



## Optimization of Critical Infrastructure Location Using TTH Metaheuristic Algorithm with Cost-Benefit Principle Approach

Sayyed Ehsan Abtahi<sup>1</sup>, Davood Sedaghat Shayegan<sup>2\*</sup>, Ali Asghar Amirkardoust<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil engineering, Ro.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran Email Address: S.abtahi@iau.ac.ir

<sup>2</sup>Correspondence: Assistant Professor, Department of Civil engineering, Ro.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran. Email Address: da.sedaghat@iau.ac.ir

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Civil engineering, Ro.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran. Email Address: al.amirkardoust@iau.ac.ir

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 1 November 2025

Received in revised form: 7 December 2025

Accepted: 17 December 2025

Available online: 20 May 2026

#### Keywords:

Location

Passive Defense

Critical Infrastructures

Optimization

TTH Algorithm

### ABSTRACT

In recent decades, one of the country's fundamental challenges in the fields of defense and security has been the traditional view of the subject of passive defense. In such a way that planning for the location of infrastructures at the national level, cities or even construction sites, has been carried out without considering technological tools such as artificial intelligence and metaheuristic algorithms and solely based on the experience of experts in the field of passive defense engineering. Considering the classification of location problems as an NP-complete problem, traditional and precise mathematical methods, especially for medium and large-scale problems, cannot find the optimal solution in a reasonable time and while respecting all the principles of passive defense. As a result, researchers and scholars have been looking for alternative scientific methods to solve these problems that can provide the best answer at the right time. The best solution to this challenge is the use of metaheuristic algorithms. New metaheuristic methods have the potential to provide optimal solutions in a shorter time frame while respecting all the principles of location. Two case studies have been selected for this study to demonstrate the usefulness and efficiency of the TTH metaheuristic algorithm in optimizing location and layout of construction sites. In the first case study, the best, average and worst solutions were 12.538, 12.541 and 12.548 respectively, and in the second case study, the best solutions were 92.758, 96.386 and 100.014, which are more optimal than the results of the ECBO (Enhanced colliding bodies optimization), CBO (Colliding bodies optimization) and PSO (Particle swarm optimization) algorithms. Numerical studies show that the TTH algorithm can achieve promising results and has advantages in addressing complex optimization problems.

**Cite this article:** S. E. Abtahi, D. Sedaghat Shayegan, and A. Asghar Amirkardoust, "Optimization of Critical Infrastructure Location Using TTH Metaheuristic Algorithm with Cost-Benefit Principle Approach," Journal of Passive Defence, vol. 17, no. 1, pp. 193-211, 2026. DOI: <https://doi.org/10.47176/pd.2026.1599>



OPEN ACCESS

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University.

## Introduction

One of the defense and security challenges of every developing country is to protect critical service infrastructures from enemy threats. This can be achieved by reducing the vulnerability of infrastructures and increasing deterrence. One of the measures that can protect infrastructures from enemy threats or reduce their vulnerability is the correct location of this infrastructure. Studies in the construction industry have shown that adopting a proper location for critical facilities and infrastructure can reduce resource movement costs by 20 to 60 percent. When the costs associated with moving resources between departments are directly proportional to the distance traveled and the volume of goods moved, the location problem can be considered as a quadratic allocation problem (QAP). The quadratic allocation problem is one of the classic combinatorial optimization problems that is known for its diverse applications. It is considered one of the most challenging problems in classical combinatorial optimization. QAP problems are classified as non-deterministic polynomial-hard (NP-hard) problems due to their combinatorial complexity. Due to the complexity of infrastructure location planning problems, several methods have been proposed to address them. This problem can be effectively solved by researchers using two different approaches: exact algorithms and approximate algorithms. Exact algorithms, such as mathematical optimization procedures, are designed to find optimal solutions, but these methods are considered a traditional and time-consuming method. These techniques are not suitable for large projects with a large number of infrastructures ( $n > 15$ ). Approximate algorithms are classified into two groups: heuristic and metaheuristic algorithms. These algorithms are developed to obtain near-optimal solutions in a short and reasonable time for managing complex real-world projects. When the number of critical facilities or infrastructures exceeds 15, the problem is shown to be NP-complete. As the number of departments or critical infrastructures increases, the computation time increases exponentially ( $n^2$ ). Since it is not easy to obtain an optimal solution in large projects, researchers have addressed the construction site layout problem (CSLP) using metaheuristic techniques. Considering the above-mentioned cases, in a developing country like Iran, many service infrastructures are being built, and their correct location according to the principles of passive defense requires a lot of time. Therefore, as an innovation, the use of metaheuristic algorithms for the location of critical infrastructures minimizes this time. In this study, with the aim of taking a scientific look at observing the principles of passive defense in the form of objective functions using modern technologies, a developed metaheuristic algorithm (MHA) called "Time Travel to History" (TTH) has been used to solve the location problems of infrastructure facilities in a construction site. Two subproblems with two objective functions have been defined in the TTH method to solve the CSLP problem. Therefore, in this research, the objective function of the first problem is to reduce the cost of transferring materials and equipment between infrastructures. The objective function of the second problem is to reduce the distance employees travel between infrastructures or reduce the amount of employee traffic between infrastructures with the aim of increasing employee safety and health.

## Research Objectives and Questions

The research seeks to answer the following main question:

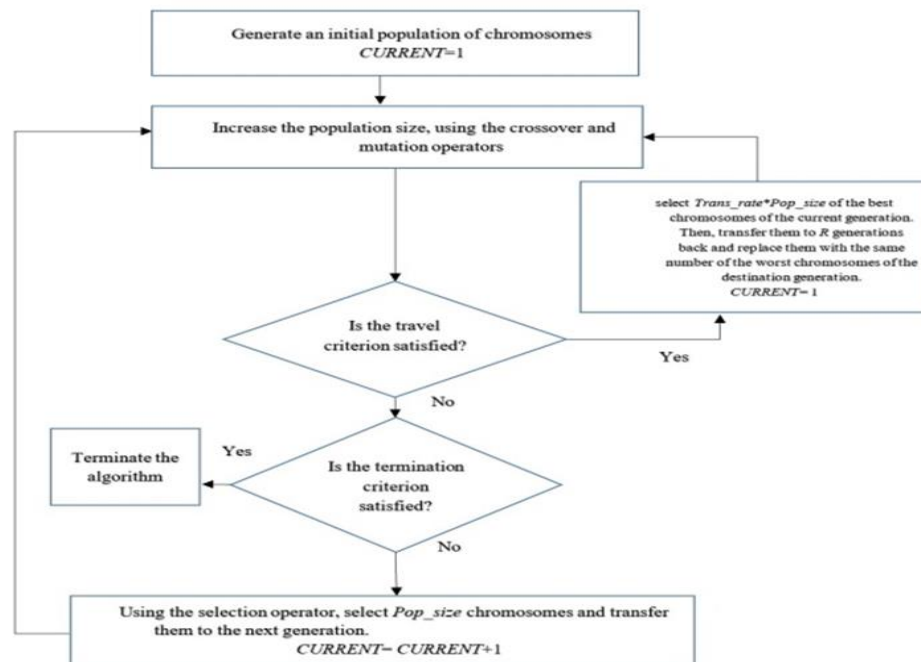
How can the principles of passive defense, which are presented as multi-purpose functions, be observed in the construction of critical infrastructure in a developing country?

The objectives are:

1. Introducing a scientific perspective to solving critical infrastructure location problems.
2. Solving non-deterministic polynomial hard (NP-hard) critical infrastructure location problems in optimal time and with solutions close to optimal.
3. Observing the principles of passive defense in the location of the country's critical infrastructure.

## Methodology

The present research method is a quantitative method that is carried out through metaheuristic algorithms as a tool. Optimization algorithms are computational methods that are used to find the best solution to a given problem in a set of constraints. In fact, these constraints have complicated these problems and cannot be answered in a traditional and accurate way. These constraints can be location principles or various passive defense principles that are defined as objective functions in the algorithm. In this study, an extended genetic algorithm called the TTH algorithm is used for construction site location planning. This algorithm is efficient and effective in finding the best solution to NP-hard problems, which is used in this paper for the purpose of construction site location planning. The process of the TTH algorithm is shown in the figure below.



TTH algorithm process

## Findings

The results of this research showed that the use of metaheuristic algorithms can be effective and efficient in the field of passive defense, and the following results were obtained:

- 1-The possibility of observing the criteria and principles of passive defense as objective functions in locating critical infrastructures
- 2-Reducing the cost and time for observing the principles of passive defense.
- 3-Proving the applicability of approximate methods and metaheuristic algorithms for solving problems related to passive defense.

## Discussion

In the first case study, 50 runs of self-determining optimization were performed with 200 iterations using PSO, CBO, ECBO, and TTH algorithms. Compared to ECBO, CBO, and PSO, the best solution, average solution, worst solution, and standard deviation of TTH were 12.538, 12.541, 12.548, and 1.4813, respectively. The results show that the TTH algorithm, in addition to identifying the best solution, provides more stable results than other algorithms

In the second case study, the problem was solved by running 30 separate optimization experiments in 1000 iterations to obtain statistically significant results through PSO, CBO, ECBO and TTH. The results show that TTH outperforms CBO, ECBO and PSO in terms of mean, worst case and standard deviation, with values of 380.96, 100.002 and 2396.4, respectively. These results indicate that TTH not only finds a better solution but also has a better convergence rate than the others

## Conclusions and Implications

The results of this study show that the TTH optimization algorithm, as a recently developed metaheuristic algorithm (MHA), can be used to address the construction site location planning (CSLP) problem. In addition to reducing the time and cost of solving NP-HARD polynomial problems for critical infrastructure location, this method has advantages over other metaheuristic algorithms such as CBO, ECBO, and PSO.

The results of this study provide valuable insights for policymakers, officials, and managers in various sectors of the country. A noteworthy point for managers in various sectors of the country is that in optimization issues, the criterion is not the large difference between the answers, but rather the improvement over previous efforts, and it is not necessary that all goals be achieved 100%. Here, it is important that infrastructures are located in such a way that their vulnerability is reduced by even 1 percent, considering the objective functions. Therefore, it is suggested that in order to improve work processes, the issue of optimization should be addressed more than before in all areas of management in the country, especially in the field of passive defense

## بهینه‌سازی مکانیابی زیرساخت‌های حیاتی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری<sup>۱</sup> TTH با رویکرد

### اصل هزینه- فایده

سید احسان ابطی<sup>۱</sup>، داود صداقت شایگان<sup>۲</sup>، علی اصغر امیرکاردوست<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران. رایانامه: S.abtahi@iau.ac.ir

<sup>۲</sup>استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: da.sedaghat@iau.ac.ir

<sup>۳</sup>استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران. رایانامه: al.amirkardoust@iau.ac.ir

#### مشخصات مقاله

##### تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰

#### چکیده

در دهه‌های اخیر یکی از چالش‌های اساسی کشور در حوزه‌های دفاعی و امنیتی، نگاه سنتی به موضوع پدافند غیرعامل بوده است. بطوریکه برنامه‌ریزی برای مکانیابی زیرساخت‌ها در سطح کشور، شهرها یا حتی کارگاه‌های ساخت، بدون توجه به ابزارهای فناورانه همچون هوش مصنوعی و الگوریتم‌های فراابتکاری و صرفاً بر اساس تجربه خبرگان در حوزه مهندسی پدافند غیرعامل صورت گرفته است. با توجه به طبقه‌بندی مسائل مکانیابی به عنوان یک مسئله NP-complete، روش‌های سنتی و دقیق ریاضی به خصوص برای مسائل با مقیاس متوسط و بزرگ نمی‌توانند راه‌حل بهینه را در زمان منطقی و با رعایت تمام اصول پدافند غیرعامل پیدا کنند. در نتیجه، محققان و پژوهشگران به دنبال روش‌های علمی جایگزین برای حل این مسائل بودند که بتواند بهترین پاسخ را در زمان مناسب ارائه دهد. بهترین راه حل برای این چالش، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری است. روش‌های فراابتکاری جدید پتانسیل ارائه راه‌حل‌های بهینه در یک بازه زمانی محدودتر با رعایت همه اصول مکانیابی را دارد. دو نمونه موردی برای این مطالعه انتخاب شده است تا سودمندی و کارایی الگوریتم فراابتکاری TTH در بهینه‌سازی مکانیابی و جانمایی سایت‌های ساخت نشان داده شود. در نمونه موردی اول، بهترین میانگین و بدترین راه‌حل‌ها به ترتیب ۱۲/۵۴۸، ۱۲/۵۴۱ و ۱۲/۵۴۸ و در نمونه موردی دوم، بهترین راه‌حل‌ها ۹۶/۳۸۶ و ۱۰۰/۰۱۴ به دست آمدند که نسبت به نتایج الگوریتم‌های ECBO (Enhanced colliding bodies optimization)، CBO (Colliding bodies optimization) و PSO (Particle swarm optimization) بهینه‌تر هستند. مطالعات عددی نشان می‌دهد که الگوریتم TTH می‌تواند به نتایج امیدوارکننده‌ای دست یابد و در پرداختن به مسائل بهینه‌سازی پیچیده مزایایی دارد.

