

مدلسازی زمانبندی عملیات تخلیه و بارگیری در قطارهای کانتینری به منظور کاهش زمان عملیات با استفاده از روش حل دقیق اپسیلون و الگوریتم‌های فراابتکاری

مهدی فلاح مهرجردی، کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، گرایش برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشگاه علم‌و‌صنعت ایران، تهران، ایران
عبدالرضا شیخ‌الاسلامی کندلوس (مسئول مکاتبات)، استادیار دانشکده مهندسی عمران، گرایش برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشگاه علم-
و‌صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: Sheikh@iust.ac.ir

شاهین حسینی، کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، گرایش برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشگاه علم‌و‌صنعت ایران، تهران، ایران

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۵

چکیده

امروزه با پیشرفت صنعت و به دنبال آن افزایش تقاضای کالا در دنیا نقش حمل‌ونقل ریلی جهت جابه‌جایی بار پررنگ‌تر از قبل شده است. اساسی‌ترین ضعف حمل ریلی نسبت به حمل جاده‌ای تأخیرات شبکه آن می‌باشد. یکی از اصلی‌ترین علل تأخیرات در شبکه ریلی تأخیر در زمان انجام عملیات تخلیه و بارگیری می‌باشد. در این مقاله در گام نخست عوامل اثرگذار بر روی زمان عملیات تخلیه و بارگیری قطار و راهکارهای مناسب جهت افزایش بهره‌وری آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با توجه به نتیجه حاصل‌شده از بررسی‌ها بر روی کاهش زمان عملیات تخلیه و بارگیری در پایانه‌های ریلی کانتینری تمرکز شده است. به منظور کمینه‌کردن زمان عملیات مذکور یک مدل ریاضی مبتنی بر برنامه‌ریزی اعداد صحیح مختلط ارائه شده است. در این مدل عملیات تخلیه و بارگیری کانتینرهای ۲۰ فوت و ۴۰ فوت توأم با یکدیگر در نظر گرفته شده است. علاوه بر حل دقیق مدل ارائه‌شده، با الگوریتم‌های فراابتکاری ازدحام ذرات و رقابت استعماری در ابعاد مختلف مسئله، مدل حل شده است. همچنین با بهره‌گیری از الگوریتم تاگوچی بهترین پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری به‌دست آورده شده است. در نهایت با مقایسه عملکرد الگوریتم ازدحام ذرات با الگوریتم رقابت استعماری نتیجه آن شد الگوریتم ازدحام ذرات برای مسائل در ابعاد بزرگتر عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم رقابت استعمار دارد.

کلمات کلیدی: الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم رقابت استعماری، تخلیه و بارگیری، تأخیر قطار باری، کاهش زمان

۱. مقدمه

صنعت حمل‌ونقل در هر کشوری جزء یکی از شاخص‌های مهم پیشرفت در ابعاد مختلف اقتصادی، سیاسی، اجتماعی، روابط بین‌الملل و ... در نظر گرفته می‌شود. یکی از ارکان اساسی این شاخص را می‌توان حمل‌ونقل کالا برشمرد. حمل‌ونقل کالا از گذشته تا به امروز یکی از مباحث مهم در صنعت حمل‌ونقل به‌شمار می‌آید که همواره چالش‌های خاص خود را به همراه داشته است. این چالش‌ها در زمینه‌های اقتصادی، زنجیره تأمین، محیط‌زیست، واردات و صادرات، تسریع در عملیات حمل‌ونقل و جابه‌جایی، کاهش هزینه‌ها و ... مطرح شده و مورد تحلیل و واکاوی قرار گرفته است. شایان ذکر است که مدیریت بهینه و کارا و ایجاد زیرساخت‌های مناسب با توجه به موقعیت راهبردی کشورها، شناسایی نقاط مهم منابع و صنایع برای ایجاد ارتباطات بین آنها، بررسی عوامل متعدد سیاسی، روابط بین‌المللی و ... لازمه اصلی استفاده از شیوه‌های مختلف حمل‌ونقل اعم از دریایی، جاده‌ای، هوایی و ریلی می‌باشد.

در دهه‌های اخیر با توجه به پیشرفت صنایع و نیاز روزافزون آن‌ها به منابع با احجام بزرگ‌تر و سنگین‌تر، گسترش زنجیره تأمین و افزایش حجم مبادلات صادرات و واردات بین کشورها، حمل‌کالا از طریق شبکه خطوط ریلی مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته است.

ایران یکی از کشورهایی است که با توجه به مرزبندی‌های گسترده با کشورهای همسایه خود، موقعیت راهبردی در منطقه و جهان و جغرافیای مناسب داخلی توانسته شبکه ریلی مناسب و ظرفیت جابه‌جایی بار از طریق خطوط ریلی را برای کالاهای داخلی و ترانزیتی فراهم کند. البته در حال حاضر میزان حمل و توزیع کالا از طریق خطوط ریلی بسیار کمتر از میزان ظرفیت زیرساخت‌های موجود می‌باشد. با توجه به سند چشم‌انداز حمل‌ونقل ریلی در افق ۱۴۰۴، بیان می‌شود که سهم حمل‌ونقل ریلی در سال ۱۴۰۴ به ۳۰ درصد برسد. با بررسی دقیق‌تر و با استناد به آخرین سالنامه آماری وزارت راه و شهرسازی در سال ۱۳۹۷،

درصد حمل زمینی کالا از طریق ریل از سال ۱۳۹۰ تا سال ۱۳۹۷ از ۸٫۵٪ به ۱۰٫۳٪ رشد پیدا کرده است. با انجام برآزش خطی صورت‌گرفته بر روی داده‌های گزارش‌شده در آخرین نسخه سالنامه آماری وزارت راه و شهرسازی می‌تواند نتیجه گرفت سهم حمل‌ونقل ریلی برای سال ۱۴۰۴ اگر همین شیب کند صعودی ادامه پیدا کند و جهشی حاصل نشود، سهم بار جابه‌جاشده از طریق خطوط ریلی در کشور به ۱۳٪ خواهد رسید که این عدد در مقایسه با هدف تعریف‌شده (۳۰٪) در سند چشم‌انداز حمل‌ونقل ریلی در افق ۱۴۰۴ فاصله‌ی چشم‌گیری دارد. به منظور دستیابی به هدف فوق‌الذکر، در سند چشم‌انداز حمل‌ونقل ریلی نقاط ضعف و چالش‌های مختلفی برای راه‌آهن ایران بیان شده است که با بهبود هر یک از این نقاط ضعف، و ارتقای سطح کیفی، می‌توان به تحقق میزان حمل ۳۰٪ کمک شایانی کرد. نکته قابل توجه این است که بسیاری از این نواقص و کمبودهای مطرح‌شده اثرات مستقیم و به‌هم‌پیوسته‌ای دارند؛ به‌گونه‌ای که بهبود عملکرد هر یک از این آن‌ها به تنهایی زمانی در کل سیستم بهتر نمود پیدا می‌کند که دیگر جوانب درگیر با آن چالش نیز، به صورت موازی عملکرد و کارایی خود را بهبود بخشند.

۱-۱ اهمیت موضوع

هرگاه قطاری در شروع حرکت از مبدأ یا رسیدن به مقصد از برنامه زمانی از پیش تعیین شده خود خارج شود، تأخیر رخ می‌دهد. تأخیر در شبکه ریلی همواره یکی از مسائل برجسته در حوزه حمل‌ونقل ریلی بوده است. بهبود آن می‌تواند به صورت مستقیم یا غیرمستقیم بسیاری از نقاط ضعف این حوزه را تحت تأثیر مثبت خود قرار دهد و سبب افزایش بازدهی عملکردی در کل سیستم گردد. مهم‌ترین اثرات کاهش تأخیر در شبکه ریلی در ذیل بیان شده است که تحقق هر یک از این موارد می‌تواند به افزایش حمل بار از طریق ریل و نزدیک شدن به هدف بیان شده در سند چشم‌انداز ریلی کمک کند.

• افزایش ظرفیت شبکه ریلی

• ایجاد نظم و انعطاف‌پذیری بیشتر در برنامه‌ریزی شبکه ریلی

مدل‌سازی زمان‌بندی عملیات تخلیه و بارگیری در قطارهای کانتینری به منظور کاهش زمان عملیات با استفاده از روش حل دقیق

اپسیلون و الگوریتم‌های فراابتکاری

- افزایش تقاضا با اعتماد بیشتر مشتریان داخلی و خارجی به زمان‌بندی شبکه
- سرمایه‌گذاری بیشتر شرکت‌های خصوصی در حوزه ریلی با توجه به افزایش میزان تقاضا
- کاهش مصرف سوخت و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی.

۱-۲ مبانی نظری

حمل‌ونقل ریلی یکی از حلقه‌های مهم در جابه‌جایی کالا در کشور ایران و دنیا می‌باشد. با توجه به مزیت‌های آن نسبت به حمل‌جاده‌ای مانند آلودگی کمتر و پایین آمدن هزینه‌های حمل‌سهم کمتری از جابه‌جایی کالاهای زمینی را در اختیار دارد. یکی از مهم‌ترین معایب آن تأخیرات موجود در شبکه ریلی می‌باشد. تأخیرات شبکه ریلی دلایل مختلفی دارد که یکی از مهم‌ترین آنها تأخیرات ناشی از عملیات تخلیه و بارگیری قطارها در پایانه‌های ریلی می‌باشد. تأخیرات به وجود آمده در شبکه ریلی عوامل مختلفی دارند که کاهش در هر یک از آنها می‌تواند به کاهش تأخیرات در کل شبکه کمک کند. متأسفانه در پژوهش‌ها انجام شده در حوزه حمل‌ریلی در کشور ما به تأخیرات برنامه زمان-بندی قطارهای باری و بررسی عوامل آن نسبت به قطارهای مسافری بسیار کمتر توجه شده است.

اما در سال‌های اخیر، برخی از مطالعات و پژوهش‌های بین‌المللی به بررسی تأخیر در مسئله زمان‌بندی قطارهای باری پرداختند. کروگر و همکارانش در سال ۲۰۱۳ با مطالعه و بررسی کدها دلایل ایجاد تأخیر و داده‌های گردآوری شده شبکه ریلی کشور سوئد برای سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ که حاوی اطلاعات ۶ میلیون قطار باری بود، عوامل تأخیر قطارهای بار را به صورت زیر دسته-بندی کردند:

- نابه‌سامانی در ترافیک خطوط ریلی،
- مدیریت ناکارآمد در پایانه‌های ریلی،
- زیرساخت‌ها،
- استهلاک، فرسودگی و خرابی ناوگان ریلی،

- ایجاد اختلالات و آشفتگی‌های پیش‌بینی نشده در خطوط برنامه‌ریزی شده و مسدود شدن آن‌ها.
- نتایج تحقیق کروگر و همکارانش نشان داد که ۴۱٪ از فراوانی علل تأخیرات، ناشی از نحوه مدیریت و عملیات اجرایی در پایانه‌های ریلی و ۳۷٪ از آن ناشی از مدیریت ترافیک خطوط می‌باشد؛ ولی از لحاظ زمانی ۵۵٪ تأخیرات ناشی از مدیریت ترافیک خطوط و ۲۶٪ مرتبط با مدیریت و عملیات اجرایی در پایانه‌های ریلی است. همچنین آنها بیان کردند که تأخیرات در مبدأ، تأخیرات در رسیدن را افزایش می‌دهد.

۱-۲-۱ واکاوی دلایل تأخیر در فرایند عملیات تخلیه و

بارگیری قطار و ارائه راهکارهای پیشنهادی از منظر

سطوح مختلف برنامه‌ریزی مدیریتی

عملیات تخلیه و بارگیری از مهم‌ترین عواملی هستند که در تعیین ظرفیت شبکه ریلی و سرعت چرخه بازرگانی قطارها مؤثرند. در کشورهایی با راه‌آهن‌های پیشرفته، مدیران با فراهم آوردن تمهیدات کافی و مستمر، سعی در کاهش زمان این فرآیند از کل چرخه حمل‌ونقل دارند. متأسفانه در ایران توجه چندانی به این سیستم بسیار حساس نمی‌شود. چنین رویکردی موجب می‌گردد فقط برای فرآیند تخلیه و بارگیری مدت‌زمان‌های طولانی صرف شود که در برخی از موارد زمان تلف شده بابت آن، از کل مدت حمل از مبدأ تا مقصد هم بیشتر می‌گردد.

عملیات تخلیه و بارگیری عمدتاً در پایانه‌های ریلی صورت می‌گیرد. مدیریت در سطوح مختلف برنامه‌ریزی برای پایانه‌های ریلی، در روند عملیات تخلیه و بارگیری اثربخش می‌باشد. برنامه‌ریزی از منظر مدیریتی شامل ۳ سطح اصلی می‌باشد:

الف) برنامه‌ریزی راهبردی

به فرایند تعیین اهداف کلی یک سازمان و تدوین راهبردها و سیاست‌های لازم برا محقق کردن این اهداف، برنامه‌ریزی راهبردی گفته می‌شود. وظیفه انجام برنامه‌ریزی راهبردی، به عهده مدیران عالی سازمان و یا ارگان مربوطه می‌باشد. افق

برنامه‌ریزی راهبردی، بلندمدت بوده و ممکن است بازه زمانی تا سقف ۱۰ الی ۲۰ سال را شامل شود.

در مدیریت پایانه‌های ریلی طراحی قسمت‌های مختلف پایانه جزء برنامه‌ریزی راهبردی محسوب می‌شود. اگر طرح‌ریزی اولیه پایانه برای بخش‌های مختلف آن منسجم و بدون در نظرگیری نیازها و تقاضای آتی در شبکه نباشد، می‌تواند در طولانی‌تر شدن روند عملیات کلی پایانه و تخلیه و بارگیری تأخیر ایجاد کند. به موارد زیر باید در طرح‌ریزی اولیه پایانه ریلی در سطح راهبردی توجه شود:

- بررسی میزان انواع بار ورود و خروجی،
- مبادی قطارهای ورودی،
- مقاصد قطارهای خروجی.

در یک چرخه مستمر حمل‌ونقل، ظرفیت بارگیری در پایانه مبدأ برای هر نوع محموله باید متناسب با ظرفیت تخلیه همان محموله در پایانه مقصد باشد. هنگامیکه از یک مبدأ نوعی محموله به چند مقصد حمل می‌شود، باید ظرفیت بارگیری مبدأ برابر مجموع ظرفیت‌های تخلیه‌های مقاصد مربوطه لحاظ گردد. همین‌طور ممکن است که در یک مقصد از چند مبدأ متفاوت یک نوع محموله دریافت شود، لذا میزان ظرفیت تخلیه آن باید برابر با مجموع ظرفیت‌های بارگیری از مبادی مربوطه باشد. طراحی مسیرهای تخلیه و بارگیری برای سرعت بخشیدن و کاهش هزینه‌ها مهم می‌باشد.

