

بهینه‌سازی فرایندهای بالابر در حین عملیات اجرایی ساختمان‌های بلندمرتبه

علیرضا جلالی یزدی، مجتبی مغربی*، جعفر بلوری بزاز

گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶-۱۰-۰۵
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۶-۰۵
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۶-۰۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۹-۲۴

کلمات کلیدی:

ساختمان بلندمرتبه
بالابر
لیفت
بهینه‌سازی
برنامه‌ریزی عدد صحیح

خلاصه: در پروژه‌های ساختمانی بلندمرتبه، فراهم بودن منابع از جمله نیروی انسانی و مصالح مورد نیاز، دقیقاً پیش از آغاز فعالیت‌های ساختمانی، عاملی بحرانی است که مستقیماً بر پیشرفت پروژه تأثیرگذار خواهد بود. تیم مدیریت پروژه، به‌منظور جلوگیری از تاخیرهای ناشی از عدم وجود منابع انسانی و مصالح ساختمانی، همواره در پی یافتن راهی برای تسهیل فرایند زنجیره‌ی تأمین در ساختمان‌هاست. این امر به ویژه در ساختمان‌های بلندمرتبه که شامل تعداد بسیار زیادی از فعالیت‌های تکراری و هم‌زمان هستند اهمیت پیدا می‌کند. چالشی که در این راستا به وجود می‌آید، حمل و نقل عمودی منابع به صورت بهینه است که فقط توسط ماشین‌آلاتی خاص (از جمله تاور کرین‌ها و بالابر‌ها)، امکان پذیر است. در پژوهش‌های گذشته مشاهده شده‌است که برنامه‌ریزی بهینه عملکرد دستگاه‌های بالابر ساختمانی از طریق روش‌های یاد شده، تأثیر چشم‌گیری در کاهش تاخیر در انجام فعالیت‌ها دارد. در این پژوهش به توسعه‌ی یک مدل بهینه‌سازی برنامه عملکردی لیفت‌ها در ساختمان‌های بلندمرتبه‌ی دارای چندین دستگاه لیفت، با استفاده از تکنیک‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح (Integer Programming) می‌پردازیم. شده‌است

۱- مقدمه

نواحی و ارتفاعات مختلف پروژه در حال انجام هستند. بسیاری از این فعالیت‌ها، فعالیت‌های تخصصی هستند، به این معنا که به منظور اجرا نیازمند مصالح و تجهیزات خاص می‌باشند. در صورتی که منابع مورد نیاز این فعالیت‌ها (اعم از نیروی کاری و مصالح) به موقع به این فعالیت‌ها نرسند، انجام فعالیت به تأخیر خواهد افتاد. هم‌چنین در صورتی که نیروهای کاری به مدتی بیش از مقدار معمول، در انتظار وسیله حمل و نقل عمودی بمانند، به علت مفید نبودن این زمان انتظار در انجام فعالیت و هم‌چنین پرداخت حقوق به این نیروهای کاری به ازای این زمان‌ها، این نوع از تأخیرها زیان‌های اقتصادی نیز در بر خواهد داشت [۳]. زمان تحویل کامل پروژه نیز وابسته به تحویل

وجود فضای محدود در نواحی مرکزی شهرها و هم‌چنین نیاز فزاینده به فضاهای مسکونی، تجاری و اداری در این مناطق باعث شده مالکین و مسئولین به ساختمان‌های بلندمرتبه، به عنوان راه حلی منطقی بنگرند [۱]. برنامه‌زمانی فشرده ساخت یک پروژه بلندمرتبه، اجرای هم‌زمان تعداد زیادی از فعالیت‌های ساختمانی را الزامی می‌کند. این مطلب باعث افزایش تقاضای حمل و نقل عمودی در این پروژه‌ها نسبت به دیگر انواع پروژه‌های ساختمانی، می‌شود [۲]. در یک ساختمان بلندمرتبه تعداد زیادی فعالیت در

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



می شود که این تقاضا به صورت تصادفی و با توزیع مشخصی اتفاق می افتد. این در حالی است که در فاز ساخت، این تقاضا را می توان با استفاده از داده های ساخت از جمله برنامه زمان بندی و انجام کاری، پیش بینی کرد. تفاوت دیگر در این است که مسافران دستگاه بالابر در فاز ساخت، کارگران و مهندسين ساختمانی هستند که برخلاف مسافران فاز بهره برداری، توسط مدیر پروژه قابل کنترل هستند [۲].

تقاضای حمل و نقل عمودی در یک ساختمان بلند مرتبه، در طول روز دچار نوسان است. این تقاضا اغلب در زمان های مشخصی در طول روز به اوج خود می رسد (مثل شروع روز کاری، پایان روز کاری و ساعت صرف نهار). از بین این زمان ها شروع روز کاری در صبح، به علت تقاضای بالابری همزمان مصالح و نیروی کاری، دارای اهمیت بیشتری است. در برنامه زمان بندی یک پروژه بایستی فعالیت های روی مسیر بحرانی را نسبت به دیگر فعالیت ها ترجیح داد، چرا که هر تاخیری در این فعالیت ها مستقیماً به تاخیر کل پروژه منجر می شود. به منظور جلوگیری از چنین مخاطراتی، بایستی تمامی منابع مورد نیاز این فعالیت ها، دقیقاً به موقع در پای فعالیت آماده باشند. این موضوع به ویژه در فعالیت هایی که منابع مورد نیازشان را تنها می توان با بالابر انتقال داد، اهمیت مدیریت دستگاه بالابر را دوچندان می کند.

هدف از این پژوهش این است که با توسعه یک مدل ریاضی به این مساله بپردازیم. در این مدل ریاضی از مفاهیم نظریه گراف و همچنین روش های برنامه ریزی عدد صحیح به منظور حل مسئله ی لیفت استفاده می شود. مدل ریاضی ذکر شده قادر خواهد بود با در دست داشتن اطلاعات مربوط به تقاضای حمل و نقل عمودی، بصورت خودکار برنامه بهینه عملکرد دستگاه بالابر را محاسبه کند. این برنامه به مدیران پروژه و تصمیم گیرندگان، در زمینه ی تصمیمات مربوط به فرایند های بالابری یاری خواهد رساند.

۲- مرور ادبیات

پژوهش هایی به منظور پشتیبانی مدیر پروژه در تصمیم گیری های مربوط به بالابری انجام شده است. این پژوهش ها در تلاش اند تا یک زمان بندی کارآمد را برای بالابر، برنامه ریزی و اجرا کنند. پژوهش های انجام شده را می توان به ۳ دسته تقسیم کرد:

۲-۱- سیستم های هوشمند کنترل بالابری

به موقع هر فعالیت به صورت منفرد است و تأخیرات در فعالیت ها به صورت تجمعی به تأخیر کل پروژه منتقل خواهند شد [۴ و ۵]. در پیشینه تحقیق، تعداد قابل توجهی پژوهش در زمینه ی تحویل به موقع^۱ مصالح و نیروی کار انجام شده است [۶ و ۷]. اما تنها تعداد اندکی از پژوهش ها به راه حل تحویل بهینه پرداخته اند [۱۰-۷].

