الگوریتم‌های فراابتکاری برای جانمایی تاورکرین در سایت

رویا امیری[1]، جواد مجروحی سردرود[2*]، وحید مومنایی کرمانی[3]

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی‌عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی‌عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۳- گروه ریاضی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، ایران

*j.majrouhi@gmail.com

چکیده

پروژه‌های تحقیقاتی نشان می‌دهد که تمایل به رویکردهای هوشمند برای اخذ تصمیم‌گیری‌ها در مراحل مختلف صنعت ساخت رو به افزایش است. برنامه-ریزی جانمایی در سایت یکی از فرآیندهای مهم تصمیم‌گیری در مراحل اولیه پروژه‌های ساخت است که طی آن بایستی مکان تجهیزات و امکانات در داخل محدوده فضای سایت تعیین شود. تاورکرین یکی از تجهیزات حیاتی و گران قیمت در سایت‌های ساخت به شمار می‌رود. جانمایی مناسب تاورکرین تاثیر قابل توجهی برکیفیت، بهره‌وری، ایمنی، هزینه و مدت زمان پروژه دارد. در انتخاب مکان تاورکرین معیارهای متعددی شامل بزرگترین شعاع بالابری و ظرفیت تاورکرین، جنس خاک در سایت، ظرفیت باربری خاک و محل عرضه مصالح تاثیر دارند. لذا با توجه به تاثیر عوامل زیاد، جانمایی تاورکرین، یک مساله بهینه‌سازی پیچیده و سخت است که حل آن با بالارفتن تعداد پارامترها و متغیرها از طریق الگوریتم‌های ریاضی دقیق میسر نیست. بنابراین، تعریف مسئله به صورت یک مساله بهینه‌سازی و ادغام آن با مدلسازی ریاضی برای رسیدن به جواب بهینه ضروری است. حل اینگونه مسائل معمولا از طریق الگوریتم‌های فراابتکاری که از دسته الگوریتم‌های تقریبی هستند انجام می‌شود. این مقاله مروری جامع بر تحقیقات انجام شده در زمینه مساله جانمایی تاورکرین در سایت‌های ساخت با استفاده از مدلسازی ریاضی و الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه می‌دهد. بر اساس یافته-های این مقاله، شکاف‌های تحقیقاتی در این زمینه شناسایی شده است. لذا پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی در جهت رفع نواقص ارائه شده است که می‌تواند موضوع مقالات تحقیقاتی متعددی باشد.

کلید واژگان: سایت، جانمایی تاورکرین، بهینه‌سازی، الگوریتم‌های فراابتکاری

Meta-heuristic Algorithms for the Tower Crane Planning on the Site

Abstract

Research projects show that the desire for intelligent approaches to decision-making at various stages of the construction industry is increasing. Site layout planning is one of the important decision-making processes in the early stages of construction projects, where the location of facilities must be determined within the site. Tower crane is considered as one of the vital and expensive facilities in construction sites. Proper locating of tower crane has a significant impact on the quality, productivity, safety, cost and time of the project. In choosing the location of the tower crane, there are several criteria, including the largest lifting radius and capacity of the tower crane, the type of soil on site, the soil-bearing capacity and the material supply points. Therefore, due to the influence of many factors, tower crane planning is a complex NP-hard optimization problem, which cannot be solved through exact mathematical algorithms as the number of parameters and variables increases. Therefore, it is necessary to define the problem as an optimization problem and integrate it with mathematical modeling to reach the optimal solution. Solving such problems is usually done through metaheuristic algorithms, which belong to the category of approximate algorithms. This study provides a comprehensive review on tower crane planning problem on construction sites using mathematical modeling and metaheuristic algorithms. Based on the findings of this study, research gaps are identified in this field. Therefore, suggestions for future works have been presented in order to solve the shortcomings, which can be the subject of various research articles.

Key words: Site, Tower crane planning, Optimization, Metaheuristic algorithms

۱-مقدمه

هدف از بهینه‌سازي یافتن بهترین جواب قابل قبول، با توجه به محدودیت‌ها و نیازهاي یک مسأله است. مسائل مختلف تصمیم‌گیری را می‌توان به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی با متغیرهای مختلف و محدود به شرایط و منابع در دسترس توصیف کرد. برای حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده در زمینه‌های مختلف، استفاده از روش‌های تقریبی مانند الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای یافتن راه‌حل‌های مناسب مورد نیاز است. مسائل بهینه سازی به شدت غیرخطی و چندوجهی هستند که توسط مجموعه‌ای از قیود پیچیده محدود شده‌اند. بیشتر اوقات اهداف مختلف در یک مساله در تضاد با یکدیگر هستند. به طور کلی، یافتن یک نتیجه بهینه برای مسائل پیچیده، کار آسانی نیست [۱]. توسعه، پیشرفت‌های روزافزون، نوآوری و رقابت‌های فشرده تجاری، شرکت‌های ساختمانی را به سمت مدیریت مناسب و دقیق سایت‌های ساخت به منظور اطمینان از بهره‌وری و حاشیه سودآوری بیشتر در پروژه‌ها هدایت می‌کند [۳, ۲]. بهره‌وری هر پروژه از جنبه‌های مختلفی مانند زمان، هزینه، کیفیت و ایمنی می‌تواند بررسی شود. با تصمیم‌گیری‌های مناسب در مراحل مختلف اجرای پروژه می‌توان بهره‌وری پروژه را افزایش و زمان و هزینه را کاهش داد. تحقیقات نشان می‌دهد که تمایل به رویکردهای هوشمند برای اخذ تصمیم‌گیری‌ها در مراحل مختلف صنعت ساخت رو به افزایش است. مدیریت سنتی پروژه‌های ساخت- شامل حل دستی و تجربی مسائل مختلف تصمیم‌گیری است و تغییر پارادایم به یک رویکرد هوشمند را ضروری می‌کند [۴]. تکنیک‌های هوشمند می‌توانند اطلاعات دقیق و قابل اعتمادی را برای تصمیم- گیری آگاهانه در مدیریت ساخت به خصوص برای مدیریت سایت پروژه‌ها ارائه دهند [۵, ۶]. جانمایی تجهیزات در سایت ساخت یک تصمیم‌گیری حیاتی در مراحل اولیه پروژه است که طی آن بایستی کلیه تجهیزات در داخل محدوده فضای سایت مکان‌یابی شوند و نقص در تصمیمات انسانی در این مرحله می‌تواند منجر به کاهش بهره‌وری پروژه شود [۳, ۷-۱۰]. این مرحله از تصمیم- گیری‌که نوع، مقدارو موقعیت تجهیزات و امکانات ضروری در سایت پروژه‌های ساخت را معرفی می‌کند، تاثیر قابل توجهی بر روی کیفیت، ایمنی، هزینه و مدت زمان پروژه دارد [۱۱]. چیدمان مناسب تجهیزات در سایت می‌تواند بهره‌وری پروژه را با تسهیل جابه‌جایی نیروی کار و مصالح افزایش دهد. هزینه تامین و برپایی تجهیزات در سایت ممکن است بین ۱۰٪ تا ۴۰٪ کل هزینه ساخت باشد [۱۲]. تحقیقات نشان می‌دهند که چنانچه اقدامات مدیریت سایت در این مرحله به گونه‌ای کارآمد و صحیح انجام شود، می- تواند بین ۱۰٪ تا ۳۰٪ در هزینه‌ها صرفه‌جویی ایجاد شود [۱۳]. این آمار اهمیت موضوع را به صورت واضح مشخص می‌کند.