#### کلیدواژه‌ها:

مکانیابی

پدافند غیرعامل

زیرساخت‌های حیاتی

بهینه‌سازی

الگوریتم TTH

**استناد:** ابطی، سید احسان، صداقت شایگان، داود، امیرکاردوست، علی اصغر، "بهینه‌سازی مکانیابی زیرساخت‌های حیاتی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری TTH با رویکرد اصل هزینه- فایده"، نشریه پدافند غیرعامل، دوره ۱۷، شماره ۱، صفحات ۲۱۱-۱۹۳، ۱۴۰۵.

DOI: <https://doi.org/10.47176/pd.2026.1599>

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).



<sup>۱</sup> Metaheuristic Algorithm (MHA)

<sup>۲</sup> Time Travel to History (سفر زمانی به تاریخ)

## ۱- مقدمه

یکی از چالش‌های دفاعی و امنیتی هر کشور در حال توسعه، مصون‌سازی زیرساخت‌های حیاتی خدمات‌رسان در مقابل تهدیدات دشمن است. این مهم از طریق کاهش آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها و افزایش بازدارندگی امکان‌پذیر خواهد بود. یکی از اقداماتی که می‌تواند زیرساخت‌ها را در برابر تهدیدات دشمن مصون نماید و یا آسیب‌پذیری آنها را کاهش دهد، مکانیابی درست این زیرساخت‌ها است.

مکانیابی زیرساخت‌ها، فعالیتی است جهت انتخاب مکانی مناسب برای کاربردهای خاص که قابلیت‌ها و توانایی‌های یک منطقه یا سایت ساخت را از لحاظ رعایت اصول پدافند غیرعامل، وجود زمین مناسب و کافی و نیز ارتباط آن کاربری خاص با کاربری‌های شهری را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد. به عبارت دیگر، مکان‌یابی انتخاب مکانی مناسب برای یک یا چند زیرساخت، با در نظر گرفتن ابعاد آن زیرساخت و محدودیت‌های موجود است به‌گونه‌ای که اهداف ویژه‌ای همچون حفظ جان انسان‌ها، تاب‌آوری زیرساختی، تداوم فعالیت‌های ضروری، تداوم کارکرد، بازدارندگی و ارتقاء پایداری ملی بهینه شود.

اهمیت مکانیابی زیرساخت‌های حیاتی زمانی مشخص می‌شود که حفظ جان مردم به عنوان مهم‌ترین عامل رشد و شکوفایی یک کشور و ارائه خدمات و همچنین استمرار این خدمات‌رسانی به جامعه منوط به افزایش تاب‌آوری و تداوم کارکرد این زیرساخت‌ها می‌باشد. مثلاً چنانچه زیرساخت‌های برق یک کشور مورد تهدید و آسیب جدی قرار بگیرد، اداره جامعه با اختلال مواجه می‌شود. بطوریکه تمام زیرساخت‌های مرتبط با برق، همچون خدمات‌رسانی به بیماران در بیمارستان‌ها، آبرسانی، گازرسانی و بسیاری از دیگر از شریان‌های حیاتی به‌صورت دومینووار در ارائه خدمات با چالش روبرو شده و جان انسان‌های زیادی به خطر می‌افتد.

بررسی به موقع مکانیابی تأسیسات یا زیرساخت‌های حیاتی، جنبه‌ای اساسی از ساخت کارآمد است که باید از ابتدا برای آن برنامه‌ریزی شود [۱-۲]. کارایی و سرعت عملیات ساخت با مکانیابی دقیق و حساب‌شده‌ی محل پروژه بهبود می‌یابد. برنامه‌ریزی چیدمان و مکانیابی زیرساخت‌های حیاتی در محل پروژه تحت تأثیر ملاحظات متعددی از جمله اصول پدافند غیرعامل، مساحت محدود محل، سازه‌ها و کاربری‌های مجاور،

دسترسی، موقعیت مکانی و موقعیت پروژه قرار دارد [۳]. هدف از برنامه‌ریزی مکانیابی زیرساخت‌ها یا سایت ساخت و ساز، مرتب کردن زیرساخت‌های دائم و موقت مانند دفاتر کار، محل‌های اسکان، انبارها و کارگاه‌های تولید است. به طوری که تمام الزامات طراحی و اصول مکانیابی برآورده شوند و حداکثر کیفیت طراحی از نظر ترجیحات طراحی، با رعایت اصل هزینه - فایده و کاهش هزینه‌های مرتبط با تعاملات بین این زیرساخت‌ها، حاصل شود [۴-۱]. مطالعات در صنعت ساخت و ساز نشان داده است که اتخاذ یک چیدمان مناسب برای تأسیسات و زیرساخت‌های حیاتی، می‌تواند هزینه‌های جابجایی مواد و مصالح را ۲۰ تا ۶۰ درصد کاهش دهد [۳]. زمانی که هزینه‌های مربوط به جابجایی منابع بین دپارتمان‌ها به طور مستقیم با مسافت طی شده و حجم کالاهای منتقل شده متناسب در نظر گرفته شود، مسئله چیدمان کارگاه ساخت را می‌توان به صورت یک مسئله تخصیص درجه دوم (QAP) در نظر گرفت [۵]. مسئله تخصیص درجه دوم یکی از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی کلاسیک است که به دلیل کاربردهای متنوع خود شناخته شده است. این مسئله به عنوان یکی از چالش برانگیزترین مسائل در بهینه‌سازی ترکیبی کلاسیک در نظر گرفته می‌شود [۶]. مسائل QAP به دلیل پیچیدگی ترکیبی‌شان که راه‌حل‌های جامع را برای مسائل مکانیابی نسبتاً بزرگ غیرعملی می‌کند، به‌عنوان مسائل سخت چندجمله‌ای غیرقطعی (NP-hard) طبقه‌بندی می‌شوند [۴]. به‌عنوان مثال، برای  $n$  تأسیسات یا زیرساخت حیاتی، تعداد حالات ممکن یا مکانیابی‌های احتمالی،  $n!$  است و این حالات با سرعتی بیشتر از  $e$  به توان  $n$  در حال رشد است. این عدد، حتی برای یک  $n$  کوچک (تعداد زیرساخت حیاتی کم)، عدد بسیار بزرگی است. بطوریکه بیش از ۳,۶۲۸,۰۰۰ مکان بالقوه برای ۱۰ تأسیسات زیربنایی یا زیرساخت حیاتی وجود دارد. برای ۱۵ تأسیسات، تعداد گزینه‌های مکانی یک عدد ۱۲ رقمی است. در مسائل واقعی، یک پروژه با  $(n=15)$  را می‌توان به عنوان یک پروژه کوچک در نظر گرفت [۷]. از آنجایی که مسئله مکانیابی سایت یک کار پیچیده است، مدیران بخش ساخت اغلب با استفاده از تجربیات قبلی، قوانین موقت و رویکرد اولویت به اولویت، به این چالش می‌پردازند که منجر به ناکارآمدی می‌شود [۱-۸]. بنابراین موفقیت یک پروژه به برنامه‌ریزی مؤثر چیدمان کارگاه ساخت (CSLP) بستگی دارد [۹]. در مراحل ابتدایی برنامه‌ریزی، دانش مدیریت پروژه به شناسایی عوامل مختلف تأثیرگذار در مکانیابی

یک ابتکار و نوآوری، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای مکانیابی زیرساخت‌های حیاتی، این زمان را به حداقل می‌رسانند. پژوهشگران زیادی در زمینه الگوریتم‌های فراابتکاری و کاربردهای آن در بخش‌های مختلف مهندسی فعالیت کرده‌اند، اما تاکنون به کاربرد این الگوریتم‌ها در حوزه پدافند غیرعامل پرداخته نشده است. در ادامه به بخشی از فعالیت‌های انجام شده در این زمینه پرداخته خواهد شد.

یه در سال ۱۹۹۵، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی را برای بهبود طرح‌بندی از پیش تعیین‌شده‌ی سایت ساخت و ساز مورد بررسی قرار داد. این مدل، تابع هدف هزینه‌ی کل را که شامل هزینه‌ی ساخت یک زیرساخت حیاتی در محل تعیین‌شده در سایت و هزینه‌ی تعامل با سایر مراکز حیاتی بود، را به حداقل رساند [۱۴].

ابرهارت و کندی در سال ۱۹۹۵، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) را به‌عنوان یک رویکرد فراابتکاری که از شبیه‌سازی رفتار اجتماعی پرندگان به سمت یک مکان مطلوب، پیروی می‌کرد، را برای مسائل بهینه‌سازی ارائه نمودند [۱۵].

ژانگ و وانگ در سال ۲۰۰۸، یک روش مبتنی بر الگوریتم PSO ارائه دادند. آنها مسئله CSLP را برای بهینه‌سازی چیدمان استاتیک سایت ساخت و ساز تحت یک تابع هدف واحد مدل‌سازی کردند تا تأسیسات یا زیرساخت‌های حیاتی با مساحت نابرابر را در مکان‌های از پیش تعیین‌شده جای دهند [۱۶].

ژو و لی در سال ۲۰۱۲، در مطالعه دیگری الگوریتم PSO را توسعه دادند. رویکرد آنها به ارائه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه (MOPSO) انجامید. این رویکرد برای حل مسئله CSLP پویای چندهدفه به کار گرفته شده است [۱۷].

لین و چنگ در سال ۲۰۱۲، یک الگوریتم زنبور عسل ذره‌ای ترکیبی، مبتنی بر هوش ازدحامی را برای بهینه‌سازی چیدمان سایت ساخت و ساز با یک تابع هدف واحد برای مکان‌یابی تأسیسات و زیرساخت‌های حیاتی در مکان‌های از پیش تعیین‌شده پیشنهاد کردند [۱۸].

دوریگو و همکاران در سال ۱۹۹۶، بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها (ACO) که یک الگوریتم فراابتکاری الهام‌گرفته از زیست‌شناسی است و رفتار مورچه‌ها در جستجوی غذا را شبیه‌سازی می‌کند، برای مسائل بهینه‌سازی ارائه کردند [۱۹].