در این نوشتار، تلاش بر این است که به منظور کمینه سازی این نوع از تأخیرات، مدلی ریاضی ارائه شود. تاور کرین های از جمله ابزار های مهم در حمل و نقل افقی مصالح، در هر سایت ساخت و سازی هستند، اما به منظور حمل و نقل عمودی، دسترسی عمودی (طول کابل) آن ها محدود است. به همین دلیل در ارتفاعات بالا، به منظور انجام حمل و نقل، تنها راه حل عملی استفاده از دستگاه های بالابر یا لیفت است. دسترسی عمودی سیستم بالابر، از طریق افزایش ارتفاع دکلی که بالابر در امتداد آن حرکت می کند، قابل افزایش است. همان طور که از مطالب بالا برداشت می شود، دستگاه های بالابر از اهمیت بالایی در حمل و نقل عمودی ساختمان های بلندمرتبه برخوردارند. اما چگونگی مدیریت حمل و نقل عمودی مصالح و نیروی کار به منظور کمینه کردن تمامی هزینه ها و اطمینان از برآورده شدن نیاز تمامی فعالیت های ساخت به صورت همزمان، پرسشی است که تاکنون به آن پاسخ کاملی داده نشده است. در عمل، بیشتر پروژه های ساخت و ساز برنامه ی مشخصی برای بالابری ندارند و این امر توسط کارگران با تجربه انجام می شود. بدیهی است که این شیوه، به ویژه زمانی که بالابر به گلوگاهی^۲ در فرایند زنجیره تأمین تبدیل شود، تأخیرات و هزینه های اضافه ای را، به مالکین پروژه ها تحمیل خواهد کرد. در پروژه های ساختمانی اغلب به منظور اطمینان از افزایش بازدهی و استفاده بهتر از فضاهای محدود، از مفهوم تولید بهنگام استفاده می شود [۶ و ۱۱]. علاوه بر این، در صورت عدم مدیریت صحیح، تعداد توقف های بالابر و مجموع فاصله طی شده ی بالابر می تواند افزایش یابد که مستقیماً بر هزینه ی بالابر مؤثر است [۲ و ۱۲].

سیستم بالابری مرحله ساخت پروژه های بلند-مرتبه، ویژگی های متفاوتی با سیستم بالابری در زمان فاز بهره برداری این ساختمان ها دارد. تقاضای بالابری در سیستم آسانسور های ساختمانی، پیش از شروع عملیات بالابری، غیرقابل پیش بینی است، بنابراین فرض

1 Just-In-Time Delivery

2 Bottleneck

۲-۲- تکنیک های شبیه سازی

۲-۳- الگوریتم های محاسبه زمان بالابری

انجام فرایند های لیفت، با در نظر گرفتن ارتفاع طبقات و هم‌چنین وزن مصالح لیفت شده، از یک شبیه‌سازی سناریو محور استفاده کردند. آنان در این شبیه سازی تجربیات خبرگان در این زمینه را نیز وارد نمودند.

شین و چو [۱] در سال ۲۰۱۱ از یک تکنیک شبیه‌سازی رویداد گسسته، که با یک الگوریتم ژنتیک تلفیق شده، به‌منظور حل بهینه مسئله برنامه ریزی لیفت استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده توسط آنان، پیشرفت قابل‌ملاحظه‌ای را در بهینگی راه حل، نسبت به راه حل پیشنهادشده توسط یک برنامه ریز مجرب نشان داد.

پارک و ها [۳] در سال ۲۰۱۳ یک مدل شبیه‌سازی، به‌منظور یافتن شکل منطقه‌بندی بهینه ی طبقات، توسعه دادند. منطقه‌بندی در مسائل حمل و نقل عمودی به این معنا است که طبقات را در خوشه‌هایی دسته‌بندی کرده و به هر یک از این خوشه‌ها یک گروه لیفت را اختصاص دهیم. آنان در این شبیه سازی، مقدار تقاضای لیفت را متغیر در طول زمان در نظر گرفتند. این روش کاهشی ۴۰ درصدی در زمان کل بالابری را نسبت به روش های قبلی برنامه ریزی نشان داد.

جانگ و مون [۲] در سال ۲۰۱۷ با استفاده از یک شبیه سازی رویداد گسسته، تاثیر فاکتورهای مشخصاتی ساختمان از جمله تعداد لیفت، تعداد شاتل و محل لابی آسمان را بر فرایند لیفت در سیستم لابی آسمان، سنجیده‌اند. سیستم لابی آسمان از سیستم های نوین مدیریت منابع است که در آن با استفاده از روش منطقه‌بندی، طبقات ساختمانی به ۲ یا چند خوشه تقسیم می‌شوند. به‌دنبال این تقسیم‌بندی، برای هر یک از این خوشه‌ها یک لابی مستقل در نظر می‌گیریم که همان پایین‌ترین طبقه مربوط به آن منطقه است. به این لابی‌ها که در طبقات بالاتر قرار دارند، به اصطلاح لابی آسمان اطلاق می‌شود. در این سیستم دو نوع بالابر فعالیت می‌کنند که عبارتند از: بالابر محلی و شاتل. بالابر محلی فقط در بین لابی‌ها هر یک از منطقه‌ها و طبقات آن منطقه رفت و آمد می‌کند. این در حالی است که شاتل‌ها فقط بین لابی اصلی (هم‌کف) و لابی‌های آسمان رفت و آمد کرده و منابع را انتقال می‌دهند.

۳-۲- الگوریتم های محاسبه ی زمان بالابری

چو و لی [۱۷] در سال ۲۰۱۳ یک الگوریتم محاسبه زمان بالابری

۱-۲- سیستم های هوشمند کنترل بالابری

سکز و نیوان [۱۳] در سال ۲۰۰۵ طرح مفهومی یک سیستم نظارت خودکار برای تجهیزات بالابر ارائه کردند. سیستم ارائه شده توسط آنان بر اساس مدل اطلاعاتی ساختمان^۱ است و از یک دستگاه نظارتی جعبه سیاه در داخل دستگاه بالابر استفاده می‌کند. این سیستم داده‌های زمان-واقعی را با دقت قابل‌قبولی جمع‌آوری و ارسال می‌کند.

چو و کوان [۱۴] در سال ۲۰۰۹ طرح مفهومی یک بالابر رباتیک هوشمند را معرفی کردند. این فناوری قادر است عملیات بارگذاری و باربرداری لیفت را به شکل خودکار انجام دهد و به همین علت ابزار مناسبی برای انجام عملیات لیفت مصالح در طول شب (ساعت‌های غیربحرانی) است. به‌منظور انجام لیفت در ساعات شب، این فناوری به یک سیستم کنترل از راه دور بی‌سیم مجهز شده‌است. ساعت‌های بحرانی به ساعتی از شبانه روز اطلاق می‌شود که اوج مصرف لیفت در آن‌ها قرار دارد. به‌عنوان مثال ساعات شروع روز کاری که در آن‌ها از لیفت برای انتقال نیروی انسانی به طبقات بالا استفاده می‌شود و یا ساعات ظهر که کارگران برای صرف غذا بایستی در یک نقطه جمع شوند، را می‌توان نام برد.

چو و کوان [۱۵] در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۱ با استفاده از برچسب‌های شناسایی فرکانس‌های رادیویی^۲ و شبکه‌های حسگر همه‌جا حاضر^۳ سیستمی را طراحی کردند که فرایند تحویل عمودی مصالح را بصورت خودکار انجام می‌دهد. این سیستم با حس کردن اطلاعات مصالح، باعث می‌شود مصالح به صورت خودکار به محل صحیح مسیردهی شوند. سیستم طراحی شده به صورت یک جعبه ابزار سخت‌افزاری هوشمند، قابل‌نصب بر روی دستگاه بالابر است و از اطلاعات به‌دست‌آمده از حسگرها می‌توان برای نظارت بر وضعیت کلی نیز استفاده کرد.

