تعیین تعداد و مکان بهینه بالابرهای ساختمانی در پروژه‌های ساختمانی با استفاده از یک مدل ریاضی عدد صحیح خطی

محدثه جواهری[۱]، مهدی احمدنیا [۲]، مجتبی مغربی [۳]، رضا قنبری [۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی دکتری ریاضی کاربردی، دانشکده ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- دانشیار، دانشکده ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- mohadese.jawaheri@mail.um.ac.ir

۲- ahmadnia.mahdi@mail.um.ac.ir

۳- mojtabamaghrebi@um.ac.ir

۴- rghanbari@um.ac.ir

چکیده:

با افزایش بلندمرتبه‌سازی در پروژه‌های ساختمانی، استفاده از بالابرها برای جابجایی عمودی مصالح و نیروی انسانی اهمیت بیشتری یافته است. پژوهش‌های زیادی در زمینه کاهش زمان سفر بالابرها در طبقات، طراحی بهینه سیستم‌های بالابری، بهینه‌سازی مسیر حرکت بالابر و تعیین ترتیب سفر به طبقات، مدیریت مصرف انرژی آسانسورها و نحوه زون‌بندی طبقات انجام شده است. اما، تاکنون بهینه‌سازی محل نصب و تعداد بالابرها مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله یک مدل عدد صحیح خطی برای تعیین بهینه تعداد و مکان نصب بالابرها پیشنهاد شده است. تعیین تعداد و مکان نصب بالابرها با در نظر گرفتن هزینه‌های نصب، اجاره و عملیات بالابرها صورت گرفته است. تعداد بالابرهای مورد استفاده می‌تواند بر روی تعداد روزهای کاری پروژه تأثیر بگذارد و در نتیجه تعداد روزهای کاری و تعداد بالابر بصورت همزمان بهینه‌سازی می‌شود. مدل پیشنهادی با استفاده از یک پروژه مسکونی ۲۰ طبقه آزمایش شده است و نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این مدل می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌ها و تعداد روزهای کاری پروژه شود.

واژگان کلیدی:

بالابر ساختمانی، ساخت و ساز، بهینه‌سازی، مدل‌سازی، مکان‌یابی.

* مجتبی مغربی، دانشیار دانشکده مهندسی عمران- دانشگاه فردوسی مشهد.

ایمیل: mojtabamaghrebi@um.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Determining the location and optimal number of building lifts in high-rise construction projects using a linear integer mathematical model

M. Jawaheri [۱], M. Ahmadnia [۲], M. Maghrebi [۳], R. Ghanbari [۴]

۱- Master Student. Faculty of Civil Engineering of Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

۲- Ph.D Student of Applied Mathematics of Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

۳- Associate Prof., Faculty of Civil Engineering of Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

۴- Associate Prof., Faculty of Mathematics of Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

Abstract:

Vertical transportation technology is essential for constructing tall and medium-rise buildings. Although lifts are a functional component of buildings, their vital nature depends on the continuous and uninterrupted use of lifts in each tall building. Therefore, the use of lifts for vertical transportation of materials and human resources has gained greater importance. Extensive research has been conducted on reducing lift travel time between floors, optimizing lift systems design, optimizing lift movement paths and determining the sequence of floor travel, managing lift energy consumption, and floor zoning. However, the optimization of lift installation locations and quantities has not been examined so far. The use of lifts in construction projects incurs multiple costs, including rental or purchase costs, energy consumption during vertical transportation of materials, and operator salaries. One of the main solutions to reduce these costs is to minimize the duration of lift usage, which, by delivering the required materials on time, can also reduce the project's execution time. The installation costs of lifts may also vary at different candidate points due to factors such as weight and dimensional capacity, electricity consumption, the number of visits for monthly or annual maintenance and repair, and lift operator salaries. Additionally, some candidate points may have advantages over other points in terms of the amount of horizontal movement of materials in building floors. These distinctive features present challenges in selecting the optimal installation point. In this article, an integer linear programming model has been proposed to determine the optimal number and location of lift installations. The number of lifts used can affect the number of project working days, and as a result, the optimization is performed simultaneously for the number of working days and the number of lifts. The goal of this optimization model is to minimize the duration of lift usage and the associated costs. Additionally, using this model, the number of project working days is obtained with a balanced distribution of lift activities. To evaluate the effectiveness of the proposed model, it was tested on a case study. The case study involved a ۲۰-story building located in the city of Mashhad, which requires determining the number and location of lifts during the workshop preparation phase. The use of this model can lead to cost reduction and a decrease in the number of project working days.

Keywords: Construction lift, High-rise construction, Optimization, Linear programming, Positioning.

۱ ـ مقدمه

امروزه مشکلاتی از قبیل افزایش جمعیت و کمبود زمین سبب افزایش قیمت زمین در اکثر کلان‌شهرها و بدنبال آن رشد مرتفع‌سازی شده است[۱]. در نتیجه استفاده از بالابرها و جرثقیل‌ها برای جابجایی مصالح و نیروی انسانی در پروژه‌های بلندمرتبه گسترش یافته است. اگرچه بالابرها یکی از واحدهای عملکردی ساختمان‌ها می‌باشند، اما ماهیت حیاتی عملکرد آن، هر ساختمان بلند را به استفاده مداوم و بدون اختلال بالابری وابسته می‌کند[۲].

بالابرها یکی از تجهیزات اساسی برای جابجایی عمودی کارگران و مصالح ساختمانی هستند که بنابر تعداد، محل نصب و برنامه کاری خود بر پیشرفت کلی پروژه تاثیرگذار هستند. استفاده از بالابرها در حمل عمودی مصالح ساختمانی و نیروی انسانی مزایای قابل توجهی دارد. این تجهیزات باعث کاهش زمان لازم برای حمل مصالح می‌شوند و تأثیر زیادی در تسریع پیشرفت پروژه و کاهش هزینه‌های عملیاتی دارند[۳]. استفاده همزمان از چند بالابر برای حمل مصالح در ساختمان‌های بلند می‌تواند راهکار مناسبی برای تحویل به موقع مصالح باشد. با این حال، نصب تعداد زیادی بالابر به دلیل محدودیت فضا، مسائل ایمنی و هزینه‌های بالای اجاره، نگهداری و تعمیر آن‌ها به‌صرفه نیست[۴]. بنابراین، تعیین تعداد بهینه بالابرها اهمیت زیادی داشته و می‌تواند به کاهش مدت زمان اجرا و هزینه‌های عملیاتی کمک کند.

استفاده از بالابرها در پروژه‌های ساختمانی هزینه‌های متعددی از جمله هزینه اجاره یا خرید ، مصرف انرژی حین جابجایی عمودی مواد و مصالح و دستمزد اپراتور را به همراه دارد. یکی از راهکارهای اصلی برای کاهش هزینه‌های مذکور، کاهش مدت زمان استفاده از بالابرها است که همزمان با تحویل به موقع مصالح موردنیاز می‌تواند زمان اجرایی پروژه را نیز کاهش دهد[۵]. مدت زمان استفاده از بالابرها به میزان مصالح مورد نیاز در نقاط مختلف و تعداد جابجایی‌های بالابر بین طبقات ساختمان بستگی دارد[۲]. همچنین، ظرفیت باربری بالابرها و ابعاد محل نصب نیز بر این موضوع تأثیرگذار است[۱]. انتخاب مکان مناسب برای نصب بالابرها می‌تواند به کاهش مدت زمان استفاده از بالابرها و در نتیجه هزینه‌های عملیاتی پروژه کمک کند.

معمولاً برای انتخاب مکان مناسب برای نصب بالابرها ابتدا نقاطی را بر اساس عوامل مختلفی مانند نکات ایمنی و محدودیت‌های فضای ساخت و ساز، به عنوان نقاط کاندید تعیین می‌کنند. همانطور که قبلاً بیان شد، ظرفیت بالابرها برای نصب در هر یک از این نقاط ممکن است به دلیل شرایط محیطی و محدودیت‌های ابعادی فضای در دسترس متفاوت باشد. به عنوان مثال اگر ترجیح بر نصب بالابر در فضای چاله آسانسور باشد، ابعاد کابین بایستی متناسب با این فضا تعیین گردد. هزینه نصب بالابرها نیز ممکن است به دلایلی مانند ظرفیت وزنی و ابعاد، میزان مصرف برق، تعداد دوره‌های بازدید برای تعمیر و نگهداری ماهانه یا سالانه و دستمزد اپراتور بالابر، در هر یک از نقاط کاندید متفاوت باشد. همچنین، برخی از نقاط کاندید ممکن است نسبت به دیگر نقاط به لحاظ مقدار جابجایی افقی مصالح در طبقات ساختمانی برتری داشته باشند. این ویژگی‌های متمایز، انتخاب نقطه نصب بهینه را با چالش روبه‌رو می‌کند.

تاکنون پژوهشگران برای مکانیابی بالابرهای ساختمانی از مدل‌های ریاضی بهره نگرفته‌اند. استفاده از مدل‌های ریاضی می‌تواند کارایی بالابرها را به حداکثر برساند. از این رو این مقاله با ارائه یک مدل عدد صحیح خطی تلاش می‌کند چیدمان بهینه‌ای برای بالابرهای ساختمانی با هدف کاهش هزینه‌های پروژه و مدت زمان ساخت و ساز و همچنین افزایش ایمنی پروژه تعیین کند. در روش پیشنهادی، ابتدا نقاطی برای نصب بالابرها به عنوان نقاط کاندید مشخص می‌شوند. سپس مدل پیشنهادی تعداد بالابرهای موردنیاز برای پروژه و مکان نصب آن‌ها را به صورت بهینه تعیین می‌کند. ظرفیت بالابرها در جابجایی مصالح، رفع تمامی مصالح مورد نیاز هر یک از طبقات، مدت زمان جابجایی افقی مصالح توسط کارگران، هزینه و مدت زمان جابجایی عمودی مصالح توسط بالابرها، هزینه نصب و اجاره بالابرها و ایمنی نقاط کاندید در تعیین چیدمان بهینه بالابرها مورد توجه قرار گرفته است. مدل پیشنهادی تلاش می‌کند از طریق تعیین تعداد بهینه بالابرها و همچنین توزیع متوازن فعالیت‌ها بین بالابرهای موجود در سایت، تعداد روزهای کاری پروژه را در صورت اقتصادی بودن کاهش دهد. جهت بررسی میزان اثربخشی مدل پیشنهادی، این مدل بر روی یک نمونه موردی آزمایش شد. نمونه موردی یک ساختمان ۲۰ طبقه واقع در شهر مشهد است که در مرحله تجهیز کارگاه نیازمند تعیین تعداد و محل نصب بالابرهای مورد نیاز است.

۲- تاریخچه تحقیقات

مکان‌یابی بالابرها را می‌توان یک زیر مسئله از طراحی چیدمان محیط ساخت و ساز[1] در نظر گرفت. چیدمان بهینه تجهیزات ساختمانی مانند بالابرها و جرثقیل‌های ساختمانی بر روی بهره‌وری، ایمنی و کارایی این تجهیزات موثر است [۶ ۷ ۸ ۹]. از این رو پژوهشگران تلاش کردند با استفاده از شبیه‌سازی و ابزارهای بهینه‌سازی چیدمان مناسبی را برای محیط ساخت و ساز طراحی کنند. تاکنون روش‌های مختلفی برای مکان‌یابی جرثقیل‌های ساختمانی انجام شده است. اما در مقابل چیدمان بهینه بالابرهای ساختمانی با استفاده از مدل‌های ریاضی مورد توجه قرار نگرفته است. به همین دلیل در ادامه پژوهش‌های مرتبط با چیدمان بهینه جرثقیل‌های ساختمانی به اختصار توضیح داده می‌شوند.

