

## تعیین بهینه ظرفیت و مکان تاورکرین و محل عرضه مصالح در سایت‌های ساخت با استفاده از الگوریتم ژنتیک

رویا امیری

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی،  
تهران، ایران

جواد مجروحی سردرود\*

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی،  
تهران، ایران

وحید مومنائی کرمانی

گروه ریاضی، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران

j.majrouhi@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵

### چکیده

جانمایی تجهیزات در سایت پروژه‌های ساخت، یکی از مهمترین و ضروری‌ترین مراحل اولیه در مدیریت ساخت پروژه‌هاست که به‌طور قابل توجهی بر بهره‌وری پروژه تأثیر دارد. از آنجا که تاورکرین یکی از تجهیزات کلیدی در سایت‌های ساخت می‌باشد، جانمایی بهینه و مدیریت عملیات آن می‌تواند عملکرد ساخت را بهبود بخشد. تعیین نوع و مکان بهینه تاورکرین، یک مساله بهینه‌سازی ترکیباتی پیچیده سخت است که عوامل درهم قفل شده متعددی در آن تأثیر دارند و حل آن در مقیاس بزرگ از طریق روش‌های ریاضی دقیق میسر نیست. از این‌رو استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل آن ضروری است. محل قرارگیری تاورکرین بر ظرفیت مورد نیاز آنو در نتیجه بر هزینه‌های کلی حمل و نقل مصالح تأثیر دارد که مدت‌ها در تحقیقات مورد توجه نبود. اخیراً در تحقیق جدیدی ظرفیت تاورکرین به صورت متغیرتصمیم‌گیری وارد مدلسازی ریاضی شده است. اما مساله در مقیاس کوچک و با روش دقیق حل شده است. از آنجا که در سایت با مقیاس واقعی فضای امکان‌پذیر جواب مساله افزایش می‌یابد، لذا استفاده از تکنیک‌های دقیق برای دستیابی به جواب بهینه عملی نیست و استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مساله ضروری است. این پژوهش در مقیاس بزرگ با استفاده از الگوریتم ژنتیک نوع و مکان بهینه تاورکرین و محل بهینه عرضه مصالح به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری را بر اساس به حداقل رساندن کل هزینه حمل و نقل مصالح ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک با موفقیت جواب بهینه را پیدا کرده و منجر به کاهش حدود ۱۴ درصدی در هزینه حمل و نقل مصالح در مقایسه با زمانی که طرح‌بندی سایت بر اساس تجربه باشد، می‌شود.

**کلید واژگان:** سایت ساخت، ظرفیت و مکان تاورکرین، محل عرضه مصالح، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک

## ۱- مقدمه

ردپای بهینه سازی تقریباً در همه بخش‌های زندگی ما وجود دارد. در حقیقت ما به طور پیوسته به دنبال راه‌حل‌های بهینه برای حل مسائلی که با آن‌ها روبرو می‌شویم، هستیم. امروزه توسعه، پیشرفت‌های روزافزون، نوآوری و رقابت‌های فشرده تجاری، شرکت‌های ساختمانی را به سمت مدیریت و سازماندهی مناسب و دقیق سایت‌های ساخت به منظور اطمینان از بهره‌وری و حاشیه سودآوری بیشتر هدایت می‌کند [۱]. بهره‌وری و بازدهی هر پروژه از چند جنبه و معیار می‌تواند بررسی شود: زمان، هزینه، کیفیت و ایمنی. با برنامه‌ریزی دقیق و روند مناسب پیشرفت پروژه می‌توان به بهبود بهره‌وری و کیفیت در عین کاهش زمان اتمام و بهینه‌سازی هزینه‌ها رسید.

مدیریت و برنامه‌ریزی برای فضای سایت پروژه‌ها از عوامل مهم در روند اجرای پروژه است. برنامه‌ریزی برای جانمایی تجهیزات در ساخت یکی از رایج‌ترین و اساسی‌ترین فرآیندهای تصمیم‌گیری در مراحل اولیه پروژه‌های ساخت است که طی آن بایستی مکان تجهیزات و امکانات در داخل محدوده فضای سایت تعیین شود [۲، ۳]. جانمایی و طراحی فضای سایت که نوع، مقدار و موقعیت تجهیزات و امکانات ضروری در سایت پروژه‌های ساخت را معرفی می‌کند، تاثیر قابل توجهی بر روی کیفیت، بهره‌وری، ایمنی، هزینه و مدت زمان پروژه دارد [۴]. هزینه تامین و برپایی تجهیزات در سایت ممکن است بین ۱۰٪ تا ۴۰٪ کل هزینه ساخت باشد [۵]. این مرحله، مرحله‌ای مهم و حیاتی برای پیمانکاران و ذینفعان پروژه است. تحقیقات و مطالعات نشان می‌دهند که چنانچه اقدامات مدیریت تدارکاتی در کارگاه در این مرحله به گونه‌ای کارآمد و موثر طراحی و اجرا شود، می‌تواند هزینه‌ها را بین ۱۰٪ تا ۳۰٪ کاهش دهد [۶]. برنامه‌ریزی دقیق برای طراحی سایت پروژه‌های ساخت، بر نحوه انتخاب صحیح و استفاده موثر از فضای سایت با توجه به محدودیت‌ها و قیود موجود به خصوص در پروژه‌های بزرگ و فضاهای کاری محدود، تمرکز دارد و منجر به افزایش بازدهی و کارایی پروژه خواهد شد [۷].

استفاده از ماشین آلات در صنعت ساخت همیشه یک هزینه‌ی عمده بوده است. تاورکرین‌ها یکی از معمول‌ترین و در عین حال کلیدی‌ترین تجهیزات در سایت‌های ساخت هستند که برای حمل و جابجایی افقی و قائم اشیا سنگین و محدوده وسیعی از المان‌های ساختمانی نظیر تیرها، ستون‌ها، المان‌های پیش‌ساخته، قالب‌ها و پانل‌های بزرگ و ... استفاده می‌شوند [۸-۱۱]. 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 [۱۲].

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، معمولاً دستیابی به یک برنامه جانمایی مناسب می‌تواند چالش برانگیز باشد [۱۳، ۱۴]. 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 [۱۵]. به واقع استفاده موثر از تاورکرین در سایت به قضاوت ماهرانه متخصصین و در نظر گرفتن عوامل فنی زیادی بستگی دارد. در حال حاضر به علت فقدان منابع کمی در دسترس، جانمایی تاورکرین عمدتاً به صورت دستی و بر اساس تجربه‌ی کارشناسان و مهندسی فنی پروژه تعیین می‌شود. زمانیکه تعداد تقاضاهای کاری برای عملیات تاورکرین افزایش می‌یابد، نیاز به یک رویکرد کمی و کارا، بیشتر محسوس است.

در مکان‌یابی بهینه تاورکرین‌ها، محل تامین مصالح در سایت نیز حائز اهمیت است، زیرا مصالح در نقاط تامین، ذخیره شده و توسط تاورکرین از این مکان برداشته و در نقاط تقاضا تحویل داده می‌شوند. در هر مکان تقاضا وزن مصالح درخواستی متفاوت و از پیش تعیین شده است. حداکثر وزن مصالح برای حمل و بیشترین طول بوم تاورکرین که می‌تواند مصالح با وزن مشخص را حمل کند، با توجه به ظرفیت آن تعیین می‌شود. سطح پوشش تاورکرین با توجه به ظرفیت و طول بوم آن بر اساس منحنی شعاع-بار آن تعیین می‌شود. در واقع گشتاور ناشی از ضرب وزن مصالح در حداکثر شعاع حمل آن نباید از ظرفیت گشتاوری تاورکرین بیشتر شود. هرچه ظرفیت تاورکرین بالاتر باشد، هزینه‌ی اجاره و عملیات آن نیز بیشتر خواهد بود [۱۶]. لذا ظرفیت مورد نیاز تاورکرین در پروژه نیز یکی از عوامل تأثیرگذار در هزینه‌های پروژه است. نقاط تقاضای مصالح در سایت از قبل تعیین شده و ثابت هستند و بر اساس موقعیت و شکل ساختمان در دست ساخت تعیین می‌شوند. با قرار دادن تاورکرین در هر یک از مکان‌های کاندید در سایت، فاصله بین تاورکرین با نقاط کاندید تامین مصالح و نقاط تقاضای مصالح مشخص می‌شود. ظرفیت مورد نیاز تاورکرین با توجه به این فواصل و وزن مشخص مصالحی که قرار است بین نقاط عرضه و تقاضا حمل شوند، تعیین خواهد شد. از آنجا که نقاط تقاضای مصالح از قبل تعیین شده و ثابت است، لذا اهمیت مکان‌یابی تاورکرین و نقاط تامین مصالح در بهینه‌سازی هزینه و زمان اجرای پروژه و همچنین ظرفیت مورد نیاز تاورکرین، که آن هم بر هزینه تأثیرگذار است، مشخص می‌شود. به عبارت دیگر مساله انتخاب بهینه نوع و مکان تاورکرین و محل عرضه مصالح در سایت، یک مساله بهینه‌سازی ترکیباتی پیچیده سخت است که عوامل درهم تنیده‌ی متعددی در آن تاثیر دارند و حل آن با بالا رفتن تعداد پارامترها و متغیرها از طریق الگوریتم‌های ریاضی دقیق میسر نیست [۱۱، ۱۷، ۱۸]. از این رو استفاده از مدل‌های ریاضی برای ساده‌سازی مساله و الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل آن ضروری است تا تجزیه و تحلیل مساله امکان‌پذیر شود.

این تحقیق به دنبال حل مساله جانمایی تاورکرین در مقیاس بزرگ با الگوریتم ژنتیک است، به گونه‌ای که نوع و مکان تاورکرین و محل عرضه مصالح به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری مستقیماً از حل مساله با

این مساله استفاده کرده‌اند. در جدول ۱ تحقیقات مذکور به همراه الگوریتم مورد استفاده در تحقیق نشان شده است. محدودیت اصلی همه‌ی تحقیقات ذکر شده در این جدول را می‌توان عدم در نظر گرفتن وزن مصالح و ظرفیت تاورکرین در مدل ریاضی بیان کرد. همچنین در برخی از این تحقیقات یک مدل ریاضی دقیق ارائه نشده است و فقط یک روش مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسئله فراهم شده است.

