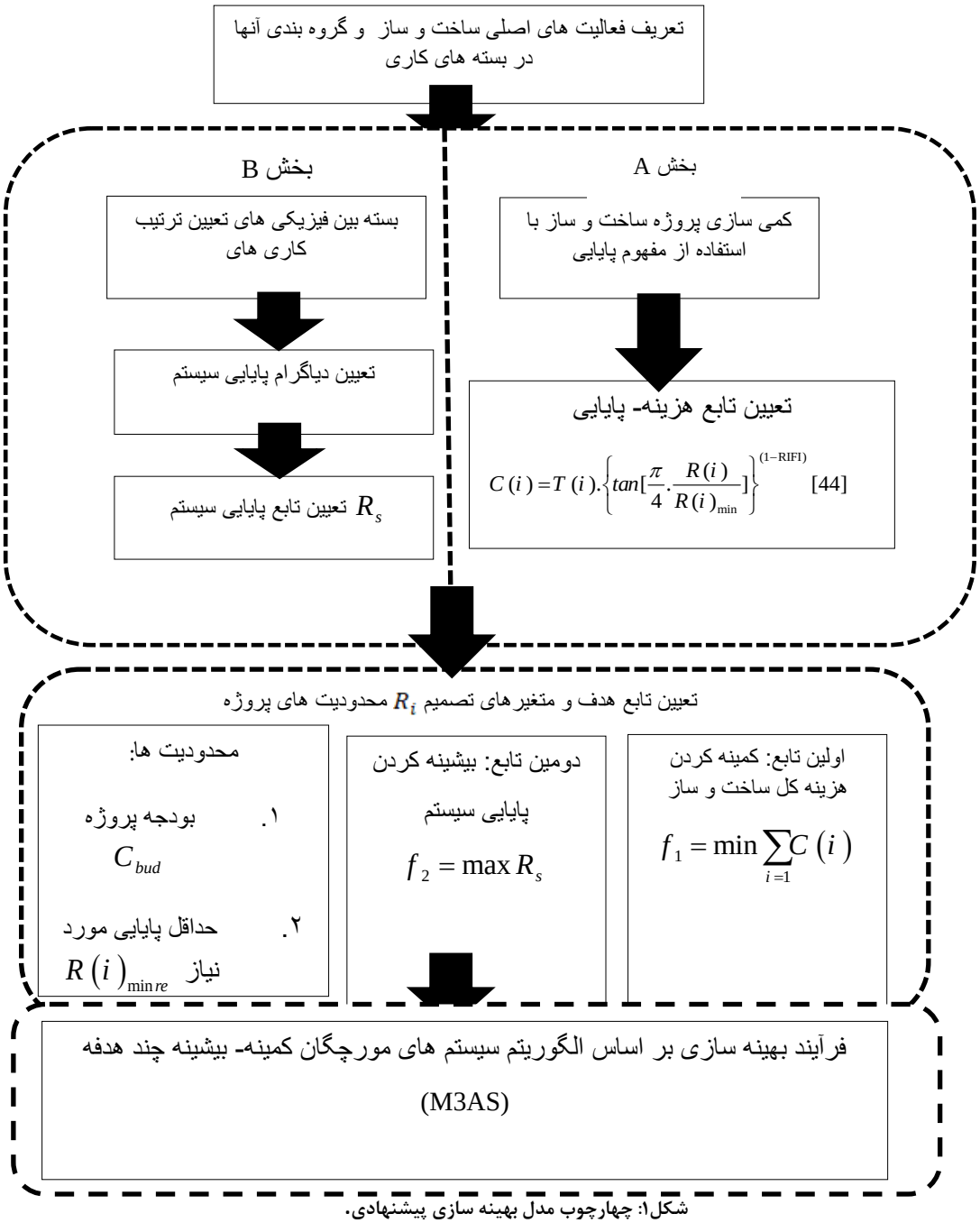
۲- فعالیّت های مربوط به پکیج های مختلف از هم مستقل اند،

۳- زمان اتمام پروژه بوسیله هزینه و کیفیت پروژه تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد،

۴- وقتی t=0: بدین معنی است که زمان اتمام پروژه فرارسیده است.

۲-۳- پارامترها:

ردیف	پارامتر	عنوان پارامتر
۱	i	تعداد بسته های کاری
۲	$C(i)$	هزینه واقعی پکیج کاری i ام
۳	$T(i)$	هزینه پایه پکیج کاری i ام
۴	$R(i)$	سطح کیفیت پکیج کاری i ام
۵	$R(i)_{min}$	حداقل پایایی مورد نیاز برای پکیج کاری i ام
۶	RIFI	پارامتر انعطاف پذیری بهبودپایایی
۷	R_s	سطح پایایی کلّ سیستم
۸	C_{bud}	سقف بودجه
۹	TTC	مجموع هزینه های تمام پکیج های کاری



شکل۱: چهارچوب مدل بهینه سازی پیشنهادی.

۴- حل مدل

بسیاری از مسائل در عمل شامل چندین هدف هستند که هریک باید بیشینه یا کمینه گردند. به حل کردن این دسته از مسائل، بهینه‌سازی چند هدفی (MOO) گفته می‌شود.

۴-۱- روش کلونی مورچگان

کلونی مورچگان، یک روش جستجوی سازنده است که از رفتار مورچه‌ها الهام گرفته شده و برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی دشوار مورد استفاده قرار می‌گیرد. مورچه‌ها در حین راه رفتن، ماده‌ای به نام فرومون را روی مسیر خود ترشح می‌کنند تا به این ترتیب با علامت‌گذاری مسیر، اعضای دیگر کلونی نیز در صورت کوتاه‌تر بودن آن مسیر به سمت آن متمایل شوند. مسیرهای کوتاه‌تر بیشتر مورد رفت‌وآمد مورچه‌ها قرارگرفته و تراکم بیشتری از فرومون را خواهد داشت، بنابراین با احتمال بیشتری نسبت به مسیرهای طولانی تر توسط مورچه های دیگر دنبال خواهد شد.