شبیه‌سازی با استفاده از رایانه امکان تجسم سازه‌های دائمی و تاسیسات موقت در محیط ساخت و ساز و ارتباط بین آن‌ها را به خوبی می‌تواند فراهم کند [۱۰]. از این طریق بسیاری از مخاطرات ایمنی مانند برخورد جرثقیل‌ها با یکدیگر و دیگر تجهیزات ساختمانی قبل از اجرای پروژه قابل شناسایی و رفع کردن است [۱۱ ۱۲ ۱۳]. مدل مبتنی بر شی [۱۴]، ادغام قابلیت‌های گرافیکی رایانه با الگوریتم ژنتیک [۱۵]، استفاده از مدل ۴ بعدی (دارای بعد زمان)[۱۶]، استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیا برای چیدمان تاسیسات موقت ساختمانی [۱۷ ۱۸] و جرثقیل‌ها و دستگاه‌های ساخت بتن [۱۹]، استفاده از مدل اطلاعات ساختمان برای تجزیه و تحلیل زمین – فضایی [۲۰]، شبیه‌سازی رفتار همه عناصر موجود در محیط [۲۱]، بهبود نظارت بصری مدیریت زنجیره تامین مصالح [۲۲] و همچنین شبیه سازی دید اپراتور جرثقیل‌های ساختمانی از طریق ادغام مدل اطلاعات ساختمان و سیستم اطلاعات جغرافیا [۱۱] از جمله تلاش‌هایی است که پژوهشگران برای چیدمان جرثقیل‌های ساختمانی انجام داده‌اند.

استفاده از ابزارهای بهینه‌سازی در چیدمان جرثقیل‌های ساختمانی نیز علاوه بر شبیه‌سازی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. ارائه مدل‌های ریاضی مختلف [۲۳ ۲۴ ۲۵ ۲۶ ۲۷ ۲۸]، استفاده از شبکه‌های عصبی [۲۹]، استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک [۳۰ ۳۱ ۳۲]، الگوریتم ذرات زنبور عسل [۳۳] و الگوریتم بازپخت شبیه سازی شده [۳۴]، استفاده از رویکرد شاخه و کران [۳۵] و ادغام مدل اطلاعات ساختمان با دانش مهندسی [۳۶] و ابزارهای بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک [۱۲] و الگوریتم کرم شب‌تاب [۳۷] از جمله این پژوهش‌ها به شمار می‌آید.

به عنوان یکی از نخستین تلاش‌ها پ، ژانگ و همکاران [۹] یک مدل خطی عدد صحیح مختلط برای بهینه‌سازی مکان فقط یک جرثقیل در محیط ساخت و ساز پیشنهاد کردند. آن‌ها در یک پژوهش دیگر توانستد مکان‌یابی همزمان چند جرثقیل در محیط ساخت و ساز را نیز به مدل ریاضی خود اضافه کنند[۲۵]. هوانگ و همکاران [۱۳] با توسعه مدل ریاضی ژانگ و همکاران توانستند حدود ۷ درصد در زمان اجرای عملیات جرثقیل صرفه‌جویی بیشتری در مقایسه با مدل ژانگ و همکاران انجام دهند. با این حال در این روش‌ها ظرفیت جرثقیل‌ها نادیده گرفته شده بود. بنابراین موسوی و همکاران [۱۱] با توسعه مدل هوانگ و همکاران [۱۳] ظرفیت جرثقیل‌ها را به مدل ریاضی خود اضافه کردند. آن‌ها نشان دادند عدم توجه به ظرفیت جرثقیل‌ها می‌تواند هزینه‌های پروژه را افزایش دهد. فرض محدودیت ظرفیت جرثقیل‌ها توسط هوانگ و ونگ [۲۵] نیز مورد توجه قرار گرفت. آن‌ها همچنین در مدل ریاضی پیشنهادی به تقاضاهای اولویت‌دار در تحویل مصالح توجه کردند.

یهو و چو [۲۹] نشان دادند که نادیده گرفتن تاثیر مراحل مختلف ساخت‌وساز منجر به افزایش هزینه‌های استقرار جرثقیل می‌شود. از این رو آن‌ها در مدل ریاضی خود مراحل مختلف ساخت و ساز و نیاز به نصب و برچیدن جرثقیل‌ها در طی مدت ساخت را در نظر گرفتند. تعیین تعداد و نوع جرثقیل مورد نیاز پروژه در فرآیند بهینه‌سازی از جمله نقاط قوت روش یهو و چو محسوب می‌شوند. آن‌ها با بررسی یک نمونه واقعی مربوط به ساختمان یک دانشگاه نشان دادند که استفاده از مدل پیشنهادی آن‌ها منجر به کاهش ۱۸.۷ درصدی هزینه‌ها می‌شود.

جی و لیتی [۱۰] با ارائه یک مدل ریاضی تلاش کردند از طریق کاهش فعالیت جرثقیل‌ها در مناطق همپوشانی، مخاطرات ایمنی جرثقیل‌ها را کاهش دهند. در یک پژوهش دیگر ریگا و همکاران [۱۵] با درنظر گرفتن فاصله ایمن بین جرثقیل‌های همپوشان تلاش کردند تا ایمنی پروژه را افزایش دهند. وو و همکاران [۳۲] و دینسنکت [۱۶]

[1] - Construction site layout planning.

ضمن توجه به فاصله ایمن تلاش کردند از طریق تنظیم ارتفاع جرثقیل‌ها توقفات و مخاطرات احتمالی ناشی از برخورد جرثقیل‌ها با یکدیگر را کاهش دهند.

علاوه بر جرثقیل‌های ساختمانی، بالابرها نیز در چیدمان محیط ساخت و ساز تاثیرگذار هستند. اگرچه پژوهشی در مورد مکان‌یابی بهینه بالابرهای ساختمانی تاکنون انجام نشده است اما به منظور تبیین بهتر موضوع در ادامه پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه مدیریت و بهینه‌سازی بالابرهای ساختمانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پژوهش‌ها عموما در موضوعات زیر هستند:

۱. شبیه‌سازی فرآیندهای بالابری
۲. زمان‌بندی فعالیت‌های بالابر
۳. زون‌بندی طبقات مورد سرویس بالابر
۴. کنترل گروهی آسانسورها

۲ ـ ۱ ـ شبیه‌سازی فرآیندهای بالابری

شین و همکاران [۳۸] به منظور بدست آوردن الگوی عملیاتی بالابر، اطلاعات تاریخچه عملیاتی را از طریق حسگر متصل به آسانسور و با وسیله‌ای به نام سیستم اطلاعات آسانسور جاسازی شده[۱] ذخیره کردند. لذا برنامه کاری بالابر برای روز بعد بر اساس الگوهای عملیاتی آن در چهار روز اخیر بدست آمده و زون‌بندی عمودی بهینه بالابر بوسیله آن مشخص می‌شود. جونگ و همکاران [۳۹] در پژوهش خود با هدف بهینه‌سازی این سیستم به توسعه روش شبیه‌سازی مبتنی بر عامل[۲] پرداختند. در این شبیه‌سازی عوامل داخلی و خارجی موثر بر عملکرد سیستم شناسایی شده و سپس مدل‌سازی قوانین رفتاری اجزای سیستم (مانند بالابرها و کارگران) انجام می‌شود. در یک پژوهش دیگر کامله و همکاران [۴] به بررسی عملکرد بالابر و تاثیر آن بر میزان تاخیر کارگران می‌پردازد. در این کار، ابتدا یک مدل شبیه‌سازی رویداد گسسته[۳] پس از جمع‌آوری داده‌ها توسعه داده می‌شود. یافته‌ها نشان‌دهنده آن است که ترکیبی از ورودی‌های تاخیری و تقسیم مناطق برای عملیات بالابری با کاهش زمان انتظار کارگران می‌تواند باعث بهبود عملیات بالابری شود.

استفاده صحیح از فضای ذخیره‌سازی موقت در سایت‌های ساختمانی باعث افزایش سرعت حمل مواد ساختمانی و کاهش هزینه‌های حمل و نقل می‌شود. لذا هوانگ و همکاران [۱] در پژوهش خود طراحی یک برنامه صفحه‌بندی ذخیره‌سازی در طبقات تکمیل‌شده یک ساختمان چندطبقه را موردبررسی قرار دادند. در این پژوهش، حرکات افقی بین سلول‌های ذخیره‌سازی و سیستم بالابری و هم‌چنین حمل و نقل عمودی مواد در طبقات به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفتند.

۲ـ ۲ ـ زمان‌بندی فعالیت‌های بالابر

جلالی‌یزدی و همکاران [۴۰] مدلی ریاضی برای برنامه‌ریزی سفر یک سیستم بالابر تکی ارائه دادند که هدف آن به حداقل رساندن کل زمان سفر کابین آسانسور است. این موضوع باعث بهره‌وری بیشتر کارگران و پیشرفت بهتر ساخت‌وساز می‌شود. جلالی یزدی و همکاران [۴۱] در پژوهش دیگری روشی برای بهینه‌سازی عملکرد آسانسورهای ساختمانی در پروژه‌های ساختمانی چندطبقه ارائه‌کردند. این روش با تاکید بر زمان اوج صبحگاهی، سیستم آسانسور را برای برآوردن همزمان و موثر نیازهای کارگران در طبقات مختلف تنظیم می‌کند. این هدف با در نظرگرفتن ویژگی‌ها و محدودیت‌های عمومی کابین آسانسور، برنامه زمان‌بندی فعالیت‌های ساخت‌وساز، شرایط سایت و ویژگی‌های منابع محقق می‌شود. هدف این مدل به حداقل رساندن زمان کل جابجایی عمودی تا طبقات سرویس با شناسایی دینامیکی نحوه تخصیص بار بهینه به کابین آسانسور و تهیه بهترین برنامه بازدید از طبقات می‌باشد. بیمورگیا و همکاران [۴۲] در پژوهش خود به کاهش زمان انتظار مسافران در یک سیستم آسانسور چندگانه پرداخته‌اند. برای این منظور از الگوریتم‌های ژنتیک که تنظیمات مختلفی برای سازگارسازی با این مسئله دارند استفاده شد. الگوریتم ژنتیک با مدیریت تماس‌هایی که در سیستم ثبت شده‌اند، یک برنامه سفر برای آسانسور ایجاد می‌کند. این الگوریتم‌ها برای دو تنظیم مختلف ساختمان (ترافیک و تعداد طبقات) پیاده‌سازی و ارزیابی شده و نتایج نشان‌دهنده آن است که اعمال تنظیمات مناسب برای الگوریتم باعث بهبود قابل توجه در عملکرد آن می‌شود.

---

۱ - Embedded Lift Information System.

۲ - Agent-based model

۳ - discrete-event simulation.

۲ ـ ۳ ـ زون‌بندی طبقات

جونگ و همکاران [۳۹] در پژوهش خود به توسعه یک مدل ریاضی برای ارائه زون‌بندی بهینه بالابر پرداختند. برای پرداختن به این چالش آنان مفهوم زون‌بندی دینامیک را معرفی کردند که می‌تواند استفاده از تجهیزات حمل‌ونقل عمودی را بهینه کند و با در نظرگرفتن تقاضای متغیر بالابر در طول پیشرفت پروژه، زمان حمل‌ونقل کارگران را به حداقل برساند. کاربرد این مدل در یک پروژه ساختمانی نشان داد که زون‌بندی بر اساس تقاضای متغیر بالابر می‌تواند زمان حمل و نقل را تا ۴۰٪ کاهش دهد.