ب) برنامه‌ریزی تاکتیکی

طرح‌های تاکتیکی در مدیریت شبکه حمل‌ونقل ریلی، افق زمانی ۶ ماه الی ۲ ساله را هدف قرار می‌دهند. مسئولیت تدوین و تنظیم برنامه‌ریزی تاکتیکی، به عهده مدیران میانی سازمان می‌باشد. مدیران میانی از این توانمندی و تسلط برخوردار هستند که کمیت و کیفیت منابع موجود را با دقت بالایی برآورد کنند و سرمایه‌های انسانی، منابع مالی و مواد اولیه را به شکلی بهینه و مؤثر با هم ترکیب کنند. درواقع، کاری که مدیران میانی به هنگام ارائه برنامه‌های تاکتیکی انجام می‌دهند، این است که برنامه‌های

راهبردی را به برنامه‌های ملموس‌تر و با بیشترین قابلیت عملیاتی طبقه‌بندی می‌کنند.

ج) برنامه‌ریزی عملیاتی

در برنامه‌ریزی عملیاتی، توجه بر فعالیت‌ها و عملیات روزمره می‌باشد. برنامه‌های عملیاتی، برخلاف برنامه‌های راهبردی، عمومی و کلی ارائه نمی‌شوند؛ آن‌ها بخش خاصی از سیستم را پوشش می‌دهند و تعیین می‌کنند که در آن بخش خاص، کارها با چه توالی و ترتیبی انجام شوند تا بهترین نتیجه ممکن حاصل گردد.

در شبکه ریلی مدیریت زمان و فعالیت‌هایی که مستقیماً روی آن اثر می‌گذارند، جزء برنامه‌ریزی عملیاتی محسوب می‌شوند. در سطح برنامه‌ریزی عملیاتی در پایانه‌های ریلی موارد زیر مستقیماً بر فرآیند تخلیه و بارگیری اثر می‌گذارند و هر یک می‌توانند به عنوان راهکار در جهت کاهش زمان تخلیه و بارگیری به کار رفته شوند.

- برنامه زمانی عملیات جرتفیل‌های دروازه‌ای در مسیر تخلیه و بارگیری و محوطه‌های انبار پایانه،
- تخصیص و توزیع مناسب تجهیزات مانند لیفتراک‌ها، یدک-کش‌ها و ... بین بخش‌های مختلف پایانه،
- تفکیک و تخصیص مناسب محوطه‌های انبار به انواع بارهای ذخیره‌شده،
- ارائه برنامه‌ای پویا و استوار جهت دپوی مناسب کانتینرها و سایر بارها در محوطه‌های انبار پایانه،
- ارائه برنامه روزانه و هفتگی به اپراتورها عملیات تخلیه و بارگیری با استفاده از سیستم‌های بهینه‌ساز به‌منظور هماهنگی بین اجزا سیستم تخلیه و بارگیری و استفاده مطلوب از تجهیزات.

۱-۲-۲ انتخاب راهکار مناسب

عوامل تأخیر و راهکارها ارائه شده در هر یک از سطوح برنامه‌ریزی دارای اهمیت بالایی هستند. راهکارهای مطرح شده برای کاهش زمان تخلیه و بارگیری در برنامه‌ریزی استراتژیکی برای

مدل سازی زمان بندی عملیات تخلیه و بارگیری در قطارهای کانتینری به منظور کاهش زمان عملیات با استفاده از روش حل دقیق

اسپیلون و الگوریتم های فرا ابتکاری

تجهیزات موجود، باعث کارایی بیشتر سیستم و کاهش زمان تخلیه و بارگیری می شوند.
به کارگیری این دو راهکار، توأم با یکدیگر مطلوب ترین حالت را ایجاد می کند ولی ۲ عامل اصلی زیر، مدیران را به استفاده از سیستم های بهینه سازی در پایانه های ریلی سوق می دهد:

- هزینه بالا برای افزایش زیرساخت ها

- عدم فضای کافی

حال با به کارگیری سیستم های بهینه سازی در بخش تخلیه و بارگیری قطارهای باری برای انواع بارها (فله خشک و مایع، کالاهای عمومی و بارهای کانتینری) بی شک می تواند مؤثر باشد. اما از آنجایی که در تحقیق حاضر صرفاً به تخلیه و بارگیری کالاهای کانتینری توجه شده است، لذا در ادامه تأثیر رویکردهای بهینه سازی در این دسته از بارها در عملیات تخلیه و بارگیری قطارها مورد بحث و ارزیابی قرار می گیرد.

۱-۲-۳ اهمیت به کارگیری سیستم بهینه سازی برای

بارهای کانتینری در عملیات تخلیه و بارگیری قطارهای

باری

امروزه کانتینر بیش از پیش در صنعت حمل و نقل مورد استفاده قرار می گیرد و اکثر کالاها با آن حمل می شوند. حجم بالا عملیات و جابه جایی کانتینرها در پایانه های ریلی باعث شده، پایانه های اختصاصی و مجزایی برا آنها فراهم آورند. پایانه های ریلی کانتینری به سه بخش اصلی تقسیم می شوند که در هر بخش، چالش هایی را که می توان با کمک سیستم های بهینه سازی برای کاهش زمان تخلیه و بارگیری برطرف گردد، در ادامه با استناد به شکل (۱) به بررسی وظایف هر کدام از بخش های پایانه ریلی پرداخته می شود.

پایانه های احداث نشده و یا در حال تکمیل مناسب هستند. در پایانه های فعال برنامه ریزی تاکتیکی و عملیاتی بیشتر مورد توجه قرار می گیرند.

یک از اهداف انجام این پژوهش بالا بردن سطح ظرفیت پایانه های ریلی از طریق کاهش زمان عملیات تخلیه و بارگیری می باشد. معیارهای اصلی اندازه گیری سطح ظرفیت در بخش های مختلف سیستم ریلی از جمله سیستم تخلیه و بارگیری به ۳ دسته تقسیم می شوند که برای هر یک می توان شاخص های متفاوتی تعریف کرد.

- توان عملیاتی مانند تعداد قطارها بارگیری شده، مقدار وزنی

بارهای بارگیری شده در دوره زمانی مشخص و ...

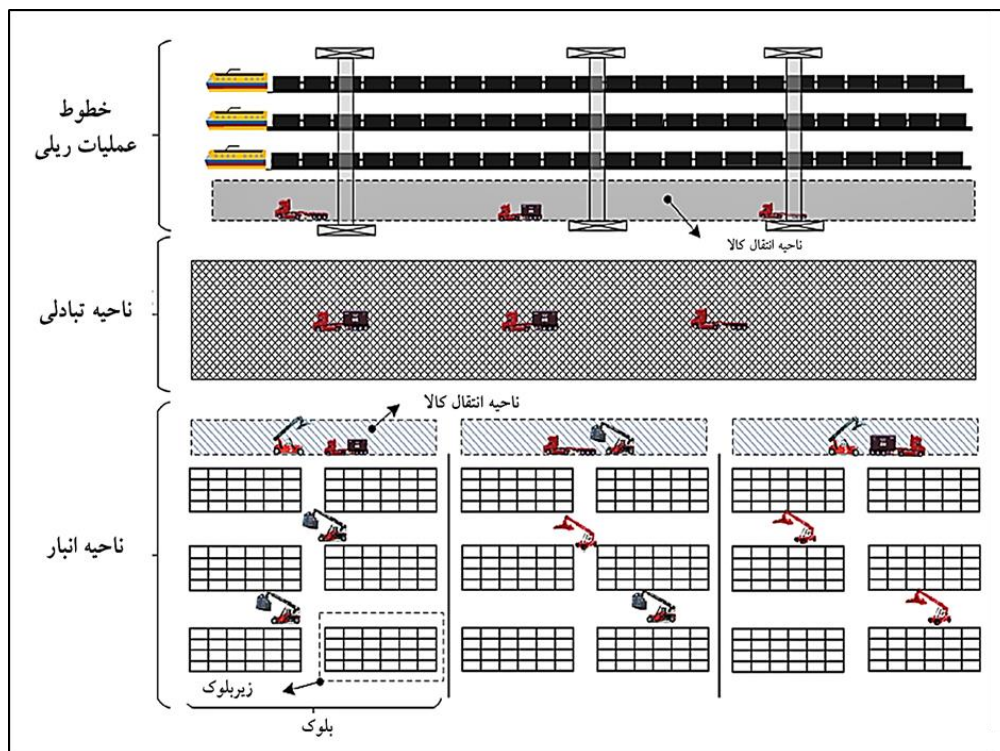
- سطح سرویس مانند کیفیت تجهیزات عملیاتی، تعداد خطوط تخلیه و بارگیری و کیفیت آن، تأخیر یا عدم تأخیر در برنامه ریزی های انجام شده، تعداد سکوها عملیاتی، تعداد تجهیزات و ...

- میزان استفاده از منابع و تجهیزات عملیاتی مانند سرعت عملیاتی تجهیزات، زمان اشغال بودن تجهیزات و خطوط عملیاتی و ...

راهکارهای بیان شده برای کاهش زمان تخلیه و بارگیری در برنامه ریزی تاکتیکی و عملیاتی پایانه های ریلی باعث بهبود تمام شاخص های معرفی شده در هر یک از معیارهای فوق می شوند. به طور کلی می توان تمام این راهکارها را به ۲ دسته زیر تقسیم کرد:

- سرمایه گذاری در راستای افزایش زیرساخت ها شامل خرید تجهیزات بیشتر، به کارگیری فناوری های نوین، ساخت و گسترش سکوها و خطوط عملیاتی

- مدیریت و به کارگیری سیستم های بهینه سازی (سیستم های بهینه سازی با ارائه برنامه زمانی و ایجاد هماهنگی بین



شکل ۱. جانمایی اجزای پایانه کانتینری ریلی متعارف

الف) ناحیه عملیات اصلی

در این ناحیه، قطارهای کانتینری وارد و خارج می‌شوند و جرثقیل‌های دروازه‌ای بر روی مسیر قطار قرار دارند. این جرثقیل‌ها عملیات برداشت کانتینرها از قطار و قرار دادن آنها در محوطه انبار پایانه موقت یا بارگیر مستقیم بر روی کامیون‌ها را انجام می‌دهند. همچنین، این جرثقیل‌ها معمولاً چند خط ریلی را پوشش می‌دهند.

در این بخش پایانه‌های کانتینری ریلی عمدتاً با چالش‌های زیر روبه‌رو می‌باشند:

- محدودیت حرکت طولی جرثقیل‌های دروازه‌ای بر روی خطوط تخلیه و بارگیری به علت تقاطع با یکدیگر باعث می‌شود زمان تخلیه و بارگیری افزایش یابد.
- متفاوت بودن فواصل کانتینرها از محوطه‌های انبار تا منطقه عملیاتی و عدم توجه به آن در برنامه‌ریزی تجهیزات دو رویکرد ایجاد می‌کند:

۱. تشکیل صف کامیون‌ها در منطقه عملیاتی که باعث افزایش زمان انتظار کامیون‌ها و کاهش کارایی سیستم تخلیه و بارگیری می‌شود.

۲. عدم حضور به‌موقع کامیون‌ها در هنگام تخلیه کانتینر توسط جرثقیل باعث می‌شود تا جرثقیل کانتینر را در محوطه انبار موقت گذاشته و سپس بعد از حضور کامیون، آنها را مجدداً برداشته و بر روی کامیون بارگیری کند که این باعث ایجاد کار اضافی برای جرثقیل می‌شود. اگر در قست انبار موقت با محدودیت فضا روبه‌رو باشیم و جرثقیل نتواند کانتینر را در این ناحیه به علت عدم حضور کامیون قرار دهد، زمان انتظار آن برای انجام عملیات بعدی افزایش خواهد یافت.

- برنامه‌ریزی برای تخلیه و بارگیری همزمان یک یا چند قطار باعث کاهش زمان تخلیه و بارگیری می‌شود. در اکثر پایانه‌ها مدیران بخش تخلیه و بارگیری به علت پیچیدگی و عدم دانش کافی برای برنامه‌ریزی تخلیه و بارگیری همزمان، عملیات

اپسیلون و الگوریتم های فرا ابتکاری

تخلیه و بارگیری را برای هر قطار به صورت مجزا انجام می دهند. ارائه مدل بهینه سازی جهت کاهش زمان عملیات تخلیه و بارگیری بر روی کالاهای کانتینری تمرکز شده است.

۲. ادبیات پژوهش

برای کاهش زمان تخلیه و بارگیری قطارها در سطوح مختلف، محققین راهکارهای مختلفی در حوزه مدیریتی برنامه ریزی ارائه کرده اند. متأسفانه، این موضوع در کشور ما به ندرت مورد توجه قرار گرفته است. تمرکز اصلی مطالعات، مانند این پژوهش، بر روی برنامه ریزی عملیات تخلیه و بارگیری در پایانه های ریلی- کانتینری در خارج از کشور صورت گرفته است.

نیاک آلیک در سال (۲۰۰۱) مطالعه ای در یک پایانه ریلی با هدف کمینه کردن حداکثر تأخیر در عملیات تخلیه و بارگیری، یک مدل بهینه سازی بر پایه ارضای محدودیت ارائه شد. برای حل تحلیلی مدل، از ۵ روش ابتکاری استاندارد استفاده شد و نشان داده شد که روش ORR^(۱) دینامیکی بهترین عملکرد را از بین سایر روش ها دارد. در مدل خود، آلیک تمرکز خود را بر روی منطقه عملیات ریلی و جابه جایی کانتینرها بین قطارها قرار داده است و دامنه عملیاتی جرثقیل های دروازه ای بر روی ریل را به طور ثابت در نظر گرفته و ترتیب بهینه کارها که باید توسط جرثقیل ها برای جابه جایی کانتینرها انجام شود، بر اساس این محدودیت تعیین می شود.

گامباردلا و همکاران در سال (۲۰۰۲) توسط نرم افزار MODESIM، یک مدل شبیه ساز رویداد مجزا^(۲) به منظور حداقل کردن حرکات جرثقیل های دروازه ای و کاهش زمان عملیاتی و توقف قطار در محوطه ارائه شد. نتایج نشان داد که در حالت های مختلف، بین ۱۰ تا ۳۰ درصد از حرکات جرثقیل نسبت به برنامه ریزی دستی کاهش می یابد.

آلیسا و ایزابل گارسیا در سال (۲۰۱۲) با استفاده از نرم افزار تجاری WITNESS با رابط کاربری اکسل، یک پلتفرم انعطاف پذیر مبتنی بر شبیه سازی برای پشتیبانی از تصمیم گیری استراتژیک، تاکتیکی مربوط به طراحی و طراحی های مجدد پایانه های مختلف ارائه کردند. از این پلتفرم می توان برای بررسی

• تخصیص مناسب تجهیزات کمکی مانند ریچ استخرها در محوطه انبار موقت برای بارگیری و تخلیه کامیون ها.