لام و همکاران در سال ۲۰۰۷، از الگوریتم ACO برای حل مسئله مکانیابی تسهیلات یا زیرساخت‌های حیاتی در سایت

پرداخته و سپس بر اساس اهمیت و اثربخشی این عوامل به اولویت‌بندی اقدامات می‌پردازد. معمولاً روابط موارد بحرانی مطابق با استاندارد PMBOK تعیین می‌شود و می‌توان از این روابط، جدول پایه‌ای استخراج کرد [۱۰]. با توجه به پیچیدگی مسائل مربوط به برنامه‌ریزی مکانیابی زیرساخت‌ها، روش‌های متعددی برای رسیدگی به آنها ارائه شده است. این مسئله می‌تواند، توسط محققان با استفاده از دو رویکرد متفاوت به طور مؤثر حل شود: الگوریتم‌های دقیق و الگوریتم‌های تقریبی. الگوریتم‌های دقیق، مانند روبه‌های بهینه‌سازی ریاضی، برای یافتن راه‌حل‌های بهینه طراحی شده‌اند، اما این روش‌ها یک روش سنتی و زمان‌بر محسوب می‌شوند. این تکنیک‌ها برای پروژه‌های بزرگ با تعداد زیرساخت‌های زیاد ( $n > 15$ ) مناسب نیستند، زیرا به نیروی کار و محاسبات زیادی نیاز دارند. با این وجود، یافتن بهترین پاسخ به صورت دستی غیرعملی است. بنابراین، معمولاً از تکنیک‌های بهینه‌سازی تقریبی برای جستجوی راه‌حل مشکلات برنامه‌ریزی مکانیابی سایت استفاده می‌شود [۱۱].

روش‌های دقیق بر خلاف روش‌های تقریبی، فقط برای برنامه‌ریزی مکانیابی تعداد بسیار محدودی از تأسیسات و زیرساخت‌ها مؤثر است [۱۲]. الگوریتم‌های تقریبی به دو گروه طبقه‌بندی می‌شوند: الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری. این الگوریتم‌ها برای دستیابی به راه‌حل‌های نزدیک به بهینه در مدت زمان کوتاه و معقول برای مدیریت پروژه‌های پیچیده‌ی دنیای واقعی توسعه داده شده‌اند. هنگامی که تعداد تأسیسات یا مراکز حیاتی برای چیدمان یا مکانیابی در سایت کمتر از ۱۵ باشد، این دو نوع روش می‌توانند به یک راه‌حل بهینه برسند. زمانیکه تعداد تأسیسات یا زیرساخت‌های حیاتی از ۱۵ بیشتر شود، مسئله NP-complete نشان داده می‌شود [۱۳]. با افزایش تعداد دپارتمان‌ها یا زیرساخت‌های حیاتی، زمان محاسبات به صورت نمایی ( $2^n$ ) افزایش می‌یابد. از آنجایی که دستیابی به راه‌حل بهینه در پروژه‌های بزرگ آسان نیست، محققان با استفاده از تکنیک‌های فراابتکاری به مسئله چیدمان سایت ساخت و ساز (CSLP) پرداخته‌اند. الگوریتم‌های فراابتکاری زیادی وجود دارند که می‌توانند برای حل مسئله مکانیابی سایت ساخت و ساز مورد استفاده قرار گیرند [۱]. با توجه به موارد فوق‌الذکر، در یک کشور در حال توسعه همچون ایران، زیرساخت‌های خدمات‌رسان زیادی احداث می‌شود که برای مکانیابی درست آنها با توجه به اصول پدافند غیرعامل نیاز به زمان زیادی است. بنابراین به عنوان

CSLP) استفاده کرده بودند، با هدف توسعه مدلی برای انتخاب مناسب‌ترین الگوریتم که قادر به شناسایی راه‌حل بهینه مکانیابی کارگاه ساخت، مطابق با اهداف بهینه‌سازی مشخص شده باشد، مورد بررسی قرار دادند. این محققان دریافتند که تقریباً ۶۵٫۳٪ از مقالات بررسی شده بر استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای پرداختن به مسئله مکان‌یابی و هوشمندی در ساخت تمرکز دارند و این روند نشان‌دهنده علاقه روزافزون به این حوزه است. علاوه بر این، آنها نشان دادند که اهداف بهینه‌سازی و ارائه راه‌حل نیز نقش مهمی در انتخاب الگوریتم دارند [۳۰].

قدیری و همکاران در سال ۲۰۲۲، الگوریتم فراابتکاری (MHA) کرم شب‌تاب را به عنوان یک تکنیک بهینه‌سازی با اهداف چندگانه برای بهینه‌سازی دو تابع هدف ایمنی و هزینه کلی ایجاد و استفاده کردند [۳۱].

روچی و پیرا در سال ۲۰۲۴، الگوریتم‌های فراابتکاری اسب وحشی و آتش‌بازی را با هم ترکیب کردند تا یک الگوریتم بهینه‌سازی برای پرداختن به مسائل پیچیده NP-Hard توسعه دهند [۳۲].

کاوه و همکاران در سال ۲۰۲۴، ده الگوریتم فراابتکاری (MHA) الهام گرفته از فیزیک را در یک تحقیق مقایسه‌ای برای پاسخ به مسئله، یافتن محل ساخت (مکانیابی) مورد مطالعه قرار دادند. این الگوریتم‌ها بر اساس کارایی‌شان درجه‌بندی شدند. دو مطالعه موردی در رابطه با برنامه‌ریزی مکان‌یابی محل ساخت مطابق با این هدف بررسی شدند. نتایج نشان داد که هم الگوریتم بهینه‌سازی تبادل حرارت (TEO) و هم الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) قادر به ارائه راه‌حل‌های بهینه‌تری نسبت به سایر الگوریتم‌های مورد بررسی هستند [۳۳-۳۴-۳۵-۳۶-۳۷-۳۸].

با توجه به رشد علم، بهینه‌سازی در علوم مختلف در دنیای امروز اهمیت زیادی دارد. ابطیحی و همکاران در سال ۲۰۲۳ از طریق فرآیندهای بهینه‌سازی، افزایش تاب‌آوری در زیرساخت‌های حمل و نقل را دنبال نمودند [۳۹]. صمدی قره‌ورن و نصیری در سال ۲۰۲۵ به موضوع بهینه‌سازی با هدف افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع پرداختند [۴۰].

صداقت شایگان و مشایخی در سال ۲۰۲۵ با ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم (IWO) و الگوریتم جستجوی ممنوعه به عنوان یک روش بهینه‌سازی به حل مساله مکانیابی سایت‌های ساختمانی پرداختند [۴۱].

ساخت و ساز فرضی با اندازه متوسط استفاده کرده‌اند [۲۰]. یکی دیگر از الگوریتم‌های فراابتکاری (MHA)، الگوریتم ژنتیک (GA) است که فرآیند تکامل طبیعی را تقلید می‌کند و به طور معمول برای تولید راه‌حل‌های مفید برای مسائل بهینه‌سازی و جستجو استفاده می‌شود. GA با استفاده از تکنیک‌های الهام گرفته از تکامل طبیعی، مانند وراثت، جهش، انتخاب و تقاطع، راه‌حل‌هایی برای مسائل بهینه‌سازی تولید می‌کند. کاربردهای متعددی از GA برای حل مسئله چیدمان سایت ساخت و ساز پیشنهاد شده است [۱-۲۱-۲۲-۲۳-۲۴-۲۵-۲۶].

لی و لاو در سال ۲۰۰۰، تحقیقی را ارائه دادند که در آن از الگوریتم ژنتیک برای دستیابی به راه‌حل بهینه برای یک مسئله CSLP تک‌هدفه جهت جایگذاری تأسیسات یا مراکز حیاتی با مساحت نابرابر در مکان‌های از پیش تعیین‌شده استفاده شده است [۲۳].

عثمان و همکاران در سال ۲۰۰۳، در یک روش پیشنهادی، فناوری CAD را با الگوریتم ژنتیک ترکیب نمودند تا تخصیص زیرساخت‌های با مساحت غیرمساوی را در هر فضای موجود در یک مکان ساخت، بهینه کند [۲۷].

قراپی و همکاران در سال ۲۰۰۶ و لام و همکاران در سال ۲۰۰۷، از بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها (ACO) برای حل مسئله مکانیابی استاتیک سایت در یک پروژه ساخت استفاده نمودند [۲۰-۲۸].

نینگ و همکاران در سال ۲۰۱۰، به منظور پرداختن به مسائل برنامه‌ریزی پویای چیدمان سایت‌های ساخت از سیستم مورچه‌های حداکثر-حداقل (MMAS)، که نوعی معمول از تکنیک‌های بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها (ACO) است، استفاده کردند [۹].

کاوه و وزیرنیا در سال ۲۰۱۹، در یک مطالعه، برای حل مسئله مکان‌یابی محل ساخت از چهار الگوریتم فراابتکاری (MHA) استفاده نمودند: سیستم ذرات مرتعش بهبودیافته (EVPS)، روش بهینه‌سازی نهنگ، جستجوی سیستم بارگذاری شده و سیستم ذرات مرتعش. طبق نتایج تحقیق، الگوریتم سیستم ذرات مرتعش بهبودیافته (EVPS) عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها داشت [۲۹].

ژو و همکاران در سال ۲۰۲۰، مقاله را که از الگوریتم‌های فراابتکاری برای بهینه‌سازی مکانیابی کارگاه ساخت

### ۱-۱- برنامه‌ریزی مکانیابی سایت ساخت (CSLP)

همانطور که قبلاً ذکر شد، برنامه‌ریزی یک سایت ساخت را می‌توان با یک QAP (مسأله تخصیص درجه دوم) مقایسه کرد که در آن هزینه‌های مربوط به جابجایی منابع بین زیرساخت‌ها به صورت خطی با مسافت حمل و نقل افزایش می‌یابد [۵].

هدف از برنامه‌ریزی مکانیابی سایت ساخت، تخصیص مجموعه‌ای از امکانات یا زیرساخت‌های حیاتی از پیش تعیین شده (n) به مجموعه‌ای از مکان‌های از پیش تعیین شده (m) است، که در آن تعداد مکان‌ها باید برابر یا بیشتر از تعداد امکانات یا زیرساخت‌های حیاتی باشد. در مواردی که تعداد مکان‌های از پیش تعیین شده (m) از تعداد امکانات یا زیرساخت‌های از پیش تعیین شده (n) بیشتر باشد، مجموعه‌ای از امکانات یا زیرساخت‌های مجازی (m - n) برای اطمینان از برابری بین این دو اضافه می‌شود. با در نظر گرفتن فاصله و فرکانس (تعداد رفت و برگشت در روز) برابر با صفر برای این تأسیسات «ساختگی»، حضور آنها هیچ تأثیری بر نتایج مکانیابی نخواهد داشت. در سناریوهایی که هر یک از مکان‌های از پیش تعیین شده ظرفیت قرارگیری هر یک از تأسیسات زیربنایی را دارند، چالش مکانیابی تأسیسات را می‌توان به عنوان یک مسئله مکانیابی تأسیسات با مساحت برابر در نظر گرفت. با این حال، اگر مکان‌های از پیش تعیین شده خاصی فقط بتوانند تأسیسات خاصی را در خود جای دهند، مسئله به یک مسئله مکانیابی تأسیسات با مساحت نابرابر تبدیل می‌شود که با تغییرات در مساحت مکان‌های از پیش تعیین شده مشخص می‌شود. معمولاً، مسائل مکانیابی با مساحت نابرابر در مقایسه با مسائل مکانیابی با مساحت برابر، پیچیدگی بیشتری دارند، که عمدتاً به دلیل معرفی محدودیت‌های اضافی در فرمول‌بندی مسئله است [۲۳].

