



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Optimization of Construction Site Supervisory Building Location Using Ant Colony Optimization

Ebrahim Rostami¹, Amir Meysam Giahi^{2*}

1- M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Ki.C., Islamic Azad University, Kish, Iran

2*- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 16 April 2026; Revised: 10 May 2026; Accepted: 25 May 2026; Published: 22 November 2026

Abstract:

Effective management of construction sites plays a critical role in improving project productivity, safety, and coordination of on-site activities. One of the key issues in construction site management is determining an appropriate location for the supervisory building, in a way that ensures efficient access to different parts of the site, enables effective monitoring of operations, and reduces potential safety risks. Although extensive studies have been conducted in the field of construction site layout planning, limited attention has been paid to optimizing the location of the supervisory building as a key managerial facility. This study proposes an optimization model for determining the optimal location of a site supervisory building using the Ant Colony Optimization (ACO) algorithm. In the proposed model, the construction site is divided into a set of potential candidate locations, and a weighted objective function is defined to evaluate each alternative based on operational criteria including accessibility to major work zones, monitoring capability, and safety considerations. The problem is formulated as a combinatorial optimization problem and solved using the Ant Colony Optimization algorithm. This algorithm is selected due to its strong capability in exploring large search spaces and identifying near-optimal solutions for complex optimization problems. To evaluate the performance of the proposed model, three different scenarios with varying site conditions were designed and implemented in the MATLAB environment. The results indicate that the ACO algorithm can efficiently identify suitable locations for the supervisory building within a reasonable computational time. The findings suggest that metaheuristic optimization approaches can serve as effective decision-support tools for project managers during the construction site planning stage.

Keywords: Construction Site Management, Site Layout Planning, Facility Location, Ant Colony Optimization, Metaheuristic Optimization

Cite this article as Rostami,E and Giahi,A M . (2026). Optimization of Construction Site Supervisory Building Location Using Ant Colony Optimization. (e244289). Civil and Project journal, 8(9), e244289 doi: <https://doi.org/10.22034/cpj.2026.582053.1442>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2026 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: am.giahi@iau.ac.ir



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

بهینه‌سازی مکان استقرار ساختمان سرپرستی در کارگاه‌های ساختمانی با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان

ابراهیم رستمی^۱، امیر میثم گیاهی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد بین الملل کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، کیش، ایران

۲*-استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۲۷ فروردین ۱۴۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۲۰ اردیبهشت ۱۴۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۰۴ خرداد ۱۴۰۵؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ آذر ۱۴۰۵

چکیده

مدیریت مؤثر کارگاه‌های ساختمانی نقش مهمی در افزایش بهره‌وری، ایمنی و هماهنگی فعالیت‌های اجرایی پروژه دارد. یکی از مسائل مهم در مدیریت کارگاه، تعیین مکان مناسب برای استقرار ساختمان سرپرستی است؛ به‌طوری‌که دسترسی مناسب به بخش‌های مختلف کارگاه، امکان نظارت مؤثر بر فعالیت‌ها و کاهش مخاطرات ایمنی فراهم شود. با وجود مطالعات گسترده در حوزه چیدمان کارگاه‌های ساختمانی، توجه محدودی به بهینه‌سازی مکان ساختمان سرپرستی به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی مدیریت کارگاه شده است. در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی برای تعیین مکان مناسب ساختمان سرپرستی کارگاه با استفاده از الگوریتم فراابتکاری کلونی مورچگان ارائه شده است. در مدل پیشنهادی، فضای کارگاه به مجموعه‌ای از مکان‌های بالقوه تقسیم شده و برای ارزیابی هر گزینه، یک تابع هدف مبتنی بر معیارهای عملیاتی شامل دسترسی به نواحی اصلی کارگاه، قابلیت نظارت و ملاحظات ایمنی تعریف شده است. سپس مسئله به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبیاتی مدل‌سازی شده و با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان حل شده است. این الگوریتم به دلیل توانایی مناسب در جست‌وجوی فضای جواب و یافتن پاسخ‌های نزدیک به بهینه برای مسائل پیچیده انتخاب شده است. به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، سه سناریوی مختلف با شرایط متفاوت کارگاهی طراحی و در محیط MATLAB پیاده‌سازی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم کلونی مورچگان قادر است در زمان محاسباتی مناسب، مکان‌های کارآمدی برای استقرار ساختمان سرپرستی شناسایی کند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های فراابتکاری می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیران پروژه در مرحله برنامه‌ریزی کارگاه مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی

مدیریت کارگاه ساختمانی، چیدمان کارگاه، مکانیابی، الگوریتم کلونی مورچگان، بهینه‌سازی فراابتکاری

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: am.giahi@iaau.ac.ir

۱-مقدمه

صنعت ساخت‌وساز یکی از مهم‌ترین بخش‌های اقتصادی در بسیاری از کشورها محسوب می‌شود و نقش قابل توجهی در توسعه زیرساخت‌ها، اشتغال‌زایی و رشد اقتصادی دارد. با این حال، پروژه‌های ساختمانی به دلیل ماهیت پیچیده، چندبعدی و پویای خود با چالش‌های مدیریتی متعددی مواجه هستند. محیط کارگاه ساختمانی معمولاً شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌های همزمان، تجهیزات متنوع، نیروی انسانی متعدد و جریان مداوم مصالح است که هماهنگی میان آن‌ها نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت کارآمد می‌باشد. در این میان، نحوه سازماندهی و چیدمان اجزای مختلف کارگاه از جمله عوامل مهمی است که می‌تواند بر بهره‌وری، ایمنی و کارایی عملیات اجرایی تأثیر مستقیم داشته باشد (توملینسون، ۲۰۱۰).

یکی از مهم‌ترین موضوعات در مدیریت کارگاه ساختمانی، مسئله چیدمان کارگاه یا Construction Site Layout Planning (CSLP) است. چیدمان کارگاه به فرآیند تعیین محل مناسب برای استقرار تسهیلات موقت، انبارها، مسیرهای حمل‌ونقل، تجهیزات و ساختمان‌های مدیریتی در محدوده کارگاه اشاره دارد. هدف اصلی این فرآیند، کاهش زمان و هزینه جابه‌جایی منابع، افزایش ایمنی، بهبود دسترسی و تسهیل نظارت بر فعالیت‌ها است (سانایانگام و همکاران، ۲۰۱۲). پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که طراحی نامناسب چیدمان کارگاه می‌تواند منجر به افزایش تداخل فعالیت‌ها، افزایش هزینه‌های حمل مصالح و کاهش کارایی عملیات اجرایی شود (هان و گولپینار، ۲۰۱۵).

در میان اجزای مختلف کارگاه ساختمانی، ساختمان سرپرستی یا ساختمان مدیریتی کارگاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این ساختمان به‌عنوان مرکز اصلی هماهنگی و نظارت پروژه عمل می‌کند و معمولاً محل استقرار مدیر پروژه، مهندسان ناظر و تیم مدیریت کارگاه است. مکان‌یابی مناسب این ساختمان می‌تواند نقش مهمی در بهبود دسترسی به بخش‌های مختلف کارگاه، افزایش کارایی فرآیندهای نظارتی و تسهیل ارتباطات میان عوامل اجرایی ایفا کند. در مقابل، استقرار نامناسب ساختمان سرپرستی ممکن است موجب افزایش زمان دسترسی به بخش‌های مختلف کارگاه، کاهش کیفیت نظارت و حتی افزایش مخاطرات ایمنی شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹).

با وجود اهمیت این موضوع، بسیاری از تصمیمات مربوط به مکان‌یابی تسهیلات کارگاهی در عمل بر اساس تجربه مهندسان و قضاوت‌های ذهنی اتخاذ می‌شود. این رویکرد اگرچه ممکن است در پروژه‌های کوچک قابل قبول باشد، اما در پروژه‌های بزرگ و پیچیده می‌تواند منجر به تصمیمات غیر بهینه شود. از این رو، استفاده از روش‌های علمی و مدل‌های بهینه‌سازی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در طراحی چیدمان کارگاه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (کوسکلا، ۲۰۰۰).

