نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۲ شماره ۲، سال ۱۳۹۹، صفحات ۳۸۳ تا ۳۹۶
DOI: 10.22060/ceej.2018.13868.5496

بهینه‌سازی فرایندهای بالابر در حین عملیات اجرایی ساختمان‌های بلندمرتبه

علیرضا جلالی یزدی، مجتبی مغربی*، جعفر بلوری بزاز

گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

خلاصه: در پروژه های ساختمانی بلند-مرتبه، فراهم بودن منابع از جمله نیروی انسانی و مصالح مورد نیاز، دقیقا پیش از آغاز فعالیت های ساختمانی، عاملی بحرانی است که مستقیما 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 زنجیره ی تأمین در ساختمان‌هاست. این امر به ویژه در ساختمان‌های بلندمرتبه که شامل تعداد بسیار زیادی از فعالیت های تکراری و هم‌زمان هستند اهمیت پیدا می کند. چالشی که در این راستا به وجود می آید، حمل و نقل عمودی منابع به صورت بهینه است که فقط توسط ماشین آلاتی خاص (از جمله تاور کرین ها و بالابر ها)، امکان پذیر است. در پژوهش های گذشته مشاهده شده‌است که برنامه ریزی بهینه عملکرد دستگاه های بالابر ساختمانی از طریق روش های یاد شده، تاثیر چشم‌گیری در کاهش تاخیر در انجام فعالیت ها دارد. در این پژوهش به توسعه ی یک مدل بهینه‌سازی برنامه عملکردی لیفت ها در ساختمان‌های بلندمرتبه ی دارای چندین دستگاه لیفت، با استفاده از تکنیک های برنامه ریزی عدد صحیح (Integer Programming) می پردازیم.شده‌است

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

۱- مقدمه

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]. برنامه زمانی فشرده ساخت یک پروژه بلند-مرتبه، اجرای هم‌زمان تعداد زیادی از فعالیت های ساختمانی را الزامی می کند. این مطلب باعث افزایش تقاضای حمل و نقل عمودی در این پروژه ها نسبت به دیگر انواع پروژه های ساختمانی، می شود [۲]. در یک ساختمان بلند-مرتبه تعداد زیادی فعالیت در نواحی و ارتفاعات مختلف پروژه در حال انجام هستند. بسیاری از این فعالیت ها، فعالیت های تخصصی هستند، به این معنا که به منظور اجرا نیازمند مصالح و تجهیزات خاص می باشند. در صورتی که منابع مورد نیاز این فعالیت ها (اعم از نیروی کاری و مصالح) به موقع به این فعالیت ها 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 زمان ها، این نوع از تأخیرها زیان های اقتصادی نیز در بر خواهد داشت [۳]. زمان تحویل کامل پروژه نیز وابسته به تحویل

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

به موقع هر فعالیت به صورت منفرد است و تأخیرات در فعالیت ها به‌صورت تجمعی به تأخیر کل پروژه منتقل خواهندشد [۴ و ۵]. در پیشینه تحقیق، تعداد قابل‌توجهی پژوهش در زمینه ی تحویل به موقع[1] مصالح و نیروی کار انجام شده‌است [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. همان‌طور که از مطالب بالا برداشت می شود، دستگاه های بالابر از اهمیت بالایی در حمل و نقل عمودی ساختمان‌های 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 نشده‌است. 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[2] در فرایند زنجیره تأمین تبدیل شود، تأخیرات و هزینه های اضافه ای را، به مالکین پروژه ها تحمیل خواهدکرد. 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 مستقیما 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 ساختمان‌ها دارد. تقاضای بالابری در سیستم آسانسور های ساختمانی، پیش از شروع عملیات بالابری، غیرقابل‌پیش بینی است، بنابراین فرض می شود که این تقاضا به‌صورت 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 مهندسین ساختمانی هستند که برخلاف مسافران فاز بهره برداری، توسط مدیر پروژه قابل‌کنترل 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 روزکاری، پایان روزکاری 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 مستقیما به تاخیر کل پروژه منجر می شود. به‌منظور جلوگیری از چنین مخاطراتی، بایستی تمامی منابع مورد نیاز این فعالیت ها، دقیقا 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 ذکرشده 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 شده‌است. این پژوهش ها در تلاش اند تا یک زمان بندی کارآمد را برای بالابر، برنامه ریزی و اجرا کنند. پژوهش های انجام‌شده را می توان به ۳ دسته تقسیم کرد:

۱-۲- سیستم های هوشمند کنترل بالابری

1 Just-In-Time Delivery
2 Bottleneck

۲-۱- 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[1] است و از یک دستگاه نظارتی جعبه سیاه در داخل دستگاه بالابر استفاده می کند. این سیستم داده های زمان-واقعی را با دقت قابل‌قبولی جمع آوری و ارسال می کند.

چو و کوان [۱۴] در سال ۲۰۰۹ طرح مفهومی یک بالابر روباتیک 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 (ساعت های غیربحرانی) است. به منظور انجام لیفت در ساعات شب، این فناوری به یک سیستم کنترل از راه دور بی‌سیم مجهز شده‌است. ساعت های بحرانی به ساعاتی از شبانه روز اطلاق می شود که اوج مصرف لیفت در آن ها قرار دارد. به‌عنوان مثال ساعات شروع روز کاری که در آن ها از لیفت برای انتقال نیروی انسانی به طبقات بالا استفاده می شود 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 برچسب های شناسایی فرکانس های رادیویی[2] و شبکه های حسگر همه جا حاضر[3] سیستمی را طراحی کردند که فرایند تحویل عمودی مصالح را به‌صورت خودکار انجام می دهد. این سیستم با حس کردن اطلاعات مصالح، باعث می شود 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 به‌دست‌به‌دست آمده از حسگرها می توان 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 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 به‌دست‌به‌دست آمده توسط آنان، پیشرفت قابل‌ملاحظه ای 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، به منظور یافتن شکل منطقه‌بندی بهینه ی طبقات، توسعه دادند. منطقه‌بندی در مسائل حمل و نقل عمودی به این معنا است که طبقات را در خوشه هایی دسته بندی کرده و به هر یک از این خوشه ها 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 ساختمان به ۲ یا چند خوشه تقسیم می شوند. به دنبال این تقسیم‌بندی، برای هر یک از این خوشه‌ها یک لابی مستقل در نظر می گیریم که همان پایین‌ترین طبقه مربوط به آن منطقه است. به این لابی ها که در طبقات بالاتر قرار دارند، به اصطلاحلابی آسمان اطلاق می شود. در این سیستم دو نوع بالابر فعالیت می کنند که عبارتند از: بالابر محلی و شاتل. بالابر محلی فقط در بین لابی هر یک از منطقه ها و طبقات آن منطقه رفت و آمد می کند. این در حالی است که شاتل ها فقط بین لابی اصلی (هم‌کف) و لابی های آسمان رفت و آمد کرده و منابع را انتقال می دهند.

۲-۳- الگوریتم های محاسبه ی زمان بالابری

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

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

را ارائه کردند که قابلیت شتاب گیری و هم‌چنین کاهش شتاب دستگاه لیفت را نیز در نظر می‌گیرد. آنان هم‌چنین یک الگوریتم شاخه و مرز را بەمنظور بەدست آوردن جواب بهینه، بروی این مسأله اعمال کردند.

کو و هانگ [۲] در سال ۲۰۱۶ یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه را بەمنظور 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، بەطور عمده تلاش بر این بوده که با استفاده از روش های شبیه‌سازی، الگوریتم های محاسبه زمان بالابری و هم‌چنین تکنولوژی های جدید به برنامه ای 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 روش ها

۳-۱- فرایندهای بالابری در ساختمان‌های بلندمرتبه

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

- سرعت حرکت لیفت
- ظرفیت لیفت (وزنی و سطحی)
- مشخصات شتاب گیری و شتاب دهی لیفت

در این پژوهش با فرضیاتی به شرح زیر مدل سازی و بهینه سازی فرایند بالابری در ساختمان بلند-مرتبه انجام می شود:

۱- در ساختمان موردنظر تعداد دلخواه دستگاه بالابر در حال فعالیت است.

