

کنند. تاکنون روش‌های مختلفی برای مکان‌یابی جرثقیل‌های ساختمانی انجام شده است؛ اما در مقابل، به چیدمان بهینه‌ی بالابرهای ساختمانی با استفاده از مدل‌های ریاضی توجه نشده است. لذا، در ادامه، پژوهش‌های مرتبط با چیدمان بهینه‌ی جرثقیل‌های ساختمانی به اختصار توضیح داده شده‌اند.

شبیه‌سازی با استفاده از رایانه، امکان تجسم سازه‌های دائمی و تأسیسات موقت در محیط ساخت و ساز و ارتباط بین آن‌ها را به خوبی می‌تواند فراهم کند.^[۱] 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.^[۱۱-۱۳] مدل مبتنی بر شیء،^[۱۴] ادغام قابلیت‌های گرافیکی رایانه با الگوریتم ژنتیک،^[۱۵] استفاده از مدل ۴ بعدی (دارای بُعد زمان)،^[۱۶] استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیا برای چیدمان تأسیسات موقت ساختمانی،^[۱۷ و ۱۸] و جرثقیل‌ها و دستگاه‌های ساخت بتن،^[۱۹] استفاده از مدل اطلاعات ساختمان برای تجزیه و تحلیل زمین-فضایی،^[۲۰] شبیه‌سازی رفتار همه‌ی عناصر موجود در محیط،^[۲۱] بهبود نظارت بصری مدیریت زنجیره‌ی تأمین مصالح،^[۲۲] و همچنین شبیه‌سازی دید اپراتور جرثقیل‌های ساختمانی از طریق ادغام مدل اطلاعات ساختمان و سیستم اطلاعات جغرافیا،^[۱] از جمله تلاش‌هایی هستند که پژوهشگران برای چیدمان جرثقیل‌های ساختمانی انجام داده‌اند.

همچنین در برخی پژوهش‌ها، علاوه بر شبیه‌سازی، به استفاده از ابزارهای بهینه‌سازی در چیدمان جرثقیل‌های ساختمانی توجه شده است؛ از جمله: ارائه‌ی مدل‌های ریاضی مختلف،^[۲۳-۲۸] استفاده از شبکه‌های عصبی،^[۲۹] استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک،^[۳۰-۳۲] الگوریتم ذرات زنبورعسل،^[۳۳] الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده،^[۳۴] استفاده از رویکرد شاخه و کران،^[۳۵] ادغام مدل اطلاعات ساختمان با دانش مهندسی،^[۳۶] و ابزارهای بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک،^[۱۲] و الگوریتم کرم شب‌تاب.^[۳۷] به عنوان یکی از نخستین تلاش‌ها، ژانگ و پن^[۹] (۲۰۲۱)، یک مدل خطی عدد صحیح مختلط برای بهینه‌سازی مکان فقط یک جرثقیل در محیط ساخت و ساز پیشنهاد کردند. ایشان در پژوهش دیگری توانستند مکان‌یابی هم‌زمان چند جرثقیل در محیط ساخت و ساز را نیز به مدل ریاضی خود اضافه کنند.^[۲۵] هوانگ^۳ و همکاران^[۱۳] (۲۰۱۱)، با توسعه‌ی مدل ریاضی ژانگ و همکاران توانستند حدود ۷٪ در زمان اجرای عملیات جرثقیل صرفه‌جویی بیشتری در مقایسه با مدل ژانگ و همکاران انجام دهند. با این حال، در روش‌های اخیر، ظرفیت جرثقیل‌ها نادیده گرفته شده است. بنابراین موسوی و همکاران^[۱۷] (۲۰۱۷)، با توسعه‌ی مدل هوانگ و همکاران^[۱۳] (۲۰۱۱) ظرفیت جرثقیل‌ها را به مدل ریاضی خود اضافه کردند. آن‌ها نشان دادند بی‌توجهی به ظرفیت جرثقیل‌ها می‌تواند هزینه‌های پروژه را افزایش دهد. فرض محدودیت ظرفیت جرثقیل‌ها توسط هوانگ و ونگ^[۳۵] (۲۰۱۸)، نیز مورد توجه قرار گرفت. آن‌ها همچنین در مدل ریاضی پیشنهادی به تقاضاهای اولویت‌دار در تحویل مصالح توجه کردند.

یهو و چو^[۳۹] (۲۰۰۶)، نشان دادند که نادیده گرفتن تأثیر مراحل مختلف ساخت‌وساز منجر به افزایش هزینه‌های استقرار جرثقیل می‌شود. لذا 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

مدت زمان استفاده از بالابرها به میزان مصالح موردنیاز در نقاط مختلف و تعداد جابجایی‌های بالابر بین طبقات ساختمان بستگی دارد.^[۴] همچنین، ظرفیت باربری بالابرها و ابعاد محل نصب نیز در 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 براساس 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 نقاط کاندید ممکن است به دلیل شرایط محیطی و محدودیت‌های ابعادی فضای در دسترس متفاوت باشد. برای مثال، اگر ترجیح بر نصب بالابر در فضای چاله‌ی آسانسور باشد، ابعاد کابین باید متناسب با فضای چاله تعیین شود. هزینه‌ی 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 نقطه‌ی نصب بهینه را با چالش روبرو می‌کند. تاکنون پژوهشگران برای مکان‌یابی بالابرهای ساختمانی از مدل‌های ریاضی بهره نگرفته‌اند. استفاده از مدل‌های ریاضی می‌تواند کارایی بالابرها را به میزان بیشینه برساند. لذا، نوشتار حاضر با ارائه‌ی یک مدل عدد صحیح خطی تلاش کرده است که چیدمان بهینه‌ی 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 و سپس، تعداد بالابرهای موردنیاز برای پروژه و مکان نصب آن‌ها به صورت بهینه تعیین می‌شود. مواردی از قبیل: ظرفیت بالابرها در جابجایی مصالح، رفع تمامی مصالح موردنیاز هر یک از طبقات، مدت زمان جابجایی افقی مصالح توسط کارگران، هزینه و مدت زمان جابجایی عمودی مصالح توسط بالابرها، هزینه‌ی نصب و اجاره‌ی بالابرها، و ایمنی نقاط کاندید در تعیین چیدمان بهینه‌ی بالابرها مورد توجه قرار گرفته است. مدل پیشنهادی تلاش می‌کند از طریق تعیین تعداد بهینه‌ی 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، مدل ذکرشده بر روی یک نمونه‌ی موردی که یک ساختمان ۲۰ طبقه واقع در شهر مشهد بود، آزمایش شده است، که در مرحله‌ی تجهیز کارگاه، نیازمند تعیین تعداد و محل نصب بالابرهای موردنیاز بوده است.

۲. تاریخچه‌ی پژوهش

مکان‌یابی بالابرها را می‌توان یک زیرمسئله از طراحی چیدمان محیط ساخت و ساز^۱ در نظر گرفت. چیدمان بهینه‌ی تجهیزات ساختمانی، مانند بالابرها و جرثقیل‌های ساختمانی در بهره‌وری، ایمنی، و کارایی تجهیزات ذکرشده مؤثر است.^[۶-۹] از این رو پژوهشگران تلاش کرده‌اند با استفاده از شبیه‌سازی و ابزارهای بهینه‌سازی، چیدمان مناسبی را برای محیط ساخت و ساز طراحی

^۴ Huang & Wong

^۵ Yeo & Ning

^۱ Construction site layout planning

^۲ Zhang & Pan

^۳ Huang

صفحه‌بندی ذخیره‌سازی در طبقات تکمیل‌شده‌ی یک ساختمان، حرکت‌های افقی بین سلول‌های ذخیره‌سازی و سیستم بالابری و همچنین حمل و نقل عمودی مواد در طبقات را به صورت هم‌زمان بررسی کرده‌اند.

۲.۲. زمان‌بندی فعالیت‌های بالابر

جلالی یزدی و همکاران (۲۰۱۹)^[۴۰] یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی سفر یک سیستم بالابر تکی ارائه دادند، که هدف آن کمینه‌سازی کل زمان سفر کابین آسانسور بوده است. این موضوع باعث بهره‌وری بیشتر کارگران و پیشرفت بهتر ساخت‌وساز می‌شود. ایشان (۲۰۱۸)^[۴۱] در پژوهش دیگری روشی برای بهینه‌سازی عملکرد آسانسورهای ساختمانی در پروژه‌های ساختمانی چندطبقه ارائه کردند؛ که با تأکید بر زمان اوج صبحگاهی، سیستم آسانسور را برای برآورد هم‌زمان و مؤثر نیازهای کارگران در طبقات مختلف تنظیم می‌کرد. این هدف با در نظر گرفتن ویژگی‌ها و محدودیت‌های عمومی کابین آسانسور، برنامه‌ی زمان‌بندی فعالیت‌های ساخت‌وساز، شرایط سایت و ویژگی‌های منابع محقق شده است. هدف مدل مذکور، کمینه‌سازی زمان کل جابجایی عمودی تا طبقات سرویس با شناسایی دینامیکی نحوه‌ی تخصیص بار بهینه به کابین آسانسور و تهیه‌ی بهترین برنامه‌ی بازدید از طبقات بوده است. بیمورگیا^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۶)^[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 سازگاری با مسئله‌ی مذکور داشتند، استفاده کرده‌اند. الگوریتم ژنتیک با مدیریت تماس‌هایی که در سیستم ثبت می‌شوند، یک برنامه‌ی سفر برای آسانسور ایجاد می‌کند. الگوریتم‌های اخیر برای دو تنظیم مختلف ساختمان (ترافیک و تعداد طبقات) پیاده‌سازی و ارزیابی شده‌اند. نتایج نشان دادند که اعمال تنظیمات مناسب برای الگوریتم باعث بهبود قابل توجه در عملکرد آن می‌شود.