(ب) ناحیه انبار

کانتینرها پس از آنکه توسط یدک کش های ریلی یا کشنده ها تخلیه شدند، به نواحی انبار پایانه به منظور ذخیره سازی ارسال می شوند. همچنین کانتینرهای خالی و کانتینرهایی که برای ارسال آماده اند و زمان اعزام آنها فرانسیده، در همان نواحی ذخیره می شوند. تخلیه و بارگیری و چیدمان کانتینرها در این نواحی نیز توسط جرثقیل های دروازه ای یا دیگر تجهیزات مخصوص کانتینر مانند ریچ استکرها انجام می شود. در این بخش علاوه بر چالش های محدودیت حرکت طولی جرثقیل، تشکیل صف یا عدم حضور کامیون ها، تخصیص مناسب تجهیزات کمکی و ... با چالش انتخاب برنامه های مناسب برای دپو کردن کانتینرها روبه رو هستیم.

(ج) ناحیه خدماتی

در این ناحیه عموماً کارهای اداری، کنترلی و نظارتی ویژه کانتینرها (باسکول کردن، اسکن، امور گمرکی و ...) انجام می گیرد. عملیات انجام شده در این ناحیه به طور غیرمستقیم بر روی زمان تخلیه و بارگیری اثر می گذارد و ممکن است زمان انتظار اعزام قطار را به صورت جد دچار تغییرات اساسی کند. بهبود عملکرد این ناحیه در گروی تسهیل امور اداری و افزایش تجهیزات مربوط به آن می باشد. برای مثال در پایانه شهید رجایی اسکن ریلی وجود ندارد و کانتینرها باید قبل از عملیات بارگیری توسط کامیون ها به محل دیگر در پایانه برای اسکن اعزام شوند. بررسی فرایند مربوط به تخلیه و بارگیری کالای کانتینری و چالش های مطرح شده برای آن و راهکارهای مطرح شده در برنامه ریزی عملیاتی می تواند اثرات چشمگیری بر روی میزان بهره وری زمان عملیات داشته باشد. از این رو در این پژوهش برای

ظرفیت پایانه‌ها، افزایش تقاضا و تغییر استراتژی‌ها در پایانه و مشاهده نتایج آنها استفاده کرد.

پوریوسف و همکاران در سال (۲۰۱۵) بیش از ۵۰ مطالعه آمریکایی و اروپایی در زمینه‌های مختلف حمل ریلی را مورد بررسی قرار دادند که نتایج آنها نشان داد به‌طور تقریبی ۶۵٪ مطالعات از روش ترکیبی و شبیه‌سازی استفاده می‌کنند و بقیه مطالعات متکی به روش‌های تحلیلی هستند. در این راستا گروهی دیگر از پژوهشگران از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی برای مدل کردن عملیات پایانه استفاده کرده‌اند. برای انجام شبیه‌سازی از نرم-افزارهای عمومی مانند Minitab و نرم‌افزارهای تجاری مانند RAILSIM, RTC, RAILSYS استفاده می‌کنند.

چانگ و همکاران در سال (۲۰۱۷) با هدف یکپارچه‌سازی عملیات پایانه یک مدل ریاضی مبتنی بر برنامه‌ریزی اعداد صحیح مختلط با هدف کاهش کلی زمان انجام عملیات ارائه کردند و با استفاده از الگوریتم ژنتیک اصلاح‌شده مدل خویش را حل کردند. آنها تابع هدف خود را به سه بخش مجموع زمان عملیات جرثقیل‌های محوطه ریلی و زمان کامیون‌های ارتباطی و مجموع زمان عملیات جرثقیل‌های محل دپو تقسیم کردند و محل کانتینرهای ورود و خروجی را بر روی قطار و در محل دپو را از قبل تعیین‌شده فرض کردند. همچنین برای حرکت جرثقیل‌های محوطه ریلی، دامنه ثابت برای جلوگیری از برخورد با یکدیگر در نظر گرفتند. خروجی آنها یک لیست توالی از کارها جرثقیل‌ها و کامیون‌های ارتباطی ارائه کرد که با مقایسه زمان انجام کارها به‌صورت متوالی زمان قابل‌توجهی را کاهش می‌دهد. ژبولی و همکاران در سال (۲۰۱۷) مسئله زمان‌بندی یک جرثقیل دروازه‌ای که کانتینرها را بین قطار، کامیون‌ها و محوطه انبار جابه‌جا می‌کند، به‌عنوان یک مسئله فرعی از زمان‌بندی چند جرثقیل مورد مطالعه قرار دادند. هدف مدل بهینه‌سازی آنها کاهش زمان توقف قطار در محوطه تخلیه و بارگیری است. آنها برای جابه‌جایی هر کانتینر یک پنجره زمانی به‌عنوان محدودیت جدید در نظر گرفتند و با ترکیب الگوریتم‌های تجزیه و شاخه-برش مدل

خود را حل کردند. مطالعه آنها نشان داد هدف کاهش زمان را نمی‌توان با حداقل‌سازی هزینه‌ها تخمین زد.

ژی و سانگ در سال (۲۰۱۸) نیز به یکپارچه‌سازی عملیات در یک پایانه ریلی-دریایی پرداخته‌اند. آنها در تحلیل خود عدم قطعیت در فعالیت‌های پایانه را در نظر گرفتند که ممکن است به دلیل تغییر در عملیات بارگیری، عدم دسترسی به جرثقیل‌ها و فواصل متفاوت بین دپوهای کانتینر و محوطه ریلی و تأخیر در رسیدن قطار رخ دهد. همچنین، آنها عملیات پیش‌ذخیره‌سازی کانتینرهای اعزامی به محوطه ریلی قبل از رسیدن قطار یا تخلیه کامل قطار را نیز در مدل خود در نظر گرفتند. تابع هدف آنها کاهش هزینه‌های عملیاتی است و مدل ریاضی مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا^(۳) و تصادفی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که پایانه‌های ریلی-دریایی می‌توانند از آماده‌سازی کانتینرها برای کاهش هزینه‌ها استفاده کنند و برنامه‌ای مناسب برای تخلیه و بارگیری را می‌توان در پاسخ به شرایط مختلف و نامشخص ایجاد کرد..

کی ژانگ و همکاران در سال (۲۰۲۰) با فرض به‌کارگیری اینترنت و ایجاد یک پلتفرم اطلاعاتی لجستیک برای پایانه کانتینری، زمان ورود برنامه‌ریزی شده و تعداد کامیون‌های ورودی را تعیین می‌کنند. در این مطالعه تخلیه و بارگیری همزمان و حرکات جرثقیل برای انتقال کانتینرها نقطه‌به‌نقطه در نظر گرفته شده است. آنها یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی اعداد صحیح که از دو تابع هدف تشکیل شده است را ایجاد کردند و برای حل آن از الگوریتم ژنتیک کدگذار چندلایه استفاده کردند. اولین تابع هدف که دوقسمتی است کاهش زمان کلی عملیات و کاهش واریانس زمان عملیاتی هر جرثقیل را محاسبه می‌کند. کاهش واریانس باعث می‌شود تا حجم کار به‌صورت متعادل بین جرثقیل‌ها تخصیص داده شود. تابع هدف دوم نیز زمان انتظار کامیون‌های ورودی برای شروع عملیات بر روی آنها را کاهش می‌دهد. نتایج آنها نشان داد با ترکیب‌های مختلف از تجهیزات و منابع تخلیه و بارگیری، زمان انجام عملیات جرثقیل‌ها و زمان

مدل سازی زمان بندی عملیات تخلیه و بارگیری در قطارهای کانتینری به منظور کاهش زمان عملیات با استفاده از روش حل دقیق

اپسیلون و الگوریتم های فرا ابتکاری

۳-۱ تعریف مسئله

مسئله زمان بندی جرثقیل های دروازه ای با فرض محدودیت های:

- مدت زمان دسترسی به کارها؛
- مدت زمان حمل وابسته به توالی کارها،
- دسترسی محدود به جرثقیل های دروازه ای.

با هدف کمینه سازی بیشترین زمان تکمیل کارها و کمینه کردن انرژی مصرفی توسط ماشین ها به شرح زیر ارائه میگردد:

یک مجموعه از n کار متمایز، $N=\{1,2,...,n\}$ ، بر روی مجموعه ای از m جرثقیل، $M=\{1,2,...,n\}$ ، که به صورت سری در کنار هم قرار گرفته اند، پردازش می شوند. هر کار حداقل نیاز به یک جابه جایی مطابق با فرآیند عملیات و حداکثر نیاز به L_I زمان حمل دارد.

جرثقیل ها نامرتب بوده و هر جرثقیل در هر لحظه قادر به انجام تنها یک پردازش از هر کار می باشد. هر پردازش از هر کار، بر روی زیرمجموعه ای از مجموعه جرثقیل ها به صورت M_I می تواند پردازش شود که به این مجموعه ها در اصطلاح مجموعه های پردازشی^(۷) گفته می شود. بر روی هر کار در طول یک دوره حداقل یک پردازش و حداکثر L_I پردازش صورت خواهد گرفت که زمان مورد نیاز برای پردازش اصلی هر کار روی هر جرثقیل هم به نوع کار و هم به نوع جرثقیل بستگی دارد.

۳-۲ فرضیات مسئله

فرض های مسئله مورد نظر با توجه به هدف تحقیق و اعمال محدودیت ها، به ترتیب ذیل می باشند:

- کانتینرها برای انتقال مستقل از یکدیگر می باشند.
- هر جرثقیل در لحظه تنها یک کانتینر را می تواند جابه جا کند.
- هر جابه جایی از هر کار در طول زمان تکمیل خود تنها بر روی یک جرثقیل انجام می شود.
- زمان آماده سازی جرثقیل به توالی کارها بین مسیرهای جابه جایی و نوع جرثقیلی که کارها توسط آن پردازش می شوند، وابسته است.

انتظار کامیون ها متغیر می باشد و مدیران پایانه ها می توانند با مقایسه ترکیب های مختلف با هم بهترین گزینه را برای انجام عملیات انتخاب کنند.

یان و همکاران در سال (۲۰۲۰) مطالعه خود را با ادغام برنامه زمان بندی قطار و عملیات تخلیه و بارگیری، به این صورت که کانتینرها بلافاصله از روی عرشه کشتی بدون ذخیره سازی در محوطه بندر به محوطه ریلی برای بارگیری منتقل شوند، تعریف کردند. با توجه به محدودیت منابع و زمان، اپراتورها باید درباره زمان ورود و خروج قطارها تصمیم گیری کنند تا با زمان تخلیه کشتی ها و برنامه حمل و نقل کانتینرهای ورودی هماهنگ شوند و به حداکثر مقدار ممکن تعداد کانتینرهای مستقیم را حمل کنند و در عین حال زمان ذخیره سازی و توقف کانتینرهای ورودی را کمینه کنند. مسئله به عنوان یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح فرمول بندی شده است و برای حل آن، یک رویکرد افق غلتان و استراتژی ردیابی معکوس پیشنهاد شده است که با افق تطبیقی متناسب است. نتایج نشان می دهند که ظرفیت جرثقیل های فعال بر روی ریل تأثیر قابل توجهی بر عملکرد عملیات تخلیه و بارگیری نسبت به عوامل دیگر دارد.

۳. روش پژوهش

در این قسمت، مسئله زمان بندی حرکت جرثقیل های دروازه ای برای جابه جایی کانتینرها در پایانه ریلی به منظور کاهش زمان زودکرد و دیرکرد کارها مورد بررسی قرار می گیرد. باید توجه داشت که برای حل مسئله، استفاده از روش برنامه ریزی عدد صحیح به عنوان یک روش دقیق محاسباتی، مناسب برای مسائل با ابعاد کوچک است. اما در بیشتر موارد موجود در محیط های تولیدی و خدماتی، ابعاد مسائل بزرگتر از ظرفیت محاسباتی مدل های برنامه ریزی عدد صحیح است و زمان محاسباتی را افزایش می دهد. بنابراین، الگوریتم های ابتکاری و فرا ابتکاری برای یافتن جواب بهینه تقریبی در زمان معقول استفاده می شوند. با این حال، رویکرد برنامه ریزی عدد صحیح، جواب های بهینه لازم برای توسعه و اعتبارسنجی مدل ریاضی را فراهم می کند.

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال هفدهم / شماره سوم (۶۸) / بهار ۱۴۰۵

- تمام جرثقیل‌ها به‌طور مستمر در دسترس هستند و امکان خرابی جرثقیل‌ها وجود دارد.
- برای هر کار، محدودیت دسترسی به جرثقیل‌ها وجود دارد.
- زمان جابه‌جایی، زمان نصب کار بر روی جرثقیل نامعین و غیرقطعی می‌باشند.

۳-۳ مدل ریاضی مسئله

در این بخش شرح اندیس‌ها، پارامترها، متغیرها و محدودیت‌های تعریف شده برای حل مدل ریاضی به تفکیک بیان می‌شود.

۳-۳-۱ اندیس‌ها و مجموعه‌های مدل

$I =$ مجموعه تمام کانتینرها برای جابه‌جایی ($I = \{1, 2, \dots, N\}$)
 i و $I =$ اندیس کانتینرها
 $J =$ مجموعه تمام مراحل حرکت وسیله حمل و نقل جهت جابه‌جایی کانتینر (۳ مرحله در نظر گرفته شده است. تخلیه از روی قطار، حمل و نقل تا کشنده، تنظیم کانتینر بر روی کشنده برای ارسال). ($J = \{1, 2, \dots, M\}$)

j و $j' =$ اندیس ایستگاه حرکت جرثقیل‌ها

$K =$ مجموعه تمام وسایل حمل و نقل. $K = \{1, 2, \dots, Q\}$

k و $k' =$ اندیس نوع وسیله حمل و نقل

$J_i =$ مجموعه ایستگاه‌هایی که وسیله حمل و نقل می‌تواند از آن عبور کند

$A_i =$ ایستگاه شروع حرکت کانتینر

$Z_i =$ آخرین مرحله حرکت کانتینر

۳-۳-۲ پارامترهای مدل

$PT_{ijk} =$ زمان لازم برای طی کردن کانتینر i در مرحله j از جرثقیل نوع k

$ST_{ijk} =$ مدت انتظار کانتینر i در مرحله j در جرثقیل k .

$TD_i =$ ضریب مدت زمان تنظیم کانتینر i در هر مرحله حمل و نقل (منظور مدت زمانی است که تنظیمات مرکز ثقلی بر روی کانتینر صرف می‌شود).

$SD_i =$ ضریب مدت زمان تنظیم استفاده از جرثقیل برای کانتینر i (تنظیمات مربوط به سرعت و جهت حرکت بار توسط جرثقیل‌ها)

$LT_{ijk} =$ فاصله زمانی هنگام‌سازی کانتینر i در مرحله j از جرثقیل نوع k .

$RW_{ijk} =$ مدت زمان حرکت عرضی و ارتفاعی کانتینر i در مرحله j از جرثقیل نوع k (حرکت‌هایی که در عرض و در ارتفاع توسط جرثقیل انجام می‌شود و حرکت طولی وجود ندارد).