در مرحله طراحی یک ساختمان، تعداد آسانسورها، ظرفیت و سرعت نامی آن‌ها انتخاب می‌شود. در صورتی که ساختمان مرتفع باشد، زون‌بندی آسانسورها بسیار رایج است. روکوکوسکی و همکاران [۴۳] در پژوهش خود یک برنامه برنامه‌نویسی پویا برای یافتن راه‌حل بهینه مسئله استاتیک زون‌بندی معرفی کردند. این برنامه شرایط ترافیک اوج را در نظر می‌گیرد. جواب مسئله بهینه‌سازی، طبقات بالای ساختمان را به مناطق جداگانه و ثابت تقسیم می‌کند و برای هر منطقه، تعداد آسانسورها و همچنین اندازه و سرعت نامی آن‌ها را مشخص می‌کند

۲ ـ ۴ ـ کنترل گروهی آسانسورها

تای و همکاران [۴۴] در مطالعه خود به بهبود روش کنترل گروهی آسانسورها با استفاده از راهنمایی طبقه مقصد پرداختند. دراین روش اطلاعاتی که از ثبت تماس‌ها در سالن‌ها و انتخاب طبقه مقصد توسط مسافران بدست می‌آید، ترکیب شده و برای جلب جریان مسافر به طور موثر استفاده می‌شود. از شبکه عصبی فازی [۱] برای بهبود چندین هدف و ارائه روش منطقی توزیع استفاده می‌شود. بامونوراچی و همکاران [۲] در پژوهش خود مسئله برنامه‌ریزی گروهی آسانسورها را با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، توجه به مصرف انرژی پایین در سیستم‌های آسانسور به عنوان ویژگی مطلوب مورد توجه قرار می‌گیرد. ابتدا یک تکنیک بر اساس مدل برنامه‌ریزی سفر [۲] و الگوریتم شاخه و حد [۳] استقلالی توسعه داده شده است. سپس با اضافه کردن اندازه‌گیری مصرف انرژی به معیار بهینه‌سازی، معیار جدیدی برای ارزیابی استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده بهبود مصرف انرژی با حفظ تقریبی زمان خدمت مدل‌های قبلی است. در نتیجه این پژوهش، مصرف انرژی ۲۰٪ کاهش یافته است وزمان خدمت نیز ۱۳٪ بهبود پیدا کرده است. یوتوگوف و همکاران [۴۵] در پژوهش خود یک الگوریتم جدید به نام مدیریت آسانسورها ارائه دادند.این الگوریتم به گونه‌ای طراحی شده است که کارایی آسانسورها برای تمام افرادی که از آن‌ها استفاده می‌کنند به حداکثر برسد. برای مقایسه و درک بهتر، مسئله ارسال آسانسور در یک سیستم جداگانه با دانستن تمام برنامه‌های سفر افراد، قبل از زمان مشخص‌شده بازسازی شده است تا نشان داده شود که بهترین کارآیی قابل دستیابی چگونه است. تانگ و همکاران [۴۶] در پژوهش خود با هدف بهبود کارایی و کاهش مصرف انرژی آسانسورها به بررسی استراتژی‌های کنترل گروهی آسانسورها می‌پردازد. در این پژوهش یک روش برنامه‌ریزی بر اساس اطلاعات مسافران ارائه می‌شود که با استفاده از یک حسگر ویژه، تعداد مسافرانی که در انتظار آسانسور هستند شناسایی می‌شود. این روش می‌تواند وضعیت ترافیک سیستم کنترل گروهی آسانسورها را به صورت لحظه‌ای تشخیص دهد. علاوه بر این، دو الگوریتم برنامه‌ریزی با استفاده از تئوری کنترل فازی [۴] توسعه داده شده است که با بکارگیری یک استراتژی سوئیچ چندگانه [۵]، در زمان فراخوانی جدید، آسانسور برنامه‌ریزی شود.

مرور ادبیات نشان می‌دهد پژوهش‌های مربوط به چیدمان محیط ساخت و ساز عمدتا بر روی چیدمان جرثقیل‌ها تمرکز کرده‌اند. این درحالی است که بالابرهای ساختمانی نیز نقش مهمی در مسئله چیدمان محیط ساخت و ساز می‌توانند داشته باشند. به طور خاص، پس از دیوارچینی و اتمام مرحله سفت‌کاری دسترسی به فضاهای داخلی توسط جرثقیل بسیار محدود شده و نقش بالابر در انتقال مصالح پررنگ‌تر می‌شود. جابجایی نیروی انسانی نیز به دلایل ایمنی تنها با بالابر امکان‌پذیر است. افزون بر این نصب بالابرهای ساختمانی در مکان‌های نامناسب می‌تواند انتقال افقی مصالح توسط کارگران را دشوار کند. اگرچه پژوهش‌های مختلفی در

---

[۱] - Fuzzy Neural Network.

[۲] - trip scheduling model.

[۳] - branch and bound algorithm.

[۴] - fuzzy control theory.

[۵] - multi-strategy switch method.

مورد بالابرهای ساختمانی انجام شده است اما مرور ادبیات نشان می‌دهد مکان‌یابی بهینه بالابرهای ساختمانی در پژوهش‌های گذشته نادیده گرفته شده است. از این رو این مقاله با ارائه یک مدل عدد صحیح خطی برای چیدمان بهینه بالابرهای ساختمانی تلاش می‌کند شکاف دانشی موجود را پوشش دهد. مدل پیشنهادی ضمن تعیین مکان بهینه بالابرها، تعداد بالابرهای مورد نیاز را نیز به طور بهینه تعیین می‌کند. این موضوع از افزایش هزینه‌های کاری و یا بیکار ماندن آن‌ها جلوگیری می‌کند. همچنین مدل پیشنهادی از طریق توزیع بهینه فعالیت‌های بالابری تعداد روزهای کاری را بهینه می‌کند. مخاطرات ایمنی، جابجایی افقی مصالح توسط کارگران و محدودیت فضای محل نصب بالابر در تعیین بهینه تعداد بالابرهای مورد نیاز مورد توجه قرار گرفته است.

۳ ـ بیان مسئله

همان طور که در بخش قبلی اشاره شد، در پژوهش های گذشته تاکنون به تعیین تعداد بالابرهای بهینه مورد نیاز یک پروژه و محل نصب آن‌ها پرداخته نشده است. در مقابل چیدمان بهینه جرثقیل‌های ساختمانی تا حد زیادی بررسی شده است. مسئله چیدمان بهینه بالابرهای ساختمانی نیز تا حدودی می‌تواند شبیه به مسئله چیدمان بهینه جرثقیل‌ها باشد. از این رو ابتدا به اختصار به معرفی بالابر و جرثقیل و همچنین تفاوت بین این دو پرداخته می‌شود.

شکل ۱ جرثقیل و بالابر پروژه مطالعاتی را نمایش می‌دهد. از بالابرها برای انتقال افقی مصالح و نیروی انسانی در طبقات مختلف یک ساختمان استفاده می‌شود. جرثقیل‌ها در مقایسه با بالابرها می‌توانند مصالح را هم به صورت افقی و هم به صورت عمودی منتقل کنند. هر یک از بالابرها و جرثقیل‌ها سرعت و ظرفیت متفاوتی دارند. معمولا برای حمل مصالح سنگین تر از جرثقیل‌ها استفاده می شود.

شکل ۱ : جرثقیل و بالابر ساختمانی نصب شده در پروژه مطالعاتی

با توجه به کارایی گسترده بالابرهای ساختمانی در پروژه‌های بلندمرتبه، با تعیین تعداد بالابرها و محل نصب آنها، کارایی سیستم بالابری را بهبود می‌دهد که باعث کاهش زمان انتظار مسافران، افزایش سرعت حرکت بالابر و کاهش ترافیک بار در ساعات اوج استفاده از بالابر می‌شود. تعیین تعداد صحیح بالابر و محل نصب آن‌ها باعث افزایش ایمنی و سهولت بیشتر انتقال کارگران و مصالح به نقاط تقاضا می‌گردد. صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش هزینه های مربوط به عملکرد بالابرها از مزایای دیگر بهینه‌سازی تعداد و محل نصب بالابرها است. در این بخش یک مدل عدد صحیح خطی برای تعیین بهینه مکان و تعداد بالابرهای مورد نیاز یک پروژه ساختمانی ارائه می‌شود. مفروضات و ویژگی های مدل پیشنهادی به شرح زیر است:

۱. نوع بالابر مورد استفاده برای جابجایی عمودی مصالح و نیروی کار از پیش تعیین شده است.
۲. مکان‌های کاندید جهت نصب بالابر با توجه به شرایط محیط ساخت و ساز از پیش تعیین شده است.
۳. طبقه همکف ساختمان به عنوان مکان عرضه مصالح درنظر گرفته می‌شود.
۴. هر یک از طبقات می تواند انواع مختلفی از مصالح را نیاز داشته باشد. تمامی این نیازها بایستی به طور کامل توسط بالابرها پوشش داده شوند.
۵. بالابر در هر سفر یک نوع از مصالح را از نقطه عرضه به یک طبقه منتقل می‌کند و سپس به نقطه عرضه بازمی‌گردد.
۶. ظرفیت حمل مصالح توسط شرکت سازنده بالابر مشخص شده و در هر سفر باید رعایت شود. هم‌چنین بدلیل محدودیت‌های ابعادی، بالابرها در صورت نصب در هر یک از نقاط کاندید دارای ظرفیت‌های متفاوت و به تبع آن سرعت حرکت متفاوت هستند.
۷. زمان جابجایی بین طبقات با توجه به سرعت ثابت حرکت بالابر و ارتفاع طبقات محاسبه می‌شود.
۸. هزینه های مربوط به نصب بالابر، هزینه کاری و هزینه اجاره با توجه به ظرفیت بالابر و مکان نصب درنظر گرفته می‌شود. کاهش هزینه های ذکر شده در تعیین

مکان و تعداد بالابرهای مورد نیاز مورد توجه قرار می‌گیرد.

۹. کاهش مقدار جابجایی دستی (افقی) مصالح در هر طبقه توسط کارگران نیز در تعیین مکان و تعداد بالابرهای مورد نیاز درنظر گرفته می‌شود. مقدار جابجایی افقی برای هر نقطه کاندید بصورت میانگین و با ملاحظات تجربی و آماری بدست می‌آید.

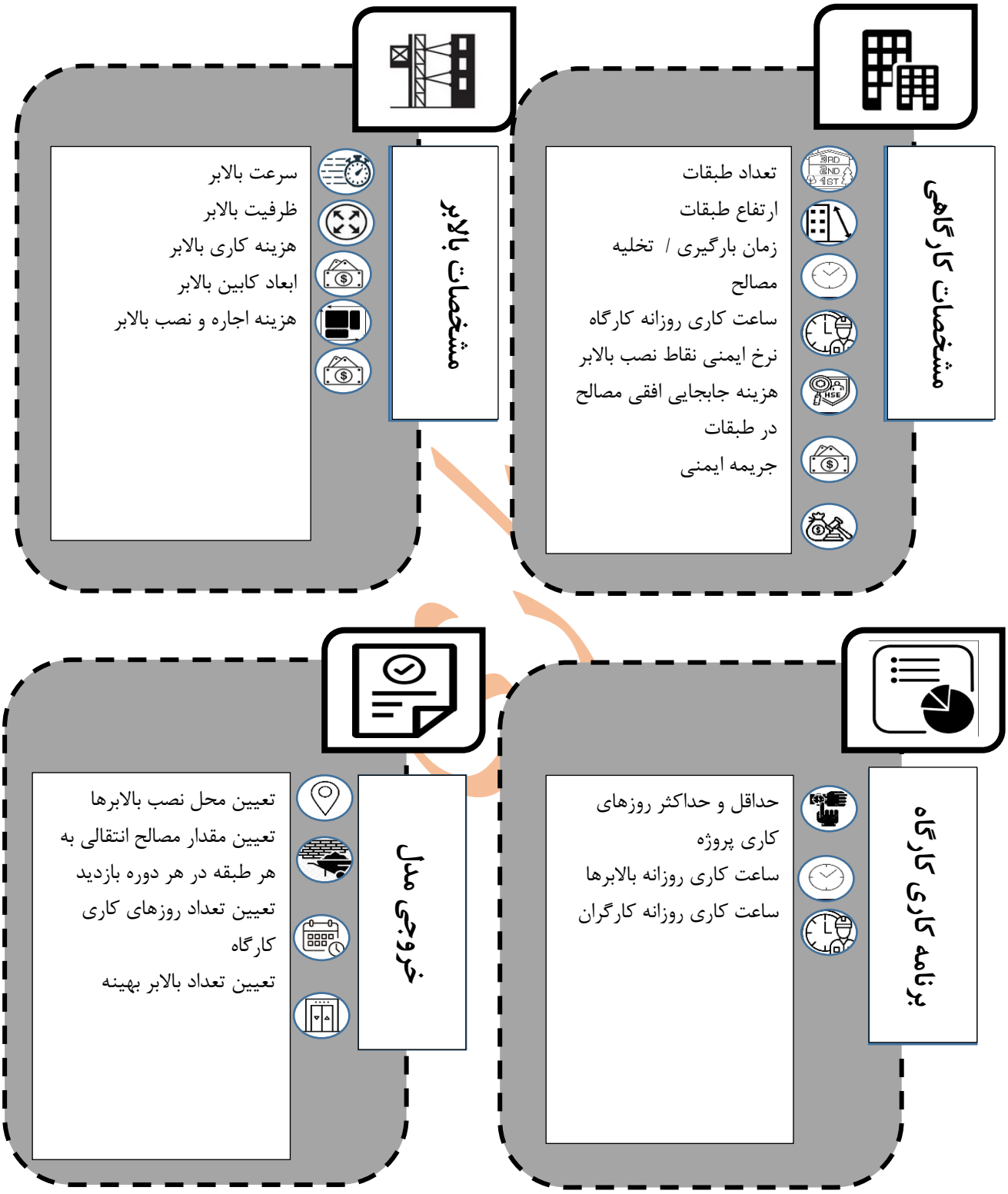
۱۰. تعداد روزهای کاری پروژه در فرآیند بهینه سازی تعیین می شود. این موضوع می تواند منجر به توزیع متوازن فعالیت های بالابری بین بالابرهای نصب شده در ساختمان شود.

۴- مدل توسعه داده‌شده

مسئله بهینه‌سازی تعریف‌شده در مورد مکانیابی و تعیین تعداد بالابرهای کارگاهی به شکلی است که به صورت بهینه تعیین می‌کند که چندین بالابر باید در کارگاه نصب شود و در کجا قرار داده شوند تا در کلیه نقاط کارگاه به طور مؤثری خدمت دهند. به طور کلی، هدف این مسئله بهینه‌سازی معمولاً به دست آوردن تعداد و موقعیت بهینه آسانسورها است. این هدف ممکن است شامل کاهش زمان انتظار مسافران، کمینه کردن هزینه‌های نصب و نگهداری آسانسورها یا بهینه‌سازی سایر عوامل مربوط به کارگاه باشد. محدودیت‌های مسئله بهینه‌سازی می‌توانند مانند ظرفیت آسانسورها، حداکثر زمان انتظار مجاز برای مسافران، محدودیت‌های فضایی برای نصب آسانسورها و سایر محدودیت‌های مربوط به ساختار و نیازهای کارگاه باشند. برای حل مسئله بهینه‌سازی مکانیابی و تعیین تعداد آسانسورهای کارگاهی، می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد. یکی از روش‌های معروف برای حل مسائل بهینه‌سازی خطی، روش سیپلکس است. الگوریتم سیپلکس یک الگوریتم بهینه‌سازی عددی است که برای پیدا کردن جواب بهینه در مسائل بهینه‌سازی خطی استفاده می‌شود. این الگوریتم قادر است به صورت مؤثر و بهینه جواب‌های بهینه برای مسائل بهینه‌سازی خطی را پیدا کند.

مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن مفروضات بالا مکان و تعداد بهینه بالابرهای موردنیاز پروژه را مشخص می‌کند. در شکل ۲ فرآیند سیستمی برنامه‌ریزی بالابری ارائه شده است.

ویراستاری نشده



شکل ۲: چارت سیستمی مدل بهینه‌سازی بالابر

هدف مدل پیشنهادی کاهش هزینه های مربوط به اجاره، نصب و هزینه کاری بالابر در طی روزهای کاری پروژه است. در ابتدا به بررسی مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله می‌پردازیم. جدول ۱ تمامی این موارد را نشان می‌دهد.

جدول ۱ : نمادهای به‌کار رفته و مفهوم آنها

نماد	مفهوم	نماد	مفهوم
j	اندیس طبقات	r_l	نرخ ایمنی نقطه کاندید l
m	اندیس مصالح	a	ثابت ایمنی
l	اندیس نقاط کاندید نصب بالابر	O_1	ثابت عددی بزرگ
d_{jm}	۰	O_2	ثابت عددی بزرگ
cap_l	ظرفیت بالابر نصب شده در مکان کاندید l	x_{jml}	مقدار مصالحی که بالابر قرارگرفته در مکان کاندید l از مصالح نوع m به طبقه j تحویل می‌دهد
t_{jl}^y	مدت زمان جابجایی بالابر نصب شده در مکان کاندید l بین نقطه عرضه و طبقه j است	n_{jml}	تعداد دفعاتی سفر بالابر نصب شده در مکان کاندید l برای رفع تقاضای ماده m به طبقه j
t_l^x	مدت زمان جابجایی افقی مصالح در صورت نصب بالابر در مکان کاندید l	T_l^y	مجموع مدت‌زمان جابجایی عمودی بالابر قرار گرفته شده در مکان کاندید l
D_{avg}	مدت زمان مجاز فعالیت روزانه بالابرها	T_l^x	مجموع مدت‌زمان جابجایی افقی مصالح در صورت نصب بالابر در مکان کاندید l
$L_{\min}$	کران پایین تعداد روزهای کاری مجاز	y_l	متغیر باینری است که اگر بالابر در مکان l نصب شود برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر با ۰
$L_{\max}$	کران بالای تعداد روزهای کاری مجاز	T_m	بیشترین زمان استفاده از بالابرها
H_j	بیانگر ارتفاع طبقه j	$Days$	تعداد روزهای کاری پروژه
h_l	ارتفاع نقطه عرضه	c^i	هزینه نصب بالابرها
V_y	سرعت ثابت حرکت بالابر	c^r	هزینه اجاره بالابرها
c_l^i	هزینه نصب بالابر l در واحد زمان	c^w	هزینه عملیاتی بالابرها
c_l^r	هزینه اجاره بالابر l در واحد زمان	c^h	هزینه جابجایی افقی مصالح در طبقات
c_l^w	هزینه عملیاتی بالابر l در واحد زمان	SR	جزیمه ایمنی
c_l^h	هزینه جابجایی افقی مصالح در طبقات در واحد زمان	A_l	متغیر خطی‌ساز

محدودیت های مدل پیشنهادی به صورت زیر است:

$$\sum_{l\in L} x_{jml} \geq d_{jm} \qquad \forall j \in J, m \in M \qquad (۱)$$

$$x_{jml} \leq cap_l \times n_{jml} \qquad \forall j \in J, m \in M, l \in L \qquad (۲)$$

$$T_l^y = 2 \times \sum_{m\in M} \sum_{j\in J} n_{jml} \times t_{jl}^y \qquad \forall l \in L \qquad (۳)$$

$$T_l^x = \sum_{m\in M} \sum_{j\in J} n_{jml} \times t_l^x \qquad \forall l \in L \qquad (۴)$$

$$y_l \times O_1 \geq x_{jml} \qquad \forall j \in J, m \in M, l \in L \qquad (۵)$$

ویراستاری شده

$$T_m \geq T_l^y \qquad \forall l \in L \qquad (۶)$$

$$Days = T_m / D_{avg} \qquad (۷)$$

$$Days \geq L_{\min} \qquad (۸)$$

$$Days \leq L_{\max} \qquad (۹)$$

رابطه (۱) رفع کامل نیاز مصالح تمام طبقات را تضمین می‌کند. هر یک از بالابرها بسته به ویژگی مکان‌های کاندید نصب (ابعاد محل نصب، ترجیحات کارفرما و مسائل ایمنی) ظرفیت مشخصی برای جابجایی مصالح دارند. از این رو بالابرها برای رفع کامل درخواست مصالح هر یک از طبقات ساختمان باید چندین بار بین نقطه عرضه و طبقات مختلف ساختمان جابجا شوند. محدودیت (۲) تعداد دفعاتی که لازم است بالابرها به هر یک از طبقات ساختمان سفر کنند را با توجه به ظرفیت هر یک از بالابرهای نصب‌شده مشخص می‌کند. رابطه (۳) مدت زمان جابجایی عمودی هر یک از بالابرها را محاسبه می‌کند. از آنجایی که بالابر در هر سفر خود پس از تحویل مصالح به هر طبقه به نقطه عرضه باز می‌گردد، مدت‌زمان جابجایی با فرض یکسان بودن زمان حرکت رو به بالا و پایین بالابر در عدد ۲ ضرب می‌شود. در این رابطه زمان جابجایی بالابر نصب شده در هر یک از نقاط کاندید از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$t_{jl}^y = (H_j - h_l)/V_y \qquad \forall l \in L \qquad (۱۰)$$

پس از تحویل مصالح به هر طبقه توسط بالابرها، کارگران مصالح را به بخش های مورد نیاز ساختمان به صورت دستی منتقل می‌کنند. مقدار جابجایی انجام‌شده توسط کارگران به فاصله محل نصب بالابر از مکان های مورد نظر بستگی دارد. رابطه (۴) مدت زمان جابجایی افقی مصالح در هر طبقه را از محل نصب بالابر تا محل‌های استفاده آن محاسبه می‌کند. مکان نصب بالابر توسط رابطه (۵) مشخص می‌شود. در صورتی که مقدار O_1 عددی کمتر از نیاز انتخاب شود، ممکن است جواب شدنی برای مسئله پیدا نشود. در مقابل اگر مقدار O_1 خیلی بزرگ انتخاب شود ممکن است مدت زمان حل مدل افزایش پیدا کند. از این رو رابطه (۱۱) برای محاسبه مقدار O_1 پیشنهاد می‌شود.

$$O_1 \geq d_{jm} + 1 \qquad (۱۱)$$

قیدهای (۶) الی (۹) به منظور محاسبه تعداد روزهای کاری پروژه به مدل پیشنهادی افزوده می شود. معمولا تعداد روزهای کاری پروژه نمی‌تواند خیلی کم (به دلایلی مانند سرعت عوامل موثر در ساخت و ساز از جمله سرعت نیروی انسانی، سرعت تجهیزات و سرعت تامین مصالح) یا خیلی زیاد (به دلایلی مانند محدودیت در قرارداد کاری و افزایش هزینه های ناشی از اجاره تجهیزات و دستمزد نیروی انسانی) باشد. رابطه (۸) و (۹) تضمین می‌کند فعالیت های بالابری در تعداد روزهای پیش بینی شده تکمیل شود. کران پایین درنظر گرفته شده در رابطه (۸) می تواند از نصب تعداد بیش از نیاز بالابر در ساختمان و در نتیجه از افزایش هزینه‌ها جلوگیری کند.

۳ ـ ۲ـ تابع هدف

مدل پیشنهادی تعداد و مکان بالابرها را با هدف کاهش هزینه هایی مانند هزینه نصب بالابر، هزینه اجاره روزانه بالابر و هزینه مصرف انرژی بالابر، کاهش جابجایی‌های افقی در طبقات و کاهش مخاطرات ایمنی تعیین می کند. از این رو تابع هدف به صورت زیر پیشنهاد می شود.

$$z = \min(c^i + c^r + c^w + c^h + SR) \qquad (۱۲)$$

$$c^i = \sum_{l \in L} c_l^i \times y_l \qquad \forall l \in L \qquad (۱۳)$$

$$c^r = D_{avg} \times (\sum_{l \in L} c_l^r \times y_l \times Days) \qquad \forall l \in L \qquad (۱۴)$$

$$c^w = \sum_{l \in L} \sum_{j \in J} c_l^w \times T_l^y \qquad \forall j \in J, l \in L \qquad (۱۵)$$

$$c^h = \sum_{l \in L} \sum_{j \in J} c_l^h \times T_l^x \qquad \forall j \in J, l \in L \qquad (۱۶)$$

$$SR = a \times (\sum_{l \in L} r_l \times y_l) \qquad \forall l \in L \qquad (۱۷)$$

رابطه (۱۲) تابع هدف مدل پیشنهادی را مشخص می‌دهد. مولفه SR با هدف افزایش ایمنی و سهولت کاربری بالابرها به تابع هدف افزوده می‌شود. ضریب a در رابطه (۱۷) بین هزینه ها و جریمه های ایمنی تعادل برقرار می کند. با افزایش پارامتر a مدل پیشنهادی می‌تواند مکان‌های ایمن‌تری را انتخاب کند. در حالی که با کاهش مقدار a می توان به جواب اقتصادی تری دست پیدا کرد. رابطه (۱۳) مجموع هزینه نصب بالابرها را محاسبه می‌کند. رابطه (۱۴) هزینه اجاره بالابرها را بر اساس تعداد روزهای کاری محاسبه می‌کند. این رابطه در تابع هدف تلاش می‌کند هزینه اجاره را از طریق کاهش تعداد روزهای کاری پروژه کاهش دهد. از این رو باتوجه به روابط (۶) الی (۹) مدل پیشنهادی تلاش می‌کند با توزیع مناسب فعالیت های بالابری بین بالابرهای نصب شده تعداد روزهای کاری پروژه را کاهش دهد. رابطه (۱۵) مجموع هزینه کاری بالابرها شامل هزینه مصرف برق و هزینه تعمیر و نگهداری را محاسبه می‌کند. رابطه (۱۶) برای محاسبه مجموع هزینه جابجایی افقی مصالح در طبقات ساختمان به مدل اضافه می‌شود. مجموع جریمه های ایمنی از رابطه (۱۷) بدست می‌آید. هر چه مخاطرات ایمنی یک مکان بیشتر باشد، باید مقدار r_l بیشتری برای آن نقطه درنظر گرفته شود.

۳ ـ ۳ـ خطی‌سازی مدل

تمامی روابط ارائه شده در تابع هدف و قیدهای مدل پیشنهادی به جز رابطه (۱۴) به صورت خطی هستند. معمولا حجم محاسبات و مدت زمان حل یک مدل ریاضی با خطی سازی آن کاهش پیدا می‌کند. از این رو در ادامه رابطه (۱۴) با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی خطی می‌شود. ابتدا رابطه (۱۴) به صورت خطی زیر بازنویسی می‌شود.

$$c^r = D_{avg} \times (\sum_{l \in L} c_l^r \times A_l) \qquad \forall l \in L \qquad (۱۸)$$

در رابطه (۱۸) بایستی مقدار A_l برابر با حاصل ضرب $y_l \times Days$ باشد. روابط (۹۱) تا (۱۲) تساوی این دو مقدار را تضمین می‌کند.

$$A_l \le O_2 \times y_l \qquad (۱۹)$$

$$A_l \le Days \qquad (۲۰)$$

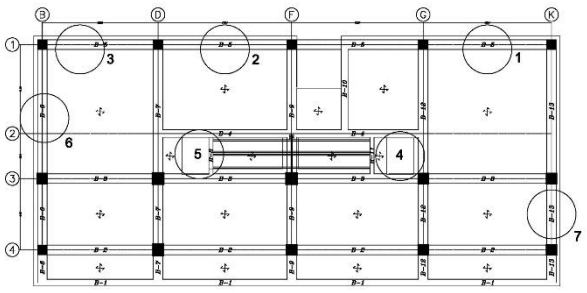
$$A_l \le Days - (1 - y_l) \times O_2 \qquad (۲۱)$$

باتوجه به اینکه A_l در تابع هدف مینیمم سازی قرار دارد، به منظور کاهش تعداد قیدهای مدل می توان فقط از رابطه (۲۰) برای برقراری تساوی A_l با حاصل ضرب $y_l \times Days$ استفاده کرد. در اینصورت تعداد قیدها به اندازه l ۲* کاهش پیدا می کند. کاهش تعداد قیدها می تواند منجر به کاهش تعداد محاسبات و در نتیجه کاهش مدت زمان حل مدل پیشنهادی شود. مقدار O_2 را نیز می توان مشابه O_1 (رابطه ۵) محاسبه کرد. رابطه (۲۲) برای محاسبه مقدار O_2 پیشنهاد می‌شود.

$$O_2 = L_{\max} + 1 \qquad (۲۲)$$

۵ ـ مطالعه موردی، ساختمان مسکونی ۲۰ طبقه

اطلاعات موردنیاز برای بررسی مدل از ساختمانی واقع در شهر مشهد تهیه شده است. در شکل ۳ مکان های کاندید برای نصب بالابر نمایش داده شده است. در این پروژه ۷ مکان به عنوان نقطه کاندید درنظر گرفته می شود. نقاط ۱، ۲، ۳، ۶ و ۷ در نمای بیرونی پروژه و نقاط ۴ و ۵ در چاله آسانسور قرار دارند.



شکل ۳ : پلان جانمایی مکان‌های کاندید نصب بالابر

جهت پیشبرد پروژه، ۵ نوع محصول نیاز به جابجایی توسط بالابر دارند و مابقی محصولات موردنیاز بصورت دستی و یا با استفاده از تاورکرین منتقل می‌شوند. تراز ارتفاعی طبقات مختلف (بر حسب

متر) و مقدار نیاز طبقات مختلف به هر کدام از انواع مصالح به صورت وزنی (بر حسب تن) در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ : میزان نیازمندی مصالح به طبقات

تراز	طبقه	ارتفاع	نیاز به مصالح ۱	نیاز به مصالح ۲	نیاز به مصالح ۳	نیاز به مصالح ۴	نیاز به مصالح ۵
۱	-۳	-۱۲	۸۰۰	۱۰۰۰	۷۰۰	۸۰۰	۱۱۰۰
۲	-۲	-۸	۱۲۰۰	۱۱۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۱۴۰۰
۳	-۱	-۴	۹۶۰	۱۰۶۰	۱۱۲۰	۵۶۰	۰
۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۵	۱	۴	۸۴۰	۶۴۰	۱۲۸۰	۱۲۸۰	۲۰۲
۶	۲	۸	۹۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۰	۶۰۰
۷	۳	۱۲	۲۴۰	۱۰۰۰	۸۲۰	۶۰۰	۱۱۸۰
۸	۴	۱۶	۶۲۰	۲۰۰	۴۰۰	۰	۰
۹	۵	۲۰	۱۲۰۰	۳۸۰	۴۸۰	۳۰۰	۷۶۰
۱۰	۶	۲۴	۷۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰	۸۰۰	۱۰۶۰
۱۱	۷	۲۸	۱۲۰۰	۴۲۰	۷۰۰	۰	۹۰۰
۱۲	۸	۳۲	۶۰۰	۲۰۰	۹۰۰	۳۶۰	۸۶۰
۱۳	۹	۳۶	۹۶۰	۱۲۰۰	۸۴۰	۱۱۴۰	۶۴۰
۱۴	۱۰	۴۰	۶۰۰	۱۳۴۰	۶۲۰	۵۶۰	۸۶۰
۱۵	۱۱	۴۴	۰	۳۰۰	۲۰۰	۰	۷۸۰
۱۶	۱۲	۴۸	۰	۳۰۰	۹۰۰	۲۱۶	۸۴۰
۱۷	۱۳	۵۲	۵۰۰	۳۰۰	۱۸۰۰	۰	۳۰۲
۱۸	۱۴	۵۶	۶۶۰	۲۱۴	۷۴۰	۴۰۴	۰
۱۹	۱۵	۶۰	۳۱۸	۸۱۷۰	۴۰۰	۳۶۰	۱۰۴۰
۲۰	۱۶	۶۴	۶۰۰	۳۶۰	۸۴۰	۲۱۴	۴۶۰

اطلاعات مربوط به ظرفیت وزنی بالابر (بر حسب کیلوگرم) در مکان‌های کاندید ۱ تا ۷، سرعت حرکت بالابر (بر حسب متر بر دقیقه)، میانگین جابجایی افقی مصالح در طبقات (برحسب متر)، ابعاد کابین (بر حسب متر)، هزینه نصب (بر حسب تومان)، هزینه اجاره و هزینه کاری در جدول ۳ آمده است. در جدول ۳ ظرفیت بالابر بر اساس فضای محل نصب آن تعیین شده است. به طور مثال مکان‌های کاندید ۴ و ۵ که در چاله آسانسور قرار دارند بدلیل فضای کوچکتر چاله آسانسور، ابعاد کابین و درنتیجه ظرفیت بالابری کمتری از سایر مکان های کاندید خواهند داشت. تفاوت سرعت حرکت بالابر در مکان های کاندید نیز به دلیل تفاوت ظرفیت بالابر است. جابجایی افقی مصالح به‌صورت دستی توسط کارگران انجام می‌شود. در جدول ۳ مقدار جابجایی های افقی با توجه موقعیت نصب بالابر و به‌صورت میانگین محاسبه شده است. سرعت حرکت افقی یک کارگر ۱.۴ متر بر ثانیه درنظر گرفته می شود. بر این اساس می توان طبق رابطه (۲۳) مقدار t_{jl}^{x} را محاسبه کرد.

$$t_l^x = x_l^{avg} / V_x \qquad \forall l \in L \qquad (۲۳)$$

که در آن x_l^{avg} بیانگر میانگین مقدار جابجایی افقی مصالح در طبقات درصورت نصب بالابر در نقطه کاندید l است و V_x نیز سرعت متوسط حرکت کارگر درحالت حمل بار است (۱.۴ متر بر ثانیه). همچنین هزینه جابجایی افقی برای هر ثانیه کاری برابر با ۱۴ تومان فرض می شود.

علاوه بر کمینه‌سازی هزینه موارد دیگری نظیر سهولت دسترسی به تجهیزات، تلاش برای افزایش ایمنی کارگاه و عدم تداخل تجهیزات نصب‌شده با مسیر رفت و آمد کارگران و مصالح نیز از نکات حائز اهمیت در چیدمان سایت‌های ساختمانی است.

هم چنین جهت تعیین محل‌های کاندید نصب بالابر، برخی نقاط دسترسی راحت‌تری برای تخلیه مصالح و انتقال آن از محل دپو به بالابرها و سپس توزیع به نقاط تقاضا در طبقات دارند. در نمونه موردی انتخاب‌شده نیز بدلیل وجود فضای آماده و نصب آسان‌تر، نظر کارفرمای پروژه نصب بالابرهای کارگاهی در چاله آسانسور پروژه

ویراستاری نشاه

است. چاله آسانسور دارای محدودیت ابعادی بوده و بالابر نصب‌شده در این نقطه ظرفیت کمتری نسبت به سایر نقاط خواهد داشت. هم‌چنین این نقطه بدلیل قرار گرفتن در مرکز پلان، از خیابان‌های اطراف که محل تخلیه مصالح می‌باشد دورتر بوده و هزینه‌ای بابت

جدول ۳ : مشخصات فنی بالابر

محل نصب	ظرفیت (کیلوگرم)	سرعت (متر/ثانیه)	جابجایی افقی (متر)	ابعاد کابین (متر)	هزینه نصب (تومان)	اجاره (تومان)	هزینه کاری (تومان)	نرخ ایمنی
۱	۱۰۰۰	۲۰/۶	۶۰	۱.۳*۲.۷*۲.۴	۳۰،۰۰۰،۰۰۰	۲،۰۹۱،۶۰۰	۳۵	۱
۲	۱۲۰۰	۱۹/۷	۴۵	۱.۳*۲.۷*۳	۳۵،۰۰۰،۰۰۰	۲،۵۲۰،۰۰۰	۴۴	۱
۳	۱۲۰۰	۱۹/۷	۶۰	۱.۳*۲.۷*۳	۳۵،۰۰۰،۰۰۰	۲،۵۲۰،۰۰۰	۴۴	۱
۴	۸۰۰	۲۱	۲۵	۱.۳*۲.۷*۱.۸	۲۵،۰۰۰،۰۰۰	۱،۷۸۹،۲۰۰	۳۱	۵
۵	۸۰۰	۲۱	۲۵	۱.۳*۲.۷*۱.۸	۲۵،۰۰۰،۰۰۰	۱،۷۸۹،۲۰۰	۳۱	۵
۶	۱۰۰۰	۲۰/۶	۴۵	۱.۳*۲.۷*۲.۵	۳۰،۰۰۰،۰۰۰	۲،۰۹۱،۶۰۰	۳۵	۲
۷	۱۰۰۰	۲۰/۶	۴۰	۱.۳*۲.۷*۱.۹	۳۰،۰۰۰،۰۰۰	۲،۰۹۱،۶۰۰	۳۵	۳

جابجایی مصالح در این مرحله نیز باید درنظر گرفته شود. به لحاظ فنی نقاط قرارگرفته در نمای پروژه برای نصب بالابر مناسب‌تر هستند زیرا تا پایان پروژه نیازی به جابجایی مجدد بالابر نبوده و فقط مرحله نماکاری آن قسمت تا انتهای کاربری بالابر متوقف می‌شود. ولی در صورت نصب بالابر در چاله آسانسور، نصب آسانسورهای اصلی پروژه که از مراحل مهم تکمیل فرآیند ساخت هستند به تعویق می‌افتد. بنابراین پارامتری با عنوان نرخ ایمنی مکان های کاندید به مدل‌سازی افزوده می‌شود که نقاط کاندید نصب را از منظر ملاحظات ایمنی و شهرداری، سهولت دسترسی و ترجیحات کارفرما رتبه بندی می‌کند. نرخ ایمنی بر اساس معیارهای تجربی برای مکان های کاندید در جدول ۳ مشخص شده است. به عنوان مثال در نمونه مطالعاتی، نصب بالابر در نما در مقایسه با چاله آسانسور ترجیح داده می‌شود. هم‌چنین مکان های کاندید موجود در نما از نظر سهولت دسترسی با یکدیگر متفاوت هستند.

۶- بررسی و آزمایش

در ادامه مدل پیشنهادی با استفاده از نمونه مطالعاتی مورد بررسی و آزمایش قرار می‌گیرد. مدل پیشنهادی در نرم افزار IBM CPLEX Optimization Studio پیاده‌سازی و با حل‌کننده CPLEX در سیستمی با پردازنده ۳ هسته ای، ۸ گیگابایت رم و سیستم عامل مایکروسافت ویندوز ۱۰ حل شده است.

در ادامه نتایج حاصل از پیاده سازی گزارش می‌شوند.

جدول ۴ : مقادیر مختلف ضریب عددی **a**

حالت	مقدار a	مکان‌های نصب منتخب	روز کاری	هزینه نصب (تومان)	هزینه اجاره (تومان)	هزینه کاری (تومان)	هزینه جابجایی افقی (تومان)	جریمه ایمنی ثابت (تومان)	مجموع (تومان)
۱	۱،۰۰۰،۰۰۰	۷ ،۶ ،۱	۱۲۶	۹۰،۰۰۰،۰۰۰	۷۹۰،۶۲۰،۰۰۰	۳۳۲،۱۹۰،۰۰۰	۲۶،۹۱۴،۰۰۰	۶،۰۰۰،۰۰۰	۱،۲۴۵،۷۲۴،۰۰۰
۲	۲،۰۰۰،۰۰۰	۶ ،۲	۱۷۵	۶۵،۰۰۰،۰۰۰	۸۰۷،۰۳۰،۰۰۰	۳۴۸،۳۶۰،۰۰۰	۲۳،۹۶۴،۰۰۰	۶،۰۰۰،۰۰۰	۱،۲۵۰،۳۵۴،۰۰۰
۳	۳،۰۰۰،۰۰۰	۲ ،۱	۱۷۵	۶۵،۰۰۰،۰۰۰	۸۰۷،۰۳۰،۰۰۰	۳۴۸،۳۹۰،۰۰۰	۲۶،۴۲۸،۰۰۰	۶،۰۰۰،۰۰۰	۱،۲۵۲،۸۴۸،۰۰۰
۴	۴،۰۰۰،۰۰۰	۲ ،۱	۱۷۵	۶۵،۰۰۰،۰۰۰	۸۰۷،۰۳۰،۰۰۰	۳۴۸،۳۹۰،۰۰۰	۲۶،۴۳۳،۰۰۰	۸،۰۰۰،۰۰۰	۱،۲۵۴،۸۵۳،۰۰۰

ویراستاری نشده

۶-۲- نتایج

در ابتدا ضریب a از طریق بررسی ها و آزمایشات متفاوت تعیین می‌شود. در جدول ۴ برای ضریب a چهار مقدار متفاوت درنظر گرفته شده است.

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار a به ۳،۰۰۰،۰۰۰ تومان، ایمن ترین مکان ها برای نصب بالابر تعیین می‌شوند (مکان ۱ و ۲ که کمترین نرخ ایمنی را دارند). دیگر آزمایشاتی که توسط نویسندگان انجام شده است نیز نشان می دهد که با افزایش بیشتر مقدار a (به هر میزان دلخواه) مکان های تعیین شده تغییری نمی‌کند. از این رو در ادامه برای سایر بررسی ها مقدار a برابر با ۳،۰۰۰،۰۰۰ درنظر گرفته می‌شود. بر این اساس جزئیات جواب بهینه در جدول ۵ گزارش شده است. مدل پیشنهادی استفاده از ۲ بالابر را بهینه می‌داند. هم‌چنین مکان های ۱ و ۲ را برای نصب آن ها تعیین کرده است. در جواب بهینه تعداد روزهای کاری برابر با ۱۷۵ روز تعیین شده است. مطابق جدول ۵ مدت زمان استفاده از هر دو بالابر با یکدیگر برابر است (۴۴۱۰۰۰۰ ثانیه). این نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی به خوبی توانسته است فعالیت‌های بالابری را بین بالابرهای نصب شده به صورت متعادل توزیع کند.

همان طور که در بالا اشاره شد، در جواب بهینه ایمن ترین مکان‌ها برای نصب بالابر انتخاب شده است. این به دلیل وجود مولفه ایمنی (SR) در تابع هدف است. برای اثبات این ادعا مدل پیشنهادی با حذف جریمه ایمنی مجددا حل می‌شود. نتایج در جدول ۶ گزارش شده است. در این حالت مدل پیشنهادی ۳ بالابر را برای نصب در مکان های ۱، ۶ و ۷ انتخاب می کند. همان طور که مشاهده می‌شود، ایمنی مکان های انتخاب شده در جواب بهینه در مقایسه با این حالت بیشتر است. بنابراین جریمه ایمنی در تابع هدف بر روی تعداد و مکان های نصب بالابر موثر است.

جدول ۵ : مشخصات جواب بهینه

محل نصب	زمان جابجایی افقی (ثانیه)	زمان جابجایی عمودی (ثانیه)	روز کاری	هزینه نصب (تومان)	هزینه اجاره (تومان)	هزینه کاری (تومان)	هزینه جابجایی افقی (تومان)	جریمه ایمنی ثابت (تومان)	مجموع (تومان)
۱	۷۲۳۱۷۰	۴۴۱۰۰۰۰	۱۷۵	۳۰،۰۰۰،۰۰۰	۳۶۶،۰۳۰،۰۰۰	۱۵۴،۳۵۰،۰۰۰	۱۰،۱۲۴،۳۸۰	۳،۰۰۰،۰۰۰	۵۶۳،۵۰۴،۳۸۰
۲	۱۱۶۴۵۰۰	۴۴۱۰۰۰۰	۱۷۵	۳۵،۰۰۰،۰۰۰	۴۴۱،۰۰۰،۰۰۰	۱۹۴،۰۴۰،۰۰۰	۱۶،۳۰۳،۰۰۰	۳،۰۰۰،۰۰۰	۶۸۹،۳۴۳،۰۰۰
مجموع	۱۸۸۷۶۷۰	۸۸۲۰۰۰۰	۱۷۵	۶۵،۰۰۰،۰۰۰	۸۰۷،۰۳۰،۰۰۰	۳۴۸،۳۹۰،۰۰۰	۲۶،۴۲۷،۳۸۰	۶،۰۰۰،۰۰۰	۱،۲۵۲،۸۴۷،۳۸۰

جدول ۶ : تاثیر حذف جریمه ایمنی

محل نصب	روز کاری	هزینه نصب (تومان)	هزینه اجاره (تومان)	هزینه کاری (تومان)	هزینه جابجایی افقی (تومان)	جریمه ایمنی ثابت (تومان)	مجموع (تومان)
۱، ۶، ۷	۱۲۶	۹۰،۰۰۰،۰۰۰	۷۹۰،۶۲۰،۰۰۰	۳۳۲،۱۹۰،۰۰۰	۲۶،۹۱۴،۰۰۰	۱۵،۰۰۰،۰۰۰	۱،۲۵۴،۷۲۴،۰۰۰

جدول ۷ : عدم بهینه‌سازی تعداد بالابرها

حالت	تعداد بالابر	محل نصب	روز کاری	هزینه نصب (تومان)	هزینه اجاره (تومان)	هزینه کاری (تومان)	هزینه جابجایی افقی (تومان)	جریمه ایمنی ثابت (تومان)	مجموع (تومان)
۱	۱	۶	۳۷۷	۳۰،۰۰۰،۰۰۰	۷۸۸،۵۳۰،۰۰۰	۳۳۲،۱۹۰،۰۰۰	۲۷،۰۹۵،۰۰۰	۶،۰۰۰،۰۰۰	۱،۱۸۳،۸۱۵،۰۰۰
۲	۲	۲، ۱	۱۷۵	۶۵،۰۰۰،۰۰۰	۸۰۷،۰۳۰،۰۰۰	۳۴۸،۳۹۰،۰۰۰	۲۶،۴۲۷،۳۸۰	۶،۰۰۰،۰۰۰	۱،۲۵۲،۸۴۷،۳۸۰
۳	۳	۷، ۶، ۱	۱۲۶	۹۰،۰۰۰،۰۰۰	۷۹۰،۶۲۰،۰۰۰	۳۳۲،۱۹۰،۰۰۰	۲۶،۹۱۴،۰۰۰	۱۸،۰۰۰،۰۰۰	۱،۲۵۷،۷۲۴،۰۰۰
۴	۴	۷، ۶، ۵، ۱	۹۹	۱۱۵،۰۰۰،۰۰۰	۷۹۸،۳۴۰،۰۰۰	۳۳۷،۹۴۰،۰۰۰	۲۴،۰۲۰،۰۰۰	۳۳،۰۰۰،۰۰۰	۱،۳۰۸،۳۰۰،۰۰۰
۵	۵	۷، ۶، ۴، ۲، ۱	۷۶	۱۵۰،۰۰۰،۰۰۰	۸۰۴،۳۸۰،۰۰۰	۳۴۳،۴۴۰،۰۰۰	۲۳،۲۳۳،۰۰۰	۳۶،۰۰۰،۰۰۰	۱،۳۵۷،۰۵۳،۰۰۰

جدول ۸ : عدم بهینه‌سازی هزینه نصب و اجاره

محل نصب	روز کاری	هزینه نصب (تومان)	هزینه اجاره (تومان)	هزینه کاری (تومان)	هزینه جابجایی افقی (تومان)	جریمه ایمنی ثابت (تومان)	مجموع (تومان)
۱ ، ۲ ، ۶	۱۸۰	۹۵،۰۰۰،۰۰۰	۱،۲۰۶،۵۷۶،۰۰۰	۳۳۳،۸۲۰،۰۰۰	۲۸،۳۶۴،۰۰۰	۱۲،۰۰۰،۰۰۰	۱،۶۷۵،۷۶۰،۰۰۰

تعداد بالابرهای مورد نیاز در مدل پیشنهادی به صورت بهینه تعیین می شود (در جواب بهینه ۲ بالابر). برای بررسی اهمیت انتخاب تعداد بالابر مورد نیاز در فرآیند بهینه سازی، در جدول ۷ تعداد بالابرها به صورت پارامتر درنظر گرفته شده است.