این مورچه‌ها پاسخ‌های تولید شده را به طور احتمالی و با در نظر داشتن دو دسته دانش خود ایجاد می‌کنند: یک رد از فرومون ها (ماتریس τ) که به‌عنوان یک حافظه برای فرایند جستجو تلقی می‌شود و به‌طور متناوب توسط مورچه‌ها بروز رسانی می‌شود، و یک مجموعه اطلاعات ابتکاری (ماتریس η) که به‌عنوان اطلاعات قبلی برای حل مسئله فعلی تلقی می‌شوند. اطلاعات ابتکاری در اغلب مسائل برابر با هزینه افزودن یک جز جدید (متناسب با یال درون گراف) به پاسخ در حال تولید است. حرکت مورچه‌ها در هنگام انتخاب گره بعدی توسط این دو دسته از دانش مشخص‌شده و به سمت یک پاسخ مناسب هدایت می‌شود. هنگامی‌که تمامی مورچه‌ها پاسخ خود را تولید نمودند، رد فرومون ها متناسب با کیفیت پاسخ‌های تولیدشده بروزرسانی می‌شود: فرومون مربوط به پاسخ‌های بهتر تقویت شده (بازخورد مثبت) و فرومون تمامی مسیرها در معرض مقدار ثابتی از تبخیر شدن قرار می‌گیرد.

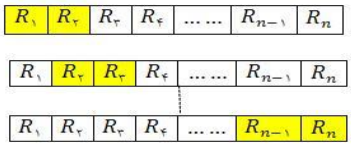
الگوریتم MMAS به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های کلونی مورچگان ارائه شده مطرح می‌شود. الگوریتم پایه کلونی مورچگان [۴۵] از دو بخش تشکیل‌شده است. تولید جواب و بروز رسانی فرومون‌ها در روش MMAS، [۴۶] برای جستجوی گسترده‌تر فضای حالت، تنها به بهترین پاسخ‌های تولید شده اجازه داده می‌شود تا رد فرومون ها را در فرآیند به روزرسانی تغییر دهند. همچنین برای پیشگیری از همگرایی زودهنگام پاسخ‌ها، مقادیر حدی برای مقدار فرومون ها در نظر گرفته می‌شود.

این الگویتم در برخی مواقع همه مقادیر فرومون‌ها را مقداردهی مجدد می‌کند تا جستجوی فضای حالت به‌طور گسترده‌تر صورت بپذیرد و از همگرایی پاسخ‌ها جلوگیری شود.

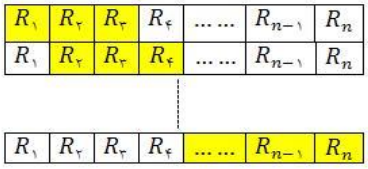
مدل چند هدفی این روش که M3AS نام دارد [۴۶] از یک ماتریس فرومون و به تعداد هدف‌های مسئله از ماتریس اطلاعات ابتکاری استفاده می‌کند.

۴-۲- جستجوی محلی

برای بهبود پاسخ‌های تولیدشده توسط مورچه‌ها در هر تکرار، یک روش جستجوی محلی مناسب برای این مسئله طراحی‌شده و مورد استفاده قرارگرفته است. پس از تولید پاسخ توسط همه مورچه‌ها، اگر بهبودی در بهترین پاسخ تولیدشده تاکنون ایجاد شده باشد، روش جستجوی محلی طراحی‌شده سعی می‌کند تا جواب‌های بهتری را که در همسایگی آن پاسخ وجود دارند پیداکرده و به‌عنوان بهترین پاسخ تولید شده تاکنون به الگوریتم ارائه دهد. روش جستجوی محلی پیشنهادی از دو مرحله تشکیل‌شده است. در مرحله اول، تمامی ترکیب‌های دوتایی مطابق شکل ۲ از اجزای مسئله انتخاب شده و با تغییر دادن مقدار پایایی آن‌ها، سعی می‌شود تا پاسخ با هزینه ترکیبی کمتر نسبت به بهترین پاسخ فعلی تولید گردد. پاسخ تولیدشده به مرحله دوم جستجوی محلی ارائه می‌شود. در مرحله دوم تمام ترکیب‌های سه‌تایی از اجزای مسئله مانند مرحله دوم بررسی می‌شوند و هر بار تمامی مقادیر پایایی ممکنی که هر مولفه می تواند بگیرد را مطابق شکل ۳ به ترکیب های سه‌تایی اختصاص می دهیم.



شکل۲ : مرحله اول جستجوی محلی.



شکل۳ : مرحله دوم جستجوی محلی.

۵- مطالعه موردی - مجموعه مسکونی پرزین

پروژه ساختمان مسکونی ۵ طبقه پرزین-۲ واقع در خیابان زعفرانیه

در این مطالعه، یکی از پروژه های فرعی مهم، کارهای ساخت و اتمام استخر مجموعه مسکونی پرزین ۲ به عنوان مورد مطالعه انتخاب شده است.

مرحله۱ مدل بهینه سازی سیستم پایایی پیشنهادی، فعالیت های اصلی این پروژه فرعی شناسایی شده اند و به ۱۱ بسته کاری گروه بندی می شوند. هزینه پایه متناظر هر بسته کاری در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول۱ : هزینه پایه هر بسته کاری.