$DD_i =$ مؤعد مقرر تحویل کانتینر i به ایستگاه آخر که مربوط به کشنده ریلی است (مربوط به زمان استاندارد است که بر اساس تجربه کار و برنامه اعلامی از سمت مدیریت ارشد ابلاغ می‌گردد).

۳-۳-۳ متغیرها

$C_{ijk} =$ زمان اتمام فعالیت کانتینر i در مرحله j از جرثقیل نوع k

$Y_{ijk} =$ متغیر صفر و یک اگر کانتینر i در رسیدن به مقصد j از جرثقیل k استفاده کند یک، در غیر این صورت صفر.

$X_{iij'jk} =$ متغیر صفر و یک اگر دو کانتینر از یک جرثقیل بخواهند استفاده کنند، نشان می‌دهد که i بعد از i' از مقصد j از جرثقیل k باشد یک، در غیر این صورت صفر.

۳-۳-۴ محدودیت‌های مدل

$$\sum_{i \in I} \sum_{i' \in I, i' \neq i_1} X_{iij'jk} \leq 1 \quad \forall j, k \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K_{ij}} Y_{ijk} = 1 \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (2)$$

$$C_{ijk} \leq MY_{ijk} \quad \forall i \in I, j \in J_i, k \in K_{ij} \quad (3)$$

$$C_{ijk} \geq \sum_{k'} C_{ij'k'} + PT_{ijk} + ST_{ijk} + RW_{ijk} + LT_{ijk} + M(1 - Y_{ijk}) \quad (4)$$

$$\forall i \in I, j, j' \in J_i, j \neq A_i, j' = j - 1, k \in K_{ij}$$

مدل سازی زمان بندی عملیات تخلیه و بارگیری در قطارهای کانتینری به منظور کاهش زمان عملیات با استفاده از روش حل دقیق

اپسیلون و الگوریتم های فرا ابتکاری

محدودیت (۴) زمان هر مرحله جابه جایی کانتینر شامل زمان حمل در ایستگاه قبلی، زمان انتظار جرثقیل و زمان حرکت در مسیر برای رسیدن به مقصد (در صورتی که مسیر برای جابه جایی انتخاب شود) است. (این محدودیت برای تمام مراحل به جز مرحله اول حمل معتبر است)

محدودیت (۵) نشان می دهد که زمان سفر در مرحله اول حمل شامل مدت زمان سفر در هر یک از مسیرها به علاوه مدت زمان انتظار جرثقیل در مسیر می باشد. (این محدودیت برای مرحله شروع حرکت جرثقیل در نظر گرفته شده است)

محدودیت های (۶) تا (۸) مربوط به انتخاب مسیر برای دو جرثقیل است که بایستی صف تردد یکی رعایت شود. در محدودیت (۶) بیان شده است که دو کانتینر i و i' می توانند از مسیر عبور کردند، و محدودیت (۷) تضمین می کند که اگر دو جرثقیل روی یک مسیر حرکت کنند، آنگاه مسیر انتخابی هر دو جرثقیل یکسان است و محدودیت (۸) نیز تکمیل کننده دو محدودیت قبلی است.

در محدودیت (۹) بیان می شود که اگر کانتینر i زودتر از کانتینر i' از جرثقیل k حرکت کند، آنگاه زمان پایان حمل بزرگتر دارد و محدودیت (۱۰) نیز بالعکس آن می باشد.

۳-۴ تابع هدف مدل

توابع هدف پژوهش به دنبال کمینه کردن زمان جابه جایی کل و ضریب مدت زمان تنظیمات استفاده از جرثقیل می باشند. واضح است که جرثقیل ها با توجه به خصوصیات فیزیکی و فرآیند کاری خود، زمان حمل و زمان تکمیل وظایفشان متفاوت می باشد. از این رو برای انتخاب مسیر مناسب، بیشترین زمان کل حمل را کمینه می شود.

$$\text{Max}_i \sum_{k \in K_{iZ_i}} C_{iZ_k} \quad (13)$$

$$\text{Min} \left\{ \text{Max}_i \sum_{k \in K_{iZ_i}} C_{iZ_k} \right\} \quad (14)$$

$$C_{ijk} \geq Y_{ijk} * (PT_{ijk} + ST_{ijk} + RW_{ijk} + LT_{ijk}) \quad (5)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in A_i, \forall k \in K_{ij} \\ X_{iik} + X_{jii'k} \leq 1 \\ \forall i, i' \in I, i < i', j \in J_i \cap J_{i'}, k \in K_{ij} \cap K_{i'j} \quad (6)$$

$$2X_{iik} \leq Y_{jik} + Y_{ji'k} \\ \forall i, i' \in I, i < i', j \in J_i \cap J_{i'}, k \in K_{ij} \cap K_{i'j} \quad (7)$$

$$Y_{ijk} + Y_{i'jk} \leq X_{ik} + X_{ji'k} + 1 \\ \forall i, i' \in I, i < i', j \in J_i \cap J_{i'}, k \in K_{ij} \cap K_{i'j} \quad (8)$$

$$C_{ijk} \geq C_{i'jk} + PT_{ijk} + ST_{ijk} + LT_{ijk} - MX_{i'ijk} - 2M + MY_{ijk} + MY_{i'jk} \\ \forall k \in K: N_k > 1, j = J_k, i, i' \in I_k: i < i' \quad (9)$$

$$C_{ijk} \geq C_{i'jk} + PT_{i_1jk} + ST_{i_1jk} + LT_{ijk} - MX_{i'ijk} - 2M + MY_{ijk} + MY_{i'jk} \\ \forall k \in K: N_k > 1, j = J_k, i, i' \in I_k: i < i' \quad (10)$$

$$\text{Min } C = \sum_i (1 + TD_i) * \left| \left(\text{Max} \sum_{K,J} C_{ijk} - DD_i \right) \right| \quad (11)$$

$$\text{Min } C = \sum_i ST_i * \left| \left(\text{Max} \sum_{K,J} Y_{ijk} \right) \right| \quad (12)$$

محدودیت (۱) بیان می کند هر کانتینر در هر جرثقیل برای طی کردن مسیر فقط یک کانتینر را می تواند انتخاب کند.

محدودیت (۲) بیان می کند که یک کانتینر برای رسیدن به مقصد تعیین شده خود بایستی از یک مسیر و نیز یک جرثقیل عبور کند.

محدودیت (۳) بیان می کند که در صورتی که مسیر برای حمل - و نقل انتخاب شود، آنگاه مسیر جهت این حمل و نقل بازگشایی می شود.

• حافظه دسترسی تصادفی (RAM): 16 GB

برای حل مدل و رسیدن به یک پاسخ بهینه از یک روش حل دقیق و دو الگوریتم فراابتکاری رقابت استعماری^(۹) (ICA) و الگوریتم ذرات انبوه^(۱۰) (PSO) استفاده شده است. همچنین از روش تاگوچی (طراحی آزمایشات) جهت تعیین مقادیر مطلوب برای الگوریتم‌های فراابتکاری به کار برده شده، استفاده شده است. در پیوست‌های ۲ تا ۴ به تفصیل الگوریتم‌های فراابتکاری و روش تاگوچی توضیح داده شده است.

۴. حل مدل ریاضی

۴-۱ تخمین پارامترهای مدل‌سازی با استفاده از

شبیه‌سازی گسسته پیشامد

با توجه به توسعه حرکتی جرثقیل‌ها و عدم قطعیت در طی فرآیند لجستیکی انتقال کانتینرها در پایانه، با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی در نرم‌افزار ARENA به تخمین پارامترهایی همچون مدت‌زمان لازم برای انتقال کانتینر از مسیرهای متفاوت و مدت‌زمان انتظار کانتینرها در صف برای اجرای فرآیند لجستیکی، پرداخته می‌شود.

در فرآیند در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی زمان-بندی حرکت جرثقیل‌ها، سه ایستگاه کاری انتخاب شده است. برای جابه‌جایی میان هر ایستگاه، ۳ مسیر موجود می‌باشد. مسیر حرکت جرثقیل‌ها در خطوط ریلی به صورت خط‌کشی شده و با خطوط راهنما نمایش داده شده است. مدل شبیه‌سازی به شرح شکل (۲) می‌باشد.

با توجه به اینکه مدل ریاضی ارائه شده به صورت برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح^(۸) (MINLP) می‌باشد، لیکن با استفاده از تغییر متغیر به شکل زیر، مدل به MIP تبدیل خواهد شد. این تغییر متغیر خود یک محدودیت نیز ایجاد می‌کند.

$$\text{Max}_i \sum_{k \in K_{iz_i}} C_{iz_{ik}} = T \quad (15)$$

$$T_i \geq \text{Max} \sum_{k \in K_{iz_i}} C_{iz_{ik}} \quad (16)$$

$$C_{iz_{ik}} \geq 0 \quad (17)$$

$$T \geq 0 \quad (18)$$

$$X_{iik}: \text{Binary} \quad (19)$$

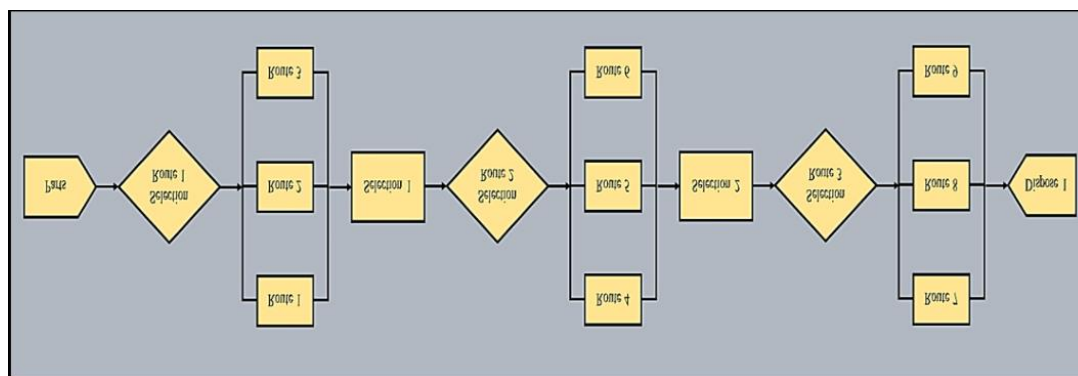
$$Y_{ijk}: \text{Binary} \quad (20)$$

۳-۵ مکانیزم حل مدل ریاضی

در بند پیشین عملیات جابه‌جایی کالاهای کانتینری توسط جرثقیل‌های دروازه‌ای در پایانه‌های ریلی در قالب مدل ریاضی، مدل‌سازی شد. در این بخش به حل مدل‌های ریاضی پرداخته می‌شود. شایان ذکر است تمام کدهای نوشته شده برای حل مدل ریاضی در محیط نرم‌افزار MATLAB R2019b نوشته شده است. همچنین برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری، از نرم‌افزار Minitab استفاده شده است. برای اجرای کدها از یک سیستم رایانه شخصی استفاده شده است که مشخصات آن به شرح زیر است:

• سیستم عامل: Windows 10 – 64bit

• پردازنده مرکزی (CPU): Core™ i7 – 4790, 3.6 GHz



شکل ۲. شبیه‌سازی مسیر حرکتی جرثقیل‌های دروازه‌ای در محیط پایانه ریلی

مدل سازی زمان بندی عملیات تخلیه و بارگیری در قطارهای کانتینری به منظور کاهش زمان عملیات با استفاده از روش حل دقیق

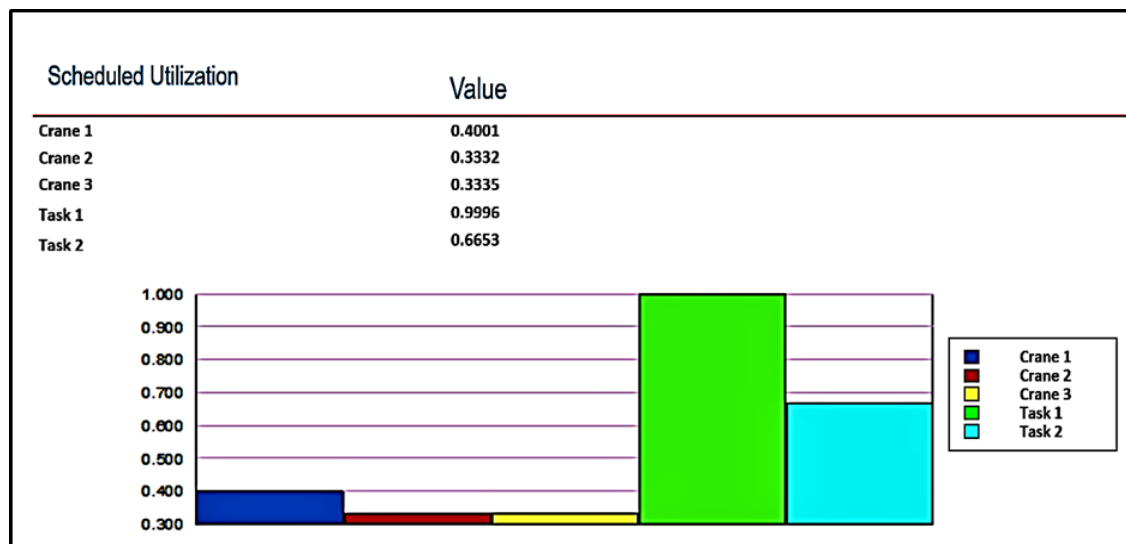
اپسیلون و الگوریتم های فراابتکاری

از این رو با توجه به زمان سنجی انجام شده در محیط بندر، تنظیم پارامترهای ماژول نرم افزار و با توجه به تنظیمات ماژول های شبیه سازی انجام شده، خروجی پارامترهای مدل ریاضی به شرح ذیل برآورد شده است که در شکل (۳) و (۴) نشان داده شده است.

با توجه به فرآیند نشان داده شده در شکل ذیل، کانتینرها از محل دپو دریافت شده و توسط جرثقیل به ایستگاه اول انتقال داده می شود، سپس بعد از پردازش در ایستگاه اول مجدداً توسط جرثقیل دوم مسیر بین ایستگاه اول و دوم طی شده و فرآیند ایستگاه دوم روی قطعات مطابق با جدول از/به انتقالی اجرا می گردد و در نهایت فرآیند ایستگاه سوم انجام و کانتینر به مقصد منتقل می شود.