### ۱-۲- تابع هدف (Objective Function)

جدول (۱) اهداف چند مدل و توابع هدف مرتبط با آن را نشان می‌دهد که با استفاده از معادله ۱ و فرم کلی ارائه شده توسط عثمان و همکاران محاسبه شده‌اند [۲۷].

$$\text{Minimize } F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \times d_{ij} \quad (1)$$

که در آن F تابع هدف است؛ n تعداد امکانات (زیرساخت‌های حیاتی) و مکان‌ها است. ضریب  $W_{ij}$  یا هزینه حمل و نقل واقعی به ازای هر واحد فاصله بین مراکز i و j (با در نظر گرفتن تعداد سفرهای انجام شده) و  $d_{ij}$  فاصله بین مراکز i و j است.

در مطالعه حاضر، به عنوان یک اقدام ابتکاری، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری که از حدود سی سال پیش بصورت گسترده در حوزه‌های مهندسی بکار گرفته شده است، وارد حوزه پدافند غیرعامل می‌شود. مکانیابی زیرساخت‌ها با توجه به اصول پدافند غیرعامل کار ساده‌ای به شمار نمی‌رود و نیاز به زمان بسیار طولانی در حد میلیاردها سال دارد که بدون استفاده از کامپیوتر و ابزارهای نوین امکان‌پذیر نیست. در این مطالعه با هدف نگاه علمی به رعایت اصول پدافند غیرعامل به شکل توابع هدف با استفاده از فناوری‌های نوین، از یک الگوریتم فراابتکاری (MHA) توسعه‌یافته به نام «سفر زمانی به تاریخ» (TTH) برای حل مسائل مکان‌یابی تأسیسات زیربنایی در یک سایت ساخت استفاده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی سفر زمانی به تاریخ توسط بهشتی‌نیا و طاهری در سال ۲۰۱۹ توسعه داده شده است [۴۱]. دو زیرمسئله با دو تابع هدف در روش TTH برای حل مسئله CSLP تعریف شده‌اند: همانطور که در عنوان مقاله اشاره شده است، با توجه به اسناد بالادستی کشور، اصل هزینه - فایده به عنوان یکی از اصول مهم پدافند غیرعامل می‌بایست در تمام پروژه‌های ساخت مدنظر قرار گیرد. لذا در این پژوهش، تابع هدف مساله اول، کاهش هزینه انتقال مواد و مصالح بین زیرساخت‌ها است. تابع هدف مساله دوم، کاهش فاصله سفر کارمندان بین زیرساخت‌ها یا کاهش میزان تردد کارکنان بین زیرساخت‌ها است. کاهش تردد کارکنان بین زیرساخت‌های خدمات رسانی، افزایش ایمنی و سلامت کارکنان و همچنین کاهش هزینه‌ها را در پی خواهد داشت. از طرفی کاهش هزینه حمل مواد و مصالح با توجه به گستردگی زیرساخت‌های کشور، به رعایت اصل هزینه-فایده کمک خواهد کرد. سپس نتایج خود را با نتایج الگوریتم‌های دیگر مقایسه می‌کنیم تا نشان دهیم که این ابزار برای حل این مسائل بهینه‌سازی مناسب‌تر است. ساختار کلی مقاله به پنج بخش تقسیم شده است: مسئله برنامه‌ریزی مکانیابی برای سایت‌های ساخت به طور خلاصه در بخش اول شرح داده شده است. فرآیند حل مسئله با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در بخش دوم شرح داده شده است. الگوریتم TTH در فصل سوم توضیح داده شده است. یافته‌های حاصل از فرآیند حل مسئله در بخش چهارم جدول‌بندی شده است. در بخش ۵ نیز نتیجه‌گیری آمده است.

جدول (۱): انواع مختلف توابع هدف در تحقیقات قبلی

ردیف	منبع	تابع هدف
۱	Yeh (1995)	به حداقل رساندن هزینه ساخت زیرساخت و هزینه تعاملی بین زیرساخت
۲	Cheung et al. (2002) and Tam et al. (2001)	به حداقل رساندن کل هزینه‌های حمل و نقل منابع بین زیرساخت‌ها
۳	Li and Love (1998, 2000)	به حداقل رساندن تعداد دفعات رفت و آمد پرسنل سایت زیرساختی
۴	Zouein and Tommelein (1999)	به حداقل رساندن کل هزینه‌های حمل و نقل منابع بین زیرساخت‌ها و کل هزینه‌های جابجایی
۵	Hegazy and Elbeltagi (1999)	به حداقل رساندن کل هزینه‌های حمل و نقل منابع بین زیرساخت‌ها

### ۱-۳- نمایش طرح‌بندی

هر گزینه چیدمان بالقوه را می‌توان با یک ماتریس جایگشت  $n \times n$  (که در آن  $n$  نشان دهنده تعداد زیرساخت‌ها یا مکان‌ها است) نامگذاری کرد، که ردیف‌ها و ستون‌ها به ترتیب نشان دهنده زیرساخت‌ها و مکان‌ها هستند. این ماتریس جایگشت امکان تخصیص یک ورودی منفرد '۱' را در هر ردیف و ستون فراهم می‌کند، در حالی که ورودی‌های باقی مانده همگی صفر هستند. به دلیل رابطه یک به یک بین زیرساخت‌ها و مکان‌ها، می‌توان از دنباله‌ای از اعداد صحیح به عنوان جایگزینی کارآمدتر، مشابه آنچه در جدول (۲) نشان داده شده است، استفاده کرد. هر موقعیت یا ورودی در دنباله نشان دهنده یک زیرساخت است و عدد صحیح نشان دهنده مکان قرارگیری زیرساخت مربوطه است. با این حال، استفاده از نمایش مبتنی بر توالی ممکن است منجر به راه‌حل‌های غیرعملی شود که در آن چندین ورودی در دنباله دارای عدد صحیح یکسانی باشند که به عنوان همپوشانی شناخته می‌شود. در نتیجه، هنگام استفاده از روش‌های فراابتکاری، انجام برخی تنظیمات در الگوریتم برای رسیدگی به این غیرعملی بودن ضروری است [۲۵-۲۲-۱۶].

در جدول (۲) می‌توان یک نمونه از ماتریس جایگشتی  $10 \times 10$  را مشاهده نمود که تعداد زیرساخت‌ها و مکان‌ها برابر ۱۰ است.

جدول (۲): یک نمونه ماتریس جایگشت  $n \times n$  برای مسائل CSLP

F10	F9	F8	F7	F6	F5	F4	F3	F2	F1
9	5	8	7	4	6	1	3	10	2

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- الگوریتم‌های فراابتکاری Meta-Heuristic Algorithms (MHA)

الگوریتم‌های بهینه‌سازی، روش‌های محاسباتی هستند که برای یافتن بهترین راه‌حل برای یک مسئله معین در مجموعه‌ای از محدودیت‌ها استفاده می‌شوند. در واقع این محدودیت‌ها باعث پیچیدگی این مسائل شده است و بصورت سنتی و با روش‌های دقیق نمی‌توان به آنها پاسخ داد. این محدودیت‌ها می‌تواند اصول مکانیابی و یا اصول مختلف پدافند غیرعامل باشند که به‌صورت توابع هدف در الگوریتم تعریف می‌شوند. این الگوریتم‌ها به‌طور گسترده در زمینه‌های مختلفی مانند مهندسی، امور مالی، یادگیری ماشین و بسیاری دیگر از حوزه‌ها کاربرد دارند و زمان محاسبات را با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود به چند دقیقه یا ثانیه کاهش می‌دهند. در این مطالعه، از این کاربرد الگوریتم‌های فراابتکاری در حوزه مهندسی پدافند غیرعامل استفاده می‌شود. از یک الگوریتم ژنتیک توسعه‌یافته به نام الگوریتم TTH برای برنامه‌ریزی مکانیابی سایت‌های ساخت استفاده می‌شود. همانطور که مشخص است، هر الگوریتم ویژگی‌های خاصی دارد، که می‌تواند آنرا نسبت به سایر الگوریتم‌ها متمایز نماید. خاصیت مکانیسم برگشت به عقب در این الگوریتم و جایگزینی پاسخ‌های غیربهینه با پاسخ‌های بهینه از ویژگی‌های مهم این الگوریتم به حساب می‌آید. این الگوریتم در یافتن بهترین راه‌حل برای مسائل NP-hard، کارآمد و مؤثر است که در این مقاله با هدف برنامه‌ریزی مکانیابی سایت ساخت مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۲-۲- الگوریتم‌های بهینه‌سازی سفر زمانی به تاریخ

#### TTH

الگوریتم (سفر زمانی به تاریخ) از مفهوم سفر به گذشته الهام گرفته شده است. اگرچه سفر در زمان واقعی هنوز امکان‌پذیر نیست، اما مفهوم آن در الگوریتم ژنتیک قابل اجرا است. برای دستیابی به این هدف، برخی اصلاحات در الگوریتم ژنتیک معمول انجام می‌شود. هنگامی که یک معیار خاص، که به عنوان معیار سفر شناخته می‌شود، برآورده شود، تعدادی کروموزوم از یک نسل انتخاب شده و به چند نسل قبل منتقل می‌شوند. این فرآیند تا زمانی که معیار خاتمه الگوریتم محقق شود، ادامه می‌یابد.

افزایش دهید.

مرحله ۳ معیار سفر:

اگر معیار سفر برآورده شود ( $CURRENT > GB$ )، مرحله ۶ را انتخاب کنید؛ در غیر این صورت، مرحله ۴ را انتخاب کنید.

مرحله ۴ خاتمه:

اگر معیار خاتمه برآورده شود، الگوریتم را خاتمه دهید؛ در غیر این صورت، مرحله ۵ را انتخاب کنید.

مرحله ۵ ایجاد نسل بعدی:

با استفاده از عملگر انتخاب، کروموزوم‌های  $Pop\_size$  را انتخاب کرده و آنها را به نسل بعدی منتقل کنید.

$CURRENT = CURRENT + 1$  را در نظر بگیرید و به مرحله ۲ برگردید.

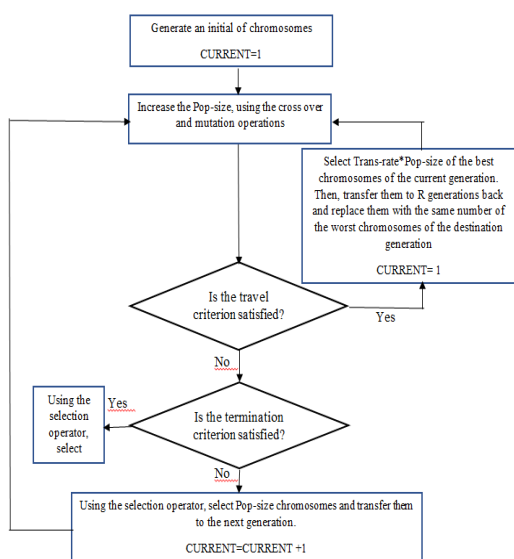
مرحله ۶ مکانیسم بازگشت به نسل‌های قبلی:

$Trans\_rate * Pop\_size$  بهترین کروموزوم‌های نسل فعلی را انتخاب کرده و آنها را به  $R$  نسل قبل منتقل کنید. سپس، آنها را با همان تعداد از بدترین کروموزوم‌های نسل مقصد جایگزین کنید. فرض کنید  $CURRENT = 1$  باشد و به مرحله ۲ برگردید.

### ۳-۲- تنظیمات پارامترها

مقادیر خاص پارامترهای الگوریتم با استفاده از روش آزمایش طاهری و بهشتی‌نیا (۲۰۱۹) بدست می‌آیند.

$Pop\_size = 50$ ,  $Cross\_rate = 0.5$ ,  $Mut\_rate = 0.5$ ,  $GB = 10$ ,  $R = 5$ , and  $Trans\_rate = 0.2$



شکل (۱): نمودار فرآیند الگوریتم TTH [۴۱].

پارامترهای اصلی الگوریتم سفر زمانی به تاریخ به شرح زیر است:

$Pop\_size$ : اندازه جمعیت اولیه را نشان می‌دهد.