۲-۲- تکنیک های شبیه سازی

چو و کیم [۱۶] در سال ۲۰۱۰ به‌منظور تولید یک برنامه بهینه

- 1 Building Information Model
- 2 Radio Frequency Identification (RFID)
- 3 Ubiquitous Sensor Networks (USN)

فعالیت است.

- ۲- بالابری در ابتدای روز کاری یعنی هنگامی که نیروی کاری و مصالح به صورت هم‌زمان بایستی جابجا شوند مدل می‌شود.
- ۳- دستگاه بالابر دارای محدودیت وزنی و حجمی است و به تبع آن هر کدام از انواع منابع نیز وزن و حجم واحد مربوط به خود را دارند.
- ۴- به هر کدام از منابع، تأخیری به ازای بارگیری و یا تخلیه تعلق می‌گیرد.
- ۵- سرعت دستگاه بالابر ثابت فرض شده و به ازای هر توقف، مقدار تأخیری ثابت به حرکت دستگاه وارد خواهد شد.

۲-۳- نظریه گراف

گراف مجموعه‌ای از راس‌هاست که توسط یال‌هایی به یکدیگر متصل می‌شوند. در مدل‌سازی مساله برنامه‌ریزی بالابر، مسیر حرکت بالابر را با استفاده از نظریه گراف مدل خواهیم کرد. هر طبقه را با یک رأس و مسیر حرکت دستگاه بالابر بین طبقات را با یال‌ها مشخص می‌کنیم. با این کار می‌توانیم با استفاده از روابطی که در گذشته برای مسائل مشابه طراحی شده‌اند برای حل مساله مدیریت فرایندهای بالابری استفاده کنیم. از نظر ساختار، این مساله شباهت‌هایی با مسائل مسیر یابی وسیله نقلیه (VRP)^۱ و هم‌چنین فروشنده دوره گرد^۲ (TSP) دارد که به آن‌ها می‌پردازیم.

۲-۳-۱- مساله ی مسیر یابی وسیله نقلیه

هدف این مساله یافتن مسیر بهینه برای ناوگانی از وسایل نقلیه است، به شکلی که به مجموعه‌ای از مشتری‌ها کالایی را تحویل دهند. شکل ۱ نمونه‌ای از این حل مساله را نشان می‌دهد. از واریانت‌های این مساله می‌توان به مساله مسیر یابی وسیله نقلیه ی ظرفیت دار اشاره کرد. در این واریانت فرض می‌شود که هر کدام از این وسایل ظرفیت محدودی دارند. هدف در مساله ی بالابری با فرضیات مطرح شده در بالا نیز تحویل کالای مورد نیاز چندین طبقه، در چندین رفت و برگشت متوالی و با طی کمترین مسیر طی شده کل است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود هدف این مساله این است که تمامی نقاط دقیقاً یک بار توسط یکی از وسایل نقلیه

را ارائه کردند که قابلیت شتاب‌گیری و هم‌چنین کاهش شتاب دستگاه لیفت را نیز در نظر می‌گیرد. آنان هم‌چنین یک الگوریتم شاخه و مرز را به‌منظور به‌دست آوردن جواب بهینه، بروی این مساله اعمال کردند.

کو و هانگ [۲] در سال ۲۰۱۶ یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه را به‌منظور بهینه کردن برنامه ریزی و اجرای فرایندهای بالابری در ساختمان‌های بلند-مرتبه ارائه کردند. آن‌ها در این مدل، ضمن برقراری یک تعادل بین فاکتورهای زمان و هزینه، مصرف الکتریسیته را نیز کمینه کردند تا عملیات ساخت و ساز، سازگار با محیط زیست باشد.

همان‌طور که به تفصیل در بالا شرح داده‌شد، در کارهای انجام شده، به‌طور عمده تلاش بر این بوده که با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی، الگوریتم‌های محاسبه زمان بالابری و هم‌چنین تکنولوژی‌های جدید به برنامه‌ای بهتر در زمینه فرایند بالابری ساختمان دست یابیم. در فصل بعد به معرفی فرایندهای بالابری پرداخته و روند مدل‌سازی این فرایندها را بررسی می‌کنیم.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- فرایندهای بالابری در ساختمان‌های بلندمرتبه

پروژه‌های ساختمانی تعداد زیادی فعالیت تکراری و پشت‌سرهم را شامل می‌شوند [۱۸] که هر کدام نیازمند منابع انسانی و مواد ساختمانی خاصی هستند. مقدار چشم‌گیری از این فعالیت‌ها در ارتفاع به نسبت زیادی انجام می‌شوند که به‌منظور رساندن منابع مورد نیاز، تجهیزات (تاور کرین و لیفت) کمی برای حمل‌ونقل عمودی وجود دارند [۱۹]. در ساختمان‌های بلند-مرتبه، که در آن‌ها حمل‌ونقل منابع فقط از طریق لیفت امکان پذیر است، بازدهی نیروهای کاری نیز به بهینگی عملکرد لیفت وابسته است. برخی شاخصه‌های عملکردی لیفت‌ها عبارتند از:

• سرعت حرکت لیفت

• ظرفیت لیفت (وزنی و سطحی)

• مشخصات شتاب‌گیری و شتاب‌دهی لیفت

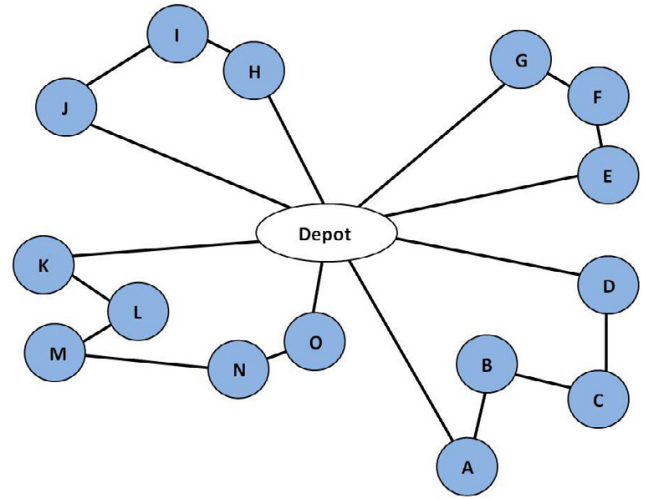
در این پژوهش با فرضیاتی به شرح زیر مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند بالابری در ساختمان بلند-مرتبه انجام می‌شود:

۱- در ساختمان موردنظر تعداد دلخواه دستگاه بالابر در حال

1 Vehicle Routing problem

2 Traveling Salesman Problem

شکل گراف مسیر حرکت بالابر در طی لیفت های متوالی مانند شکل ۱ خواهد بود با این تفاوت که دستگاه لیفت می تواند در رفت و برگشت های متوالی بیش از ۱ بار در یک گره توقف کند. نمونه ای از شکل گراف مساله ی بالابری در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل مسیر حرکت هر دستگاه بالابر با رنگی مجزا نشان داده شده است. نقطه بزرگ در مرکز شکل، طبقه هم کف و یا همان انبار را نمایش می دهد و نقاط دیگر طبقات بالاتر در ساختمان را مشخص می کنند. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، در دور های رفت و برگشتی متوالی، دستگاه های بالابر تمامی نقاطی که نیازمند منابع هستند را حداقل یک بار (بسته به مقدار تقاضا) ملاقات می کند. نقاطی که توسط دستگاه بالابر ملاقات نشده اند نیز تقاضای بالابری نداشته اند.