Replications:	1	Time Units:	Hours	
Resource				
Usage				
Instantaneous Utilization	Average	Half width	Minimum Value	Maximum Value
Crane 1	0.4001	0.007849562	0.00	1.0000
Crane 2	0.3332	0/004716193	0.00	1.0000
Crane 3	0.3335	0/006466122	0.00	1.0000
Task 1	0.9996	(Insufficient)	0.00	1.0000
Task 2	0.6653	0.004051633	0.00	1.0000

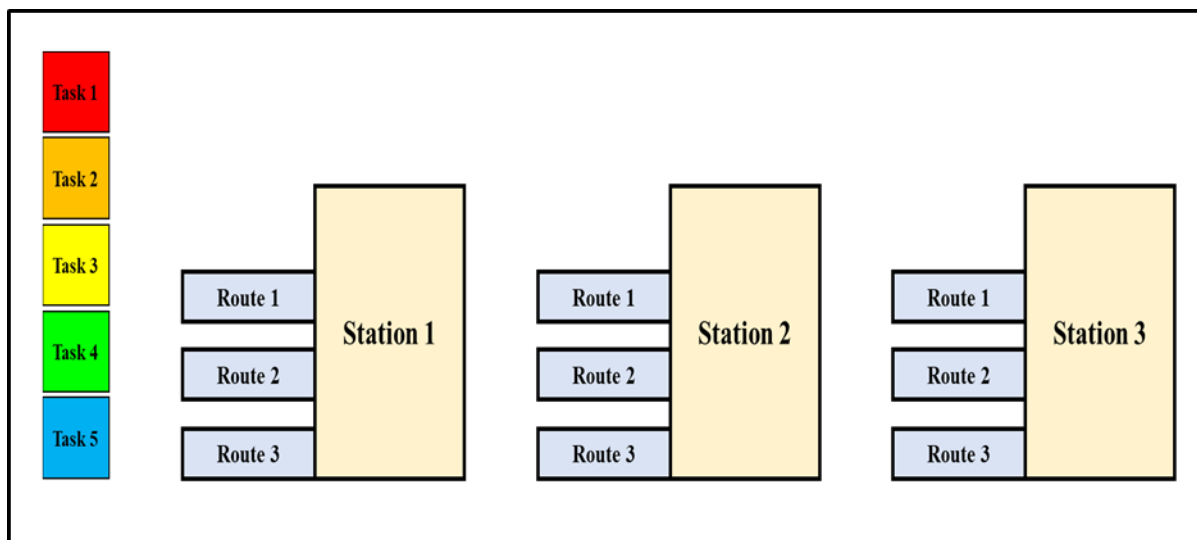
شکل ۳. زمان حمل و نقل میان بخش ها در شبیه سازی



شکل ۴. بهره وری جرثقیل ها در شبیه سازی

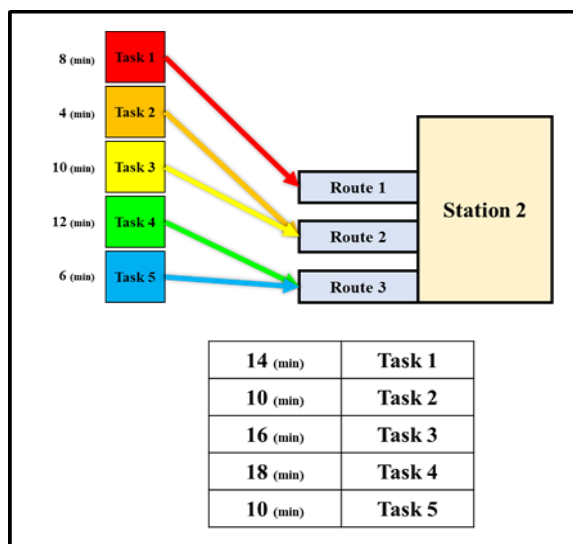
از این رو شکل شماتیک بندر برای حرکت جرثقیل ها و مسیر حرکتی آنها به شرح شکل (۵) می باشد که نمایش داده شده است:

همان طور که مشاهده می شود، جرثقیل مرحله اول، پرکارترین جرثقیل در میان سه جرثقیل دیگر شناخته شده است و از سوی دیگر ایستگاه دوم نیز با بهره وری ۱۰۰٪ در حال جابه جایی کانتینرها می باشد.



شکل ۵. شماتیک حرکتی جرثقیل‌ها

همانطور که مشاهده می‌شود، جرثقیل اول کانتینر ۱ را از مسیر اول به ایستگاه اول انتقال می‌دهد؛ با توجه به تداخل کانتینر اول و دوم جرثقیل ابتدا کانتینر شماره ۲ را حمل کرده و تا زمان حمل این کانتینر در ایستگاه اول کانتینر اول را به این ایستگاه حمل می‌کند؛ و به همین ترتیب، سایر کانتینرها از مسیرهای مختلف مطابق با برنامه حمل انتقال می‌دهد. در مسیر دوم نیز کانتینر ۴ و ۵ به ترتیب حمل می‌شوند که ابتدا کانتینر ۵ حمل شده و سپس کانتینر ۴ منتقل می‌شود.

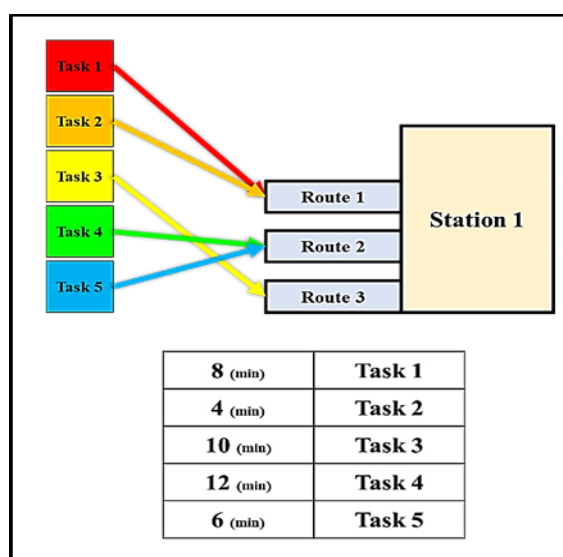


شکل ۷. مسیرهای حرکتی جرثقیل دوم بین ایستگاه اول و دوم

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، کار اول در دقیقه ۱۴ به ایستگاه دوم می‌رسد که از مسیر ۱ انتقال داده شده است و کار فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال هفدهم / شماره سوم (۶۸) / بهار ۱۴۰۵

پس از انجام شبیه‌سازی سیستم، پارامترهای ارزیابی شده در مدل ریاضی اعمال و سپس مدل به کمک نرم‌افزار GAMS و CPLEX پیاده‌سازی و حل گردید. مدل در مدت‌زمان ۰,۰۴۷ ثانیه مقادیر کمینه‌سازی هزینه‌های کل عملیات حمل را ۱۳۴ دقیقه ضرب ایمنی برای تنظیمات کانتینرها بر روی جرثقیل را ۴,۳۸۰ گزارش کرده است.

با توجه به خروجی مدل طریقه زمان‌بندی حمل‌ونقل کانتینرها در جرثقیل‌ها برای هر ایستگاه به ترتیب شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) می‌باشد:



شکل ۶. مسیرهای حرکتی جرثقیل اول در ایستگاه اول

مدل‌سازی زمان‌بندی عملیات تخلیه و بارگیری در قطارهای کانتینری به منظور کاهش زمان عملیات با استفاده از روش حل دقیق

اپسیلون و الگوریتم‌های فراابتکاری

با توجه به زمان‌بندی کل، تکمیل ۵ کار در پایانه نشان داده شده است؛ که در مدت زمان ۹۸ دقیقه کل کانتینرها (مقصود دسته کانتینر می‌باشد. هر کار می‌تواند شامل چندین کانتینر برای جابه‌جایی باشد). منتقل می‌شود.

۲-۴ حل مدل ریاضی در حالت چندهدفه با استفاده

از روش محدودیت اپسیلون

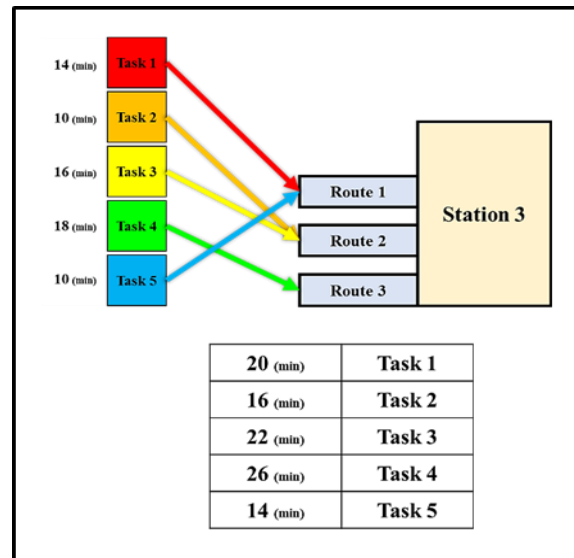
با توجه به چندهدفه بودن مدل ریاضی ارائه شده، نیاز است تا جواب‌های پارتو بهینه نیز به دست آید. روش محدودیت اپسیلون، جواب‌های بهینه کارآمد پارتو را ارائه می‌کند. در روش محدودیت اپسیلون یکی از توابع هدف به‌عنوان تابع اصلی در نظر گرفته می‌شود تا بهینه‌سازی شود؛ درحالی‌که تابع هدف دیگر به‌عنوان محدودیت در مدل قرار می‌گیرد. فرآیند روش محدودیت اپسیلون در پیوست (۱) به تفصیل توضیح داده شده است. مدل اپسیلون تقویت‌شده را با استفاده از نرم‌افزار GAMS برای هر یک از اپسیلون‌های به‌دست آورده شده است که مجموعه جواب‌های بهینه پارتو مطابق جدول (۱) است:

جدول ۱. جواب پارتو برای اپسیلون‌های مختلف

مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف اول	ع
۴,۳۸	۶۸۵	۱۳۴
۴,۳۸	۱۹۰	۱۸۹
۴,۳۵	۲۴۴,۶۵	۲۴۴
۴,۳۲	۲۹۹,۹	۲۹۹
۴,۳۰	۳۵۵,۸	۳۵۴
۴,۲۹	۴۰۹,۸	۴۰۹
۴,۲۸	۴۶۴	۴۶۴
۴,۲۸	۵۱۹,۹	۵۱۹
۴,۲۸	۵۷۴,۹	۵۷۴
۴,۲۸	۶۸۵	۶۸۵

نمودار پارتو برای توابع هدف نیز به‌صورت شکل‌های (۹) و (۱۰) به‌دست می‌آید:

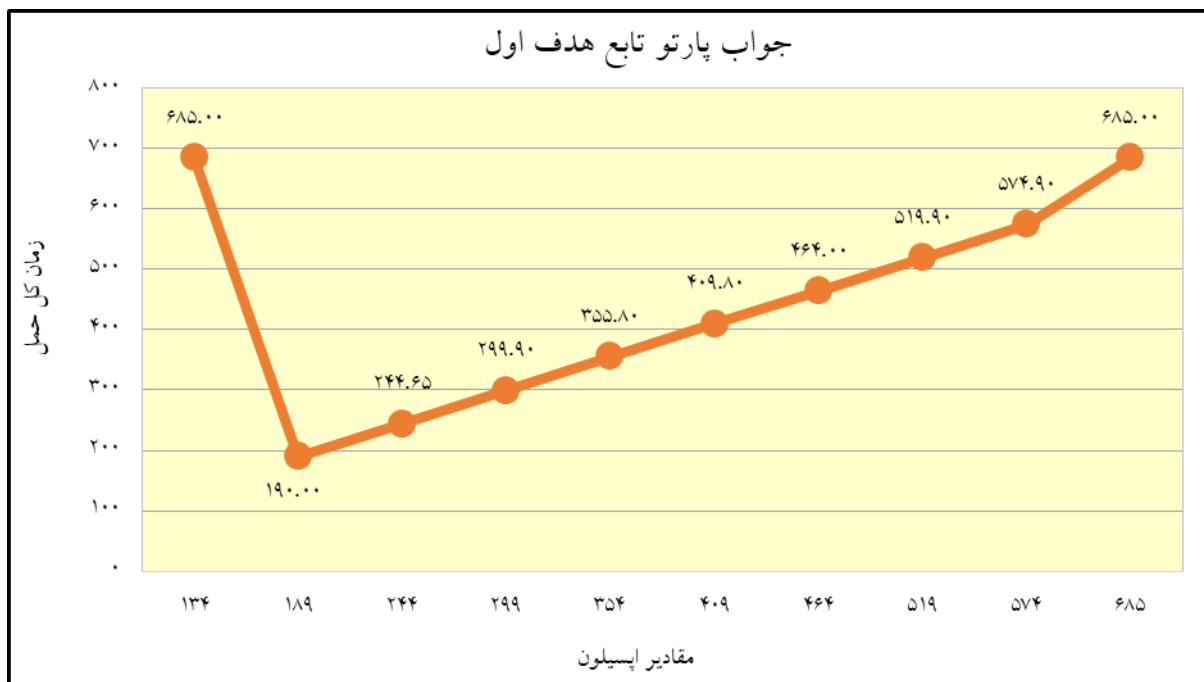
دوم و چهارم در مسیر شماره ۲ قرار می‌گیرد که ابتدا کار دوم انتقال می‌یابد و سپس کانتینر چهارم و به همین ترتیب شکل ابتدا کانتینر پنجم و سپس کانتینر سوم از مسیر سوم به ایستگاه دوم انتقال داده می‌شود.



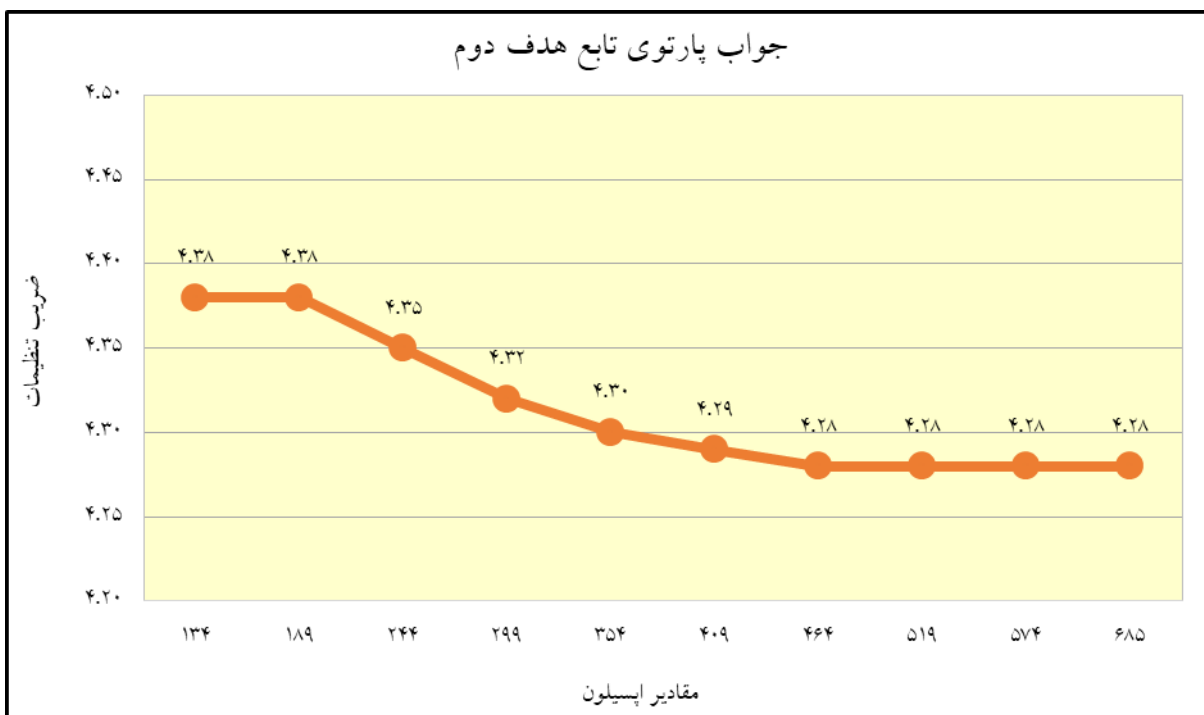
شکل ۸. مسیرهای حرکتی جرثقیل سوم به مرحله آخر

با توجه به شکل (۸) حمل‌ونقل جرثقیل سوم نیز الگوی عملکرد متفاوتی نسبت به دو ایستگاه قبلی داشته است و کانتینر اول بعد از ۲۰ دقیقه، دوم ۱۶ دقیقه، سوم ۲۲ دقیقه، چهارم ۲۶ دقیقه و پنجم ۱۴ دقیقه به محل دپو انتقال می‌دهند.