در دهه‌های اخیر، رویکردهای مختلفی برای حل مسئله چیدمان کارگاه ارائه شده است. روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی به دلیل ماهیت پیچیده و ترکیباتی این مسئله با محدودیت‌هایی مواجه هستند، زیرا فضای جست‌وجوی پاسخ‌ها بسیار بزرگ بوده و مسئله غالباً در رده مسائل NP-hard طبقه‌بندی می‌شود. به همین دلیل، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری به عنوان ابزارهای مؤثر برای حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی مورد توجه قرار گرفته است (بلوم و رولی، ۲۰۰۳).

الگوریتم‌های فراابتکاری از جمله الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم کلونی مورچگان به طور گسترده در مسائل برنامه‌ریزی و مدیریت پروژه‌های ساختمانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این الگوریتم‌ها با الهام از پدیده‌های طبیعی قادرند در فضای جست‌وجوی بزرگ حرکت کرده و پاسخ‌های نزدیک به بهینه را در زمان محاسباتی مناسب پیدا کنند. در میان این روش‌ها، الگوریتم کلونی مورچگان (Ant Colony Optimization) که نخستین بار توسط دوریگو معرفی شد، به دلیل توانایی بالا در حل مسائل ترکیباتی مانند مسیریابی، تخصیص و مکان‌یابی مورد توجه قرار گرفته است (دوریگو و اشتوتزل، ۲۰۰۴).

الگوریتم کلونی مورچگان با الهام از رفتار جمعی مورچه‌ها در یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین لانه و منبع غذا توسعه یافته است. در این الگوریتم، عامل‌های جست‌وجوگر موسوم به مورچه‌ها با استفاده از اطلاعات فرومونی و قواعد احتمالی، مسیرهای

مختلف را بررسی کرده و به تدریج مسیرهای بهتر تقویت می‌شوند. این ویژگی باعث می‌شود الگوریتم بتواند به صورت کارآمد در مسائل بهینه‌سازی پیچیده به کار گرفته شود (دوریگو، ۱۹۹۶).

در حوزه مدیریت ساخت، کاربرد الگوریتم‌های فراابتکاری در مسائل مختلفی از جمله زمان‌بندی پروژه، تخصیص منابع و طراحی چیدمان کارگاه مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال، برخی پژوهش‌ها از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی چیدمان کارگاه استفاده کرده‌اند، در حالی که مطالعات دیگر به کاربرد الگوریتم‌های ازدحام ذرات یا روش‌های ترکیبی پرداخته‌اند (کازمی و همکاران، ۲۰۱۵). با این حال، بخش قابل توجهی از این مطالعات بر بهینه‌سازی کلی چیدمان کارگاه تمرکز داشته و کمتر به بررسی مکان‌یابی یک تسهیل مدیریتی خاص مانند ساختمان سرپرستی پرداخته‌اند.

با توجه به اهمیت نقش ساختمان سرپرستی در فرآیند مدیریت و نظارت پروژه، بررسی علمی و سیستماتیک مکان‌یابی این تسهیل می‌تواند به بهبود عملکرد مدیریتی کارگاه کمک کند. از این رو، هدف اصلی این پژوهش ارائه یک مدل بهینه‌سازی برای تعیین مکان مناسب ساختمان سرپرستی در کارگاه‌های ساختمانی با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان است. در این پژوهش، فضای کارگاه به مجموعه‌ای از مکان‌های بالقوه تقسیم شده و با در نظر گرفتن معیارهایی مانند دسترسی به بخش‌های مختلف کارگاه، قابلیت نظارت و ملاحظات ایمنی، یک تابع هدف برای ارزیابی گزینه‌های مختلف تعریف شده است.

به منظور ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی، چندین سناریوی آزمایشی با شرایط متفاوت کارگاهی طراحی شده و الگوریتم در محیط MATLAB پیاده‌سازی شده است. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان می‌دهد که الگوریتم کلونی مورچگان قادر است در زمان محاسباتی مناسب، مکان‌های کارآمدی برای استقرار ساختمان سرپرستی شناسایی کند. انتظار می‌رود یافته‌های این پژوهش بتواند به عنوان ابزاری تصمیم‌یار در مرحله برنامه‌ریزی کارگاه مورد استفاده مدیران پروژه و برنامه‌ریزان ساخت قرار گیرد و به بهبود کارایی مدیریت کارگاه‌های ساختمانی کمک کند.

۲- مبانی نظری و مرور ادبیات

کارگاه ساختمانی محیطی پویا و پیچیده است که در آن فعالیت‌های مختلف اجرایی، تجهیزات، نیروی انسانی و جریان مصالح به صورت هم‌زمان در حال تعامل هستند. در چنین محیطی، مدیریت صحیح فضا و سازماندهی تسهیلات موقت نقش مهمی در بهبود بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و افزایش ایمنی دارد. یکی از مفاهیم کلیدی در این حوزه، چیدمان کارگاه ساختمانی^۱ است که به تعیین موقعیت مناسب تسهیلات موقت و دائمی در محدوده کارگاه اشاره دارد (توملینسون، ۲۰۱۰).

هدف اصلی چیدمان کارگاه، سازماندهی بهینه اجزای مختلف کارگاه به گونه‌ای است که جریان حرکت مصالح، تجهیزات و نیروی انسانی با حداقل تداخل و حداکثر کارایی انجام شود. یک چیدمان مناسب می‌تواند باعث کاهش زمان حمل مصالح، کاهش ازدحام در مسیرهای حمل‌ونقل، بهبود ایمنی و افزایش کارایی عملیات اجرایی شود. در مقابل، چیدمان نامناسب می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های لجستیک، کاهش بهره‌وری و افزایش خطرات ایمنی در محیط کارگاه شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹). تسهیلات مختلفی در چیدمان کارگاه مورد توجه قرار می‌گیرند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به انبارهای مصالح، مسیرهای دسترسی، محل استقرار ماشین‌آلات، فضاهای خدماتی و ساختمان‌های مدیریتی اشاره کرد. در میان این تسهیلات، ساختمان سرپرستی یا ساختمان مدیریت کارگاه به عنوان مرکز هماهنگی و کنترل فعالیت‌های اجرایی اهمیت ویژه‌ای دارد. این ساختمان معمولاً محل استقرار مدیر پروژه، مهندسین ناظر و بخش‌های اداری کارگاه است و موقعیت آن می‌تواند بر کیفیت نظارت، سرعت تصمیم‌گیری و کارایی ارتباطات میان عوامل اجرایی تأثیرگذار باشد (هریس و مک کافر، ۲۰۱۳).

مکانیابی تسهیلات یکی از مسائل مهم در مهندسی صنایع، تحقیق در عملیات و مدیریت ساخت محسوب می‌شود. در زمینه چیدمان کارگاه، مسئله مکانیابی به تعیین موقعیت مناسب برای استقرار تسهیلات مختلف به گونه‌ای اشاره دارد که معیارهای

^۱Construction Site Layout Planning – CSLP

عملکردی مشخصی بهینه شوند. این معیارها معمولاً شامل حداقل سازی فاصله حمل و نقل، کاهش زمان جابه جایی، افزایش دسترسی و بهبود ایمنی هستند (کلاس و شیمیدل، ۲۰۱۴). مسئله چیدمان کارگاه به دلیل ماهیت ترکیبیاتی و تعداد زیاد حالت های ممکن، به عنوان یک مسئله NP-hard شناخته می شود. با افزایش تعداد تسهیلات و مکان های بالقوه، فضای جست و جوی مسئله به صورت نمایی افزایش می یابد و استفاده از روش های دقیق کلاسیک برای حل آن دشوار می شود. به همین دلیل، بسیاری از پژوهشگران استفاده از روش های تقریبی و الگوریتم های فراابتکاری را برای حل این مسئله پیشنهاد کرده اند (بلوم و رولی، ۲۰۰۳). در مطالعات اولیه، تصمیم گیری در مورد چیدمان کارگاه اغلب بر اساس تجربه مهندسان و روش های دستی انجام می شد. با پیشرفت فناوری های محاسباتی، استفاده از مدل های ریاضی و روش های بهینه سازی برای طراحی چیدمان کارگاه گسترش یافت. این مدل ها معمولاً شامل تعریف یک تابع هدف و مجموعه ای از محدودیت ها هستند که شرایط عملیاتی کارگاه را منعکس می کنند (سانایانگام و همکاران، ۲۰۱۲).

در دهه های اخیر، الگوریتم های فراابتکاری به عنوان یکی از مهم ترین ابزارهای حل مسائل بهینه سازی پیچیده مطرح شده اند. این الگوریتم ها با الهام از پدیده های طبیعی، زیستی یا اجتماعی طراحی شده اند و قادرند در فضای جست و جوی بزرگ حرکت کرده و پاسخ های نزدیک به بهینه را در زمان محاسباتی مناسب پیدا کنند (بلوم و رولی، ۲۰۰۳). از جمله مهم ترین الگوریتم های فراابتکاری مورد استفاده در مسائل چیدمان کارگاه می توان به الگوریتم ژنتیک^۱، بهینه سازی ازدحام ذرات^۲ و الگوریتم کلونی مورچگان^۳ اشاره کرد. الگوریتم ژنتیک با الهام از فرآیند تکامل طبیعی، از عملگرهایی مانند انتخاب، تقاطع و جهش برای تولید نسل های جدید از پاسخ ها استفاده می کند. این روش در بسیاری از مطالعات برای بهینه سازی چیدمان کارگاه مورد استفاده قرار گرفته است (کازمی و همکاران، ۲۰۱۵). الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات نیز با الهام از رفتار جمعی پرندگان یا ماهی ها توسعه یافته و بر اساس حرکت ذرات در فضای جست و جوی عمل می کند. در این الگوریتم، هر ذره موقعیت خود را بر اساس تجربه فردی و تجربه جمعی به روزرسانی می کند و به سمت بهترین پاسخ های یافت شده حرکت می کند (کندی و ابرهات، ۱۹۹۵). در میان الگوریتم های فراابتکاری، الگوریتم کلونی مورچگان به دلیل کارایی بالا در حل مسائل ترکیبیاتی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این الگوریتم نخستین بار توسط دوریگو معرفی شد و بر اساس رفتار جمعی مورچه ها در یافتن کوتاه ترین مسیر بین لانه و منبع غذا طراحی شده است (دوریگو، ۱۹۹۶). در این الگوریتم، عامل هایی به نام مورچه ها مسیرهای مختلف را بررسی کرده و با استفاده از مکانیزم فرومون، مسیرهای بهتر به تدریج تقویت می شوند. این ویژگی باعث می شود الگوریتم بتواند به طور مؤثر در مسائل مکانیابی و مسیریابی مورد استفاده قرار گیرد (دوریگو و اشتوتزل، ۲۰۰۴).

مطالعات متعددی در زمینه بهینه سازی چیدمان کارگاه های ساختمانی انجام شده است. بسیاری از این پژوهش ها بر کاهش هزینه های حمل مصالح، بهبود دسترسی و افزایش ایمنی تمرکز داشته اند. برای مثال، سانایانگام و همکاران (۲۰۱۲) از روش های بهینه سازی برای طراحی چیدمان پویا در کارگاه های ساختمانی استفاده کردند و نشان دادند که استفاده از مدل های محاسباتی می تواند به طور قابل توجهی کارایی چیدمان را بهبود دهد. ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) نیز مدلی برای بهینه سازی چیدمان کارگاه با در نظر گرفتن معیارهای ایمنی و دسترسی ارائه کردند. نتایج پژوهش آن ها نشان داد که در نظر گرفتن همزمان معیارهای ایمنی و بهره وری می تواند منجر به طراحی چیدمان های کارآمدتر شود. در مطالعه ای دیگر، کازمی و همکاران (۲۰۱۵) از الگوریتم های فراابتکاری برای بهینه سازی چیدمان کارگاه استفاده کردند و نشان دادند که این الگوریتم ها قادرند پاسخ های مناسب تری نسبت به روش های سنتی ارائه دهند. نتایج این مطالعات نشان می دهد که استفاده از روش های فراابتکاری می تواند به طور مؤثری در حل مسائل پیچیده چیدمان کارگاه به کار گرفته شود. با وجود پیشرفت های قابل توجه در این حوزه، بخش عمده ای از پژوهش ها بر بهینه سازی چیدمان کلی کارگاه تمرکز داشته اند و کمتر به بررسی مکان یابی یک تسهیل مدیریتی خاص مانند ساختمان سرپرستی پرداخته اند. از آنجا که این ساختمان نقش مهمی در مدیریت و نظارت بر فعالیت های کارگاه دارد،

¹ Genetic Algorithm

² Ant Colony Optimization

³ Particle Swarm Optimization

بررسی علمی مکان‌یابی آن می‌تواند به بهبود عملکرد مدیریتی کارگاه کمک کند. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارائه یک مدل بهینه‌سازی برای تعیین مکان مناسب ساختمان سرپرستی کارگاه با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان انجام شده است. این پژوهش تلاش می‌کند با ترکیب مفاهیم مدیریت کارگاه، مکانیابی تسهیلات و الگوریتم‌های فراابتکاری، رویکردی نظام‌مند برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مرحله برنامه‌ریزی کارگاه ارائه دهد.

۳- روش‌شناسی تحقیق

۳-۱- رویکرد پژوهش

این پژوهش با هدف ارائه یک چارچوب محاسباتی برای تعیین مکان بهینه ساختمان سرپرستی در کارگاه‌های ساختمانی انجام شده است. از نظر ماهیت، این تحقیق در دسته پژوهش‌های کاربردی و توسعه‌ای قرار می‌گیرد و از نظر روش، مبتنی بر مدل‌سازی و بهینه‌سازی محاسباتی است. در این مطالعه تلاش شده است با ترکیب مفاهیم مدیریت کارگاه ساختمانی، مکانیابی تسهیلات و الگوریتم‌های فراابتکاری، مدلی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مرحله برنامه‌ریزی کارگاه ارائه شود.

فرآیند تحقیق شامل چند مرحله اصلی است. در مرحله نخست، بر اساس مبانی نظری و مطالعات پیشین، معیارهای مؤثر در تعیین مکان ساختمان سرپرستی کارگاه شناسایی شد. در مرحله بعد، فضای کارگاه به مجموعه‌ای از مکان‌های بالقوه برای استقرار ساختمان سرپرستی تقسیم شد و یک مدل ریاضی برای ارزیابی گزینه‌های مختلف تعریف گردید. سپس مسئله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبیاتی فرموله شد و برای حل آن از الگوریتم فراابتکاری کلونی مورچگان استفاده شد. در نهایت، مدل پیشنهادی در محیط MATLAB پیاده‌سازی شده و عملکرد آن در چند سناریوی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳-۲- مدل‌سازی مسئله مکانیابی

مسئله اصلی این پژوهش تعیین بهترین مکان برای استقرار ساختمان سرپرستی در محدوده کارگاه ساختمانی است. به منظور مدل‌سازی مسئله، ابتدا محدوده کارگاه به مجموعه‌ای از مکان‌های گسسته یا سلول‌های شبکه‌ای تقسیم می‌شود که هر یک از آن‌ها می‌تواند به عنوان یک مکان بالقوه برای استقرار ساختمان سرپرستی در نظر گرفته شود. فرض می‌شود که مجموعه مکان‌های ممکن به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$L = \{l_1, l_2, l_3, \dots, l_n\} \quad (1)$$

که در آن l_i بیانگر مکان بالقوه i برای استقرار ساختمان سرپرستی و n تعداد کل مکان‌های قابل انتخاب در محدوده کارگاه است.

برای ارزیابی هر مکان، مجموعه‌ای از معیارهای عملیاتی در نظر گرفته می‌شود. این معیارها بر اساس مطالعات حوزه چیدمان کارگاه و مدیریت ساخت انتخاب شده‌اند و مهم‌ترین آن‌ها شامل موارد زیر است:

- دسترسی به نواحی اصلی فعالیت در کارگاه
- قابلیت نظارت و دید مدیریتی بر بخش‌های مختلف پروژه
- ملاحظات ایمنی و فاصله از نواحی پرخطر

به منظور ترکیب این معیارها، یک تابع هدف وزنی تعریف می‌شود که عملکرد هر مکان را ارزیابی می‌کند. تابع هدف کلی به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$F(x) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) + w_3 f_3(x) \quad (2)$$

که در آن:

- $f_1(X)$ شاخص دسترسی به نواحی عملیاتی
- $f_2(X)$ شاخص قابلیت نظارت
- $f_3(X)$ شاخص ایمنی
- w_i وزن هر معیار

مقادیر وزن‌ها بر اساس اهمیت نسبی هر معیار در مدیریت کارگاه تعیین می‌شوند و مجموع آن‌ها برابر با یک در نظر گرفته می‌شود، رابطه (۳):

$$\sum_{i=1}^3 w_i = 1 \quad (3)$$

هدف مدل، یافتن مکانی است که مقدار تابع هدف را بهینه کند.

۳-۳- الگوریتم کلونی مورچگان

برای حل مدل بهینه‌سازی ارائه شده، از الگوریتم فراابتکاری کلونی مورچگان استفاده شده است. این الگوریتم که نخستین بار توسط دوریگو (۱۹۹۶) معرفی شد، از رفتار جمعی مورچه‌ها در طبیعت الهام گرفته است. مورچه‌ها هنگام جست‌وجوی غذا با ترشح ماده‌ای شیمیایی به نام فرومون مسیرهای طی شده را علامت‌گذاری می‌کنند. با گذشت زمان، مسیرهایی که کوتاه‌تر یا کارآمدتر هستند فرومون بیشتری دریافت کرده و احتمال انتخاب آن‌ها توسط سایر مورچه‌ها افزایش می‌یابد (دوریگو و اشتوتزل، ۲۰۰۴).

در الگوریتم کلونی مورچگان، مجموعه‌ای از عامل‌های جست‌وجوگر به نام مورچه‌ها در فضای پاسخ حرکت کرده و مسیرهای مختلف را بررسی می‌کنند. احتمال انتخاب هر مسیر توسط یک مورچه بر اساس دو عامل تعیین می‌شود:

۱- مقدار فرومون موجود روی مسیر

۲- اطلاعات ابتکاری^۱ مرتبط با کیفیت مسیر

احتمال انتخاب گزینه j توسط مورچه k از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$P_{ij} = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k \in N_i} [\tau_{ik}]^\alpha [\eta_{ik}]^\beta} \quad (4)$$

که در آن:

- τ_{ij} مقدار فرومون مسیر
- η_{ij} مقدار اطلاعات ابتکاری
- α و β ضرایب کنترل‌کننده اهمیت فرومون و اطلاعات ابتکاری هستند.

¹ heuristic

پس از ایجاد پاسخ توسط مورچه‌ها، مقدار فرومون مسیره‌ها به‌روزرسانی می‌شود. این فرآیند شامل دو مرحله است: تبخیر فرومون و افزایش فرومون مسیرهای مناسب. رابطه به‌روزرسانی فرومون به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij} \quad (5)$$

که در آن ρ نرخ تبخیر فرومون است و $\Delta\tau_{ij}$ مقدار فرومون افزوده‌شده توسط مورچه‌ها می‌باشد. این فرآیند تا رسیدن به معیار توقف مشخص، مانند تعداد تکرار مشخص یا همگرایی پاسخ‌ها، ادامه می‌یابد.

۳-۴- پیاده‌سازی مدل

مدل پیشنهادی در محیط MATLAB پیاده‌سازی شده است. در این پیاده‌سازی، ابتدا داده‌های مربوط به موقعیت نواحی فعالیت در کارگاه تعریف شده و ماتریس فاصله میان مکان‌های بالقوه و این نواحی محاسبه شده است. سپس الگوریتم کلونی مورچگان با مجموعه‌ای از پارامترهای اولیه شامل تعداد مورچه‌ها، نرخ تبخیر فرومون و ضرایب کنترل‌کننده اجرا شده است. پارامترهای الگوریتم بر اساس مطالعات پیشین و آزمون‌های اولیه تنظیم شده‌اند. انتخاب مناسب این پارامترها نقش مهمی در عملکرد الگوریتم و سرعت همگرایی آن دارد.

۳-۵- طراحی سناریوهای آزمایشی

به منظور ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، سه سناریوی مختلف با شرایط متفاوت کارگاهی طراحی شده است. این سناریوها شامل تغییر در توزیع نواحی فعالیت، محدودیت‌های مکانی و شرایط دسترسی در کارگاه هستند. هدف از طراحی این سناریوها بررسی پایداری عملکرد الگوریتم در شرایط مختلف و تحلیل حساسیت نتایج نسبت به تغییر شرایط محیطی است.

در هر سناریو، الگوریتم چندین بار اجرا شده و بهترین پاسخ به دست آمده ثبت شده است. سپس نتایج به دست آمده از نظر مقدار تابع هدف و زمان محاسباتی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

چارچوب روش‌شناسی ارائه‌شده در این پژوهش امکان استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسائل مکانیابی در محیط‌های پیچیده کارگاهی را فراهم می‌کند و می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌یار در برنامه‌ریزی و مدیریت کارگاه‌های ساختمانی مورد استفاده قرار گیرد.

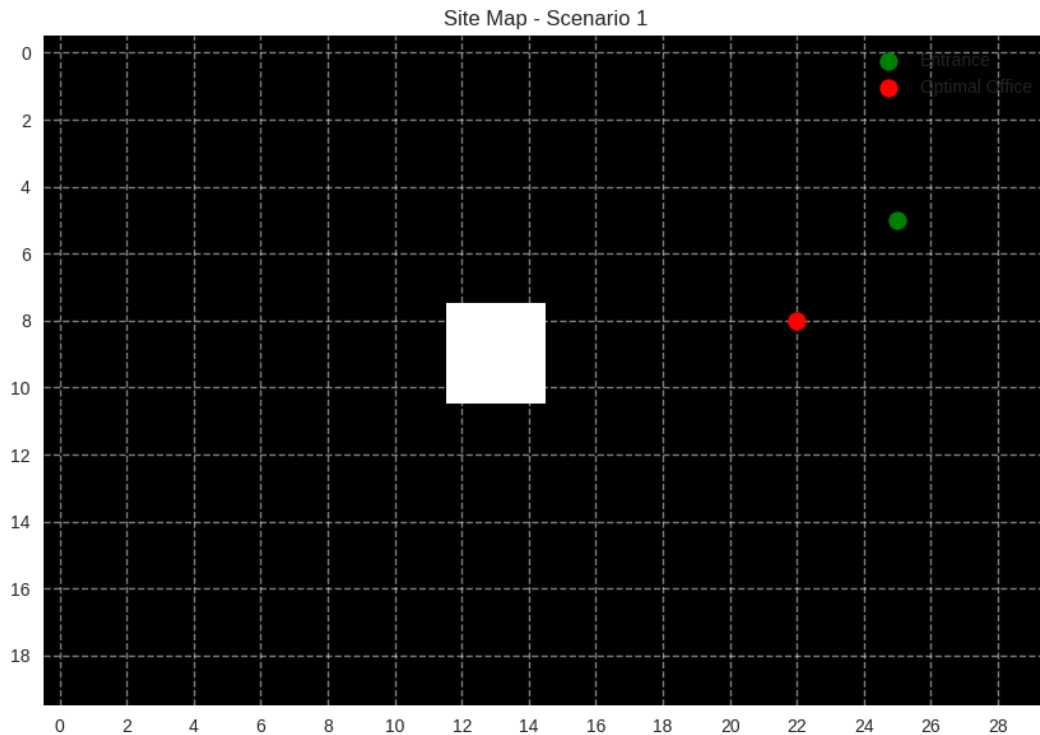
۴- نتایج و تحلیل یافته‌ها

در این بخش عملکرد مدل پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم کلونی مورچگان (ACO) برای تعیین مکان بهینه ساختمان سرپرستی در کارگاه‌های ساختمانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور ارزیابی کارایی مدل، سه سناریو با درجات مختلف پیچیدگی فضایی طراحی و اجرا شده است. این سناریوها به ترتیب شامل محیطی با پیچیدگی کم، متوسط و زیاد هستند. تفاوت میان سناریوها در ابعاد شبکه، تعداد موانع موجود در محیط، تعداد نواحی عملکردی مهم و میزان محدودیت‌های فضایی در نظر گرفته شده است.

در هر سه سناریو، مسئله مکان‌یابی به صورت شبکه‌ای مدل‌سازی شده و تابع هدف با استفاده از ترکیب وزنی معیارهایی نظیر فاصله از نواحی کلیدی، ملاحظات ایمنی، دید نظارتی و هزینه‌های زیرساخت تعریف شده است. الگوریتم کلونی مورچگان با مجموعه‌ای از پارامترهای ثابت برای تمامی سناریوها اجرا شده تا امکان مقایسه مستقیم نتایج فراهم شود. در ادامه نتایج هر سناریو به صورت جداگانه ارائه و تحلیل می‌شود.

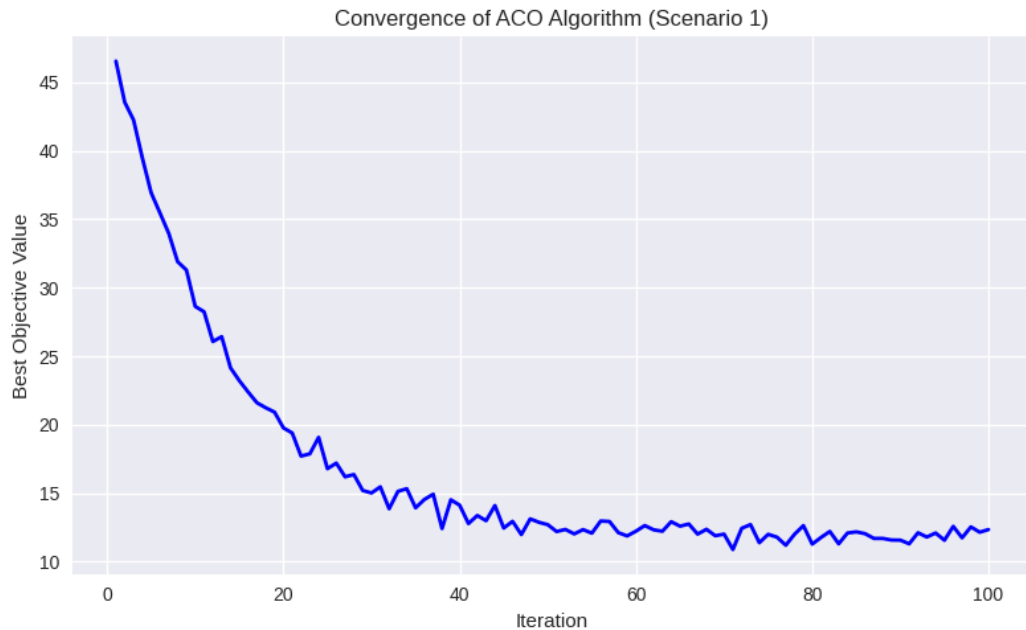
۱-۴- نتایج سناریوی اول: محیط با پیچیدگی کم

در سناریوی اول یک محیط کارگاهی نسبتاً ساده در نظر گرفته شده است که در آن تنها یک مانع کوچک و یک ناحیه کلیدی اصلی (ورودی کارگاه) وجود دارد. شبکه مدل سازی شده دارای ابعاد محدود بوده و فضای جستجوی مسئله نسبتاً کوچک است. هدف از طراحی این سناریو بررسی رفتار اولیه الگوریتم در شرایطی است که محدودیت های فضایی حداقل هستند.



شکل ۱: نقشه سایت ساده و نمایش شبکه، مانع کوچک، ورودی سایت و موقعیت بهینه ساختمان سرپرستی در سناریوی اول

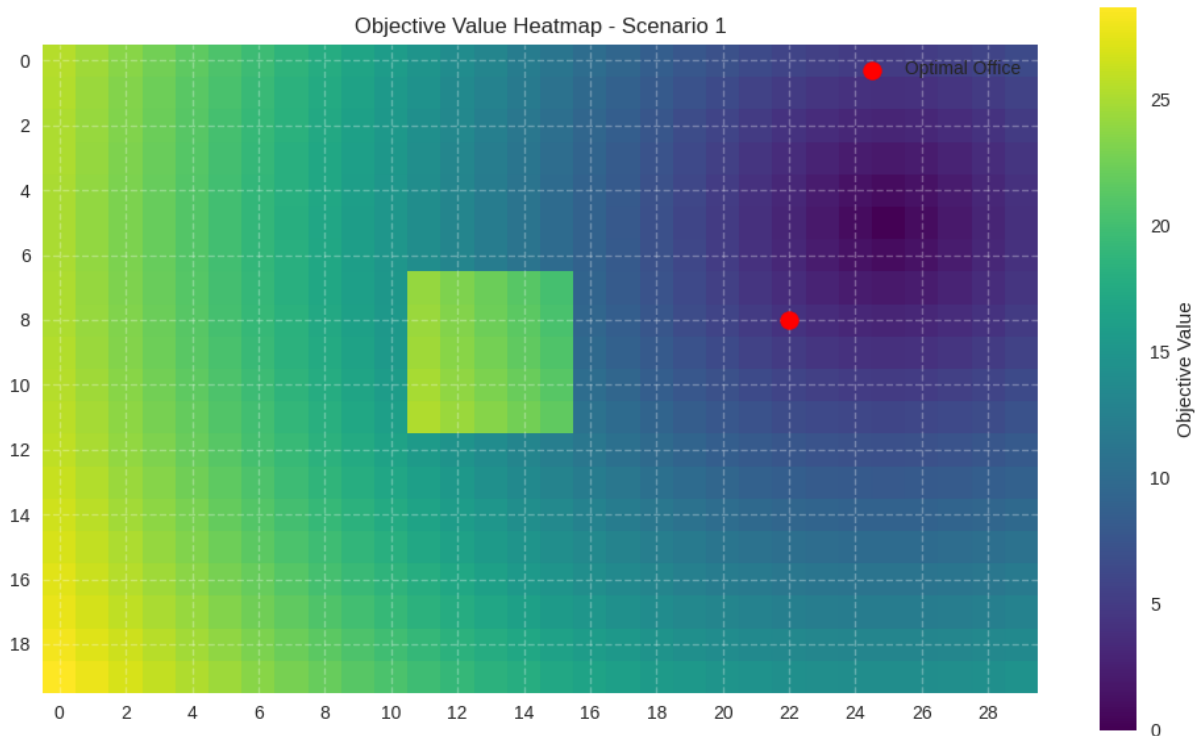
همان گونه که در شکل (۱) مشاهده می شود، الگوریتم توانسته است موقعیت مناسبی را در نزدیکی ورودی سایت انتخاب کند که علاوه بر دسترسی مناسب، فاصله ایمنی لازم از مانع موجود را نیز حفظ می کند. این موقعیت از نظر مدیریتی نیز منطقی است زیرا ساختمان سرپرستی باید امکان نظارت مناسب بر ورود و خروج تجهیزات و نیروی انسانی را داشته باشد. برای بررسی رفتار الگوریتم در فرآیند جستجو، نمودار همگرایی الگوریتم در طول تکرارها ترسیم شده است.



شکل ۲: نمودار همگرایی الگوریتم و روند کاهش مقدار تابع هدف در طول تکرارها در سناریوی اول

مطابق شکل (۲)، مقدار تابع هدف در تکرارهای ابتدایی با سرعت قابل توجهی کاهش یافته و الگوریتم در تعداد نسبتاً کمی از تکرارها به مقدار پایدار رسیده است. این موضوع نشان می‌دهد که در محیط‌های با پیچیدگی پایین، الگوریتم کلونی مورچگان قادر است به سرعت نواحی مناسب در فضای جستجو را شناسایی کند.

به منظور درک بهتر ساختار فضای جستجو، نقشه توزیع مقدار تابع هدف در کل شبکه نیز محاسبه و نمایش داده شده است.



شکل ۳: نقشه تابع هدف و نمایش رنگی مقدار تابع هدف در کل شبکه و نقطه انتخاب شده به عنوان محل بهینه در سناریوی اول

در شکل (۳) مشاهده می‌شود که نواحی با مقدار کمتر تابع هدف عمدتاً در نزدیکی ورودی سایت قرار گرفته‌اند و با افزایش فاصله از این ناحیه مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد. این الگو نشان می‌دهد که ساختار تابع هدف به خوبی توانسته است اهمیت دسترسی به نقاط کلیدی سایت را در فرآیند بهینه‌سازی منعکس کند.

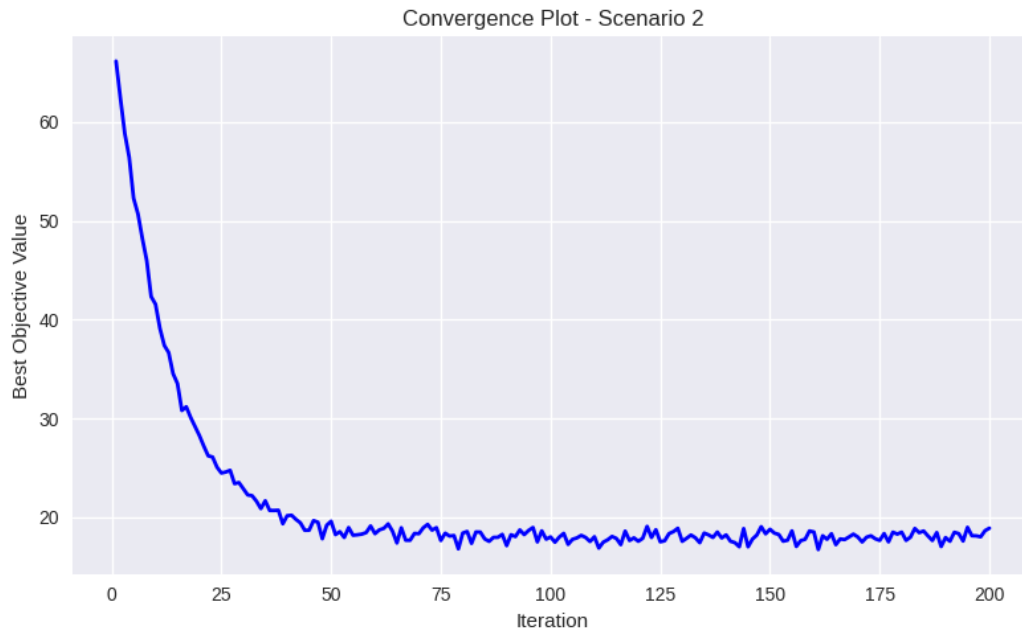
۴-۲- نتایج سناریوی دوم: محیط با پیچیدگی متوسط

در سناریوی دوم، ابعاد محیط کارگاه افزایش یافته و چندین ناحیه عملکردی مهم شامل ورودی کارگاه، انبار مصالح، محل بتن‌ریزی و محدوده فعالیت جرثقیل در مدل در نظر گرفته شده است. همچنین چندین مانع در نقاط مختلف سایت تعریف شده تا شرایطی نزدیک‌تر به محیط واقعی کارگاه ایجاد شود.



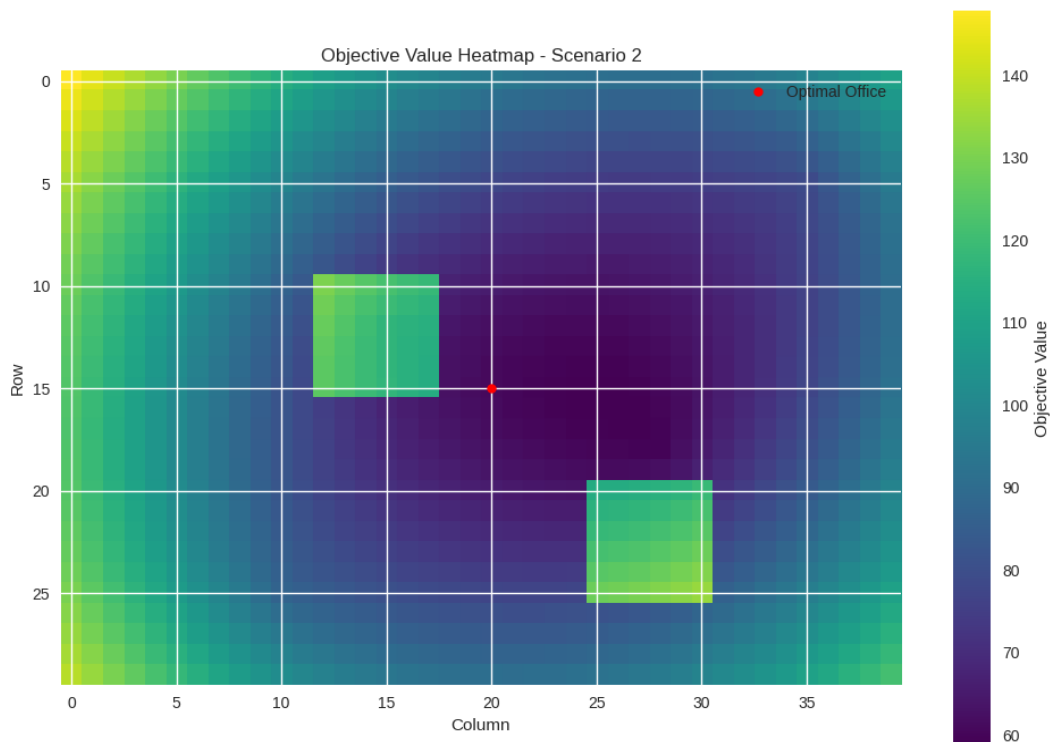
شکل ۴: نقشه سایت متوسط و نمایش شبکه، موانع پراکنده، نواحی کلیدی و موقعیت بهینه ساختمان سرپرستی در سناریوی دوم

بر اساس شکل (۴)، محل انتخاب شده برای استقرار ساختمان سرپرستی در نقطه‌ای قرار دارد که فاصله نسبتاً متعادلی با نواحی کلیدی مختلف کارگاه دارد. این موقعیت امکان دسترسی مناسب به بخش‌های مختلف سایت را فراهم کرده و در عین حال از موانع موجود فاصله ایمن دارد. نمودار همگرایی الگوریتم برای این سناریو در شکل (۵) ارائه شده است.



شکل ۵: نمودار همگرایی الگوریتم و روند کاهش مقدار تابع هدف در طول تکرارها در سناریوی دوم

همان طور که در شکل (۵) مشاهده می شود، کاهش مقدار تابع هدف در این سناریو نسبت به سناریوی اول تدریجی تر است و الگوریتم پس از تعداد بیشتری تکرار به مقدار پایدار می رسد. این موضوع ناشی از افزایش پیچیدگی مسئله و بزرگ تر شدن فضای جستجو است. همچنین نقشه توزیع مقدار تابع هدف در این سناریو نشان می دهد که چندین ناحیه با مقادیر نزدیک به بهینه در محیط سایت وجود دارد.

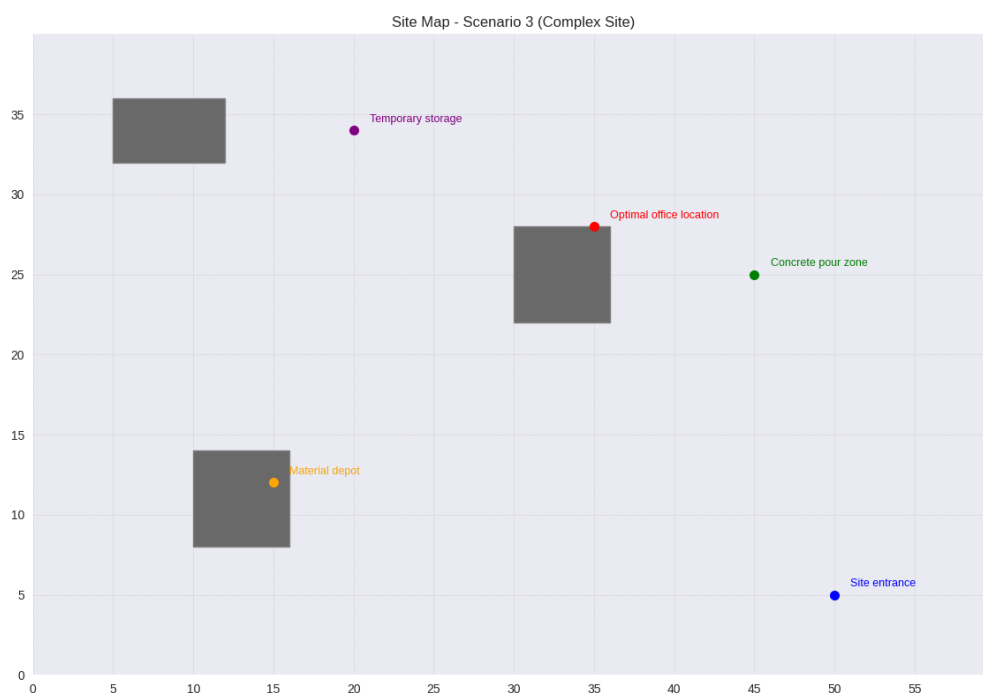


شکل ۶: نقشه تابع هدف و نمایش رنگی مقدار تابع هدف در کل شبکه و نقطه انتخاب شده به عنوان محل بهینه در سناریوی دوم

وجود چندین ناحیه با مقادیر نزدیک به بهینه نشان می‌دهد که در شرایطی که چند معیار تصمیم‌گیری به طور همزمان در نظر گرفته می‌شوند، ممکن است چند گزینه مکانی مناسب برای استقرار ساختمان سرپرستی وجود داشته باشد که از نظر عملکردی تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند.

۳-۴- نتایج سناریوی سوم: محیط با پیچیدگی بالا

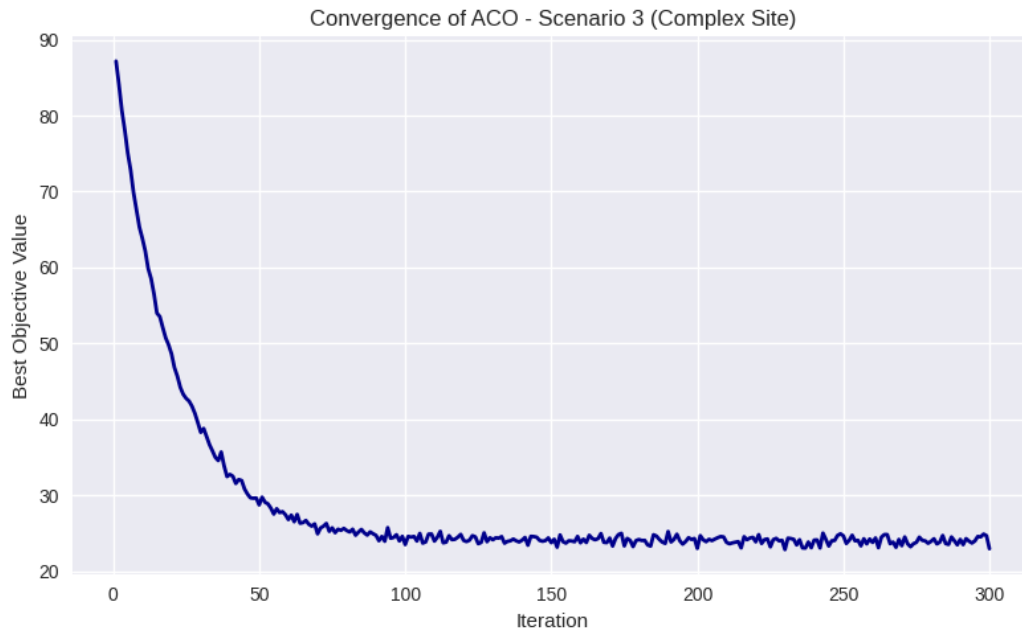
در سناریوی سوم پیچیدگی مسئله به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در این حالت علاوه بر افزایش ابعاد شبکه، تعداد موانع و نواحی کلیدی نیز بیشتر در نظر گرفته شده است تا شرایط یک کارگاه ساختمانی بزرگ و پرتراکم شبیه‌سازی شود.



شکل ۷: نقشه سایت پیچیده و نمایش شبکه، موانع پراکنده، نواحی کلیدی و موقعیت بهینه ساختمان سرپرستی در سناریوی سوم

مطابق شکل (۷)، مکان انتخاب شده برای ساختمان سرپرستی در ناحیه‌ای قرار گرفته است که تعادل مناسبی میان دسترسی به نواحی مختلف سایت و رعایت فاصله ایمن از موانع برقرار می‌کند.

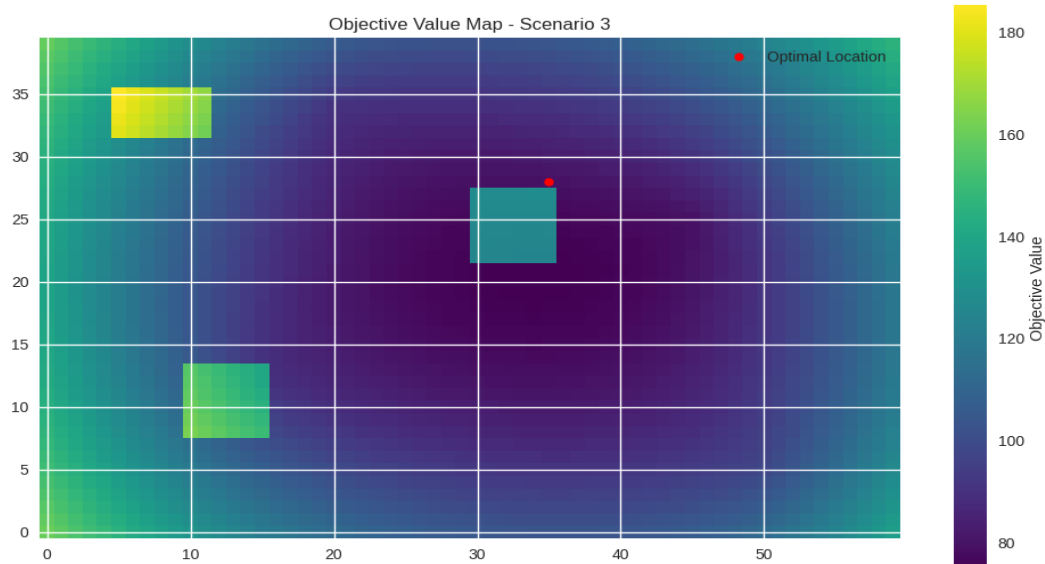
رفتار الگوریتم در فرآیند جستجو برای این سناریو در نمودار همگرایی در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸: نمودار همگرایی الگوریتم و روند کاهش مقدار تابع هدف در طول تکرارها در سناریوی سوم

همان طور که در شکل (۸) مشاهده می شود، روند همگرایی در این سناریو نسبت به دو سناریوی قبلی کندتر بوده و الگوریتم پس از تعداد بیشتری تکرار به مقدار پایدار دست یافته است. این موضوع بیانگر افزایش پیچیدگی فضای جستجو و وجود محدودیت های بیشتر در مسئله است.

در ادامه، نقشه توزیع مقدار تابع هدف در کل شبکه برای این سناریو نمایش داده شده است.