۲- بالابری در ابتدای روز کاری یعنی هنگامی که نیروی کاری و مصالح به صورت هم‌زمان بایستی جابجا شوند مدل می شود.

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 می گیرد.

۵- سرعت دستگاه بالابر ثابت فرض شده و به ازای هر توقف، مقدار تأخیری ثابت به حرکت دستگاه وارد خواهد شد.

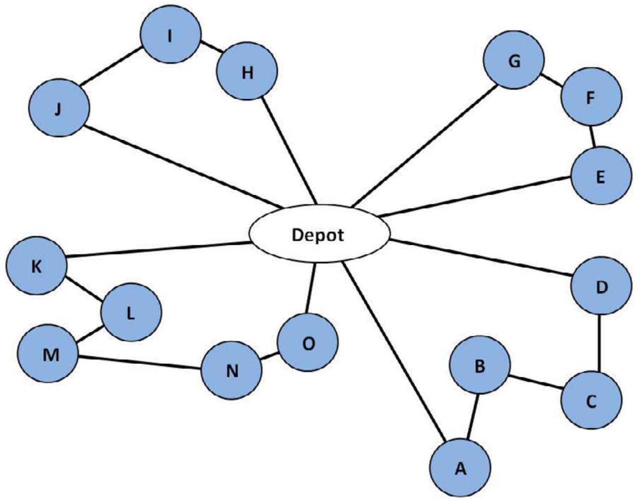
۳-۲- نظریه گراف

گراف مجموعه ای از راس هاست که توسط یال هایی به یکدیگر متصل می شوند. در مدل سازی مساله برنامه ریزی 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 یال ها مشخص می کنیم. با این کار می توانیم با استفاده از روابطی که در گذشته برای مسائل مشابه طراحی شده اند برای حل مساله مدیریت فرایندهای بالابری استفاده کنیم. از نظر ساختار، این مساله شباهت هایی با مسائل مسیر یابی وسیله نقلیه (VRP)[1] و هم‌چنین فروشنده دوره گرد (TSP)[2] دارد که به آن ها می پردازیم.

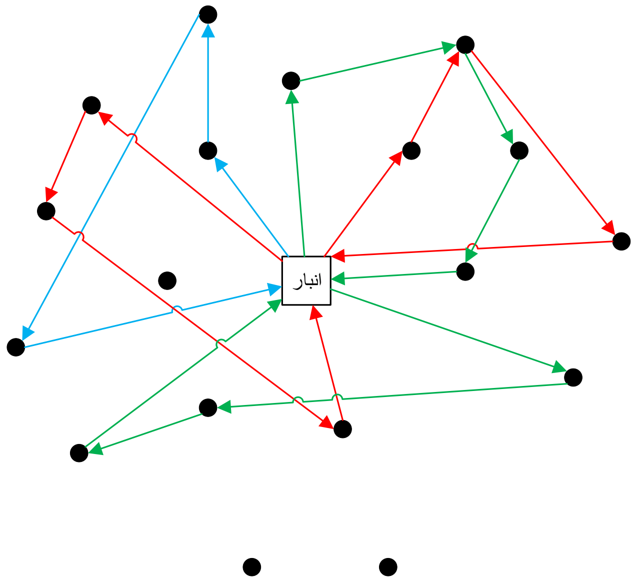
۳-۲-۱- مساله ی مسیریابی وسیله نقلیه

هدف این مساله یافتن مسیر بهینه برای ناوگانی از وسایل نقلیه است، به شکلی که به مجموعه ای از مشتری ها کالایی را تحویل دهند. شکل ۱ نمونه ای از این حل مساله را نشان می دهد. از واریانت های این مسأله می توان به مساله مسیریابی وسیله نقلیه ی ظرفیت دار اشاره کرد. در این واریانت فرض می شود 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 می شود هدف این مساله این است که تمامی نقاط دقیقا یک بار توسط یکی از وسایل نقلیه

1 Vehicle Routing problem
2 Traveling Salesman Problem



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



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 مسأله 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 هم‌پوشانی داشته‌باشد، چرا که میزان تقاضای طبقه لزوما نمی تواند با یک بار سفر کردن یک دستگاه، ارضا شود.