برنامه‌ریزی طراحی سایت پروژه‌های ساخت که بر نحوه استفاده موثر از فضای سایت با توجه به محدودیت‌ها و قیود موجود به خصوص در پروژه‌های بزرگ و فضاهای کاری محدود، تمرکز دارد، منجر به افزایش بازدهی و کارایی قابل توجهی در پروژه خواهد شد [۱۴]. از آنجایی که تصمیمات مهم زیادی در این مرحله بایستی گرفته شود و همچنین عوامل متعدد و در هم تنیده بسیاری بر مساله چیدمان تجهیزات در سایت تأثیر می‌گذارند، لذا پیدا کردن یک جانمایی بهینه مساله‌ای سخت و پیچیده است [۱۵].

استفاده از ماشین آلات در صنعت ساخت همیشه یک هزینه‌ی بالا بوده است. تاورکرین‌ها یکی از معمول‌ترین و کلیدی‌ترین تجهیزات در سایت‌های ساخت هستند که برای حمل و جابجایی افقی و قائم اشیا سنگین و مصالح ساختمانی نظیر تیرها، ستون‌ها، المان‌های پیش‌ساخته، قالب‌ها و ...ضروری هستند [۱۶-۱۹]. از آنجا که تاورکرین یکی از تجهیزات حیاتی در سایت‌های ساخت به شمار می‌رود، جانمایی بهینه و مدیریت عملیات آن می‌تواند عملکرد و بهره‌وری پروژه را به صورت چشمگیری بهبود بخشد [۲۰]. با توجه به اینکه زمان حمل مصالح توسط تاورکرین به عنوان یک عامل مهم در روند مونتاژ و پیشرفت پروژه است، لذا بهینه سازی محل تاورکرین می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در مدت زمان و هزینه‌ی پروژه شود. در سایت ساختمان‌های بلندمرتبه، معمولا دستیابی به یک برنامه جانمایی مناسب می‌تواند چالش برانگیز باشد [۲۱, ۲۲]. از این‌رو، تعیین مکان تاورکرین در موقعیت ایمن و مناسب در سایت برای به حداکثر رساندن سطح تحت پوشش و بهره‌وری پروژه بسیار مهم است. کاهش فاصله حرکت قلاب تاورکرین می‌تواند باعث کاهش زمان عملیات و بالا رفتن بهره‌وری پروژه در سایت‌های ساختمانی دارای تاورکرین شود [۲۳]. امروزه در بیشتر مواقع به علت فقدان منابع کمی در دسترس، جانمایی تاورکرین در سایت عمدتا بر اساس تجربه‌ی کارشناسان و مهندسین فنی پروژه انجام می‌شود.

در مساله مکان‌یابی تاورکرین، مکان‌یابی محل عرضه مصالح در سایت نیز مطرح می‌شود، زیرا مصالح در نقاط عرضه، ذخیره شده و توسط تاورکرین از این مکان برداشته و در نقاط تقاضا تحویل داده می‌شوند. وزن مصالح درخواستی در هرمکان تقاضا، متفاوت و از پیش تعیین شده است. ظرفیت تاورکرین مشخص می‌کند که حداکثر وزن مصالح برای حمل و بیشترین طول بوم آن چقدر می‌تواند باشد که بر اساس منحنی شعاع-بار تاورکرین تعیین می‌شود. در واقع گشتاور ناشی از ضرب وزن هر یک از مصالح در حداکثر شعاع حمل آن نباید از ظرفیت گشتاوری تاورکرین تجاوزکند. شایان ذکر است که هرچه ظرفیت تاورکرین بالاتر باشد، هزینه‌ی اجاره و عملیات آن نیز بیشتر خواهد بود [۲۴]. لذا ظرفیت مورد نیاز تاورکرین در هر پروژه نیز یکی از عوامل تأثیرگذار در هزینه‌های پروژه است، زیرا

هزینه اجاره و عملکرد آن متفاوت خواهد بود. محل تقاضای هر یک از مصالح در سایت همان ساختمان در حال احداث است که از قبل تعیین شده و ثابت هستند. با قرار دادن تاورکرین در هر یک از مکان‌های کاندید در سایت، فاصله بین تاورکرین با نقاط کاندید عرضه مصالح و نقاط تقاضای مصالح مشخص می‌شود. لذا با توجه به این فواصل و وزن مصالحی که قرار است بین نقاط عرضه و تقاضا حمل شود، ظرفیت مورد نیاز تاورکرین تعیین خواهد شد. از آنجا که نقاط تقاضای مصالح ثابت است، لذا اهمیت مکان‌یابی تاورکرین و نقاط عرضه مصالح در بهینه‌سازی هزینه و زمان اجرای پروژه مشخص می‌شود. این مکان‌یابی بر ظرفیت مورد نیاز تاورکرین، که آن هم بر هزینه تاثیرگذار است، اثر دارد. به عبارت دیگر مساله جانمایی تاورکرین در سایت، یک مساله بهینه‌سازی ترکیباتی پیچیده سخت است که عوامل درهم تنیده‌ی متعددی در آن تاثیر دارند و حل آن با بالارفتن تعداد پارامترها و متغیرها از طریق الگوریتم‌های ریاضی دقیق میسر نیست [۱۹, ۲۵, ۲۶]. از این رو استفاده ازمدل‌های ریاضی برای ساده‌سازی مساله و الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل آن ضروری است تا تجزیه و تحلیل مساله امکان‌پذیر شود.