برخی از تحقیقات انجام شده در زمینه جانمایی تاورکرین با مدل ریاضی عدد صحیح انجام شده است [۱۵-۱۷, ۲۰, ۲۶-۲۸]. این تحقیقات در جدول ۲ مرور شده و یافته‌ها و محدودیت‌های آنها بیان شده است که حل همه آنها با نرم‌افزارهای ریاضی بوده که در جدول عنوان شده است. یکی از تحقیقات بنیادی در سال ۲۰۱۱ توسط هوانگ و همکارانش [۱۷] 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. در این تحقیق تابع هدف به دنبال کم کردن هزینه و زمان انتقال مصالح از نقاط عرضه به تقاضا بود که به صورت خطی تعریف شد. اگرچه مطالعه آنها یک تحقیق اساسی در زمینه جانمایی تاورکرین با مدل ریاضی خطی عدد صحیح است، اما نوع و ظرفیت تاورکرین و وزن مصالح در مدل ریاضی آنها در نظر گرفته نشده است. همچنین آنها یک مثال عددی در مقیاس کوچک را با نرم‌افزار ریاضی حل کردند و سراغ حل مساله در مقیاس بزرگ با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری نرفتند. در سال ۲۰۱۷ و در ادامه کار هوانگ، یک تحقیق دیگر با مدل ریاضی غیر خطی عدد صحیح ارائه شد. موسوی و همکارانش [۱۶] با بسط مدل هوانگ به دنبال یک مدل دقیق‌تر برای جانمایی تاورکرین و نقاط عرضه مصالح در سایت بودند. آنها برای اولین بار تاثیر محل تاورکرین بر ظرفیت مورد نیاز و در نتیجه بر هزینه‌ها را مطرح کردند. در این تحقیق تاکید شده است که موقعیت تاورکرین علاوه بر تاثیر بر روی زمان و هزینه حمل مصالح از نقاط عرضه به تقاضا، به طور قابل توجهی بر روی ظرفیت مورد نیاز تاورکرین و در نتیجه هزینه اجاره و عملکرد آن نیز تاثیر می‌گذارد. لذا یک مدل ریاضی عدد صحیح برای جانمایی تاورکرین و محل عرضه مصالح ارائه دادند که در آن تاثیر محل تاورکرین بر ظرفیت و هزینه‌های آن مدنظر قرار گرفت و با به کارگیری قیود، البته به صورت غیرخطی، سعی در مدلسازی شرایط و محدودیت‌های مساله داشتند. در واقع آنها نتوانستند قیود مساله را به صورت خطی مدلسازی کنند و در زمان حل مساله با نرم‌افزار خطی‌سازی مدل ریاضی را انجام دادند. هرچند که ظرفیت تاورکرین برای اولین بار در مدل آنها مطرح شد، اما به صورت متغیر تصمیم‌گیری وارد مدل ریاضی نشده است. همچنین در تحقیق آنها نیز از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مساله استفاده نشد. همانطور که در مرور تحقیقات گذشته اشاره شد، تاثیر ظرفیت تاورکرین در مدل ریاضی و اثر آن بر روی کل هزینه‌های حمل و نقل مصالح در سایت برای اولین بار توسط موسوی و همکارانش [۱۶] مطرح گردید، اما به صورت متغیر تصمیم‌گیری وارد مدل ریاضی نشده است. البته ایراد دیگر در تحقیق آنها این بود که مدل آنها به صورت غیرخطی تعریف

این الگوریتم بر اساس به حداقل رساندن کل هزینه حمل و نقل مصالح استخراج شوند.

## ۲- مروری بر تحقیقات گذشته

برنامه‌ریزی برای تاورکرین‌ها فرآیندی شامل تعیین مکان، نوع، تعداد و برنامه‌ریزی برای حرکات آنهاست که تاثیر قابل توجهی بر بهره‌وری کلی پروژه دارد [۱۹] که مکان‌یابی تاورکرین بیشتر مورد توجه تحقیقات مدلسازی ریاضی قرار گرفته است. چندین رویکرد مختلف برای حل مساله مکان‌یابی تاورکرین وجود دارد که رایج‌ترین و کاراترین آنها مدل-سازی ریاضی است [۲۰]. تحقیقات پیشین در زمینه جانمایی تاورکرین، به دنبال برآورده کردن معیارهایی به عنوان تابع هدف بوده‌اند که زمان و هزینه مورد توجه‌ترین توابع هدف در آنها بوده است.

در اولین تحقیقات در سال ۱۹۸۳ یک مدل ریاضی برای بدست آوردن موقعیت بهینه تاورکرین ارائه شد که هدف آن به حداقل رساندن کل هزینه حمل و نقل مصالح توسط تاورکرین بر اساس حرکت زاویه‌ای و شعاعی قلاب بود و حرکت قائم قلاب در این تحقیق مورد توجه قرار نگرفت [۲۱]. ژنگ و همکارانش یک مدل شبیه سازی برای مکان‌یابی تاورکرین ارائه دادند که زمان حمل و نقل افقی قلاب را کاهش داد. آنها نشان دادند در صورتی که تاورکرین در موقعیت پیشنهادی مدل ارائه شده قرار گیرد، تقریباً بین ۲۰ تا ۴۰ درصد از زمان حرکت افقی قلاب تاورکرین می‌تواند کم شود. جانمایی محل تامین مصالح و نوع تاورکرین در مدل آن‌ها وارد نشد [۲۲].

زمانی که یک تاورکرین نتواند کل سایت را پوشش دهد و یا برنامه زمان‌بندی پروژه فشرده باشد، معمولاً چند تاورکرین مورد نیاز است. پوشش کلی و متعادل وظایف در سایت ساخت از مهمترین کارها در جانمایی گروه تاورکرین است. همچنین بهینه‌سازی محل استقرار گروهی از تاورکرین‌ها به دلیل مسائل ایمنی و تداخلات آن‌ها چالش-برانگیز است [۲۳-۲۵]. در تحقیق دیگر ژنگ و همکارانش [۲۳] مدل ریاضی قبلی‌شان را توسعه دادند. در این تحقیق سه معیار برای بهینه سازی مکان گروه تاورکرین در نظر گرفته شد که عبارت بودند از بالانس کردن باربری تاورکرین‌ها، کمینه کردن تداخلات بین آنها و بالابردن کارایی تاورکرین‌ها با کم کردن زمان کارکرد آنها. در مدل آنها با وجود تاثیر محل عرضه مصالح در مکان‌یابی بهینه تاورکرین، رقابت بین نقاط مختلف کاندید تامین مصالح و همچنین تاثیر ظرفیت تاورکرین در هزینه‌ها در نظر گرفته نشد.

در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی پیچیده اغلب از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری مانند ژنتیک، ازدحام ذرات، کلونی مورچگان، الگوریتم زنبور عسل، کرم‌شب‌تاب، تبرید شبیه‌سازی شده 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. در میان این تحقیقات استفاده از الگوریتم ژنتیک فراوانی بیشتری دارد، اما محققان الگوریتم‌های دیگری را نیز با الهام از طبیعت برای حل

با دو روش صحت سنجی و تایید کردند. اما در تحقیق آنها نیز یک مساله در مقیاس کوچک انتخاب شد و با استفاده از روشهای دقیق در نرم افزار گمز حل شد و از الگوریتمهای فراابتکاری برای حل مساله در مقیاس بزرگ واقعی استفاده نشد. از آنجا که تحقیق امیری و همکارانش [۲۹] نواقص مدل های قبلی را برطرف کرده و ظرفیت تاورکرین به عنوان متغیر تصمیم گیری وارد مدل ریاضی آنها شده است، لذا تحقیق حاضر از مدل ریاضی پیشنهادی در تحقیق آنها استفاده کرده و در مقیاس واقعی و ابعاد بزرگ به حل مساله جانمایی تاورکرین با الگوریتم ژنتیک پرداخته است.

شده بود. لازم به ذکر است که مدل های خطی به دلیل ساختار ساده تر و الگوریتم های حل کارآمدتر، در مقایسه با مدل های غیرخطی ترجیح داده می شوند. در سال ۲۰۲۲ امیری و همکارانش [۲۹] یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح ارائه دادند که ظرفیت تاورکرین به عنوان یک متغیر تصمیم گیری وارد مدل سازی ریاضی شد و با حل مساله ظرفیت بهینه تاورکرین از بین ظرفیت های در دسترس انتخاب می شد. خروجی مدل آنها ظرفیت و مکان بهینه تاورکرین و محل عرضه مصالح به عنوان متغیرهای تصمیم گیری بر اساس به حداقل رساندن کل هزینه حمل و نقل مصالح بود. همچنین آنها در تحقیق خود مدل ریاضی ارائه شده را

جدول ۱- تحقیقات انجام شده در زمینه جانمایی تاورکرین با استفاده از الگوریتم های فراابتکاری

ردیف	شماره منبع	الگوریتم فراابتکاری مورد استفاده	یافته ها
۱	[۴]	الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm)	بهینه سازی مکان تاورکرین و محل تامین مصالح
۲	[۳۰]	الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm)	بهینه سازی مکان تاورکرین
۳	[۱]	الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm)	بهینه سازی مکان تاورکرین و محل تامین مصالح
۴	[۷]	الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm)	بهینه سازی مکان تاورکرین
۵	[۳۱]	الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm)	بهینه سازی مکان تاورکرین
۶	[۳۲]	ژنتیک- شبکه عصبی مصنوعی (Genetic Algorithm and Artificial Neural Network)	بهینه سازی مکان تاورکرین و محل تامین مصالح
۷	[۳۳]	کلونی مورچگان (Ant Colony Optimization)	بهینه سازی مکان تاورکرین
۸	[۱۱]	الگوریتم زنبور عسل - ازدحام ذرات - ازدحام زنبور عسل (Bee Algorithm, Particle Swarm Optimization, Particle Bee Algorithm)	بهینه سازی مکان تاورکرین و محل تامین مصالح
۹	[۱۸]	الگوریتم کرم شب تاب (Firefly Algorithm)	بهینه سازی مکان تاورکرین و محل تامین مصالح
۱۰	[۳۴]	تبرید شبیه سازی شده (Simulated Annealing)	بهینه سازی مکان تاورکرین