شکل ۱. نمونه ای از حل مساله ی مسیریابی وسیله نقلیه
Fig. 1. Example solution of a Vehicle Routing Problem

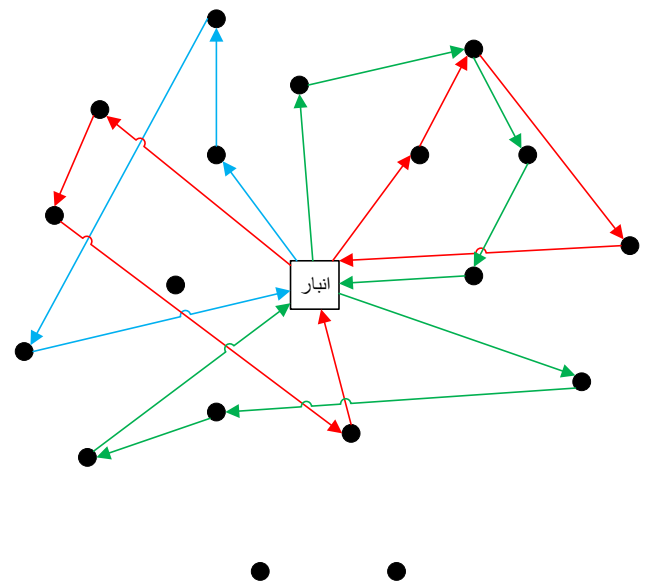
۳-۲-۲- مساله ی فروشنده ی دوره گرد

در نظریه ی گراف مفهومی شناخته شده تحت عنوان دور همیلتونی وجود دارد. در یک گراف، دور همیلتونی به دوری اطلاق می شود که تمامی نقاط گراف را دقیقاً یک بار ملاقات کند. هدف مساله فروشنده دوره گرد این است که در یک گراف وزن دار، دور همیلتونی با کمترین وزن را پیدا کند [۲۰].

مساله ی بالابری را از این جهت می توان به مساله ی فروشنده ی دوره گرد شبیه دانست که بالابر نیز در هر دور رفت و برگشتی، با انتخاب تعدادی از طبقات، در بین مسیرهای ممکن کوتاه ترین مسیر را انتخاب کرده و به مبدا باز خواهد گشت. البته بدیهی است که کوتاه ترین مسیر برای وسیله ی نقلیه ای که فقط در یک بعد حرکت می کند، مسیری است که در آن تنها یک تغییر جهت وجود داشته باشد، اما روابط حاکم بر مساله ی فروشنده ی دوره گرد، در مدل سازی مساله مساله ی بالابری می توانند مفید باشند.

۳-۳- برنامه ریزی عدد صحیح

برنامه ریزی عدد صحیح یکی از روش های حل مسائل بهینه سازی (بیشینه یا کمینه سازی) ریاضی و از مشتقات برنامه ریزی خطی است. در این دسته از مسائل یک یا چند متغیر به مقادیر صحیح محدود می شوند. همچنین در این مسائل تعدادی محدودیت نیز بر متغیرها حاکم اند. مسائل تصمیم گیری علوم مهندسی از آن جایی که اکثراً با متغیرهای باینری سر و کار دارند در این دسته بندی از مسائل قرار



شکل ۲. نمونه ای از مسیر حرکت مساله ی برنامه ریزی بالابر
Fig. 2. Example solution of a lift planning problem

ملاقات شوند، در حالی که در کل وسایل نقلیه کمترین فاصله را بپیمایند. می توان مساله ی بالابری را شبیه این مساله فرض کرد با این تفاوت که هر کدام از وسایل نقلیه ی مساله مسیریابی، نمایانگر یک دور رفت و برگشتی هر کدام از دستگاه های لیفت در مساله ی بالابری هستند. همچنین مسیر دستگاه های لیفت می تواند با یکدیگر هم پوشانی داشته باشد، چرا که میزان تقاضای طبقه لزوماً نمی تواند با یک بار سفر کردن یک دستگاه، ارضا شود.

جدول ۱. نمادهای به کار رفته و مفهوم آنها
Table 1. Notations and their description

تعریف	نماد	تعریف	نماد
حجم واحد منبع نوع m	$V(m)$	اندیس طبقات	i, j, k
تأخیر ثابت بارگیری و تخلیه منبع نوع m	$MD(m)$	اندیس نوع منابع	m
ارتفاع طبقه شماره i	$H(i)$	اندیس دستگاه لیفت	c
تقاضای طبقه i از منبع m	$D(i, m)$	اندیس دور رفت و بازگشتی	l
زمان سفر از طبقه i به j با دستگاه لیفت c	$t(i, j, c)$	سرعت متوسط لیفت شماره c	$SP(c)$
1 در صورتی که لیفت c در دور شماره l از طبقه i به j برود. 0 در غیر این صورت	$x(i, j, c, l)$	ظرفیت وزنی لیفت شماره c	$WC(c)$
مقدار مصالح m که در دور l توسط لیفت c به طبقه i حمل می شود	$u(i, m, c, l)$	ظرفیت سطحی لیفت شماره c	$AC(c)$
ثابت بسیار بزرگ	N	تأخیر ثابت لیفت شماره c به ازای هر توقف در طبقات	$DL(c)$
تابع هدف	Z	وزن واحد منبع نوع m	$W(m)$

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i,m,c,l} MD_m \times u_{i,m,c,l} + \sum_{i,j,c,l} [t_{i,j,c} + DL_c] \times x_{i,j,c,l} \quad (1)$$

$$\sum_{i,m} u_{i,m,c,l} \times W_m \leq WC_c \quad \forall c, l \quad (2)$$

$$\sum_{i,m} u_{i,m,c,l} \times V_m \leq AC_c \quad \forall c, l \quad (3)$$

$$\sum_i x_{i,j,c,l} = \sum_k x_{j,k,c,l} \quad \forall j, c, l \quad (4)$$

$$\sum_{i,i>j} x_{i,j,c,l} = 0 \quad \forall j > 1, c, l \quad (5)$$

$$\sum_m u_{j,m,c,l} \leq N \times \sum_i x_{i,j,c,l} \quad \forall j, c, l \quad (6)$$

$$\sum_{c,l} u_{i,m,c,l} \geq D_{i,m} \quad \forall c, l \quad (7)$$

$$N \times \sum_{j,i=1} x_{i,j,c,l} \geq \sum_{j,m} u_{j,m,c,l} \quad \forall c, l \quad (1)$$

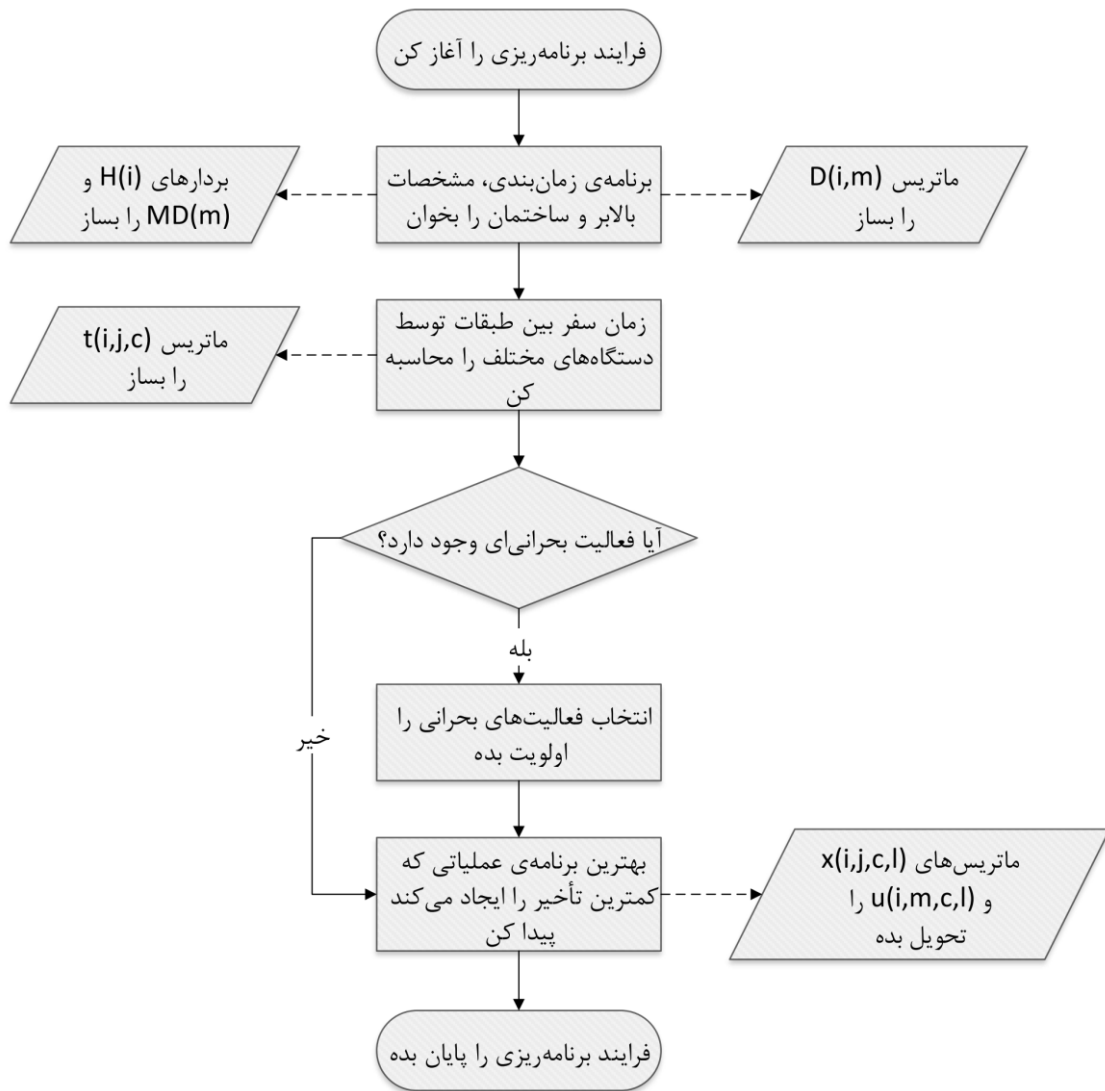
می گیرند. برای حل مدل طراحی شده از مساله ی بالابری نیز از این روش بهره خواهیم گرفت. شایان ذکر است که محدود بودن متغیرها به اعداد صحیح، پیچیدگی محاسباتی مساله را نسبت به مسائل برنامه ریزی خطی بالا می برد [۲۱].

۳-۴- روابط حاکم بر مساله

به منظور پیدا کردن برنامه ی عملکرد بهینه دستگاه های لیفت، بایستی زمان سفر کل دستگاه ها در طول یک روز کاری را کمینه کنیم. به منظور پیدا کردن این برنامه بایستی تابع هدف و قیدهای مساله را معرفی کنیم. در ابتدا به بررسی مجموعه ها، پارامترها و متغیرهای مساله می پردازیم. جدول ۱ تمامی این موارد را نشان می دهد.

شایان ذکر است که در روابط زیر به جای ظرفیت فضایی از ظرفیت سطحی لیفت استفاده شده است. علت این انتخاب این است که بسیاری از مصالح را به علت شکل ظاهری شان، نمی توان بر روی یکدیگر انباشت.

حال به بیان روابط حاکم بر مساله ی بالابری می پردازیم.



شکل ۳. فلوجارت روند انجام فرایند بهینه‌سازی
 Fig. 3. Flowchart of the optimization procedure

می‌کند، به این شکل که سفرها را از طبقه ای به طبقات بالاتر از خودش محدود می‌کند. این مساله به این معنا است که لیفت تنها زمانی به طبقه ای با ارتفاع کمتر از طبقه ی کنونی اش سفر می‌کند که تمامی طبقات برنامه ریزی شده در دور کنونی را ملاقات کرده و تمام بار خود را تخلیه کرده‌باشد و بخواهد به مبدا بازگردد. بر اساس رابطه ی ۶، در هر دور رفت‌وبازگشتی، هیچ مصالحی توسط لیفت C به طبقه ی j حمل نخواهد شد، مگر اینکه این لیفت به آن طبقه سفر کند. رابطه ی ۷ باعث خواهد شد که مجموع مقدار منابع حمل شده از هر منبع به هر طبقه، از مقدار تقاضای آن طبقه بزرگ‌تر یا مساوی با آن باشد. در نهایت رابطه ۸ بهینه‌سازی را ملزم می‌کند تا در

در رابطه ی ۱ عبارت $\sum_{i,m,c,l} MD_m \times u_{i,m,c,l}$ بیانگر تأخیر کل اعمال شده به ازای بارگیری و باربرداری مصالح است. عبارت $\sum_{i,j,c} t_{i,j,c} \times x_{i,j,c,l}$ نمایانگر تأخیر به ازای سفر انجام شده بین طبقات و عبارت $\sum_{i,j,c,l} DL_c \times x_{i,j,c,l}$ نمایانگر کل تأخیرات اعمال شده به ازای هر توقف است.

روابط ۲ و ۳ به ترتیب قیدهای مربوط به محدودیت وزنی و محدودیت حجمی هر کدام از لیفت‌ها هستند. رابطه ۴ قید پایداری است به این معنا که تعداد ورود دستگاه لیفت به یک طبقه با تعداد خروج لیفت از همان طبقه، در هر دور رفت‌وبازگشتی، برابر است. رابطه ۵ به کاهش پیچیدگی محاسباتی مساله کمک بسیاری

جدول ۲. مشخصات فنی دستگاههای لیفت
Table 2. Technical specifications of the lift cars

مشخصه	مقدار
سرعت متوسط	36 متر بر دقیقه
ظرفیت وزنی	1500 کیلوگرم
ابعاد	2/5×1/5×2/1
ظرفیت سطحی	3/75 متر مربع
تأخیر ثابت	30 ثانیه

جدول ۳. ویژگیهای فنی هر واحد از منابع
Table 3. Characteristics of each resource unit

نوع منبع	وزن (Kg)	سطح اشغال شده (m^2)	تأخیر بارگیری و باربرداری (s)
کارگران	85	0/28	3
روکش گچی کناف	35	0/5	10
درب دفاتر	80	0/45	15
لوله	15	0/1	7

در این بخش به منظور آزمون کارکرد این روابط، یک مساله‌مساله ی جهان واقعی را از طریق این روابط حل می‌کنیم.

برای آزمایش بهینه‌سازی ارائه‌شده، داده‌های تقاضای مربوط به پروژه ی برج ۳۴ طبقه تجاری آرمیتاژ گلشن واقع در مشهد مقدس جمع‌آوری شدند. این برج دارای ۱۴۰ متر ارتفاع و ۲۰۰۰۰ متر مربع زیربنا است. این ساختمان دارای دو دستگاه لیفت با خصوصیات مشابه است که در جدول ۲ داده شده‌اند.

در روز کاری انتخاب شده به منظور برنامه ریزی لیفت توسط مدیر پروژه، چند نوع عملیات ساختمانی از جمله لوله‌کشی، نصب دیوارهای کناف و هم‌چنین نصب درب‌های دفاتر در حال انجام است. ویژگی‌های منابع مورد نیاز برای این فعالیت‌ها در جدول ۳ داده شده‌است.

وزن هر یک از کارگران با احتساب ابزاری که معمولاً همراه خود دارند، در پژوهش‌های پیشین حدود ۸۵ کیلوگرم در نظر گرفته شده‌است. روکش‌های گچی کناف هر کدام دارای ابعاد $1.2m \times 2.4m \times 1.25mm$ هستند که با کمی محاسبات بدبینانه

صورت حمل مصالح در یک دور رفت و بازگشتی، حتماً طبقه هم‌کف و یا همان انبار را در مسیر حرکت لیفت قرار دهد.

فرایند ۳ مرحله‌ای بهینه‌سازی در قالب یک فلوچارت در شکل ۳ نمایش داده شده‌است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود برنامه‌ی توسعه داده‌شده در ابتدا داده‌ها را از منابع مختلف دریافت کرده و ماتریس‌های ورودی مربوطه را ایجاد می‌کند. سپس در صورت وجود فعالیت‌های بحرانی آن‌ها را در برنامه‌ریزی اولویت داده و فرایند جستجو در فضای جواب را آغاز می‌کند. در نهایت نیز پاسخ بهینه را به فرم دو ماتریس خروجی X_{ijel} و U_{imcl} نمایش می‌دهد.

در قسمت بعد بهینه‌سازی مذکور را بر روی داده‌های یک پروژه واقعی پیاده‌سازی کرده و نتایج را بررسی می‌کنیم.

۴- نتایج

در قسمت قبل به بیان مفاهیم پایه‌ی روابط حاکم بر مساله‌ی لیفت پرداختیم، هم‌چنین روابط حاکم را معرفی کرده و شرح دادیم.

جدول ۴. داده های مربوط به ارتفاع و تقاضای طبقات ساختمان
Table 4. Input data of building floor heights and resource demands

تقاضای منابع					
لوله	درب	روکش گچی	کارگر	ارتفاع (m)	طبقه
-	-	-	-	-	1-25
-	9	14	4	109/8	26
-	9	14	4	113/6	27
-	9	14	4	117/4	28
-	-	-	-	121/2	29
-	-	-	-	125	30
-	-	-	-	128/8	31
8	-	-	6	132/6	32
8	-	-	6	136/4	33
8	-	-	6	140/2	34

وارد نرم افزار CPLEX/GAMS شدند. نتایج بهینه سازی در جدول ۵ ارائه شده اند. در این جدول هر رنگ نمایانگر یک نوع از منابع و هر مربع رنگی، نشان دهنده ی یک واحد از منبع مربوطه است.

این محاسبات بر روی سیستمی با پردازنده ی اینتل ۵ هسته ای و دارای ۴ گیگابایت رم، در مدت زمان ۱۲۹۴۰ ثانیه به فاصله ی ۰٪ از حد پایین رسیده است. در شکل ۴ نمودار همگرایی فرایند حل مساله نشان داده شده است. این نمودار، به منظور نمایش بهتر فرایند همگرایی، به صورت شبه لگاریتمی نشان داده شده است.

نتایج به دستبده دست آمده از روش بهینه سازی پیاده سازی شده پس از محاسبات جهت پیاده سازی به دفتر کنترل پروژه برج مسکونی-تجاری آرمیتاژ ارائه و پس از پیاده سازی در مورد بهبود تاخیر ناشی از حمل و نقل عمودی از ایشان نظرخواهی شد. نظرات آنان حاکی از بهبود فرایندهای بالابری پس از اعمال برنامه ی به دستبده دست آمده بود. دیدگاه خبرگاه و متخصصین کنترل پروژه مشغول در پروژه در موارد زیر خلاصه شده است.

۱- زمان کل بالابری در این روز کاری نسبت به روزهای دیگر با حجم مصالح مشابه، کمتر بود.

۲- فعالیت هایی که وابسته به مصالح بالا برده شده است توسط

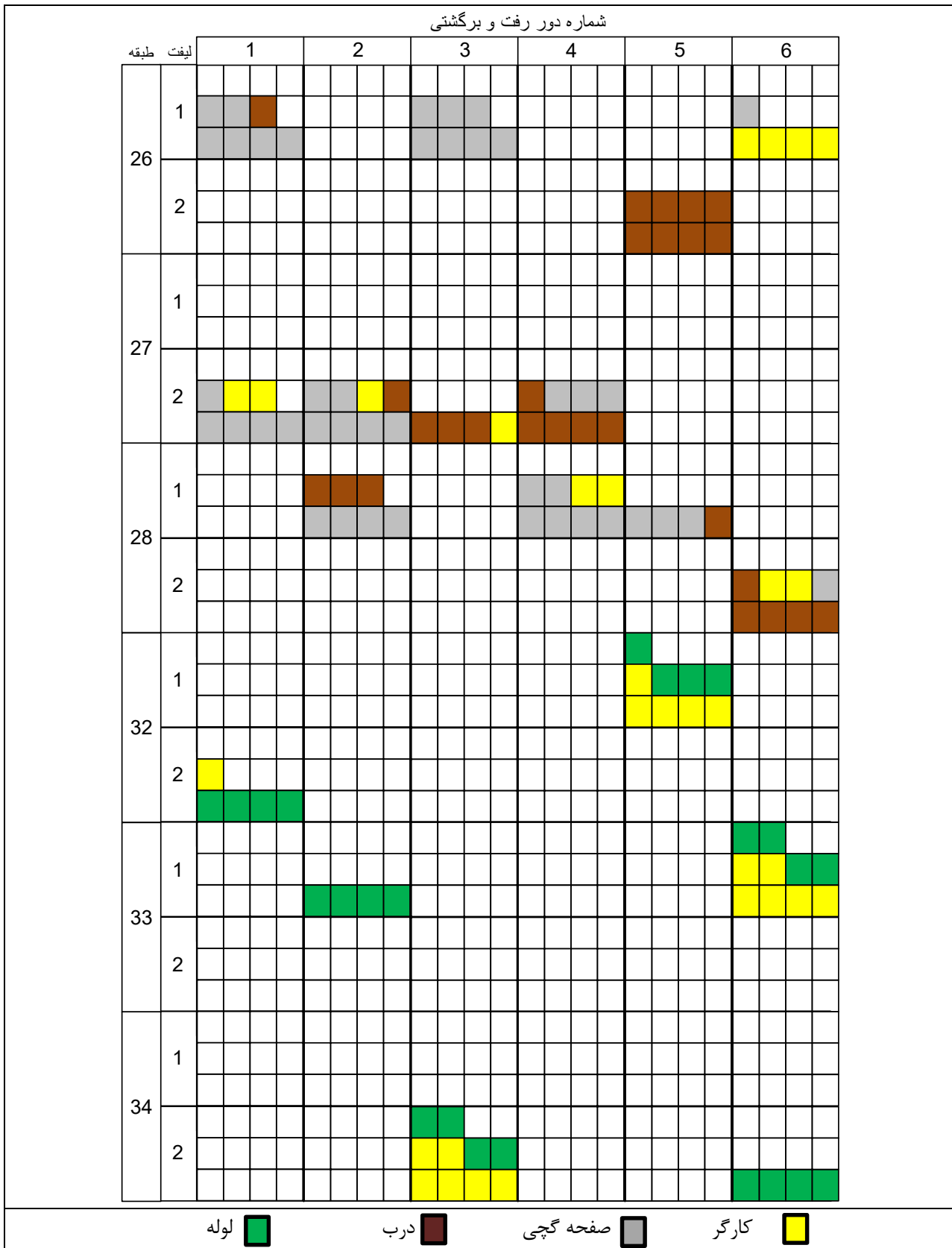
(به علت کج شدن آن ها در صورت تکیه دادن به دیواره ی اتاقک لیفت و به یکدیگر) سطحی حدود ۰/۵ مترمربع را اشغال خواهند کرد. مشخصات هندسی و وزنی درب ها نیز از نقشه های تاییدشده، جمع آوری شده و به مدل داده شده است. لوله های مورد نیاز در پروژه در شاخه های ۶ متری عرضه می شوند. به گفته مسئولین کنترل پروژه ی برج، این لوله ها را با استفاده از فضای حفره مانند کوچکی که در سقف اتاقک لیفت تعبیه شده در لیت جای می دهند. این امر باعث می شود که تعداد لوله هایی که هر دفعه می توان در لیفت بارگیری کرد به ۴ عدد محدود شود. به منظور اعمال این شرایط، بایستی قید ۹ را به قیود بهینه سازی اضافه کرد.

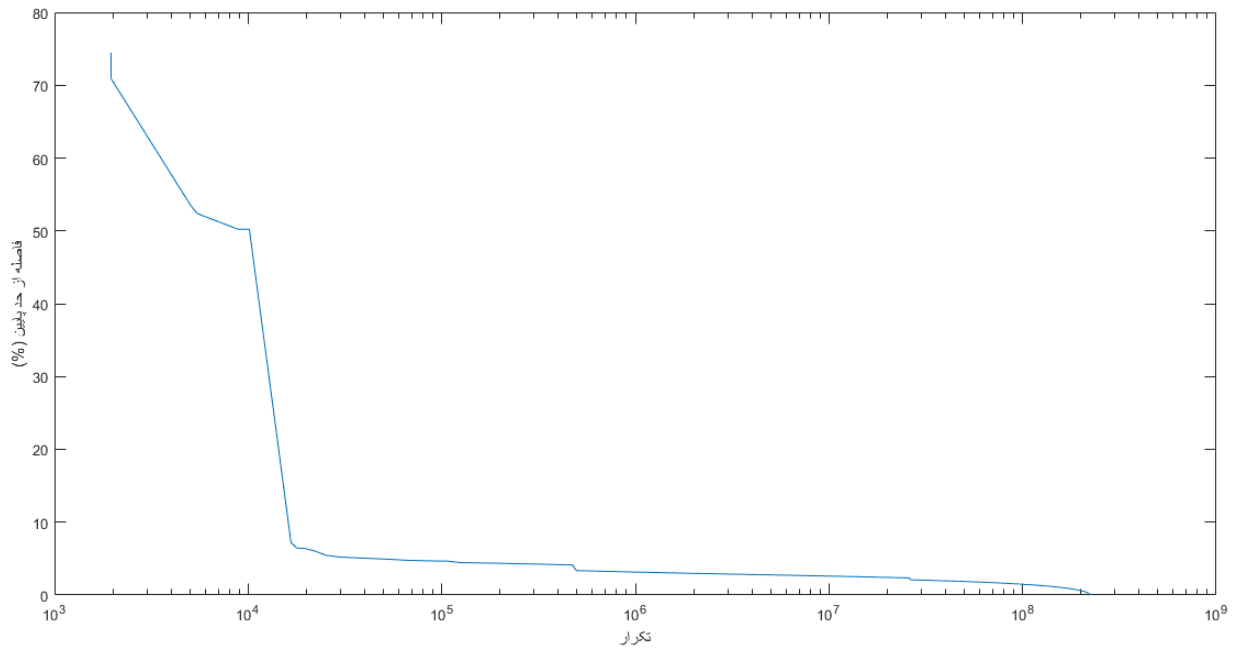
$$\sum_i u_{imcl} \leq 4 \quad \forall c, l, m = pipe \quad (9)$$

اضافه شدن این قید پیچیدگی محاسبات را افزایش می دهد و باعث می شود بهینه سازی دیرتر به جواب برسد.

داده های ارتفاعی و مقدار تقاضای ساختمان نیز با مشورت دفتر کنترل پروژه ی برج، جمع آوری شده و در جدول ۴ ارائه شده است. تمامی داده های فوق الذکر به منظور انجام محاسبات بهینه سازی،

جدول ۵. مقدار منابع منتقل شده توسط هر یک از لیفتها، در هر دور رفت و برگشتی
 Table 5. The number of resources carried by each lift car on each roundtrip





شکل ۴. نمودار همگرایی بهینه سازی نسبت به تکرارها
 Fig. 4. Semi-logarithmic convergence curve of the optimization process (Iterations-gap)

و همچنین انواع مصالح حمل شده محدود بوده‌اند. در پژوهش‌های جدیدتر از جمله [۲ و ۳ و ۱۲] مدل‌های شبیه‌سازی کمی در زمینه‌ی انتخاب طبقات آزادتر گذاشته شده‌اند اما همچنان بهترین برنامه‌ی حرکت دستگاه بالابر با مقایسه‌ی چندین سناریوی از پیش تعریف شده، انتخاب می‌شوند. شبیه‌سازی سناریو محور که اغلب بر مبنای نظرات خبرگان استوار است ممکن است بهترین عملکرد و یا بهینه‌ی جهانی^۱ را نیابد. اما در این پژوهش، صرف‌نظر از سناریوهایی که در ساختمان‌های بلندمرتبه معمول هستند و برنامه‌ریزی اغلب بر اساس آن‌ها انجام می‌شود، بهینه‌سازی در انتخاب‌های خود کاملاً آزاد گذاشته شده و محدودیت‌های پژوهش‌های پیشین نیز برداشته شده‌اند. بنابراین این پژوهش قابلیت پیدا کردن بهینه‌ی جهانی را داراست.

نمودار همگرایی نشان داده شده در شکل ۴ نیز نمایانگر این است که بهینه‌سازی در زمان بسیار کوتاهی به درصد مناسبی از بهینگی پاسخ رسیده و در شرایط محدودیت زمان محاسبات نیز می‌توان به پاسخ قابل قبولی دست یافت.

۶- نتیجه گیری

حمل و نقل عمودی مصالح و نیروی کاری در موفقیت پروژه‌های

دستگاه لیفت بودند، زودتر آغاز شده و در پایان با تاخیر کمتری تحویل داده شدند.

۳- مقدار انرژی روزانه مصرفی دستگاه بالابر نسبت به حالت بدون برنامه‌ریزی اندکی کاهش یافت.

۴- تعداد سفرهای انجام شده از طبقه هم‌کف کاهش یافت.

۵- زمان انتظار افراد برای انجام سفرهای عمودی در سایت کمی کاهش پیدا کرد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به حل مسأله‌ی بالابری در ساختمان‌های بلندمرتبه پرداخته شد. همان‌طور که در فصل قبل دیده شد خروجی‌های این برنامه‌ریزی دو ماتریس هستند که به‌طور دقیق بهترین برنامه‌ی بالابری را برای عملکرد دستگاه‌های بالابر ارائه می‌دهند. در پژوهش‌های پیشین، محاسبه‌ی بهترین برنامه با محدودیت‌هایی روبرو بوده‌است. این محدودیت‌ها یا در جزئیات تصمیم‌گیری‌ها و یا در دامنه‌ی تصمیمات ممکن نمود پیدا می‌کرده‌اند. به این صورت که برخی همانند [۱۶ و ۱۷] مدل شبیه‌سازی را در تصمیم‌گیری محدود به یک سری سناریوهای از پیش تعریف شده می‌کنند. این سناریوها در تعداد دستگاه‌های بالابر، تعداد توقف‌ها در دوره‌های رفت و برگشتی

- [2] M. Jung, J. Moon, M. Park, H.-S. Lee, S.U. Joo, K.-P. Lee, Construction worker hoisting simulation for sky-lobby lifting system, *Automation in Construction*, 73 (2017) 166-174.
- [3] M. Park, S. Ha, H.-S. Lee, Y.-k. Choi, H. Kim, S. Han, Lifting demand-based zoning for minimizing worker vertical transportation time in high-rise building construction, *Automation in Construction*, 32 (2013) 88-95.
- [4] T. Kim, H. Lim, S.W. Kim, H. Cho, K.-I. Kang, Inclined construction hoist for efficient resource transportation in irregularly shaped tall buildings, *Automation in Construction*, 62 (2016) 124-132.
- [5] M. Kamleh, Improving Hoist Performance during the Up-Peak of Tall Building Construction, 2014.
- [6] D. Castro-Lacouture, A.L. Medaglia, M. Skibniewski, Supply chain optimization tool for purchasing decisions in B2B construction marketplaces, *Automation in Construction*, 16(5) (2007) 569-575.
- [7] H. Zhang, H. Li, Simulation-based optimization for dynamic resource allocation, *Automation in Construction*, 13(3) (2004) 409-420.
- [8] W. Lu, G.Q. Huang, H. Li, Scenarios for applying RFID technology in construction project management, *Automation in Construction*, 20(2) (2011) 101-106.
- [9] R. Sacks, M. Radosavljevic, R. Barak, Requirements for building information modeling based lean production management systems for construction, *Automation in construction*, 19(5) (2010) 641-655.
- [10] M. Bade, C. Haas, Using lean design and construction to get more from capital projects, *Government Finance Review*, 31(2) (2015) 39-44.
- [11] T.-H. Shin, S. Chin, S.-W. Yoon, S.-W. Kwon, A service-oriented integrated information framework for RFID/WSN-based intelligent construction supply chain management, *Automation in Construction*, 20(6) (2011) 706-715.
- [12] C. Koo, T. Hong, J. Yoon, K. Jeong, Zoning-Based Vertical Transportation Optimization for Workers at Peak Time in a Skyscraper Construction, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31(11) (2016) 826-845.

ساختمانی بلند-مرتبه، عاملی بسیار مؤثر است. تعداد بسیار زیاد فعالیت های هم‌زمان و ارتفاع بالایی که بیشتر این فعالیت ها در آن انجام می شوند، وجود یک برنامه ی عملکردی بهینه برای بالابرها را الزامی می کند. بررسی پیشینه ی تحقیق حاکی از این است که نقطه ی اوج حمل و نقل صحگاهی به علت بالابری هم‌زمان نیروی کاری و مصالح، از اهمیت بالاتری نسبت به زمان های دیگر برخوردار است. راه حل معمول در کارگاه های ساختمانی این است که یک یا دو روز پیش از آغاز هر فعالیت، مصالح مربوط به آن فعالیت را به محل مربوطه انتقال می دهند. اما در برخی شرایط به علت کمبود فضا و همچنین مزاحمت برای همسایگان، این کار امکان پذیر نیست. هم چنین انتقال نیروی کاری نیز با این روش به هیچ وجه امکان پذیر نیست.

با توجه به طبیعت پیچیده ی فعالیت های ساختمانی در یک ساختمان بلند-مرتبه، بهینه سازی این فرایند به منظور جلوگیری از به وجود آمدن گلوگاه در زنجیره ی تامین امری مشکل است. در این پژوهش به منظور مقابله با این مساله، برای برنامه ریزی یک سیستم چند بالابره، یک مدل ریاضی توسعه داده شد. مدل مذکور با کمینه سازی زمان بالابری کل، به حل مشکل بالابری می پردازد. پژوهش هایی که در آینده می توان در این زمینه انجام داد را می شود در موارد زیر برشمرد:

- ۱- بررسی میزان تأثیر ایجاد تغییر در داده های ورودی (از جمله نوع و تعداد دستگاه های بالابره)، در خروجی های مساله.
- ۲- توسعه ی مدل هایی که زمان بالابری را دقیق محاسبه کنند.
- ۳- توسعه ی مدل های احتمالاتی، به علت ماهیت پویا و احتمالی تقاضا در بازه های زمانی بلندتر از یک روز کاری
- ۴- ارائه ی روش های نوین جمع آوری داده به منظور استفاده در حل مسائل بالابری
- ۵- ارائه ی روش های نوین به منظور استفاده از داده های خروجی در بالابره های ساختمانی

مراجع

- [1] Y. Shin, H. Cho, K.-I. Kang, Simulation model incorporating genetic algorithms for optimal temporary hoist planning in high-rise building construction, *Automation in Construction*, 20(5) (2011) 550-558.

- [17] C.-Y. Cho, Y. Lee, M.-Y. Cho, S. Kwon, Y. Shin, J. Lee, An optimal algorithm of the multi-lifting operating simulation for super-tall building construction, *Automation in Construction*, 35 (2013) 595-607.
- [18] K. Hyari, K. El-Rayes, Optimal planning and scheduling for repetitive construction projects, *Journal of Management in Engineering*, 22(1) (2006) 11-19.
- [19] S. Hwang, Planning temporary hoists for building construction, in: *Construction Research Congress 2009: Building a Sustainable Future*, 2009, pp. 1300-1307.
- [20] G. Dantzig, R. Fulkerson, S. Johnson, Solution of a large-scale traveling-salesman problem, *Journal of the operations research society of America*, 2(4) (1954) 393-410.
- [21] G.L. Nemhauser, L.A. Wolsey, *Integer programming and combinatorial optimization*, Wiley, Chichester. GL Nemhauser, MWP Savelsbergh, GS Sigismondi (1992). *Constraint Classification for Mixed Integer Programming Formulations*. COAL Bulletin, 20 (1988) 8-12.
- [13] R. Sacks, R. Navon, I. Brodetskaia, A. Shapira, Feasibility of automated monitoring of lifting equipment in support of project control, *Journal of construction engineering and management*, 131(5) (2005) 604-614.
- [14] C. Cho, S. Kwon, J. Lee, S. You, S. Chin, Y. Kim, Basic Study of Smart Robotic Construction Lift For Increasing Resource Lifting Efficiency in High-Rise Building Construction, in: *Conference Proceeding of ISARC, 2009*, pp. 483-491.
- [15] C.-Y. Cho, S. Kwon, T.-H. Shin, S. Chin, Y.-S. Kim, A development of next generation intelligent construction liftcar toolkit for vertical material movement management, *Automation in construction*, 20(1) (2011) 14-27.
- [16] C.-Y. Cho, J. Kim, M. Cho, J. Lee, Y. Kim, S. Kwon, Simulation method of construction hoist operating plan for high rise buildings considering lifting heights and loads, in: *27th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2010, pp. 22-28.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Jalali Yazdi, M. Maghrebi, J. Bolouri Bazaz, *Optimizing the lift process in high-rise construction projects*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(2) (2020) 383-396.

DOI: [10.22060/ceej.2018.13868.5496](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.13868.5496)