۳.۲. زون‌بندی طبقات

جونگ^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۷)^[۴۳] در پژوهش خود به توسعه‌ی یک مدل ریاضی برای ارائه‌ی زون‌بندی بهینه‌ی بالابر پرداختند. برای پرداختن به چالش اخیر، آنان مفهوم زون‌بندی دینامیک را معرفی کردند، که می‌تواند استفاده از تجهیزات حمل‌ونقل عمودی را بهینه سازد و با در نظر گرفتن تقاضای متغیر بالابر در طول پیشرفت پروژه، زمان حمل‌ونقل کارگران را به میزان کمینه برساند. کاربرد مدل اخیر در یک پروژه‌ی ساختمانی نشان داد که زون‌بندی براساس تقاضای متغیر بالابر می‌تواند زمان حمل و نقل را تا ۴۰٪ کاهش دهد. در مرحله‌ی طراحی یک ساختمان، تعداد آسانسورها، ظرفیت، و سرعت نامی آن‌ها انتخاب می‌شود. در صورتی که ساختمان مرتفع باشد، زون‌بندی آسانسورها بسیار رایج است. روکوکوسکی^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۵)^[۴۴] در پژوهش خود یک برنامه‌ی برنامه‌نویسی پویا برای یافتن راه‌حل بهینه‌ی مسئله‌ی استاتیک زون‌بندی معرفی کردند، که شرایط ترافیک اوج را در نظر

موردنیاز پروژه در فرآیند بهینه‌سازی، از جمله نقاط قوت روش یهو و چو (۲۰۰۶) محسوب می‌شوند. ایشان با بررسی یک نمونه‌ی واقعی مربوط به ساختمان یک دانشگاه نشان دادند که استفاده از مدل پیشنهادی‌شان منجر به کاهش ۱۸/۷٪ هزینه‌ها شده است.

جی و لیتی^۱ (۲۰۲۰)^[۱۰] با ارائه‌ی یک مدل ریاضی تلاش کردند از طریق کاهش فعالیت جرثقیل‌ها در مناطق هم‌پوشانی، مخاطرات ایمنی جرثقیل‌ها را کاهش دهند. ریگا^۲ و همکاران (۲۰۲۰)^[۱۵] نیز با در نظر گرفتن فاصله‌ی ایمن بین جرثقیل‌های هم‌پوشان تلاش کردند تا ایمنی پروژه را افزایش دهند. وو^۳ و همکاران (۲۰۲۰)^[۳۲] و دینسنتک^۴ (۲۰۲۳)^[۱۶] ضمن توجه به فاصله‌ی ایمن تلاش کردند از طریق تنظیم ارتفاع جرثقیل‌ها، توقف‌ها و مخاطره‌های احتمالی ناشی از برخورد جرثقیل‌ها با یکدیگر را کاهش دهند.

علاوه بر جرثقیل‌های ساختمانی، بالابرها نیز در چیدمان محیط ساخت و ساز تأثیرگذار هستند. اگرچه پژوهشی در مورد مکان‌یابی بهینه‌ی بالابرها در ساختمانی تاکنون انجام نشده است، اما در ادامه، به‌منظور تبیین بهتر موضوع، پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه‌ی مدیریت و بهینه‌سازی بالابرها در ساختمانی بررسی شده‌اند، که عموماً در این موضوعات بوده‌اند:

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

۱.۲. شبیه‌سازی فرآیندهای بالابری

شین^۵ و همکاران (۲۰۱۱)^[۳۸] به‌منظور به‌دست آوردن الگوی عملیاتی بالابر، اطلاعات تاریخیچه‌ی عملیاتی را از طریق حسگر متصل به آسانسور و با وسیله‌ی به نام سیستم اطلاعات آسانسور جاسازی‌شده^۶ ذخیره کردند. لذا برنامه‌ی کاری بالابر برای روز بعد براساس الگوهای عملیاتی آن در ۴ روز اخیر به‌دست آمد و زون‌بندی عمودی بهینه‌ی بالابر به‌وسیله‌ی آن مشخص شد. جونگ^۷ و همکاران (۲۰۱۷)^[۳۹] در پژوهش خود با هدف بهینه‌سازی سیستم اخیر، به توسعه‌ی روش شبیه‌سازی مبتنی بر عامل^۸ پرداختند؛ که در آن، عوامل داخلی و خارجی مؤثر در عملکرد سیستم شناسایی و سپس مدل‌سازی قوانین رفتاری اجزاء سیستم (مانند بالابرها و کارگران) انجام شده است. در پژوهشی دیگر، کامله^۹ و همکاران (۲۰۱۴)^[۴] به بررسی عملکرد بالابر و تأثیر آن در میزان تأخیر کارگران پرداخته‌اند. ایشان، ابتدا یک مدل شبیه‌سازی رویداد گسسته^{۱۰} را پس از جمع‌آوری داده‌ها توسعه دادند و سپس دریافتند که ترکیبی از ورودی‌های تأخیری و تقسیم مناطق برای عملیات بالابری با کاهش زمان انتظار کارگران می‌تواند باعث بهبود عملیات بالابری شود. استفاده‌ی صحیح از فضای ذخیره‌سازی موقت در سایت‌های ساختمانی باعث افزایش سرعت حمل مواد ساختمانی و کاهش هزینه‌های حمل و نقل می‌شود. لذا هوانگ^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۰)^[۱] در پژوهش خود با طراحی یک برنامه‌ی

^۸ Agent-based model

^۹ Kamleh

^{۱۰} discrete-event simulation.

^{۱۱} Huang

^{۱۲} Beamurgia

^{۱۳} Jung

^{۱۴} Ruokokoski

^۱ Ji & Leite

^۲ Riga

^۳ Wu

^۴ Dienstknecht

^۵ Shin

^۶ Embedded Lift Information System

^۷ Jung

کند. اگرچه پژوهش‌های مختلفی در مورد بالابرهای ساختمانی انجام شده است، اما مرور ادبیات نشان می‌دهد مکان‌یابی بهینه‌ی بالابرهای ساختمانی در پژوهش‌های پیشین نادیده گرفته شده است. لذا، در نوشتار حاضر با ارائه‌ی یک مدل عدد صحیح خطی برای چیدمان بهینه‌ی بالابرهای ساختمانی تلاش شده است که شکاف دانشی موجود را پوشش دهد. مدل پیشنهادی ضمن تعیین مکان بهینه‌ی بالابرها، تعداد بالابرهای موردنیاز را نیز به طور بهینه تعیین می‌کند. این موضوع از افزایش هزینه‌های کاری و یا بیکارماندن آن‌ها جلوگیری می‌کند. همچنین مدل پیشنهادی از طریق توزیع بهینه‌ی فعالیت‌های بالابری، تعداد روزهای کاری را بهینه می‌سازد و نیز به موارد مخاطرات ایمنی، جابجایی افقی مصالح توسط کارگران، و محدودیت فضای محل نصب بالابر در تعیین بهینه‌ی تعداد بالابرهای موردنیاز توجه شده است.

۳. بیان مسئله

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، در پژوهش‌های پیشین تاکنون به تعیین تعداد بالابرهای بهینه‌ی موردنیاز یک پروژه و محل نصب آن‌ها پرداخته نشده است. در مقابل، چیدمان بهینه‌ی جرتقیل‌های ساختمانی تا حد زیادی بررسی شده است. مسئله‌ی چیدمان بهینه‌ی بالابرهای ساختمانی نیز تا حدودی می‌تواند شبیه به مسئله‌ی چیدمان بهینه‌ی جرتقیل‌ها باشد. از این رو، ابتدا به اختصار به معرفی بالابر و جرتقیل و همچنین تفاوت بین آن‌ها پرداخته شده است.

در شکل ۱، جرتقیل و بالابر پروژه‌ی مطالعاتی مشاهده می‌شود. از بالابرها برای انتقال افقی مصالح و نیروی انسانی در طبقات مختلف یک ساختمان استفاده می‌شود. جرتقیل‌ها در مقایسه با بالابرها می‌توانند مصالح را هم به صورت افقی و هم به صورت عمودی منتقل کنند. هر یک از بالابرها و جرتقیل‌ها، سرعت و ظرفیت متفاوتی دارند. معمولاً برای حمل مصالح سنگین‌تر از جرتقیل‌ها استفاده می‌شود.

با توجه به کارایی گسترده‌ی بالابرهای ساختمانی در پروژه‌های بلندمرتبه، با تعیین تعداد بالابرها و محل نصب آن‌ها، کارایی سیستم بالابری بهبود بخشیده می‌شود، 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 می‌شود. صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های مربوط به عملکرد بالابرها از مزایای دیگر بهینه‌سازی تعداد و محل



شکل ۱. جرتقیل و بالابر ساختمانی نصب‌شده در پروژه‌ی مطالعاتی.

می‌گیرد. جواب مسئله‌ی 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.