این تحقیق به دنبال مرور تحقیقات گذشته و شناسایی محدودیت‌ها و شکاف‌های تحقیق در حل مساله جانمایی تاورکرین است که با مدل‌های ریاضی و الگوریتم های فراابتکاری به حل مساله پرداخته‌اند. ساختار تحقیق به صورت خلاصه به این شرح می‌باشد: قسمت ۲ مقدمه‌ای درباره بهینه‌سازی و انواع الگوریتم‌های فراابتکاری بیان کرده است. در قسمت ۳ تحقیقات انجام شده در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته و به محدودیت‌ها و شکاف‌های تحقیق پرداخته شده است. در نهایت در قسمت ۴ نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای تحقیقات آتی ارائه شده که می‌تواند موضوع مقالات تحقیقاتی متعددی در این زمینه باشد.

۲- بهینه‌سازی و الگوریتم‌های فراابتکاری

بهینه‌سازی روشی برای یافتن بهترین راه حل در مسائل مختلف است. برای حل یک مسئله بهینه سازی، ابتدا باید آن را به صورت ریاضی مدلسازی کرد. به این معنی که مسئله توسط پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری به شکل ریاضی توصیف شود. این مسائل نیاز به تکنیک‌های بهینه‌سازی برای حل و رسیدن به بهترین جواب دارند. اگر چه در مسائل با ابعاد کوچک می‌توان راحت به بهترین جواب ممکن به صورت دقیق رسید، اما اکثر مسائل بهینه‌سازی در واقعیت مسائل پیچیده‌ای هستند که اغلب غیرخطی و تحت محدودیت‌های متعددی نیز قرار دارند و معمولا حل آن‌ها به صورت دقیق امکان‌پذیر نیست. همچنین برخی مواقع در یک مساله بهینه‌سازی چندین هدف را بایستی دنبال کرد که اهداف مختلف آن در تضاد با یکدیگر هستند. بنابراین،

دستیابی به راه حل بهینه دقیق عملی نیست.
الگوریتم‌های حل مسائل بهینه-سازی، روش‌های کلی برای دستیابی به راه حل‌های بهینه هستند تا بتوان در زمان قابل قبولی به جواب مناسبی برای این مسائل رسید. با توجه به ویژگی‌های الگوریتم‌ها، دسته-بندی‌های متفاوتی برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی وجود دارد. در حالت کلی الگوریتم-های بهینه‌سازی به دو دسته دقیق و تقریبی تقسیم‌بندی می-شوند. الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند، اما در مورد مسائل بهینه سازی پیچیده و سخت کارایی ندارند و زمان حل آنها در این مسائل به صورت نمایی افزایش می‌یابد. لذا در مسائل واقعی که تعداد پارامترها و متغیرهای مساله بالاست و فضای جستجو به صورت تصاعدی با اندازه مسئله افزایش می‌یابد، استفاده از تکنیک‌های دقیق عملی نیست و راه‌حل مناسبی ارائه نمی‌دهند. در این شرایط الگوریتم‌های فرا ابتکاری، که از دسته الگوریتم‌های تقریبی هستند، مناسب است که در زمان قابل قبولی جواب مناسبی ارائه می-دهند. این الگوریتم‌ها با الگو گرفتن از طبیعت و بر اساس فرآیندهای فیزیکی و بیولوژیکی و رفتارهای طبیعی موجودات و پدیده‌های مختلف نه در یک مساله خاص، بلکه در طیف گسترده‌ای از مسائل بهینه‌سازی کارایی خود را به اثبات رسانده‌اند و بیشتر آنها به صورت جمعی عمل می کنند [۲۷].

از الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک، کلونی مورچگان، کلونی زنبورها، ازدحام ذرات، رقابت استعماری، جستجوی گرانشی، کرم شب تاب و رقابت استعماری، گرگ خاکستری و .. اشاره کرد. البته برخی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری مبتنی بر یک جواب هستند که می‌توان از الگوریتم جستجوی ممنوعه و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده نام برد. شایان ذکر است که الگوریتم‌های فرا ابتکاری که در حل مسائل با ابعاد بزرگ بسیار کارا هستند، هیچگاه تضمین رسیدن به بهترین جواب را ندارند و قادرند به جواب بهینه محلی دست یابند. البته در شرایط نادری که اندازه مساله متوسط باشد یا پارامترها به خوبی تنظیم شده باشند، احتمال رسیدن به جواب بهینه‌ی سراسری نیز وجود دارد. با وجود اینکه همه‌ی الگوریتم‌های فرا ابتکاری نتایج رضایت‌بخشی ارائه می‌دهند، اما هیچ الگوریتمی وجود ندارد که بتواند عملکردی برتر نسبت به سایرین در حل تمام مسائل بهینه سازی ارائه دهد. به عبارت دیگر، یک الگوریتم ممکن است برخی از مسائل را بهتر و برخی دیگر از مسائل را بدتر حل کند. از این رو الگوریتم-های فرا ابتکاری جدید با کارایی بالا مورد استقبال قرار می‌گیرند و شناسایی الگوریتم-های مناسب برای حل مساله بهینه‌سازی مدنظر مهم می‌باشد [۲۷].

