



Optimal Tower Crane Layout in Construction Sites to Reduce Operational Costs and Ensure On-Time Project Completion Considering Crane Capacity and Supply Point Constraints

Mehdi Ahmadnia¹, Reza Ghanbari¹, Mojtaba Maghrebi^{2*} 

¹ Department of Mathematics, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

² Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

ABSTRACT: The optimal layout of tower cranes on construction sites can significantly reduce project costs and construction duration. Previous mathematical models have failed to simultaneously incorporate all critical factors affecting the optimal positioning of tower cranes. Moreover, aspects such as early project completion prior to contractual deadlines have often been overlooked in existing research. Additionally, comprehensive consideration of various cost components—including crane rental, installation and dismantling expenses, and labor wages—has received limited attention. This paper proposes an integer linear programming model to determine the optimal number and locations of cranes, addressing several gaps in the literature. The proposed method accounts for essential factors including crane capacity, operational radius, diverse material requirements, and limited supply point capacities. Furthermore, the model guarantees project completion within contractual deadlines. Results demonstrate that the proposed model not only reduces operational costs but also ensures timely project completion while respecting crane capacities and supply point limitations.

Review History:

Received: Jun. 13, 2023

Revised: Dec. 27, 2025

Accepted: Feb. 13, 2026

Available Online: Mar. 01, 2026

Keywords:

Optimal Layout

Tower Crane

Optimization

Location Planning

Construction Crane

1- Introduction

In the construction of high-rise buildings, the use of equipment such as tower cranes and hoists has become an unavoidable necessity. These systems are employed to transport materials and personnel between various points within a building under construction. While hoists primarily facilitate vertical movement, tower cranes are capable of both vertical and horizontal material handling.

The location of cranes is a critical factor influencing both the distance and time required for movements between supply and demand points [1] are evaluated and calculated on a construction site plot plan. A general algorithm has been developed to determine the workspace area in the construction site by preselecting data input satisfying the required crane-fitting distance and by calculating the crane body area to a given clearance distance. For each lifted object, the crane minimum and maximum radii based on capacity are overlaid on this work area to produce the feasible mobile crane position area. This is the first function of an automated crane selection and positioning program that runs independent of a CAD) computer aided design. Furthermore, as the distance between supply points and the crane increases, the crane's lifting capacity decreases. This leads to a greater number of trips and, consequently, longer crane operation times.

Therefore, optimizing the layout of cranes can significantly reduce project costs by minimizing crane activity duration. In addition, the optimal positioning of supply points also contributes to improved crane efficiency.

The use of tower cranes for transporting construction materials accelerates the construction process and can reduce certain material handling costs. However, cranes are among the most expensive pieces of equipment in high-rise construction projects [2]. While increasing the number of cranes may raise overall project costs [3], it can also improve the timely delivery of materials. On-time material delivery plays a crucial role in shortening project duration and reducing costs. Thus, determining the optimal number of tower cranes has a substantial impact on minimizing operational expenses.

In real-world applications, the presence of various uncertainties necessitates the evaluation of multiple scenarios to achieve an optimal layout. Due to the high computational complexity of existing optimization models, analyzing different scenarios is often time-consuming or infeasible. This paper addresses this limitation by proposing a computationally efficient method that enables the rapid evaluation of multiple scenarios, thereby supporting more comprehensive and robust decision-making.

*Corresponding author's email: mojtabamaghrebi@um.ac.ir



2- Methodology

Existing methods suffer from high computational complexity, which can challenge decision-making in large-scale, real-world scenarios. To address this issue, this paper proposes a low-complexity approach that emphasizes the most critical factors. The key features and assumptions of the proposed method are outlined below:

- The proposed model accounts for the building’s demand for material types as well as the limited capacity of supply points in fulfilling those demands. The number, location, and capacity of each supply point are predetermined. Each supply point is capable of supplying multiple material types simultaneously.
- The locations of demand points, along with the types and quantities of materials required at each point throughout the construction process, are predetermined. It is assumed that material demand remains consistent across all working days. The proposed model fully satisfies the requirements of all demand points.
- For each material request, the model determines the appropriate supply point and crane based on material transport time, supply point capacity, crane placement, and crane capacity and operational radius. Connections between supply and demand points may be established via multiple cranes.
- It is assumed that each crane transports only one type of material per lift and delivers it to a single demand point. After delivery, the crane returns to the supply point.
- Construction projects are typically required to be

completed within a specified timeframe. The optimal layout generated by the proposed model ensures timely project completion.

- The number and locations of cranes required for the project are determined during the optimization process. Crane capacity and operational radius are taken into account in the layout planning.
- The aim of the proposed model is to minimize various costs, including material transport costs, crane rental, un/installation expenses, and operator wages.
- Crane heights are determined to address the issue of crane overlapping and the associated safety risks.

In the proposed methodology, the travel time between supply and demand points for each trip is first calculated. Subsequently, a mixed-integer linear programming (MILP) model is solved to determine the optimal number and locations of tower cranes, as well as to assign tasks to each crane. When multiple cranes are installed on a construction site, the movement paths of some cranes may be permanently or temporarily obstructed by others. Such obstructions can often be resolved by adjusting crane heights. To address this, an integer linear programming (ILP) model is proposed to optimally adjust crane heights, thereby preventing crane collisions and minimizing downtime caused by overlapping. The overall procedure of the proposed method is summarized in Figure 1.

3- Results

To evaluate the performance of the proposed method, it was tested on a real-world construction scenario. The model successfully determined the optimal layout for tower cranes and supply points in approximately five seconds. The resulting optimal layout is illustrated in Figure 2.

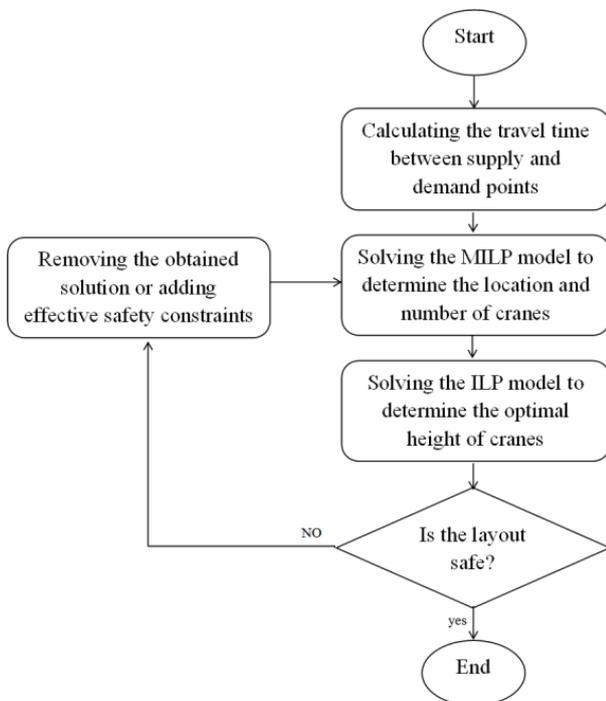


Fig. 1. Flowchart of the proposed method for determining the optimal layout of cranes .

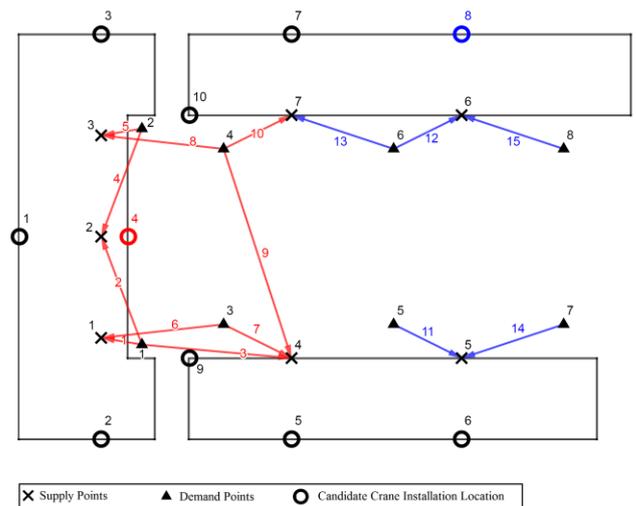


Fig. 2. Optimal layout of tower cranes along with their designated movement paths .

4- Conclusion

This paper presented two integer linear programming models for the tower crane layout problem in construction environments. The first model determines the optimal number and locations of tower cranes as well as the positions of supply points, while the second model optimizes crane heights to mitigate overlapping and associated safety risks. These models are solved sequentially to obtain an optimal solution. The results demonstrate that the proposed approach is capable of reaching an optimal layout within a short computational time.

References

- [1] H. Safouhi, M. Mouattamid, U. Hermann, A. Hendi, An algorithm for the calculation of feasible mobile crane position areas, *Automation in Construction*, 20 (2011) 282–292.
- [2] K. Riga, K. Jahr, C. Thielen, A. Borrmann, Mixed integer programming for dynamic tower crane and storage area optimization on construction sites, *Automation in Construction*, 113 (2020) 103259.
- [3] M. Ahmadnia, R. Ghanbari, M. Maghrebi, Optimized multi-tower crane layout planning: determine height, location and type to improve operational safety, *Engineering, Construction and Architectural Management* (2025).



چیدمان بهینه تاورکرین‌ها در محیط ساخت‌وساز با هدف کاهش هزینه‌های عملیاتی و تکمیل به موقع پروژه با در نظر گرفتن ظرفیت تاورکرین‌ها و ظرفیت نقاط عرضه

مهدی احمدنیا^۱، رضا قنبری^۱، مجتبی مغربی^{۲*}

۱- دانشکده ریاضی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

۲- دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۳

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۲/۱۰

کلمات کلیدی:

چیدمان بهینه

تاورکرین

بهینه‌سازی

مکان‌یابی

جرثقیل ساختمانی

خلاصه: چیدمان بهینه تاورکرین‌ها در محیط ساخت‌وساز می‌تواند هزینه‌های پروژه و همچنین مدت زمان ساخت‌وساز را کاهش دهد. مدل‌های ریاضی مختلفی برای چیدمان بهینه تاورکرین‌ها ارائه شده است. اما مدل‌های ریاضی پیشین نتوانستند تمام عوامل تاثیرگذار بر مکان‌یابی بهینه تاورکرین‌ها را به صورت همزمان مورد توجه قرار دهند. علاوه بر این برخی از موارد مانند تکمیل پروژه قبل از مهلت تعیین شده در پژوهش‌های گذشته مورد غفلت واقع شده است. همچنین توجه به انواع هزینه‌های تاثیرگذار از قبیل هزینه اجاره، نصب و راه‌اندازی تاورکرین‌ها و دستمزد نیروی انسانی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله به منظور بهبود برخی از نواقص موجود یک مدل خطی عدد صحیح برای تعیین بهینه تعداد و مکان تاورکرین‌ها پیشنهاد می‌شود. مدل پیشنهادی عوامل مهمی از قبیل ظرفیت و شعاع حرکت مجاز تاورکرین‌ها، نیاز به انواع مصالح ساختمانی و ظرفیت محدود نقاط عرضه در تامین مصالح را در نظر می‌گیرد. همچنین مدل پیشنهادی تکمیل به موقع پروژه قبل از مهلت تعیین شده بر اساس قراردادهای کاری را تضمین می‌کند. مدل پیشنهادی در تعیین تعداد و مکان بهینه تاورکرین‌ها به دنبال کاهش هزینه‌های عملیاتی مانند هزینه نصب، راه‌اندازی و اجاره تاورکرین‌ها، دستمزد نیروی انسانی و هزینه فعالیت تاورکرین‌ها است. در این مقاله هزینه اجاره و فعالیت تاورکرین‌ها و همچنین دستمزد نیروی انسانی متناسب با مدت زمان استفاده از تاورکرین‌ها محاسبه می‌شود. با استفاده از یک نمونه مطالعاتی عملکرد مدل پیشنهادی بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد مدل پیشنهادی ضمن کاهش هزینه‌های عملیاتی، تکمیل به موقع پروژه و رعایت ظرفیت تاورکرین و نقاط عرضه را تضمین می‌کند.

۱- مقدمه

مصالح مورد نیاز پروژه در نقاطی به نام نقاط عرضه ذخیره‌سازی می‌شوند. تاورکرین‌ها مصالح را از نقاط عرضه بارگیری و در نقاط دیگری به نام نقاط تقاضا تخلیه می‌کنند. از آنجا که ظرفیت تاورکرین‌ها محدود است، تاورکرین‌ها برای رفع کامل درخواست‌ها اغلب چندین بار بین نقاط عرضه و تقاضا جابجا می‌شوند [۸]. مکان قرارگیری تاورکرین‌ها یکی از عوامل موثر بر مقدار و مدت زمان حرکت بین نقاط عرضه و تقاضا است [۹، ۱۰]. افزون بر این هرچه فاصله نقاط عرضه و تقاضا از مکان نصب تاورکرین بیشتر شود، ظرفیت تاورکرین در انتقال مصالح کمتر می‌شود [۱۱]. این موضوع منجر به افزایش تعداد دفعات جابجایی بین نقاط عرضه و تقاضا و در نتیجه منجر به افزایش مدت زمان فعالیت تاورکرین‌ها می‌شود. از این رو چیدمان بهینه تاورکرین‌ها می‌تواند از طریق کاهش مدت زمان فعالیت تاورکرین‌ها هزینه‌های پروژه را کاهش دهد [۱۲]. علاوه بر این با کاهش فاصله بین نقاط عرضه و تقاضا نیز می‌توان مدت زمان انتقال مصالح ساختمانی را تا

کمبود زمین مناسب برای ساخت مراکز تجاری، اقامتی و مسکن مورد نیاز در شهرهای بزرگ به یک چالش جدی در دوره معاصر تبدیل شده است. ساخت برج‌های مرتفع به عنوان یک راهکار منطقی و عملی برای غلبه بر این چالش در نظر گرفته می‌شود [۱]. در ساخت برج‌های مرتفع استفاده از تجهیزات مختلف از قبیل تاورکرین و بالابر به یک ضرورت اجتناب ناپذیر تبدیل شده است [۲]. تاورکرین‌ها و بالابرها یکی از ارزشمندترین و ضروری ترین ماشین آلات ساختمانی مورد استفاده در ساخت ساختمان‌های مرتفع محسوب می‌شوند [۳-۵]. از تاورکرین‌ها و بالابرها برای جابه‌جایی مواد و مصالح و همچنین نیروی انسانی بین نقاط مختلف یک ساختمان در حال ساخت استفاده می‌شود [۶]. بالابرها مصالح را به صورت عمودی و تاورکرین‌ها مصالح را به صورت عمودی و افقی جابجا می‌کنند [۷].