جدول ۲- تحقیقات انجام شده در زمینه جانمایی تاورکرین با استفاده از مدل ریاضی عدد صحیح

ردیف	شماره منبع	نوع مدل ریاضی	نرم افزار مورد استفاده برای حل مدل	یافته ها	محدودیت ها
۱	[۱۷]	Linear-MIP	LINGO	بهینه سازی مکان تاورکرین و محل تامین مصالح	ظرفیت تاورکرین و وزن مصالح در مدل ریاضی ارائه شده در نظر گرفته نشده است.
۲	[۱۶]	Non-Linear MIP	CPLEX (IBM)	بهینه سازی مکان تاورکرین و محل تامین مصالح	مدل به صورت غیرخطی ارائه شد و توسط نرم افزار خطی سازی شده است. ظرفیت تاورکرین به عنوان متغیر تصمیم گیری وارد مدل نشده است.
۳	[۲۰]	Linear-MIP	CPLEX	بهینه سازی مکان تاورکرین	ظرفیت تاورکرین به عنوان متغیر تصمیم گیری وارد مدل نشده است.
۴	[۲۶]	Linear-MIP	CPLEX	بهینه سازی نوع و مکان تاورکرین	ظرفیت تاورکرین به عنوان متغیر تصمیم گیری وارد مدل نشده است.
۵	[۲۸]	Linear-MIP	GUROBI	بهینه سازی مکان تاورکرین و محل تامین مصالح	مدل ارائه شده برای سایت پروژه های خاصی که مصالح جعبه ای شکل هستند، کاربرد دارد. ظرفیت تاورکرین به عنوان متغیر تصمیم گیری وارد مدل نشده است.
۶	[۲۷]	Linear-MIP	COIN Branch-and-Cut (CBC)	بهینه سازی مکان چند تاورکرین و محل تامین مصالح	ظرفیت تاورکرین به عنوان متغیر تصمیم گیری وارد مدل نشده است. تداخلات مربوط به چندکرین و مسائل ایمنی و تعادل در باربری آنها در مدل لحاظ نشده است.

و قیود مربوط به مساله به صورت معادلات (۱) تا (۱۳) فرموله شده است:

$$\text{Minimize} \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N C_{sikn} X_{sikn} + \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N C_n^r Y_{kn} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N Y_{kn} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I Z_{si} = 1 \quad s=1, \dots, S \quad (3)$$

$$Z_{si} = Z_{s+1,i} \quad s=1, \dots, S-1, \quad i=1, \dots, I \quad (4)$$

$$(Z_{si} + Y_{kn}) \leq (1 + X_{sikn}) \quad s=1, \dots, S, \quad i=1, \dots, I, \quad k=1, \dots, K, \quad n=1, \dots, N \quad (5)$$

$$(2 - Z_{si} - Y_{kn}) \leq M(1 - X_{sikn}) \quad s=1, \dots, S, \quad i=1, \dots, I, \quad k=1, \dots, K, \quad n=1, \dots, N \quad (6)$$

$$D_{ik} W_s X_{sikn} \leq P_n \quad s=1, \dots, S, \quad i=1, \dots, I, \quad k=1, \dots, K, \quad n=1, \dots, N \quad (7)$$

$$D_{ik} Y_{kn} \leq L_n \quad i=1, \dots, I, \quad k=1, \dots, K, \quad n=1, \dots, N \quad (8)$$

$$D_{jk} W_s Y_{kn} \leq P_n \quad j=1, \dots, J, \quad \forall s \in A_j, \quad k=1, \dots, K, \quad n=1, \dots, N \quad (9)$$

$$D_{jk} Y_{kn} \leq L_n \quad j=1, \dots, J, \quad k=1, \dots, K, \quad n=1, \dots, N \quad (10)$$

$$Z_{si} \in \{0,1\} \quad s=1, \dots, S, \quad i=1, \dots, I \quad (11)$$

$$Y_{kn} \in \{0,1\} \quad k=1, \dots, K, \quad n=1, \dots, N \quad (12)$$

$$X_{sikn} \in \{0,1\} \quad s=1, \dots, S, \quad i=1, \dots, I, \quad k=1, \dots, K, \quad n=1, \dots, N \quad (13)$$

معادله (۱) تابع هدف مساله را نشان می‌دهد که به دنبال به حداقل رساندن کل هزینه‌های حمل‌ونقل مصالح است و شامل دو جمله است. این معادله می‌تواند کل هزینه حمل و نقل مصالح را از نقاط عرضه به نقاط تقاضای از پیش تعیین شده توسط یک تاورکرین محاسبه کند. هزینه‌های تاورکرین به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: هزینه متغیر و

### ۳- ارائه مدل ریاضی پیشنهادی

در این قسمت مدل ریاضی ارائه شده در تحقیق امیری و همکارانش [۲۹] بیان می‌شود:

#### ۳-۱- تعریف صورت مساله و مفروضات

قرار است در یک کارگاه ساختمانی، یک تاورکرین نصب شود که تعداد  $S$  قطعه مصالح را از نقاط تامین مصالح به نقاط تقاضای آن‌ها، که از قبل تعیین شده است، منتقل کند.  $N$  نوع تاورکرین با ظرفیت‌های مختلف و حداکثر طول بوم‌های متفاوت وجود دارد و هزینه اجاره و کارکرد هر نوع کاملاً مشخص است. همچنین  $K$  مکان کاندید برای نصب تاورکرین،  $I$  مکان کاندید برای ذخیره و عرضه مصالح، تعداد  $S$  قطعه مصالح با وزن مشخص هر کدام برابر با  $W_s$  برای حمل و  $J$  مکان مشخص شده برای تقاضای مصالح، که همان ساختمان در حال ساخت است، در سایت وجود دارد. از قبل محل تقاضای  $J$  هر کدام از مصالح  $s$ ، مشخص است. این مساله به دنبال یافتن مناسب‌ترین نوع تاورکرین و محل قرارگیری آن و همچنین محل تامین مصالح در سایت از بین مکان‌های کاندید در سایت است، به گونه‌ای که هزینه کل حمل و نقل مصالح حداقل شود.

مفروضات در نظر گرفته شده به شرح زیر می‌باشد:

۱- این تحقیق در مورد آن دسته از پروژه‌هایی است که نیاز به یک تاورکرین دارند.

۲- مکان و طرح هندسی نقاط کاندیدای تامین مصالح مشخص است و مساحت آنها برای ذخیره مصالح به اندازه کافی بزرگ می‌باشد.

۳- مکان و طرح هندسی نقاط تقاضای مصالح از قبل تعیین شده و ثابت است.

۴- به دلیل راحتی در بارگیری و تخلیه مصالح، سهولت در مسائل اجرایی پروژه و جلوگیری از پراکندگی مصالح در سایت، فقط یکی از مکان‌های ذخیره کاندید برای عرضه مصالح انتخاب می‌شود.

۵- تعداد و وزن مصالحی که باید به هر نقطه تقاضا تحویل داده شوند، از قبل مشخص است.

۶- محل و طرح هندسی نقاط کاندیدای نصب تاورکرین در سایت مشخص است. هزینه نصب و برچیدن تاورکرین در تمام نقاط کاندیدا تفاوت قابل توجهی با یکدیگر ندارد.

۷- هزینه عملیات، تعمیر و نگهداری و اجاره هر نوع تاورکرین بر حسب ظرفیت آن مشخص است.

۸- ظرفیت باربری خاک مقاومت کافی برای برپایی و نصب تاورکرین را دارد.

۹- دید اپراتور کامل است و عملیات بدون وقفه انجام می‌شود.

#### ۳-۲- فرمول بندی مساله

مدل ریاضی خطی عدد صحیح ارائه شده، مکان بهینه‌ی تاورکرین و محل تامین مصالح و همچنین نوع بهینه تاورکرین را به گونه‌ای تعیین می‌کند که کل هزینه حمل‌ونقل مصالح در سایت حداقل شود. تابع هدف

مصالح  $s$ ام از نقطه عرضه  $\lambda$ م به نقطه تقاضای از قبل تعیین شده‌ی آن مصالح، توسط تاورکرین نوع  $n$  قرار گرفته در مکان  $k$ ام صورت بگیرد، مقدار  $X_{sijkn}$  برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر است. مقدار  $X_{sijkn}$  به مقادیر بدست آمده از متغیرهای  $Z_{si}$  و  $Y_{kn}$  بستگی دارد، به گونه‌ای که وقتی هر دو متغیر  $Z_{si}$  و  $Y_{kn}$  هم‌زمان و با هم برابر با یک باشند،  $X_{sijkn}$  نیز برابر ۱ خواهد بود، در حالی که اگر هر یک یا هر دوی آن -ها برابر صفر باشد، مقدار  $X_{sijkn}$  نیز باید صفر باشد. معادلات (۵) و (۶) به گونه‌ای تنظیم شده اند که تعریف ذکر شده اقنا می‌شوند. معادله (۷) به گونه ای تنظیم شده است که با ضرب وزن هر مصالح،  $W_s$ ، در فاصله تاورکرین از نقطه تأمین آن مصالح،  $D_{ik}$ ، نبایستی از حداکثر ظرفیت تاورکرین،  $P_n$ ، فراتر رود. معادله (۸) فاصله بین تاورکرین و نقطه تأمین مصالح را با حداکثر طول بوم امکان‌پذیر برای تاورکرین بررسی می‌کند، که برای هر تاورکرین مطابق نمودار بار-شعاع آن تعیین می‌شود. معادلات (۹) و (۱۰) همان کنترلها را برای نقاط تقاضای مصالح، که بسته به شکل هندسی ساختمان در حال ساخت است، انجام می‌دهند. معادله (۹)، برای هر نقطه تقاضای مصالح،  $j$ ، فقط با توجه به وزن مصالحی که بایستی در آن مکان تخلیه شوند، و نه همگی مصالح، کنترل می‌شود. زیرا مصالحی که قرار است در نقطه تقاضای  $j$  تخلیه شوند، از ابتدا مشخص هستند و توسط مجموعه  $A_j$  نشان داده شده‌اند. به این ترتیب، یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح برای به حداقل رساندن هزینه کل حمل و نقل مصالح در سایت ساخت مطرح شده که تابع هدف در معادله (۱) و مجموعه محدودیت‌ها در معادلات (۲) تا (۱۳) فرموله شده است.