۳-تحقیقات انجام شده در زمینه جانمایی تاورکرین با رویکرد مدلسازی ریاضی و شناسایی محدودیت‌های آن‌ها

مطالعات متعددی برای جانمایی تاورکرین‌ها و بهینه‌سازی عملیات آن‌ها در راستای افزایش بهره‌وری پروژه‌ها انجام شده است. برنامه‌ریزی برای تاورکرین‌ها فرآیندی شامل تعیین مکان، نوع، تعداد و برنامه‌ریزی برای حرکات آنهاست که تاثیر قابل توجهی بر بهره‌وری کلی پروژه دارد [۲۸] .

تحقیقات انجام شده در زمینه مساله تاورکرین در سایت پروژه‌های ساخت در سه گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: انتخاب تاورکرین [۱۴, ۲۹ ,۴۰, ۴۴-۴۷]، مکان یابی تاورکرین [۲ ,۱۱ ,۱۲, ۱۸,۱۹ , ۲۳-۲۶, ۲۸-۳۲ ,۳۵-۳۹, ۴۰-۴۲] و برنامه ریزی برای حمل توسط تاورکرین [۲۱, ۲۳ ,۳۳ ,۴۸-۵۴]. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین تحقیقات در زمینه مکان‌یابی تاورکرین با مدلسازی ریاضی بوده است که اهمیت موضوع مشخص می‌شود. شکل ۱ تحقیقات انجام شده در هر زمینه را به صورت درصدی نشان می‌دهد. در بیشتر این تحقیقات، هدف تحقیق کاهش زمان و هزینه پروژه با یافتن مکان بهینه تاورکرین و با توجه به محدودیت ها و متغیرهای موجود در سایت بوده است. این تحقیقات با روش های مختلفی حل و بهینه شده اند. چندین رویکرد مختلف برای حل مساله مکان‌یابی تاورکرین وجود دارد که کاراترین آنها مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی آن است [۲۹].

در اولین تحقیقات در این زمینه رودریگز و همکارانش یک مدل ریاضی برای بدست آوردن مکان بهینه تاورکرین ارائه دادند. در این تحقیق هزینه حمل و نقل مصالح توسط تاورکرین بر اساس حرکت زاویه‌ای و شعاعی قلاب حداقل می‌شود. حرکت قائم قلاب در مدل پیشنهادی آن‌ها در نظر گرفته نشده است [۳۰]. در تحقیقی دیگر در سال ۱۹۹۶ یک مدل ریاضی برای مکان یابی تاورکرین ارائه شد که زمان حرکت افقی قلاب را برای حمل مصالح بین ۲۰ تا ٤۰ درصد کاهش داد. علیرغم تاثیر وزن مصالح، محل عرضه مصالح و ظرفیت تاورکرین در این مدل این عوامل در نظر گرفته نشده است [۳۱].

زمانی که با یک تاورکرین قادر به پوشش کل فضای سایت نباشد و یا برنامه زمان‌بندی پروژه دارای محدودیت زمانی باشد، معمولا از چند تاورکرین در سایت برای حمل مصالح استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که بهینه‌سازی محل استقرار چند تاورکرین به دلیل مسائل ایمنی و تداخلات آن‌ها همیشه چالش‌برانگیز است [۱٤, ۳۲-۳٤]. در تحقیقی توسط ژنگ و همکارانش [۳۲] در سال ۱۹۹۹ یک مدل ریاضی برای جانمایی گروه تاورکرین ارائه و با استفاده از شبیه سازی مونتکارلو حل گردید. در این تحقیق سه معیار متعادل کردن باربری تاورکرین‌ها، مینیمم کردن تداخلات بین آنها و بالابردن کارایی تاورکرین‌ها با کم کردن زمان کارکرد آنها برای بهینه سازی

مکان گروه تاورکرین در نظر گرفته شد. علیرغم اینکه محل عرضه مصالح بر زمان و هزینه حمل مصالح در سایت تاثیر دارد، در مدل آنها تاثیر محل عرضه مصالح و همچنین ظرفیت تاورکرین در هزینه‌ها در نظر گرفته نشده است.

همانطور که قبلا بیان شد در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی پیچیده اغلب از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری مانند ژنتیک، ازدحام ذرات، کلونی مورچگان، الگوریتم زنبورعسل، کرم‌شبتاب، تبریدشبیه‌سازی‌شده، جستجوی گرانشی، رقابت استعماری، گرگ خاکستری و غیره استفاده می‌شود. از آنجا که جانمایی تاورکرین نیز از نوع مسائل بهینه‌سازی ترکیبی پیچیده سخت است، در برخی از مطالعات قبلی از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل تقریبی مساله جانمایی تاورکرین استفاده شده است. الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، ازدحام زنبور عسل (PBA) و ازدحام ذرات (PSO)، کلونی مورچگان (ACO)،کرم شبتاب (FA) و تبریدشبیه‌سازی‌شده (SA) از الگوریتم‌های فراابتکاری هستندکه تا به حال در حل مساله جانمایی تاورکرین به کارگرفته شده‌اند. جدول ۱ اطلاعاتی شامل سال انجام تحقیق، الگوریتم مورد استفاده و تعداد ارجاع به هریک از آن‌ها را نشان می‌دهد. تعداد ارجاع هر تحقیق از سایت گوگل اسکولار برداشت شده است. با توجه به تعداد ارجاع‌ها به این تحقیقات مشاهده می‌شود که حل مساله جانمایی تاورکرین با الگوریتم‌های فراابتکاری عمدتا مورد توجه محققان بوده است. با توجه به سال انجام تحقیقات مشخص می‌شود که استفاده از این الگوریتم‌ها در حل مساله جانمایی تاورکرین رو به افزایش است. همچنین درشکل ۲ میزان استفاده از هریک از الگوریتم‌ها نشان داده شده که مشاهده می‌شود استفاده از الگوریتم ژنتیک فراوانی بیشتری دارد. تعداد محدودی از الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر به جز الگوریتم ژنتیک تا به‌حال در حل مساله جانمایی تاورکرین استفاده شده است. درحالیکه الگوریتم‌های فراابتکاری متعددی برای حل اینگونه مسائل وجود داردکه شاید بتوان جواب‌های مناسبتری از آن‌ها بدست آورد. همچنین یکی دیگر از محدودیت اصلی همه‌ی تحقیقات انجام شده با الگوریتم‌های فراابتکاری را می‌توان عدم درنظرگرفتن وزن مصالح و ظرفیت تاورکرین در مدل ریاضی بیان کرد. در برخی از این تحقیقات نیز یک مدل ریاضی دقیق ارائه نشده است و فقط یک روش مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسئله فراهم شده است.