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mojtabamaghrebi@um.ac.ir



متناسب با مدت زمان فعالیت تاورکرینها در تابع هدف قرار می‌دهد. عدم توجه به تکمیل به موقع پروژه نکته دیگری است که در پژوهش‌های قبلی به آن توجه نشده است. معمولاً در قراردادهای کاری مهلتی برای اتمام پروژه تعیین می‌شود. عدم توجه به این مهلت زمانی خصوصاً در پروژه‌های تجاری، درمانی و مسکونی می‌تواند خسارت‌های مادی و معنوی مختلفی به همراه داشته باشد. از این رو مدل پیشنهادی ضمن توجه به کاهش هزینه‌های عملیاتی پروژه، تکمیل به موقع فرآیند ساخت‌وساز را تضمین می‌کند. علاوه بر این در ذنبای واقعی به دلیل وجود شرایط غیر قطعی مختلف لازم است سناریوهای متعددی برای رسیدن به چیدمان بهینه بررسی شود. به دلیل پیچیدگی محاسباتی بالای مدل‌های بهینه‌سازی قبلی، معمولاً بررسی سناریوهای مختلف زمان بر یا غیر ممکن است. از این رو این مقاله با ارائه یک روش با پیچیدگی محاسباتی پایین تلاش می‌کند امکان بررسی سناریوهای مختلف را در زمان کوتاه فراهم کند و از این طریق تصمیم بهینه جامعیت ببخشد.

۲- مرور ادبیات

در مسئله چیدمان بهینه تاورکرینها درباره عوامل مختلفی از قبیل تعداد و مکان قرارگیری تاورکرینها باید تصمیم‌گیری شود. در ادامه با توضیح نکات مهم تعدادی از مقالات ارائه شده پیشین برخی از ویژگی‌ها و عوامل موثر بر مسئله چیدمان بهینه تاورکرینها بیان می‌شود.

مدل خطی عدد صحیح مختلط ارائه شده توسط ژانگ^۱ و همکاران [۱۸] در سال ۱۹۹۶ را می‌توان به عنوان یکی از تلاش‌های اولیه برای حل مسئله چیدمان بهینه تاورکرینها در نظر گرفت. آن‌ها از طریق مکان‌یابی تاورکرینها در محیط ساخت‌وساز تلاش کردند مدت زمان عملیات تاورکرینها را کاهش دهند. نتایج ژانگ و همکاران نشان داد که استفاده از مدل آن‌ها می‌تواند منجر به کاهش ۲۰ تا ۴۰ درصدی مدت زمان استفاده از تاورکرینها شود. آن‌ها همچنین با تجزیه حرکت تاورکرینها به حرکات شعاعی، زاویه‌ای و عمودی یک فرمول برای محاسبه مدت زمان حرکت تاورکرینها بین نقاط عرضه و تقاضا پیشنهاد دادند. مفروضاتی مانند استفاده از فقط یک تاورکرینها و عدم توجه به مسائل ایمنی از جمله نقاط ضعف روش آن‌ها محسوب می‌شود. ژانگ و همکاران [۱۹] در یک پژوهشی دیگر تلاش کردند تا با مکان‌یابی همزمان چند تاورکرینها و ایجاد فاصله ایمن بین آن‌ها کار پیشین خود را بهبود بخشند. استفاده از این مدل می‌تواند علاوه بر بهبود ایمنی،

حد زیادی کاهش داد. انتخاب نزدیک‌ترین نقطه عرضه برای رفع نیازهای هر یک از نقاط تقاضا می‌تواند به عنوان یک راهکار اولیه در نظر گرفته شود. با این حال محدودیت در ظرفیت و نوع مصالح قابل تامین توسط هر یک از نقاط عرضه و همچنین ظرفیت و شعاع محدود حرکت مجاز تاورکرینها می‌تواند به عنوان چالش‌های این راهکار مطرح شود. در نظر گرفتن ظرفیت و نوع مصالح ذخیره شده در هر یک از نقاط عرضه و توجه به شعاع و ظرفیت محدود تاورکرینها در فرآیند بهینه‌سازی می‌تواند یک راهکار عملی و مناسب برای غلبه بر این چالش باشد.

استفاده از تاورکرینها در حمل مصالح ساختمانی موجب افزایش سرعت ساخت‌وساز و احتمالاً موجب کاهش برخی از هزینه‌های مربوط به انتقال و جابجایی مصالح می‌شود. با این حال تاورکرینها جز تجهیزات گران قیمت یک پروژه ساختمانی بلند مرتبه محسوب می‌شوند [۱۳، ۱۴]. هزینه‌های خرید و اجاره این تجهیزات به‌طور متوسط ۳۶ درصد از هزینه‌های مربوط به تجهیزات یک پروژه ساختمانی مرتفع را شامل می‌شوند [۱۵]. بنابراین با افزایش تعداد تاورکرینها مورد استفاده در محیط ساخت‌وساز ممکن است هزینه‌های پروژه افزایش پیدا کند [۱۳]. اما در مقابل افزایش تعداد تاورکرینها می‌تواند فرصت بهتری برای تحویل به موقع مصالح ساختمانی فراهم نماید. تحویل به موقع مصالح توسط تاورکرینها تاثیر زیادی در کاهش مدت زمان ساخت‌وساز یک پروژه ساختمانی دارد [۱۶]. کاهش مدت زمان ساخت‌وساز می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های مربوط به نیروی انسانی و اجاره تجهیزات و همچنین بهره‌برداری سریع‌تر از یک پروژه شود [۱۲، ۱۷]. به همین دلیل تعیین تعداد بهینه تاورکرینها تاثیر زیادی در کاهش هزینه‌های عملیاتی پروژه دارد.

این مقاله یک مدل خطی عدد صحیح برای مسئله چیدمان بهینه تاورکرینها پیشنهاد می‌کند. مدل ریاضی پیشنهادی تعداد و مکان تاورکرینها مورد نیاز پروژه را متناسب با مقدار درخواست مصالح نقاط تقاضا به صورت بهینه تعیین می‌کند. ظرفیت و شعاع حرکت مجاز تاورکرینها و همچنین ظرفیت و نوع مصالح قابل تامین توسط نقاط عرضه از جمله مواردی مهمی است که در چیدمان بهینه مورد توجه قرار گرفته است. هدف مدل پیشنهادی کاهش هزینه‌های عملیاتی مانند هزینه‌های انرژی مصرف شده توسط تاورکرینها در انتقال مصالح، هزینه اجاره و نصب تاورکرینها و هزینه دستمزد نیروی انسانی است. پژوهش‌های قبلی عمدتاً هزینه اجاره و دستمزد نیروی انسانی را به خوبی در نظر نگرفته‌اند. مدل پیشنهادی به منظور واقعی تر کردن مفروضات مسئله، هزینه اجاره و دستمزد نیروی انسانی را

1. Zhang

از رسیدن قلاب تاورکریین به محل به دلایلی مانند شرایط جوی و محیطی نامساعد و همچنین مهارت و دید کم اپراتورها ممکن است در عمل اتفاق نیافتد. به همین دلیل هوانگ و همکاران تلاش کردند تاخیرات احتمالی را در فرمول پیشنهادی در نظر بگیرند. آن‌ها با استفاده از نمونه مطالعاتی مورد استفاده در مقاله تام و همکاران [۲۲] نشان دادند که در صورت استفاده از مدل پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم ژنتیک ارائه شده توسط تام و همکاران [۲۲] می‌توان ۷ درصد در زمان اجرای عملیات تاورکریین صرفه‌جویی کرد. در روش‌های فوق‌الذکر هزینه‌های مربوط به عملیات تاورکریین‌ها به‌طور کامل در نظر گرفته نشده است. لین و چنگ^۵ [۲۵] برای نخستین بار کاهش هزینه‌هایی مانند هزینه استفاده، اجاره و راه‌اندازی تاورکریین‌ها و همچنین هزینه نیروی کار را با ارائه یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط در چیدمان بهینه تاورکریین‌ها در دستور کار قرار دادند. با این حال در مدل لین و چنگ هزینه‌های مربوط به اجاره و نصب تاورکریین‌ها و همچنین دستمزد نیروی انسانی به عنوان یک عدد ثابت و از پیش تعیین شده در تابع هدف قرار داده شده است. این رویکرد نمی‌تواند هزینه‌های ذکر شده را در فرآیند بهینه‌سازی دخیل کند. از پیش تعیین شده بودن تعداد تاورکریین‌های مورد استفاده، یکسان در نظر گرفتن تمام مصالح ساختمانی را می‌توان از دیگر کاستی‌های روش لین و چنگ به حساب آورد.

هر یک از تاورکریین‌ها ظرفیت و شعاع مشخصی برای فعالیت در محیط ساخت‌وساز دارند. این موضوع در تمام روش‌های ذکر شده در بالا نادیده گرفته شده است. عدم رعایت ظرفیت بالابری در حمل مصالح ساختمانی می‌تواند منجر به سقوط تاورکریین‌ها و به بار آمدن خسارت‌های جانی و مالی غیر قابل جبران شود. معمولاً ظرفیت بالابری تاورکریین‌ها با افزایش شعاع حرکت آن‌ها کاهش پیدا می‌کند. بنابراین تعداد دفعاتی تاورکریین‌ها باید بین نقاط عرضه و تقاضا برای رفع درخواست مصالح جابجا شوند به‌طور مستقیم به شعاع حرکت و ظرفیت تاورکریین بستگی دارد. از این رو نادیده گرفتن این دو عامل در روش‌های ذکر شده در بالا می‌تواند نتایج بدست آمده از آن‌ها را در واقعیت دچار مشکل نماید. موسوی و همکاران [۱۲] با توسعه مدل هوانگ و همکاران [۲۴] تلاش کردند این نقیصه را برطرف نمایند. با این حال آن‌ها نتوانستند سایر مفروضات محدود کننده مدل هوانگ و همکاران را بهبود بخشند.

توجه به ظرفیت و شعاع حرکت تاورکریین‌ها توسط وانگ^۶ و همکاران [۲۶] نیز مورد توجه قرار گرفت. آن‌ها از ترکیب مدل اطلاعات ساختمان و

منجر به کاهش ۱۰ تا ۴۰ درصدی مدت زمان استفاده از تاورکریین‌ها شود. با این حال ثابت بودن تعداد و مکان‌های نقاط عرضه و مشخص بودن تعداد تاورکریین‌ها از جمله کاستی‌های روش ارائه شده توسط ژانگ و همکاران محسوب می‌شود.

با توجه به پیچیدگی‌های زیاد مسئله چیدمان بهینه تاورکریین‌ها، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک برای حل این مسئله مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. نخستین بار فیلیپ^۱ و همکاران [۲۰] و لی و لاو^۲ [۲۱] از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی چیدمان تاسیسات ساختمانی استفاده کردند. اما به دلیل مفروضات زیاد مانند مستطیل در نظر گرفتن تاسیسات محیط ساخت‌وساز و عدم توجه به محدودیت فضای نتایج بدست آمده از پژوهش آن‌ها با واقعیت تطابق نداشت [۲۲، ۲۳]. در ادامه تام^۳ و همکاران [۲۲] مکان بهینه تاورکریین و نقاط عرضه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک مشخص کردند. آن‌ها همچنین در یک پژوهش دیگر [۲۳] شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک را برای دستیابی به این هدف با یکدیگر ترکیب کردند. تام و همکاران از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی عملیات تاورکریین و همچنین برای تجزیه و تحلیل رابطه بین مناطق ذخیره‌سازی کلیدی استفاده کردند. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک مکان استقرار تاورکریین در محیط ساخت‌وساز را مشخص کردند. استفاده از فقط یک تاورکریین برای انتقال مصالح را می‌توان به عنوان مهم‌ترین نقطه ضعف دو پژوهش انجام شده توسط تام و همکاران ذکر کرد.

تعداد نقاط عرضه عامل دیگری است که در چیدمان بهینه تاورکریین‌ها موثر است. این موضوع توسط هوانگ^۴ و همکاران [۲۴] با ارائه یک مدل خطی عدد صحیح مختلط مورد توجه قرار گرفت. آن‌ها تعداد نقاط عرضه، نوع مواد قابل تامین توسط هر یک از نقاط عرضه و همچنین اتصال بین نقاط عرضه و تقاضا را در فرآیند بهینه‌سازی مشخص کردند. مفروضاتی مانند استفاده از فقط یک تاورکریین و انتقال فقط یک نوع مصالح ساختمانی در کل فرآیند ساخت‌وساز و همچنین فرض تامین مصالح توسط نقاط عرضه به مقدار نامحدود از جمله معایب روش هوانگ و همکاران به‌شمار می‌آید. آن‌ها همچنین فرمول ارائه شده توسط ژانگ و همکاران را به منظور محاسبه دقیق‌تر مدت زمان حرکت تاورکریین‌ها بهبود دادند. در فرمول ارائه شده توسط ژانگ و همکاران [۱۸]، فرض اتمام حرکت عمودی تاورکریین قبل

1. Philip
2. Li and Love
3. Tam
4. Huang

5. Lien and Cheng
6. Wang

جمله نقاط ضعف مدل هوانگ و ونگ محسوب می‌شود.

در یک پژوهش دیگر جی و لیتی^۳ [۱۱] با ارائه یک مدل عدد صحیح مختلط مکان قرارگیری تاورکرین‌ها و مکان احداث و تعداد نقاط عرضه مورد نیاز را به صورت همزمان تعیین کردند. در نظر گرفتن عوامل تاثیرگذار مهمی مانند ظرفیت تاورکرین متناسب با شعاع حرکت و توجه به انواع مصالح ساختمانی مورد نیاز از دیگر مزایای مدل جی و لیتی محسوب می‌شود. آن‌ها با استفاده از یک نمونه نشان دادند که استفاده از این مدل باعث کاهش ۶٫۸ درصدی زمان عملیات تاورکرین‌ها و صرفه‌جویی ۳٫۶ درصدی هزینه‌های مربوط به عملیات تاورکرین‌ها می‌شود. انتخاب تعداد تاورکرین‌های مورد نیاز خارج از فرآیند بهینه‌سازی، عدم توجه به ظرفیت نقاط عرضه، امکان تامین فقط یک نوع از مصالح توسط هر یک از نقاط عرضه و عدم توجه به هزینه‌های اجاره و نصب تاورکرین‌ها و دستمزد نیروی انسانی را می‌توان به عنوان کاستی‌های مدل جی و لیتی به شمار آورد.

ریگا^۴ و همکاران [۱۴] با ارائه دو مدل عدد صحیح مختلط مکان‌یابی همزمان نقاط عرضه و تاورکرین‌ها را در دستور کار خود قرار دادند. آن‌ها ابتدا به حل مدل مکان‌یابی تاورکرین‌ها پرداختند و سپس با استفاده از مدل ریاضی دوم مکان نقاط عرضه را مشخص کردند. این دو مدل تا هنگام دست‌یابی به جواب مناسب به صورت متناوب در چندین تکرار حل می‌شود. عدم توجه به ظرفیت نقاط عرضه و همچنین فرض ذخیره‌سازی فقط یک نوع از مصالح در هر یک از نقاط عرضه را می‌توان به عنوان کاستی‌های این روش ذکر کرد.