$Cross\_rate$ : تعداد دفعات تکرار عملیات تقاطع را تعیین می‌کند  $(Cross\_rate * Pop\_size)$ .

$Mut\_rate$ : تعداد دفعات تکرار عملیات جهش را تعیین می‌کند  $(Mut\_rate * Pop\_size)$ .

$STOP$ : یک عدد تکرار، که معیار خاتمه الگوریتم را نشان می‌دهد. اگر بهترین کروموزوم در نسل فعلی پس از توقف تکرارهای متوالی بهبود نیابد، الگوریتم خاتمه می‌یابد.

$ELIT$ : عملگر انتخاب را در این الگوریتم مشخص می‌کند. درصدی از کروموزوم‌های نسل فعلی که مقادیر تابع هدف بهتری نسبت به سایرین دارند، برای رفتن به نسل بعدی انتخاب می‌شوند که با  $ELIT$  نشان داده می‌شود. کروموزوم‌های باقیمانده به طور تصادفی برای رفتن به نسل بعدی با استفاده از انتخاب چرخ رولت انتخاب می‌شوند. در الگوریتم  $TTH$ ، یک معیار اضافی و دو پارامتر دیگر به  $GA$  اضافه می‌شوند که به شرح زیر است:

معیار سفر: پس از برآورده شدن معیار سفر، فرآیند آغاز می‌شود. در این مطالعه، معیار سفر، شمارنده نسل ( $CURRENT$ ) است. این معیار، زمانی برآورده می‌شود که شمارنده نسل به عدد مشخصی برسد که با  $GB$  نشان داده می‌شود.

$Trans\_rate$ : تعداد کروموزوم‌های نسل فعلی را که باید به نسل‌های قبلی سفر کنند، تعیین می‌کند. به عبارت دیگر، به تعداد  $Pop\_size * Trans\_rate$  از بهترین کروموزوم‌های نسل‌های فعلی انتخاب و به نسل‌های قبلی منتقل می‌شوند.

این پارامتر تعیین می‌کند که کروموزوم‌ها باید به چند نسل قبل سفر کنند. فرض کنید  $CURRENT$  تعداد نسل فعلی باشد. سپس، کروموزوم‌های انتخاب شده باید به نسل  $CURRENT - R$  سفر کنند. در این حالت، به تعداد  $Pop\_size * Trans\_rate$  از بدترین کروموزوم‌های نسل  $CURRENT - R$  حذف و با کروموزوم‌های انتخاب شده جایگزین می‌شوند.

مراحل پیاده‌سازی الگوریتم  $TTH$  به شرح زیر است:

مرحله ۱ جمعیت اولیه:

تعدادی کروموزوم تصادفی به عنوان جمعیت اولیه ایجاد کنید و  $CURRENT = 1$  را در نظر بگیرید. ( $CURRENT$  تعداد نسل فعلی است).

مرحله ۲ تقاطع و جهش:

جمعیت نسل فعلی را با استفاده از عملگرهای جهش و تقاطع

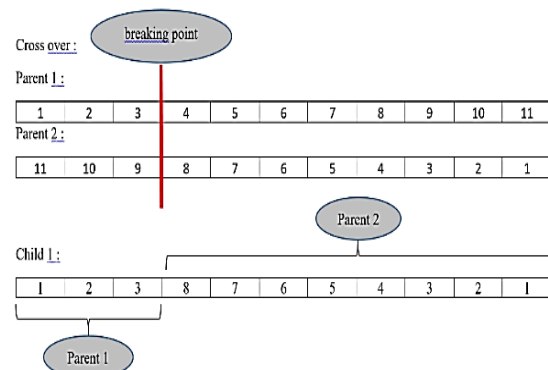
## ۴-۲- کاربرد مدل فراابتکاری

در TTH، هر  $F_i$  کاندید راه‌حل که شامل تعدادی متغیر (یعنی  $F_i = \{F_{ij}\}$ ) است، به عنوان یک ژن در نظر گرفته می‌شود. در مسائل CSLP، هر "ژن" به عنوان دنباله‌ای از متغیرها در نظر گرفته می‌شود که نشان‌دهنده یک راه‌حل مکانیابی است و دنباله‌های مختلف نشان‌دهنده راه‌حل‌های مکانیابی مختلف هستند. هر متغیر در دنباله نشان‌دهنده یک زیرساخت است و مقدار متغیر نشان‌دهنده مکانی است که به زیرساخت مربوطه اختصاص داده شده است. از آنجایی که هر مکان قادر به دریافت فقط یک زیرساخت است، ژن‌ها نباید مقادیر تکراری داشته باشند. نقض این نکته منجر به یک راه‌حل غیرممکن می‌شود. با این حال، همه متغیرهای یک ژن در GA (الگوریتم ژنتیک) و TTH (سفر زمانی به تاریخ) مستقل از یکدیگر هستند. به‌روزرسانی مقدار و موقعیت یک ژن به طور مستقل انجام می‌شود. در صورتیکه بیش از یک متغیر در یک ژن به‌روزرسانی شده باشد، ممکن است مقدار یکسانی داشته باشند. بنابراین، برای غلبه بر این غیرممکن بودن، باید برخی اصلاحات در مکانیسم به‌روزرسانی انجام شود. مکانیسم به‌روزرسانی ژن‌ها به شرح زیر است:

## ۵-۲- عملیات تقاطع و جهش

### (Cross Over and Mutation Operation)

#### ۱-۵-۲- عملیات تقاطع (Cross Over)

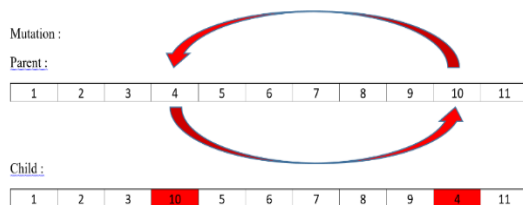


شکل (۲): فرآیند تقاطع در الگوریتم TTH

در این عملیات، به طور تصادفی دو کروموزوم را به عنوان والدین از نسل فعلی انتخاب می‌کنیم و سپس یک نقطه شکست همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، روی دو کروموزوم والد اول و والد دوم ایجاد می‌کنیم. کروموزوم فرزند

حاصل ترکیب ژن‌های والد اول و والد دوم است بطوریکه ژن‌های والد اول که قبل از نقطه شکست هستند و ژن‌های والد دوم که بعد از نقطه شکست هستند را به ارث ببرد. فرزند متولد شده ممکن است دو ژن تکراری داشته باشد، که ژن‌های تکراری را با کدنویسی مکانیسمی در MATLAB حذف می‌کنیم.

#### ۲-۵-۲- عملیات جهش (Mutation)



شکل (۳): فرآیند جهش در الگوریتم TTH

برای انجام عملیات جهش، باید به طور تصادفی یک کروموزوم والد (همان سایتی که زیرساخت‌ها در آن مکانیابی شده‌اند) را از نسل فعلی انتخاب و سپس به طور دلخواه و اتفاقی ۲ ژن (زیرساخت‌های مکانیابی شده در سایت) از این کروموزوم والد انتخاب شود. فرزند متولد شده نتیجه جابجایی این دو ژن انتخاب شده از کروموزوم والد خواهد بود، این فرآیند با کد نویسی در MATLAB صورت می‌پذیرد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است.

## ۳- نتایج و بحث

### ۱-۳- نمونه‌های موردی برنامه‌ریزی مکانیابی سایت

#### (CSLP)

دو مطالعه موردی برای نشان دادن کاربردی بودن و اثربخشی روش فراابتکاری TTH در بهینه‌سازی طرح‌بندی سایت‌های ساخت انتخاب شده‌اند. سپس نتایج این مطالعات موردی با نتایج حاصل از بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، بهینه‌سازی اجسام برخوردی (CBO) و بهینه‌سازی اجسام برخوردی بهبود یافته (ECBO) مقایسه می‌شوند. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در این مطالعات موردی در جدول (۳) ارائه شده است. الگوریتم در روی یک رایانه شخصی با پردازنده Intel(R)Core™ i7 CPU ۱/۷۳ گیگاهرتز) و ۶ گیگابایت رم تحت سیستم عامل ویندوز ۷ (نسخه Home 64 بیتی) انجام شده است. مطالعات موردی دقیق و نتایج به شرح زیر است:

گرفته می‌شوند و به طور دائمی در موقعیت‌های از پیش تعیین شده قرار گرفته‌اند.

#### تابع هدف مطالعه موردی اول

رعایت اصل هزینه - فایده در پدافند غیرعامل و همچنین افزایش سطح ایمنی و سلامت انسان‌ها از طریق کاهش کل مسافتی که کارمندان باید در سایت و بین زیرساخت‌ها طی کنند، هدف اصلی این مطالعه است. رابطه ۲ کل زمان سفر را همانطور که توسط لی و لائو (۱۹۹۸) تعیین شده است [۲۲]، نشان می‌دهد:

$$\text{Minimize TD} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n x_{ik} \times x_{jl} \times f_{if} \times d_{kl}$$

$$\text{Subjected to } \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1$$

(۲)

وقتی مرکز  $i$  در موقعیت  $k$  تعریف می‌شود، متغیر  $x_{ik}$  برابر با (۱) است؛ در غیر این صورت، برابر با (۰) است. همین ایده در مورد متغیر  $x_{jl}$  نیز صدق می‌کند. ضریب  $f_{if}$  نشان می‌دهد که کارمندان روزانه چند بار بین مراکز  $i$  و  $j$  سفر می‌کنند. کل دوره سفر روزانه برای کارمندان شاغل توسط TD با استفاده از ضریب  $d_{kl}$  تعیین می‌شود که فواصل بین موقعیت‌های  $k$  و  $l$  را نشان می‌دهد.

#### فاصله سفر و تعداد دفعات سفر بین زیرساخت‌ها

فاصله سفر بین مکان زیرساخت‌های از پیش تعیین شده و همچنین تعداد دفعات سفر بین این زیرساخت‌ها به منظور برنامه‌ریزی مکانیابی زیرساخت‌ها در سایت ساخت بر اساس کار پژوهشی لی و لائو در سال ۱۹۹۸ به ترتیب در جداول (۴) و (۵) ارائه شده است [۲۲].

جدول (۳): مقادیر پارامترهای الگوریتم‌های مختلف مورد استفاده در

#### مطالعات موردی

TTH	ECBO	CBO	PSO
Population-size=50	Population-size=50	Population-size=50	Population-size=50
CR=0/5	CM=5	-	Inertia weight=0/4-0/9
MR=0/5	Pro=0/3	-	C1=C2=2

#### ۳-۱-۱- مطالعه موردی اول

این مثال واقعی که از کار مطالعاتی لی و لائو (۱۹۹۸) گرفته شده است [۲۲]، نمونه‌ای از یک پروژه متوسط است. همانطور که قبلاً هم توضیح داده شد، در طرح‌های آمایش سرزمین زیرساختی که تعداد زیرساخت‌های حیاتی زیاد است و ممکن است، اهداف و اصول مکانیابی و یا پدافند غیرعامل بیش از یک اصل باشد، امکان محاسبات مکانیابی با روش‌های معمول ریاضی وجود ندارد. لذا در این مطالعه، هدف ارائه یک ابزار قدرتمند برای یافتن چیدمان ایده‌آل برای قرار دادن ۱۱ مرکز یا زیرساخت حیاتی در ۱۱ مکان از پیش انتخاب شده است، بگونه‌ای که در کمترین زمان، بهینه‌ترین طرح مکانیابی زیرساخت‌های حیاتی در سایت ساخت با کاهش اثرات تهدید ارائه شود. جدول (۴) لیستی از ۱۱ مرکز به همراه اعداد شاخص مربوطه آنها را ارائه می‌دهد. در این مورد خاص، دو فرض در مورد چیدمان محل ساخت در نظر گرفته شده است:

- هر یک از مکان‌های از پیش تعیین شده ظرفیت قرارگیری هر یک از مراکز را دارند. (مساحت برابر)
- درب اصلی و درب فرعی به عنوان تأسیسات ویژه در نظر

جدول (۴): مسافت سفر بین مکان زیرساخت‌های حیاتی از پیش تعیین شده

مکان از پیش تعیین شده											فاصله
۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۲۰	۳۰	۳۵	۵۵	۴۷	۴۲	۴۰	۳۳	۲۵	۱۵	۰	۱
۳۵	۴۵	۵۰	۴۲	۳۲	۲۷	۲۵	۱۸	۱۰	۰	۱۵	۲
۴۵	۵۵	۵۲	۳۲	۲۲	۱۷	۱۵	۸	۰	۱۰	۲۵	۳
۵۳	۴۹	۴۴	۲۴	۱۴	۹	۷	۰	۸	۱۸	۳۳	۴
۵۲	۴۲	۳۷	۱۷	۷	۲	۰	۷	۱۵	۲۵	۴۰	۵
۵۰	۴۰	۳۵	۱۵	۵	۰	۲	۹	۱۷	۲۷	۴۲	۶
۴۰	۳۵	۳۰	۱۰	۰	۵	۷	۱۴	۲۲	۳۲	۴۷	۷
۳۵	۲۵	۲۰	۰	۱۰	۱۵	۱۷	۲۴	۳۲	۴۲	۵۵	۸
۱۵	۵	۰	۲۰	۳۰	۳۵	۳۷	۴۲	۵۲	۵۰	۳۵	۹
۱۰	۰	۵	۲۵	۳۵	۴۰	۴۲	۴۹	۵۵	۴۵	۳۰	۱۰
۰	۱۰	۱۵	۳۵	۴۰	۵۰	۵۲	۵۳	۴۵	۳۵	۲۰	۱۱

مکان از پیش تعیین شده

جدول (۵): تعداد سفر کارکنان بین زیرساخت‌های حیاتی

مکان از پیش تعیین شده											فاصله
۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۱	۹	۲	۱	۴	۱	۱	۲	۲	۵	۰	۱
۸	۳	۲	۸	۷	۲	۱	۵	۲	۰	۵	۲
۵	۶	۵	۴	۹	۴	۴	۷	۰	۲	۲	۳
۱	۵	۸	۱	۸	۷	۸	۰	۷	۵	۲	۴
۶	۳	۳	۱	۴	۳	۰	۸	۴	۱	۱	۵
۵	۷	۴	۸	۵	۰	۳	۷	۴	۲	۱	۶
۲	۳	۶	۷	۰	۵	۴	۸	۹	۷	۴	۷
۸	۴	۹	۰	۷	۸	۱	۱	۴	۸	۱	۸
۳	۵	۰	۹	۶	۴	۳	۸	۵	۲	۲	۹
۵	۰	۵	۴	۳	۷	۳	۵	۶	۳	۹	۱۰
۰	۵	۳	۸	۲	۵	۶	۱	۵	۸	۱	۱۱

مکان از  
پیش  
تعیین  
شده

تشخیص بهترین جواب، نتایج پایداری نسبت به سایر الگوریتم-ها ارائه می‌دهد. شکل (۴) منحنی‌های ایزوتروپی برای TTH، ECBO، CBO و PSO را در رابطه با تعداد تکرارها نشان می‌دهد. جدول (۷) مقایسه‌ای بین مطالعه مورد نظر و جدیدترین تحقیقات ارائه شده برای مطالعه موردی ۱ را نشان می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد که ۱۲/۵۳۸ بهترین نتیجه در این مطالعه موردی است که از نتایج الگوریتم‌های GA و ACO بهتر است.

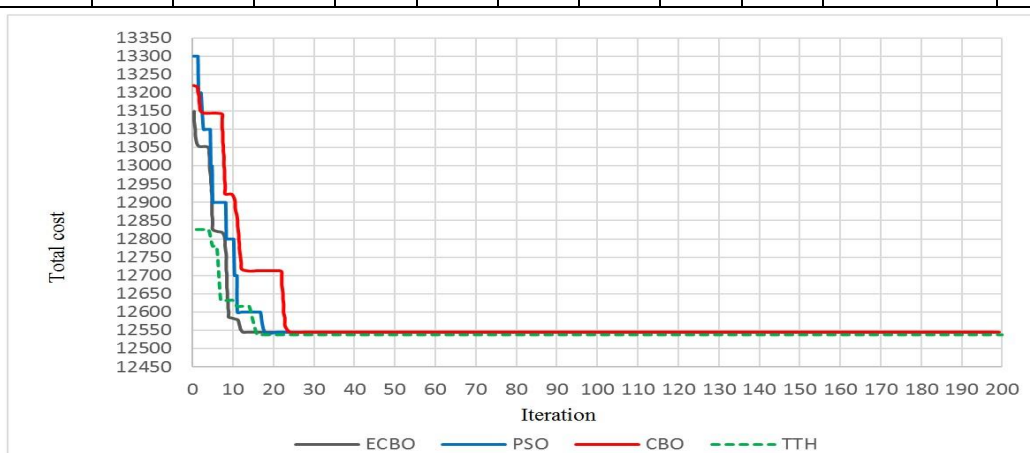
در این مطالعه موردی با استفاده از الگوریتم‌های PSO، CBO، ECBO و TTH، ۵۰ اجرای بهینه‌سازی خودتعیین‌کننده با ۲۰۰ تکرار انجام شد، که هر کدام نتایج آماری معنی‌داری را تولید کردند. جدول (۶) نتایج ۵۰ اجرای مجزا را ارزیابی می‌کند. در مقایسه با ECBO، CBO و PSO، بهترین جواب، جواب میانگین، بدترین جواب و انحراف معیار TTH به ترتیب ۱۲/۵۳۸، ۱۲/۵۴۱، ۱۲/۵۴۸ و ۱/۴۸۱۳ بدست آمد. همانطور که در جدول (۶) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم TTH علاوه بر

جدول (۶): مقایسه نتایج ۵۰ اجرای مستقل الگوریتم‌ها برای مطالعه موردی اول

الگوریتم	بهترین جواب	میانگین جواب	بدترین جواب	تفاوت بین بهترین و میانگین جواب	تفاوت بین بهترین و بدترین جواب	انحراف معیار
PSO	۱۲/۵۴۶	۱۲/۵۶۰	۱۲/۷۵۶	۰/۱۱۲	۱/۶۴۷	۴۷/۳۹
CBO	۱۲/۵۴۶	۱۲/۵۵۸	۱۲/۷۶۸	۰/۰۹۶	۱/۷۶۹	۴۵/۵۱
ECBO	۱۲/۵۴۶	۱۲/۵۵۵	۱۲/۷۴۶	۰/۰۷۲	۱/۵۹۴	۳۲/۱۱
TTH	۱۲/۵۳۸	۱۲/۵۴۱	۱۲/۵۴۸	۰/۰۲۴	۰/۰۷۹	۱/۴۸

جدول (۷): مقایسه‌ای بین راه‌حل نهایی پژوهش حاضر و راه‌حل‌های تحقیقات قبلی گزارش شده

بهترین چیدمان زیرساخت											مسافت کل	الگوریتم
P11	P10	P9	P8	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1		
۱۰	۴	۶	۱	۳	۹	۲	۷	۸	۵	۱۱	۱۵/۰۹۰	GA
۱۰	۸	۳	۱	۴	۲	۷	۵	۶	۱۱	۹	۱۲/۵۴۶	ACO
۱۰	۸	۲	۱	۳	۴	۷	۶	۵	۱۱	۹	۱۲/۵۴۶	PSO
۱۰	۸	۲	۱	۳	۴	۷	۵	۶	۱۱	۹	۱۲/۵۴۶	CBO
۱۰	۸	۲	۱	۳	۶	۷	۵	۴	۱۱	۹	۱۲/۵۴۶	ECBO
۱۰	۸	۳	۱	۴	۲	۷	۶	۵	۱۱	۹	۱۲/۵۳۸	TTH



شکل (۴): تاریخچه همگرایی الگوریتم‌های فراابتکاری

همانطور که مشخص است، منابع می‌تواند شامل نیروی انسانی، تجهیزات و ماشین آلات مختلف و مصالح گوناگون باشد. پس از مشخص شدن زیرساخت‌ها و منابع می‌بایست، تابع هدف مساله را مشخص و با کد نویسی الگوریتم TTH در نرم افزار به بهینه‌ترین جواب در کمترین زمان دست یابیم.

#### تابع هدف مطالعه موردی دوم

تابع هدف می‌تواند در یک پروژه بزرگ واقعی بر رعایت اصول پدافند غیرعامل یا مکانیابی، ایمنی کارمندان و یا حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی متمرکز شود. در این مطالعه، تابع هدف بر به حداقل رساندن هزینه کل حمل منابع در هر روز برای رعایت اصل هزینه-فایده پدافند غیرعامل و دستیابی به خروجی مورد انتظار متمرکز است. تابع هدف بر مبنای کار مطالعاتی چئونگ و همکاران در سال ۲۰۰۲ بوده و از طریق روابط ۳، ۴ و ۵ محاسبه می‌شود [۲۱].

$$\text{Minimize TC} = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q TCL_{Mk,i,j} \quad (3)$$

$$TCL_{Mk,i,j} = M_{LMij} \times C_{Mk} \quad (4)$$

$$M_{LMij} = FL_{Mkij} \times D_{ij} \quad (5)$$

که در آن؛  $D_{ij}$  فاصله مستطیلی بین مکان  $i$  و مکان  $j$ .

#### ۳-۲-۱- مطالعه موردی دوم

زیرساخت‌های مطالعه موردی دوم بر اساس کار علمی وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۰ و سایت ساخت که برای مکانیابی این زیرساخت‌ها مورد استفاده قرار خواهد گرفت، بر مبنای کار مطالعاتی چئونگ و همکاران در سال ۲۰۰۲ می‌باشد. چهار نوع منبع که در این مطالعه بین زیرساخت‌ها حمل خواهد شد و همچنین هزینه حمل آن در جدول ۸ آمده است [۲۱-۲]. در این مطالعه نیز ۱۱ زیرساخت به ۱۱ مکان از پیش تعیین شده اختصاص می‌یابد.

جدول (۸): چهار نوع منبع و هزینه‌های حمل و نقل آنها در واحد

فاصله

نماد	منابع	هزینه واحد حمل
M1	سنگدانه، شن، ماسه، سیمان و بتن	۵
M2	میلگرد	۴
M3	قالب	۸
M4	قطعات پیش ساخته	۸/۵

$D_{Mk}$  هزینه جریان مواد Mk در واحد فاصله.  $FL_{(Mk,ij)}$  نرخ جریان مواد Mk بین مکان‌های  $i$  و  $j$  در واحد زمان.  
 $TCL_{(Mk,i,j)}$  هزینه کلی جریان مواد Mk بین مکان‌های  $i$  و  $j$ . فاصله بین مکان‌های از پیش تعیین شده جهت چیدمان و مکانیابی زیرساخت‌ها محاسبه و در جدول (۹) نشان داده شده است.  
 $ML_{(Mk,ij)}$  مسافتی که مواد Mk بین مکان‌های  $i$  و  $j$  در واحد زمان جریان می‌یابد.

جدول (۹): فاصله بین مکان‌های از پیش تعیین شده زیرساخت‌های حیاتی در مثال موردی ۲

مکان‌های از پیش تعیین شده											فاصله
۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۱۹	۳۰	۳۸	۵۳	۵۵	۳۳	۳۵	۳۰	۱۷	۱۲	۰	۱
۳۱	۱۸	۴۰	۴۵	۴۷	۲۱	۲۷	۲۲	۹	۰	۱۲	۲
۲۲	۲۷	۳۱	۳۶	۳۸	۳۰	۲۲	۱۳	۰	۹	۱۷	۳
۲۹	۲۰	۳۸	۲۳	۲۵	۲۳	۱۵	۰	۱۳	۲۲	۳۰	۴
۴۴	۲۵	۵۳	۳۸	۲۰	۸	۰	۱۵	۲۲	۲۷	۳۵	۵
۵۲	۱۷	۶۱	۴۶	۲۸	۰	۸	۲۳	۳۰	۲۱	۳۳	۶
۴۰	۴۵	۳۳	۱۸	۰	۲۸	۲۰	۲۵	۳۸	۴۷	۵۵	۷
۳۸	۴۳	۱۵	۰	۱۸	۴۶	۳۸	۲۳	۳۶	۴۵	۵۳	۸
۲۳	۵۸	۰	۱۵	۳۳	۶۱	۵۳	۳۸	۳۱	۴۰	۳۸	۹
۴۹	۰	۵۸	۴۳	۴۵	۱۷	۲۵	۲۰	۲۷	۱۸	۳۰	۱۰
۰	۴۹	۲۳	۳۸	۴۰	۵۲	۴۴	۲۹	۲۲	۳۱	۱۹	۱۱

جدول (۱۰): فراوانی جریان چهار نوع منبع بین زیرساخت‌ها

زیرساخت											فرکانس جریان (تعداد سفر)
۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۰	۰	۰	۰	۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۰	۰	۰	۰	۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲
۰	۳۵	۰	۰	۳۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۵	۱۵	۲۰	۷
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۵	۰	۰	۹
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰	۰	۰	۰	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰	۰	۰	۰	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۵۰	۰	۰	۰	۲۰	۳۰	۴

جدول (۱۰): فراوانی جریان چهار نوع منبع بین زیرساخت‌ها

زیرساخت											فرکانس جریان (تعداد سفر)
۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵
۰	۵۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۰	۰	۰	۰	۶
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹
۰	۰	۰	۰	۰	۵۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴
۰	۴۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴۸	۰	۰	۰	۰	۱۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱
۲۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷
۴۸	۴۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹
۰	۰	۰	۴۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰
۰	۰	۰	۴۸	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰	۲۸	۱۱

قالب

قطعات پیش ساخته

آزمایش مستقل در جدول (۱۱) کنار هم قرار گرفته‌اند. با بررسی جدول (۱۱)، مشخص می‌شود که TTH از نظر میانگین، بدترین و انحراف معیار، با مقادیر به ترتیب ۹۶/۳۸۰، ۱۰۰/۰۰۲ و ۲۳۹۶/۴،

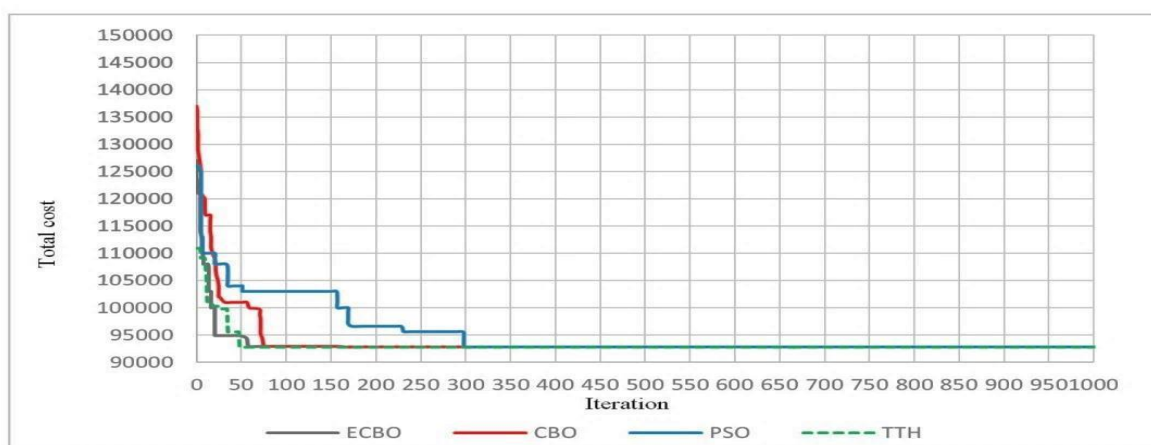
در این مطالعه، با اجرای ۳۰ آزمایش بهینه‌سازی مجزا در ۱۰۰۰ تکرار به حل مساله پرداخته شد تا نتایج آماری معناداری از طریق CBO، PSO، ECBO و TTH به دست آید. نتایج آماری ۳۰

می‌دهد TTH نرخ همگرایی بهتری نسبت به سایرین دارد. جدول (۱۲) نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه حاضر و تحقیقات گزارش شده قبلی را خلاصه می‌کند. در این مطالعه، بهترین نتیجه ۹۲/۷۵۸ است که بهتر از الگوریتم ژنتیک (GA)، جستجوی چندگانه ممنوعه (TS)، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP) است و با جستجوی هارمونی یکسان است.

از CBO، ECBO و PSO بهتر عمل می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که TTH نه تنها راه‌حل بهتری پیدا می‌کند، بلکه پایدارتر نیز هست. منحنی‌های همگرایی برای TTH (سفر زمانی به تاریخ)، ECBO (بهینه‌سازی اجسام برخوردی بهبود یافته)، CBO (بهینه‌سازی اجسام برخوردی) و PSO (بهینه‌سازی ازدحام ذرات) از نظر تعداد تکرارها در شکل (۵) نشان داده شده است که نشان

جدول (۱۱): مقایسه نتایج سی آزمایش مجزا برای مطالعه موردی ۲

انحراف معیار	تفاوت بین بهترین و بدترین جواب	تفاوت بین بهترین و میانگین جواب	بدترین جواب	میانگین جواب	بهترین جواب	الگوریتم
۳۳۶۳/۱	۱۴/۹۵۵	۵/۲۹۲	۱۰۶/۶۳۰	۹۷/۶۶۷	۹۲/۷۵۸	PSO
۳۱۴۹	۱۱/۰۸۳	۵/۱۱۷	۱۰۳/۰۳۸	۹۷/۵۰۴	۹۲/۷۵۸	CBO
۲۷۳۳/۵	۱۰/۹۵۵	۴/۲۱۷	۱۰۲/۹۲۰	۹۶/۶۷۰	۹۲/۷۵۸	ECBO
۲۳۹۶/۴	۹/۹۴۶	۳/۴۲۰	۱۰۰/۰۱۴	۹۶/۳۸۶	۹۲/۷۵۸	TTH



شکل (۵): تاریخچه همگرایی الگوریتم‌های فراابتکاری

جدول (۱۲): مقایسه‌ای بین پاسخ نهایی کار فعلی و پاسخ‌های مطالعات منتشر شده قبلی

بهترین چیدمان زیرساخت											مسافت کل	الگوریتم
P11	P10	P9	P8	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1		
۲	۴	۷	۳	۱۱	۵	۸	۶	۹	۱۰	۱	۹۹/۷۸۸	GA
۴	۲	۱۱	۳	۶	۹	۱	۸	۱۰	۷	۵	۹۴/۸۵۸	TS
۲	۴	۱۱	۳	۹	۵	۷	۶	۸	۱۰	۱	۹۸/۴۲۴	MIP
۴	۲	۱۱	۳	۸	۱۰	۱	۶	۹	۷	۵	۹۲/۷۵۸	HS
۴	۲	۱۱	۳	۸	۱۰	۱	۶	۹	۷	۵	۹۲/۷۵۸	PSO
۴	۲	۱۱	۳	۸	۱۰	۱	۶	۹	۷	۵	۹۲/۷۵۸	CBO
۴	۲	۱۱	۳	۸	۱۰	۱	۶	۹	۷	۵	۹۲/۷۵۸	ECBO
۴	۲	۱۱	۳	۸	۱۰	۱	۶	۹	۷	۵	۹۲/۷۵۸	TTH

آسیب‌پذیری آنها حتی به اندازه ۱ درصد کاهش یابد. بنابراین پیشنهاد می‌شود، برای بهبود فرآیندهای کاری به موضوع بهینه‌سازی در تمام عرصه‌های مدیریتی کشور به‌خصوص حوزه پدافند غیرعامل بیش از پیش پرداخته شود. این کار پژوهشی می‌تواند به‌عنوان یک سرآغاز برای ورود نگاه علمی به حوزه پدافند غیرعامل قلمداد شود. توصیه می‌شود، پژوهشگران و دانشجویان فعال در حوزه‌های مختلف پدافند غیرعامل، با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری و احصاء نظام مسائل، به حل چالش‌های مختلف بپردازند. به‌عنوان مثال اصول دیگر پدافند غیرعامل همچون اصل پراکندگی، چند منظوره‌سازی، مقاوم‌سازی و ... می‌توانند به‌عنوان توابع هدف جداگانه‌ای برای طرح‌های آتی دنبال شوند.

## ۵- مراجع

1. AM. Adrian, A. Utamima, and KJ. Wang, "A comparative study of GA PSO and ACO for solving construction site layout optimization," *KSCE. J. Civil. Eng.*, vol. 19(3), pp. 520-527, 2014.  
<https://doi.org/10.1007/s12205-013-1467-6>
2. CK. Wong, IWH. Fung, and CM. Tam, "Comparison of using mixedinteger programming and genetic algorithms for construction site facility layout planning," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 136(10), pp.1116-1128, 2010.  
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000214](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000214)
3. KC. Lam, CM. Tang, and WC. Lee, "Application of the entropy technique and genetic algorithms to construction site layout planning of medium-size projects," *Construct Manage Econ.*, vol. 23(2), pp. 127-145, 2005.  
<https://doi.org/10.1080/0144619042000202834>
4. IC. Yeh, "Architectural layout optimization using annealed neural network," *Automat Constr.*, vol 15(4), pp.531-539, 2006.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2005.07.002>
5. DM. Tate, AE. Smith, "Unequal-area facility layout by genetic search," *IIE Trans.*, vol 27(4), pp.465-472, 1995.  
<http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2013.774481>
6. H. Azarbayad, R. Babazadeh, "A genetic algorithm for solving quadratic assignment problem (QAP)," *Neural. Evol. Comput.*, pp. 2-5, 2014.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1405.5050>
7. IC. Yeh, "Construction site layout using annealed neural network," *J. Comput. Civil. Eng.*, vol 9(7), pp.201-208, 1995.  
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(1995\)9:3\(201\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(1995)9:3(201))
8. H. Said, K., El-Rayes, "Performance of global optimization models for dynamic site layout planning of construction projects," *Automat Construct.*, vol 36, pp.71-78, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.08.008>
9. X. Ning, KC. Lam, and MCK. Lam, "Dynamic construction site layout planning using max-min ant system," *Automat Construct.*, vol 19(1), pp.55-65, 2010.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2009.09.002>
10. SS. Shahebrahimi, A. Lork, D. Sedaghat Shayegan, and A. Amir Kardoust, "Optimization of construction site layout planning with combination of metaheuristic algorithms," *Int. J. Nonlinear Anal. Appl.*, pp.1-12, 2024.  
<https://doi.org/10.22075/ijnaa.2024.33972.5070>
11. HM. Sanad, MA. Ammar, and ME. Ibrahim, "Optimal construction site layout considering safety and environmental aspects," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol 134(7), pp.536-544, 2008.  
<https://doi.org/10.1061/ASCE0733-93642008134:7536>
12. ID. Tommelein, RE. Levitt, and B. Hayes-Roth, "Site-layout modeling: how can artificial intelligence help," *J. Constr. Eng.*

## ۴- نتیجه گیری

در دنیای امروز که رشد علم و فناوری با سرعت خیره‌کننده‌ای به جلو می‌رود، تهدیدات نیز رویکردی نوین به خود گرفته است و نمی‌توان با نگاه‌های سنتی به مقابله با این تهدیدات پرداخت. حل چالش‌های دفاعی و امنیتی کشور، فقط زمانی امکان‌پذیر خواهد بود که به مسأله پدافند غیرعامل، نگاه علمی و فناورانه داشته باشیم. الگوریتم بهینه‌سازی TTH، به‌عنوان یک الگوریتم فراابتکاری (MHA) که اخیراً ایجاد شده است، در این مطالعه برای پرداختن به مسئله برنامه‌ریزی مکانیابی سایت ساخت (CSLP) استفاده می‌شود. الگوریتم TTH از مفهوم سفر به گذشته الهام می‌گیرد. هنگامی که معیار سفر برآورده شود، تعداد مشخصی از کروموزوم‌ها از یک نسل خاص انتخاب شده و به چند نسل قبل منتقل می‌شوند. این فرآیند تا زمانی که الگوریتم شرط خاتمه خود را برآورده کند، ادامه می‌یابد. این الگوریتم از یک فرمول‌بندی ساده برای تابع هدف استفاده می‌کند و به هر پارامتر داخلی وابسته نیست. دو مطالعه موردی به منظور تأیید مدل بررسی شده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در دستیابی به نتایج برتر و در تعداد ارزیابی‌های مورد نیاز برای یافتن راه‌حل بهینه، موفقیت‌آمیز بوده است. مقایسه اثربخشی روش پیشنهادی با سایر فراابتکاری‌های شناخته شده در برنامه‌ریزی مکانیابی سایت ساخت نشان می‌دهد که از نظر سرعت همگرایی و کیفیت راه‌حل، عملکرد بسیار رقابتی دارد. بنابراین، در مثال واقعی شماره یک که هدف آن کاهش میزان سفر پرسنل بین مراکز است، بهترین، میانگین و بدترین پاسخ‌ها به ترتیب ۱۲/۵۳۸، ۱۲/۵۴۱ و ۱۲/۵۴۸ و انحراف معیار ۱/۴۸۱۳ است که نشان می‌دهد نتایج نسبت به سایر الگوریتم‌ها همگراتر و بهینه‌تر هستند. در مثال واقعی دو که هدف آن کاهش هزینه حمل و نقل منابع بین مراکز است، بهترین، میانگین و بدترین پاسخ‌ها به ترتیب ۹۲/۷۵۸، ۹۶/۳۸۶ و ۱۰۰/۰۱۴ هستند و انحراف معیار ۲۴۷۱/۶ است که نشان دهنده بهبود نتایج در مطالعه حاضر در مقایسه با مطالعات قبلی است. نکته قابل توجه برای مدیران بخش‌های مختلف کشور این است که در مسائل بهینه‌سازی، اختلاف زیاد بین پاسخ‌ها ملاک نیست، بلکه بهبود نسبت به تلاش‌های قبلی ملاک است، و لزوماً نیازی نیست همه اهداف به‌صورت صددرصد محقق شود. در اینجا مهم این است که زیرساخت‌ها با توجه به توابع هدف، بگونه‌ای مکانیابی شوند که

- review. Eng.” Constr. Archit. Manage., July 2020.  
<http://dx.doi.org/10.1108/ECAM-08-2019-0457>
31. A. Ghadiri, D. Sedaghat Shayegan, and A. Amir Kardoust, “Multi objective firefly optimization algorithm for construction site layout planning,” Iranian. J. optim., vol 14(4), pp.245-260, 2022.
32. A. Rouhi, E. Pira, “WHOFWA: An Effective Hybrid Metaheuristic Algorithm Based on Wild Horse Optimizer and Fireworks Algorithm,” J. Electr. Comput. Eng. Innovations., vol 12(2), pp. 319-342, 2024.  
<https://doi.org/10.22061/jeccei.2024.10422.699>
33. A. Kaveh, AK. Shirzadi Javid, Y. Vazirnia, “Physics-inspired Metaheuristics for Construction Site Layout Planning Problem,” Period Polytech Civil Eng., vol 68(1), pp. 68–87, 2024.  
<https://doi.org/10.3311/PPci.22902>
34. A. Kaveh, M. Khanzadi, M. Alipour, and M. Rajabi Naraky, “CBO and CSS algorithms for resource allocation and time-cost trade-off,” Period Polytech Civil Eng., vol 59(3), pp. 361–371, 2015.  
<https://doi.org/10.3311/PPci.7788>
35. A. Kaveh, VR. Mahdavi, “Colliding bodies optimization: a novel meta-heuristic method,” Comput Struct., vol 139, pp.18–27, 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.04.005>
36. A. Kaveh, A. Shakouri Mahmoud Abady, and S. Zolfaghari Moghaddam, “An adapted harmony search based algorithm for facility layout optimization,” Int. J. Civil. Eng. IUST., vol 10(1), pp. 37–42, 2012.
37. A. Kaveh, M. Ilchi Ghazaan, “Enhanced colliding bodies optimization for design problems with continuous and discrete variables,” Adv. Eng. Softw., vol 77, pp. 66–75, 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.08.003>
38. Kaveh, A., (2014). Advances in metaheuristic algorithms for optimal design of structures. Springer International Publishing, Latest edition, Switzerland.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-59392-6>
39. S.E. Abtahi, R. Kalhor, and M. Mirzaebrahimtehri, “Improving the Level of Safety and Reducing the Vulnerability of the Transport Infrastructures of the Border Provinces with the Aim of Increasing Resilience),” Journal of passive deffense., vol 14, pp. 37-53, 2023, (in persion).  
DOR: 20.1001.1.20086849.1402.14.1.4.4.
40. S. Samadi Gharehveran, M. Nasiri, “Resilient Planning Against Disturbances and Optimal Location Determination for Mobile Energy Storage Systems in Smart Microgrids,” Journal of passive deffense., vol 16, pp. 69-80, 2025, (in persion).  
DOR: 20.1001.1.20086849.1404.16.2.6.2.
41. SMR. Taheri, MA. Beheshtinia, “A Genetic Algorithm Developed for a Supply Chain Scheduling Problem,” Iranian Journal of Management Studies (IJMS), vol 12(2), pp.281-306, 2019.
42. C.M. Tam, KL. Tong, and KW., Chan, “Genetic algorithm for optimizing supply locations around tower crane,” Construct. Eng. Manag., vol 127(4), pp.315–321, 2001.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2001\)127:4\(315\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2001)127:4(315))
43. PP. Zouein, ID. Tommelein, “Dynamic layout planning using a hybrid incremental solution method,” J. Constr. Eng. Manag., vol 5(1), pp. 1–16, 1999.  
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1999\)125:6\(400\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1999)125:6(400))
44. T. Hegazy, E. Elbeltagi, “EvoSite: evolution-based model for site layout planning,” J. Comput. Civ. Eng., vol 13(3), pp. 198-206, (1999).  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(1999\)13:3\(198\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(1999)13:3(198))
45. LY. Liang, WC. Chao, “The strategies of tabu search technique for facility layout optimization,” Automat Construct., vol 17(6), pp.657–669, 2008.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.01.001>
46. D. Sedaghat Shayegan, M. Mashayekhi, “Solving the prolem of locating construction sites based on a combination of weeding algorithm and forbidden search algorithm,” Amirkabir. J. of civil eng. Vol 16(8), pp. 1365–1382, 2025.  
<http://dx.doi.org/10.22060/ceej.2025.23469.8168>
- Manag., vol 118(3), pp.594–611, (1993).  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1992\)118:3\(594\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1992)118:3(594))
13. MR. Garey, DS. Johnson, “A guide to the theory of NP-completeness,” A series of books in the mathematical sciences., 1979.  
<https://www.amazon.com/Computers-Intractability-NP-Completeness-Mathematical-Sciences/dp/0716710455>
14. IC. Yeh, “Construction site layout using annealed neural network,” J. Comput. Civil. Eng., vol 9(7), pp.201–208, 1995.  
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(1995\)9:3\(201\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(1995)9:3(201))
15. R.C. Eberhart, J. Kennedy, “A New Optimizer Using Particle Swarm Theory,” Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya., pp.39-43, 1995.  
<https://doi.org/10.1109/MHS.1995.494215>
16. H. Zhang, JY. Wang, “Particle swarm optimization for construction site unequal-area layout,” J. Constr. Eng. Manag., vol 134(9), pp.739–748, (2008).  
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:9\(739\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:9(739))
17. J. Xu, Z., Li, “Multi-objective dynamic construction site layout planning in fuzzy random environment,” Automat Construct., vol 27, pp.155–169, 2012.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.017>
18. LC. Lien, MY. Cheng, “A hybrid swarm intelligence based particle-bee algorithm for construction site layout optimization,” Expert Syst Appl., vol 39(10), pp.9642–9650, 2012.  
<https://dl.acm.org/doi/10.1016/j.eswa.2012.02.134>
19. M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colorni, “The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents,” IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B Cybern., vol 26( 1), pp. 29–41, 1996.  
<https://doi.org/10.1109/3477.484436>
20. K.C. Lam, X. Ning, T., Ng, “The application of the ant colony optimization algorithm to the construction site layout planning problem,” Construct. Manage. Econ., vol 25(4), pp. 359–374, (2007).  
<http://dx.doi.org/10.1080/01446190600972870>
21. S. O. Cheung, T. K. L. Tong, and C. M., Tam, “Site pre-cast yard layout arrangement through genetic algorithms,” Autom. Constr., vol 11(1), pp. 35–46, 2002.  
[https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(01\)00044-9](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(01)00044-9)
22. H. Li, PED. Love, “Site-level facilities layout using genetic algorithms,” J. Comput. Civil Eng., vol 12(4), pp.227–23, 1998.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(1998\)12:4\(227\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(1998)12:4(227))
23. H. Li, PED. Love, “Genetic search for solving construction sitelevel unequal-area facility layout problems,” Automat Construct., vol 9(2), pp.217–226, 2000.  
[https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(99\)00006-0](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(99)00006-0)
24. MJ. Mawdesley, SH. Al-jibouri, and H. Yang, “Genetic algorithms for construction site layout in project planning,” J. Constr. Eng. Manag., vol 128(4), pp.418–426, 2002.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2002\)128:5\(418\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:5(418))
25. MJ. Mawdesley, SH. Al-jibouri, “Proposed genetic algorithms for construction site layout,” Eng Appl. Artif. Intell., vol 16(3), pp.501–509, (2003).  
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2003.09.002>
26. PP. Zouein, H. Harmanani, and A. Hajar, “Genetic algorithm for solving site layout problem with unequal-size and constrained facilities,” J. Comput. Civil. Eng., vol 16(2), pp.143, 2002.  
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2002\)16:2\(143\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2002)16:2(143))
27. HM. Osman, ME. Georgy, and ME. Ibrahim, “A hybrid CAD-based construction site layout planning system using genetic algorithms,” Automat Construct., vol 12(6), pp.749–764, 2003.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0926-5805\(03\)00058-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-5805(03)00058-X)
28. E. Gharaie, A. Afshar, and M., Jalali, “Site layout optimization with ACO algorithm,” In: Proceedings of the 5th WSEAS international conference on artificial intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases, Madrid., pp.90–94, 2006.
29. A. Kaveh, Y. Vazirnia, “Construction Site Layout Planning Problem Using Metaheuristic Algorithms: A Comparative Study,” Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering., August2019.  
<https://doi.org/10.1007/s40996-018-0148-6>
30. M. Xu, Z. Mei, S. Luo, and Y. Tan, “Optimization algorithms for construction site layout planning: a systematic literature