در برخی دیگر از تحقیقات انجام شده در زمینه جانمایی تاورکرین از مدل ریاضی عدد صحیح استفاده شده است [۲۳-۲۵, ۲۹, ۴۰-۴۲]. در اکثر آن‌ها مثال عددی در مقیاس کوچک ارائه شده و لذا حل آن به جای الگوریتم‌های فراابتکاری با نرم‌افزارهای ریاضی مثل LINGO, GAMS, GUROBI و غیره بوده است. یکی از تحقیقات اساسی در این زمینه در سال ۲۰۱۱ توسط هوانگ و همکارانش [۲۵] انجام شد. در

این تحقیق برای اولین بار مساله جانمایی تاورکرین و نقاط عرضه مصالح به صورت مدل ریاضی خطی عدد صحیح فرموله شده است. هدف تحقیق آن‌ها کم کردن هزینه و زمان انتقال مصالح از نقاط عرضه به تقاضا بود. البته وزن مصالح و نوع و ظرفیت تاورکرین در مدل ریاضی آن‌ها در نظر گرفته نشده است. همچنین آنها یک مثال عددی در مقیاس کوچک را با نرم‌افزار LINGO حل کردند و سراغ حل مساله جانمایی تاورکرین در مقیاس بزرگ و با استفاده از الگوریتم های فرا‌ابتکاری نرفتند.

در سال ۲۰۱۷ و در تکمیل کار هوانگ، یک تحقیق دیگر با مدل ریاضی غیر خطی عدد صحیح ارائه شد [۲۴]. این تحقیق با بسط مدل هوانگ به دنبال یک مدل دقیق‌تر برای جانمایی تاورکرین در سایت بود. در این تحقیق برای اولین بار تاثیر محل تاورکرین بر ظرفیت مورد نیاز و در نتیجه بر هزینه‌ها مطرح شد و تاثیر موقعیت تاورکرین بر ظرفیت مورد نیاز تاورکرین و درنتیجه هزینه اجاره و عملکرد آن در نظر گرفته شد. در این تحقیق همچنین برخی مفروضات در نظر گرفته شده به درستی به صورت ریاضی مدلسازی نشده است. هرچند که ظرفیت تاورکرین برای اولین بار در این تحقیق مطرح شد، اما به صورت متغیر تصمیم گیری وارد مدل ریاضی نشده است. همچنین از الگوریتم‌های فرا‌ابتکاری برای حل مساله استفاده نشد. ایراد دیگر در تحقیق آنها این بود که مدل آنها به صورت غیرخطی تعریف شده بود و در زمان حل مساله با نرم‌افزار خطی‌سازی مدل ریاضی را انجام دادند. لازم به ذکر است که مدل‌های خطی به دلیل ساختار ساده‌تر و الگوریتم‌های حل کارآمدتر، در مقایسه با مدل‌های غیرخطی ترجیح داده می‌شوند.

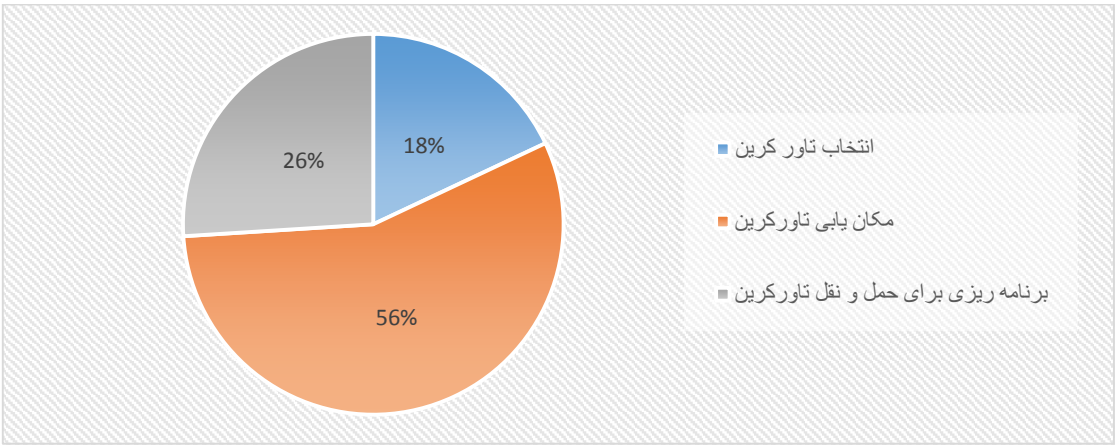
در سال ۲۰۲۲ امیری و همکارانش [۴۳] یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح ارائه دادند که برای اولین بار ظرفیت تاورکرین به عنوان یک متغیر تصمیم‌گیری وارد مدلسازی ریاضی شد. با حل این مدل علاوه بر مکان تاورکرین و محل عرضه مصالح، ظرفیت بهینه تاورکرین نیز از بین ظرفیت‌های در دسترس انتخاب می‌شود. آن‌ها با در نظر گرفتن وزن مصالح و فواصل تاورکرین تا نقاط عرضه و تقاضای مصالح و تاثیرش بر ظرفیت مورد نیاز تاورکرین، مدلی ریاضی خطی عدد صحیحی را ارائه دادند که خروجی مدل آنها ظرفیت و مکان بهینه تاورکرین و محل عرضه مصالح به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری بر اساس به حداقل رساندن کل هزینه حمل و نقل مصالح بود. مدل پیشنهادی آن‌ها با دو روش صحت سنجی شد. در تحقیق آنها نیز این محدودیت وجود داشت که یک مساله در مقیاس کوچک انتخاب شد و با استفاده از روشهای دقیق در نرم‌افزار GAMS حل شد و به حل مساله در مقیاس بزرگ و با استفاده از الگوریتم‌های فرا‌ابتکاری نپرداختند.