در یک پژوهش دیگر دینسنت^۵ [۳۰] با ارائه یک رویکرد شاخه و کران تعداد و مکان تاورکرین‌های مورد نیاز را در فرآیند بهینه‌سازی تعیین کرد. دینسنت مسائل ایمنی مانند رعایت فاصله ایمن بین تاورکرین‌ها و عدم برخورد تاورکرین‌ها با یکدیگر را در مسئله چیدمان بهینه تاورکرین‌ها مورد توجه قرار داد. عدم توجه به ظرفیت نقاط عرضه، تعیین ارتباط بین نقاط عرضه و تقاضا خارج از فرآیند بهینه‌سازی و عدم توجه به هزینه‌های اجاره و نصب تاورکرین‌ها و دستمزد نیروی انسانی از جمله نقاط ضعف روش دینسنت محسوب می‌شوند.

امیری و همکاران [۳۱] با استفاده از الگوریتم ژنتیک تلاش کردند با در نظر گرفتن ظرفیت تاورکرین‌ها در مورد نوع و مکان تاورکرین و همچنین مکان احداث نقاط عرضه تصمیم‌گیری کنند. علاوه بر این آن‌ها به هزینه

الگوریتم کرم شب تاب برای مکان‌یابی بهینه تاورکرین‌ها استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از مدل اطلاعات ساختمان تلاش کردند برخورد تاورکرین‌ها با یکدیگر و سایر اشیاء موجود در محیط ساخت‌وساز را در چیدمان بهینه کاهش دهند. تعیین تعداد تاورکرین‌های مورد نیاز خارج از فرآیند بهینه‌سازی و عدم توجه به هزینه‌های اجاره و نصب تاورکرین‌ها و دستمزد نیروی انسانی از جمله نقاط ضعف روش ونگ و همکاران محسوب می‌شود. علاوه بر این در روش آن‌ها اتصال هر جفت نقطه عرضه و تقاضا فقط با یک تاورکرین امکان پذیر بود.

نیاز به انواع مصالح ساختمانی در طول فرآیند ساخت‌وساز می‌تواند تغییر کند. با این حال در اغلب پژوهش‌های انجام شده فرض می‌شود که نیاز به مصالح در طول روزهای کاری پروژه ثابت است [۲۷]. بهو و چو^۱ [۲۸] فرآیند ساخت‌وساز را بر اساس تغییرات نیاز به مصالح به مراحل مختلف تقسیم کردند. آن‌ها نشان دادند که نادیده گرفتن تاثیر مراحل مختلف ساخت‌وساز منجر به افزایش هزینه‌های استقرار تاورکرین می‌شود. آن‌ها با ارائه یک مدل خطی عدد صحیح مختلط در مورد نصب و یا برچیدن تاورکرین‌ها در هر یک از مراحل ساخت‌وساز تصمیم‌گیری کردند. تعیین نوع و تعداد تاورکرین‌های مورد نیاز در فرآیند بهینه‌سازی از دیگر مزیت‌های روش بهو و چو هستند. آن‌ها با استفاده از یک نمونه واقعی مربوط به ساختمان یک دانشگاه نشان دادند که استفاده از روش آن‌ها منجر به کاهش ۱۸٫۷ درصدی هزینه‌ها می‌شود. عدم توجه به ظرفیت نقاط عرضه، عدم توجه به شعاع حرکت تاورکرین در تعیین ظرفیت آن و همچنین فرض انتقال فقط یک نوع مصالح در کل فرآیند ساخت‌وساز از جمله نقاط ضعف روش بهو و چو محسوب می‌شوند.

تحویل به موقع مصالح ساختمانی تاثیر بسزایی در کاهش مدت زمان ساخت‌وساز یک پروژه دارد [۱۶]. از این رو هوانگ و ونگ^۲ [۲۹] با ارائه یک مدل خطی عدد صحیح صفر و یک مختلط در تعیین مکان بهینه تاورکرین تقاضاهای اولویت دار را در نظر گرفتند. توجه به حداکثر ظرفیت تاورکرین، در نظر گرفتن انواع مصالح ساختمانی و امکان تامین چند نوع مصالح توسط هر یک از نقاط عرضه را می‌توان از دیگر نقاط مثبت مدل هوانگ و ونگ به شمار آورد. آن‌ها مدل پیشنهادی خود را با تکنیک‌های استاندارد شاخه و کران و با استفاده از حل کننده گروبی حل کردند. فرض استفاده از فقط یک تاورکرین در محیط ساخت‌وساز، عدم توجه به ظرفیت نقاط عرضه و در نظر نگرفتن هزینه‌های اجاره و نصب تاورکرین‌ها و دستمزد نیروی انسانی از

3. Ji and Leite
4. Riga
5. Dienstknecht

1. Yeoh and Chua
2. Huang and Wong

پیچیده را با تأخیر و کندی همراه کند. علاوه بر این روش‌هایی که پیچیدگی محاسباتی بالایی دارند اغلب در حل مسئله‌هایی با ابعاد بالا از نظر محاسباتی با شکست مواجه می‌شوند. برای پرداختن به این مشکلات این مقاله تلاش می‌کند با در نظر گرفتن اغلب عوامل موثرتر و مهمتر یک روش با پیچیدگی محاسباتی پایین پیشنهاد کند.

۳- روش پیشنهادی

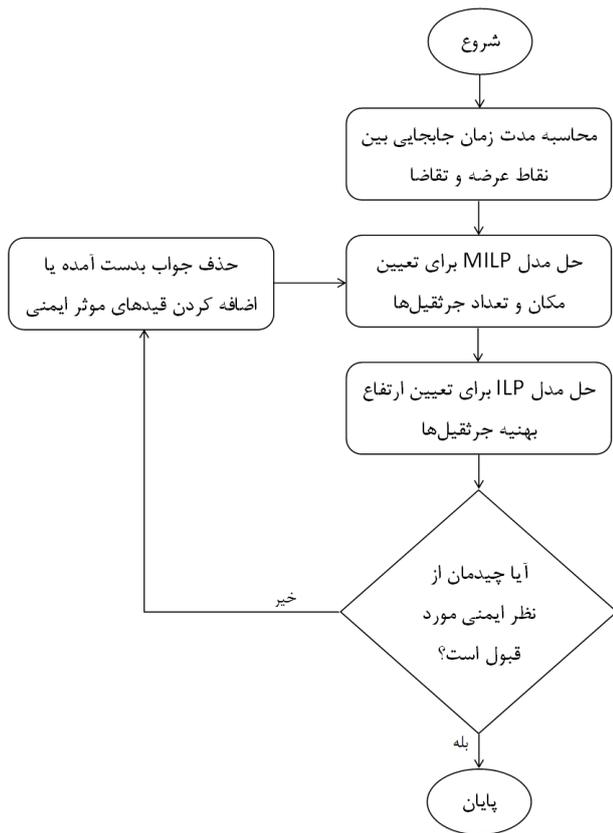
در سال‌های گذشته پژوهشگران تلاش‌های متعددی برای ارائه یک مدل ریاضی به منظور حل مسئله چیدمان تاورکری‌ها در محیط ساخت‌وساز انجام داده‌اند. با این حال به دلیل پیچیدگی‌های زیاد این مسئله، تاکنون تلاش‌های انجام شده توسط پژوهشگران منجر به ارائه یک مدل ریاضی با در نظر گرفتن تمام عوامل موثر بر چیدمان بهینه نشده است. برخی از روش‌های موجود پیچیدگی محاسباتی بالایی دارند که می‌تواند در سناریوهای واقعی و بزرگ تصمیم‌گیری را با چالش همراه کند. برای رفع این نواقص این مقاله با تأکید بر عوامل موثر با اهمیت روشی با پیچیدگی محاسباتی پایین ارائه می‌کند. برخی از ویژگی‌ها و مفروضات برجسته روش پیشنهادی در زیر اشاره شده است:

- مدل پیشنهادی نیاز ساختمان به انواع مصالح ساختمانی و همچنین ظرفیت محدود نقاط عرضه در تامین مصالح را در نظر می‌گیرد. تعداد، مکان و ظرفیت هر یک از نقاط عرضه از پیش تعیین شده است. امکان تامین چند نوع مصالح به صورت همزمان توسط هر یک از نقاط عرضه وجود دارد.
- مکان نقاط تقاضا و همچنین نوع و مصالح مورد نیاز هر یک از این نقاط در کل فرآیند ساخت‌وساز از پیش تعیین شده است. فرض می‌شود که نیاز به مصالح در تمام روزهای کاری مشابه یکدیگر است. مدل پیشنهادی نیازهای نقاط تقاضا را به طور کامل پوشش می‌دهد.
- مدل پیشنهادی برای هر درخواست نقطه عرضه و تاورکری مناسب را بر اساس مدت زمان انتقال مصالح، ظرفیت نقاط عرضه، مکان استقرار تاورکری‌ها و همچنین ظرفیت و شعاع مجاز حرکت تاورکری‌ها در فرآیند بهینه‌سازی تعیین می‌کند. اتصال نقاط عرضه و تقاضا می‌تواند توسط چند تاورکری برقرار شود.
- فرض می‌شود تاورکری‌ها فقط یک نوع مصالح را در هر مرتبه بارگیری می‌کنند و سپس آن را فقط به یک نقطه تقاضا تحویل می‌دهد. پس از تحویل مصالح تاورکری مجدداً به نقطه عرضه بر می‌گردد.

مقاومت اجاره تاورکری‌ها توجه کردند. با این حال در هزینه اجاره تاورکری‌ها به مدت زمان استفاده از تاورکری‌ها توجه نشده است و صرفاً برای هر تاورکری یک عدد ثابت در نظر گرفته می‌شود. عدم توجه به هزینه نصب و راه‌اندازی تاورکری‌ها، مکان‌یابی فقط یک تاورکری در محیط ساخت‌وساز و عدم توجه به ظرفیت نقاط عرضه از دیگر محدودیت‌های روش ارائه شده توسط امیری و همکاران هستند. اخیراً احمدنیا و همکاران [۸] تلاش کردند با ارائه یک روش جامع بسیاری از نواقص روش‌های قبلی را بهبود بخشند. با این حال روش آن‌ها از پیچیدگی محاسباتی بالا خصوصاً در نمونه‌هایی با ابعاد بالا رنج می‌برد.

توضیحات این بخش نشان می‌دهد که تاکنون پژوهشگران موفق به شناسایی و در نظر گرفتن عوامل تاثیرگذار مختلفی در مسئله چیدمان بهینه تاورکری‌ها شده‌اند. با این حال علیرغم تلاش‌های متعدد، تاکنون پژوهشگران نتوانسته‌اند تمام عوامل ذکر شده را به صورت همزمان در یک مدل ریاضی در نظر بگیرند. علاوه بر این در پژوهش‌های ذکر شده در بالا برخی از عوامل موثر به خوبی مورد توجه قرار نگرفته است. به عنوان مثال یک پروژه ساختمان سازی اغلب باید قبل از مهلت مشخص شده به بهره‌برداری برسد. مدل‌های ریاضی موجود این محدودیت را مورد توجه قرار نداده‌اند. از این رو این مقاله با ارائه یک مدل خطی عدد صحیح تلاش می‌کند در تعیین تعداد و مکان بهینه تاورکری‌ها تکمیل به موقع پروژه را در نظر بگیرد. هزینه اجاره و نصب تاورکری‌ها و همچنین دستمزد نیروی انسانی نیز در پژوهش‌های قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این موضوع باعث می‌شود که هزینه‌های ذکر شده در فرآیند بهینه‌سازی دخالتی نداشته باشند. مدل پیشنهادی برای رفع این نقیصه هزینه اجاره تاورکری‌ها و دستمزد نیروی انسانی را متناسب با مدت زمان فعالیت هر یک از تاورکری‌ها در نظر می‌گیرد. توجه به ظرفیت و شعاع حرکت مجاز تاورکری‌ها، امکان تامین چند نوع مصالح توسط هر یک از نقاط عرضه و همچنین توجه به ظرفیت محدود تامین مصالح توسط هر یک از این نقاط را می‌توان به عنوان دیگر نکات مثبت و برجسته مدل پیشنهادی ذکر کرد. علاوه بر این روش پیشنهادی در مدت زمان کوتاهی می‌تواند ارتفاع بهینه تاورکری‌های نصب شده را به منظور کاهش مخاطرات ایمنی و کاهش توقفات احتمالی ناشی از همپوشانی فعالیت‌ها را تعیین کند.

روش‌های پیشین اغلب پیچیدگی محاسباتی بالایی دارند. در دنیای واقعی معمولاً لازم است برای در نظر گرفتن شرایط و سناریوهای مختلف چندین بار مدل اجرا شود. این موضوع می‌تواند تصمیم‌گیری با مدل‌های



شکل ۱. فلوچارت روش پیشنهادی در تعیین چیدمان بهینه تاورکرینها در محیط ساخت و ساز.

Fig. 1. Flowchart of the proposed method for determining the optimal layout of tower cranes on a construction site.

مماسی) است. مقدار حرکات تاورکرینها را می‌توان با توجه به مختصات مکان تاورکرینها و مختصات نقاط عرضه و تقاضا مشخص کرد. مدت زمان حرکت عمودی از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$T_{ijl}^v = \frac{\Delta_{ijl}^h}{V^h} \quad (1)$$

که در آن T_{ijl}^v بیانگر مدت زمان حرکت عمودی تاورکرینها l در انتقال مصالح از نقطه عرضه i به نقطه تقاضای j است. در رابطه (۱) V^h بیانگر سرعت حرکت عمودی تاورکرینها و Δ_{ijl}^h و برابر مقدار حرکت عمودی تاورکرینها l در انتقال مصالح از نقطه عرضه i به نقطه تقاضای j است. در این مقاله تاورکرینها استقرار یافته در مکان کاندید l را تاورکرینها l می‌نامیم.

• معمولاً فرآیند ساخت‌وساز باید در مدت زمان مشخصی تکمیل شود. چیدمان بهینه ارائه شده توسط مدل پیشنهادی تکمیل به موقع پروژه را تضمین می‌کند.

• مکان و تعداد تاورکرینها مورد نیاز پروژه در فرآیند بهینه‌سازی تعیین می‌شود. شعاع و ظرفیت تاورکرینها در چیدمان تاورکرینها مورد توجه قرار گرفته است.