شماره بسته کاری	عنوان بسته کاری	هزینه اولیه (Ti) (ریال)
۱	سقف کاذب استخر	۷۵,۷۵۰,۰۰۰
۲	سیمانکاری استخر	۲۰,۰۰۰,۰۰۰
۳	تکمیل سفتکاری استخر	۱۲,۰۰۰,۰۰۰
۴	آب بندی محوطه و بدنه استخر شامل ایزوگام ، مواد آب بندی و...	۳۶,۰۰۰,۰۰۰
۵	تکمیل و نصب تاسیسات استخر	۵۶۰,۰۰۰,۰۰۰
۶	کاشی کاری استخر	۱۳۰,۰۰۰,۰۰۰
۷	نصب تجهیزات برقی و مکانیکی استخر	۱,۰۲۰,۵۰۰,۰۰۰
۸	نور پردازی استخر	۲۲۰,۰۰۰,۰۰۰
۹	اجرای سونای خشک	۲۵۰,۰۰۰,۰۰۰
۱۰	شیرآلات بهداشتی استخر	۸۰,۰۰۰,۰۰۰
۱۱	لاکرها و تزیینات داخلی استخر	۶۵,۰۰۰,۰۰۰

در مرحله۲، ترتیبات فیزیکی بین بسته های کاری تعریف میشود ، یعنی رابطه سری بین ساختن سقف کاذب استخر، سیمانکاری استخر، تکمیل سفتکاری استخر، آب بندی محوطه و بدنه استخر، تکمیل و نصب تاسیسات استخر و کاشی کاری استخر رابطه موازی بین نور پردازی استخر، نصب تجهیزات برقی و مکانیکی استخر، اجرای سونای خشک و غیره. بر اساس این ترتیبات فیزیکی، دیاگرام قابلیت اطمینان سیستم تعیین می شود و تابع پایایی سیستم R در معادله زیر تعریف شده است:

$$R_s(t) = R_1(t).R_2(t).R_3(t).R_4(t).R_5(t). \\ R_6(t).\{1-(1-R_7(t))(1-R_8(t))(1-R_9(t))\}. \\ R_{10}(t).R_{11}(t) \quad (1)$$

مدل ریاضیاتی به صورت زیر خلاصه می شود:

$$\begin{cases} Maximize\, f_1 = Max\, R(s) = Max\, R_s(t) = R(1).\{1-(1-R(2))(1-R(3))\}.R(4) \\ .\{1-(1-R(5))(1-R(6))\}.R(7) \\ Minimize\, f_1 = MinTTC = Min\sum_{i=1}^{7} T(i).\left\{tan\left[\frac{\pi}{4}.\frac{R(i)}{R(i)_{min}}\right]\right\}^{(1-RIFI)} \\ subject\ to: \\ \sum_{i=1}^{7} T(i).\left\{tan\left[\frac{\pi}{4}.\frac{R(i)}{R(i)_{min}}\right]\right\}^{(1-RIFI)} \le 600,000 \\ 0.5 \le R(i) \le 1 for\ i = 1,\ldots,7 \end{cases}$$

در گام چهارم متغیر های تصمیم R(i) (i=1,2,…,11)از طریق الگوریتم M3AS بهینه می شوند. نتایج در جدول ۲ خلاصه شده است. نتایج حاکی از این است که پایایی سیستم این پروژه به ازای RIFI =۰.۷ برابر با ۰.۶۸ ٪ است و هزینه کل سیستم ۳۴۹۹۹۶۰۱۴۳.۷ ریال می باشد که از بودجه تعیین شده کمتر است.

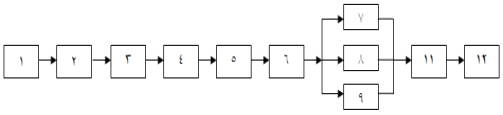
جدول۲ : نتایج بهینه وقتی RIFI=۰.۷.

شماره	بسته کاری	*RIFI*=۰.۷	
		سطح پایایی هر بسته کاری *R(i)*	هزینه هر بسته کاری *C(i)*
۱	سقف کاذب استخر	۰.۹۷	۱۸۹۳۷۱۱۴۵.۲
۲	سیمانکاری استخر	۰.۹۹	۶۹۵۳۱۷۷۵
۳	تکمیل سفتکاری استخر	۰.۹۹	۴۱۷۱۹۰۶۵
٤	آب بندی محوطه و بدنه استخر شامل ایزوگام ، مواد آب بندی و...	۰.۹۸	۱۰۱۶۵۱۷۰۴.۶
٥	تکمیل و نصب تاسیسات استخر	۰.۸۶	۸۷۷۸۷۳۷۷.۸
٦	کاشی کاری استخر	۰.۹۵	۲۷۸۷۰۷۱۴۷.۹
۷	نصب تجهیزات برقی و مکانیکی استخر	۰.۵	۱۰۲۰۵۰۰۰۰۰
۸	نور پردازی استخر	۰.۷۹	۳۰۳۴۳۹۰۶۱.۶
۹	اجرای سونای خشک	۰.۵۲	۲۵۴۷۶۰۲۴۵.۳
۱۰	شیرآلات بهداشتی استخر	۰.۹۷	۱۹۹۹۹۵۹۲۸.۹
۱۱	لاکرها و تزیینات داخلی استخر	۰.۹۷	۱۶۲۴۹۶۶۹۲.۳
هزینه کل سیستم C(s) (مقدار تابع هدف اول)			**۳٤۹۹۹٦۰۱٤۳.٦۸۷۸۷۳**
پایایی کل سیستم R(s) (مقدار تابع هدف دوم)			**۰.٦۸**

با استفاده از روش مرکز ثقل فازی و با فرض اینکه حداقل کیفیت مورد نیاز برای هر بسته کاری باید "متوسط" باشد داریم:

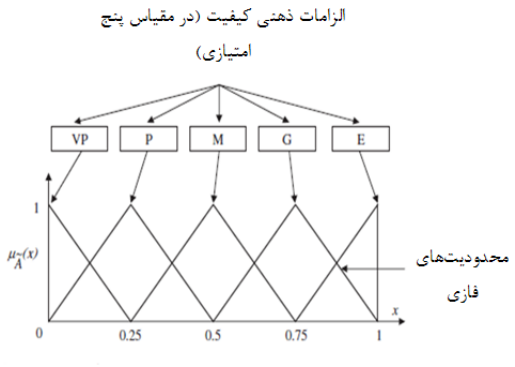
$$R(i)_{min} = 0/5$$
$$R(i)_{min} = \frac{0/25+0/5+0/75}{3} = 0/5 \qquad (۳)$$

دیاگرام پایایی سیستم در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل۴ : دیاگرام پایایی سیستم.

تابع عضویت نیازمندی های کیفیت در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل۵ : تابع عضویت نیازمندی های کیفیت. [۳۴]

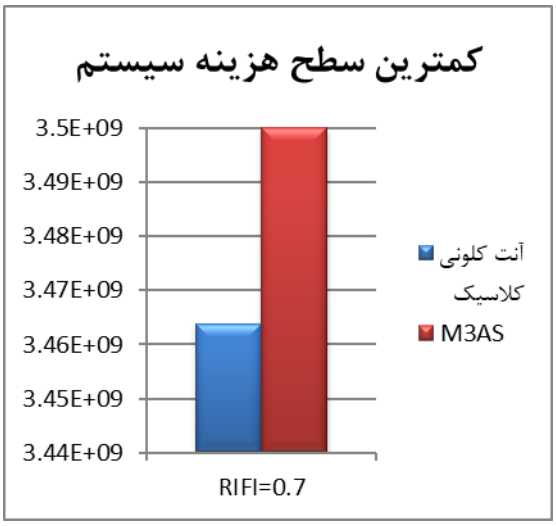
در این مطالعه، سطح انعطاف پذیری پروژه "خیلی خوب" درنظر گرفته شده است، بنابراین با توجه به جدول ۲، ۰.۷= RIFI می‌باشد. به منظور نشان دادن کارایی الگوریتم M3AS پیشنهادی، مقایسه ای بین نتایج حاصل از حل به روش های الگوریتم آنت کلونی پارتو محور یا همان انت کلونی کلاسیک صورت گرفت. جواب های حاصل از حل به روش کلاسیک در جدول ۳ خلاصه شده است.

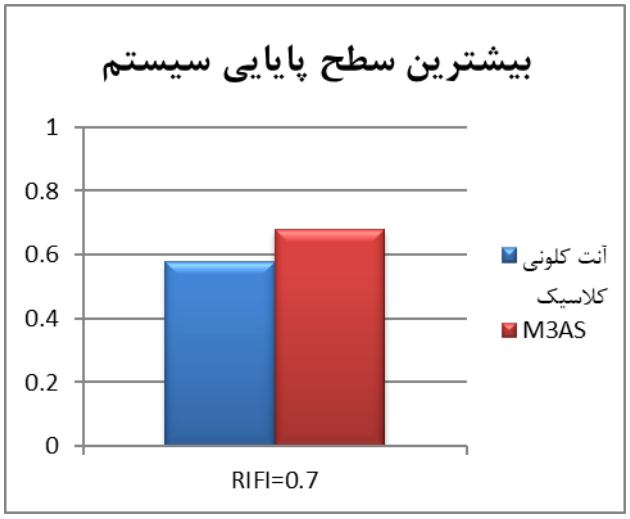
جدول۳ : جواب های بهینه حاصل از حل کلاسیک با RIFI=۰.۷.

شماره	بسته کاری	RIFI=۰.۷	
		سطح پایایی هر بسته کاری $R(i)$	هزینه هر بسته کاری $C(i)$
۱	سقف کاذب استخر	۰.۹۵	۱۶۲۴۰۰۵۱۱.۲
۲	سیمانکاری استخر	۰.۸۹	۳۳۷۶۵۲۹۱.۸۴
۳	تکمیل سفتکاری استخر	۰.۹۷	۲۹۹۹۹۳۸۹.۳۴
۴	آب بندی محوطه و بدنه استخر شامل ایزوگام ، مواد آب بندی و...	۰.۹۹	۱۲۵۱۵۷۱۹۵
۵	تکمیل و نصب تاسیسات استخر	۰.۸۹	۹۴۵۴۲۸۱۷۱.۴
۶	کاشی کاری استخر	۰.۹۵	۲۷۸۷۰۷۱۴۷.۹
۷	نصب تجهیزات برقی و مکانیکی استخر	۰.۵۳	۱۰۴۹۸۰۹۷۸۳
۸	نور پردازی استخر	۰.۵۷	۲۳۵۱۳۰۱۶۸.۸
۹	اجرای سونای خشک	۰.۶۲	۲۸۰۷۱۴۰۳۸.۴
۱۰	شیرآلات بهداشتی استخر	۰.۹۶	۱۸۳۴۲۷۴۸۶.۸
۱۱	لاکرها و تزیینات داخلی استخر	۰.۹۵	۱۳۹۳۵۳۵۷۳.۹
هزینه کل سیستم C(s) (مقدار تابع هدف اول) **۳۴۶۳۸۹۲۷۵۷.۶۷۹۱۷۷**			
پایایی کل سیستم R(s) (مقدار تابع هدف دوم) **۰.۵۷۷۹۹۷۱۹۰۸۸۲۸۴**			

نتایج حاکی از این است که پایایی سیستم این پروژه به ازای RIFI =۰.۷ برابر با ۰.۵۷ ٪ است و هزینه کل سیستم ۳۴۶۳۸۹۲۷۵۷.۷ ریال می‌باشد که از بودجه تعیین شده کمتر است.