همانطور که در مرور و بررسی تحقیقات گذشته مشاهده شد، ظرفیت تاورکرین به صورت یک متغیر تصمیم‌گیری در مساله

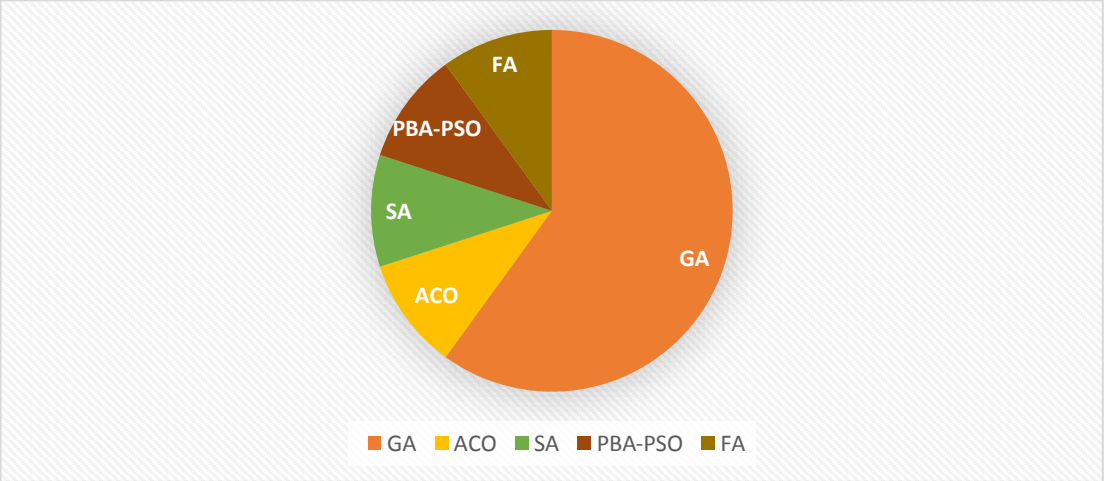
جانمایی آن در سایت و اثرش بر روی هزینه‌ها برای اولین بار در سال ۲۰۲۲ [۴۳] ارائه شده است. البته این تحقیق هم فقط در مقیاس کوچک و با روش‌های دقیق به حل مساله پرداخته است. همچنین این تحقیق برای سایت‌های با یک تاورکرین بوده است که عمدتا سایت‌های متوسطی هستند. در مواقعی که سایت بزرگتر باشد و با یک تاورکرین نتوان کل سایت را پوشش داد و یا برنامه زمان‌بندی پروژه فشرده باشد، احتمالا به بیش از یک تاورکرین نیاز خواهد بود. محدودیت قابل ذکر دیگر در تحقیقات گذشته این است که به ظرفیت باربری خاک در سایت چندان توجه نشده است. زیرا بهینه‌سازی فونداسیون تاورکرین با توجه به شرایط پارامترهای خاک و ظرفیت باربری آن نیز موضوع قابل توجهی است.

جدول ۱- تحقیقات انجام شده با الگوریتم‌های فرا ابتکاری و تعداد ارجاع به آن‌ها

ردیف	نویسندگان تحقیق و سال انجام آن	الگوریتم فرا ابتکاری مورد استفاده	تعداد ارجاع به تحقیق
۱	C. Tam et al. (2001)	Genetic Algorithm (GA)	۱۶۴
۲	C. Tam et al. (2003)	Genetic Algorithm (GA)	۱۱۲
۳	K. Alkriz et al. (2005)	Genetic Algorithm (GA)	۲۲
۴	M. A. Abdelmegid et al. (2015)	Genetic Algorithm (GA)	۵۷
۵	M. Marzouk et al. (2016)	Genetic Algorithm (GA)	۱۱۳
۶	H. Hyun et al. (2021)	Genetic Algorithm (GA)	۱۲
۷	C. Trevino et al. (2017)	Ant Colony Optimization (ACO)	۵
۸	LC. Lien et al. (2014)	Particle Bee Algorithm (PBA), Particle Swarm Optimization (PSO)	۹۵
۹	J. Wang et al. (2015)	Firefly Algorithm (FA)	۱۱۲
۱۰	K. Wu et al. (2020)	Simulated Annealing (SA)	۲۴



شکل ۱- تقسیم‌بندی تحقیقات گذشته درباره تاورکرین بر حسب زمینه‌ی کاربرد



شکل ۲- میزان استفاده ازهر یک از الگوریتم‌های فراابتکاری در تحقیقات گذشته در زمینه مساله جانمایی تاورکرین

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای تحقیقات آتی

برنامه‌ریزی برای جانمایی تجهیزات در سایت ساخت یکی از اساسی‌ترین فرآیندهای تصمیم-گیری در مراحل اولیه پروژه-هاست. تاورکرین یکی از تجهیزات کلیدی در سایت‌های ساخت به شمار می‌رود که جانمایی بهینه آن تاثیر قابل توجهی بر روی کیفیت، بهره‌وری، ایمنی، هزینه و مدت زمان پروژه دارد. این مقاله تحقیقات انجام شده در زمینه جانمایی تاورکرین با استفاده از مدلسازی ریاضی را بررسی کرده ومحدودیت‌های آن‌ها را مشخص‌کرده است. مساله جانمایی تاورکرین یک مساله بهینه‌سازی ترکیبی پیچیده سخت است. بنابراین، تعریف مسئله به صورت یک مساله بهینه‌سازی و ادغام آن با مدلسازی ریاضی برای رسیدن به جواب بهینه ضروری است. حل اینگونه مسائل معمولا از طریق الگوریتم‌های فراابتکاری انجام می‌شود. در برخی تحقیقات گذشته از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل این مساله استفاده شده است. اما اغلب الگوریتم ژنتیک به کارگرفته شده و استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر نقش کمرنگتری دارد. چه بسا با به‌کارگیری الگوریتم‌های جدید بتوان به نتایج بهتری دست یافت. همچنین در بسیاری از تحقیقات گذشته به حل مساله در مقیاس کوچک پرداخته شده و لذا از روش‌های دقیق برای حل استفاده شده است. در حالیکه واضح است در مقیاس واقعی حل این مساله از طریق الگوریتم-های ریاضی دقیق میسر نیست و استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل تقریبی آن ضروری است تا تجزیه و تحلیل مساله امکان‌پذیر شود. عدم توجه به ظرفیت تاورکرین به عنوان متغیر تصمیم‌گیری نیز یکی از محدودیت‌های تحقیقات گذشته بوده که اخیرا و در تحقیق جدیدی ظرفیت تاورکرین به عنوان متغیر تصمیم‌گیری و یک فاکتور موثر در هزینه حمل مصالح، وارد مدلسازی ریاضی شده است، اما این عامل تاثیرگذار در هزینه برای سایت‌های با چند تاورکرین هنوز مدلسازی نشده است. همچنین به ظرفیت باربری خاک در سایت در تحقیقات گذشته توجه نشده است. پیشنهاد برای تحقیقات آتی می-تواند ارائه یک مدل ریاضی