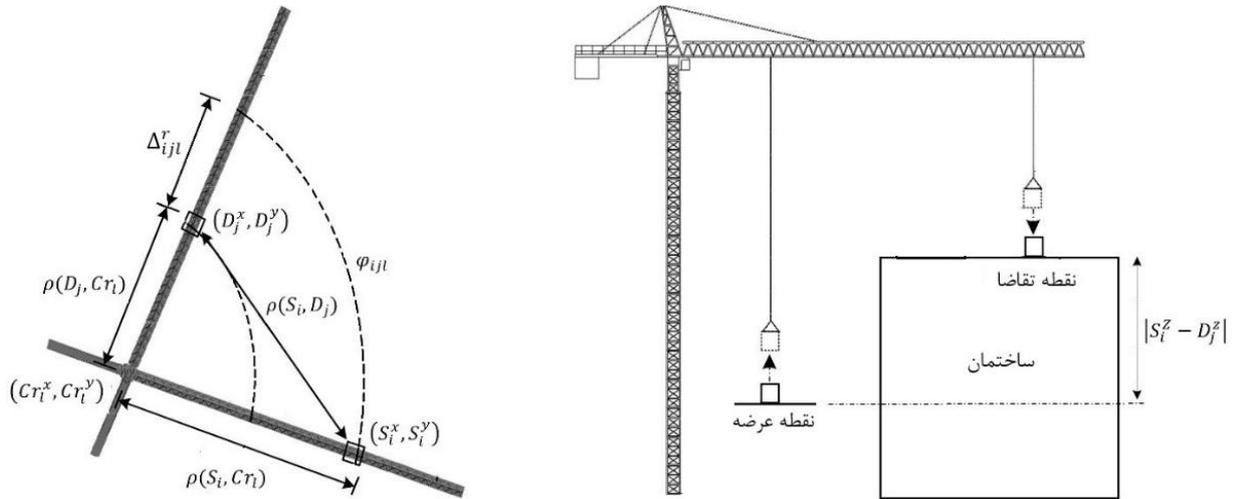
• هدف مدل پیشنهادی کاهش هزینه‌هایی مانند هزینه انتقال مصالح توسط تاورکرینها، هزینه اجاره تاورکرینها، هزینه نصب و راه‌اندازی تاورکرینها و دستمزد پرداختی به اپراتورها است.

• ارتفاع تاورکرینها با هدف پرداختن به مسئله همپوشانی تاورکرینها و مخاطرات ایمنی ناشی از آن تعیین می‌شود.

در روش پیشنهادی ابتدا مدت زمان جابجایی بین نقاط عرضه و تقاضا در هر سفر محاسبه می‌شود. سپس برای تعیین مکان و تعداد تاورکرینها مورد نیاز و همچنین تخصیص فعالیت‌ها به تاورکرینها یک مدل MILP حل می‌شود. هنگامی که چند تاورکرینها در محیط ساخت و ساز نصب می‌شود، مسیر حرکت برخی از آنها ممکن است توسط دیگری به صورت دائم یا موقت مسدود شود. برخی از این مسدودیت‌ها با تنظیم ارتفاع تاورکرینها می‌تواند برطرف شود. برای پرداختن به این مسئله یک مدل ILP در این مقاله پیشنهاد شده است. با حل این مدل ارتفاع تاورکرینها به صورت بهینه تنظیم می‌شود تا از برخورد تاورکرینها با یکدیگر و توقفات ناشی از همپوشانی آنها جلوگیری کند. پس از حل این مدل مشخص می‌شود که جواب بدست آمده از نظر ایمنی قابل قبول است یا نه. اگر این جواب قابل قبول باشد، فرآیند حل به اتمام می‌رسد. اما اگر این جواب از نظر ایمنی مورد قبول نباشد باید مراحل مجدداً تکرار شود. در این شرایط تدبیرهای مختلفی می‌تواند بکار گرفته شود. به عنوان مثال می‌توان جواب بدست آمده را از فضای جواب مسئله حذف کرد و مجدداً مراحل را تا رسیدن به جواب مورد قبول تکرار کرد. مراحل روش پیشنهادی در شکل ۱ خلاصه شده است.

۳-۱- مدت زمان جابجایی تاورکرینها بین نقاط عرضه و تقاضا

مدت زمان انتقال مصالح از تقسیم مقدار حرکت تاورکرینها بر سرعت حرکت تاورکرینها بدست می‌آید [۱۱]. سرعت حرکت تاورکرینها را شرکت سازنده آن تعیین می‌کند. حرکات تاورکرینها را می‌توان به حرکت عمودی و حرکت افقی تجزیه کرد (در شکل ۲ نشان داده شده است) [۳]. حرکت افقی تاورکرینها شامل حرکت شعاعی و واگن برقی و حرکت چرخشی بازو (حرکت



شکل ۲. حرکات تاورکرین (سمت چپ حرکت افقی و سمت راست حرکت عمودی).

Fig. 2. Tower crane movements: horizontal movement (left) and vertical movement (right).

که در آن $\rho(S_i, Cr_I)$ بیانگر فاصله افقی نقطه عرضه i از مکان کاندید l روی محور x و y $\rho(D_j, Cr_I)$ برابر با فاصله افقی نقطه تقاضای j از مکان کاندید l روی محور x و y است. به طور مثال $\rho(S_i, Cr_I)$ از رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$\rho(S_i, Cr_I) = \sqrt{(S_i^x - Cr_I^x)^2 + (S_i^y - Cr_I^y)^2} \quad (5)$$

با استفاده از رابطه (۶) مدت زمان حرکت مماسی تاورکرین را می‌توان محاسبه کرد:

$$T_{ijl}^\omega = \frac{\varphi_{ijl}}{V^\omega} \quad (6)$$

که در آن T_{ijl}^ω بیانگر مدت زمان حرکت مماسی تاورکرین l در انتقال مصالح از نقطه عرضه i به نقطه تقاضای j و V^ω بیانگر سرعت حرکت مماسی تاورکرین است. همچنین مقدار تغییرات زاویه‌ای بازوی تاورکرین مستقر در مکان کاندید l برای حرکت از نقطه عرضه i به نقطه تقاضای j را مشخص می‌کند. بر اساس قانون کسینوس‌ها [۳۲] برای مثلث شکل ۱ داریم:

j است. مقدار حرکت عمودی تاورکرین از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\Delta_{ijl}^h = |S_i^z - D_j^z| \quad (2)$$

که در آن S_i^z و D_j^z به ترتیب بیانگر مختصات نقطه عرضه i و نقطه تقاضای j روی محور Z است. رابطه (۳) مدت زمان حرکت شعاعی تاورکرین را محاسبه می‌کند:

$$T_{ijl}^r = \frac{\Delta_{ijl}^r}{V^r} \quad (3)$$

که در آن T_{ijl}^r بیانگر مدت زمان حرکت شعاعی تاورکرین l در انتقال مصالح از نقطه عرضه i به نقطه تقاضای j است. در رابطه (۳) V^r بیانگر سرعت حرکت شعاعی و Δ_{ijl}^r برابر مقدار حرکت شعاعی تاورکرین l برای انتقال مصالح از نقطه عرضه i به نقطه تقاضای j است. با استفاده از رابطه (۴) مقدار حرکت شعاعی تاورکرین محاسبه می‌شود:

$$\Delta_{ijl}^r = |\rho(S_i, Cr_I) - \rho(D_j, Cr_I)| \quad (4)$$

l را مشخص می‌کند (۰ نشان دهنده حرکت همزمان و ۱ نشان دهنده حرکت متوالی است). همچنین در رابطه (۱۰) پارامتری پیوسته بین ۰/۱ تا ۱۰ است که مقدار آن با توجه به دشواری عملیات بالابری تاورکرین l مشخص می‌شود (۰، ۱) برای عملیات بالابری عادی و ۱۰ برای عملیات بالابری دشوار).

۳-۲- مدل پیشنهادی برای تعیین مکان و تعداد تاورکرین های مورد نیاز در این بخش یک مدل MILP برای تعیین مکان و تعداد تاورکرین‌های مورد نیاز پیشنهاد می‌شود. در ادامه قیدها و تابع هدف این مدل توضیح داده می‌شود.

مدت زمان عملیات تاورکرین‌ها

رابطه (۱۱) مدت زمان کل عملیات تاورکرین برای هر تقاضا را محاسبه می‌کند:

$$T_{ijml} = 2 \times y_{ijml} \times T_{ijl}^t \quad (11)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall m \in M, \forall l \in L$$

که در آن I, J, M, L به ترتیب برابر با مجموعه تمام نقاط عرضه کاندید، نقاط تقاضا، مصالح موجود و مکان‌های کاندید برای استقرار تاورکرین‌ها است. همچنین T_{ijml} برابر با کل مدت زمانی است که تاورکرین l صرف انتقال ماده m از نقطه عرضه i به نقطه تقاضای j می‌کند. در رابطه (۱۱) متغیر y_{ijml} برابر تعداد دفعاتی است که تاورکرین l برای انتقال ماده m بین نقطه عرضه i و نقطه تقاضای j جابجا می‌شود. در این مقاله فرض می‌شود که تاورکرین پس از تحویل ماده m به نقطه تقاضای j مجدداً به نقطه عرضه i بر می‌گردد. به همین دلیل در رابطه (۱۱) مدت زمان انتقال مصالح در عدد دو ضرب شده است.

رابطه (۱۲) مدت زمان عملیات هر تاورکرین در فرآیند انتقال مصالح را محاسبه می‌کند:

$$T_l^{crane} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} T_{ijml} \quad \forall l \in L \quad (12)$$

$$\rho(S_i, D_j)^2 = \rho(S_i, Cr_i)^2 + \rho(D_j, Cr_i)^2 - 2\rho(S_i, Cr_i)\rho(D_j, Cr_i)\cos(\varphi) \quad (7)$$

با حل معادله رابطه (۷) مقدار φ_{ijl} بدست می‌آید:

$$\varphi_{ijl} = \arccos\left(\frac{\rho(S_i, Cr_i)^2 + \rho(D_j, Cr_i)^2 - \rho(S_i, D_j)^2}{2\rho(S_i, Cr_i)\rho(D_j, Cr_i)}\right) \quad (8)$$

$$0 \leq \varphi_{ijl} \leq \pi$$

همانطور که بیان شد، حرکت افقی تاورکرین شامل حرکت شعاعی و حرکت مماسی می‌شود. این دو حرکت می‌تواند به صورت همزمان انجام شود. بر این اساس رابطه (۹) مدت زمان حرکت افقی تاورکرین را محاسبه می‌کند:

$$T_{ijl}^h = \max(T_{ijl}^r, T_{ijl}^o) + \alpha_l \min(T_{ijl}^r, T_{ijl}^o) \quad (9)$$

که در آن T_{ijl}^h برابر با مدت زمان حرکت افقی تاورکرین l در انتقال مصالح از نقطه عرضه i به نقطه تقاضای j است. پارامتری پیوسته بین ۰ و ۱ است که درجه هماهنگی بین حرکت شعاعی و حرکت مماسی تاورکرین l را مشخص می‌کند (۰ نشان دهنده حرکت همزمان و ۱ نشان دهنده حرکت متوالی است).

حرکت افقی و حرکت عمودی نیز می‌تواند با توجه به ویژگی‌های مسیر، نوع بار، نوع تاورکرین و مهارت اپراتور به صورت همزمان انجام شود. از این رو مدت زمان لازم برای انتقال و جابجایی مصالح از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$T_{ijl}^t = \gamma_l \left[\max(T_{ijl}^h, T_{ijl}^v) + \beta_l \min(T_{ijl}^h, T_{ijl}^v) \right] \quad (10)$$

که در آن T_{ijl}^t برابر با مدت زمان انتقال مصالح از نقطه عرضه i به نقطه تقاضای j توسط تاورکرین l است. پارامتری پیوسته بین ۰ و ۱ است که درجه هماهنگی بین حرکت افقی و حرکت عمودی تاورکرین

ساخت‌وساز است. همچنین x_{ijml} یک متغیر عدد صحیح است که مقدار ماده m انتقال یافته توسط تاورکری l از نقطه عرضه i به نقطه تقاضای j را مشخص می‌کند. با توجه به رابطه (۱۵) و رابطه (۱۱) می‌توان گفت که مدل پیشنهادی می‌تواند برای کاهش مدت زمان انتقال مصالح برای هر درخواست نقطه عرضه مناسبی را انتخاب نماید.

رعایت ظرفیت نقاط عرضه

مصالح مورد نیاز ساختمان توسط نقاطی به نام نقاط عرضه تامین می‌شود. هر یک از نقاط عرضه از نظر نوع و مقدار تامین مصالح محدودیت‌هایی دارند. رابطه (۱۶) محدودیت تامین مصالح توسط نقاط عرضه را تضمین می‌کند. علاوه بر این رابطه (۱۶) فرض امکان ذخیره‌سازی همزمان چندین نوع مصالح در هر یک از نقاط عرضه را در نظر می‌گیرد.

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in L} x_{ijml} \leq \Delta_{im} \quad \forall i \in I, m \in M \quad (16)$$

که در آن پارامتر Δ_{im} برابر با ظرفیت نقطه عرضه i در تامین ماده m در فرآیند ساخت‌وساز است.

انتخاب مکان و تعداد تاورکری‌ها

تعداد و مکان استقرار تاورکری‌ها در مدت زمان حمل و نقل مصالح و هزینه‌های پروژه تاثیر زیادی دارد. محدودیت (۱۷) از بین نقاط کاندید، نقاط بهینه برای استقرار تاورکری‌ها را شناسایی می‌کند.

$$\frac{1}{M_1} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijml} \leq \pi_l \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijml} \quad (17)$$

$$\forall l \in L$$

که در آن π_l یک متغیر باینری است که اگر تاورکری l به مکان کاندید l اختصاص یابد برابر یک و در غیر اینصورت برابر صفر می‌شود. همچنین در رابطه (۱۷) M_1 یک عدد بزرگ است (باید عددی بزرگتر از مجموع مصالح منتقل شده توسط هر یک از تاورکری‌ها باشد). محدودیت (۱۷) علاوه بر مکان‌یابی بهینه تاورکری‌ها، تعداد بهینه تاورکری‌های مورد

که در آن T_l^{crane} برابر با مدت زمان عملیات تاورکری l در جابجایی مصالح است. معمولاً به دلیل تکمیل به موقع پروژه مطابق با قرارداد کاری فرآیند تحویل مصالح نباید از مدت زمان مشخصی بیشتر شود. محدودیت‌های (۱۳) و (۱۴) با هدف تکمیل به موقع پروژه به مدل پیشنهادی اضافه می‌شود. محدودیت (۱۳) رعایت سقف مدت زمان فعالیت‌های بالابری را تضمین می‌کند:

$$T_l^{crane} \leq T^{max} \quad \forall l \in L \quad (13)$$

که در آن پارامتر T^{max} برابر با حداکثر مدت زمان مجاز فعالیت توسط هر یک از تاورکری‌ها است. مقدار T^{max} باید طوری محاسبه شود که فعالیت‌های بالابری از تعداد روزهای مجازی کاری تجاوز نکند. برای محاسبه T^{max} رابطه (۱۴) پیشنهاد می‌شود:

$$T^{max} = ND \times T^{working} \quad (14)$$

که در آن پارامتر ND بیانگر حداکثر تعداد روزهای مجاز کاری و پارامتر $T^{working}$ بیانگر سقف مدت زمان روزانه فعالیت‌های بالابری توسط هر یک از تاورکری‌ها است.