در مدل ریاضی ارائه شده پارامتر زمان حرکت قلاب  $T_{(i,j)}^k$  مشاهده می‌شود که قبلاً معرفی شده است که در این قسمت به نحوه محاسبه آن پرداخته می‌شود. ژانگ و همکارانش [۲۳] مجموعه ای از معادلات ریاضی را برای محاسبه زمان حرکت قلاب در انتقال مصالح از نقاط عرضه به نقاط تقاضا پیشنهاد دادند. با توجه به شکل ۱، حرکات قلاب تاورکرین در دو صفحه افقی و قائم می‌باشد. حرکات شعاعی و مماسی در جهت افقی و حرکت عمودی در جهت عمودی است که هر کدام جداگانه محاسبه شده و ترکیب می‌شوند و نهایتاً زمان کل حرکت قلاب تاورکرین بدست می‌آید.

فاصله بین نقاط عرضه و تقاضا و فاصله بین این نقاط و محل تاورکرین را می‌توان با استفاده از معادلات (۱۵) تا (۱۷) محاسبه کرد:

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (15)$$

$$D_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2} \quad (16)$$

$$D_{jk} = \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2} \quad (17)$$

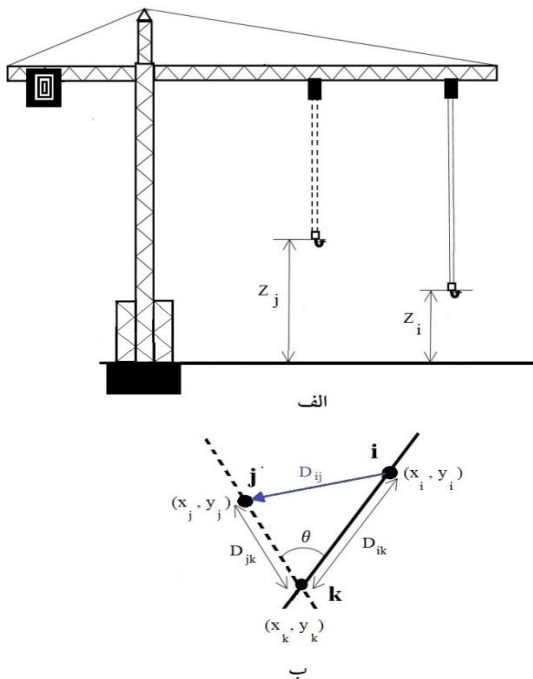
ثابت. جمله اول و دوم تابع هدف به ترتیب هزینه‌های متغیر و ثابت را نشان می‌دهد. هزینه‌های متغیر مانند هزینه مصرف انرژی، دستمزد اپراتور و تعمیر و نگهداری دستگاه که کاملاً به زمان کارکرد تاورکرین وابسته است و در تابع هدف با پارامتر  $C_{sijkn}$  نشان داده شده است. هزینه ثابت شامل هزینه اجاره یا خرید تاورکرین برای مدت زمان مشخص طبق برنامه زمان‌بندی پروژه است که با توجه به ظرفیت تاورکرین متفاوت است و در تابع هدف با پارامتر  $C_n^r$  نشان داده شده است. هزینه‌های ثابت و متغیر در تابع هدف در دو جمله جداگانه ذکر شده است، زیرا هزینه‌های متغیر کاملاً به زمان کارکرد تاورکرین وابسته است، در حالی که هزینه ثابت این‌گونه نیست. فرض کنید عملیات حمل مصالح به هر دلیلی در سایت متوقف شود. در این صورت، هزینه‌های متغیر حذف می‌شوند درحالی‌که هزینه‌های ثابت همچنان ادامه دارد. در تابع هدف  $C_{sijkn}$  هزینه کارکرد تاورکرین برای انتقال مصالح  $s$ ام از نقطه عرضه  $\lambda$ م به نقطه تقاضای از پیش تعیین شده آن مصالح توسط تاورکرین نوع  $n$ ام، قرار گرفته در مکان  $k$ ام را نشان می‌دهد. همچنین  $C_n^r$  هم هزینه اجاره یا خرید تاورکرین نوع  $n$ ام را برای مدت زمان مشخص طبق برنامه زمان‌بندی پروژه نشان می‌دهد. مقدار  $C_{sijkn}$  با معادله (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$C_{sijkn} = C_n^t \cdot T_{(i,j)}^k \quad (14)$$

که در معادله بالا  $C_n^t$  و  $T_{(i,j)}^k$  به ترتیب هزینه کارکرد تاورکرین نوع  $n$ ام در واحد زمان و زمان کارکرد تاورکرین برای انتقال مصالح از نقطه عرضه  $i$  به نقطه تقاضای  $j$  به وسیله تاورکرین قرار گرفته در مکان  $k$  می‌باشد. محاسبات مربوط به  $T_{(i,j)}^k$  در ادامه ارائه شده است. با در نظر گرفتن تاورکرین در هر مکان کاندیدا و انتخاب محل عرضه هر مصالح با وزن مشخص  $W_s$  و با در نظر گرفتن نقطه تقاضای از پیش تعیین شده هر مصالح، حداکثر ظرفیت مورد نیاز تاورکرین مشخص می‌شود. در این مدل، تابع هدف به دنبال تعیین محل قرارگیری تاورکرین و محل تأمین مصالح و همچنین تعیین نوع تاورکرین است به گونه‌ای که کل هزینه‌های حمل و نقل حداقل شود.

چندین معادله نیز برای نشان دادن محدودیت‌ها و جواب شدنی مساله بیان شده است. در فرآیند بهینه سازی، معادله (۲) با هدف اطمینان از انتخاب منحصر به فرد نوع و مکان تاورکرین با توجه به انتخاب‌های کاندیدهای موجود در سایت، ارائه شده است. اگر تاورکرین نوع  $n$ ام در مکان  $k$ ام قرار گیرد، متغیر باینری  $Y_{kn}$  برابر با یک و در غیر این صورت صفر است. هر مصالح بایستی در یکی از محل‌های کاندید تأمین ذخیره شود، که معادله (۳) این محدودیت را نشان می‌دهد. اگر مصالح  $s$ ام در نقطه عرضه  $\lambda$ م ذخیره شود، متغیر باینری  $Z_{si}$  برابر با یک و در غیر این صورت صفر است. همچنین با توجه به مفروضات مساله، همه مصالح باید فقط در یکی از مکان‌های کاندید تأمین مصالح ذخیره شوند که این محدودیت در معادله (۴) نشان داده شده است.  $X_{sijkn}$  به عنوان متغیر اصلی باینری تابع هدف تعریف می‌شود. در صورتی که انتقال





شکل ۱- نمایش گرافیکی حرکات تاورکین (الف) حرکت در صفحه قائم (ب) حرکت در صفحه افقی [۲۹]

$\alpha$  و  $\beta$  پارامترهایی با مقدار بین ۰ تا ۱ هستند، که به ترتیب نشان دهنده میزان هماهنگی بین حرکت شعاعی و مماسی قلاب بر اساس مهارت اپراتور تاورکین و درجه هماهنگی حرکت قلاب در صفحه افقی و عمودی است.  $\gamma_k$  نیز پارامتر دیگری است که بسته به درجه سختی در کنترل حرکت قلاب با توجه به مکان‌های مختلف قرارگیری تاورکین، می‌تواند بین ۰/۱ تا ۱۰ متغیر باشد. اگر از سیستم دید پیشرفته در تاورکین استفاده شود، خط دید اپراتور بهبود یافته و حرکات تاورکین سریعتر است. لذا زمان عملیات انتقال مصالح کاهش یافته و می‌توان به  $\gamma_k$  مقدار کمتری داد [۱۷]. در حالت عملیات با دید عادی، مقدار  $\gamma_k$  را می‌توان ۱ در نظر گرفت.

#### ۴- حل یک مثال عددی با الگوریتم ژنتیک

مساله جانمایی تاورکین در سایت ساخت یک مساله بهینه‌سازی ترکیباتی پیچیده سخت است. حل اینگونه مسائل با بالارفتن تعداد پارامترها و متغیرها از طریق الگوریتم‌های ریاضی دقیق میسر نیست. این رو استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل تقریبی آن ضروری است تا تجزیه و تحلیل مساله امکان‌پذیر شود. در میان مسائل بهینه‌سازی استفاده از الگوریتم ژنتیک فراوانی بیشتری دارد. در این تحقیق نیز از الگوریتم ژنتیک (GA) برای حل مساله جانمایی تاورکین استفاده گردیده و نتایج ارائه شده است.