شکل گراف مسیر حرکت بالابر در طی لیفت های متوالی مانند شکل ۱ خواهد بود با این تفاوت که دستگاه لیفت می تواند در رفت‌وبرگشت های متوالی بیش از ۱ بار در یک گره توقف کند. نمونه ای از شکل گراف مسالهماله ی بالابری در شکل ۲ نشان داده شده‌است. در این شکل مسیر حرکت هر دستگاه بالابر با رنگی مجزا نشان داده شده‌است. نقطه بزرگ در مرکز شکل، طبقه هم‌کف و یا همان انبار را نمایش می دهد و نقاط دیگر طبقات بالاتر در ساختمان را مشخص می کنند. همان‌طور 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 کنند. نقاطی که توسط دستگاه بالابر ملاقات نشده‌اند نیز تقاضای بالابری نداشته اند.

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 دقیقا 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 وبرگشتی، 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 داشته‌باشد، اما روابط حاکم بر مسالهمساله 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 کمینه‌سازی) 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 اکثرا با متغیر های باینری سر و کار دارند در این دسته بندی از مسائل قرار

جدول ۱. نمادهای به‌کار 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 می‌شود	$u(i,m,c,l)$	ظرفیت سطحی لیفت شماره c	$AC(c)$
ثابت بسیار بزرگ	N	تاخیر ثابت لیفت شماره c به ازای هر توقف در طبقات	$DL(c)$
تابع هدف	Z	وزن واحد منبع نوع m	$W(m)$

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

۳-۴- روابط حاکم بر مساله

به‌منظور پیدا کردن برنامه ی عملکرد بهینه دستگاه های لیفت، بایستی زمان سفر کل دستگاه ها در طول یک روز کاری را کمینه کنیم. به‌منظور پیدا کردن این برنامه بایستی تابع هدف و قیدهای مساله را معرفی کنیم. در ابتدا به بررسی مجموعه ها، پارامترها و متغیر های مساله می‌پردازیم. 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 شده‌است. علت این انتخاب این است که بسیاری از مصالح را به علت شکل ظاهری‌شان، نمی توان بر روی یکدیگر انباشت.

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

$$Minimize\, Z = \sum_{i,m,c,l} MD_m \times u_{i,m,c,l} + \sum_{i,j,c,l} [t_{i,j,c} + DL_c] \times x_{i,j,c,l} \qquad (۱)$$