رفع تقاضای مصالح

برای ساخت یک ساختمان به مصالح مختلفی در طول عملیات ساخت‌وساز نیاز است. قبل از شروع فرآیند ساخت‌وساز می‌توان نیاز کلی پروژه به هر یک از مصالح ساختمانی را تخمین زد. معمولاً قبل از شروع فرآیند ساخت‌وساز نقاطی به عنوان نقاط تقاضا برای تحویل مصالح مورد نیاز در نظر گرفته می‌شود. هر نقطه تقاضا در طول فرآیند ساخت‌وساز نیاز مشخصی به انواع مصالح ساختمانی دارند. محدودیت (۱۵) برای تضمین رفع نیاز نقاط تقاضا به مدل پیشنهادی اضافه می‌شود:

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} x_{ijml} \geq d_{jm} \quad \forall j \in J, \forall m \in M \quad (15)$$

که در آن d_{jm} نیاز نقطه تقاضای j به ماده m در کل فرآیند

مدل پیشنهادی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C = \min C^{Operation} + C^{Fixed} + C^{Variable} + C^{Salary} \quad (20)$$

که در آن $C^{Operation}$ ، C^{Fixed} ، $C^{Variable}$ و C^{Salary} به ترتیب بیانگر هزینه عملیات تاورکرین‌ها، هزینه‌های ثابت (از قبیل نصب، راه‌اندازی و هزینه احتمالی اجاره اولیه تاورکرین‌ها)، هزینه‌های متغیر (از قبیل اجاره و تعمیر و نگهداری تاورکرین‌ها) و دستمزد اپراتورها هستند. هزینه عملیات تاورکرین توسط رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود:

$$C^{Operation} = \sum_{l \in L} T_l^{crane} \times \bar{C}^{Operation} \quad (21)$$

که در آن $\bar{C}^{Operation}$ برابر با هزینه هر دقیقه فعالیت تاورکرین‌ها است. هزینه ثابت تاورکرین‌ها از رابطه (۲۲) بدست می‌آید:

$$C^{Fixed} = \sum_{l \in L} \pi_l \times \bar{C}^{Fixed} \quad (22)$$

که در آن \bar{C}^{Fixed} بیانگر هزینه ثابت استفاده از هر تاورکرین‌ها است. رابطه (۲۳) هزینه متغیر تاورکرین‌ها را بر حسب مدت زمان فعالیت هر یک از آن‌ها محاسبه می‌کند:

$$C^{Variable} = \sum_{l \in L} \pi_l \times T_l^{crane} \times \bar{C}^{Variable} \quad (23)$$

که در آن $\bar{C}^{Variable}$ بیانگر هزینه متغیر هر تاورکرین بر حسب هر دقیقه فعالیت است. رابطه (۲۴) دستمزد اپراتورهای تاورکرین‌ها را بر حسب دقیقه محاسبه می‌کند:

$$C^{Salary} = \sum_{l \in L} \pi_l \times T_l^{crane} \times \bar{C}^{Salary} \quad (24)$$

که در آن \bar{C}^{Salary} بیانگر دستمزد هر دقیقه کار بر روی تاورکرین‌ها است.

نیاز پروژه را نیز مشخص می‌کند. معمولاً به دلیل هزینه بالای تاورکرین‌ها و همچنین محدودیت‌های محیط ساخت‌وساز امکان استقرار تعداد زیادی تاورکرین امکان پذیر نیست. محدودیت (۱۸) یک کران بالا برای تعداد تاورکرین‌های تخصیص یافته در نظر می‌گیرد.

$$\sum_{l \in L} \pi_l \leq \pi^{max} \quad (18)$$

که در آن π^{max} برابر با حداکثر تعداد مجاز استفاده از تاورکرین در پروژه است.

رعایت ظرفیت و شعاع حرکت تاورکرین

هر یک از تاورکرین‌ها ظرفیت و شعاع محدودی در انتقال مصالح ساختمانی دارند. از این رو معمولاً برای رفع تقاضای هر یک از نقاط تقاضا، تاورکرین‌ها باید چندین بار بین نقاط عرضه و تقاضا جابجا شوند. محدودیت (۱۹) تعداد دفعاتی که هر یک از تاورکرین‌ها بین نقاط عرضه و تقاضا جابجا می‌شوند را در نظر گرفتن ظرفیت و شعاع مجاز حرکت تاورکرین‌ها محاسبه می‌کند:

$$x_{ijml} \leq y_{ijml} \times \delta_{ijl} \leq x_{ijml} + \delta_{ijl} \quad (19)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall m \in M, \forall l \in L$$

که در آن y_{ijml} یک متغیر عدد صحیح است که تعداد جابجایی‌های تاورکرین l در انتقال ماده m از نقطه عرضه i به نقطه تقاضای j را مشخص می‌کند. δ_{ijl} برابر با ظرفیت تاورکرین l در انتقال مصالح از نقطه عرضه i به نقطه تقاضای j است. δ_{ijl} باید بر اساس نمودار بار تاورکرین و فاصله نقاط عرضه و تقاضا از مکان استقرار تاورکرین تعیین شود. همچنین δ_{ijl} برای نقاط عرضه و تقاضای خارج از شعاع تاورکرین برابر با صفر انتخاب می‌شود.

تابع هدف

هدف اصلی مدل پیشنهادی به حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی و بهره‌برداری سریع‌تر از پروژه با رعایت محدودیت‌های فوق است. تابع هدف

خطی سازی مدل پیشنهادی

رابطه‌های (۲۳) و (۲۴) ارائه شده در تابع هدف منجر به غیرخطی شدن مدل پیشنهادی می‌شود. در ادامه با هدف کاهش مدت زمان حل مدل ریاضی ارائه شده، رابطه‌های (۲۳) و (۲۴) با استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی به روابطی خطی تبدیل می‌شوند. عبارت $\pi_l \times T_l$ منجر به غیرخطی شدن رابطه‌های (۲۳) و (۲۴) شده است. ابتدا رابطه‌های (۲۳) و (۲۴) را به ترتیب به صورت رابطه‌های خطی (۲۵) و (۲۶) بازنویسی می‌کنیم:

$$C^{Rental} = \sum_{l \in L} A_l \times \bar{C}^{Rental} \quad (25)$$

$$C^{Salary} = \sum_{l \in L} A_l \times \bar{C}^{Salary} \quad (26)$$

که در آن‌ها A_l برابر با یک متغیر عدد صحیح کمکی است. برای اینکه مدل مقدار A_l را برابر با $\pi_l \times T_l$ در نظر بگیرد محدودیت‌های زیر باید اضافه شود.

$$A_l \leq M_2 \times \pi_l \quad \forall l \in L \quad (27)$$

$$A_l \leq T_l \quad \forall l \in L \quad (28)$$

$$A_l \geq T_l - (1 - \pi_l) \times M_2 \quad \forall l \in L \quad (29)$$

که در آن M_2 یک عدد به اندازه کافی بزرگ است (به عنوان مثال مقداری بزرگ‌تر از T^{max}).

۳-۳- تنظیم ارتفاع تاورکرین‌ها

معمولاً در محیط ساخت و ساز چندین تاورکرین در مجاورت یکدیگر نصب می‌شوند. مسیر حرکت این تاورکرین‌ها می‌تواند توسط تاورکرین‌های مجاور مسدود شود. هنگامی که تاورکرین با ارتفاع بیشتر در یک مکان اقدام به بارگیری یا تخلیه مصالح می‌کند، تاورکرین با ارتفاع کمتر نمی‌تواند از آن

مسیر عبور کند. همچنین تخلیه و بارگیری همزمان چند تاورکرین در یک مکان امکان‌پذیر نیست. در چنین شرایطی تاورکرین‌ها باید منتظر اتمام فعالیت تاورکرین دیگر باشند. این می‌تواند منجر به وقفه‌های طولانی در برنامه روزانه تاورکرین‌ها شود. علاوه بر این پایه تاورکرین‌های با ارتفاع بیشتر ممکن است منجر به مسدودیت دائمی مسیرهای حرکت تاورکرین با ارتفاع کمتر شود. برای پرداختن به این مشکلات یک مدل ILP پیشنهاد می‌شود تا ارتفاع تاورکرین‌ها به صورت بهینه تعیین شود. این می‌تواند وقفه‌های ناشی از همپوشانی تاورکرین‌ها و مسدودیت مسیرها را کاهش دهد. در ادامه ابتدا محدودیت‌ها و سپس تابع هدف مدل پیشنهادی توضیح داده شده است.

محدودیت‌های مدل پیشنهادی

محدودیت (۳۰) نشان می‌دهد که ارتفاع تاورکرین نصب شده در مکان l از ارتفاع نصب شده در مکان l' بیشتر است یا نه.

$$N \times H_{ll'} \geq h_l - h_{l'} + 1 \quad (30)$$

$$\forall l \in L^*, \forall l' \in L^*$$

در محدودیت (۳۰) پارامتر N بیانگر تعداد تاورکرین نصب شده، مجموعه L^* شامل مکان تاورکرین‌های نصب شده و متغیر عدد صحیح h_l نشان دهنده رتبه ارتفاع تاورکرین نصب شده در مکان l است. رتبه بالاتر به معنی ارتفاع بیشتر است. به عنوان مثال ارتفاع تاورکرین با رتبه ۳ باید بیشتر از تاورکرین با رتبه ۲ در نظر گرفته شود. در محدودیت (۳۰) $H_{ll'}$ یک متغیر باینری است که اگر ارتفاع تاورکرین نصب شده در مکان l از ارتفاع تاورکرین نصب شده در مکان l' بیشتر باشد برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر با ۰ است.

همان‌طور که بیان شد پایه تاورکرین با ارتفاع بیشتر ممکن است منجر به مسدودیت دائمی برخی از مسیرهای حرکت شود. برای پرداختن به این مشکل محدودیت (۳۱) به مدل پیشنهادی اضافه می‌شود. اگر تاورکرینی در مسیر حرکت تاورکرین‌های دیگر باشد، محدودیت (۳۱) ارتفاع آن را کمتر از تاورکرین‌های مجاور انتخاب می‌کند.

تاورکرین نصب شده در مکان l' شود برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر با ۰ است.

$$UC = \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{l' \in L^*} \Lambda_{jl}^{Unload} \times H_{ll'} \times O_{jll'}^2 \quad (34)$$

که در آن پارامتری است که برابر با تعداد دفعاتی است که تاورکرین نصب شده در مکان l در نقطه تقاضا j اقدام به تخلیه مصالح می‌کند. همچنین پارامتری باینری است که اگر تخلیه تاورکرین مستقر در مکان l در نقطه تقاضا j منجر به مسدودیت مسیرهای حرکت تاورکرین نصب شده در مکان l' شود برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر با ۰ است.

$$LO = \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{l' \in L^*} \Lambda_{il}^{Load} \times O_{ill'}^3 \quad (35)$$

که در آن پارامتری باینری است که اگر تاورکرین‌های نصب شده در مکان‌های l و l' از نقطه عرضه i مصالحی بارگیری کنند برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر با ۰ است.

$$UO = \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{l' \in L^*} \Lambda_{jl}^{Unload} \times O_{jll'}^4 \quad (36)$$

که در آن پارامتری باینری است که اگر تاورکرین‌های نصب شده در مکان‌های l و l' در نقطه تقاضا j مصالحی تخلیه کنند برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر با ۰ است.

مدل پیشنهادی بالا در گام نخست با تعیین ارتفاع مناسب تداخلات فضایی را کاهش می‌دهد. اما ممکن است با وجود تنظیم بهینه ارتفاع تاورکرین‌ها مقدار همپوشانی تاورکرین‌ها همچنان بالا باشد. علاوه بر این ممکن است پایه دو تاورکرین مجاور در مسیر حرکت یک دیگر باشند. در چنین شرایطی با تنظیم ارتفاع نمی‌توان تمام مسیرهای مسدودیت شده را قابل استفاده کرد. در چنین شرایطی که جواب بدست آمده از نظر ایمنی مورد قبول نباشد باید آن را از فضای جواب مسئله حذف و مدل MILP را برای تعیین مکان و تعداد تاورکرین‌ها مجدداً اجرا کرد. برای حذف جواب

$$h_l \geq p_{ll'} \times h_{l'} + 1 \quad (31)$$

$$\forall l \in L^*, \forall l' \in L^*$$

در محدودیت (۳۱) $p_{ll'}$ یک پارامتر باینری است که اگر پایه تاورکرین نصب شده در مکان l در مسیر حرکت تاورکرین نصب شده در مکان l' باشد برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر با ۰ در نظر گرفته می‌شود.

تابع هدف

رابطه (۳۲) تابع هدف مدل پیشنهادی را مشخص می‌کند.

$$\min LC + UC + LO + UO + SH \quad (32)$$

که در آن LC بیانگر تعداد دفعاتی است که بارگیری تاورکرین با ارتفاع بیشتر منجر به مسدودیت موقت مسیر حرکت تاورکرین‌های با ارتفاع کمتر شده است. UC بیانگر تعداد دفعاتی است که تخلیه تاورکرین با ارتفاع بیشتر منجر به مسدودیت موقت مسیر حرکت تاورکرین‌های با ارتفاع کمتر شده است. همچنین LO و UO در محدودیت (۳۲) به ترتیب برابر با تعداد دفعاتی است که تاورکرین‌ها در یک مکان یکسان اقدام به بارگیری و تخلیه می‌کنند. این چهار مولفه در تابع هدف به منظور کاهش همپوشانی تاورکرین‌ها از طریق تنظیم ارتفاع آن‌ها گنجانده شده است. SH در محدودیت (۳۲) بیانگر مجموع رتبه ارتفاع تاورکرین‌های نصب شده است. این مولفه در تابع هدف از افزایش غیر ضروری ارتفاع تاورکرین‌ها جلوگیری می‌کند. رابطه (۳۳) تا (۳۶) برای محاسبه LC ، UC ، LO و UO استفاده می‌شود.

$$LC = \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{l' \in L^*} \Lambda_{il}^{Load} \times H_{ll'} \times O_{ill'}^1 \quad (33)$$

که در آن پارامتری است که برابر با تعداد دفعاتی است که تاورکرین نصب شده در مکان l از نقطه عرضه i اقدام به بارگیری مصالح می‌کند. همچنین پارامتری باینری است که اگر بارگیری تاورکرین مستقر در مکان l از نقطه عرضه i منجر به مسدودیت مسیرهای حرکت

منجر به مسدودیت مسیرهای یکدیگر می‌شوند می‌تواند موثر واقع شود. تا هنگامی که جواب بدست آمده از نظر ایمنی و مقدار همپوشانی مطلوب نباشد می‌تواند فرایند فوق را ادامه داد. علاوه بر این می‌توان جواب‌های مختلف را بررسی کرد تا یک تعادل بین هزینه و ایمنی پیدا شود.

۴- نتایج عددی

در این بخش مدل خطی عدد صحیح ارائه شده در بخش قبلی با استفاده از یک نمونه مطالعاتی آزمایش و راستی آزمایی می‌شود. مدل پیشنهادی در نرم افزار IBM CPLEX 12.10 پیاده‌سازی و با استفاده از حل کننده CPLEX در سیستمی با ویندوز ۱۰، رم 8GB و سی پیو Core i5 حل شده است.

نمونه مطالعاتی

در ادامه با استفاده از اطلاعات مراجع [۱۱] [۱۲] [۱۴] [۱۸] [۲۶] نمونه مورد استفاده برای آزمایش مدل پیشنهادی متناسب با مفروضات در نظر گرفته شده در بخش ۳ معرفی می‌شود. طرح هندسی محیط ساخت‌وساز در نمونه مطالعاتی از مرجع [۱۴] اقتباس شده است. شکل ۳ ماکت مربوط به ساختمان نمونه مطالعاتی را نشان می‌دهد. این ساختمان از سه بخش تشکیل شده است. فرض می‌شود که عملیات ساخت‌وساز در هر سه بخش در حال انجام است.

شکل ۴ محیط ساخت‌وساز و همچنین مکان نقاط عرضه و تقاضا و

فعلی از فضای شدنی باتوجه به شرایط مسئله می‌توان از محدودیت‌های زیر استفاده کرد.

اگر همپوشانی تاورکرین‌ها زیاد باشد باید مکان تاورکرین‌ها تغییر پیدا کند. برای دست‌یابی به این هدف می‌توان از محدودیت زیر استفاده کرد.

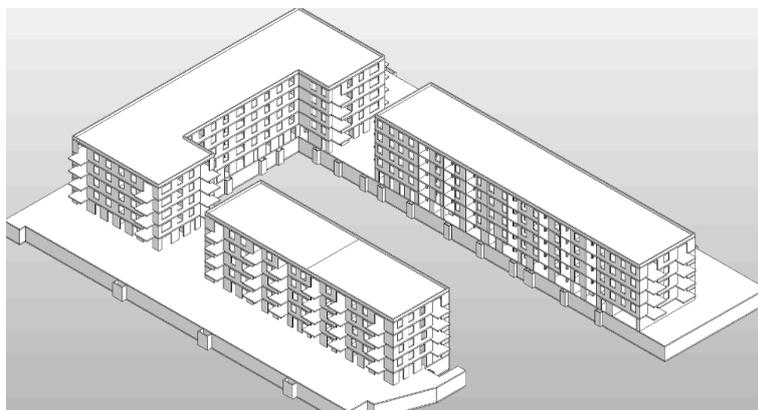
$$\sum_{l \in L^*} \pi_l \leq N - 1 \quad (37)$$

با اضافه شدن محدودیت (۳۷) حداقل مکان یک تاورکرین در جواب جدید تغییر می‌کند.

اگر حذف برخی از مسیرهای همپوشان مطلوب باشد، می‌توان از محدودیت (۳۸) استفاده کرد. فرض کنید مسیر حرکت تاورکرین مستقر در مکان l از نقطه عرضه i به نقطه تقاضا j در حمل مصالح m مسیری باشد که باید از مجموعه جواب حذف شود. در این حالت می‌توان محدودیت زیر را به مدل پیشنهادی اضافه کرد تا این مسیر در جواب جدید وجود نداشته باشد.

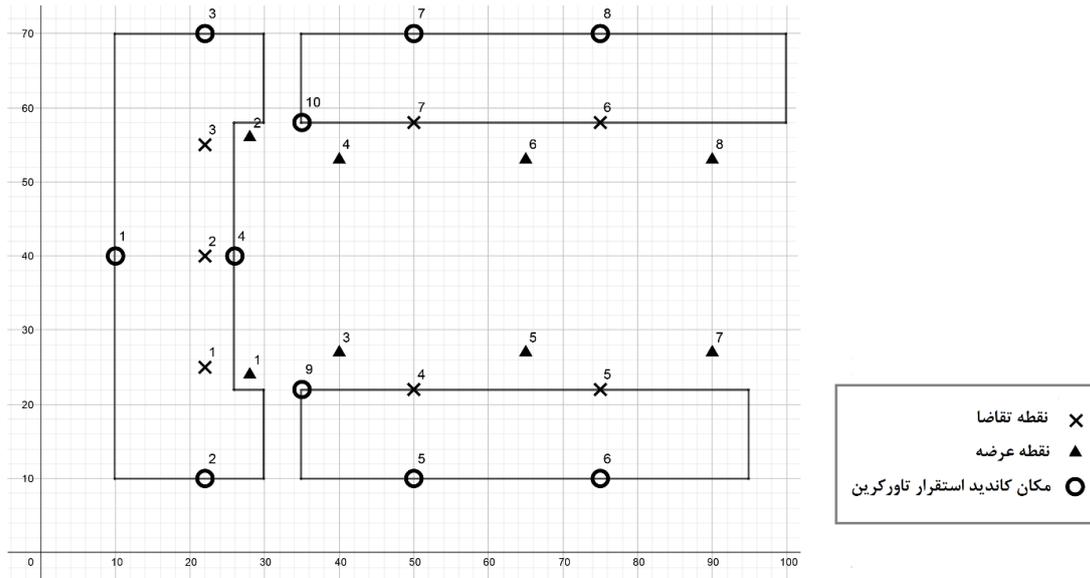
$$y_{ijml} = 0 \quad (38)$$

محدودیت (۳۸) برای هنگامی که پایه دو تاورکرین به صورت متقابل



شکل ۳. ماکت ساختمان در نمونه مطالعاتی [۱۴].

Fig. 3. Building mock-up used in the case study [14].



شکل ۴. طرح هندسی نمونه موردی شامل مکان نقاط عرضه و تقاضا و مکان‌های کاندید استقرار تاورکربن.

Fig. 4. Geometric layout of the case study, including supply and demand points as well as candidate locations for crane installation.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به نقاط عرضه و تقاضا.

Table 1. Information on supply and demand points.

مقدار مصالح مورد نیاز				مختصات			نقطه	ظرفیت تامین مصالح				مختصات			نقطه
D	C	B	A	z	y	x	تقاضا	D	C	B	A	z	y	x	عرضه
۲۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۲۵	۲۵	۲۲	۱	۰	۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۰	۲۴	۲۸	۱
۲۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰	۲۰۰۰	۲۵	۴۰	۲۲	۲	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۰	۰	۰	۵۶	۲۸	۲
۲۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۲۵	۵۵	۲۲	۳	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۰	۰	۰	۲۷	۴۰	۳
۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۵	۲۲	۵۰	۴	۰	۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۰	۵۳	۴۰	۴
۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۵	۲۲	۷۵	۵	۰	۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۰	۲۷	۶۵	۵
۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۵	۵۸	۷۵	۶	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۰	۰	۰	۵۳	۶۵	۶
۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۵	۵۸	۵۰	۷	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۰	۰	۰	۲۷	۹۰	۷
-	-	-	-	-	-	-	-	۰	۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۰	۵۳	۹۰	۸

شکل ۴ تحویل داده شود. مختصات نقاط تقاضا و مقدار مصالح مورد نیاز هر یک از این نقاط در جدول ۱ نشان داده شده است. درخواست‌های مصالح توسط نقاط عرضه مشخص شده در شکل ۴ باید تامین شود. جدول ۱ مختصات نقاط عرضه و همچنین ظرفیت قابل تامین مصالح توسط هر یک از این نقاط مشخص شده است. اعداد مربوط به مقدار مصالح در جدول ۱ بر حسب تن است.

در جدول ۲ شعاع حرکت مجاز تاورکربن، ظرفیت تاورکربن در حمل

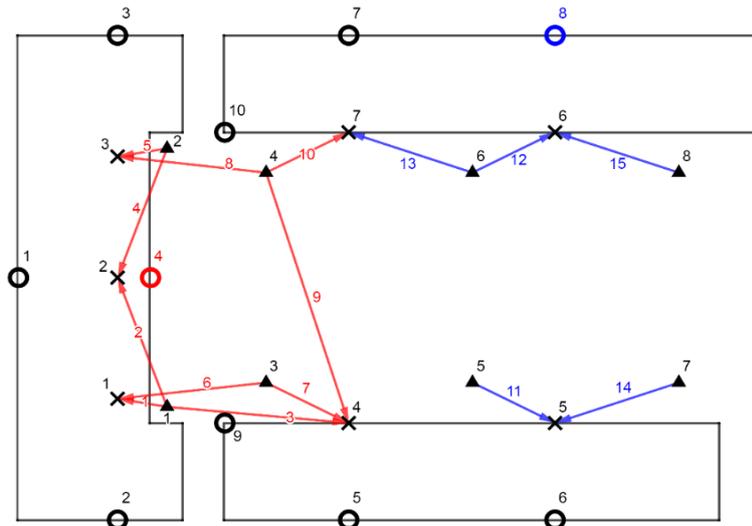
مکان‌های کاندید برای استقرار تاورکربن را نمایش می‌دهد. در این شکل ۸ مکان به عنوان نقطه عرضه مصالح و ۷ مکان به عنوان نقطه تقاضا در نظر گرفته شده است. همچنین در نمونه موردی ۱۰ مکان کاندید برای استقرار تاورکربن مشخص شده است.

نمونه مورد مطالعه مربوط به یک مرحله از فرآیند ساخت‌وساز است. فرض می‌شود که ساختمان به چهار نوع مصالح (A, B, C و D) در طول این مرحله نیاز دارد. مصالح مورد نیاز باید به نقاط تقاضا مشخص شده در

جدول ۲. مشخصات تاورکرین مورد استفاده در نمونه مطالعاتی

Table 2. Specifications of the tower crane used in the case study.

سرعت حرکات			ظرفیت			شعاع		حرکت	تاورکرین
V^ω	V^r	V^h	تا ۵۵ متر	تا ۵۰ متر	تا ۴۵ متر	تا ۴۰ متر	تا ۳۰ متر		
۷/۵۷	۵۳/۳	۶۰	۵/۱	۵/۶	۶/۳	۷/۱	۸	۵۵ متر	



شکل ۵. چیدمان بهینه تاورکرین‌ها به همراه حرکات هر یک از آن‌ها

Fig. 5. Optimal layout of tower cranes and their corresponding movement paths.

بررسی و آزمایش

در ادامه مدل پیشنهادی با استفاده از نمونه مطالعاتی فوق مورد بررسی و آزمایش قرار می‌گیرد. جواب بهینه بدست آمده از مدل پیشنهادی برای نمونه مطالعاتی در شکل ۵ نشان داده شده است. مدل پیشنهادی استفاده از ۲ تاورکرین در محیط ساخت‌وساز را بهینه می‌داند و مکان‌های ۴ و ۸ را برای استقرار آن‌ها مشخص می‌کند. همچنین شکل ۴ جابجایی‌های انجام شده بین نقاط عرضه و تقاضا توسط هر یک از تاورکرین‌ها را نمایش می‌دهد. جابجایی‌های انجام شده توسط تاورکرین ۴ با رنگ قرمز و جابجایی‌های انجام شده توسط تاورکرین ۸ با رنگ آبی مشخص شده است. به عنوان مثال پیکان شماره ۱۳ به معنی انتقال مصالح توسط تاورکرین ۸ از نقطه عرضه ۶ به نقطه تقاضای ۷ است. تعداد جابجایی‌ها، مدت زمان جابجایی‌ها (بر حسب دقیقه) و مقدار مصالح جابجا شده (بر حسب تن) مربوط به هر پیکان در جدول ۳ مشخص شده است.

با توجه به شکل ۵ و جدول ۳ می‌توان گفت که مدل پیشنهادی کوتاه

مصالح و همچنین سرعت حرکات تاورکرین نمایش داده شده است. ظرفیت باربری تاورکرین تا شعاع ۳۰ متر برابر ۸ تن است که در شعاع حرکتی بیش از ۵۰ متر به ۵٫۱ تن کاهش پیدا می‌کند. حداکثر شعاع حرکت مجاز تاورکرین با توجه به طول بازوی آن در جدول ۲ برابر با ۵۵ متر در نظر گرفته شده است. سرعت حرکت عمودی (V^h) برابر با $60m/min$ ، سرعت حرکت شعاعی (V^r) برابر با $53.3 m/min$ و سرعت حرکت مماسی (V^ω) برابر با $7.57 rad/min$ است. پارامترهای α_k ، β_k و γ_k به ترتیب برابر با ۱، ۰/۲۵ و ۱ تنظیم می‌شود. سقف مجاز مدت زمان استفاده از تاورکرین برای رعایت مهلت تعیین شده برابر با ۵۰۰۰ دقیقه فرض می‌شود. همچنین هزینه عملیات تاورکرین برای هر دقیقه فعالیت برابر با ۱/۹۱ دلار، هزینه ثابت هر تاورکرین برابر با ۱۰۰۰۰ دلار و هزینه متغیر تاورکرین به ازای هر دقیقه فعالیت برابر با ۲/۱ دلار در نظر گرفته می‌شود. هزینه دستمزد اپراتور تاورکرین به ازای هر ساعت فعالیت ۱ دلار فرض می‌شود. حداکثر تعداد مجاز استفاده از تاورکرین برابر با ۵ در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۳. مشخصات مربوط به مسیرهای حرکت تاورکریں در چیدمان بهینه

Table 3. Specifications of tower crane movement paths in the optimal layout.