با توجه به زمان‌بندی انجام‌شده، توالی حرکت کانتینرها برای جابه‌جایی به صورتی است که ابتدا کانتینر پنجم به مکان خود منتقل شده و سپس کانتینر دوم که ۴۰ فوتی است و در زمان‌بندی آماده‌سازی و حرکت‌های عرضی و ارتفاعی مدت زمان طولانی‌تری را به خود اختصاص می‌دهد، برای همین مسئله کانتینر سوم که ۲۰ فوتی است به مدت زمان ۶ دقیقه در صف انتظار می‌ماند. سپس جابه‌جایی انجام می‌شود. دراین بین با توجه به باز بودن مسیر حرکتی، جرثقیل کانتینر شماره ۱ را به محل دپو انتقال داده و منتظر می‌ماند تا حمل کانتینر شماره ۲ به اتمام برسد، سپس کانتینر سوم را جابه‌جا می‌کند. درنهایت کانتینر شماره ۴ به محل استقرار خود منتقل می‌شود.



شکل ۹. جواب‌های پارتوی تابع هدف اول (زمان حمل کل)



شکل ۱۰. جواب‌های پارتوی تابع هدف دوم (ضرب تنظیمات کانتینر بر روی جراثیل)

Hard بودن ساختار مسئله، از دو الگوریتم ICA و PSO استفاده خواهد شد. از طرفی دیگر با توجه به اینکه مدل ریاضی دو هدفه بوده و به صورت کمینه‌سازی می‌باشد با استفاده از روش وزنی به

۳-۴ اعتبارسنجی مدل ریاضی بر اساس الگوریتم‌های فراابتکاری

در این بخش با توجه به صحت‌گذاری انجام‌شده در مدل ریاضی با استفاده از الگوریتم محدودیت اپسیلون و با در نظر گرفتن NP-

مدل سازی زمان بندی عملیات تخلیه و بارگیری در قطارهای کانتینری به منظور کاهش زمان عملیات با استفاده از روش حل دقیق

اپسیلون و الگوریتم های فراابتکاری

به منظور ارزیابی بهتر الگوریتم های پیشنهادی مسائل با ابعاد کوچک توسط GAMS حل شده و جواب آنها در جدول (۵) نمایش داده شده است و مسائل بُعد متوسط و بزرگ به ترتیب در جداول (۶) و (۷) نمایش داده شده اند که در تمامی این جداول سه مقدار زیر برای هر الگوریتم در ۱۰ تکرار مورد بررسی قرار گرفته اند.

- بهترین جواب یافت شده (B)
- میانگین جواب های به دست آمده (M)
- بدترین جواب (W)

یک تابع هدف تبدیل شده و با استفاده از این دو الگوریتم فراابتکاری به ارزیابی مدل پرداخته می شود.

۳-۴-۱ تنظیم پارامترهای مدل

منظور از تنظیم پارامتر، انتخاب بهترین مقدار برای پارامترها به نحوی است که عملکرد الگوریتم در سطح بهینه قرار گیرد. لذا پارامترها هر الگوریتم تأثیر فراوانی بر کارایی و اثربخشی الگوریتم، (رسیدن به جواب مناسب در زمان مناسب) دارند.

در این روش ابتدا برای هر یک از پارامترها محدوده مؤثرشان را مشخص کرده و سپس از طریق طراحی آزمایش های چندعاملی با استفاده از روش تاگوچی به بررسی و تحلیل اثرات متقابل پارامترها پرداخته می شود و در نهایت ترکیب بهینه معین می گردد. مقادیر پارامترهای پیشنهادی کنترل کننده الگوریتم ICA و PSO مطابق جدول (۲) و (۳) تنظیم می شوند.

جدول ۲. مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده الگوریتم ICA

فاکتور	سطوح قابل قبول
PoP _{ICA}	۴۰۰
Decade	۳۰۰
P _{ICA}	۱۹۰

جدول ۳. مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده الگوریتم PSO

فاکتور	سطوح قابل قبول
PoP _{size}	۵۰
حداکثر تعداد نسل (Iter _{max})	۸۰
ضریب جذب (α)	۰٫۹
مفاهیم یادگیری (C_1 و C_2)	۲
ضریب احتمال جهش	۰٫۲

۴-۴ نتایج و تفسیر آنها

به منظور ارزیابی الگوریتم های پیشنهادی، با استفاده از داده های جمع آوری شده، ۷۲ مسئله طراحی شد و تمامی این مسائل، در جدول (۴) خلاصه و نمایش داده شده اند. مسئله ها در سه سطح کوچک، متوسط و بزرگ (بُعد واقعی) می باشند.

جدول ۴. مشخصات مسائل تعریف شده در مدل

N	m	t = 0.2			t = 0.4		
		R = 0.6	R = 0.8	R = 1	R = 0.6	R = 0.8	R = 1
6	2	Num01	Num02	Num03	Num04	Num05	Num06
6	4	Num07	Num08	Num09	Num10	Num11	Num12
8	2	Num13	Num14	Num15	Num16	Num17	Num18
8	4	Num19	Num20	Num21	Num22	Num23	Num24
14	4	Num25	Num26	Num27	Num28	Num29	Num32
14	5	Num31	Num32	Num33	Num34	Num35	Num36
16	4	Num37	Num38	Num39	Num40	Num41	Num42
16	5	Num43	Num44	Num45	Num46	Num47	Num48
30	5	Num49	Num50	Num51	Num52	Num53	Num54
30	6	Num55	Num56	Num57	Num58	Num59	Num60
40	5	Num61	Num62	Num63	Num64	Num65	Num66
40	6	Num67	Num68	Num69	Num70	Num71	Num72

جدول ۵. عملیات انجام کارها در ابعاد کوچک

Num	GAMS	ICA			PSO		
	OPT	B	M	W	B	M	W
Num 01	۱۹,۰۸	۱۹,۰۸	۱۹,۰۸	۱۹,۰۸	۱۹,۰۸	۱۹,۰۸	۱۹,۰۸
Num 02	۱۰,۴۴	۱۰,۴۴	۱۰,۴۴	۱۰,۴۴	۱۰,۴۴	۱۰,۴۴	۱۰,۴۴
Num 03	۱۶,۷۲	۱۶,۷۲	۱۶,۷۲	۱۶,۷۲	۱۶,۷۲	۱۶,۷۲	۱۶,۷۲
Num 04	۳۳,۳۳	۳۳,۳۳	۳۳,۳۳	۳۳,۳۳	۳۳,۳۳	۳۳,۳۳	۳۳,۳۳
Num 05	۳۰,۸۴	۳۰,۸۴	۳۰,۸۴	۳۰,۸۴	۳۰,۸۴	۳۰,۸۴	۳۰,۸۴
Num 06	۱۶,۶۳	۱۶,۶۳	۱۶,۶۳	۱۶,۶۳	۱۶,۶۳	۱۶,۶۳	۱۶,۶۳
Num 07	۶,۶۳	۶,۶۳	۸,۶۲	۱۲,۰۳	۶,۳۶	۶,۹۶	۹,۳۶
Num 08	۹,۷۶	۹,۷۶	۱۳,۰۶	۱۳,۹۶	۹,۷۶	۱۱,۵۰	۱۳,۹۶
Num 09	۲۲,۷۶	۲۲,۷۶	۲۳,۳۲	۲۶,۱۱	۲۲,۷۶	۲۳,۳۲	۲۶,۱۱
Num 10	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۲۸	۰,۵۶	۰,۰۰	۰,۳۴	۰,۵۶
Num 11	۴,۵۶	۴,۵۶	۶,۱۶	۱۶,۵۵	۴,۵۶	۵,۸۱	۱۶,۵۵
Num 12	۱۵,۹۶	۱۵,۹۶	۱۵,۹۶	۱۵,۹۶	۱۵,۹۶	۱۶,۶۶	۱۹,۴۸
Num 13	۴۶,۱۶	۳۴,۱۶	۴۹,۸۵	۵۶,۱۷	۴۶,۱۶	۴۷,۱۱	۴۹,۷۵
Num 14	۵۴,۹۱	۳۲,۹۲	۵۵,۵۶	۵۷,۴۸	۵۴,۹۱	۵۴,۹۱	۵۴,۹۱
Num 15	۳۴,۱۶	۲۳,۲۸	۳۹,۳۲	۴۶,۱۳	۳۴,۱۶	۳۸,۳۹	۴۶,۱۳
Num 16	۳۲,۹۲	۳۲,۹۲	۳۷,۴۵	۴۰,۲۳	۳۲,۹۲	۳۴,۷۶	۳۸,۹۶
Num 17	۲۳,۲۸	۲۳,۲۸	۲۳,۷۱	۲۶,۷۳	۲۳,۲۸	۲۵,۸۷	۲۶,۷۳
Num 18	۷۴,۶۲	۷۴,۶۲	۸۲,۵۱	۹۴,۶۲	۷۴,۶۲	۷۴,۶۲	۷۴,۶۲
Num 19	۸,۴۰	۸,۴۰	۱۲,۹۳	۲۱,۱۲	۸,۴۰	۱۱,۴۰	۱۹,۵۵
Num 20	۱۰,۵۲	۱۰,۵۲	۱۳,۸۲	۲۳,۹۲	۱۰,۵۲	۱۲,۶۴	۲۲,۰۵

مدل سازی زمان بندی عملیات تخلیه و بارگیری در قطارهای کانتینری به منظور کاهش زمان عملیات با استفاده از روش حل دقیق اپسیلون و الگوریتم های فراابتکاری

Num	GAMS	ICA			PSO		
	OPT	B	M	W	B	M	W
Num 21	۰,۹۹	۰,۹۹	۲,۴۵	۱۲,۴۸	۰,۹۹	۱,۸۳	۷,۷۰
Num 22	۱۳,۲۴	۱۳,۲۴	۱۴,۲۳	۱۶,۷۰	۱۳,۲۴	۱۴,۰۱	۱۶,۲۵
Num 23	۸,۹۹	۸,۹۹	۱۰,۲۱	۱۷,۰۷	۸,۹۹	۱۰,۰۱	۱۷,۴۹
Num 24	۱۰,۴۴	۱۰,۴۴	۱۱,۶۱	۱۸,۳۱	۱۰,۴۴	۱۱,۲۳	۱۵,۳۶
Mean	۲۱,۰۴	۲۱,۰۴	۲۲,۸۴	۲۶,۸۰	۲۱,۰۴	۲۲,۰۲	۲۵,۱۱

جدول ۶. عملیات انجام کارها در ابعاد متوسط

Num	ICA			PSO		
	B	M	W	B	M	W
Num 25	۲۵,۰۴	۲۹,۶۶	۳۴,۵۳	۲۵,۴	۲۷,۲۶	۳۱,۳۵
Num 26	۲۶,۱۶	۲۹,۲۴	۴۰,۴۸	۲۵,۲۴	۲۷,۹۲	۴۴,۰۷
Num 27	۱۶,۰۶	۱۸,۴۵	۲۶,۶۴	۱۲,۳۳	۱۳,۸۵	۲۰,۷۵
Num 28	۳۵,۲۳	۳۸,۳۳	۴۰,۷۹	۳۱,۶	۳۴,۲۶	۳۹,۵۸
Num 29	۱۵,۰۱	۱۶,۷۷	۲۵,۷۱	۱۳,۵۲	۱۴,۸۸	۲۱,۴۰
Num 30	۲۴,۷۳	۲۸,۰۱	۴۰,۲۹	۲۵,۴۸	۲۷,۵۲	۳۹,۲۴
Num 31	۴۵,۹۷	۵۰,۱۱	۵۶,۴۲	۴۴,۱۶	۴۷,۶۹	۵۵,۷۹
Num 32	۲۷,۷۹	۳۱,۴۰	۳۸,۳۳	۲۲,۶۳	۲۴,۴۴	۳۴,۲۶
Num 33	۱۱,۹۹	۱۳,۶۴	۱۷,۳۲	۱۲,۳۸	۱۲,۹۳	۱۴,۱۳
Num 34	۲۹,۸۹	۳۴,۰۷	۵۱,۳۹	۳۱,۰۵	۳۵,۷۱	۴۸,۸۶
Num 35	۱۸,۲۶	۲۱,۳۶	۳۱,۸۸	۱۷,۲۵	۱۸,۶۳	۲۳,۹۲
Num 36	۳۲,۰۲	۳۷,۷۸	۴۲,۶۱	۳۲,۰۲	۳۴,۹۰	۳۸,۵۵
Num 37	۶۹,۲۰	۷۸,۱۹	۸۲,۲۱	۵۱,۱۹	۵۴,۷۷	۶۲,۲۱
Num 38	۳۸,۲۷	۴۳,۶۳	۵۰,۸۹	۳۵,۰۰	۳۷,۸۰	۴۲,۲۲
Num 39	۲۴,۷۰	۲۷,۶۶	۳۸,۴۲	۲۱,۷۶	۲۳,۷۲	۳۱,۲۵
Num 40	۴۲,۰۰	۴۶,۶۲	۵۱,۳۳	۳۸,۹۴	۴۲,۴۴	۴۷,۳۶
Num 41	۴۰,۰۷	۴۴,۱۸	۵۰,۰۷	۴۱,۲۶	۴۵,۷۹	۵۵,۷۴
Num 42	۵۰,۹۴	۵۶,۰۴	۶۳,۲۵	۵۱,۲۸	۵۵,۸۹	۶۰,۰۳
Num 43	۶۶,۴۹	۷۴,۴۷	۸۰,۷۹	۶۳,۵۷	۶۷,۳۸	۷۲,۱۹
Num 44	۵۶,۵۵	۶۱,۹۰	۶۴,۰۹	۵۳,۷۸	۵۵,۹۳	۵۷,۱۰
Num 45	۳۰,۵۹	۳۶,۷۱	۵۰,۲۳	۳۰,۵۹	۳۳,۶۵	۳۸,۰۶
Num 46	۴۷,۲۹	۵۳,۴۳	۶۶,۹۴	۴۷,۲۹	۵۲,۴۲	۶۳,۶۱
Num 47	۴۵,۷۴	۵۰,۷۷	۶۵,۲۹	۴۵,۴۳	۴۹,۹۷	۶۳,۲۹
Num 48	۲۰,۰۰	۲۴,۰۱	۳۶,۴۱	۲۰,۰۰	۲۲,۲۰	۲۸,۴۴