$$\sum_{i,m} u_{i,m,c,l} \times W_m \le WC_c \qquad \forall c,l \qquad (۲)$$

$$\sum_{i,m} u_{i,m,c,l} \times V_m \le AC_c \qquad \forall c,l \qquad (۳)$$

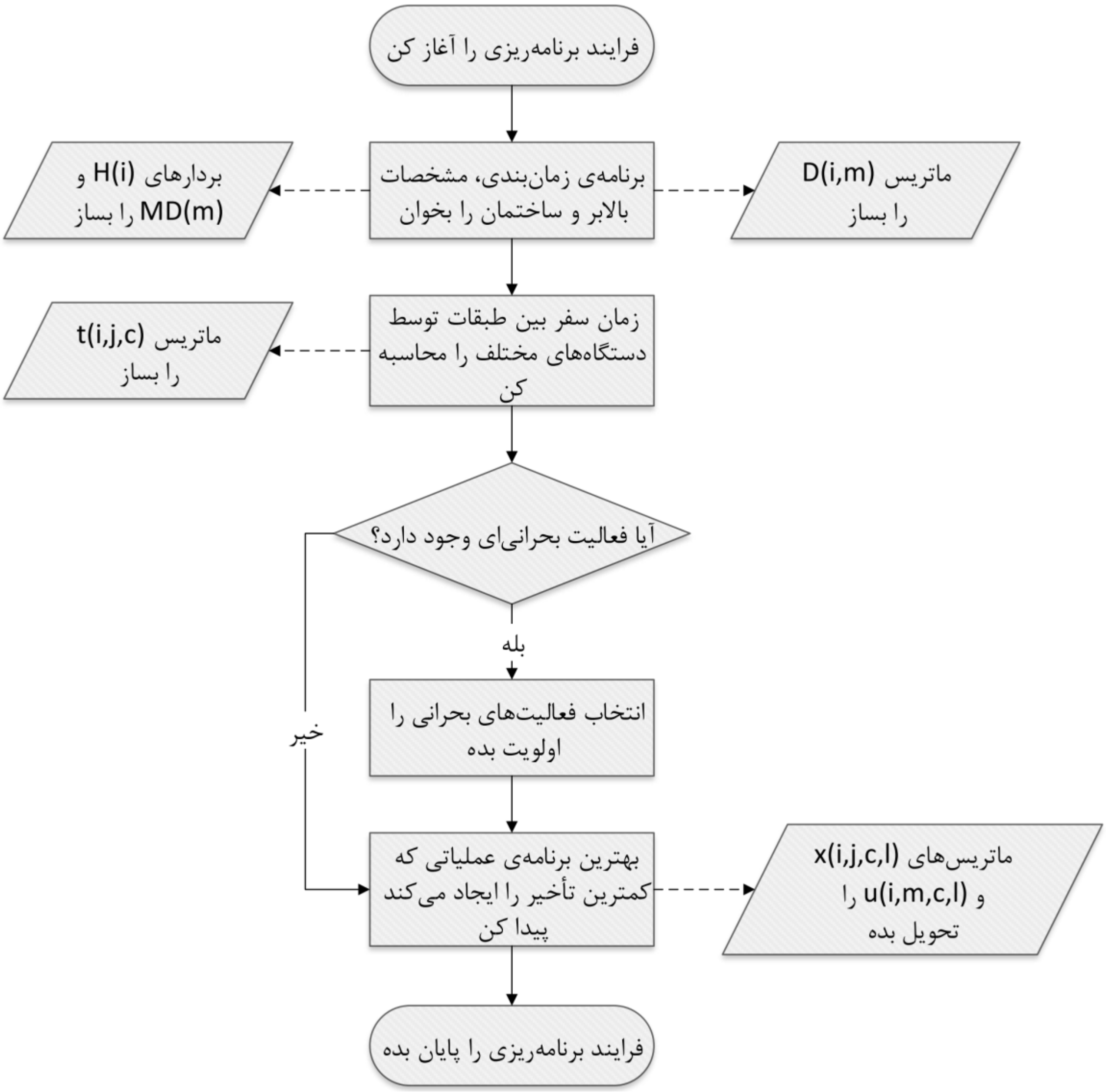
$$\sum_{i} x_{i,j,c,l} = \sum_{k} x_{j,k,c,l} \qquad \forall j,c,l \qquad (۴)$$

$$\sum_{i,i>j} x_{i,j,c,l} = 0 \qquad \forall j>1,c,l \qquad (۵)$$

$$\sum_{m} u_{j,m,c,l} \le N \times \sum_{i} x_{i,j,c,l} \qquad \forall j,c,l \qquad (۶)$$

$$\sum_{c,l} u_{i,m,c,l} \ge D_{i,m} \qquad \forall c,l \qquad (۷)$$

$$N \times \sum_{j,i=1} x_{i,j,c,l} \ge \sum_{j,m} u_{j,m,c,l} \qquad \forall c,l \qquad (۱)$$



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

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 $\sum_{i,j,c,l} t_{i,j,c} \times x_{i,j,c,l}$ 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 ۳به ترتیب قیدهای مربوط به محدودیت وزنی و محدودیت حجمی هر کدام از لیفت ها هستند. رابطه ۴ قید پایستگی است به این معنا که تعداد ورود دستگاه لیفت به یک طبقه با تعداد خروج لیفت از همان طبقه، در هر دور رفت‌وبرگشتی، برابر است. رابطه ی۵به کاهش پیچیدگی محاسباتی مساله کمک بسیاری می کند، به این شکل که سفرها را از طبقه ای به طبقات بالاتر از خودش محدود می کند. این مساله به این معنا است که لیفت تنها زمانی به طبقه ای با ارتفاع کمتر از طبقه ی کنونی اش سفر می کند 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 سفرکند. 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 ۸بهینه‌سازی را ملزم می کند تا در

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	3/75متر 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

صورت حمل مصالح در یک دور رفت و بازگشتی، حتما 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_{ijcl} و u_{imcl} نمایش می‌دهد.