باشدکه بتواند در سایت پروژه-های عمرانی بزرگ شامل سدسازی و ساختمان‌سازی که معمولا بیش از یک تاورکرین مورد نیاز است، با توجه به تاورکرین‌های در دسترس، تعداد، مکان و ظرفیت مورد نیاز آن را برای هر پروژه اعلام کند، به گونه‌ای که کل زمان و هزینه حمل مصالح حداقل شود. برای این منظور می-توان از مدلسازی ریاضی چندهدفه با در نظرگرفتن معیارهاي متعددي برای بهینه-سازی از قبیل زمان، هزینه، تداخل بین شعاع عملکرد تاورکرین‌ها، متعادل کردن کارکرد هریک ازتاورکرین‌ها ودرنظرگرفتن مسائل ایمنی استفاده کرد. استفاده همزمان از تاورکرین و موبایل کرین و بهینه‌سازی عملیات حمل مصالح و احتمالا طرح بندی سایت به صورت دینامیک نیز می‌تواند موضوع دیگری برای تحقیقات‌آتی باشد. در نظر گرفتن جنس‌خاک، پارامترها و ظرفیت باربری خاک در سایت در بهینه‌سازی فونداسیون تاورکرین نیز می-تواند در مدلسازی ریاضی مساله جانمایی تاورکرین مورد توجه قرار گیرد تا با ارائه مدل جامع‌تر، انتخاب دقیق‌تری برای مکان تاورکرین در سایت با توجه به جنس خاک انجام شود. پس از مدلسازی ریاضی مساله، حل آن با الگوریتم های فراابتکاری جدید و الگوریتم-هایی‌که تا به‌حال در حل این-مساله استفاده نشده‌اند نیزموضوع‌قابل‌توجهی است.

۵-مراجع

[1] Suroliya M, Dhaka V, Poonia RC. Metaheuristics for communication protocols: Overview and conceptual comparison. Int J Adv Res Comput Sci Softw Eng. 2014;4(3):353-60.

[2] Alkriz K, Mangin J-C, editors. A new model for optimizing the location of cranes and construction facilities using genetic algorithms. Proceedings 21st Annual ARCOM Conference London, UK: Springer; 2005.

[3] Xu M, Mei Z, Luo S, Tan Y. Optimization algorithms for construction site layout planning: a systematic literature review. Engineering, Construction and Architectural Management. 2020;27(8):1913-38.

[4] Wang Q, Tan Y, Mei Z. Computational methods of acquisition and processing of 3D point cloud data for construction applications. Archives of computational methods in engineering. 2020; 479-99,27(2).

[5] Kim C, Park T, Lim H, Kim H. On-site construction management using mobile computing technology. Automation in construction. 2013;35:415-23.

[6] Rohani M, Shafabakhsh G, Haddad A, Asnaashari E. Strategy management of construction workspaces by conflict resolution algorithm and visualization model. Engineering, Construction and Architectural Management. 2018.

[7] Amiri R, Sardroud JM, De Soto BG. BIM-based applications of metaheuristic algorithms to support the decision-making process: Uses in the planning of construction site layout. Procedia Engineering. 2017;196:558-64.

[8] Easa SM, Hossain KMA. New mathematical optimization model for construction site layout. Journal of construction engineering management. 2008;134(8):653-62.

[9] Liao TW, Egbelu P, Sarker B, Leu S. Metaheuristics for project and construction management–A state-of-the-art review. Automation in construction. 2011;20(5):491-505.

[10] Vilventhan A, Kalidindi S. Interrelationships of factors causing delays in the relocation of utilities: A cognitive mapping approach. Engineering, construction and architectural management. 2016.

[11] Tam C, Tong TK, Chan WK. Genetic algorithm for optimizing supply locations around tower crane. Journal of construction engineering management. 2001;127(4) 315-21.

[12] Li R, Fu Y, Liu G, Mao C, Xu P, editors. An Algorithm for Optimizing the Location of Attached Tower Crane and Material Supply Point with BIM. ISARC Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction; 2018: IAARC Publications.

[13] Said H, El-Rayes K. Automated multi-objective construction logistics optimization system. Automation in Construction. 2014;43:110-22.

[14] Marzouk M, Abubakr A. Decision support for tower crane selection with building information models and genetic algorithms. Automation in Construction. 2016;61:1-15.

considering activity conflicts. Automation in construction. 2018;93:348-60.
[29] Yeoh JK, Chua DK. Optimizing crane selection and location for multistage construction using a four-dimensional set cover approach. Journal of Construction Engineering Management. 2017;143(8):04017029.
[30] Rodriguez-Ramos WE, Francis RL. Single crane location optimization. Journal of Construction Engineering Management. 1983;387-97, (4)109.
[31] Zhang P, Harris F, Olomolaiye P. A computer- based model for optimizing the location of a single tower crane: Authors claim 20–40% of hook horizontal travelling time can be saved if located at the position recommended by the model. Building research information. 1996;24(2):113-23.
[32] Zhang P, Harris FC, Olomolaiye P, Holt GD. Location optimization for a group of tower cranes. Journal of construction engineering management. 1999;125(2):115-22.
[33] Kang S-C, Miranda E. Computational methods for coordinating multiple construction cranes. Journal of Computing in Civil Engineering. 2008;22(4):252-63.
[34] Shapira A, Simcha M. AHP-Based Weighting of Factors Affecting Safety on Construction Sites with Tower Cranes. J Construction Engineering Management. 2009a;135(4):307-18.
[35] Tam C, Tong TK. GA-ANN model for optimizing the locations of tower crane and supply points for high-rise public housing construction. Construction Management Economics. 2003;21(3):257-66.
[36] Abdelmegid MA, Shawki KM, Abdel-Khalek H. GA optimization model for solving tower crane location problem in construction sites. Alexandria Engineering Journal. 2015;54(3):519-26.
[37] Hyun H, Park M, Lee D, Lee J. Tower crane location optimization for heavy unit lifting in high-rise modular construction. Buildings. 2021;11(3):121.
[38] Trevino C, Abdel-Raheem M. Single tower crane allocation using ant colony optimization. Computing in Civil Engineering 20172017. p. 132-40.
[39] Wu K, de Soto BG, Zhang F. Spatio-temporal planning for tower cranes in construction projects with simulated annealing. Automation in Construction. 2020;111:103060.
[40] Briskorn D, Dienstknecht M. Mixed-integer programming models for tower crane selection and positioning with respect to mutual interference. Automation in Construction. 2019;273(1):160-74.
[15] Astour H, Franz V. BIM-and simulation-based site layout planning. Computing in Civil and Building Engineering (2014)2014. p. 291-8.
[16] Ju F, Choo YS. Dynamic analysis of tower cranes. Journal of engineering mechanics. 2005;131(1):88-96.
[17] Shapira A, Goldenberg M. Soft considerations in equipment selection for building construction projects. Journal of construction engineering management. 2007;133(10):749-60.
[18] Irizarry J, Karan EP. Optimizing location of tower cranes on construction sites through GIS and BIM integration. Journal of information technology in construction. 2012;17(23):351-66.
[19] Lien L-C, Cheng M-Y. Particle bee algorithm for tower crane layout with material quantity supply and demand optimization. Automation in Construction. 2014;45:25-32.
[20] Al Hattab M, Zankoul E, Barakat M, Hamzeh F. Crane overlap and operational flexibility: balancing utilization, duration, and safety. Construction Innovation. 2018;18(1) 43-63.
[21] Leung AW, Tam C. Models for assessing hoisting times of tower cranes. Journal of construction engineering management. 1999;125(6):385-91.
[22] Shapira A, Elbaz A. Tower crane cycle times: case study of remote-control versus cab-control operation. Journal of Construction Engineering Management. 2014;140(12):05014010.
[23] Huang C, Wong C. Optimization of crane setup location and servicing schedule for urgent material requests with non-homogeneous and non-fixed material supply. Automation in Construction. 2018;89:183-98.
[24] Moussavi Nadoushani ZS, Hammad AW, Akbarnezhad A. Location optimization of tower crane and allocation of material supply points in a construction site considering operating and rental costs. Journal of Construction Engineering Management. 2017;143(1):04016089.
[25] Huang C, Wong CK, Tam CM. Optimization of tower crane and material supply locations in a high-rise building site by mixed-integer linear programming. Automation in Construction. 2011;20(5):571-80.
[26] Wang J, Zhang X, Shou W, Wang X, Xu B, Kim MJ, et al. A BIM-based approach for automated tower crane layout planning. Automation in Construction. 2015;59:168-78.
[27] Rashedi E, Nezamabadi-Pour H, Saryazdi S. GSA: a gravitational search algorithm. J Information sciences. 2009; 2232-48:(13) 179.
[28] Younes A, Marzouk M. Tower cranes layout planning using agent-based simulation

construction using service request optimization. Automation in construction. 2014;47:69-77.
[49] Ali MAD, Babu NR, Varghese K. Collision free path planning of cooperative crane manipulators using genetic algorithm. Journal of computing in civil engineering. 2005;19(2):182-93.
[50] Chang Y-C, Hung W-H, Kang S-C. A fast path planning method for single and dual crane erections. Automation in Construction. 2012;22:468-80.
[51] Lei Z, Taghaddos H, Olearczyk J, Al-Hussein M, Hermann U. Automated method for checking crane paths for heavy lifts in industrial projects. Journal of construction engineering management. 2013;139(10):04013011.
[52] Leung AW, Tam C, Liu D. Comparative study of artificial neural networks and multiple regression analysis for predicting hoisting times of tower cranes. Building Environment. 2001 36(4):457-67.
[53] Sivakumar Pá, Varghese K, Babu NR. Automated path planning of cooperative crane lifts using heuristic search. Journal of computing in civil engineering. 2003;17(3):197-207.
[54] Tam C, Leung AW, Liu D. Nonlinear models for predicting hoisting times of tower cranes. Journal of Computing in Civil Engineering. 2002;16(1):76-81.
[41] Ji Y, Leite F. Optimized planning approach for multiple tower cranes and material supply points using mixed-integer programming. Journal of Construction Engineering Management. 2020;146(3):04020007.
[42] Riga K, Jahr K, Thielen C, Borrmann A. Mixed integer programming for dynamic tower crane and storage area optimization on construction sites. Automation in Construction. 2020;120:103259.
[43] Amiri R, Sardroud JM, Kermani VM. Decision support system for tower crane location and material supply point in construction sites using an integer linear programming model. Engineering, Construction Architectural Management. 2022.
[44] Hanna AS, Lotfallah WB. A fuzzy logic approach to the selection of cranes. Automation in construction. 1999;8(5):597-608.
[45] Sawhney A, Mund A. An integrated crane type and model selection system. Construction Management Economics. 2001;19(2):227-37.
[46] Shapira A, Goldenberg M, management. AHP-based equipment selection model for construction projects. Journal of construction engineering. 2005;131(12):1263-73.
[47] Wu D, Lin Y, Wang X, Wang X, Gao S. Algorithm of crane selection for heavy lifts. Journal of Computing in Civil Engineering. 2011;25(1):57-65.
[48] Zavichi A, Madani K, Xanthopoulos P, Oloufo AA. Enhanced crane operations in