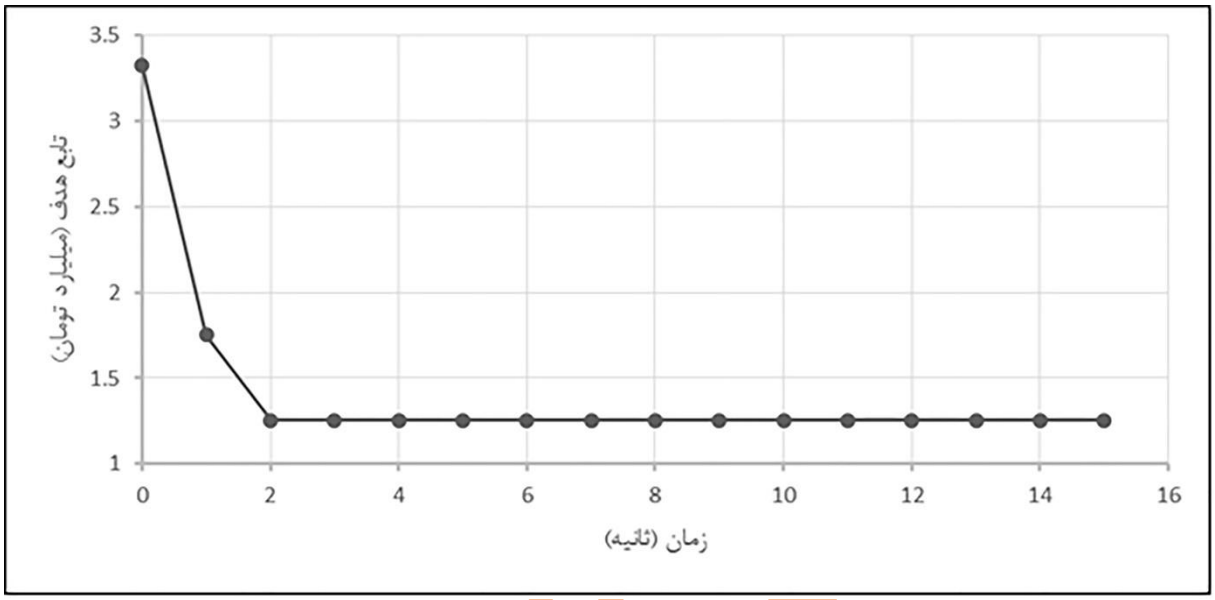
همان طور که در جدول ۷ مشاهده می شود، مقدار تابع هدف، هزینه‌ها و تعداد روزهای کاری به تعداد بالابرهای نصب شده بستگی دارد. درصورتی که فقط از یک بالابر برای حمل مصالح ساختمانی استفاده شود، مقدار تابع هدف حدود ۵.۵ درصد کاهش پیدا می کند. اما در مقابل تعداد روزهای کاری به ۳۷۷ روز (حدود ۱۱۵ درصد) افزایش پیدا می کند. این تعداد روز از سقف تعداد روزهای کاری مجاز (۱۸۰ روز) بیشتر است. به همین دلیل مدل پیشنهادی این حالت را به عنوان جواب بهینه انتخاب نکرده است. در صورت استفاده از سه بالابر مقدار تابع هدف تقریبا ۰.۴ درصد نسبت به جواب بهینه افزایش پیدا می کند. اما در مقابل تعداد روزهای کاری به ۱۲۶ روز (۲۸ درصد) کاهش پیدا می کند. ممکن است افزایش ۰.۴ درصدی مقدار تابع هدف در مقایسه با کاهش ۲۸ درصدی روزهای کاری برای پیمانکاران اهمیت بیشتری داشته باشد. بنابراین این احتمال وجود دارد که در عمل حالت سوم برای اجرای پروژه انتخاب شود. این نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند سناریوهای مختلف را برای تصمیم‌گیری بهتر در اختیار عوامل ساخت و ساز قرار دهد. هم‌چنین در صورت انتخاب ۴ بالابر مقدار تابع هدف حدودا ۴.۴ درصد در مقایسه با جواب بهینه افزایش و تعداد روزهای کاری به ۹۹ روز (حدود ۴۳ درصد) کاهش پیدا می‌کند. در صورتی که ۵ بالابر برای استفاده در ساختمان درنظر گرفته شود، مقدار تابع هدف تقریبا ۸.۳ درصد افزایش و تعداد روزهای کاری به ۷۶ روز کاهش پیدا می کند. این درحالی است که تعداد روزهای پروژه بر اساس دیگر عوامل موثر بر ساخت و ساز نمی‌تواند کمتر از ۸۰ روز باشد. یعنی درصورت استفاده از ۵ بالابر یا بیشتر تعداد روزهای کاری در عمل همان ۸۰ روز است و هزینه اجاره بالابرها (۵ بالابر یا بیشتر) باید تا ۸۰ روز به طور کامل پرداخت شود. تعداد بالابرهای مورد نیاز در فرآیند بهینه سازی یک ویژگی مهم و کاربردی برای مدل پیشنهادی به حساب می آید.

هزینه نصب و اجاره بالابرها یکی از عوامل تاثیرگذار مهم در تعیین تعداد و محل بهینه نصب بالابرها می باشد. درصورتی که هزینه نصب و اجاره از تابع هدف حذف شود، مدل پیشنهادی براساس هزینه کاری، جابجایی افقی و تفاوت های ایمنی مکان های نصب تصمیم گیری می کند. نتایج این حالت در جدول ۸ گزارش شده است.

همان طور که در جدول ۸ مشاهده می شود، درصورت نادیده گرفتن هزینه نصب و اجاره بالابرها در فرآیند بهینه سازی تعداد بالابرهای نصب شده به ۳ عدد افزایش پیدا می کند. این حالت می‌تواند منجر به افزایش حدود ۳۳.۸ درصدی مقدار تابع هدف و افزایش حدود ۲.۹ درصدی تعداد روزهای کاری در مقایسه با جواب بهینه شود. این نشان می‌دهد که درنظر گرفتن هزینه نصب و اجاره بالابرها در فرآیند بهینه‌سازی می‌تواند تاثیر مهمی در هزینه‌ها و تعداد روزهای کاری پروژه داشته باشد.

نمودار همگرایی مدل پیشنهادی در شکل ۴ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مدل پیشنهادی در مدت زمان کوتاه ۱۵ ثانیه می‌تواند جواب بهینه را برای نمونه مطالعاتی بدست آورد. حل مدل پیشنهادی در مدت زمان کوتاه می‌تواند تصمیم‌گیری برای دست اندرکاران ساخت و ساز را سریع‌تر کند. علاوه بر این همگرایی سریع مدل پیشنهادی در بررسی سناریوهای مختلف مانند جدول ۴ و ۷ می تواند حائز اهمیت باشد.

درنتیجه تاثیرگذارترین پارامتر در تابع هدف هزینه نصب و اجاره بالابرها است. پس از آن عدم بهینه‌سازی تعداد بالابرها باعث افزایش غیرمنطقی هزینه‌ها خواهد شد.



شکل ۴ : نمودار همگرایی جواب مدل

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش یک مدل عدد صحیح خطی برای مسئله مکان‌یابی بالابر و تعیین تعداد آن در محیط ساخت و ساز ارائه شده است. این موضوع از مسائل مهم در چیدمان سایت‌های ساختمانی هستند که تاثیر مستقیم بر هزینه‌های کارگاهی، ایمنی سایت و هم‌چنین بازدهی نیروهای انسانی و تجهیزات خواهد داشت. با وجود اهمیت موضوع، در پژوهش‌های گذشته به این مبحث پرداخته نشده است. مدل پیشنهادی به عنوان نخستین پژوهش انجام‌گرفته در این زمینه علاوه بر مکان‌یابی، تعداد بالابرهای مورد نیاز و همچنین تعداد روزهای کاری پروژه را در فرآیند بهینه سازی تعیین می کند. در چیدمان بهینه به هزینه نصب، اجاره، هزینه جابجایی، سهولت نصب و تعمیر و نگهداری و مباحث ایمنی توجه شده است.

کارایی روش پیشنهادی در یک پروژه ساختمان سازی ۲۰ طبقه مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که مدل پیشنهادی می تواند چیدمان های مختلفی را با ایمنی و سهولت دسترسی متفاوت در اختیار کاربران قرار دهد.

همچنین نتایج نشان می دهد که انتخاب تعداد بالابرها خارج از فرآیند بهینه سازی می تواند تعداد روزهای کاری را بیش از ۲ برابر نموده و هزینه های پروژه را ۸.۳٪ درصد افزایش دهد. افزون بر این در صورت نادیده گرفتن هزینه نصب واجاره بالابر تعداد روزهای کاری ۲.۹٪ درصد و هزینه‌های مربوطه ۳۳.۸٪ درصد افزایش میابد به طور کلی مدل پیشنهادی تلاش می‌کند از طریق تعیین مکان و تعداد بالابرهای موردنیاز و همچنین توزیع متوازن فعالیت های بالابری بین بالابرهای نصب شده هزینه های پروژه و مخاطرات ایمنی را به حداقل برساند.

به علت نوپا بودن پژوهش‌ها در زمینه بالابری، خصوصا تعیین تعداد و محل نصب بالابرها این زمینه پتانسیل بالایی برای انجام پژوهش‌های بیشتر وجود دارد. از جمله پژوهش‌های بالقوه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. روش‌های نوین در جمع‌آوری داده‌ها.
۲. در نظر گرفتن عدم قطعیت داده‌های ورودی مسئله در مدل‌سازی.
۳. ارائه روش‌های برای تسهیل فرایند بالابری.
۴. بهینه‌سازی همزمان محل نصب بالابرها و محل دپو مصالح.

۵. مدل‌سازی همزمان فعالیت بالابری و جرثقیل‌ها جهت توزین متناسب فعالیت‌ها بین تجهیزات مورد استفاده کارگاه.

۸- منابع

۱. Huang, C., Wong, C. K. & Tam, C. M., ۲۰۱۰. Optimization of material hoisting operations and storage locations in multi-storey building construction by mixed-integer programming. *Autom. Constr.* ۱۹, ۶۵۶–۶۶۳. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۰,۰۲,۰۰۵.

۲. Bamunuarachchi, D. T. & Ranasinghe, D. N., ۲۰۱۵. Elevator group optimization in a smart building. *2015 IEEE 10th Int. Conf. Ind. Inf. Syst. ICIIS 2015 - Conf. Proc.* ۷۱–۷۶. doi:۱۰,۱۱۰۹/ICIINFS.۲۰۱۵,۷۳۹۸۹۸۸.

۳. Jung, M., Park, M., Lee, H.-S. & Chi, S., ۲۰۱۷. Agent-Based Lift System Simulation Model for High-Rise Building Construction Projects. *J. Comput. Civ. Eng.* ۳۱, ۱–۱۰. doi: ۱۰,۱۰۶۱/(asce)cp.۱۹۴۳-۵۴۸۷,۰۰۰۰۷۰۷..

۴. Kamleh, M., ۲۰۱۴. Improving Hoist Performance during the Up-Peak of Tall Building Construction.

۵. Lin, X., Han, Y., Guo, H., Luo, Z. & Guo, Z., ۲۰۲۳. Lift path planning for tower cranes based on environmental point clouds. *Autom. Constr.* ۱۵۵, ۱۰۵۰۴۶. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۲۳,۱۰۵۰۴۶.

۶. Al-Hussein, M., Athar Niaz, M., Yu, H. & Kim, H., ۲۰۰۶. Integrating ۳D visualization and simulation for tower crane operations on construction sites. *Autom. Constr.* doi:۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۰۵,۰۷,۰۰۷.

۷. Safouhi, H., Mouattamid, M., Hermann, U. & Hendi, A., ۲۰۱۱. An algorithm for the calculation of feasible mobile crane position areas. *Autom. Constr.* ۲۰, ۳۶۰–۳۶۷. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۰,۱۱,۰۰۶.

۸. Han, S. H., Hasan, S., Bouferguène, A., Al-Hussein, M. & Kosa, J., ۲۰۱۵. Utilization of ۳D Visualization of Mobile Crane Operations for Modular Construction On-Site Assembly. *J. Manag. Eng.* ۳۱, ۱–۹. doi: ۱۰,۱۰۶۱/(asce)me.۱۹۴۳-۵۴۷۹,۰۰۰۰۳۱۷.

۹. Zhang, Z. & Pan, W., ۲۰۲۱. Multi-criteria decision analysis for tower crane layout planning in high-rise modular integrated construction. *Autom. Constr.* ۱۲۷, ۱۰۳۷۰۹. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۲۱,۱۰۳۷۰۹.

۱۰. Ji, Y. & Leite, F., ۲۰۲۰. Optimized Planning Approach for Multiple Tower Cranes and Material Supply Points Using Mixed-Integer Programming. *J. Constr. Eng. Manag.* ۱۴۶. doi: ۱۰,۱۰۶۱/(asce)co.۱۹۴۳-۷۸۶۲,۰۰۰۱۷۸۱.

۱۱. Zhang, P., Harris, F. C. & Olomolaiye, P. O., ۱۹۹۶. A computer-based model for optimizing the location of a single

۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۲۸۸-۰۲۲-۰۰۵۰۳-۷.
۱۷. Zavichi, A. & Behzadan, A. H., ۲۰۱۱, A real time decision support system for enhanced crane operations in construction and manufacturing. in *Congress on Computing in Civil Engineering, Proceedings*. doi:۱۰,۱۰۶۱/۴۱۱۸۲(۴۱۶)۷۲.
۱۸. Zavichi, A., Madani, K., Xanthopoulos, P. & Oloufa, A. A., ۲۰۱۴. Enhanced crane operations in construction using service request optimization. *Autom. Constr.* doi:۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۴,۰۷,۰۱۱.
۱۹. Monghasemi, S., Nikoo, M. R. & Adamowski, J., ۲۰۱۶. Sequential ordering of crane service requests considering the pending times of the requests: An approach based on game theory and optimization techniques. *Autom. Constr.* doi:۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۶,۰۶,۰۰۶.
۲۰. Al Hattab, M., Zankoul, E. & Hamzeh, F. R., ۲۰۱۷. Near-Real-Time Optimization of Overlapping Tower Crane Operations: A Model and Case Study. *J. Comput. Civ. Eng.* doi:۱۰,۱۰۶۱/(asce)cp.۱۹۴۳-۵۴۸۷,۰۰۰۶۶۶.
۲۱. Al Hattab, M., Zankoul, E., Barakat, M. & Hamzeh, F., ۲۰۱۸. Crane overlap and operational flexibility: Balancing utilization, duration, and safety. *Constr. Innov.* doi:۱۰,۱۱۰۸/CI-۱۱-۲۰۱۶-۰۰۶۲.
۲۲. Tarhini, H., Maddah, B. & Hamzeh, F., ۲۰۲۱. The traveling salesman tower crane: Authors claim ۲۰-۴۰٪ of hook horizontal travelling time can be saved if located at the position recommended by the model. *Build. Res. Inf.* doi:۱۰,۱۰۸۰/۰۹۶۱۳۲۱۹۶۰۸۷۲۷۵۱۱.
۱۲. Tam, C. M., Tong, T. K. L. & Chan, W. K. W., ۲۰۰۱. Genetic Algorithm for Optimizing Supply Locations around Tower Crane. *J. Constr. Eng. Manag.* doi:۱۰,۱۰۶۱/(asce)۰۷۳۳-۹۳۶۴(۲۰۰۱)۱۲۷:۴(۳۱۵).
۱۳. Huang, C., Wong, C. K. & Tam, C. M., ۲۰۱۱. Optimization of tower crane and material supply locations in a high-rise building site by mixed-integer linear programming. *Autom. Constr.* ۲۰, ۵۷۱–۵۸۰. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۰,۱۱,۰۲۳.
۱۴. Lien, L. C. & Cheng, M. Y., ۲۰۱۴. Particle bee algorithm for tower crane layout with material quantity supply and demand optimization. *Autom. Constr.* ۴۵, ۲۵–۳۲. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۴,۰۵,۰۰۲.
۱۵. Riga, K., Jahr, K., Thielen, C. & Borrmann, A., ۲۰۲۰. Mixed integer programming for dynamic tower crane and storage area optimization on construction sites. *Autom. Constr.* ۱۲۰, ۱۰۳۲۵۹. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۲۰,۱۰۳۲۵۹.
۱۶. Dienstknecht, M., ۲۰۲۳. A branch and bound approach for the tower crane selection and positioning problem with respect to mutual interference. *4or* ۲۱, ۱۰۵–۱۲۳. doi:

layout planning. *Autom. Constr.* ۵۹, ۱۶۸–۱۷۸. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۵,۰۵,۰۰۶.

۲۸. Tork, A., ۲۰۱۳. *A real-time crane service scheduling decision support system (css-dss) for Cconstruction tower crane*. (Ph.D. Thesis, College of Engineering and Computer Science, University of Central Florida,.

۲۹. Yeo, K. T. & Ning, J. H., ۲۰۰۶. Managing uncertainty in major equipment procurement in engineering projects. *Eur. J. Oper. Res.* doi:۱۰,۱۰۱۶/j.ejor.۲۰۰۴,۰۶,۰۳۶.

۳۰. Yeoh, J. K. W. & Chua, D. K. H., ۲۰۱۷. Optimizing Crane Selection and Location for Multistage Construction Using a Four-Dimensional Set Cover Approach. *J. Constr. Eng. Manag.* ۱۴۳.doi: ۱۰,۱۰۶۱/(asce)co.۱۹۴۳-۷۸۶۲,۰۰۰۱۳۱۸.

۳۱. Marzouk, M. & Abubakr, A., ۲۰۱۶. Decision support for tower crane selection with building information models and genetic algorithms. *Autom. Constr.* ۶۱, ۱–۱۵. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۵,۰۹,۰۰۸.

۳۲. Wu, K., García de Soto, B. & Zhang, F., ۲۰۲۰. Spatio-temporal planning for tower cranes in construction projects with simulated annealing. *Autom. Constr.* ۱۱۱, ۱۰۳۰۶۰. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۹,۱۰۳۰۶۰.

۳۳. Sugimoto, Y., Seki, H., Samo, T. & puts-on a hard hat – Tower crane scheduling in construction projects. *Eur. J. Oper. Res.* doi:۱۰,۱۰۱۶/j.ejor.۲۰۲۰,۱۰,۰۲۹.

۲۳. Tam, C. M. & Tong, T. K. L., ۲۰۰۳. GA-ANN model for optimizing the locations of tower crane and supply points for high-rise public housing construction. *Constr. Manag. Econ.* ۲۱, ۲۵۷–۲۶۶. doi: ۱۰,۱۰۸۰/۰۱۴۴۶۱۹۰۳۲۰۰۰۰۴۹۶۶۵.

۲۴. Moussavi Nadoushani, Z. S., Hammad, A. W. A. & Akbarnezhad, A., ۲۰۱۷. Location Optimization of Tower Crane and Allocation of Material Supply Points in a Construction Site Considering Operating and Rental Costs. *J. Constr. Eng. Manag.* ۱۴۳, ۱–۱۳ . doi: ۱۰,۱۰۶۱/(asce)co.۱۹۴۳-۷۸۶۲,۰۰۰۱۲۱۵.

۲۵. Huang, C. & Wong, C. K., ۲۰۱۸. Optimization of crane setup location and servicing schedule for urgent material requests with non-homogeneous and non-fixed material supply. *Autom. Constr.* ۸۹, ۱۸۳–۱۹۸. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۸,۰۱,۰۱۵.

۲۶. Zhang, P., Harris, F. C., Olomolaiye, P. O. & Holt, G. D., ۱۹۹۹. Location Optimization for a Group of Tower Cranes. *J. Constr. Eng. Manag.* doi:۱۰,۱۰۶۱/(asce)۰۷۳۳-۹۳۶۴(۱۹۹۹)۱۲۵:۲(۱۱۵).

۲۷. Wang, J. *et al.*, ۲۰۱۵. A BIM-based approach for automated tower crane

Nakamitsu, N., ۲۰۱۶. ۴D CAD-based evaluation system for crane deployment plans in construction of nuclear power plants. *Autom. Constr.* doi:۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۶,۰۴,۰۰۴.

۳۴. Chang, Y. C., Hung, W. H. & Kang, S. C., ۲۰۱۲, A fast path planning method for single and dual crane erections. in *Automation in Construction* . doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۱,۱۱,۰۰۶. doi:۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۱,۱۱,۰۰۶.

۳۵. Kang, S. C. & Miranda, E., ۲۰۰۶. Planning and visualization for automated robotic crane erection processes in construction. *Autom. Constr.* doi:۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۰۵,۰۶,۰۰۸.

۳۶. Ali, G. M. *et al.*, ۲۰۲۱. Decision support for hydraulic crane stabilization using combined loading and crane mat strength analysis. *Autom. Constr.* doi:۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۲۱,۱۰۳۸۸۴.

۳۷. Gharaie, E., Lingard, H. & Cooke, T., ۲۰۱۵. Causes of fatal accidents involving cranes in the australian construction industry. *Constr. Econ. Build.* doi:۱۰,۵۱۳۰/AJCEB.v۱۵i۲,۴۲۴۴.

۳۸. Shin, Y., Cho, H. & Kang, K. I., ۲۰۱۱. Simulation model incorporating genetic algorithms for optimal temporary hoist planning in high-rise building construction. *Autom. Constr.* ۲۰, ۵۵۰–۵۵۸. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۰,۱۱,۰۲۱.

۳۹. Jung, M. *et al.*, ۲۰۱۷. Construction worker hoisting simulation for sky-lobby lifting system. *Autom. Constr.* ۷۳, ۱۶۶–۱۷۴. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۶,۱۰,۰۰۲.

۴۰. Jalali Yazdi, A., Forsythe, P., Ahmadian Fard Fini, A. & Maghrebi, M., ۲۰۱۹. Optimization of flexible lift processes on high-rise building construction sites. *Autom. Constr.* ۱۰۷, ۱۰۲۹۳۹. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۹,۱۰۲۹۳۹.

۴۱. Jalali Yazdi, A., Maghrebi, M. & Bolouri Bazaz, J., ۲۰۱۸. Mathematical model to optimally solve the lift planning problem in high-rise construction projects. *Autom. Constr.* ۹۲, ۱۲۰–۱۳۲. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.autcon.۲۰۱۸,۰۳,۰۲۹.

۴۲. Beamurgia, M., Basagoiti, R., Rodríguez, I. & Rodriguez, V., ۲۰۱۶. A modified genetic algorithm applied to the elevator dispatching problem. Soft Comput. ۲۰, ۳۵۹۵–۳۶۰۹. doi: ۱۰,۱۰۰۷/s۰۰۵۰۰-۰۱۵-۱۷۱۸-۱.

۴۳. Ruokokoski, M., Ehtamo, H. & Pardalos, P. M., ۲۰۱۵. Elevator dispatching problem: a mixed integer linear programming formulation and polyhedral results. J. Comb. Optim. ۲۹, ۷۵۰–۷۸۰. doi: ۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۸۷۸-۰۱۳-۹۶۲۰-۱.

۴۴. Tai, J., Yang, S. & Tan, H., ۲۰۰۸. Dispatching approach optimization of elevator group control system with destination floor guidance using fuzzy neural network. Proc.

World Congr. Intell. Control Autom. ۷۰۸۵–۷۰۸۸. doi:۱۰,۱۱۰۹/WCICA.۲۰۰۸,۴۵۹۴۰۱۶.

۴۵. Utgoff, P. E. & Connell, M. E., ۲۰۱۲. Real-Time Combinatorial Optimization for Elevator Group Dispatching. IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part A Syst. Humans ۴۲, ۱۳۰–۱۴۶. doi: ۱۰,۱۱۰۹/TSMCA.۲۰۱۱,۲۱۵۷۱۳۴.

۴۶. Tang, H. Y., Bao, D., Qi, W. G. & Zhang, Y. M., ۲۰۰۸. Optimization of elevator group control scheduling with multi-strategy switch. Proc. ۷th Int. Conf. Mach. Learn. Cybern. ICMLC ۴, ۲۰۶۷–۲۰۷۲. doi: ۱۰,۱۱۰۹/ICMLC.۲۰۰۸,۴۶۲۰۷۴۶.

ویرایشاری نشده