شکل ۹: نقشه تابع هدف و نمایش رنگی مقدار تابع هدف در کل شبکه و نقطه انتخاب شده به عنوان محل بهینه در سناریوی سوم

بر اساس شکل (۹)، چندین ناحیه با مقادیر نزدیک به بهینه در محیط مشاهده می شود. این امر نشان می دهد که در محیط های پیچیده، تعادل میان معیارهای مختلف می تواند منجر به ایجاد چندین گزینه مکانی رقابتی برای استقرار ساختمان سرپرستی شود.

۴-۴- مقایسه نتایج سه سناریو

به منظور مقایسه کمی عملکرد الگوریتم در سناریوهای مختلف، نتایج حاصل از اجرای الگوریتم در قالب جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: مقایسه نتایج سه سناریو اجرای الگوریتم کلونی مورچگان

معیار	سناریوی ۱ (ساده)	سناریوی ۲ (متوسط)	سناریوی ۳ (پیچیده)
ابعاد شبکه	۳۰×۲۰	۴۰×۳۰	۶۰×۴۰
تعداد نواحی کلیدی	۱ (ورودی سایت)	۴ (ورودی، بتن ریزی، انبار، جرثقیل)	۴+ (ورودی، بتن ریزی، انبار، انبار موقت)
تعداد موانع	۱ مانع کوچک	چند مانع پراکنده	چند مانع بزرگ و مسیرهای اضطراری
وزن نواحی کلیدی	ورودی با وزن بالا	وزن های متفاوت (ورودی مهم تر)	ترکیبی و چندمعیاره
تعداد مورچه ها	۳۰	۵۰	۸۰
تعداد تکرار	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰
تکرار تا همگرایی	۲۰~	۴۰~	۷۰~
مقدار تابع هدف نهایی	۱۲~	۱۸,۷~	۲۴,۳~
موقعیت بهینه	نزدیک ورودی	بین ورودی و انبار، دید بتن ریزی	مجموعه نقاط پارتو
نوع پاسخ	منفرد	منفرد	چندهدفه (پارتو)
زمان اجرا	بسیار کوتاه	متوسط	طولانی تر
پایداری نتایج	بسیار بالا	بالا	بالا

مطابق نتایج جدول (۱)، با افزایش پیچیدگی محیط کارگاه و افزایش ابعاد شبکه، تعداد تکرارهای لازم برای همگرایی الگوریتم افزایش یافته است. این روند افزایشی بیانگر افزایش طبیعی دشواری مسئله و گسترش فضای جستجو است. با این حال، الگوریتم در تمامی سناریوها توانسته است بدون نقض محدودیت های تعریف شده به پاسخ پایدار دست یابد. به طور کلی نتایج نشان می دهد که الگوریتم کلونی مورچگان از توانایی مناسبی برای حل مسئله مکان یابی ساختمان سرپرستی در کارگاه های ساختمانی برخوردار است و می تواند در محیط های با سطوح مختلف پیچیدگی عملکرد قابل قبولی ارائه دهد.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، کاربرد الگوریتم کلونی مورچگان برای تعیین مکان بهینه ساختمان سرپرستی در کارگاه های ساختمانی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی، سه سناریو با سطوح مختلف پیچیدگی شامل محیط ساده، متوسط و پیچیده طراحی و تحلیل شد. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که الگوریتم کلونی مورچگان قادر است با در نظر گرفتن محدودیت های فضایی و معیارهای مدیریتی مختلف، مکان مناسب برای استقرار ساختمان سرپرستی را به طور مؤثر شناسایی کند. بر اساس تحلیل نتایج به دست آمده، مهم ترین یافته های این پژوهش به شرح زیر قابل جمع بندی است:

۱- سرعت همگرایی بالا در محیط های با پیچیدگی کم

در سناریوی اول که نمایانگر یک کارگاه ساختمانی با محدودیت های فضایی اندک بود، الگوریتم در کمتر از ۲۰ تکرار به پاسخ پایدار دست یافت. مکان پیشنهادی در نزدیکی ورودی سایت و در فاصله ای ایمن از مانع موجود قرار داشت که نشان دهنده کارایی مناسب الگوریتم در محیط های ساده و کارگاه های کوچک است.

۲- توانایی ایجاد تعادل میان معیارهای مختلف تصمیم گیری

در سناریوی دوم که شامل چندین ناحیه عملیاتی مهم مانند ورودی کارگاه، انبار مصالح و محل بتن ریزی بود، الگوریتم پس از حدود ۴۰ تکرار به پاسخ پایدار رسید. محل پیشنهادی دسترسی متعادل به بخش های مختلف سایت فراهم می کرد و امکان

نظارت مناسب بر فعالیت‌های اصلی کارگاه را فراهم می‌ساخت. این نتیجه نشان‌دهنده توانایی الگوریتم در مدیریت مسائل چندمعیاره در برنامه‌ریزی چیدمان کارگاه است.

۳- کارایی مناسب در محیط‌های پیچیده و چندمحدودیت

در سناریوی سوم که با افزایش ابعاد شبکه، تعداد موانع و نواحی کلیدی همراه بود، الگوریتم پس از حدود ۷۰ تکرار به پاسخ پایدار رسید و چندین گزینه مکانی نزدیک به بهینه را شناسایی کرد. این ویژگی امکان انتخاب گزینه مناسب را بر اساس اولویت‌های اجرایی و مدیریتی فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که الگوریتم در شرایط پیچیده نیز عملکرد قابل قبولی دارد.

۴- پایداری و قابلیت اطمینان نتایج بهینه‌سازی

نتایج حاصل از هر سه سناریو نشان داد که الگوریتم کلونی مورچگان قادر است بدون نقض محدودیت‌های تعریف‌شده، پاسخ‌های پایدار و قابل اعتماد ارائه دهد. این موضوع بیانگر استحکام مدل پیشنهادی در مواجهه با شرایط مختلف محیطی است.

۵- افزایش زمان محاسبات با افزایش پیچیدگی مسئله

با افزایش ابعاد شبکه و تعداد معیارهای تصمیم‌گیری، زمان همگرایی الگوریتم افزایش یافت. با این حال، الگوریتم همچنان توانست در زمان قابل قبول به راه‌حل‌های مناسب دست یابد که نشان‌دهنده مقیاس‌پذیری مناسب روش پیشنهادی است.

به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که الگوریتم کلونی مورچگان می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌یار کارآمد در برنامه‌ریزی چیدمان کارگاه‌های ساختمانی و تعیین مکان بهینه ساختمان سرپرستی مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از این رویکرد می‌تواند به بهبود نظارت مدیریتی، افزایش کارایی عملیاتی و ارتقای سطح ایمنی در محیط‌های کارگاهی کمک کند.

منابع

- Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, 35(3), 268–308.
- Dorigo, M. (1996). The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 26(1), 29–41.
- Dorigo, M., & Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. MIT Press.
- Han, S., & Golparvar-Fard, M. (2015). Potential of big visual data and building information modeling for construction performance analytics. *Automation in Construction*, 61, 45–58.
- Koskela, L. (2000). *An exploration towards a production theory and its application to construction*. VTT Technical Research Centre of Finland.
- Sananayagam, S., Zhang, G., & Teizer, J. (2012). Real-time construction site layout planning using optimization algorithms. *Automation in Construction*, 24, 206–215.
- Kazemi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Shahnazari-Shahrezaei, P. (2015). Construction site layout optimization using metaheuristic algorithms. *Automation in Construction*, 51, 159–170.
- Dorigo, M., & Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. MIT Press.
- Harris, F., & McCaffer, R. (2013). *Modern construction management* (7th ed.). Wiley-Blackwell.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, 1942–1948.
- Tomlinson, M. (2010). *Foundation design and construction* (7th ed.). Pearson Education.
- Sananayagam, S., Zhang, G., & Teizer, J. (2012). Real-time construction site layout planning using optimization algorithms. *Automation in Construction*, 24, 206–215.
- Zhang, H., Li, H., & Tam, V. (2019). Site layout optimization in construction projects considering safety and accessibility. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(6), 04019025.