۴.۲. کنترل گروهی آسانسورها

تای^۱ و همکاران (۲۰۰۸)^[۴۴] در مطالعه‌ی خود به بهبود روش کنترل گروهی آسانسورها با استفاده از راهنمایی طبقه‌ی مقصد پرداختند. در روش اخیر، اطلاعاتی که از ثبت تماس‌ها در سالن‌ها و انتخاب طبقه‌ی مقصد توسط مسافران به دست می‌آید، ترکیب و برای جلب جریان مسافر به‌طور مؤثر استفاده می‌شود. از شبکه‌ی عصبی فازی^۲ برای بهبود چند هدف و ارائه‌ی روش منطقی توزیع استفاده می‌شود. بامونواراچی^۳ و همکاران (۲۰۱۵)^[۴۵] در پژوهش خود مسئله‌ی برنامه‌ریزی گروهی آسانسورها را با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، بررسی و به مصرف انرژی پایین در سیستم‌های آسانسور به‌عنوان ویژگی مطلوب توجه کردند. ایشان، ابتدا روشی را براساس مدل برنامه‌ریزی سفر^۴ و الگوریتم شاخه و حد^۵ استقلالی توسعه دادند و سپس با اضافه کردن اندازه‌گیری مصرف انرژی به معیار بهینه‌سازی، معیار جدیدی برای ارزیابی به دست آوردند. نتایج نشان‌دهنده‌ی بهبود مصرف انرژی با حفظ تقریبی زمان خدمت مدل‌های قبلی بوده است. در نتیجه‌ی پژوهش اخیر، مصرف انرژی ۲۰٪ کاهش یافته و زمان خدمت نیز ۱۳٪ بهبود پیدا کرده است. یوتوگوف^۶ و همکاران (۲۰۱۲)^[۴۶] نیز یک الگوریتم جدید به نام مدیریت آسانسورها ارائه کردند، که به گونه‌ی طراحی شده بود که کارایی آسانسورها را برای تمام افرادی که از آن‌ها استفاده می‌کردند، به میزان بیشینه می‌رساند. برای مقایسه و درک بهتر، مسئله‌ی ارسال آسانسور در یک سیستم جداگانه با دانستن تمام برنامه‌های سفر افراد، قبل از زمان مشخص شده بازسازی شده است، تا نشان داده شود که بهترین کارایی قابل دستیابی چگونه است. همچنین تانگ^۷ و همکاران (۲۰۱۱)^[۴۶] با هدف بهبود کارایی و کاهش مصرف انرژی آسانسورها به بررسی راهبردهای کنترل گروهی آسانسورها پرداختند و یک روش برنامه‌ریزی براساس اطلاعات مسافران ارائه کردند که با استفاده از یک حسگر ویژه، تعداد مسافرانی که در انتظار آسانسور هستند، را شناسایی می‌کند. این روش می‌تواند وضعیت ترافیک سیستم کنترل گروهی آسانسورها را به‌صورت لحظه‌ی تشخیص دهد. علاوه بر این، دو الگوریتم برنامه‌ریزی با استفاده از تئوری کنترل فازی^۸ توسعه داده شده است، که با به‌کارگیری یک راهبرد سوئیچ چندگانه^۹، در زمان فراخوانی جدید آسانسور برنامه‌ریزی می‌شود.

مرور ادبیات نشان می‌دهد که پژوهش‌های مربوط به چیدمان محیط ساخت و ساز عمدتاً بر روی چیدمان جرتقیل‌ها تمرکز کرده‌اند. این در حالی است که بالابرهای ساختمانی نیز نقش مهمی در مسئله‌ی چیدمان محیط ساخت و ساز می‌توانند داشته باشند. به‌طور خاص، پس از دیوارچینی و اتمام مرحله‌ی سفت‌کاری دسترسی به فضاهای داخلی توسط جرتقیل بسیار محدود و نقش بالابر در انتقال مصالح پررنگ‌تر می‌شود. جابجایی نیروی انسانی نیز به دلایل ایمنی فقط با بالابر امکان‌پذیر است. افزون بر این، نصب بالابرهای ساختمانی در مکان‌های نامناسب می‌تواند انتقال افقی مصالح توسط کارگران را دشوار

^۶ Utgoff

^۷ Tang

^۸ fuzzy control theory.

^۹ multi-strategy switch method.

^۱ Tai

^۲ Fuzzy Neural Network

^۳ Bamunuarachchi

^۴ trip scheduling model

^۵ branch and bound algorithm

۱۰. تعداد روزهای کاری پروژه در فرآیند بهینه‌سازی تعیین می‌شود. این موضوع می‌تواند منجر به توزیع متوازن فعالیت‌های بالابری بین بالابرها نصب‌شده در ساختمان شود.

۴. مدل توسعه داده‌شده

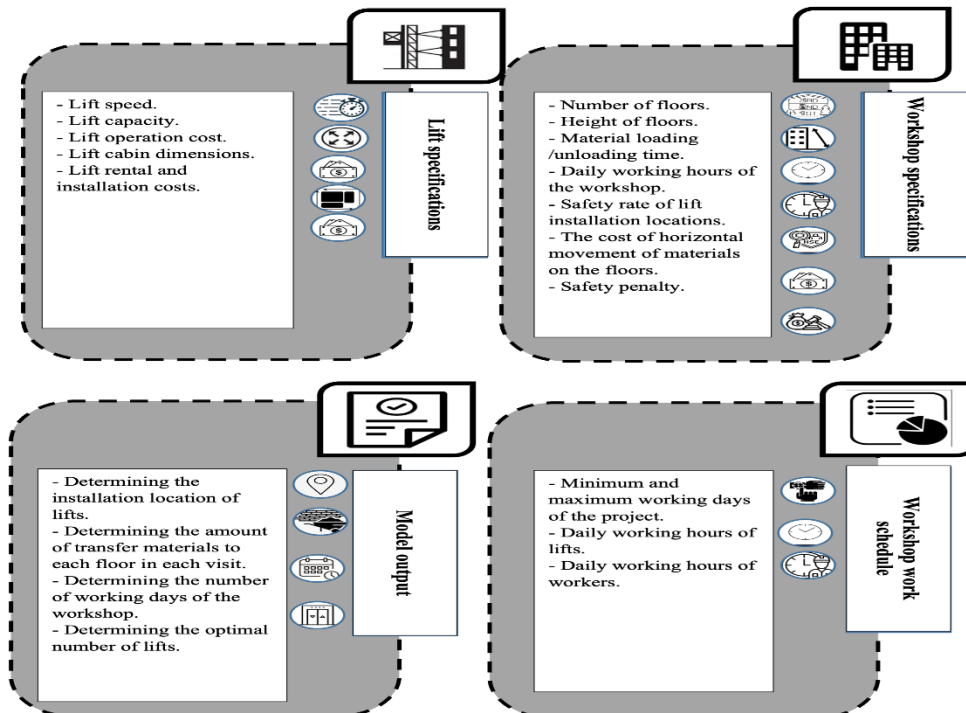
مسئله‌ی بهینه‌سازی تعریف‌شده در مورد مکان‌یابی و تعیین تعداد بالابرها کارگاهی به شکلی است که به‌صورت بهینه تعیین می‌کند که چندبالبر باید در کارگاه نصب شود و در کجا قرار داده شوند تا در کلیه‌ی نقاط کارگاه به‌طور مؤثری خدمات ارائه دهند. به‌طور کلی، هدف مسئله‌ی بهینه‌سازی حاضر، به‌دست‌آوردن تعداد و موقعیت بهینه‌ی آسانسورهاست. این هدف ممکن است شامل کاهش زمان انتظار مسافران، کمینه‌ساختن هزینه‌های نصب و نگهداری آسانسورها، یا بهینه‌سازی سایر عوامل مرتبط با کارگاه باشد. محدودیت‌های مسئله‌ی بهینه‌سازی می‌توانند مانند ظرفیت آسانسورها، بیشینه‌ی زمان انتظار مجاز برای مسافران، محدودیت‌های فضایی برای نصب آسانسورها، و سایر محدودیت‌های مربوط به ساختار و نیازهای کارگاه باشند. برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی مکان‌یابی و تعیین تعداد آسانسورهای کارگاهی، می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد. یکی از روش‌های معروف برای حل مسائل بهینه‌سازی خطی، روش سیمپلکس^۱ است. الگوریتم سیمپلکس، یک الگوریتم بهینه‌سازی عددی است که برای پیدا کردن جواب بهینه در مسائل بهینه‌سازی خطی استفاده می‌شود و قادر است به‌صورت مؤثر و بهینه، جواب‌های بهینه برای مسائل بهینه‌سازی خطی را پیدا کند.

مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن مفروضات بالا، مکان و تعداد بهینه‌ی بالابرها موردنیاز پروژه را مشخص می‌کند. در شکل ۲، فرآیند سیستمی برنامه‌ریزی بالابری مشاهده می‌شود.