Num	ICA			PSO		
	B	M	W	B	M	W
Mean	۳۵,۰۰	۳۹,۴۳	۴۷,۷۶	۳۳,۰۳	۳۵,۹۶	۴۳,۰۶

جدول ۷. عملیات انجام کارها در ابعاد بزرگ (واقعی)

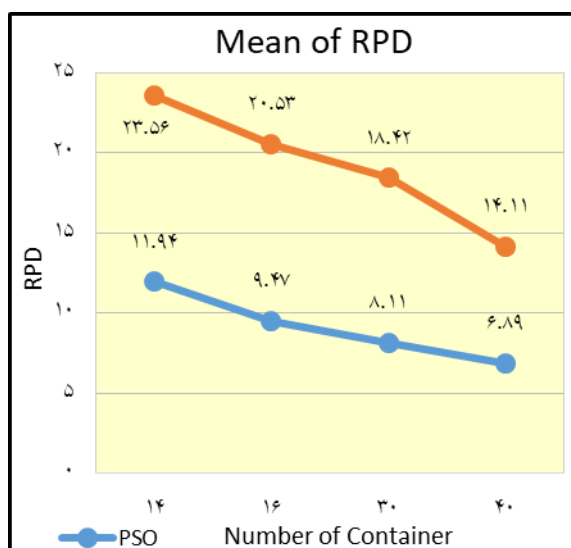
Num	ICA			PSO		
	B	M	W	B	M	W
Num 49	۱۱۲,۴۱	۱۲۰,۲۶	۱۴۰,۸۷	۱۰۵,۱۷	۱۱۱,۴۷	۱۳۶,۶۲
Num 50	۴۵,۳۲	۵۰,۲۱	۶۴,۲۳	۴۱,۱۳	۴۴,۰۱	۵۸,۱۸
Num 51	۲۱,۷۶	۲۳,۰۹	۲۷,۷۳	۲۲,۴۵	۲۴,۱۶	۲۸,۲۳
Num 52	۱۰۰,۳۴	۱۰۶,۸۲	۱۱۵,۱۲	۸۳,۳۱	۸۹,۱۴	۱۰۰,۲۷
Num 53	۹۰,۳۴	۹۷,۵۶	۱۱۰,۳۵	۸۸,۳۳	۹۴,۵۱	۱۰۷,۲۸
Num 54	۲۵,۲۰	۲۶,۷۳	۳۰,۲۶	۲۷,۲۹	۲۸,۷۱	۳۱,۳۷
Num 55	۱۲۴,۶۳	۱۳۳,۳۵	۱۴۵,۱۶	۱۲۴,۰۶	۱۳۰,۲۶	۱۴۳,۸۲
Num 56	۴۰,۹۰	۴۵,۹۶	۵۱,۵۳	۳۳,۶۲	۳۶,۶۵	۴۴,۴۹
Num 57	۲۸,۴۴	۳۲,۴۴	۳۸,۵۵	۲۸,۱۳	۲۹,۸۵	۳۳,۵۸
Num 58	۱۶۱,۹۲	۱۷۰,۴۹	۱۸۶,۹۶	۱۵۰,۵۲	۱۵۸,۰۷	۱۷۳,۷۴
Num 59	۵۱,۳۵	۵۶,۱۶	۶۸,۲۱	۴۵,۱۵	۴۸,۷۶	۶۰,۱۵
Num 60	۲۱,۵۱	۲۳,۴۴	۲۶,۲۰	۱۷,۷۷	۱۹,۱۹	۲۲,۴۰
Num 61	۲۸۲,۶۰	۲۹۱,۰۹	۳۰۱,۴۴	۲۳۹,۶۰	۲۴۶,۷۹	۲۵۶,۸۲
Num 62	۱۱۵,۶۲	۱۲۲,۲۰	۱۴۰,۲۷	۱۰۲,۲۱	۱۰۸,۳۹	۱۲۵,۸۷
Num 63	۶۹,۵۸	۷۳,۲۴	۸۶,۲۴	۷۳,۶۶	۷۷,۱۱	۸۸,۲۶
Num 64	۲۰۹,۶۷	۲۲۶,۴۴	۲۴۴,۹۱	۱۹۱,۴۱	۲۰۲,۸۹	۲۳۶,۹۲
Num 65	۵۱,۶۸	۵۴,۹۳	۶۰,۶۲	۵۳,۸۶	۵۶,۶۱	۶۵,۰۲
Num 66	۸۱,۶۳	۸۷,۳۴	۹۴,۲۲	۷۹,۶۲	۸۵,۴۳	۱۰۰,۸۷
Num 67	۱۹۳,۶۲	۲۰۳,۲۴	۲۱۸,۱۰	۲۰۰,۱۲	۲۰۷,۳۷	۲۲۵,۱۸
Num 68	۸۷,۵۷	۹۵,۴۵	۱۲۰,۴۷	۸۰,۸۱	۸۶,۴۷	۱۱۵,۳۷
Num 69	۵۳,۱۸	۵۷,۰۸	۷۲,۲۶	۵۳,۴۴	۵۶,۸۷	۶۸,۲۳
Num 70	۱۳۹,۶۴	۱۵۵,۰۰	۱۷۵,۴۴	۱۳۰,۴۷	۱۳۶,۸۳	۱۵۱,۸۸
Num 71	۶۳,۳۲	۶۸,۳۹	۷۵,۱۴	۶۳,۸۳	۶۸,۰۴	۷۵,۱۴
Num 72	۲۷,۵۷	۳۲,۱۹	۳۶,۷۳	۲۵,۰۱	۲۵,۹۸	۲۷,۱۱
Mean	۹۱,۶۶	۹۸,۰۵	۱۰۹,۶۴	۸۵,۸۷	۹۰,۵۳	۱۰۳,۲۰

با توجه به آزمایش‌های انجام شده در مسائل با اندازه‌های متوسط، GAMS در زمان ۲۲ ساعت قادر به رسیدن به جواب بهینه نمی‌باشد. به‌منظور محاسبه عملکرد الگوریتم‌ها برای مسائل ابعاد

همان‌طور که در جدول (۵) نمایش داده شد، تمامی الگوریتم‌ها در مسائل ابعاد کوچک به جواب بهینه می‌رسند. البته جواب بهینه به‌دست آمده برای GAMS در زمانی کمتر از ۲ دقیقه می‌باشد و

مدل سازی زمان بندی عملیات تخلیه و بارگیری در قطارهای کانتینری به منظور کاهش زمان عملیات با استفاده از روش حل دقیق

اپسیلون و الگوریتم های فراابتکاری



شکل ۱۲. RPD برای تعداد مختلف کانتینرها

تمامی نتایج نشان از برتر الگوریتم ازدحام ذرات در تمامی سطوح دارد. علاوه بر آزمایش های انجام شده در تمامی الگوریتم ها مقدار هر پارامتر برای هر مسئله با توجه به الگوریتم رقابت استعماری سنجیده و به آن مقدار در بازه صفر تا یک اختصاص داده می شود. حال مجموع مقادیر مقایسه ها برای پارامترها در سطوح مختلف در جدول (۸) و درصد تعداد جواب هایی که هر الگوریتم در هر سطح برای هر پارامتر نسبت به الگوریتم دیگر بهتر عمل کرده باشد را در جدول (۹) نشان داده شده است. در جدول (۹) مجموع مقایسه ای: بهترین (SB)، میانگین (SM) و بدترین (SW) می باشند.

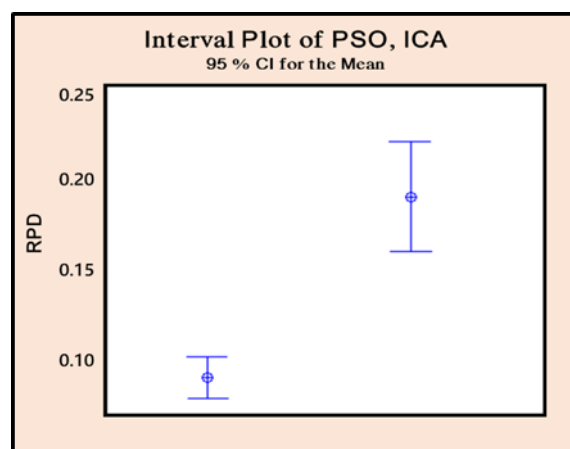
در جدول (۹)، فرضاً برای مسائل سطح بزرگ و پارامتر بهترین مقدار، الگوریتم ازدحام ذرات ۰.۶۷ جواب هایش بهتر از الگوریتم رقابت استعماری بوده است. در این جدول درصد تعداد بهتری برای بهترین مقدار، میانگین مقادیر و درصد تعداد بهتر برای بدترین مقادیر به ترتیب به صورت P_B ، P_M و P_W نمایش داده شده است. نتایج نشان دهنده آن است که الگوریتم ازدحام ذرات برای هر سه سطح عملکرد بهتر دارد.

کوچک از درصد خطا^(۱۱) (PRE) و متوسط و بزرگ از درصد انحراف نسبی^(۱۲) (PRD) استفاده می شود. دلیل استفاده از PRE برای سطوح کوچک این است که در این سطح، جواب بهینه توسط LINGO برای مقایسه حساب می شود. روابط مربوط به PRE و RPD در زیر نمایش داده شده اند.

$$PRE = \frac{solve_{ave} - O}{O} * 100 \quad (21)$$

$$PRD = \frac{solve_{ave} - solve_{min}}{solve_{min}} * 100 \quad (22)$$

در رابطه PRE، O بیانگر جواب بهینه به دست آمده توسط GAMS می باشد. با توجه به اینکه در مسائل با سطح متوسط و بزرگ جواب بهینه مشخصی نداریم، به همین دلیل از PRD برای به دست آوردن یک انحراف استفاده می شود. نمودار میانگین به همراه فواصل LSD^(۱۳) برای مقادیر مختلف PRD در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱. نمودار میانگین جواب های الگوریتم ها در فواصل LSD

میانگین انحرافات برای تعداد کانتینرها مختلف در نمودار شکل (۱۲) نمایش داده شده است.

جدول ۸. مجموع مقایسه‌ای پارامتر الگوریتم‌ها

Size	ICA			PSO		
	S _B	S _M	S _W	S _B	S _M	S _W
کوچک	8	8.12	8.26	8	7.81	7.78
متوسط	8.15	8.3	8.41	7.71	7.55	7.47
بزرگ	8.1	8.14	8.15	7.65	7.54	7.64

جدول ۹. درصد جواب‌های بهتر الگوریتم‌ها

Size	ICA			PSO		
	P _B	P _M	P _W	P _B	P _M	P _W
کوچک	1	0.24	0.25	1	0.5	0.4
متوسط	0.2	0.08	0.08	0.49	0.67	0.73
بزرگ	0.25	0.21	0.23	0.67	0.67	0.57

خروجی کاربرد و عملیاتی برای مدیران پایانه لیست توالی کارها می‌باشد. در جدول (۱۰) مسئله‌ای که با کانتینر حل شده است، برتری الگوریتم PSO به الگوریتم ICA با مقایسه مدت‌زمان انجام کل عملیات و توالی کارها گزارش شده در هر الگوریتم نیز آشکار می‌باشد.

جدول ۱۰. لیست توالی کارها و مدت‌زمان انجام کل عملیات

الگوریتم	توالی انجام کارها (ترتیب جابه‌جایی)	مدت‌زمان تکلیف عملیات کل (ثانیه)
ICA	۱۸-۲۰-۱۷-۱۹-۱۶-۱۴-۹-۸-۱۵-۷-۱۱-۱۰-۶-۴-۳-۱۲-۲۱-۲-۵-۱-۱۳-۲۲	۴۳۱۰۲
PSO	۱۸-۱۵-۱۷-۲۲-۵-۱۶-۱۴-۹-۱۱-۶-۷-۸-۱۹-۴-۳-۱۲-۲۱-۲-۲۰-۱-۱۰-۱۳	۴۲۹۸۱

۵. نتیجه‌گیری

برای حل مدل و دستیابی به یک پاسخ بهینه از یک روش حل دقیق و دو الگوریتم فراابتکاری PSO و ICA استفاده شده است. همچنین از روش تاگوچی جهت تعیین مقادیر مطلوب برای الگوریتم‌های فراابتکاری به کار برده شده، استفاده شده است. نتایج و خروجی تحلیل مدل نشان از برتری و عملکرد بهتر الگوریتم PSO نسبت به ICA دارد.

۶. پی‌نوشت‌ها

1. Objective Response Rate
2. Discrete Event Simulation
3. Dynamic Stochastic Programming
4. Rolling Horizon
5. Adaptive Horizon
6. Backtracking Strategy
7. Processing Set

حمل‌ونقل ریلی یکی از حلقه‌های مهم در جابه‌جایی کالا می‌باشد. با توجه به مزیت‌های آن نسبت به حمل جاده‌ای مانند آلودگی کمتر و پایین آمدن هزینه‌های حمل، اما سهم کمتری از جابه‌جایی کالاهای زمینی را در اختیار دارد. یکی از مهمترین معایب آن تأخیرات موجود در شبکه ریلی می‌باشد. تأخیرات شبکه ریلی دلایل مختلفی دارد که یکی از مهم‌ترین آنها تأخیرات ناشی از عملیات تخلیه و بارگیری قطارها در پایانه‌های ریلی می‌باشد. مسئله برنامه‌ریزی زمان‌بندی عملیات تخلیه و بارگیری کالا در پایانه‌های ریلی جزء دسته مسائل NP-Hard محسوب می‌گردند و به همین علت برای حل آنها در مدت‌زمان بهینه و معقولی باید از الگوریتم‌های فراابتکاری یاری جست. لذا در پژوهش حاضر

مدل‌سازی زمان‌بندی عملیات تخلیه و بارگیری در قطارهای کانتینری به منظور کاهش زمان عملیات با استفاده از روش حل دقیق

اپسیلون و الگوریتم‌های فراابتکاری

- Chen, B., H. Lv, and Z. Liu, (2013), "Selection of railway-water intermodal transportation port station handling machinery", ICTE 2013: Safety, Speediness, Intelligence, Low-Carbon and Innovation. pp: 773-779.

- García, A. and I. García, (2012), "A simulation-based flexible platform for the design and evaluation of rail service infrastructures", Simulation Modelling Practice and Theory, pp: 31-46.

- Xie, M., L. Wang, and W. Yang. (2019), "A Flexible Scheduling Mode of Gantry Cranes for Railway Container Terminal", in Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing.