در این قسمت داده‌های ورودی مساله معرفی می‌شود. در این مثال، ۲۶۲۵ قطعه مصالح برای حمل داریم ( $S=2625$ ). ۱۸ محل کاندید برای تامین مصالح ( $I=18$ )، ۷۵ محل برای تقاضای مصالح ( $J=75$ ) و

زمان حرکت قلاب نشانگر زمان کارکرد تاورکین برای حمل مصالح در سایت است که هم در صفحه افقی و هم در عمودی محاسبه می‌شود. معادلات (۱۸) و (۱۹) به ترتیب زمان حرکت شعاعی و مماسی قلاب تاورکین را نشان می‌دهند.

$$T_{r(i,j)}^k = \frac{|D_{ik} - D_{jk}|}{V_r} \quad (18)$$

$$T_{\omega(i,j)}^k = \frac{\arccos\left(\frac{D_{ik}^2 + D_{jk}^2 - D_{ij}^2}{2 D_{ik} D_{jk}}\right)}{V_{\omega}} \quad (19)$$

$$0 \leq \arccos\theta \leq \pi$$

کل زمان حرکت افقی را می‌توان با استفاده از معادله (۲۰) که ترکیبی از زمان صرف شده برای حرکات مماسی و شعاعی است تخمین زد:

$$T_{h(i,j)}^k = \text{Max}(T_{r(i,j)}^k, T_{\omega(i,j)}^k) + \alpha \cdot \text{Min}(T_{r(i,j)}^k, T_{\omega(i,j)}^k) \quad (20)$$

حرکت عمودی قلاب نیز از رابطه (۲۱) بدست می‌آید. معادله (۲۲)، که ترکیبی از زمان حرکت افقی و عمودی است، کل زمان حرکت قلاب را محاسبه می‌کند تا مصالح را از نقطه عرضه  $i$  به نقطه تقاضای  $j$  توسط تاورکین قرار گرفته در محل  $k$  انتقال دهد.

$$T_{v(i,j)}^k = \frac{|Z_i - Z_j|}{V_h} \quad (21)$$

$$T_{(i,j)}^k = \gamma_k [\text{Max}(T_{h(i,j)}^k, T_{v(i,j)}^k) + \beta \cdot \text{Min}(T_{h(i,j)}^k, T_{v(i,j)}^k)] \quad (22)$$

ظرفیت آن نشان می‌دهد. مشخصات انواع تاورکرین، شامل ظرفیت، هزینه اجاره برای یک دوره معین، هزینه عملیات تاورکرین در واحد زمان و حداکثر طول بوم دسترسی تاورکرین در جدول ۷ ارائه شده است. این اعداد از تحقیق موسوی و همکارانش در سال ۲۰۱۷ [۱۶] الهام گرفته شده‌اند.

مقادیر سرعت شعاعی ( $V_r$ )، سرعت زاویه‌ای ( $V_\omega$ )، سرعت بالا بردن قلاب ( $V_h$ ) و پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\gamma_k$  طبق تحقیقات قبلی (با فرض اینکه تفاوت قابل توجهی بین مکان‌های کاندید قرارگیری تاورکرین وجود ندارد)، به صورت جدول ۸ در نظر گرفته می‌شوند [۱۷].

[۲۳]

۲۷ مکان در دسترس برای راه اندازی و نصب تاورکرین ( $K=27$ ) در نظر گرفته شده است. مصالح در وزن‌های متفاوت وجود دارند که بایستی توسط تاورکرین به نقاط تقاضای مختلف رسانده شوند. جدول ۳ مشخصات وزن مصالح، تعداد و محل تقاضای هر کدام را مشخص می‌کند. اطلاعات ورودی دیگر، شامل مختصات نقاط کاندید تامین مصالح، نقاط تقاضای مصالح و مکان‌های کاندید برای قرارگیری تاورکرین به ترتیب در جداول ۴ تا ۶ نشان داده شده است.

۸ نوع تاورکرین ( $N=8$ ) وجود دارد. پارامتر  $C_n^r$  هزینه اجاره تاورکرین برای یک دوره معین با توجه به برنامه زمان‌بندی پروژه و ظرفیت آن را نشان می‌دهد. پارامتر  $C_n^t$  هزینه عملکرد تاورکرین در دقیقه، مانند دستمزد اپراتور، هزینه مصرف انرژی و تعمیر و نگهداری را با توجه به

جدول ۳- مشخصات مصالح و محل تقاضای آن‌ها

تعداد کل قطعات درخواستی در هر مکان تقاضای مصالح	تعداد قطعه از هر وزن	وزن قطعات بر حسب تن ( $W_j$ )	شماره مکان تقاضای مصالح j
۲۰	۵	۲ و ۳/۵ و ۷	۱ و ۷ و ۱۱ و ۲۱ و ۳۵ و ۳۸ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۴ و ۵۰ و ۵۳ و ۵۵ و ۵۶ و ۵۹ و ۶۸ و ۷۲
۳۰	۱۰	۴ و ۵ و ۶	۳ و ۵ و ۹ و ۱۳ و ۲۴ و ۲۶ و ۲۸ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۴ و ۳۴ و ۴۵ و ۴۸ و ۵۴ و ۵۸ و ۶۵ و ۷۱ و ۷۵
۴۰	۱۰	۱ و ۳ و ۴/۵ و ۵/۵	۲ و ۸ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۷ و ۲۹ و ۳۳ و ۳۳ و ۴۳ و ۴۶ و ۴۹ و ۶۲ و ۶۴ و ۶۶ و ۶۷ و ۷۰ و ۷۳
۴۵	۹	۲ و ۴ و ۵ و ۶ و ۷	۴ و ۶ و ۱۰ و ۱۲ و ۱۶ و ۲۰ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۵ و ۳۲ و ۳۲ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۹ و ۴۲ و ۴۷ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۷ و ۶۰ و ۶۱ و ۶۳ و ۶۹ و ۷۴

## ۴- حل یک مقال عددی با الگوریتم ژنتیک

جدول ۴- مختصات نقاط کاندید تامین مصالح

شماره مکان i	x	y	z
۱	۲۸	۲۲	.
۲	۴۴	۲۲	.
۳	۵۴	۲۲	.
۴	۶۵	۲۲	.
۵	۷۵	۲۲	.
۶	۸۵	۲۲	.
۷	۹۲	۳۱	.
۸	۹۲	۴۳	.
۹	۹۲	۵۵	.
۱۰	۹۲	۶۶	.
۱۱	۸۱	۷۷	.
۱۲	۷۱	۷۷	.
۱۳	۵۷	۷۷	.
۱۴	۴۷	۷۷	.
۱۵	۳۶	۷۷	.
۱۶	۲۷	۶۱	.
۱۷	۲۲	۴۸	.
۱۸	۲۲	۳۴	.



جدول ۵- مختصات نقاط تقاضای مصالح

شماره مکان , j	x	y	z
۱	۳۲	۳۲	۳۸
۲	۳۲	۳۷	۳۸
۳	۳۲	۴۲	۳۸
۴	۳۷	۳۲	۳۸
۵	۳۷	۳۷	۳۸
۶	۳۷	۴۲	۳۸
۷	۴۲	۳۲	۴۴
۸	۴۲	۳۷	۴۴
۹	۴۲	۴۲	۴۴
۱۰	۴۲	۴۷	۴۴
۱۱	۴۲	۵۲	۴۲
۱۲	۴۲	۵۷	۴۲
۱۳	۴۲	۶۲	۴۲
۱۴	۴۲	۶۷	۴۲
۱۵	۴۷	۳۲	۴۴
۱۶	۴۷	۳۷	۴۴
۱۷	۴۷	۴۲	۴۴
۱۸	۴۷	۴۷	۴۴
۱۹	۴۷	۵۲	۴۲
۲۰	۴۷	۵۷	۴۲
۲۱	۴۷	۶۲	۴۲
۲۲	۴۷	۶۷	۴۲
۲۳	۵۲	۳۲	۴۴
۲۴	۵۲	۳۷	۴۴
۲۵	۵۲	۴۲	۴۴
۲۶	۵۲	۴۷	۴۴
۲۷	۵۲	۵۲	۴۲
۲۸	۵۲	۵۷	۴۲
۲۹	۵۲	۶۲	۴۲
۳۰	۵۲	۶۷	۴۲
۳۱	۵۷	۳۲	۴۴
۳۲	۵۷	۳۷	۴۴
۳۳	۵۷	۴۲	۴۴
۳۴	۵۷	۴۷	۴۴
۳۵	۵۷	۵۲	۴۲
۳۶	۵۷	۵۷	۴۲
۳۷	۵۷	۶۲	۴۲
۳۸	۵۷	۶۷	۴۲
۳۹	۶۲	۳۲	۴۴
۴۰	۶۲	۳۷	۴۴
۴۱	۶۲	۴۲	۴۴
۴۲	۶۲	۴۷	۴۴
۴۳	۶۲	۵۲	۴۲
۴۴	۶۲	۵۷	۴۲
۴۵	۶۲	۶۲	۴۲
۴۶	۶۷	۳۲	۳۷
۴۷	۶۷	۳۷	۳۷
۴۸	۶۷	۴۲	۳۷

۳۷	۴۷	۶۷	۴۹
۳۹	۵۲	۶۷	۵۰
۳۹	۵۷	۶۷	۵۱
۳۹	۶۲	۶۷	۵۲
۳۷	۳۲	۷۲	۵۳
۳۷	۳۷	۷۲	۵۴
۳۷	۴۲	۷۲	۵۵
۳۷	۴۷	۷۲	۵۶
۳۹	۵۲	۷۲	۵۷
۳۹	۵۷	۷۲	۵۸
۳۹	۶۲	۷۲	۵۹
۳۷	۳۲	۷۷	۶۰
۳۷	۳۷	۷۷	۶۱
۳۷	۴۲	۷۷	۶۲
۳۷	۴۷	۷۷	۶۳
۳۹	۵۲	۷۷	۶۴
۳۹	۵۷	۷۷	۶۵
۳۹	۶۲	۷۷	۶۶
۳۹	۶۷	۷۷	۶۷
۳۷	۳۲	۸۲	۶۸
۳۷	۳۷	۸۲	۶۹
۳۷	۴۲	۸۲	۷۰
۳۷	۴۷	۸۲	۷۱
۳۹	۵۲	۸۲	۷۲
۳۹	۵۷	۸۲	۷۳
۳۹	۶۲	۸۲	۷۴
۳۹	۶۷	۸۲	۷۵

جدول ۶- مختصات نقاط کاندید نصب تاور کرین

شماره مکان , k	x	y	z
۱	۲۳	۲۸	۰
۲	۴۱	۲۸	۰
۳	۵۱	۲۸	۰
۴	۶۰	۲۸	۰
۵	۶۸	۲۸	۰
۶	۷۵	۲۸	۰
۷	۸۲	۲۸	۰
۸	۸۶	۳۳	۰
۹	۸۶	۴۲	۰
۱۰	۸۶	۴۹	۰
۱۱	۸۶	۵۷	۰
۱۲	۸۶	۶۷	۰
۱۳	۸۳	۷۱	۰
۱۴	۷۶	۷۱	۰
۱۵	۷۳	۶۶	۰
۱۶	۶۷	۶۶	۰
۱۷	۶۱	۶۶	۰
۱۸	۵۸	۷۱	۰
۱۹	۴۹	۷۱	۰