هدف مدل پیشنهادی، کاهش هزینه‌های مربوط به اجاره، نصب، و هزینه‌ی کاری بالابر در طی روزهای کاری پروژه است. در ابتدا، به بررسی مجموعه‌ها،

نصب بالابرهاست. در بخش حاضر، یک مدل عدد صحیح خطی برای تعیین بهینه‌ی مکان و تعداد بالابرها موردنیاز یک پروژه‌ی ساختمانی ارائه شده است. مفروضات و ویژگی‌های مدل پیشنهادی به این شرح است:

۱. نوع بالابر استفاده‌شده 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. طبقه‌ی همکف ساختمان به‌عنوان مکان عرضه‌ی مصالح در نظر گرفته می‌شود.
۴. هر یک از طبقات می‌توانند انواع مختلفی از مصالح را نیاز داشته باشند، که تمامی آن‌ها باید کاملاً توسط بالابرها پوشش داده شوند.
۵. بالابر در هر سفر، یک نوع از مصالح را از نقطه‌ی عرضه به یک طبقه منتقل می‌کند و سپس به نقطه‌ی عرضه باز می‌گردد.
۶. ظرفیت حمل مصالح توسط شرکت سازنده‌ی بالابر مشخص می‌شود و در هر سفر باید رعایت شود. همچنین به‌دلیل محدودیت‌های ابعادی، بالابرها در صورت نصب در هر یک از نقاط کاندید، ظرفیت‌های متفاوت و به‌تبع آن سرعت حرکت متفاوت دارند.
۷. زمان جابجایی بین طبقات با توجه به سرعت ثابت حرکت بالابر و ارتفاع طبقات محاسبه می‌شود.
۸. هزینه‌های مربوط به نصب بالابر، هزینه‌ی کاری، و هزینه‌ی اجاره با توجه به ظرفیت بالابر و مکان نصب در نظر گرفته می‌شود. کاهش هزینه‌های ذکرشده در تعیین مکان و تعداد بالابرها موردنیاز مورد توجه قرار می‌گیرد.
۹. کاهش مقدار جابجایی دستی (افقی) مصالح در هر طبقه توسط کارگران نیز در تعیین مکان و تعداد بالابرها موردنیاز در نظر گرفته می‌شود. مقدار جابجایی افقی برای هر نقطه‌ی کاندید به‌صورت میانگین و با ملاحظات تجربی و آماری به‌دست می‌آید.



شکل ۲. نمودار سیستمی مدل بهینه‌سازی بالابر.

^۱ Simplex

محدودیت ۱، رفع کامل نیاز مصالح تمام طبقات را تضمین می‌کند. هر یک از بالابرها بسته به ویژگی مکان‌های کاندید نصب (ابعاد محل نصب، اولویت‌های کارفرما، و مسائل ایمنی)، ظرفیت مشخصی برای جابجایی مصالح دارند. لذا بالابرها برای رفع کامل درخواست مصالح هر یک از طبقات ساختمان باید چند بار بین نقطه‌ی 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 بالابرها نصب‌شده مشخص می‌کند. محدودیت 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 نقطه‌ی عرضه باز می‌گردد، مدت‌زمان جابجایی با فرض یکسان‌بودن زمان حرکت رو به بالا و پایین بالابر در عدد ۲ ضرب می‌شود؛ که در آن، زمان جابجایی بالابر نصب‌شده در هر یک از نقاط کاندید مطابق رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$t_{jl}^y = (H_j - h_l) / V_y \quad \forall l \in L \quad (10)$$

پس از تحویل مصالح به هر طبقه توسط بالابرها، کارگران مصالح را به بخش‌های موردنیاز ساختمان به‌صورت دستی منتقل می‌کنند. مقدار جابجایی انجام‌شده توسط کارگران به فاصله‌ی محل نصب بالابر از مکان‌های موردنظر بستگی دارد. محدودیت ۴، مدت زمان جابجایی افقی مصالح در هر طبقه را از

پارامترها، و متغیرهای مسئله پرداخته شده است. در جدول ۱، تمامی موارد مذکور ارائه شده است.

محدودیت های مدل پیشنهادی به صورت روابط ۱ الی ۹ است:

$$\sum_{l \in L} x_{jml} \geq d_{jm} \quad \forall j \in J, m \in M \quad (1)$$

$$x_{jml} \leq cap_l \times n_{jml} \quad \forall j \in J, m \in M, l \in L \quad (2)$$

$$T_l^y = 2 \times \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} n_{jml} \times t_{jl}^y \quad \forall l \in L \quad (3)$$

$$T_l^x = \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} n_{jml} \times t_l^x \quad \forall l \in L \quad (4)$$

$$y_l \times O_1 \geq x_{jml} \quad \forall j \in J, m \in M, l \in L \quad (5)$$

$$T_m \geq T_l^y \quad \forall l \in L \quad (6)$$

$$Days = T_m / D_{avg} \quad (7)$$

$$Days \geq L_{min} \quad (8)$$

$$Days \leq L_{max} \quad (9)$$

جدول ۱. نمادهای به‌کاررفته و مفهوم آنها.

نماد	مفهوم	نماد	مفهوم
j	اندیس طبقات	r_l	نرخ ایمنی نقطه‌ی کاندید (l)
m	اندیس مصالح	a	ثابت ایمنی
l	اندیس نقاط کاندید نصب بالابر	O_1	ثابت عددی بزرگ
d_{jm}	.	O_2	ثابت عددی بزرگ
cap_l	ظرفیت بالابر نصب‌شده در مکان کاندید l	x_{jml}	مقدار مصالحی که بالابر قرارگرفته در مکان کاندید l از مصالح نوع m به طبقه‌ی j تحویل می‌دهد
t_{jl}^y	مدت زمان جابجایی بالابر نصب‌شده در مکان کاندید l بین نقطه‌ی عرضه و طبقه‌ی j است	n_{jml}	تعداد دفعاتی سفر بالابر نصب‌شده در مکان کاندید l برای رفع تقاضای ماده‌ی m به طبقه‌ی j
t_l^x	مدت زمان جابجایی افقی مصالح در صورت نصب بالابر در مکان کاندید l	T_l^y	مجموع مدت زمان جابجایی عمودی بالابر قرار گرفته‌شده در مکان کاندید l
D_{avg}	مدت زمان مجاز فعالیت روزانه‌ی 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 است.
L_{max}	کران بالای تعداد روزهای کاری مجاز	T_m	بیشترین زمان استفاده از بالابرها
H_j	بیانگر ارتفاع طبقه‌ی j	$Days$	تعداد روزهای کاری پروژه
h_l	ارتفاع نقطه‌ی عرضه	c^i	هزینه‌ی نصب بالابرها
V_y	سرعت ثابت حرکت بالابر	c^r	هزینه‌ی اجاره‌ی بالابرها
c_l^i	هزینه‌ی نصب بالابر l در واحد زمان	c^w	هزینه‌ی عملیاتی بالابرها
c_l^r	هزینه‌ی اجاره‌ی بالابر l در واحد زمان	c^h	هزینه‌ی جابجایی افقی مصالح در طبقات
c_l^w	هزینه‌ی عملیاتی بالابر l در واحد زمان	SR	جریمه‌ی ایمنی
c_l^h	هزینه‌ی جابجایی افقی مصالح در طبقات در واحد زمان	A_l	متغیر خطی‌ساز

۳.۳. خطی سازی مدل

تمامی روابط ارائه شده در تابع هدف و محدودیت‌های مدل پیشنهادی به جز رابطه ی ۱۴، به صورت خطی هستند. معمولاً حجم محاسبات و مدت زمان حل یک مدل ریاضی با خطی سازی آن کاهش پیدا می‌کند. از این رو در ادامه، رابطه ی ۱۴، با استفاده از روش‌های بهینه سازی خطی شده است. ابتدا رابطه ی ۱۴ به صورت خطی مطابق رابطه ی ۱۸ بازنویسی می‌شود:

$$c^r = D_{avg} \times (\sum_{l \in L} c_l^r \times A_l) \quad \forall l \in L \quad (18)$$

که در آن، باید مقدار A_l برابر با حاصل ضرب $y_l \times Days$ باشد. روابط ۱۹ الی ۲۱، تساوی این دو مقدار را تضمین می‌کند.

$$A_l \leq O_2 \times y_l \quad (19)$$

$$A_l \leq Days \quad (20)$$

$$A_l \leq Days - (1 - y_l) \times O_2 \quad (21)$$

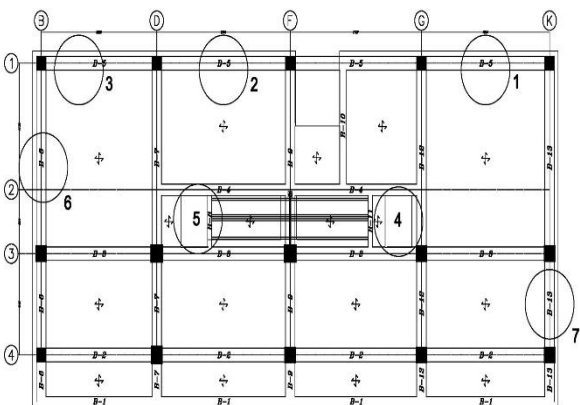
با توجه به اینکه A_l در تابع هدف کمینه سازی قرار دارد، به منظور کاهش تعداد قیدهای مدل می‌توان فقط از رابطه ی ۲۰ برای برقراری تساوی A_l با حاصل ضرب $y_l \times Days$ استفاده کرد. در این صورت، تعداد قیدها به اندازه $2 \times l$ کاهش پیدا می‌کند. کاهش تعداد قیدها می‌تواند منجر به کاهش تعداد محاسبات و در نتیجه کاهش مدت زمان حل مدل پیشنهادی شود. مقدار O_2 را نیز می‌توان مشابه O_1 (رابطه ی ۵) محاسبه کرد. رابطه ی ۲۲، برای محاسبه ی مقدار O_2 پیشنهاد شده است:

$$O_2 = L_{max} + 1 \quad (22)$$

۵. مطالعه ی موردی، ساختمان مسکونی ۲۰ طبقه

اطلاعات مورد نیاز برای بررسی مدل از ساختمانی واقع در شهر مشهد تهیه شده است. در شکل ۳، مکان‌های کاندید برای نصب بالابر مشاهده می‌شود؛ که در آن، مکان‌ها به عنوان نقطه ی کاندید در نظر گرفته شده‌اند. نقاط ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ در نمای بیرونی پروژه و نقاط ۴ و ۵ در چاله ی آسانسور قرار دارند. جهت پیشبرد پروژه، ۵ نوع محصول نیاز به جابجایی توسط بالابر دارند و مابقی محصولات مورد نیاز به صورت دستی و یا با استفاده از تاورکرین منتقل شده‌اند. 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 ارائه شده است.