با بررسی به عمل آمده و با توجه به شکل ۶ مشخص شد که درمیان این دو روش، M3AS از قابلیت های بیشتری جهت عملیات بهینه سازی، برخوردار است.





۶- صحت سنجی الگوریتم

در این مقاله به منظور اعتبارسنجی مدل و الگوریتم ارائه شده به طراحی مساله در ابعاد قابل حل با استفاده از روش های دقیق در نرم افزار لینگو شده است. با این روش ابتدا مساله های کوچک حل و نتایج حاصل با جواب های مورد انتظار مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در صورتیکه هماهنگی و دقت لازم مشاهده گردید مساله های با ابعاد بزرگتر اجرا و دقت الگوریتم های پیشنهادی تجزیه و تحلیل می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از روش شاخه و کران در نرم افزار لینگو مدل به درستی اهداف و محدودیت های مساله را دنبال می نماید. از طرف دیگر مدل برای ۲۵ مساله (این تعداد مساله نمونه جهت استفاده از قضیه نرمال بودن نمونه جهت بسط خواص نمونه به کل جامعه در نظر گرفته شده است) در ابعاد متنوع با استفاده از روش دقیق و پیشنهادی حل گردید و نتایج جدول زیر نشان دهنده زمان حل مساله‌ها در ابعاد مختلف می باشد. با توجه به خروجی‌های ثبت شده الگوریتم پیشنهادی در جدول زیر این تحقیق از دقت بیش ۹۷ درصد برخوردار است.

جدول۴: نتایج مربوط به تابع برازندگی و زمان اجرا الگوریتم پیشنهادی و روش دقیق

الگوریتم	روش پیشنهادی		Lingo	
مسئله	زمان (S)	تابع برازندگی	زمان (S)	تابع برازندگی
1	28	1287	35	1285
2	57	1356	39	1328
3	78	1471	81	1457
4	78	1725	56	1692
5	57	2224	54	2200
6	135	2274	124	2251
7	166	2489	156	2470
8	213	2718	199	2689
9	185	2927	210	2909
10	237	3149	221	3128
11	229	3367	258	3348
12	266	3582	268	3567
13	222	3809	254	3786
14	350	4013	360	4006
15	361	5687	385	5684
16	383	8745	391	8721
17	404	9245	423	9213
18	419	11405	468	11402
19	515	13184	570	13166
20	820	14963	870	14931
21	1208	16722	1254	16695
22	1543	17840	1560	17820
23	1579	20230	1610	20200
24	1645	21520	1689	21500
25	1693	23678	1701	23654

همانطور که از جدول بالا مشخص است الگوریتم پیشنهادی از دقت و زمان اجرای مناسبی برخوردار است. این امر با توجه به نرمال بودن نمونه گیری انجام شده با رعایت منطقی بودن پارامترها صحت مدل و الگوریتم پیشنهادی را نشان می دهد.

۷-تحلیل و نتیجه گیری

در این مقاله به ارائه یک مدل جهت بهبود پایایی سیستم ها به منظور استفاده در پروژه های عمرانی پرداخته شده است.با توجه به اینکه پروژه های عمرانی طیف گسترده ای از فعالیت ها در ابعاد مختلف را به خود اختصاص می دهند. در این مقاله به منظور ارتقا کیفیت حل و اجرا مدل از الگوریتم فراابتکاری کلونی مورچگان استفاده شده است. این امر قابلیت استفاده از این مدل برای کاربردهای متنوع در پروژه های عمرانی از کوچک تا مگا پروژه را فراهم می سازد. جهت صحت سنجی و ارزیابی کیفی الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر کلونی مورچگان

مدل برای ۲۵ مساله در ابعاد متنوع حل و با جواب منتج از روش های دقیق (شاخه و کران) در نرم افزار لینگو مورد مقایسه قرار گرفت که دقت بیش از ۹۷ درصد نشان دهنده کیفیت و دقت بالا این روش می باشد. از طرف دیگر با توجه به پیچیدگی مدل زمان الگوریتم پیشنهادی از توجیه مناسبی برخوردار است.

در سال‌های اخیر پیچیدگی اجرای پروژه ها، فضای رقابتی کسب وکار و محدودیت منابع سازمان‌ها، لزوم توجه به مدیریت پروژه را در دستیابی به اهداف پروژه ها بیشتر مورد توجه قرارداده است. از اینرو در مراحل اجرای پروژه‌ها، کارفرمایان به دنبال افزایش کیفیت، کاهش مدت زمان و هزینه های اجرا هستند که از اهداف اصلی پروژه‌ها بشمار می‌روند. بنابراین مدیران پروژه ها با انتخاب بهترین تصمیم به دنبال تامین شدن اهداف فوق می‌باشند. این در حالی است که کاهش هزینه برای برخی از کارفرمایان هدف اصلی است و برای برخی دیگر افزایش کیفیت دارای اهمیت بیشتری است. یکی از جذابیت های مدل پیشنهادی این مدل طراحی پارامتریک جهت استفاده برای کاربری های مختلف می باشد که از این موارد قابلیت تخصیص درجه اهمیت مختلف متناسب با شرایط فضای مساله می باشد که کار را برای استفاده از نظرات خبرگان و مدیران استراتژیک ساده می سازد. این موضوع می تواند با استفاده از به صورت اتوماتیک و بدون نیاز به نظر خبره با استفاده از تکنیک برنامه ریزی فازی –آرمانی پارامترهای درجه اهمیت پارامترهای وزن پایایی و هزینه تنظیم نمود. این مطالعه برای پرداختن به این موضوع در مرحله اول وزن اهمیت پایایی را ۰.۷ و ضریب هزینه را ۰.۳ قرارمی دهیم:

اختصاص وزن $w_1 = 0.7$ به پایایی و $w_2 = 0.3$ به هزینه
اختصاص وزن $w_1 = 0.3$ به پایایی و $w_2 = 0.7$ به هزینه

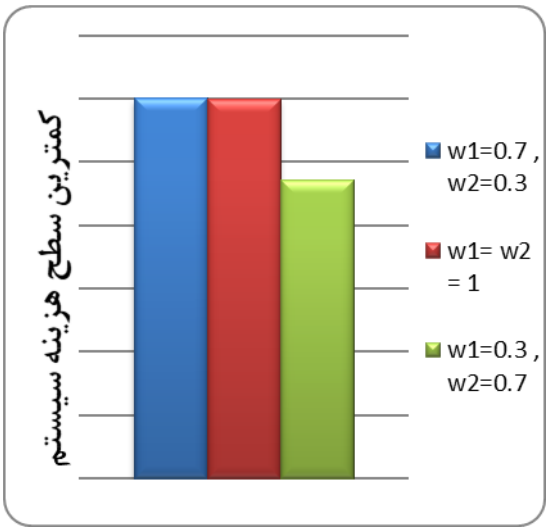
جدول۵ : جواب های بهینه در حالتی که اهمیت بیشتری پارامتر پایایی داده می شود.

$w_1 = 0.7$, $w_2 = 0.3$			
شماره	بسته کاری	RIFI=۰.۵	
		سطح پایایی هر بسته کاری R(i)	هزینه هر بسته کاری C(i)
۱	ستون بتنی	۰.۶۸	۱۶۱۸۴۴
۲	تیغه بتنی	۰.۵	۹۰۰۰۰
۳	دیوار بتنی	۰.۵۳	۸۷.۰۱۰
۴	سقف بتنی	۰.۸	۹۹.۹۹۶
۵	اتمام سقف	۰.۷۷	۴۵.۵۴۹
۶	اتمام تیغه، دیوار و ستون	۰.۵	۵۶۰۰۰
۷	اتمام کف	۰.۸۸	۵۹.۵۲۹
هزینه کل سیستم C(s) (مقدار تابع هدف اول) ۵۹۹۹۳۱			
پایایی کل سیستم R(s) (مقدار تابع هدف دوم) ۰.۳۲۴۱			

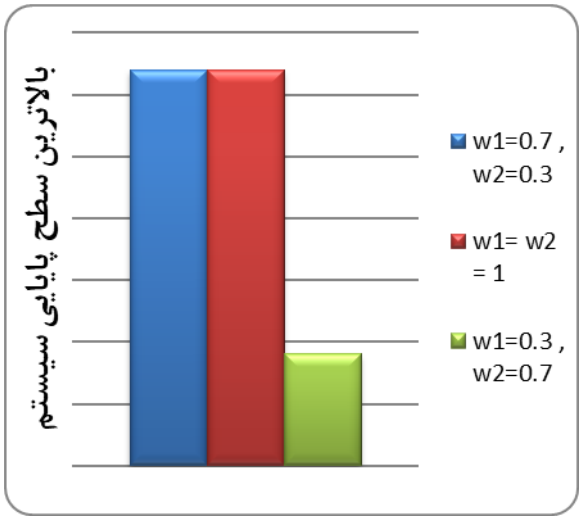
جدول۶: جواب های بهینه در حالتی که اهمیت بیشتری به پارامتر هزینه داده می شود.

$w_1 = 0.3$, $w_2 = 0.7$			
شماره	بسته کاری	RIFI=۰.۵	
		سطح پایایی هر بسته کاری R(i)	هزینه هر بسته کاری C(i)
۱	ستون بتنی	۰.۵	۱۲۰۰۰۰
۲	تیغه بتنی	۰.۵	۹۰۰۰۰
۳	دیوار بتنی	۰.۵	۸۳۰۰۰
۴	سقف بتنی	۰.۵	۵۷۰۰۰
۵	اتمام سقف	۰.۵	۲۸۰۰۰
۶	اتمام تیغه، دیوار و ستون	۰.۵	۵۶۰۰۰
۷	اتمام کف	۰.۷	۳۶.۴۲۴
هزینه کل سیستم C(s) (مقدار تابع هدف اول) ۴۷۰۴۲۴			
پایایی کل سیستم R(s) (مقدار تابع هدف دوم) ۰.۰۹۸۴			

شکل۷ : بالاترین سطح پایایی سیستم با در نظر گرفتن وزن های ۷ و ۰/۳ و ۱ برای پایایی



شکل۸ : کمترین سطح هزینه سیستم با در نظر گرفتن وزن های ۰/۷ و ۰/۳ و ۱ برای هزینه



به عنوان جمع بندی نتایج حاصل از پژوهش موارد زیر مدنظر است:

*اکثر مطالعات قبلی اهمیت کیفیت پروژه را در نظر نگرفته اند. برای عددی سازی سطح کیفیت در این مطالعه، کیفیت به صورت سطح پایایی در زمان اتمام کار، کمی سازی می شود، یعنی مقدار تابع پایایی R(t) وقتی t=0 است. بنابراین مدل پیشنهادی بر کمبود بیان شده غلبه می‌کند و به طور موثر با بکارگیری تئوری پایایی سیستم ها کیفیت پروژه را عددی کند.
*در ساخت‌وساز پروژه های مهندسی واقعی، پیمانکار باید جایگزینی را برای کنترل و بهینه سازی هزینه‌ها، با توجه به کیفیت مورد نیاز انتخاب کند. وظیفه اصلی مدل توسعه داده شده در این مقاله نمایش رابطه کیفیت قابلیت اطمینان با هزینه ساخت‌وساز در هر پروژه است.
*مدل پیشنهادی می تواند به طور خود کار پایایی و هزینه بهینه سیستم را با توجه به تابع ساختاری پایایی سیستم و تابع غیر خطی هزینه- پایایی تولید کند.
*با استفاده از طراحی ۲۵ مساله نمونه و حل آن در نرم افزار لینگو و همینطور الگوریتم پیشنهادی، صحت و اعتبار الگوریتم فراابتکاری کلونی مورچگان و قابلیت آن در حل مدل در ابعاد متنوع مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.
*الگوریتم کلونی مورچگان توسعه یافته در این مقاله قابلیت استفاده در پروژه های عمرانی کوچک، متوسط و بزرگ و همینطور مگا پروژه را دارا بوده و به خوبی می تواند برای کاربری های متنوع مورد استفاده قرار گیرد.
*M3AS به جهت جستجوی محلی‌ای که انجام می‌دهد از قابلیت های بیشتری جهت عملیات بهینه سازی نسبت به الگوریتم کلونی مورچگان کلاسیک، برخوردار است.
بنابراین جواب‌های بهتری که M3AS ارائه می‌دهد به دلیل جستجوی جواب‌های محلی است.
*این مقاله بر آن است تا نظریه پایایی سیستم مبتنی بر مدل بهینه‌سازی چند هدفه را گسترش دهد و به تصمیم گیران برای تعیین و انتخاب بین هزینه و کیفیت برای پروژه های ساختمانی کمک کند. به منظور کمک به تصمیم‌گیران مقادیر وزنی اهمیت برای پایایی و هزینه در نظر گرفتیم. مشاهده شد که در نظر گرفتن مقادیر وزنی اهمیت هر پارامتر می تواند جواب های بهینه تری را نسبت به اهمیت آنها استخراج نماید.
*یکی از پیشنهادات قابل بررسی در آینده در نظر گرفتن عاملی سوم همچون ریسک می باشد. در اینجا منظور از ریسک عوامل تاثیرگذار در عدم انجام درست و به موقع زیر سیستم‌های پروژه است عواملی نظیر بارش باران، وقوع حوادث طبیعی و ... به عبارت بهتر به صورت همزمان سه عامل هزینه، کیفیت و ریسک شکست انجام پروژه در یک تابع سه هدفه مورد بررسی قرار گیرند. در نظر گرفتن سه عامل به صورت همزمان به واقعیت بخشی به مقادیر بهینه پایایی هر جزء کمک خواهد کرد.

مراجع

[1] Mills, A. (2001). *A systematic approach to risk management for construction.* Structural survey, **19**(5), p. 245-252.
[2] Andrews, J.D. and Moss, T. (1993). *Reliability and risk assessment*. Longman Scientific & Technical Harlow.
[3] Tao, R. and Tam, C.-M. (2013). *System reliability theory based multiple-objective optimization model for construction projects.* Automation in Construction,**31**: p. 54-64.
[4] Shi, Y.-f. and Li H.-m. and Lu N. (*2009*). *Quality reliability-cost optimization of construction project based on genetic algorithm in Engineering Computation. ICEC'09. International Conference on 2009.* IEEE.
[5] Ning, X. and Wang, L.-g. (*2009*). *Construction quality-cost trade-off using the Pareto-based ant colony optimization algorithm in Management and Service Science. MASS'09. International Conference on 2009* . IEEE.
[6] Lock, M.D. (2012). *Project Management in Construction*. Gower Publishing, Ltd.
[7] Babu, A. and Suresh, N. (1996). *Project management with time, cost, and quality considerations.* European Journal of Operational Research, **88**(2), p. 320-327.
[8] Easa, S.M. (1989). *Resource leveling in construction by optimization.* Journal of Construction Engineering and Management. **115**(2), p. 302-316.
[9] Hegazy, T. (1999). *Optimization of resource allocation and leveling using genetic algorithms.* Journal of Construction Engineering and Management, **125**(3), p. 167-175.
[10] Gomar, J.E. and Haas, C.T. and Morton, D.P. (2002). *Assignment and allocation optimization of partially multiskilled workforce.* Journal of Construction Engineering and Management, **128**(2), p. 103-109.
[11] Kelley Jr, J.E. (1957). *Computers and Operations Research in Roadbuilding.* Operations Research, Computers and Management Decisions, p. 327-334.
[12] Goyal, S. (1975). *Note-A Note on "A Simple CPM Time-Cost Tradeoff Algorithm".* Management Science, **21**(6), p. 718-722.
[13] Falk, J.E. and Horowitz, J.L. (1972). *Critical path problems with concave cost-time curves.* Management Science, **19**(4-part-1), p. 446-455.
[14] Burns, S.A. and Liu, L. and Feng, C.-W. (1996). *The LP/IP hybrid method for construction time-cost trade-off analysis.* Construction Management & Economics, **14** :(۳), p. 265-276.
[15] Feng, C.-W. and Liu, L. and Burns, S.A. (1997). *Using genetic algorithms to solve construction time-cost trade-off problems.* Journal of computing in civil engineering,. **11**(3), p. 184-189.
[16] Li, H. and Love, P. (1997). *Using improved genetic algorithms to facilitate time-cost optimization.* Journal of Construction Engineering and Management,. **123**(3), p. 233-237.
[17] Li, H. and Cao, J.-N. and Love, P. (1999). *Using machine learning and GA to solve time-cost trade-off problems.* Journal of Construction Engineering and Management, **125**(5), p. 347-353.
[18] Feng, C.-W. and Liu, L. and Burns, S.A. (2000). *Stochastic construction time-cost trade-off analysis.* Journal of computing in civil engineering, **14**(2), p. 117-126.
[19] Zheng, D.X. and Ng, S.T. and Kumaraswamy, M.M. (2004). *Applying a genetic algorithm-based multiobjective approach for time-cost optimization.* Journal of Construction Engineering and Management, **130**(2), p. 168-176.
[20] Zheng, D.X. and Ng, S.T. and Kumaraswamy, M.M. (2005). *Applying Pareto ranking and niche formation to genetic algorithm-based multiobjective time–cost optimization.* Journal of Construction Engineering and Management, **131**(1), p. 81-91.
[21] Khang, D.B. and Myint, Y.M. (1999). *Time, cost and quality trade-off in project management: a case study.* International Journal of Project Management, **17**(4), p. 249-256.
[22] El-Rayes, K. and Kandil, A. (2005). *Time-cost-quality trade-off analysis for highway construction.* Journal of Construction Engineering and Management, **131**(4), p. 477-486.
[23] Nabipoor Afruzi, E. and et al. (2014). *A Multi-Objective Imperialist Competitive Algorithm for solving discrete time, cost and quality trade-off problems with mode-identity and resource-constrained situations.* Computers & Operations Research, **50**, p. 80-96.
[24] Tavana, M. and Abtahi, A. and K. Khalili-Damghani. (2014). *A new multi-objective multi-mode model for solving preemptive time–cost–quality trade-off project scheduling problems.* Expert Systems with Applications, **41**(4), p. 1830-1846.
[25] Monghasemi, S. and et al. (2014). *A Novel Multi Criteria Decision Making Model for Optimizing Time-Cost-Quality Trade-off Problems in Construction Projects.* Expert Systems with Applications.
[26] Cheng, M.-Y. and Tran, D.-H. and Cao, M.-T. (2014). *Hybrid multiple objective artificial bee colony with differential evolution for the time-cost-quality tradeoff problem.* Knowledge-Based Systems.
[27] Beasley, J.E. (2005). *Advances in linear and integer programming*. 1996, Clarendon Press Oxford.
[28] Karlof, J.K. *Integer programming: theory and practice*. CRC Press.

[29] Jünger, M. and et al. (2009). *50 Years of Integer Programming 1958-2008: From the Early Years to the State-of-the-art*, Springer.
[30] Fondahl, J.W. (1962). *A non-computer approach to the critical path method for the construction industry*.
[31] Prager, W. (1963). *A structural method of computing project cost polygons.* Management Science,.**9**(3), p. 394-404.
[32] Siemens, N. (1971). *A simple CPM time-cost tradeoff algorithm.* Management Science,**17**(6), p. B-354-B-363.
[33] Moselhi, O. (1993). *Schedule compression using the direct stiffness method*. Canadian Journal of Civil Engineering, **20**(1), p. 65-72.
[34] Chan, W.-T. and Chua, D.K. and Kannan, G. (1996). *Construction resource scheduling with genetic algorithms.* Journal of Construction Engineering and Management, **122**(2), p. 125-132.
[35] Leu, S.-S. and Yang, C.-H. (1999). *GA-based multicriteria optimal model for construction scheduling.* Journal of Construction Engineering and Management, **125**(6), p. 420-427.
[36] Elazouni, A.M. and Gab-Allah, A.A. (2004). *Finance-based scheduling of construction projects using integer programming.* Journal of Construction Engineering and Management, **130**(1), p. 15-24
[37] Liu, L. and Burns, S.A. and Feng, C.-W. (1995). Construction time-cost trade-off analysis using LP/IP hybrid method. Journal of Construction Engineering and Management, 121(4), p. 446-454.
[38] Eberhart, R.C. and Shi, Y. (*2001*). *Particle swarm optimization: developments, applications and resources*. in *Evolutionary Computation. Proceedings of the 2001 Congress on* 2001. IEEE.
[39] Bo, Z. and Yi-jia, C. (2005). *Multiple objective particle swarm optimization technique for economic load dispatch.* Journal of Zhejiang University SCIENCE A, **6**(5), p. 420-427.
[40] Dorigo, M. and Birattari, M. and Stutzle, T. (2006). *Ant colony optimization.* Computational Intelligence Magazine, IEEE, **1**(4), p. 28-39.
[41] Ya-ping, K. and Ying, X. (*2006*). *Construction time-cost trade-off analysis using ant colony optimization algorithm*. in *Management Science and Engineering,. ICMSE'06. 2006 International Conference on* IEEE.
[42] Ng ,S.T. and Zhang, Y. (2008). *Optimizing construction time and cost using ant colony optimization approach.* Journal of Construction Engineering and Management, **134**(9), p. 721-728.
[43] Hui-min, L. and Wang, Z.-f. (2009). *Applying self-adaptive ant colony optimization for construction time-cost optimization*. in *Management Science and Engineering, 2009. ICMSE 2009. International Conference on 2009*. IEEE.
[44] Afshar, A. and et al. (2009). *Nondominated archiving multicolony ant algorithm in time–cost trade-off optimization.* Journal of Construction Engineering and Management, **135**(7), p. 668-674.
[45] Dorigo, M. and Birattari, M. and Stutzle, T. (2006). *Ant colony optimization.* Computational Intelligence Magazine. IEEE, **1**(4), p. 28-39.
[46] Stützle, T. and Hoos, H.H. (2000). *MAX–MIN ant system.* Future generation computer systems, (۸)۱۶ .p. 889-914 .

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هم‌فکری تمام اعضای کمیته علمی **انجمن مهندسی سازه ایران** کمال سپاسگزاری را دارند.