۲۰	۴۱	۷۱	۰
۲۱	۳۸	۶۷	۰
۲۲	۳۸	۶۰	۰
۲۳	۲۸	۵۳	۰
۲۴	۲۸	۴۶	۰
۲۵	۳۱	۴۶	۰
۲۶	۲۸	۴۱	۰
۲۷	۲۸	۳۲	۰

جدول ۷- مشخصات انواع تاورکرین

نوع کرین n	ظرفیت کرین $P_n$ (t.m)	هزینه اجاره برای مدت زمان مشخص $C_n^r$ (\$)	هزینه عملکرد در واحد زمان $C_n^t$ (\$/min)	حداکثر دسترسی بازوی کرین $L_n$ (m)
۱	۲۰۰	۱۲۰۰۰	۲	۴۵
۲	۲۵۰	۱۵۰۰۰	۲/۵	۵۵
۳	۳۰۰	۱۸۰۰۰	۳	۶۵
۴	۳۵۰	۲۱۰۰۰	۲/۵	۷۵
۵	۴۰۰	۲۴۰۰۰	۴	۸۵
۶	۴۵۰	۲۷۰۰۰	۴/۵	۹۵
۷	۵۰۰	۳۰۰۰۰	۵	۱۰۰
۸	۵۵۰	۳۳۰۰۰	۵/۵	۱۰۵

جدول ۸- سرعت قلاب تاورکرین در جهات مختلف و ضرایب مربوطه [۱۷، ۲۳]

$V_r$ (m/min)	$V_\omega$ (rad/min)	$V_h$ (m/min)	$\alpha$	$\beta$	$\gamma_k$
۵۳/۳	۷/۵۷	۶۰	۰/۲۵	۱	۱

برای کد نویسی و حل مسئله با الگوریتم ژنتیک از نرم افزار متلب استفاده شده است. حل مساله با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند مرحله دارد. در مرحله اول اطلاعات اولیه مساله طبق جداول ۳ تا ۸ به عنوان داده های ورودی مورد نیاز به برنامه داده شده است. در مرحله دوم یک جمعیت اولیه از فضای جواب مساله برای الگوریتم به صورت تصادفی تولید می شوند. تعداد جمعیت اولیه در حل این مثال ۱۰۰ حالت جواب تصادفی از فضای جواب مساله در نظر گرفته شده است ( $N_{pop} = 100$ ). این جواب ها معرف محل جانمایی تاورکرین، محل عرضه مصالح و نوع تاورکرین می باشند. لذا هریک از کروموزوم های مساله از سه متغیر تشکیل شده است که البته هریک از این متغیرها نیز شامل چندین بیت است که به صورت صفر و یک تعریف می شوند. تعداد بیت ها در هر یک از متغیرهای محل جانمایی تاورکرین، محل عرضه مصالح و نوع تاورکرین به ترتیب  $K$  و  $I$  و  $N$  می باشد که تعداد کل بیت ها در هر یک از کروموزوم ها مجموع آن ها است. در مرحله سوم بایستی تابع برازندگی هریک از اعضای این جمعیت محاسبه شود. البته در محاسبه برازندگی بایستی قیود مربوط به ظرفیت و طول بوم هر تاورکرین را نیز برای هر کروموزوم مدنظر داشت که برای اعمال محدودیت ها از روش تابع جریمه استفاده و به تابع هدف اضافه شده اند. در ادامه مراحل الگوریتم ژنتیک، در مرحله چهارم پس از محاسبه برازندگی هریک از جواب ها، بایستی عملگر انتخاب بر اساس روش چرخ رولت برای انتخاب کروموزوم های والد و تولید نسل جدید عمل کند. هر یک از کروموزوم ها

بسته به میزان برازندگی شان شانس انتخاب شدن را دارند که ۸۰ درصد آنها انتخاب می شوند. به عبارت دیگر هر چه برازندگی یک کروموزوم بیشتر باشد، احتمال انتخاب شدنش برای تولید نسل بعدی بیشتر است. سپس در مرحله پنجم بر روی کروموزوم های انتخاب شده به عنوان والد عملگر تزویج اعمال می شود. عمل تزویج بصورت تک نقطه ای انجام شده است. در مرحله ششم عملگر جهش نیز برای بهبود احتمالی جمعیت بعدی عمل می کند که روی ۳۰ درصد جمعیت با نرخ ۰/۰۲ جهش اعمال شده است. کلیه مقادیر پارامترها برای تنظیم الگوریتم پس از چندین بار سعی و خطا به گونه ای در نظر گرفته شده که بهترین نتیجه را برای حل این مساله با الگوریتم ژنتیک نتیجه دهد. در مرحله هفتم ارزیابی جمعیت جدید انجام شده است. این مراحل آنقدر تکرار می شود تا جواب مساله به همگرایی برسد. همانطور که می دانیم در هر بار اجرای الگوریتم های فراابتکاری با توجه به جمعیت اولیه ای که به صورت کاملاً تصادفی از بین فضای جواب مساله انتخاب می شود، ممکن است به جواب های بهینه ای متفاوتی برسد. گاهی اوقات ممکن است به صورت تصادفی جمعیت اولیه مناسب تر باشند و الگوریتم با قابلیت و هوش مصنوعی خود و راهکارهای برون رفت از بهینه محلی به سمت جواب بهینه سراسری نزدیک شود و چه بسا در برخی حالات به آن نیز برسد. البته قابلیت الگوریتم ها در حل مسائل بهینه سازی متفاوت نیز فرق می کند و برخی الگوریتم ها برای حل برخی مسائل بهینه سازی بهتر

مصالح، تاورکرین با ظرفیت بیشتر مورد نیاز شده است. لذا مشاهده می‌شود که با مکان‌یابی نامناسب تاورکرین و در نتیجه ظرفیت مورد نیاز بالاتر برای تاورکرین، هزینه افزایش قابل توجهی خواهد داشت. این مقایسه اهمیت مکان‌یابی تاورکرین در کاهش هزینه‌ی پروژه و ظرفیت مورد نیاز تاورکرین در هر پروژه را نشان می‌دهد.

همانطور که در جدول ۹ مشخص است، نتایج اجرای ۸ام برنامه کمترین هزینه را در میان ۱۰ اجرای برنامه دارد. در این حالت از میان ۲۷ مکان کاندید برای تاورکرین، ۱۸ محل کاندید برای عرضه مصالح و ۸ نوع تاورکرین، انتخاب موقعیت  $k=4$  برای تاورکرین، موقعیت  $i=8$  برای عرضه مصالح و نوع  $n=3$  برای ظرفیت تاورکرین با استفاده از الگوریتم ژنتیک، منجر به کمترین هزینه حمل و نقل ۲۶۲۵ قطعه مصالح مدنظر می‌شود. در این حالت هزینه حمل و نقل مصالح،  $25607/206$  دلار است. این نتیجه به عنوان بهترین جواب بهینه بدست آمده توسط الگوریتم ژنتیک در ۱۰ بار اجرای برنامه شناخته می‌شود. نتیجه بهینه در اجرای ۸ام در شکل ۳ به صورت گرافیکی نشان داده شده است.

همانطور که در نتایج مشاهده می‌شود در نتایج اجرای ۱ام و ۸ام نوع و مکان تاورکرین یکی است و تفاوت فقط در محل عرضه مصالح است. هزینه عملکرد تاورکرین در این دو اجرا به ترتیب  $8004/223$  و  $7607/206$  می‌باشد که هزینه در اجرای اول حدود ۵ درصد بیشتر است که ناشی از افزایش زمان کارکرد تاورکرین می‌باشد. این تفاوت صرفاً به دلیل تاثیر مکان عرضه مصالح است. در اجرای ۹ام و ۱۰ام مکان عرضه مصالح در هر دو اجرا یکسان است و تفاوت در مکان تاورکرین و در نتیجه ظرفیت مورد نیاز تاورکرین است. هزینه‌های عملکرد بدست آمده در این دو اجرا به ترتیب  $9735/841$  و  $8440/023$  هستند که اجرای ۹ام حدود ۱۵ درصد بیشتر از اجرای ۱۰ام هزینه دارد. این افزایش هزینه فقط ناشی از مکان تاورکرین و در نتیجه ظرفیت مورد نیاز آن است. با بررسی این هزینه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که هرچند که مکان عرضه مصالح نیز در هزینه کلی حمل و نقل موثر است، اما مکان تاورکرین و در نتیجه ظرفیت آن تاثیر بیشتری در هزینه کلی حمل و نقل مصالح دارد.

هر ۱۰ اجرای برنامه و جواب‌های بدست آمده، جواب بهینه ناشی از حل با الگوریتم ژنتیک است. با این حال چنانچه خوش‌بینانه میانگین هزینه در اجراهای دیگر به جز اجرای ۸ام (که بهترین جواب بدست آمده است) را به عنوان جانمایی بر اساس تجربه در نظر بگیریم مشاهده می‌شود که با جانمایی بهینه تاورکرین حدود ۱۴ درصد کاهش در هزینه نسبت به حالت انتخاب بر اساس تجربه وجود دارد. لذا اهمیت مکان‌یابی تاورکرین در کاهش هزینه مشخص می‌شود.

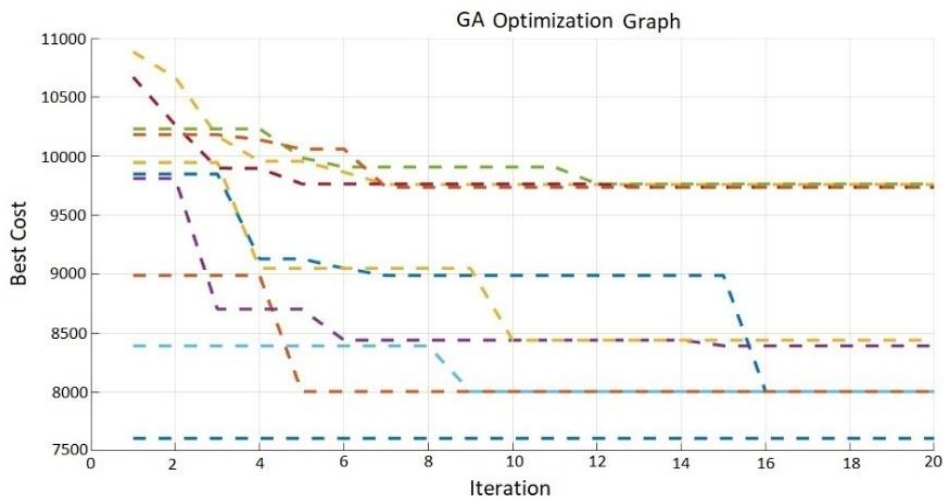
جواب می‌دهند و قابلیت بیشتری دارند. لذا مساله ۱۰ بار اجرا شد تا نتیجه به صورت میانگین بررسی شود. روند تغییرات هزینه عملکرد تاورکرین برای حمل و نقل مصالح و همگرایی به سمت جواب بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. جزئیات جواب بهینه نیز در جدول ۹ ارائه شده است.

در ۱۰ بار اجرای برنامه، الگوریتم ژنتیک با توجه به جمعیت اولیه‌ای که به صورت کاملاً تصادفی از بین فضای جواب مساله انتخاب کرده، به جواب‌های بهینه‌ی متفاوتی رسیده است. در ۴ اجرا از ۱۰ اجرای الگوریتم (اجراهای شماره ۱ و ۲ و ۶ و ۸) مکان بهینه تاورکرین  $k=4$  انتخاب شده است. با توجه به اینکه مکان شماره ۴ برای نصب تاورکرین بیشترین تکرار را در جواب‌های بهینه داشته و ضمناً هزینه حمل و نقل مصالح در این ۴ اجرا از سایر حالات کمتر می‌باشد و تاورکرین با ظرفیت کمتر مورد نیاز است، احتمالاً مکان بهینه برای جانمایی تاورکرین  $k=4$  می‌باشد.

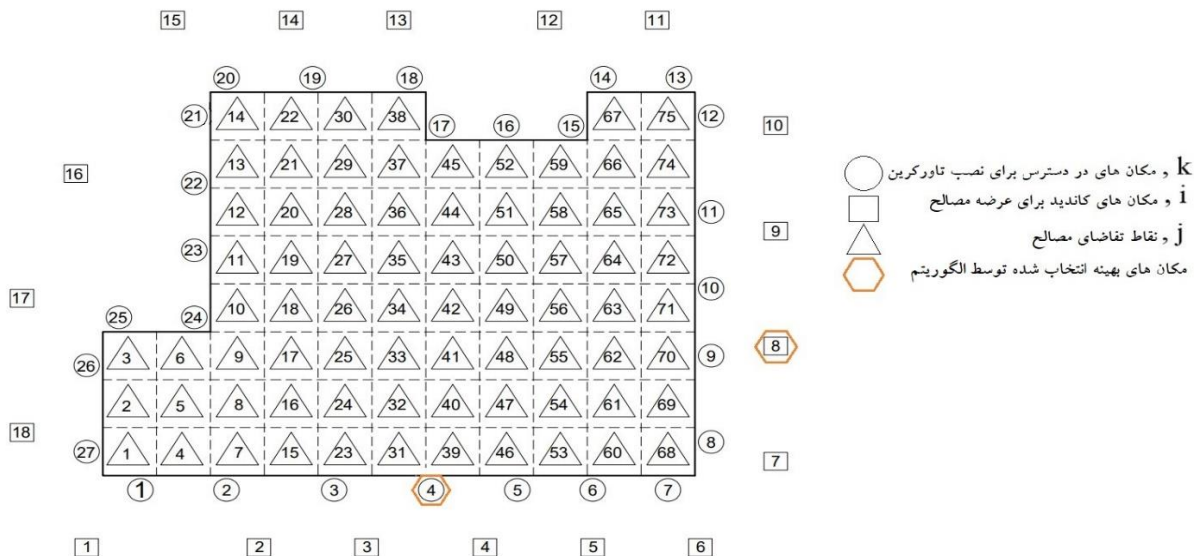
همانطور که قبلاً بیان شد تاورکرین با ظرفیت بیشتر هزینه اجاره و عملکرد بیشتری خواهد داشت. موقعیت قرارگیری یک تاورکرین با توجه به فاصله آن با نقاط عرضه و تقاضای مصالح و وزن مصالحی که بایستی به هر مکان تقاضای مصالح حمل شود، به طور قابل توجهی بر روی ظرفیت مورد نیاز تاورکرین و در نتیجه هزینه اجاره و عملکرد آن تاثیر می‌گذارد. لازم به ذکر است که وزن مصالحی که به نقاط عرضه مختلف می‌رسد، متفاوت است. همانگونه که قبلاً بیان شد در مدل ریاضی استفاده شده ظرفیت تاورکرین به عنوان یک متغیر تصمیم‌گیری وارد مدل شده که مستقیماً با حل آن، ظرفیت مورد نیاز تاورکرین علاوه بر مکان آن، بهینه و مشخص می‌شود. البته این دو متغیر تصمیم‌گیری (نوع و مکان تاورکرین) کاملاً به یکدیگر وابسته بوده و بر روی یکدیگر تاثیر دارند. در اجراهای شماره ۱ و ۲ و ۴ و ۶ و ۸ و ۱۰ توسط الگوریتم ژنتیک، مشاهده می‌شود که تاورکرین نوع  $n=3$  انتخاب شده است. با توجه به اینکه در ۶ بار اجرای برنامه تاورکرین نوع ۳ انتخاب شده است، احتمالاً با توجه با فواصل، وزن مصالح و مکان‌های کاندید برای تاورکرین و عرضه مصالح، بهینه‌ترین انتخاب برای ظرفیت تاورکرین بوده و احتمالاً ظرفیت کمتری با توجه به شرایط سایت پاسخگو نبوده است. در حالیکه در ۴ بار اجرای دیگر برنامه (اجراهای شماره ۳ و ۵ و ۷ و ۹) تاورکرین نوع  $n=5$  جواب بهینه شده است که هزینه اجاره و عملکرد بیشتری نسبت به نوع  $n=3$  دارد (حدود ۲۸ درصد افزایش هزینه). این نتیجه بیانگر این موضوع است که در این ۴ اجرا، الگوریتم احتمالاً در بهینه محلی گیر افتاده و نتوانسته مکان بهینه‌تری برای جانمایی تاورکرین انتخاب کند و در نتیجه با توجه به فواصل و وزن

جدول ۹- نتایج بهینه مثال عددی بزرگ در ۱۰ بار اجرای برنامه توسط الگوریتم ژنتیک

شماره اجرای برنامه	k	n	i	کل هزینه شامل هزینه عملکرد و اجاره تاورکرین	درصد افزایش هزینه نسبت به بهترین جواب بدست آمده برای هزینه عملکرد تاورکرین
۱	۴	۳	۱۸	$26004/223 = 8004/223 + 18000$	۵/۲ %
۲	۴	۳	۱۸	$26004/223 = 8004/223 + 18000$	۵/۲ %
۳	۸	۵	۳	$33760/084 = 9760/084 + 24000$	۲۸/۳ %
۴	۵	۳	۸	$26391/899 = 8391/899 + 18000$	۱۰/۳ %
۵	۲۱	۵	۱۲	$33764/466 = 9764/466 + 24000$	۲۸/۴ %
۶	۴	۳	۱۸	$26004/223 = 8004/223 + 18000$	۵/۲ %
۷	۶	۵	۲	$33735/841 = 9735/841 + 24000$	۲۸ %
۸	۴	۳	۸	$25607/206 = 7607/206 + 18000$	-
۹	۶	۵	۲	$33735/841 = 9735/841 + 24000$	۲۸ %
۱۰	۵	۳	۲	$26440/023 = 8440/023 + 18000$	۱۰/۹ %



شکل ۲- روند تغییرات هزینه و همگرایی جواب مساله با داده های مثال عددی بزرگ با استفاده از الگوریتم ژنتیک در ۱۰ بار اجرای برنامه



شکل ۳- جزئیات نتیجه بهینه برای جانمایی تاور کرین و محل عرضه مصالح با الگوریتم ژنتیک به صورت گرافیکی

چیدمان دینامیک در سایت نیز یکی از مسائلی است که می‌توان در مراحل مختلف اجرای پروژه و بر اساس برنامه زمان‌بندی بررسی کرد.

### ۶- پیوست

در این تحقیق از نمادهای زیر استفاده شده است:

#### - اندیس‌ها

اندیس برای نشان دادن یک نقطه تامین مصالح	i
اندیس برای نشان دادن نقطه تقاضای مصالح	j
اندیس برای نشان دادن یک موقعیت قرارگیری تاورکرین در سایت	k
اندیس برای نشان دادن شماره‌ی یک مصالح	s
اندیس برای نشان دادن یک نوع تاورکرین	n