اطلاعات مربوط به ظرفیت وزنی بالابر (بر حسب کیلوگرم) در مکان‌های کاندید ۱ الی ۷، سرعت حرکت بالابر (بر حسب متر بر دقیقه)، میانگین جابجایی افقی



شکل ۳. پلان جانمایی مکان‌های کاندید نصب بالابر.

محل نصب بالابر تا محل‌های استفاده ی آن محاسبه می‌کند. مکان نصب بالابر توسط رابطه ی 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. لذا، رابطه ی ۱۱ برای محاسبه ی مقدار O_1 پیشنهاد شده است:

$$O_1 \geq d_{jm} + 1 \quad (11)$$

محدودیت‌های ۶ الی ۹، به منظور محاسبه ی تعداد روزهای کاری پروژه به مدل پیشنهادی افزوده شده است. معمولاً تعداد روزهای کاری پروژه نمی‌تواند خیلی کم (به دلایلی مانند سرعت عوامل مؤثر در ساخت و ساز، از جمله: سرعت نیروی انسانی، سرعت تجهیزات، و سرعت تأمین مصالح) یا خیلی زیاد (به دلایلی مانند محدودیت در قرارداد کاری و افزایش هزینه‌های ناشی از اجاره ی تجهیزات و دستمزد نیروی انسانی) باشد. رابطه‌های ۸ و ۹، تضمین می‌کنند که فعالیت‌های بالابری در تعداد روزهای پیش‌بینی شده تکمیل شوند. کران پایین در نظر گرفته شده در رابطه ی ۸ می‌تواند از نصب تعداد بیش از نیاز بالابر در ساختمان و در نتیجه از افزایش هزینه‌ها جلوگیری کند.

۲.۳. تابع هدف

مدل پیشنهادی، تعداد و مکان بالابرها را با هدف کاهش هزینه‌هایی، مانند: هزینه ی نصب بالابر، هزینه ی اجاره ی روزانه ی بالابر، و هزینه ی مصرف انرژی بالابر، کاهش جابجایی‌های افقی در طبقات، و کاهش مخاطرات ایمنی تعیین می‌کند. از این رو تابع هدف به صورت روابط ۱۲ الی ۱۷ پیشنهاد می‌شود:

$$z = \min(c^i + c^r + c^w + c^h + SR) \quad (12)$$

$$c^i = \sum_{l \in L} c_l^i \times y_l \quad \forall l \in L \quad (13)$$

$$c^r = D_{avg} \times (\sum_{l \in L} c_l^r \times y_l \times Days) \quad \forall l \in L \quad (14)$$

$$c^w = \sum_{l \in L} \sum_{j \in J} c_l^w \times T_l^y \quad \forall j \in J, l \in L \quad (15)$$

$$c^h = \sum_{l \in L} \sum_{j \in J} c_l^h \times T_l^x \quad \forall j \in J, l \in L \quad (16)$$

$$SR = a \times (\sum_{l \in L} r_l \times y_l) \quad \forall l \in L \quad (17)$$

رابطه ی ۱۲، تابع هدف مدل پیشنهادی را مشخص می‌کند. مؤلفه ی SR با هدف افزایش ایمنی و سهولت کاربری بالابرها به تابع هدف افزوده شده است. ضریب a در رابطه ی ۱۷، بین هزینه‌ها و جریمه‌های ایمنی تعادل برقرار می‌کند. با افزایش پارامتر a مدل پیشنهادی می‌تواند مکان‌های ایمن‌تری را انتخاب کند. در حالی که با کاهش مقدار a می‌توان به جواب اقتصادی‌تری دست پیدا کرد. رابطه ی ۱۳، مجموع هزینه ی نصب بالابرها را محاسبه می‌کند. رابطه ی ۱۴، هزینه ی اجاره ی بالابرها را بر اساس تعداد روزهای کاری محاسبه و در تابع هدف تلاش می‌کند هزینه ی اجاره را از طریق کاهش تعداد روزهای کاری پروژه کاهش دهد. لذا، با توجه به روابط ۶ الی ۹، مدل پیشنهادی تلاش می‌کند با توزیع مناسب فعالیت‌های بالابری بین بالابرهای نصب‌شده، تعداد روزهای کاری پروژه را کاهش دهد. رابطه ی ۱۵، مجموع هزینه ی کاری بالابرها، شامل هزینه ی مصرف برق و هزینه ی تعمیر و نگهداری را محاسبه می‌کند. رابطه ی ۱۶، برای محاسبه ی مجموع هزینه ی جابجایی افقی مصالح در طبقات ساختمان به مدل اضافه شده است. مجموع جریمه‌های ایمنی از رابطه ی ۱۷ به دست می‌آید. هر چه مخاطرات ایمنی یک مکان بیشتر باشد، باید مقدار r_l بیشتری برای آن نقطه در نظر گرفته شود.

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	۸۷۰	۴۰۰	۳۶۰	۱۰۴۰
۲۰	۱۶	۶۴	۶۰۰	۳۶۰	۸۴۰	۲۱۴	۴۶۰

کارگاهی در چاله‌ی آسانسور پروژه بوده است. چاله‌ی آسانسور دارای محدودیت ابعادی است و بالابر نصب‌شده در این نقطه ظرفیت کمتری نسبت به سایر نقاط خواهد داشت. همچنین محل چال آسانسور، به دلیل قرارگرفتن در مرکز پلان، از خیابان‌های اطراف، که محل تخلیه‌ی مصالح است، دورتر بوده و هزینه‌ی بابت جابجایی مصالح در این مرحله نیز باید در نظر گرفته شود. به لحاظ فنی نقاط قرارگرفته در نمای پروژه برای نصب بالابر مناسب‌تر هستند، زیرا تا پایان پروژه نیازی به جابجایی مجدد بالابر نیست و فقط مرحله‌ی نماکاری آن قسمت تا انتهای کاربری بالابر متوقف می‌شود. ولی در صورت نصب بالابر در چاله‌ی آسانسور، نصب آسانسورهای اصلی پروژه، که از مراحل مهم تکمیل فرآیند ساخت هستند، به تعویق می‌افتد. بنابراین، پارامتری با عنوان نرخ ایمنی مکان‌های کاندید به مدل‌سازی افزوده می‌شود، که نقاط کاندید نصب را از منظر ملاحظات ایمنی و شهرداری، سهولت دسترسی، و اولویت‌های کارفرما رتبه‌بندی می‌کند. نرخ ایمنی براساس معیارهای تجربی برای مکان‌های کاندید در جدول ۳ مشخص شده است. به عنوان مثال، در نمونه‌ی مطالعاتی، نصب بالابر در نما در مقایسه با چاله‌ی آسانسور ترجیح داده می‌شود. همچنین مکان‌های کاندید موجود در نما از نظر سهولت دسترسی با یکدیگر متفاوت هستند.

۶. بررسی و آزمایش

در ادامه، مدل پیشنهادی با استفاده از نمونه‌ی مطالعاتی بررسی و آزمایش شده است. مدل پیشنهادی در نرم‌افزار IBM CPLEX Optimization Studio پیاده‌سازی و با حل‌کننده‌ی CPLEX در سیستمی با پردازنده‌ی ۳ هسته‌یی، ۸ گیگابایت رم، و سیستم عامل مایکروسافت ویندوز ۱۰ حل شده است. در ادامه، نتایج حاصل از پیاده‌سازی گزارش شده است.

مصالح در طبقات (بر حسب متر)، ابعاد کابین (بر حسب متر)، هزینه‌ی نصب (بر حسب تومان)، هزینه‌ی اجاره، و هزینه‌ی کاری در جدول ۳ ارائه شده است؛ که در آن، ظرفیت بالابر براساس فضای محل نصب آن تعیین شده است. برای نمونه، مکان‌های کاندید ۴ و ۵، که در چاله‌ی آسانسور قرار داشتند، به دلیل فضای کوچک‌تر چاله‌ی آسانسور، ابعاد کابین و در نتیجه ظرفیت بالابری کمتری از سایر مکان‌های کاندید داشتند. تفاوت سرعت حرکت بالابر در مکان‌های کاندید نیز به دلیل تفاوت ظرفیت بالابر است. جابجایی افقی مصالح به صورت دستی توسط کارگران انجام می‌شود. در جدول ۳، مقدار جابجایی‌های افقی با توجه موقعیت نصب بالابر و به صورت میانگین محاسبه شده است. سرعت حرکت افقی یک کارگر، ۱/۴ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. بر این اساس می‌توان طبق رابطه‌ی ۲۳، مقدار t_i^x را محاسبه کرد.

$$t_i^x = x_i^{avg} / V_x \quad \forall l \in L \quad (23)$$

که در آن، x_i^{avg} بیانگر میانگین مقدار جابجایی افقی مصالح در طبقات در صورت نصب بالابر در نقطه‌ی کاندید l و V_x نیز سرعت متوسط حرکت کارگر در حالت حمل بار است (۱/۴ متر بر ثانیه). همچنین هزینه‌ی جابجایی افقی برای هر ثانیه‌ی کاری برابر با ۱۴ تومان فرض شده است.

علاوه بر کمینه‌سازی هزینه‌ی 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 هستند.

همچنین جهت تعیین محل‌های کاندید نصب بالابر، برخی نقاط دسترسی راحت‌تری برای تخلیه‌ی مصالح و انتقال آن از محل دپو به بالابرها و سپس توزیع به نقاط تقاضا در طبقات دارند. در نمونه‌ی موردی انتخاب‌شده نیز به دلیل وجود فضای آماده و نصب آسان‌تر، نظر کارفرمای پروژه، نصب بالابرهای

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

جدول ۴. مقادیر مختلف ضریب عددی a.

حالت	مقدار a	مکان های 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	۷,۰۶,۰۱	۱۲۶	۹۰,۰۰۰,۰۰۰	۷۹۰,۶۲۰,۰۰۰	۳۳۲,۱۹۰,۰۰۰	۲۶,۹۱۴,۰۰۰	۶,۰۰۰,۰۰۰	۱,۲۴۵,۷۲۴,۰۰۰
۲	۲,۰۰۰,۰۰۰	۶,۰۲	۱۷۵	۶۵,۰۰۰,۰۰۰	۸۰۷,۰۳۰,۰۰۰	۳۴۸,۳۶۰,۰۰۰	۲۳,۹۶۴,۰۰۰	۶,۰۰۰,۰۰۰	۱,۲۵۰,۳۵۴,۰۰۰
۳	۳,۰۰۰,۰۰۰	۲,۰۱	۱۷۵	۶۵,۰۰۰,۰۰۰	۸۰۷,۰۳۰,۰۰۰	۳۴۸,۳۹۰,۰۰۰	۲۶,۴۲۸,۰۰۰	۶,۰۰۰,۰۰۰	۱,۲۵۲,۸۴۸,۰۰۰
۴	۴,۰۰۰,۰۰۰	۲,۰۱	۱۷۵	۶۵,۰۰۰,۰۰۰	۸۰۷,۰۳۰,۰۰۰	۳۴۸,۳۹۰,۰۰۰	۲۶,۴۳۳,۰۰۰	۸,۰۰۰,۰۰۰	۱,۲۵۴,۸۵۳,۰۰۰

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	۴۴۱۰۰۰	۱۷۵	۳۰,۰۰۰,۰۰۰	۳۶۶,۰۳۰,۰۰	۱۵۴,۳۵۰,۰۰۰	۱۰,۱۲۴,۳۸۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۵۶۳,۵۰۴,۳۸۰
۲	۱۱۶۴۵۰	۴۴۱۰۰۰	۱۷۵	۳۵,۰۰۰,۰۰۰	۴۴۱,۰۰۰,۰۰۰	۱۹۴,۰۴۰,۰۰۰	۱۶,۳۰۳,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۶۸۹,۳۴۳,۰۰۰
مجموع	۱۸۸۷۶۷۰	۸۸۲۰۰۰	۱۷۵	۶۵,۰۰۰,۰۰۰	۸۰۷,۰۳۰,۰۰۰	۳۴۸,۳۹۰,۰۰۰	۲۶,۴۲۷,۳۸۰	۶,۰۰۰,۰۰۰	۱,۲۵۲,۸۴۷,۳۸۰

جدول ۶. تأثیر 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	۱۲۶	۹۰,۰۰۰,۰۰۰	۷۹۰,۶۲۰,۰۰۰	۳۳۲,۱۹۰,۰۰۰	۲۶,۹۱۴,۰۰۰	۱۵,۰۰۰,۰۰۰	۱,۲۵۴,۷۲۴,۰۰۰

۱.۶. نتایج

پیشنهادی، استفاده از ۲ بالابر را بهینه می‌داند. همچنین مکان‌های ۱ و ۲ را برای نصب آن‌ها 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 (۴۴۱۰۰۰ ثانیه)؛ که نشان می‌دهد مدل پیشنهادی به خوبی توانسته است فعالیت‌های بالابری را بین بالابرهای نصب‌شده به صورت متعادل توزیع کند. همان‌طور که اشاره شد، در جواب بهینه، ایمن‌ترین مکان‌ها برای نصب بالابر انتخاب شده است. این به دلیل وجود مؤلفه‌ی ایمنی (SR) در تابع هدف است. برای اثبات این ادعا، مدل پیشنهادی با حذف جریمه‌ی ایمنی مجدداً حل و نتایج در جدول ۶ گزارش شده است. در این حالت، مدل پیشنهادی ۳ بالابر را

در ابتدا، ضریب a از طریق بررسی‌ها و آزمایش‌های متفاوت تعیین شده است. در جدول ۴، برای ضریب a چهار مقدار متفاوت ارائه شده است. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار a به ۳,۰۰۰,۰۰۰ تومان، ایمن‌ترین مکان‌ها برای نصب بالابر تعیین شده‌اند (مکان‌های ۱ و ۲، کمترین نرخ ایمنی را داشته‌اند). آزمایش‌های دیگری که توسط نویسندگان نوشتار حاضر انجام شده است، نیز نشان می‌دهد که با افزایش بیشتر مقدار a (به هر میزان دلخواه) مکان‌های تعیین‌شده تغییری نمی‌کنند. لذا در ادامه، برای سایر بررسی‌ها مقدار a برابر با ۳,۰۰۰,۰۰۰ در نظر گرفته شده است. بر این اساس، جزئیات جواب بهینه در جدول ۵ گزارش شده است. مدل

جدول ۷. عدم بهینه‌سازی تعداد بالابرها.

حالت	تعداد بالابر	محل نصب	روز کاری	هزینه‌ی نصب (تومان)	هزینه‌ی اجاره (تومان)	هزینه‌ی کاری (تومان)	هزینه‌ی جابجایی افقی (تومان)	جریمه‌ی 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	۶, ۴, ۲, ۱, ۷	۷۶	۱۵۰,۰۰۰,۰۰۰	۸۰۴,۳۸۰,۰۰۰	۳۴۳,۴۴۰,۰۰۰	۲۳,۲۳۳,۰۰۰	۳۶,۰۰۰,۰۰۰	۱,۳۵۷,۰۵۳,۰۰۰

جدول ۸. عدم بهینه‌سازی هزینه‌ی نصب و اجاره.

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

هدف تقریباً $\frac{8}{3}\%$ افزایش و تعداد روزهای کاری به ۷۶ روز کاهش پیدا می‌کند. این در حالی است که تعداد روزهای پروژه براساس دیگر عوامل مؤثر در ساخت و ساز نمی‌تواند کمتر از ۸۰ روز باشد. یعنی در صورت استفاده از ۵ بالابر یا بیشتر، تعداد روزهای کاری عملاً همان ۸۰ روز است و هزینه‌ی اجاره‌ی بالابرها (۵ بالابر یا بیشتر) باید تا ۸۰ روز به‌طور کامل پرداخت شود. تعداد بالابرها موردنیاز در فرآیند بهینه‌سازی، یک ویژگی مهم و کاربردی برای مدل پیشنهادی به حساب می‌آید.

هزینه‌ی نصب و اجاره‌ی بالابرها، یکی از عوامل تأثیرگذار مهم در تعیین تعداد و محل بهینه‌ی نصب بالابرهاست. در صورتی که هزینه‌ی نصب و اجاره از تابع هدف حذف شود، مدل پیشنهادی براساس هزینه‌ی کاری، جابجایی افقی، و تفاوت‌های ایمنی مکان‌های نصب تصمیم‌گیری می‌کند. نتایج این حالت در جدول ۸ گزارش شده است؛ که مطابق آن، در صورت نادیده‌گرفتن هزینه‌ی نصب و اجاره‌ی بالابرها در فرآیند بهینه‌سازی، تعداد بالابرها نصب‌شده به ۳ عدد افزایش پیدا می‌کند. این حالت می‌تواند منجر به افزایش حدود $\frac{33}{8}$ درصدی مقدار تابع هدف و افزایش حدود $\frac{2}{9}$ درصدی تعداد روزهای کاری در مقایسه با جواب بهینه شود؛ که نشان می‌دهد در نظر گرفتن هزینه‌ی نصب و اجاره‌ی بالابرها می‌تواند در فرآیند بهینه‌سازی، تأثیر مهمی در هزینه‌ها و تعداد روزهای کاری پروژه داشته باشد.

نمودار همگرایی مدل پیشنهادی در شکل ۴ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، مدل پیشنهادی در مدت زمان کوتاه ۱۵ ثانیه توانسته است جواب بهینه را برای نمونه‌ی مطالعاتی به‌دست آورد. حل مدل پیشنهادی در مدت زمان کوتاه می‌تواند تصمیم‌گیری برای دست‌اندرکاران ساخت و ساز را سریع‌تر کند. علاوه بر این، همگرایی سریع مدل پیشنهادی در بررسی سناریوهای مختلف مانند جدول‌های ۴ و ۷ می‌تواند حائز اهمیت باشد. در نتیجه، تأثیرگذارترین

برای نصب در مکان‌های ۱، ۶، و ۷ انتخاب کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ایمنی مکان‌های انتخاب‌شده در جواب بهینه در مقایسه با این حالت بیشتر بوده است. بنابراین، جریمه‌ی ایمنی در تابع هدف در تعداد و مکان‌های نصب بالابر مؤثر است.

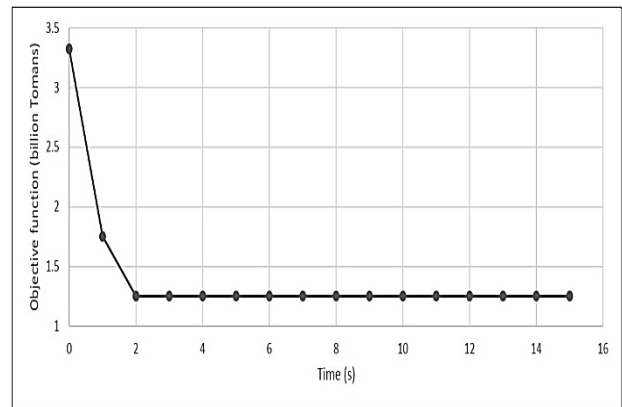
تعداد بالابرها موردنیاز در مدل پیشنهادی به‌صورت بهینه تعیین می‌شود (در جواب بهینه: ۲ بالابر). برای بررسی اهمیت انتخاب تعداد بالابر موردنیاز در فرآیند بهینه‌سازی، در جدول ۷ تعداد بالابرها به صورت پارامتر در نظر گرفته شده است.

مطابق جدول ۷، مقدار تابع هدف، هزینه‌ها و تعداد روزهای کاری به تعداد بالابرها نصب‌شده بستگی دارد. در صورتی که فقط از یک بالابر برای حمل مصالح ساختمانی استفاده شود، مقدار تابع هدف حدود $\frac{5}{5}\%$ کاهش پیدا می‌کند. اما در مقابل، تعداد روزهای کاری به ۳۷۷ روز (حدود $\frac{115}{1}\%$) افزایش پیدا می‌کند؛ که از سقف تعداد روزهای کاری مجاز (۱۸۰ روز) بیشتر است. به همین دلیل، مدل پیشنهادی این حالت را به‌عنوان جواب بهینه انتخاب نکرده است. در صورت استفاده از ۳ بالابر، مقدار تابع هدف تقریباً $\frac{4}{4}\%$ نسبت به جواب بهینه افزایش و در مقابل، تعداد روزهای کاری به ۱۲۶ روز ($\frac{28}{2}\%$) کاهش پیدا می‌کند. ممکن است افزایش $\frac{4}{4}\%$ مقدار تابع هدف در مقایسه با کاهش ۲۸ درصدی روزهای کاری برای پیمانکاران اهمیت بیشتری داشته باشد. بنابراین، احتمال دارد که عملاً حالت سوم برای اجرای پروژه انتخاب شود؛ که نشان می‌دهد مدل پیشنهادی می‌تواند سناریوهای مختلفی را برای تصمیم‌گیری بهتر در اختیار عوامل ساخت و ساز قرار دهد. همچنین در صورت انتخاب ۴ بالابر، مقدار تابع هدف حدوداً $\frac{4}{4}\%$ در مقایسه با جواب بهینه افزایش و تعداد روزهای کاری به ۹۹ روز (حدود $\frac{43}{3}\%$) کاهش پیدا می‌کند. در صورتی که ۵ بالابر برای استفاده در ساختمان در نظر گرفته شود، مقدار تابع

کاری پروژه را در فرآیند بهینه‌سازی تعیین می‌کند. در چیدمان بهینه به هزینه‌ی نصب، اجاره، هزینه‌ی جابجایی، سهولت نصب و تعمیر و نگهداری، و مباحث ایمنی توجه شده است.

کارایی روش پیشنهادی در یک پروژه‌ی ساختمان‌سازی ۲۰ طبقه در مشهد بررسی و آزمایش شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی می‌تواند چیدمان‌های مختلفی را با ایمنی و سهولت دسترسی متفاوت در اختیار کاربران قرار دهد. همچنین، انتخاب تعداد بالابرها خارج از فرآیند بهینه‌سازی می‌تواند تعداد روزهای کاری را بیش از ۲ برابر کند و هزینه‌های پروژه را ۸/۳٪ افزایش دهد. افزون بر این، در صورت نادیده‌گرفتن هزینه‌ی نصب و اجاره‌ی بالابر، تعداد روزهای کاری ۲/۹٪ و هزینه‌های مرتبط ۳۳/۸٪ افزایش می‌یابد. به‌طور کلی مدل پیشنهادی تلاش می‌کند از طریق تعیین مکان و تعداد بالابرها، موردنیاز و همچنین توزیع متوازن فعالیت‌های بالابری بین بالابرها نصب‌شده، هزینه‌های پروژه و مخاطرات ایمنی را به میزان کمینه برساند. به‌علت نوبادون پژوهش‌ها در زمینه‌ی بالابری، خصوصاً تعیین تعداد و محل نصب بالابرها، زمینه‌ی مذکور پتانسیل بالایی برای انجام پژوهش‌های بیشتر دارد. از جمله پژوهش‌های بالقوه می‌توان به این موارد اشاره کرد:

۱. روش‌های نوین در جمع‌آوری داده‌ها.
۲. در نظر گرفتن عدم قطعیت داده‌های ورودی مسئله در مدل‌سازی.
۳. ارائه‌ی روش‌هایی برای تسهیل فرایند بالابری.
۴. بهینه‌سازی هم‌زمان محل نصب بالابرها و محل دپوی مصالح.
۵. مدل‌سازی هم‌زمان فعالیت بالابری و جرثقیل‌ها جهت توزین متناسب فعالیت‌ها بین تجهیزات استفاده‌شده‌ی کارگاه.



شکل ۴. نمودار همگرایی جواب مدل.

پارامتر در تابع هدف، هزینه‌ی نصب و اجاره‌ی بالابرهاست. پس از آن عدم بهینه‌سازی تعداد بالابرها باعث افزایش غیرمنطقی هزینه‌ها خواهد شد.

۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در پژوهش حاضر، یک مدل عدد صحیح خطی برای مسئله‌ی 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 تأثیر مستقیم در هزینه‌های کارگاهی، ایمنی سایت، و همچنین بازدهی نیروهای انسانی و تجهیزات خواهد داشت. با وجود اهمیت موضوع، در پژوهش‌های پیشین به بحث اخیر پرداخته نشده است. لذا، مدل پیشنهادی به‌عنوان نخستین پژوهش انجام‌گرفته در این زمینه، علاوه بر مکان‌یابی، تعداد بالابرها، موردنیاز و همچنین تعداد روزهای

منابع (References)

1. Huang, C., Wong, C. K. and Tam, C. M., 2010. Optimization of material hoisting operations and storage locations in multi-story building construction by mixed-integer programming. *J. of Autom. Constr.* 19, pp.656–663. doi: 10.1016/j.autcon.2010.02.005.
2. Bamunuarachchi, D. T. and Ransinghe, D. N., 2015. Elevator group optimization in a smart building. *In 2015 IEEE 10th Int. Conf. Ind. Inf. Syst. ICIIS 2015 - Conf. Proc.*, 71–76. doi:10.1109/ICIINFS.2015.7398988.
3. Jung, M., Park, M., Lee, H.-S. and Chi, S., 2017. Agent-based lift system simulation model for high-rise building construction projects. *J. of Comput. Civ. Eng.*, 31, 1–10. doi: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000707.
4. Kamleh, M., 2014. Improving hoist performance during the up-peak of tall building construction.
5. Lin, X., Han, Y., Guo, H., Luo, Z. and Guo, Z., 2023. Lift path planning for tower cranes based on environmental point clouds. *J. of Autom. Constr.* 155, 105046. doi: 10.1016/j.autcon.2023.105046.
6. Al-Hussein, M., Athar Niaz, M., Yu, H. and Kim, H., 2006. Integrating 3D visualization and simulation for tower crane operations on construction sites. *J. of Autom. Constr.* 15, pp. 554-563. doi: 10.1016/j.autcon.2005.07.007.
7. Safouhi, H., Mouattamid, M., Hermann, U. and Hendi, A., 2011. An algorithm for the calculation of feasible mobile crane position areas. *J. of Autom. Constr.* 20, pp. 360–367. doi: 10.1016/j.autcon.2010.11.006.
8. Han, S. H., Hasan, S., Bouferguène, A., Al-Hussein, M. and Kosa, J., 2015. Utilization of 3D visualization of mobile crane operations for modular construction on-site assembly. *J. of Manag. Eng.* 31, pp. 1–9. doi: 10.1061/(asce)me.1943-5479.0000317.
9. Zhang, Z. and Pan, W., 2021. Multi-criteria decision analysis for tower crane layout planning in high-rise modular integrated construction. *J. of Autom. Constr.* 127, 103709. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103709.
10. Ji, Y. and Leite, F., 2020. Optimized planning approach for multiple tower cranes and material supply points using mixed-integer programming. *J. of Constr. Eng. Manag.* 146, doi:

- 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001781.
11. Zhang, P., Harris, F. C. and Olomolaiye, P. O., 1996. A computer-based model for optimizing the location of a single tower crane: Authors claim 20-40% of hook horizontal traveling time can be saved if located at the position recommended by the model. *J. of Build. Res. Inf.* 24, pp. 101-109. doi: 10.1080/09613219608727511.
 12. Tam, C. M., Tong, T. K. L. and Chan, W. K. W., 2001. Genetic algorithm for optimizing supply locations around tower crane. *J. of Constr. Eng. Manag.* 127, pp. 315-322. doi: 10.1061/(asce)0733-9364(2001)127:4(315).
 13. Huang, C., Wong, C. K. and Tam, C. M., 2011. Optimization of tower crane and material supply locations in a high-rise building site by mixed-integer linear programming. *J. of Autom. Constr.* 20, pp. 571-580. doi: 10.1016/j.autcon.2010.11.023.
 14. Lien, L. C. and Cheng, M. Y., 2014. Particle bee algorithm for tower crane layout with material quantity supply and demand optimization. *J. of Autom. Constr.* 45, pp. 25-32. doi: 10.1016/j.autcon.2014.05.002.
 15. Riga, K., Jahr, K., Thielen, C. and Borrmann, A., 2020. Mixed integer programming for dynamic tower crane and storage area optimization on construction sites. *J. of Autom. Constr.* 120, 103259. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103259.
 16. Dienstknecht, M., 2023. A branch and bound approach for the tower crane selection and positioning problem with respect to mutual interference. *4or* 21, pp. 105-123. doi: 10.1007/s10288-022-00503-7.
 17. Zavichi, A. and Behzadan, A. H., 2011. A real-time decision support system for enhanced crane operations in construction and manufacturing. *In Congress on Computing in Civil Engineering, Proceedings.* doi: 10.1061/41182(416)72.
 18. Zavichi, A., Madani, K., Xanthopoulos, P. and Oloufa, A. A., 2014. Enhanced crane operations in construction using service request optimization. *J. of Autom. Constr.* 45, pp. 25-32. doi: 10.1016/j.autcon.2014.07.011.
 19. Monghasemi, S., Nikoo, M. R. and Adamowski, J., 2016. Sequential ordering of crane service requests considering the pending times of the requests: an approach based on game theory and optimization techniques. *J. of Autom. Constr.* 45, pp. 25-32. doi: 10.1016/j.autcon.2016.06.006.
 20. Al Hattab, M., Zankoul, E. and Hamzeh, F. R., 2017. Near-real-time optimization of overlapping tower crane operations: a model and case study. *J. of Comput. Civ. Eng.* 31, pp. 1-9. doi: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000666.
 21. Al Hattab, M., Zankoul, E., Barakat, M. and Hamzeh, F., 2018. Crane overlap and operational flexibility: balancing utilization, duration, and safety. *J. of Constr. Innov.* 18, pp. 1-15. doi: 10.1108/CI-11-2016-0062.
 22. Tarhini, H., Maddah, B. and Hamzeh, F., 2021. The traveling salesman puts-on a hard hat – tower crane scheduling in construction projects. *J. of Eur. J. Oper. Res.* 291, pp. 1-12. doi: 10.1016/j.ejor.2020.10.029.
 23. Tam, C. M. and Tong, T. K. L., 2003. GA-ANN model for optimizing the locations of tower crane and supply points for high-rise public housing construction. *J. of Constr. Manag. Econ.* 21, pp. 257-266. doi: 10.1080/0144619032000049665.
 24. Moussavi Nadoushani, Z. S., Hammad, A. W. A. and Akbarnezhad, A., 2017. Location optimization of tower crane and allocation of material supply points in a construction site considering operating and rental costs. *J. of Constr. Eng. Manag.* 143, pp. 1-13. doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001215.
 25. Huang, C. and Wong, C. K., 2018. Optimization of crane setup location and servicing schedule for urgent material requests with non-homogeneous and non-fixed material supply. *J. of Autom. Constr.* 89, pp. 183-198. doi: 10.1016/j.autcon.2018.01.015.
 26. Zhang, P., Harris, F. C., Olomolaiye, P. O. and Holt, G. D., 1999. Location optimization for a group of tower cranes. *J. of Constr. Eng. Manag.* 125, pp. 115-123. doi: 10.1061/(asce)0733-9364(1999)125:2(115).
 27. Wang, J. et al., 2015. A BIM-based approach for automated tower crane layout planning. *J. of Autom. Constr.* 59, pp. 168-178. doi: 10.1016/j.autcon.2015.05.006.
 28. Tork, A., 2013. 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*).
 29. Yeo, K. T. and Ning, J. H., 2006. Managing uncertainty in major equipment procurement in engineering projects. *J. of Eur. J. Oper. Res.* 171, pp. 123-134. doi: 10.1016/j.ejor.2004.06.036.
 30. Yeoh, J. K. W. and Chua, D. K. H., 2017. Optimizing crane selection and location for multistage construction using a four-dimensional set cover approach. *J. of Constr. Eng. Manag.* 143, pp. 1-12. doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001318.
 31. Marzouk, M. and Abubakr, A., 2016. Decision support for tower crane selection with building information models and genetic algorithms. *J. of Autom. Constr.* 61, pp. 1-15. doi: 10.1016/j.autcon.2015.09.008.
 32. Wu, K., García de Soto, B. and Zhang, F., 2020. Spatio-temporal panning for tower cranes in

- construction projects with simulated annealing. *J. of Autom. Constr.* 111, 103060. doi: 10.1016/j.autcon.2019.103060.
33. Sugimoto, Y., Seki, H., Samo, T. and Nakamitsu, N., 2016. 4D CAD-based evaluation system for crane deployment plans in construction of nuclear power plants. *J. of Autom. Constr.* 68, pp. 1-10. doi: 10.1016/j.autcon.2016.04.004.
34. Chang, Y. C., Hung, W. H. and Kang, S. C., 2012. A fast path planning method for single and dual crane erections. *J. of Autom. Constr.* 22, pp. 1-12. doi: 10.1016/j.autcon.2011.11.006
35. Kang, S. C. and Miranda, E., 2006. Planning and visualization for automated robotic crane erection processes in construction. *J. of Autom. Constr.* 15, pp. 398-408. doi: 10.1016/j.autcon.2005.06.008.
36. Ali, G. M. et al., 2021. Decision support for hydraulic crane stabilization using combined loading and crane mat strength analysis. *J. of Autom. Constr.* 125, 103884. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103884.
37. Gharaie, E., Lingard, H. and Cooke, T., 2015. Causes of fatal accidents Involving Cranes in the Australian construction industry. *J. of Constr. Econ. Build.* 15, pp. 1-12. doi: 10.5130/AJCEB.v15i2.4244.
38. Shin, Y., Cho, H. and Kang, K. I., 2011. Simulation model incorporating genetic algorithms for optimal temporary hoist planning in high-rise building construction. *J. of Autom. Constr.* 20, pp. 550-558. doi: 10.1016/j.autcon.2010.11.021.
39. Jung, M. et al., 2017. Construction worker hoisting simulation for sky-lobby lifting system. *J. of Autom. Constr.* 73, pp. 166-174. doi: 10.1016/j.autcon.2016.10.002.
40. Jalali Yazdi, A., Forsythe, P., Ahmadian Fard Fini, A. and Maghrebi, M., 2019. Optimization of flexible lift processes on high-rise building construction sites. *J. of Autom. Constr.* 107, 102939. doi: 10.1016/j.autcon.2019.102939.
41. Jalali Yazdi, A., Maghrebi, M. and Bolouri Bazaz, J., 2018. Mathematical model to optimally solve the lift planning problem in high-rise construction projects. *J. of Autom. Constr.* 92, pp. 120-132. doi: 10.1016/j.autcon.2018.03.029.
42. Beamurgia, M., Basagoiti, R., Rodríguez, I. and Rodríguez, V., 2016. A modified genetic algorithm applied to the elevator dispatching problem. *J. of Soft Comput.* 20, pp. 3595-3609. doi: 10.1007/s00500-015-1718-1.
43. Ruokokoski, M., Ehtamo, H. and Pardalos, P. M., 2015. Elevator Dispatching Problem: A mixed integer linear programming formulation and polyhedral results. *J. of Comb. Optim.* 29, pp. 750-780. doi: 10.1007/s10878-013-9620-1.
44. Tai, J., Yang, S. and Tan, H., 2008. Dispatching approach optimization of elevator group control system with destination floor guidance using fuzzy neural network. *Proc. In World Congr. Intell. Control Autom.* 7, pp. 7085-7088. doi: 10.1109/WCICA.2008.4594016.
45. Utgoff, P. E. and Connell, M. E., 2012. Real-time combinatorial optimization for elevator group dispatching. *J. of IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part A Syst. Humans* 42, pp. 130-146. doi: 10.1109/TSMCA.2011.2157134.
46. Tang, H. Y., Bao, D., Qi, W. G. and Zhang, Y. M., 2008. Optimization of elevator group control scheduling with multi-strategy switch. *In Proc. 7th Int. Conf. Mach. Learn. Cybern. ICMLC 4*, pp. 2067-2072. doi: 10.1109/ICMLC.2008.4620746.