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

۴- نتایج

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

در این بخش به‌منظور آزمودن کارکرد این روابط، یک مسالهمساله ی جهان واقعی را از طریق این روابط حل می کنیم.

برای آزمایش بهینه سازی ارائه‌شده، داده های 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 شده اند.

در روز کاری انتخاب شده به‌منظور برنامه ریزی لیفت توسط مدیر پروژه، چند نوع عملیات ساختمانی ازجمله لوله‌کشی، نصب دیوارهای کناف و هم‌چنین نصب درب‌های دفاتر در حال انجام است. ویژگی های منابع مورد نیاز برای این فعالیت ها در جدول ۳ داده شده‌است.

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

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

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

(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، جمع‌آوری شده و به مدل داده شده‌است. 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. بـمنظور اعمال این شرایط، بایستی قید ۹ را به قیود بهینه سازی اضافه کرد.

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

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، جمع‌آوری شده و در جدول ۴ ارائه شده‌است.

تمامی داده های فوق الذکر به‌منظور انجام محاسبات بهینه‌سازی، وارد نرم‌افزار CPLEX/GAMS شدند. نتایج بهینه‌سازی در جدول ۵ ارائه شده اند. در این جدول هر رنگ نمایانگر یک نوع از منابع و هر مربع رنگی، نشان‌دهنده ی یک واحد از منبع مربوطه است.

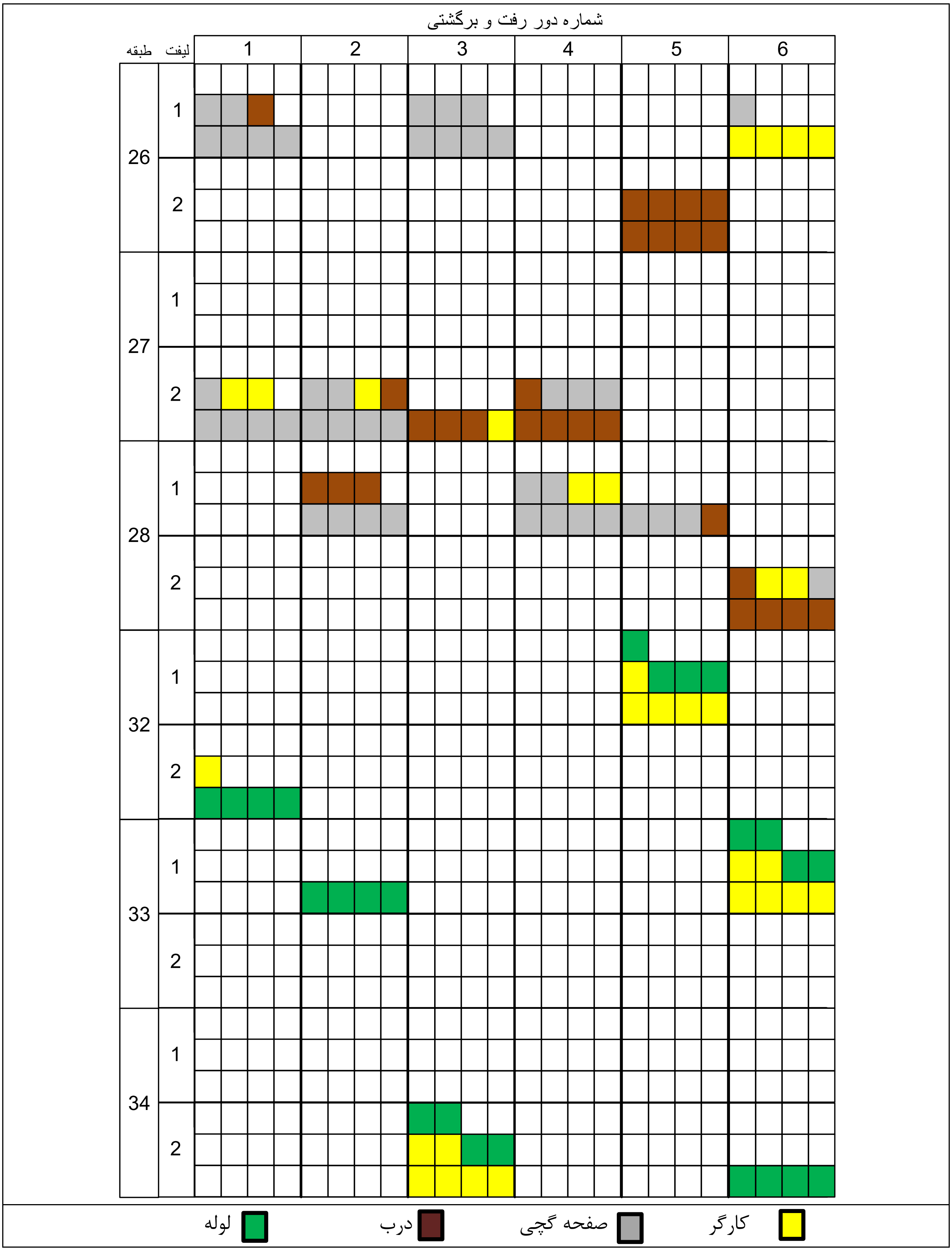
این محاسبات برروی سیستمی با پردازنده‌ی اینتل ۵ هسته ای و دارای ۴ گیگابایت رم، در مدت زمان ۱۲۹۴۰ ثانیه به فاصله ی ۰٪ از حد پایین رسیده‌است. در شکل ۴ نمودار همگرایی فرایند حل مساله نشان داده شده‌است. این نمودار، به‌منظور نمایش بهتر فرایند همگرایی، به‌صورت شبه لگاریتمی نشان داده شده‌است.

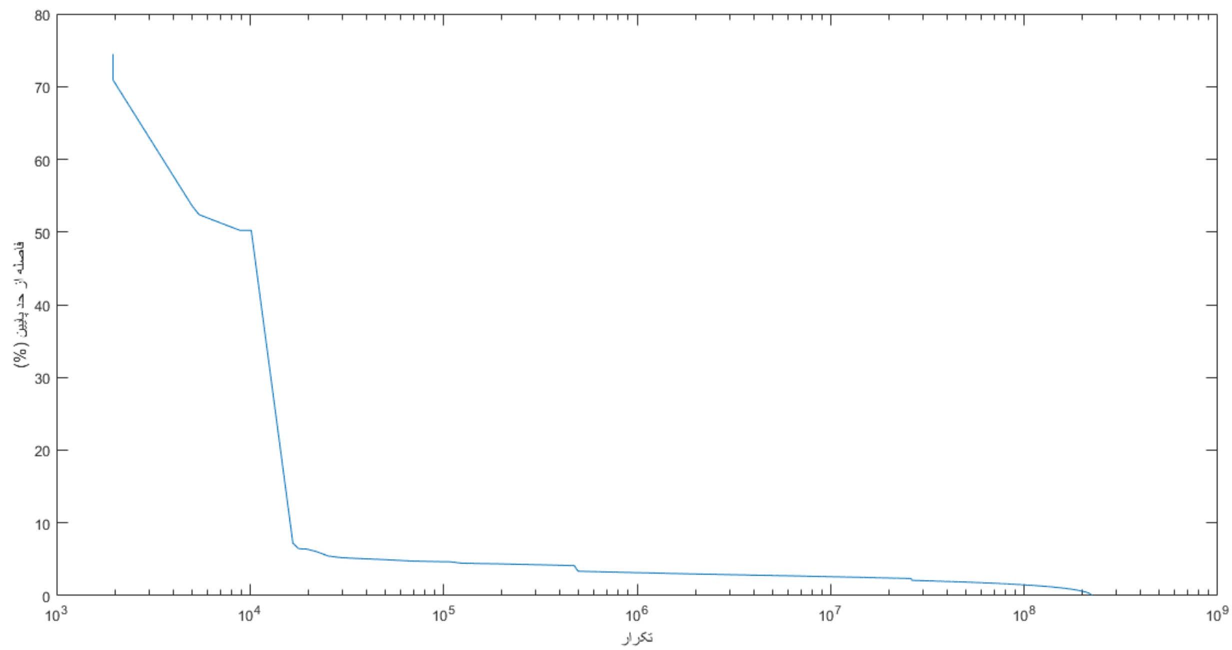
نتایج به‌دست‌آمده از روش بهینه‌سازی پیاده‌سازی شده پس از محاسبات جهت پیاده سازی به دفتر کنترل پروژه برج مسکونی-تجاری آرمیتاژ ارائه و پس از پیاده سازی در مورد بهبود تاخیر ناشی از حمل‌ونقل عمودی از ایشان نظرخواهی شد. نظرات آنان حاکی از بهبود فرایندهای بالابری پس از اعمال برنامه‌ی به‌دست‌آمده‌بود. دیدگاه خبرگاه و متخصصین کنترل پروژه مشغول در پروژه در موارد زیر خلاصه شده‌است.

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

۲- فعالیت‌هایی که وابسته به مصالح بالا برده شده‌است توسط

جدول ۵. مقدار منابع منتقل شده توسط هر یک از لیفتها، در هر \دور رفت‌وبرگشتی
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)

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

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

۴- تعداد سفرهای انجام‌شده از طبقه هم‌کف کاهش یافت.

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

۵- بحث‌ونتیجه‌گیری

در این پژوهش به حل مساله‌ی بالابری در ساختمان‌های بلندمرتبه پرداخته شد. همان‌طور که در فصل قبل دیده‌شد 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. به‌این‌صورت که برخی همانند [۱۶ و ۱۷] مدل شبیه‌سازی را در تصمیم‌گیری محدود به یک سری سناریوهای ازپیش تعریف‌شده می‌کنند. این سناریوها در تعداد دستگاه‌های بالابر، تعداد توقف‌ها در دورهای رفت‌وبرگشتی و همچنین انواع مصالح حمل‌شده 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[1] 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 کاملا 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 قابل‌قبولی دست یافت.

۶- نتیجه گیری

حمل و نقل عمودی مصالح و نیروی کاری در موفقیت پروژه های

1 Global Optimum

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 صبحگاهی 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 فعالیتی، مصالح مربوط به ان فعالیت را به محل مربوطه انتقال می دهند. اما در برخی شرایط به علت کمبود فضا و هم‌چنین مزاحمت برای همسایگان، این کار امکان‌پذیر نیست. هم‌چنین 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 به‌منظور مقابله با این مسالهمساله، برای برنامه ریزی یک سیستم چند بالابره، یک مدل ریاضی توسعه داده‌شد. مدل مذکور با کمینه‌سازی زمان بالابری کل، به حل مشکل بالابری می پردازد.

پژوهش‌هایی که در آینده می‌توان در این زمینه انجام داد را می‌شود در موارد زیر برشمرد:

۱- بررسی میزان تأثیر ایجاد تغییر در داده‌های ورودی (از جمله نوع و تعداد دستگاه‌های بالابر)، در خروجی‌های مساله.

۲- توسعه‌ی مدل‌هایی که زمان بالابری را دقیق محاسبه کنند.

۳- توسعه‌ی مدل‌های احتمالاتی، به علت ماهیت پویا و احتمالی تقاضا در بازه‌های زمانی بلندتر از یک روزکاری

۴- ارائه‌ی روش‌های نوین جمع‌آوری داده به‌منظور استفاده در حل مسائل بالابری

۵- ارائه‌ی روش‌های نوین به منظور استفاده از داده‌های خروجی در بالابرهای 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.

[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.

[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 Constructio n 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.

[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.

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

این صفحه عمداً خالی است