#### - پارامترها

تعداد کل نقاط تامین مصالح در دسترس در سایت	I
تعداد کل نقاط تقاضای مصالح در سایت	J
تعداد کل مکان‌های موجود برای نصب تاورکرین در سایت	K
تعداد کل مصالح	S
تعداد کل انواع تاورکرین	N
یک عدد صحیح دلخواه بزرگ	M
ظرفیت تاورکرین نوع n	$P_n$
حداکثر طول بوم قابل دسترسی تاورکرین نوع n	$L_n$
وزن مصالح شماره k	$W_s$
مختصات نقطه تامین مصالح $\alpha_m$	$(X_{i\alpha}, Y_{i\alpha}, Z_{i\alpha})$
مختصات نقطه تقاضای مصالح $\beta_m$	$(X_{j\beta}, Y_{j\beta}, Z_{j\beta})$
مختصات نقطه قرارگیری تاورکرین در مکان k	$(X_{k\tau}, Y_{k\tau}, Z_{k\tau})$
فاصله بین نقطه تامین مصالح $\alpha_m$ و نقطه قرارگیری تاورکرین در مکان k	$D_{ik}$
فاصله بین نقطه تقاضای مصالح $\beta_m$ و نقطه قرارگیری تاورکرین در مکان k	$D_{jk}$
فاصله بین نقطه تامین مصالح $\alpha_m$ و نقطه تقاضای مصالح $\beta_m$	$D_{ij}$
سرعت بالابردن قلاب (m/min)	$V_h$
سرعت حرکت زاویه‌ای قلاب (rad/min)	$V_\omega$
سرعت حرکت شعاعی قلاب (m/min)	$V_r$
زمان حرکت شعاعی قلاب تاورکرین در مکان k برای انتقال مصالح از نقطه تامین $\alpha_m$ به نقطه تقاضای $\beta_m$	$T_{r(i,j)}^k$
زمان حرکت زاویه‌ای قلاب تاورکرین در مکان k برای انتقال مصالح از نقطه تامین $\alpha_m$ به نقطه تقاضای $\beta_m$	$T_{\omega(i,j)}^k$
زمان حرکت افقی قلاب تاورکرین در مکان k برای انتقال مصالح از نقطه تامین $\alpha_m$ به نقطه تقاضای $\beta_m$	$T_{h(i,j)}^k$
زمان حرکت قائم قلاب تاورکرین در مکان k برای انتقال مصالح از نقطه تامین $\alpha_m$ به نقطه تقاضای $\beta_m$	$T_{v(i,j)}^k$
کل زمان حرکت قلاب تاورکرین در مکان k برای انتقال مصالح از نقطه تامین $\alpha_m$ به نقطه تقاضای $\beta_m$	$T_{(i,j)}^k$
پارامتری برای نشان دادن درجه هماهنگی بین حرکت شعاعی و زاویه‌ای قلاب در صفحه افقی بر اساس مهارت اپراتور تاورکرین	$\alpha$
پارامتری برای نشان دادن درجه هماهنگی بین حرکت در صفحات افقی و قائم قلاب تاورکرین	$\beta$

### ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای تحقیقات آتی

جانمایی تاورکرین در موقعیت مناسب از میان مکان‌های کاندید در سایت به طور چشمگیری بر بهره‌وری پروژه تأثیر داشته و به مراتب می‌تواند هزینه اجرای پروژه را کمتر کند. تعیین نوع و مکان بهینه تاورکرین و محل عرضه مصالح در سایت، یک مساله ترکیباتی پیچیده سخت است. از این رو استفاده از مدل‌های ریاضی برای ساده سازی مساله و الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل آن ضروری است تا تجزیه و تحلیل مساله امکان‌پذیر شود. هدف از تحقیق ارائه شده کمک به مهندسان درگیر در امر ساخت در انتخاب نوع و مکان تاورکرین و مکان عرضه مصالح در سایت با کمک یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیر در مقیاس واقعی است که از مدلسازی ریاضی و الگوریتم ژنتیک استفاده می‌کند. محل قرارگیری تاورکرین بر ظرفیت مورد نیاز و در نتیجه بر هزینه‌های کلی حمل و نقل مصالح در سایت تأثیر بسزایی دارد که مدت‌ها در تحقیقات به آن توجه نشده بود. ظرفیت تاورکرین به عنوان یک عامل تأثیرگذار در هزینه، به عنوان متغیر تصمیم‌گیری، اخیراً وارد یک تحقیق جدید با مدلسازی ریاضی شده است، اما مدل در مقیاس کوچک و در نتیجه با روش دقیق حل شده است. از آنجا که در سایت با مقیاس واقعی فضای جستجو به صورت تصاعدی با اندازه مسئله افزایش می‌یابد، لذا استفاده از تکنیک‌های دقیق حل عملی نیست. در این شرایط استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مساله ضروری است. در این تحقیق نوع و مکان تاورکرین و محل عرضه مصالح به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری مستقیماً از حل مدل با الگوریتم ژنتیک و بر اساس به حداقل رساندن کل هزینه حمل و نقل مصالح استخراج می‌شوند. با حل مساله توسط الگوریتم ژنتیک مشاهده شد چنانچه جانمایی تاورکرین و محل عرضه مصالح به صورت بهینه و بر اساس حل با الگوریتم ژنتیک انجام شود، لذا الگوریتم ظرفیت مناسب‌تری نیز برای تاورکرین انتخاب می‌کند و در نتیجه به طور میانگین حدود ۱۴ درصد در هزینه حمل و نقل مصالح نسبت به حالت انتخاب بر اساس تجربه صرفه‌جویی می‌شود. همچنین نتایج بدست آمده نشان داد هرچند که مکان عرضه مصالح نیز در هزینه کلی حمل و نقل موثر است، اما مکان تاورکرین و در نتیجه ظرفیت آن تأثیر بیشتری در هزینه کلی حمل و نقل مصالح دارد.

پیشنهادات برای تحقیقات آتی را می‌توان در موارد زیر بیان کرد: مدل استفاده شده در این مطالعه برای پروژه‌هایی است که تنها به یک تاورکرین نیاز دارند. در پروژه‌های بزرگتر عمدتاً بیش از یک تاورکرین نیاز است. لذا حل مدل‌های ریاضی با چند تاورکرین با استفاده از الگوریتم‌های مختلف فراابتکاری و مقایسه نتایج آنها برای رسیدن به جواب بهتر می‌تواند موضوع قابل توجهی باشد. تأثیر شرایط محیطی خاص برای مناطقی که اغلب وزش باد شدید دارند، مانند تأثیر باد بر زمان حمل مصالح با توجه به حجم، ابعاد و سایر مشخصات فیزیکی آنها نیز از موارد قابل بررسی است. برنامه‌ریزی



system. Automation in Construction. 2014;43:110-22.

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

[8] Ju F, Choo YS. Dynamic analysis of tower cranes. Journal of engineering mechanics. 2005;131(1):88-96.

[9] Shapira A, Goldenberg M. Soft considerations in equipment selection for building construction projects. Journal of construction engineering management. 2007;133(10):749-60.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] Leung AW, Tam C. Models for assessing hoisting times of tower cranes. Journal of construction engineering management. 1999;125(6):385-91.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] Younes A, Marzouk M. Tower cranes layout planning using agent-based simulation

پارامتری برای نشان دادن درجه سختی در کنترل حرکت قلاب برای تاورکریین قرار گرفته در مکان $k$ ام	$\gamma_k$
هزینه عملیات تاورکریین در واحد زمان برای نوع $n$	$C_n^t$
هزینه اجاره یا خرید تاورکریین نوع $n$ ام برای مدت زمان مشخص طبق برنامه زمان بندی پروژه	$C_n^r$
مجموعه مصالحی که قرار است در نقطه تقاضای $j$ تخلیه شوند	$A_j$
هزینه عملیاتی تاورکریین برای انتقال مصالح $s$ ام از نقطه تأمین $i$ ام به نقطه تقاضای $j$ از پیش تعیین شده آن مصالح توسط تاورکریین نوع $n$ ام و قرار گرفته در مکان $k$ ام	$C_{sikn}$

#### متغیرهای تصمیم گیری

یک متغیر از نوع باینری که اگر تاورکریین نوع $n$ ام در مکان $k$ ام قرار بگیرد، برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر است	$Y_{kn}$
یک متغیر از نوع باینری که اگر مصالح شماره $s$ ام در مکان تأمین $i$ ام قرار بگیرد، برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر است	$Z_{si}$
متغیر اصلی مدل از نوع باینری که اگر مصالح $s$ ام از نقطه تأمین $i$ به نقطه تقاضای $j$ از قبل تعیین شده خود توسط تاورکریین نوع $n$ و قرار گرفته در محل $k$ منتقل می شود، برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر است	$X_{sikn}$

#### ۷-مراجع

- [1] 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.
- [2] 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.
- [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] 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.
- [5] 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.
- [6] Said H, El-Rayes K. Automated multi-objective construction logistics optimization

tower crane location problem in construction sites. Alexandria Engineering Journal. 2015;54(3):519-26.

[32] 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.

[33] Trevino C, Abdel-Raheem M. Single tower crane allocation using ant colony optimization. Computing in Civil Engineering 2017/2017. p. 132-40.

[34] 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.

considering activity conflicts. Automation in construction. 2018;93:348-60.

[20] 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.

[21] Rodriguez-Ramos WE, Francis RL. Single crane location optimization. Journal of Construction Engineering Management. 1983; (4)109: 387-97.

[22] 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.

[23] 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.

[24] Kang S-C, Miranda E. Computational methods for coordinating multiple construction cranes. Journal of Computing in Civil Engineering. 2008;22(4):252-63.

[25] 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.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 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.

[30] 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.

[31] Abdelmegid MA, Shawki KM, Abdel-Khalek H. GA optimization model for solving

# Determining the Optimal Capacity and Location of the Tower Crane and Material Supply Point in Construction Sites Using Genetic Algorithm

Roya Amiri

Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Javad Majrouhi Sardroud\*

Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Vahid Momenaei Kermani

Department of Mathematics, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran

j.majrouhi@gmail.com

## Abstract

Construction site layout planning is one of the most important and essential early steps in construction management, which significantly influences project's productivity. Since the tower crane is one of the key facilities on construction sites, optimized planning and managing its operation can improve construction performance. Determining optimal capacity and location of tower crane are complex combinatorial NP-hard optimization problems that are affected by several interrelated factors. This problem cannot be solved using exact mathematical methods on a large-scale site. Therefore, the use of metaheuristic algorithms is necessary in order to solve it. Tower crane's location has a significant impact on its required capacity and, as a result, on total cost of material transportation, which was not considered in research for a long time. Recently, in a new research, tower crane's capacity has been considered as a decision variable in the mathematical model. But the problem has been solved on a small-scale and with a precise method. Since the feasible solution space increases on a real-scale site, therefore, using the precise techniques is not practical to achieve the optimal solution. Therefore, it is necessary to utilize metaheuristic algorithms to solve the problem. Using Genetic Algorithm, this study presents the optimal type and location of tower crane and material supply point as decision variables based on minimizing the total cost of material transportation on the large-scale site. The results indicate that the GA successfully determines the optimal solution, leading to approximately 14% cost reduction compared with when a site layout is decided based on experience.

**Key words:** Construction site, Capacity and location of tower crane, Material supply point, Optimization, Genetic Algorithm



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license:

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)