شماره پیکان	نوع مصالح	مقدار مصالح جایجا شده	تعداد جایجایی‌ها	مدت زمان هر جایجایی	مجموع مدت زمان جایجایی‌ها
۱	A	۲۰۰۰	۲۵۰	۰/۸۶۶۷	۲۱۶/۶۷
	B	۱۰۰۰	۱۲۵	۰/۸۶۶۷	۱۰۸/۳۴
۲	A	۲۰۰۰	۲۵۰	۱/۱۰۰۰	۲۷۵
	B	۳۰۰۰	۳۷۵	۱/۱۰۰۰	۴۱۲/۵
۳	A	۱۰۰۰	۱۲۵	۱	۱۲۵
	B	۱۰۰۰	۱۲۵	۱	۱۲۵
۴	C	۲۰۰۰	۲۵۰	۱/۱۰۰۰	۲۷۵
	D	۲۰۰۰	۲۵۰	۱/۱۰۰۰	۲۷۵
۵	C	۲۰۰۰	۲۵۰	۰/۸۶۶۷	۲۱۶/۶۷
	D	۲۰۰۰	۲۵۰	۰/۸۶۶۷	۲۱۶/۶۷
۶	C	۲۰۰۰	۲۵۰	۰/۹۳۳۳	۲۲۳/۳۳
	D	۲۰۰۰	۲۵۰	۰/۹۳۳۳	۲۲۳/۳۳
۷	C	۲۰۰۰	۲۵۰	۰/۹۳۳۳	۲۲۳/۳۳
	D	۲۰۰۰	۲۵۰	۰/۹۳۳۳	۲۲۳/۳۳
۸	A	۲۰۰۰	۲۵۰	۰/۹۳۳۳	۲۲۳/۳۳
	B	۱۰۰۰	۱۲۵	۰/۹۳۳۳	۱۱۶/۶۷
۹	A	۱۰۰۰	۱۲۵	۱/۰۳	۱۲۹/۱۷
	B	۱۰۰۰	۱۲۵	۱/۰۳	۱۲۹/۱۷
۱۰	A	۲۰۰۰	۲۵۰	۰/۹۳۳۳	۲۲۳/۳۳
	B	۲۰۰۰	۲۵۰	۰/۹۳۳۳	۲۲۳/۳۳
۱۱	A	۲۰۰۴	۳۵۸	۰/۹	۳۲۲/۲
	B	۲۰۰۰	۳۵۸	۰/۹	۳۲۲/۲
۱۲	C	۲۰۰۰	۲۵۰	۰/۹۳۳۳	۲۲۳/۳۳
	D	۲۰۰۰	۲۵۰	۰/۹۳۳۳	۲۲۳/۳۳
۱۳	C	۲۰۰۰	۲۵۰	۰/۹۳۳۳	۲۲۳/۳۳
	D	۲۰۰۰	۲۵۰	۰/۹۳۳۳	۲۲۳/۳۳
۱۴	C	۲۰۰۴	۳۵۸	۰/۸۶۶۷	۳۱۰/۲۷
	D	۲۰۰۴	۳۵۸	۰/۸۶۶۷	۳۱۰/۲۷
۱۵	A	۲۰۰۰	۲۵۰	۰/۹۶۶۷	۲۴۱/۶۷
	B	۲۰۰۰	۲۵۰	۰/۹۶۶۷	۲۴۱/۶۷

این انتخاب است. علاوه بر این ظرفیت تاورکریں‌ها و ظرفیت نقاط عرضه در تمامی جایجایی‌ها رعایت شده است. همچنین تمامی درخواست‌های ذکر شده در جدول ۱ برای نقاط تقاضا به طور کامل بر طرف شده است. در جدول ۴ مدت زمان استفاده از هر تاورکریں (بر حسب دقیقه) و هزینه‌های عملیاتی تاورکریں‌ها (بر حسب دلار) نشان داده شده است.

ترین مسیرهای حرکت بین نقاط عرضه و تقاضا را به جز در یک مورد (پیکان ۹) برای هر تاورکریں انتخاب می‌کند. کوتاه ترین مسیر برای تاورکریں ۴ در رفع درخواست مصالح نقطه تقاضای ۴ نقاط عرضه ۱ و ۳ است. اما مدل پیشنهادی در رفع درخواست‌های نقطه تقاضای ۴ علاوه بر نقطه عرضه ۱ از نقطه عرضه ۴ نیز استفاده می‌کند. تکمیل ظرفیت نقطه عرضه ۱ علت

جدول ۴. مدت زمان و هزینه‌های عملیاتی چیدمان بهینه.

Table 4. Duration and operational costs of the optimal layout.

تاور کرین	مدت زمان فعالیت	هزینه عملیات تاور کرین	هزینه ثابت	هزینه متغیر	دستمزد اپراتور	مجموع هزینه‌ها
تاور کرین ۴	۴۲۵۴	۸۱۲۵	۱۰۰۰۰	۸۹۳۴	۴۳	۲۷۱۰۲
تاور کرین ۸	۲۶۸۲	۵۱۲۲	۱۰۰۰۰	۵۶۳۱	۲۷	۲۰۷۸۰
مجموع	۶۹۳۶	۱۳۲۴۷	۲۰۰۰۰	۱۴۵۶۵	۷۰	۴۷۸۸۲

جدول ۵. اطلاعات مربوط به چیدمان بدست آمده از مدل پیشنهادی بدون در نظر گرفتن محدودیت تکمیل به موقع پروژه.

Table 5. Results of the proposed model without considering the project completion deadline constraint.

تاور کرین	مدت زمان فعالیت	هزینه عملیات تاور کرین	هزینه ثابت	هزینه متغیر	دستمزد اپراتور	مجموع هزینه‌ها
تاور کرین ۴	۷۷۴۹	۱۴۸۰۱	۱۰۰۰۰	۱۶۲۷۳	۷۷	۴۱۱۵۱

درصد و در مقایسه با سقف تعیین شده (۵۰۰۰ دقیقه) ۵۵ درصد بیشتر است. بنابراین عدم در نظر گرفتن سقف زمانی برای تحویل مصالح می‌تواند مدت زمان لازم برای تکمیل درخواست مصالح را به طور چشمگیری افزایش دهد. هزینه‌های ثابت تاور کرین‌ها در تعیین تعداد تاور کرین‌های بهینه مورد نیاز تاثیرگذار است. برای اثبات این ادعا مجدداً مدل پیشنهادی بدون در نظر گرفتن هزینه‌های ثابت تاور کرین برای نمونه مطالعاتی حل می‌شود. نتایج در جدول ۶ گزارش شده است. در این حالت مدل پیشنهادی با هدف کاهش مجموع مدت زمان استفاده از تاور کرین‌ها از حداکثر تعداد مجاز تاور کرین‌ها (۵ تاور کرین) برای رفع درخواست مصالح استفاده می‌کند. از مقایسه جدول ۶ و جدول ۴ می‌توان نتیجه گرفت که نادیده گرفتن هزینه‌های ثابت تاور کرین‌ها می‌تواند منجر به افزایش حدوداً ۵۸ درصدی مجموع هزینه‌های عملیاتی استفاده از تاور کرین‌ها شود. در مقابل استفاده از ۵ تاور کرین در مقایسه با چیدمان بهینه (استفاده از ۲ تاور کرین) منجر به کاهش حدوداً ۷ درصدی مجموع مدت زمان فعالیت تاور کرین‌ها و دیگر هزینه‌های مربوط به تاور کرین‌ها (هزینه عملیات و هزینه متغیر تاور کرین‌ها و دستمزد اپراتورها) شده است. این مقدار در مقایسه با هزینه‌های ثابت تاور کرین‌ها و همچنین مخاطرات ایمنی ناشی از افزایش تعداد تاور کرین‌ها (از قبیل برخورد تاور کرین‌ها با یکدیگر و تاخیرات ناشی از فعالیت در مناطق همپوشان) اندک به نظر می‌رسد. بنابراین استفاده از ۲ تاور کرین در مقایسه با ۵ تاور کرین مقرون به صرفه تر است.

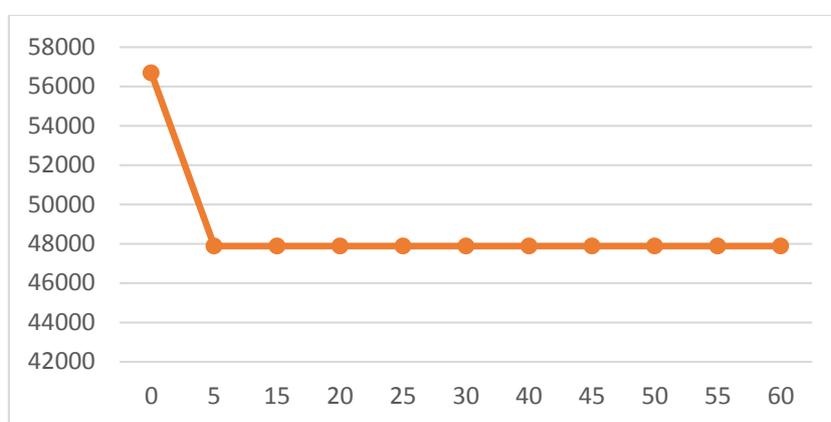
بیشترین فعالیت مربوط به تاور کرین ۴ است که در آن سقف مدت زمان تعیین شده برای استفاده از هر تاور کرین (۵۰۰۰ دقیقه) رعایت شده است. در واقع زمان تکمیل این مرحله از پروژه را تاور کرین ۴ مشخص می‌کند. مدت زمان استفاده از تاور کرین ۴ برابر با ۴۲۵۴ دقیقه بدست آمده است. این مقدار نشان می‌دهد که در چیدمان بهینه، پروژه تقریباً ۱۵ درصد زودتر از مهلت تعیین شده تکمیل می‌شود. مجموع کل هزینه‌های عملیاتی مربوط به استفاده از تاور کرین‌ها در چیدمان بهینه ارائه شده توسط مدل پیشنهادی برابر با ۴۷۸۸۲ دلار است.

تکمیل به موقع پروژه و در نظر گرفتن هزینه‌های ثابت مانند هزینه نصب و راه‌اندازی تاور کرین‌ها از جمله ادعاهای برجسته مطرح شده در این مقاله است. در ادامه با اعمال تغییراتی بر روی مدل پیشنهادی درستی و اهمیت این ادعاها نشان داده می‌شود. ابتدا محدودیت مربوط به رعایت سقف مدت زمان استفاده از هر تاور کرین (محدودیت (۱۳)) از مدل پیشنهادی حذف و سپس مجدداً مدل حل می‌شود. اطلاعات مربوط به چیدمان بدست آمده ناشی از این تغییرات در جدول ۵ گزارش شده است. در این حالت مدل فقط یک تاور کرین را برای حمل مصالح در مکان کاندید ۴ انتخاب می‌کند. اگرچه این چیدمان منجر به کاهش تقریبی ۱۴ درصدی هزینه‌ها در مقایسه با چیدمان بهینه می‌شود اما در مقابل در این حالت به ۷۷۴۹ دقیقه برای رفع تمامی تقاضاها نیاز است. این مقدار در مقایسه با چیدمان بهینه تقریباً ۸۲

جدول ۶. اطلاعات مربوط به چیدمان بدست آمده از مدل پیشنهادی بدون در نظر گرفتن هزینه‌های ثابت تاورکریں.

Table 6. Results of the proposed model without considering fixed tower crane costs.

تاورکریں	مدت زمان فعالیت	هزینه عملیات تاورکریں	هزینه متغیر	دستمزد اپراتور	مجموع هزینه‌ها	مجموع هزینه‌ها با اعمال هزینه ثابت
تاورکریں ۳	۱۵۱۷	۲۸۹۷	۳۱۸۶	۱۵	۶۰۹۸	۱۶۰۹۸
تاورکریں ۴	۱۶۰۸	۳۰۷۱	۳۳۷۷	۱۶	۶۴۶۴	۱۶۴۶۴
تاورکریں ۶	۱۴۱۷	۲۷۰۶	۲۹۷۶	۱۴	۵۶۹۶	۱۵۶۹۶
تاورکریں ۷	۶۸۳	۱۳۰۵	۱۴۳۴	۷	۲۷۴۵	۱۲۷۴۵
تاورکریں ۸	۱۲۰۰	۲۲۹۲	۲۵۲۰	۱۲	۴۸۲۴	۱۴۸۲۴
مجموع	۶۴۲۵	۱۲۲۷۱	۱۳۴۹۳	۶۴	۲۵۸۲۷	۷۵۸۲۷



شکل ۶. نمودار همگرایی مدل پیشنهادی برای نمونه مطالعاتی.

Fig. 6. Convergence diagram of the proposed model for the case study.

مدت زمان حل یک مدل ریاضی خصوصا در مسائل واقعی که معمولا بعد بالایی دارند حائز اهمیت است. در این مقاله مسئله چیدمان تاورکریں‌ها با هدف کاهش مدت زمان حل به صورت خطی با متغیرهای عدد صحیح و باینری مدل‌سازی شده است. در شکل ۶ نمودار همگرایی مدل پیشنهادی برای نمونه مطالعاتی مشخص شده است. شکل ۶ نشان می‌دهد مدل پیشنهادی در مدت زمان کوتاه ۵ ثانیه چیدمان بهینه را برای نمونه مطالعاتی تعیین می‌کند. معمولا به دلیل شرایط غیرقطعی در موقعیت‌های واقعی نیاز به بررسی سناریوهای متعدد است. از این رو این مدل بایچیدگی محاسباتی پایین می‌تواند به تصمیم‌گیری بهینه کمک کند.

در چیدمان بهینه (شکل ۵) چند مورد همپوشانی ملاحظه می‌شود. هر دو تاورکریں در نقطه تقاضا ۷ اقدام به تخلیه مصالح می‌کنند. علاوه بر این تخلیه تاورکریں مستقر در مکان تقاضا ۷ می‌تواند مسیر حرکت تاورکریں نصب شده در مکان ۴ (از نقطه عرضه ۴ به نقطه تقاضا ۴) را به صورت موقت مسدود کند. بنابراین برای کاهش همپوشانی باید ارتفاع تاورکریں‌های نصب شده به صورت بهینه تنظیم شود. مدل *ILP* پیشنهادی رتبه ارتفاع تاورکریں نصب شده در مکان ۴ را برابر با ۱ و رتبه ارتفاع تاورکریں نصب شده در مکان ۸ را برابر با ۲ تعیین می‌کند. بر این اساس ارتفاع تاورکریں نصب شده در مکان ۴ باید کمتر از ارتفاع تاورکریں نصب شده در مکان ۸ انتخاب شود. با این تنظیم ارتفاع در مجموع حداکثر ۱۵۰۰ فعالیت همپوشان در طول کل پروژه ممکن است به وجود بیاید. علاوه بر این هیچ مسیری به صورت دائمی

مدت زمان حل یک مدل ریاضی خصوصا در مسائل واقعی که معمولا بعد بالایی دارند حائز اهمیت است. در این مقاله مسئله چیدمان تاورکریں‌ها با هدف کاهش مدت زمان حل به صورت خطی با متغیرهای عدد صحیح و باینری مدل‌سازی شده است. در شکل ۶ نمودار همگرایی مدل پیشنهادی برای نمونه مطالعاتی مشخص شده است. شکل ۶ نشان می‌دهد مدل پیشنهادی در مدت زمان کوتاه ۵ ثانیه چیدمان بهینه را برای نمونه مطالعاتی تعیین می‌کند. معمولا به دلیل شرایط غیرقطعی در موقعیت‌های واقعی نیاز به بررسی سناریوهای متعدد است. از این رو این مدل بایچیدگی محاسباتی پایین می‌تواند به تصمیم‌گیری بهینه کمک کند.

در چیدمان بهینه (شکل ۵) چند مورد همپوشانی ملاحظه می‌شود. هر دو تاورکریں در نقطه تقاضا ۷ اقدام به تخلیه مصالح می‌کنند. علاوه بر این تخلیه تاورکریں مستقر در مکان تقاضا ۷ می‌تواند مسیر حرکت تاورکریں نصب شده در مکان ۴ (از نقطه عرضه ۴ به نقطه تقاضا ۴) را به صورت موقت مسدود کند. بنابراین برای کاهش همپوشانی باید ارتفاع تاورکریں‌های نصب شده به صورت بهینه تنظیم شود. مدل *ILP* پیشنهادی رتبه ارتفاع تاورکریں نصب شده در مکان ۴ را برابر با ۱ و رتبه ارتفاع تاورکریں نصب شده در مکان ۸ را برابر با ۲ تعیین می‌کند. بر این اساس ارتفاع تاورکریں نصب شده در مکان ۴ باید کمتر از ارتفاع تاورکریں نصب شده در مکان ۸ انتخاب شود. با این تنظیم ارتفاع در مجموع حداکثر ۱۵۰۰ فعالیت همپوشان در طول کل پروژه ممکن است به وجود بیاید. علاوه بر این هیچ مسیری به صورت دائمی

جدول ۷. بررسی اهمیت تنظیم ارتفاع تاورکرینها به صورت بهینه.

Table 7. Evaluation of the importance of optimal tower crane height adjustment.

رتبه ارتفاع تاورکریین ۴	رتبه ارتفاع تاورکریین ۸	تعداد فعالیت‌های همپوشان	درصد افزایش
رتبه ۱	رتبه ۲	۱۵۰۰	-
رتبه ۲	رتبه ۱	۲۱۲۵	۴۱٫۷

معمولاً برای تکمیل فرآیند ساخت‌وساز یک مهلت از پیش تعیین شده وجود دارد. مدل پیشنهادی تکمیل پروژه را پیش از مهلت تعیین شده تضمین می‌کند. نتایج نشان می‌دهد عدم در نظر گرفتن سقف زمانی برای تکمیل پروژه می‌تواند مدت زمان ساخت‌وساز را به طور چشمگیری افزایش دهد (۸۲ درصد برای نمونه مطالعاتی). تکمیل به موقع پروژه در اغلب مدل‌های ریاضی پیشین در نظر گرفته نشده است. این موضوع می‌تواند نتایج بدست آمده از روش‌های قبلی را در یک موقعیت واقعی دچار مشکل کند.

هدف مدل پیشنهادی کاهش هزینه‌های عملیاتی تاورکرینها از قبیل هزینه فعالیت تاورکرینها، هزینه‌های ثابت تاورکریین (مانند هزینه نصب و راه‌اندازی تاورکریین، هزینه انتقال تاورکریین به محل ساخت‌وساز و هزینه اجاره اولیه تاورکریین) هزینه‌های متغیر تاورکریین (مانند هزینه اجاره و نگهداری از تاورکریین) و دستمزد نیروی انسانی است. مدل پیشنهادی تلاش می‌کند از طریق تعیین بهینه تعداد و مکان تاورکریین‌ها و همچنین کاهش مدت زمان فعالیت تاورکریین‌ها هزینه‌های ذکر شده را کاهش دهد. نتایج بررسی‌های این مقاله نشان می‌دهد نادیده گرفتن هزینه‌های ثابت می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های پروژه شود.

به طور کلی تعیین تعداد و مکان بهینه تاورکریین‌ها، توجه به انواع مصالح ساختمانی، توجه به ظرفیت و شعاع حرکت تاورکریین‌ها، توجه به ظرفیت نقاط عرضه در تامین مصالح، در نظر گرفتن انواع هزینه‌های تاثیرگذار و رفع درخواست مصالح پیش از مهلت تعیین شده را می‌توان از جمله ویژگی‌های مثبت و برجسته مدل پیشنهادی ذکر کرد. همچنین با توجه به خطی بودن قیدها و عدد صحیح بودن متغیرهای مدل پیشنهادی مدت زمان حل آن کوتاه است (برای نمونه مطالعاتی ۵ ثانیه). با این حال به دلیل پیچیدگی مسئله، مدل پیشنهادی مانند سایر مدل‌های ریاضی پیشین محدودیت‌ها و کاستی‌هایی نیز دارد که در پژوهش‌های آتی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در این مقاله فرض می‌شود که فقط یک نوع تاورکریین در دسترس است. این

توسط پایه تاورکریین مجاور مسدود نشده است. بنابراین این جواب از نظر ایمنی می‌تواند مورد قبول واقع شود.

جدول ۷ اهمیت تنظیم ارتفاع بهینه توسط مدل *ILP* پیشنهادی را به صورت بهتری مشخص می‌کند. جدول ۷ تعداد فعالیت‌های همپوشان را در حالت بهینه با حالت غیر بهینه مقایسه می‌کند. در حالت غیر بهینه ارتفاع تاورکریین‌ها برعکس حالت بهینه در نظر گرفته شده است.

جدول ۷ نشان می‌دهد که اگر ارتفاع تاورکریین‌ها به صورت بهینه

تنظیم نشود، تعداد فعالیت‌های همپوشان ۴۱٫۷ درصد افزایش پیدا می‌کند. بنابراین استفاده از مدل *ILP* پیشنهادی برای تنظیم بهینه ارتفاع تاورکریین‌ها حائز اهمیت است.

به طور خلاصه نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند در مدت زمان کوتاهی تعداد و مکان تاورکریین‌ها را تعیین کند. علاوه بر این تنظیم ارتفاع بهینه تاورکریین‌ها به طور موثری فعالیت‌های همپوشان را توانست کاهش دهد. بنابراین روش پیشنهادی در نمونه‌هایی با ابعاد بالا می‌تواند کارا و موثر باقی بماند. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن هزینه‌های تاورکریین و همچنین توجه به محدودیت زمانی در رفع تقاضای مصالح اهمیت زیادی در تعیین چیدمان بهینه تاورکریین‌ها دارند.

۵- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل عدد صحیح خطی برای مسئله چیدمان تاورکریین‌ها در محیط ساخت‌وساز ارائه شده است. مدل پیشنهادی تعداد و مکان تاورکریین‌های مورد نیاز محیط ساخت‌وساز را به صورت بهینه مشخص می‌کند. در چیدمان بهینه به ظرفیت و شعاع محدود تاورکریین‌ها توجه شده است. همچنین در مدل پیشنهادی نیاز به انواع مصالح ساختمانی و محدودیت در تامین مصالح توسط هر یک از نقاط عرضه در نظر گرفته شده است.

transportation time in high-rise building construction, *Automation in Construction*, 30 (2013) 176–188.

- [7] M. Jawaheri, M. Ahmadnia, M. Maghrebi, R. Ghanbari, How many lifts does a construction site need? A global optimization approach, *Engineering, Construction and Architectural Management* (2025).
- [8] M. Ahmadnia, R. Ghanbari, M. Maghrebi, Optimized multi-tower crane layout planning: determine height, location and type to improve operational safety, *Engineering, Construction and Architectural Management* (2025).
- [9] J. Irizarry, E.P. Karan, Optimizing location of tower cranes on construction sites through GIS and BIM integration, *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, 17 (2012) 351–366.
- [10] H. Safouhi, M. Mouattamid, U. Hermann, A. Hendi, An algorithm for the calculation of feasible mobile crane position areas, *Automation in Construction*, 20 (2011) 282–292.
- [11] Y. Ji, F. Leite, Optimized planning approach for multiple tower cranes and material supply points using mixed-integer programming, *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(1) (2020) 04019091.
- [12] Z.S. Moussavi Nadoushani, A.W.A. Hammad, A. Akbarnezhad, Location optimization of tower crane and allocation of material supply points in a construction site considering operating and rental costs, *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(3) (2017) 04016120.
- [13] A. Tork, A real-time crane service scheduling decision support system (CSS-DSS) for construction tower crane, Ph.D. Thesis, College of Engineering and Computer Science, University of Central Florida, 2013.
- [14] K. Riga, K. Jahr, C. Thielen, A. Borrmann, Mixed integer programming for dynamic tower crane and storage area optimization on construction sites, *Automation in Construction*, 113 (2020) 103259.
- [15] K.T. Yeo, J.H. Ning, Managing uncertainty in major equipment procurement in engineering projects,

در حالی است که تاورکرینها از نظر سرعت حرکات و هزینه‌های عملیاتی با یکدیگر متفاوت هستند. تعیین مکان نقاط عرضه و همچنین تعیین نوع و مقدار مصالح قابل تامین توسط هریک از این نقاط در فرآیند بهینه‌سازی می‌تواند نتایج مدل پیشنهادی را قابل اطمینان تر کند. فعالیت همزمان چند تاورکرینها در محیط ساخت‌وساز ممکن است خطرات برخورد تاورکرینها با یکدیگر را افزایش دهد. توجه به این موضوع در پژوهش‌های آتی می‌تواند مخاطرات ایمنی را کاهش دهد. همچنین در مدل پیشنهادی هزینه ثابت تاورکرینها مستقل از مکان نصب در نظر گرفته شده است. در واقعیت ممکن است هزینه نصب تاورکرینها در مکان‌های کاندید با یکدیگر متفاوت باشد. علاوه بر این از نظر ایمنی نیز نقاط کاندید نصب تاورکرینها می‌تواند به دلایلی مانند نزدیک بودن به اجسام مرتفع یا ظرفیت تحمل خاک با یکدیگر متفاوت باشد. برخی از پیشنهادات مطرح شده در مورد بهبود مدل پیشنهادی هم اکنون مورد توجه نویسندگان این مقاله قرار گرفته است.

منابع

- [1] Y. Shin, H. Cho, K.I. Kang, Simulation model incorporating genetic algorithms for optimal temporary hoist planning in high-rise building construction, *Automation in Construction*, 20 (2011).
- [2] S. Hu, Y. Fang, Y. Bai, Automation and optimization in crane lift planning: A critical review, *Advanced Engineering Informatics*, 49 (2021) 101346.
- [3] C. Huang, W. Li, W. Lu, F. Xue, M. Liu, Z. Liu, Optimization of multiple-crane service schedules in overlapping areas through consideration of transportation efficiency and operational safety, *Automation in Construction*, 127 (2021) 103716.
- [4] M. Al-Hussein, M.A. Niaz, H. Yu, H. Kim, Integrating 3D visualization and simulation for tower crane operations on construction sites, *Automation in Construction*, 15 (2006) 554–562.
- [5] T. Kim, H. Lim, S.W. Kim, H. Cho, K.I. Kang, Inclined construction hoist for efficient resource transportation in irregularly shaped tall buildings, *Automation in Construction*, 63 (2016) 84–95.
- [6] M. Park, S. Ha, H.S. Lee, Y.K. Choi, H. Kim, S. Han, Lifting demand-based zoning for minimizing worker vertical

- rise building site by mixed-integer linear programming, *Automation in Construction*, 20 (2011) 571–580.
- [25] L.C. Lien, M.Y. Cheng, Particle bee algorithm for tower crane layout with material quantity supply and demand optimization, *Automation in Construction*, 45 (2014) 182–192.
- [26] J. Wang, et al., A BIM-based approach for automated tower crane layout planning, *Automation in Construction*, 59 (2015) 168–178.
- [27] K. Wu, B. García de Soto, F. Zhang, Spatio-temporal planning for tower cranes in construction projects with simulated annealing, *Automation in Construction*, 110 (2020) 103060.
- [28] J.K.W. Yeoh, D.K.H. Chua, Optimizing crane selection and location for multistage construction using a four-dimensional set cover approach, *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(8) (2017) 04017037.
- [29] C. Huang, C.K. Wong, Optimization of crane setup location and servicing schedule for urgent material requests with non-homogeneous and non-fixed material supply, *Automation in Construction*, 85 (2018) 187–200.
- [30] M. Dienstknecht, A branch and bound approach for the tower crane selection and positioning problem with respect to mutual interference, *4OR*, 20 (2022) 345–368.
- [31] R. Amiri, J.M.S., V.M.K., Determining the optimal capacity and location of the tower crane and material supply point in construction sites using genetic algorithm, *Journal of Analysis of Structures and Earthquake Engineering*, 19(2) (2022) 48.
- [32] Y. Ding, The law of cosines for an n-dimensional simplex, *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 39 (2008) 109–117.
- European Journal of Operational Research, 171 (2006) 123–134.
- [16] A. Jalali Yazdi, M. Maghrebi, J. Bolouri Bazaz, Mathematical model to optimally solve the lift planning problem in high-rise construction projects, *Automation in Construction*, 91 (2018) 33–45.
- [17] A.J. Jalali Yazdi, M. Maghrebi, Optimizing the lift process in high-rise construction projects, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(2) (2020) 383–396.
- [18] P. Zhang, F.C. Harris, P.O. Olomolaiye, A computer-based model for optimizing the location of a single tower crane, *Building Research and Information*, 24(4) (1996) 230–237.
- [19] P. Zhang, F.C. Harris, P.O. Olomolaiye, G.D. Holt, Location optimization for a group of tower cranes, *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(2) (1999) 115–122.
- [20] K. Philip, M. Manoj, N. Mahadevan, Optimization of construction site layout: A genetic algorithm approach, *Proceedings of Computing in Civil Engineering*, (1997) 710–717.
- [21] H. Li, P.E.D. Love, Site-level facilities layout using genetic algorithms, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 12(4) (1998) 227–231.
- [22] C.M. Tam, T.K.L. Tong, W.K.W. Chan, Genetic algorithm for optimizing supply locations around tower crane, *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(4) (2001) 315–321.
- [23] C.M. Tam, T.K.L. Tong, GA-ANN model for optimizing the locations of tower crane and supply points for high-rise public housing construction, *Construction Management and Economics*, 21 (2003) 257–266.
- [24] C. Huang, C.K. Wong, C.M. Tam, Optimization of tower crane and material supply locations in a high-

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Ahmadnia¹, R. Ghanbari, M. Maghrebi, *Optimal Tower Crane Layout in Construction Sites to Reduce Operational Costs and Ensure On-Time Project Completion Considering Crane Capacity and Supply Point Constraints*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(11) (2026) 1897-1920.

DOI: [10.22060/ceej.2026.22470.7980](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.22470.7980)