- Ballis, A. and E.K. Morlok, (2004), "Advanced rail and maritime system demonstrations in Europe", Transportation research record, Vol1873(1), pp: 89-98.

- Lovett, A.H., C.T. Dick, and C.P.J.P.o.R.T. Barkan, (2015), "Determining freight train delay costs on railroad lines in North America".

- Gambardella, L.M., A.E. Rizzoli, and P. Funk, (2002), "Agent-based planning and simulation of combined rail/road transport", Simulation, Vol78(5), pp: 293-303.

- Rizzoli, A.E., N. Fornara, and L.M. Gambardella, (2002), "A simulation tool for combined rail/road transport in intermodal terminals", Mathematics and Computers in Simulation, Vol59(1-3), pp: 57-71.

- Aliche, K., (2005), "Modeling and optimization of the intermodal terminal Mega Hub, in Container Terminals and Automated Transport Systems.", Springer, pp: 307-323.

- Boysen, N., M. Flidner, and M. Kellner, (2010), "Determining fixed crane areas in rail-rail transshipment yards", Transportation

8. Mix Integer Nonlinear Programming

9. Imperialist Competitive Algorithm

10. Particle Swarm Optimization

11. Percentage Relative Error

12. Relative Percentage Deviation

13. Log Spectral Distance

۷. مراجع

- سند چشم‌انداز حمل‌ونقل ریلی در افق ۱۴۰۴.

- سالنامه آماری وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۹۷.

- محمودی، س.م. (۱۳۹۹)، "نقش سیستم‌های تخلیه و بارگیری در تعیین ظرفیت شبکه ریلی"، Available from:

<https://www.tinn.ir/fa/tiny/news-228126>

- Krüger, N., I. Vierth, and F. Fakhraei Roudsari, (2013), "Spatial, temporal and size distribution of freight train delays: evidence from Sweden". Centre for Transport Studies.

- Zhou, J. and P. Zhang. (2015), "Design and Application of Robotic Package Stacking for Train Loading in Ports". 3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation. Atlantis Press.

- Caris, A., C. Macharis, and G.K. Janssens, (2008), "Planning problems in intermodal freight transport: accomplishments and prospects", Transportation Planning and Technology, Vol 31(3), pp: 277-302.

- Weber, P.J. and K.W. Reichelt, (2018), "Railway facility with high throughput loop track", Google Patents.

- Shao, Y., et al., Lectotype and Quantity, (2015), "Optimization of Handling Machines for Railway Freight Transport: The Case of Kunming Railway Bureau", in ICTE 2015. pp: 2151-2159.

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال هفدهم / شماره سوم (۶۸) / بهار ۱۴۰۵

گام‌های روش محدودیت اپسیلون به صورت زیر است:

۱. یکی از توابع هدف به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب شود.
۲. هر بار با توجه به یکی از توابع هدف، مسئله را حل کرده و مقادیر بهینه هر تابع هدف به دست آورده شود.
۳. بازه بین دو مقدار بهینه توابع هدف فرعی را به تعداد از قبل مشخص تقسیم‌بندی کرده و یک جدول مقادیر برای $\epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ به دست آورده شود.
۴. هر بار مسئله را با تابع هدف اصلی با هر یک از مقادیر $\epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ حل شود.
۵. جواب‌های پارتوی یافته شده گزارش گردد.

۸-۲ الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری (ICA)

الگوریتم رقابت استعماری روشی در حوزه محاسبات تکاملی است که به یافتن پاسخ بهینه مسائل مختلف بهینه‌سازی می‌پردازد. این الگوریتم با مدل‌سازی ریاضی فرایند تکامل اجتماعی-سیاسی، الگوریتمی برای حل مسائل ریاضی بهینه‌سازی ارائه می‌دهد. مانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم نیز با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هرکدام از آن‌ها یک «کشور» نامیده می‌شوند، شروع می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت به عنوان استعمارگر انتخاب می‌شوند. باقی‌مانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره، در نظر گرفته می‌شوند. استعمارگران بسته به قدرتشان، این مستعمرات را با یک‌روند خاص که در ادامه می‌آید، به سمت خود جذب می‌کنند. قدرت کل هر امپراتوری به هر دو بخش تشکیل‌دهنده آن، یعنی کشور استعمارگر (به عنوان هسته مرکزی) و مستعمرات آن، بستگی دارد. در حالت ریاضی، این وابستگی با تعریف قدرت امپراتوری به صورت مجموع قدرت کشور استعمارگر به اضافه درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن مدل می‌شود.

با شکل‌گیری امپراتوری‌های اولیه رقابت استعماری میان آن‌ها شروع می‌شود. هر امپراتوری‌ای که نتواند در رقابت استعماری موفق عمل کند و به قدرت خود بیفزاید (یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنه رقابت استعماری حذف خواهد

Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol46(6), pp: 1005-1016.

- Li, X., A. Otto, and E. Pesch, (2019), "Solving the single crane scheduling problem at rail transshipment yards", Discrete Applied Mathematics, Vol (264), pp: 134-147.

- Zhang, Q., et al., (2020), "Research on Loading and Unloading Resource Scheduling and Optimization of Rail-Road Transportation in Container Terminal Based on "Internet", for Ghana Container Port Development Planning, Journal of Advanced Transportation, 2020.

- Chang, Y., et al., (2019), "Integrated scheduling of handling operations in railway container terminals", Transportation Letters, Vol11(7), pp: 402-412.

- Yan, B., et al., (2020), "Integrated planning of train schedule template and container transshipment operation in seaport railway terminals", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol142, pp: 102061.

۸ پیوست

۸-۱ روش محدودیت اپسیلون

روش محدودیت اپسیلون (ϵ -constraint) یکی از رویکردهای شناخته شده برای مواجهه با مسائل چندهدفه که با انتقال تمامی توابع هدف به جز یکی از آنها در هر مرحله به محدودیت به حل این نوع از مسائل می‌پردازد. مرز پارتو می‌تواند با روش قید ϵ ایجاد شود.

$$\text{Min } f_1(x) \quad (23)$$

$$x \in X \quad (24)$$

$$f_2(x) \leq \epsilon_2$$

$$\dots \quad (25)$$

$$f_n(x) \leq \epsilon_n$$

مدل سازی زمان بندی عملیات تخلیه و بارگیری در قطارهای کانتینری به منظور کاهش زمان عملیات با استفاده از روش حل دقیق

اپسیلون و الگوریتم های فرا ابتکاری

(۱۱) پایان

۸-۳ الگوریتم بهینه سازی ذرات انبوه (PSO)

الگوریتم PSO یک الگوریتم جستجوی جمعی است که از روی رفتار اجتماعی دسته های پرندگان مدل شده است. روند اجرای الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات به شرح زیر است:

(۱) ایجاد جمعیت اولیه و ارزیابی آن

(۲) تعیین بهترین خاطره های هر ذره و بهترین خاطره جمعی

(۳) اگر شرایط خاتمه برآورده شود، به مرحله ۶ مراجعه شود؛ در غیر این صورت به مرحله ۴ مراجعه شود.

(۴) سرعت و موقعیت هر ذره به روزرسانی شود.

(۵) همه پاسخ های جدید ارزیابی شوند و به مرحله ۲ مراجعه شود.

(۶) پایان

در مرحله چهارم باید موقعیت هر ذره به روزرسانی شود. برای به روزرسانی موقعیت هر ذره باید از رابطه زیر استفاده شود:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$$

در رابطه بالا، پارامتر $x_i(t+1)$ ، موقعیت ذره t ام را در تکرار $t+1$ را نشان می دهد و پارامتر $v_i(t+1)$ سرعت ذره t ام را در تکرار $t+1$ را نشان می دهد. برای محاسبه سرعت ذره، از رابطه زیر استفاده می شود:

$$v_i(t+1) = w \times v_i(t) + r_1 c_1 (P_i.best - x_i(t)) + r_2 c_2 (P_g.best - x_i(t))$$

در رابطه بالا پارامتر w ضریب اینرسی را نشان می دهد. ضریب اینرسی، تمایل ذره برای ادامه دادن ذره در همان سرعت پیشین را نشان می دهد. دو پارامتر r_1, r_2 اعداد تصادفی هستند که با استفاده از توزیع یکنواخت احتمالی ساخته می شوند ($r_1, r_2 = U(0,1)$). پارامتر c_1 ضریب یادگیری شخصی و پارامتر c_2 ضریب یادگیری جمعی را نشان می دهد. سه پارامتر w, c_1, c_2 برای هر مسئله مقدار متفاوتی دارند و باید مقدار بهینه آن ها برای هر مسئله محاسبه شود.

۸-۴ روش طراحی آزمایشات (تاگوچی)

شد؛ بنابراین بقای یک امپراتوری وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراتوری های رقیب و به سطره درآوردن آن ها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت های استعماری به تدریج به قدرت امپراتوری های بزرگ تر افزوده شده و امپراتوری های ضعیف تر، حذف خواهند شد. امپراتوری ها برای افزایش قدرت خود مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند.

به طور خلاصه این الگوریتم به استعمار به عنوان بخش تفکیک ناپذیری از سیر تکامل تاریخی بشر نگریسته شده و از چگونگی اثرگذاری آن بر کشورهای استعمارگر و مستعمره و نیز کل تاریخ، به عنوان منبع الهام یک الگوریتم کارا و نو در زمینه محاسبات تکاملی استفاده شده است.

مراحل الگوریتم رقابت استعماری به شرح زیر هستند:

(۱) کشورهای اولیه ایجاد می شوند.

(۲) بهترین کشورها به عنوان استعمارگر انتخاب می شوند.

(۳) بقیه کشورهای به عنوان مستعمره به کشورهای استعمارگر تخصیص داده می شوند.

(۴) سیاست همسان سازی بین کشورهای استعمارگر و مستعمره شان اجرا می شود.

(۵) عملیات انقلاب در همه کشورها انجام می شود.

(۶) کشورهای مستعمره با کشورهای استعمارگر مقایسه می شوند (در صورتی که مستعمره بهتر از استعمارگر خود باشد، جای آن را می گیرد).

(۷) امپراتوری ها ارزیابی می شوند. (محاسبه شاخص مربوط به هر امپراتوری)

(۸) یک مستعمره از ضعیف ترین امپراتوری حذف و به تصادف به یک امپراتوری دیگر منتقل می شود.

(۹) اگر ضعیف ترین امپراتوری هیچ مستعمره ای نداشت، استعمارگر آن امپراتوری به عنوان یک مستعمره به یک امپراتوری دیگر تخصیص پیدا می کند.

(۱۰) در صورتی که شرایط خاتمه محقق نشده باشد به مرحله ۴ مراجعه شود؛ در غیر این صورت به مرحله ۱۱ مراجعه شود.

حالت اول: مقدار کوچکتر معرف حالت بهینه است:

$$SB = \frac{1}{n} \sum y_i^2 \quad (26)$$

حالت دوم: مقدار بزرگتر معرف حالت بهینه است:

$$LB = \frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \quad (27)$$

حالت سوم: اندازه اسمی مطلوب است:

$$NB = \frac{1}{n} \sum (y_i - y_0)^2 \quad (28)$$

که در آنها n تعداد تکرارها، y_i ها خروجی های اندازه گیری شده و y_0 اندازه اسمی مطلوب است.

پس از تعیین عوامل کنترلی و غیرکنترلی و داده های زائدی که هیچ گونه اثربخشی در نتیجه مدل ندارند، فرآیند انجام الگوریتم های تکاملی در قالب روش تاگوچی به ترتیب ذیل انجام می گیرد:

- ۱- محاسبه مقادیر سیگنال به نویز کل برای هر یک از خروجی ها طبق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$SN = -\log(L_i) \quad (29)$$

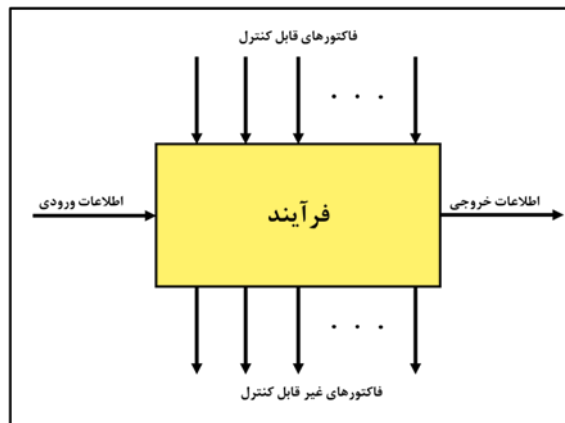
- ۲- محاسبه مقدار سیگنال به نویز برای هر سطح از پارامترها: در روش تاگوچی سطوحی از پارامترها که دارای بیشترین مقادیر سیگنال به نویز هستند (بدون توجه به نوع تابع زیان)، به عنوان سطوح بهینه معرفی می گردند.

- ۳- تعیین میزان اهمیت هر یک از پارامترها با استفاده از ابزار آماری آنالیز واریانس.

- ۴- آنالیز داده ها و پیش بینی خروجی در حالت بهینه.

- ۵- انجام آزمایش تأییدی به منظور صحت گذاری و تصدیق نتایج به دست آمده.

روش طراحی آزمایشات تاگوچی در سال ۱۹۶۰ توسط پروفیسور تاگوچی معرفی گردید. این روش می تواند با کمترین تعداد آزمایشات، شرایط بهینه را تعیین کند و باعث کاهش چشمگیر در زمان و هزینه انجام آزمایشات مورد نیاز می گردد. در روش تاگوچی با توجه به تعداد پارامترهای انتخابی و سطوح مربوطه، از آرایه های متعامد مختلفی به عنوان ماتریس آزمایشات استفاده می شود. در این روش تغییرات با عاملی به نام نسبت سیگنال به نویز معرفی می گردند و شرایط آزمایشی که دارای بیشترین مقدار سیگنال به نویز باشد، به عنوان شرایط بهینه انتخاب می شود. در ادامه برای توضیح بهتر فرآیند طراحی آزمایشات، مراحل اجرایی روش تاگوچی به اختصار در شکل (۱۳) آورده شده است:



شکل ۱۳. فرآیند طراحی آزمایشات در روش تاگوچی

- انتخاب عوامل کنترلی و غیرکنترلی

عوامل کنترلی در واقع پارامترهای ورودی مسئله هستند که به منظور رسیدن به شرایط بهینه در طول آزمایشات برحسب سطوح انتخابی و ماتریس آزمایشات تغییر می کنند. عوامل غیرکنترلی نیز به تمامی فاکتورهای اطلاقی می شود که باعث ایجاد تغییرات می شوند اما بر حسب شرایط در طی آزمایشات ثابت فرض می گردند.

حال پس از مشخص کردن پارامترهای کنترلی، محاسبه تابع زیان جهت تعیین تغییرات موجود بین نتایج آزمایشات و مقادیر مطلوب انجام می گیرد. این تابع با توجه به شرایط مسئله و به کمک روابط (۲۶) الی (۲۸) محاسبه می شود: