

بهینه‌سازی توالی و تخصیص کامیون‌های ورودی و خروجی در باراندازهای متقاطع

جمال ارکات^{۱*}، پرک قدس^۲، فردین احمدی‌زر^۳

۱. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان

۲. کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان

۳. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان

(تاریخ دریافت ۹۵/۰۲/۰۵ - تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده ۹۵/۰۲/۲۶ - تاریخ تصویب ۹۵/۰۳/۱۱)

چکیده

سیستم بارانداز متقاطع یک راهبرد لجستیکی است که براساس آن کالاهای تخلیه‌شده از کامیون‌های ورودی، تقریباً بدون ذخیره‌سازی و به‌صورت مستقیم در کامیون‌های خروجی بارگیری می‌شوند؛ بنابراین، تقریباً هیچ موجودی در این مراکز توزیع، نگهداری نمی‌شود. در این تحقیق، مسئله تخصیص کامیون‌ها به درهای بارانداز و تعیین توالی هم‌زمان کامیون‌های ورودی و خروجی در یک بارانداز متقاطع دارنده چند در تخلیه و بارگیری بررسی می‌شود. بدین‌منظور، مسئله مورد بررسی در قالب یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه می‌شود. به‌دلیل ناچندجمله‌ای سخت‌بودن مسئله و همچنین به‌منظور حل مسئله در مقیاس بزرگ، یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ارائه می‌شود. به‌منظور ارزیابی صحت مدل ریاضی و عملکرد الگوریتم پیشنهادی، تعدادی مثال عددی، حل و نتایج تحلیل می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، بارانداز متقاطع، تخصیص درهای بارانداز، زمان‌بندی کامیون‌ها.

مقدمه

بارانداز متقاطع^۱ یک راهبرد لجستیکی است که امروزه شرکت‌های متعددی در حوزه صنایع مختلف آن را به‌کار می‌برند. ایده اصلی بارانداز متقاطع، انتقال مستقیم کالاهای وارده به مرکز توزیع به وسایل نقلیه خروجی و بدون ذخیره‌سازی موقت است. ممکن است این تکنیک اهداف متفاوتی مانند ترکیب کالاها^۲، کاهش زمان تحویل و کاهش هزینه‌ها را برآورده سازد. نبود ذخیره موقت، حالت ایده‌آل به‌شمار می‌رود، اما معمولاً در عمل، ذخیره‌سازی موقت لازم است، زیرا بسیاری از کالاهای ورودی، پیش از بارگیری باید دسته‌بندی و ترکیب شوند. در نتیجه، می‌توان سیستم بارانداز متقاطع را فرایند ترکیب کالاهایی با مقصد یکسان - که از منابع مختلف آمده‌اند - با کمینه جابه‌جایی و ذخیره‌سازی بین تخلیه و بارگیری کالاها توصیف کرد. اگر ذخیره‌سازی کالاها اجتناب‌ناپذیر باشد، این ذخیره‌سازی باید برای بازه زمانی کوتاهی (حداکثر ۲۴ ساعت) صورت گیرد. در انبارهای متقاطع از میان کارکردهای اصلی

انبارداری یعنی دریافت، ذخیره‌سازی، برداشت سفارش‌ها و ارسال، دو کارکرد پرهزینه ذخیره‌سازی و برداشت سفارش‌ها حذف می‌شوند. هرچند امروزه بسیاری از شرکت‌ها از باراندازهای متقاطع استفاده می‌کنند، این سیستم یک راه‌حل عمومی برای تمام کاربردها نیست. البته و ویزواناتن [۱] عواملی را برشمرده‌اند که بر کاربرد و کارکرد بارانداز متقاطع در مقایسه با توزیع سنتی تأثیر می‌گذارند. در این زمینه، دو عامل نرخ تقاضای محصول و هزینه واحد اتمام موجودی، مهم‌ترین عواملند.

می‌توان سیستم‌های بارانداز متقاطع را براساس سه نوع ویژگی فیزیکی، عملیاتی و جریان کالا دسته‌بندی کرد. ویژگی فیزیکی برای مدت طولانی ثابت می‌ماند و شامل شکل و تعداد درهای بارانداز و شیوه حمل‌ونقل داخلی می‌شود. شیوه خدمت‌دهی و نحوه اعمال وقفه^۳، جزء ویژگی‌های عملیاتی هستند. ویژگی جریان کالا شامل الگوی ورود، زمان حرکت، قابلیت تعویض‌پذیری محصول^۴ و ذخیره‌سازی موقتی می‌شود. در طول فازهای طراحی و

جریمه به تابع هدف اضافه شده است. ایراد اصلی این رویکرد، در نظر گرفتن زمان لازم برای انتقال کالاها بین درهای بارانداز است. محققان از الگوریتم‌های ژنتیک و جست‌وجوی ممنوعه برای حل مسئله استفاده کرده‌اند. لیم و همکاران [۵] و میائو و همکاران [۶] مسئله تحقیق قبل را با در نظر گرفتن زمان سفر بین درهای بارانداز توسعه داده‌اند. تابع هدف این تحقیقات، مجموع هزینه‌های عملیاتی (بر اساس زمان سفر) و هزینه محموله‌های تکمیل نشده را کمینه می‌سازد. بویزن [۷] در مسئله زمان‌بندی کامیون فرض کرده است ذخیره‌سازی میانی برای محصولات مجاز نیست و در نتیجه، محموله‌های ورودی به کامیون خروجی مشخصی تخصیص می‌یابند و قابلیت تعویض‌پذیری ندارند. در این پژوهش، کامیون‌ها و حامل‌های استاندارد برای انتقال کالاها در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، فرض می‌شود زمان توقف، باراندازی و به حرکت در آمدن کامیون‌ها یکسان است. نویسنده یک مدل چندهدفه شامل کمینه‌سازی زمان جریان، زمان فرایند و تأخیر کامیون‌های خروجی را برای مسئله زمان‌بندی کامیون‌ها ارائه داده است. برای حل مسئله، از یک رویکرد برنامه‌ریزی پویا و یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده شده است.

لی و همکاران [۸] مسئله زمان‌بندی هم‌زمان کامیون‌های ورودی و خروجی را بررسی کرده‌اند و برای آن یک مدل ریاضی با هدف بیشینه‌کردن تعداد محصولات انتقالی ارائه داده‌اند. در این تحقیق، از الگوریتم‌های ژنتیک با عملگرهای هم‌گذری مختلف به منظور حل مسئله در مقیاس بزرگ استفاده شده است. جو و کیم [۹] مسئله زمان‌بندی کامیون‌های ورودی، خروجی و ترکیبی را بررسی کرده‌اند. کامیون‌های ترکیبی نقش هر دو نوع کامیون‌های ورودی و خروجی را ایفا می‌کنند. در این پژوهش، دو الگوریتم ژنتیک و خود تکاملی^۷ برای کمینه‌کردن دامنه عملیات^۸ پیشنهاد شده است. در سه تحقیق آخر، زمان انتقال محصولات بین درهای مختلف ورودی و خروجی یکسان فرض شده است، در حالی که معمولاً زمان مورد نیاز به منظور انتقال کالاها در بارانداز متقاطع به فاصله بین درهای ورودی و خروجی بستگی دارد.

شاکری و همکاران [۱۰] مسئله زمان‌بندی کامیون‌ها را

اجرای بارانداز متقاطع باید در سه سطح راهبردی، تاکتیکی و عملیاتی، تصمیماتی اتخاذ شود. تصمیمات راهبردی شامل تصمیمات مکان‌یابی و جانمایی بارانداز متقاطع است. تصمیمات تاکتیکی در زمینه شیوه جریان کالا در سطح شبکه اتخاذ می‌شود. تصمیمات عملیاتی آخرین دسته از تصمیمات است که شامل مسیریابی وسایل نقلیه، تخصیص درهای بارانداز،^۵ زمان‌بندی کامیون^۶ و ذخیره‌سازی موقت می‌شود. با توجه به اهمیت زمان پاسخ و اجرای عملیات در صنعت بسیار رقابتی توزیع، مطالعات بسیاری در زمینه تخصیص درهای بارانداز و زمان‌بندی کامیون‌ها در سیستم بارانداز متقاطع صورت گرفته است.

مسئله زمان‌بندی کامیون‌ها علاوه بر تخصیص کامیون‌ها به درهای بارانداز، در مورد توالی ورود کامیون‌های نیز تصمیم می‌گیرد. پژوهش‌های محققان در این حوزه به سه دسته تقسیم می‌شود: دسته اول مانند یو و اگبلو [۲] زمان‌بندی بارانداز متقاطع را فقط با یک در تخلیه و یک در بارگیری بررسی کرده‌اند. دسته دوم مانند کونور و گولیاس [۳] فقط زمان‌بندی کامیون‌های ورودی یا زمان‌بندی کامیون‌های خروجی را در باراندازهایی با چند در تخلیه و بارگیری بررسی کرده‌اند. دسته سوم زمان‌بندی هم‌زمان کامیون‌های ورودی و خروجی را در باراندازهای دارنده چندین در تخلیه و بارگیری بررسی کرده‌اند. با توجه به مسئله تحت بررسی، در ادامه صرفاً تحقیقات انجام شده در حوزه زمان‌بندی هم‌زمان کامیون‌های ورودی و خروجی با وجود چندین درب باراندازی و بارگیری، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

لیم و همکاران [۴] در مسئله زمان‌بندی کامیون فرض کرده‌اند عملیات تخلیه و بارگیری کامیون‌ها در یک پنجره زمانی ثابت انجام می‌گیرد. در مسئله مورد بررسی، تعداد کامیون‌ها از تعداد درهای بارانداز بیشتر است؛ بنابراین، با در نظر گرفتن محدودیت زمان عملیات، مسئله زمان‌بندی به مسئله تخصیص کامیون‌ها به درهای بارانداز تبدیل شده است. هدف مسئله، کمینه‌کردن کل مسافت پیموده شده (طول سفر) است. کامیون‌ها ممکن است به هر دری تخصیص یابند (شیوه خدمت‌دهی مرکب) و ظرفیت بارانداز نیز محدود است. همچنین وقفه، مجاز نیست و برای کامیون‌هایی که خدمت‌دهی نمی‌شوند، عبارتی به‌عنوان

وقفه مجاز نیست، زمان انتقال کالاها درون بارانداز براساس فاصله مستقیم محاسبه می‌شود و ظرفیت تجهیزات جابه‌جایی به منظور انتقال کالاها بی‌نهایت فرض شده است. محتشمی [۱۶] از بین ۳۲ سناریوی پیشنهادی یو [۱۷]، دو سناریو را برای توقف کامیون‌های خروجی بررسی کرده است. در سناریوی نخست، وقفه در عملیات بارگیری کامیون‌های خروجی مجاز نیست، اما در سناریوی دوم، ممکن است بارها وقفه صورت پذیرد. یو [۱۸] مسئله تعیین توالی کامیون‌های ورودی و خروجی را با هدف کمینه کردن دامنه عملیات کل سیستم بررسی کرده است. در مدل ارائه شده، علاوه بر تعیین توالی کامیون‌ها، مسئله تخصیص محصولات نیز به صورت هم‌زمان انجام می‌گیرد. همچنین، زمان سفر بین درهای مختلف تخلیه و بارگیری، ثابت فرض شده است. اسدی و باقری [۱۹] مسئله زمان‌بندی کامیون‌ها را به همراه مسئله تخصیص محصولات با هدف کمینه کردن تعداد کامیون‌های دارای تأخیر بررسی کرده‌اند. در مسئله مورد بررسی، کامیون‌های ورودی در زمان‌های متفاوتی در دسترس قرار می‌گیرند و فواصل متفاوتی بین درهای مختلف تخلیه و بارگیری منظور شده است. همچنین، از الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید و ژنتیک برای حل مسئله در مقیاس بزرگ استفاده شده است. لی و همکاران [۲۰] مسئله زمان‌بندی کامیون‌ها را در شرایطی که امکان وقفه در عملیات تخلیه کامیون‌های ورودی به تعداد محدود وجود دارد، با هدف کمینه کردن دامنه عملیات بررسی کرده‌اند. از الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات برای حل مسئله در اندازه بزرگ استفاده شده است. اسدی و باقری [۲۱] با بهره‌گیری از سیاست تولید بهنگام، مجموع زودکردها و دیرکردهای کامیون‌های خروجی را کمینه کرده‌اند. در مسئله مورد بررسی، کامیون‌ها در زمان‌های متفاوتی در دسترس قرار می‌گیرند و فواصل بین درهای مختلف تخلیه و بارگیری متفاوت فرض شده است. ارکات و همکاران [۲۲] مسئله زمان‌بندی کامیون‌ها را در یک بارانداز متقاطع با هدف کمینه کردن دامنه عملیات بررسی کرده‌اند. در این مسئله، کامیون‌های ورودی در زمان‌های متفاوتی در دسترس قرار می‌گیرند و حامل یک نوع کالا هستند.

در تحقیق حاضر، زمان‌بندی هم‌زمان کامیون‌های

به صورت یک مسئله زمان‌بندی دومرحله‌ای ماشین‌های موازی با تابع هدف کمینه‌سازی دامنه عملیات، مدل‌سازی کرده‌اند. در این مسئله، شیوه خدمت‌دهی بارانداز از نوع مرکب و ظرفیت انبار موقت، نامحدود در نظر گرفته شده است. کالاهای متفاوت یک کامیون به صورت موازی باراندازی می‌شوند و انتقال کالاها فقط پس از تخلیه کامل و حضور کامیون خروجی در محل بارگیری شروع می‌شود. همچنین، بارگیری یک کامیون خروجی، زمانی آغاز می‌شود که کالاهای مربوط به آن در فضای انبار موجود باشند. زمان سفر براساس مسافت بین درهای بارانداز تعیین می‌شود و فرض شده است در ابتدای افق برنامه‌ریزی، تمام کامیون‌ها در دسترس قرار دارند. وقفه، مجاز نیست و در فاصله بین تخلیه یا بارگیری دو کامیون متوالی، یک زمان آماده‌سازی نیز لحاظ شده است. لی و همکاران [۱۱] برای حل مسئله مطرح شده در تحقیق قبل، یک الگوریتم جست‌وجوی وابسته به رتبه‌بندی^۹ ارائه داده‌اند که شامل دو بخش است؛ در بخش اول، یک توالی شدنی از کارها با توجه به تعداد درهای بارانداز ایجاد می‌شود و در بخش دوم، کارها براساس مسافت بین درهای تخلیه و بارگیری، به درهای بارانداز تخصیص می‌یابند. لیائو و همکاران [۱۲] دو نوع الگوریتم تکامل دیفرانسیلی ترکیبی^{۱۰} را به منظور تعیین توالی کامیون‌های ورودی و خروجی با هدف کمینه کردن دامنه عملیات ارائه داده‌اند. الگوریتم‌های ارائه شده در این تحقیق عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم پیشنهادی عربانی و همکاران [۱۳] دارند که برای زمان‌بندی کامیون‌ها در بارانداز متقاطع با یک در تخلیه و یک در بارگیری به کار گرفته شده است. همچنین، سیاست عملیاتی ارائه شده به منظور کمینه کردن دامنه عملیات نسبت به سیاست ارائه شده از سوی یو و اگبلو [۱۴] کارایی بهتری دارد. کئو [۱۵] به منظور بهبود کارایی بارانداز متقاطع، مسئله زمان‌بندی کامیون‌های ورودی و خروجی را با هدف کمینه‌سازی دامنه عملیات بررسی کرده است. در این تحقیق، از الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر (VNS) به منظور تعیین توالی ورود کامیون‌های ورودی و خروجی استفاده شده است. براساس بهترین توالی به دست آمده از طریق VNS و با در نظر گرفتن سیاست نوبتی، کامیون‌ها به درهای بارانداز تخصیص داده می‌شوند.

بیان مسئله و ارائه مدل ریاضی

در یک سیستم بارانداز متقاطع، تعداد مشخصی در ورودی و خروجی با موقعیت مکانی مشخص وجود دارد. در ابتدای هر دوره برنامه‌ریزی، تعدادی کامیون ورودی و خروجی که هر کدام به ترتیب حامل و نیازمند ترکیب مشخصی از محصولات متنوع هستند در بارانداز مستقرند. در اینجا، هدف ۱. به دست آوردن بهترین نحوه تخصیص کامیون‌های ورودی و خروجی به ترتیب به درهای تخلیه و بارگیری بارانداز، ۲. تعیین توالی بهینه مراجعه و استقرار کامیون‌های ورودی و خروجی در درهای بارانداز و ۳. تعیین حجم محصول ارسالی از کامیون‌های ورودی به کامیون‌های خروجی است. مسئله در قالب یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با تابع هدف کمینه‌سازی دامنه عملیات ارائه می‌شود. در مدل‌سازی مسئله مذکور، مفروضات زیر در نظر گرفته می‌شود:

- کامیون‌های ورودی و خروجی در ابتدای دوره برنامه‌ریزی در دسترس‌اند.
- هر در بارانداز فقط به عملیات تخلیه یا بارگیری محصولات تخصیص می‌یابد.
- زمان لازم به منظور تخلیه یا بارگیری هر واحد کالا فارغ از نوع آن، ثابت و مشخص است.
- برای هر کامیون ورودی یا خروجی، امکان تخلیه یا بارگیری چندین واحد کالا به صورت هم‌زمان وجود ندارد و در هر لحظه فقط می‌توان یک واحد کالا را تخلیه یا بارگیری کرد.
- ظرفیت تجهیزات منتقل‌کننده محصولات درون بارانداز نامحدود است.
- فاصله هر یک از درهای تخلیه از هر یک از درهای بارگیری مشخص است.
- در عملیات تخلیه و بارگیری، وقفه مجاز نیست.
- ذخیره‌سازی موقت، مجاز است و ظرفیت ناحیه ذخیره‌سازی موقت، بی‌نهایت است.
- زمان لازم به منظور هر بار آماده‌سازی بارانداز ثابت است.
- محصولات قابلیت تعویض‌پذیری دارند؛ یعنی می‌توان کالای مورد نیاز هر کامیون خروجی را از هر یک از کامیون‌های ورودی تأمین کرد.

ورودی و خروجی در یک بارانداز متقاطع با چند در تخلیه و بارگیری، بررسی و مدل‌سازی می‌شود. در مدل ریاضی ارائه‌شده، تخصیص کامیون‌های ورودی و خروجی به درهای تخلیه و بارگیری و توالی ورود کامیون‌ها به بارانداز به گونه‌ای تعیین می‌شود که دامنه عملیات، کمینه شود. علاوه بر زمان‌بندی کامیون‌ها، با توجه به ویژگی تعویض‌پذیری محصولات، مسئله تخصیص بهینه محصولات نیز در مدل ریاضی گنجانده می‌شود. در تمام تحقیقات صورت گرفته در زمینه زمان‌بندی هم‌زمان کامیون‌های ورودی و خروجی، فرض می‌شود تا زمانی که تمام بارهای تخصیص یافته به یک کامیون خروجی روی سکوی بارگیری آماده نباشند، از ورود و استقرار کامیون مذکور روی سکو، جلوگیری می‌شود؛ به عبارت دیگر، یک کامیون خروجی زمانی می‌تواند به در بارگیری مراجعه کند که امکان بارگیری تمام کالاهای تخصیص یافته فراهم باشد. در مدل ارائه‌شده، این محدودیت حذف می‌شود و کامیون‌ها با رعایت توالی بهینه برای هر در، به سکوی تخصیص یافته مراجعه می‌کنند. برای بارگیری محصولات کامیون‌های ورودی در هر یک از کامیون‌های خروجی، یک توالی در نظر گرفته می‌شود که براساس آن، کالاهایی که زودتر به سکوی بارگیری متناظر رسیده‌اند، زودتر بارگیری می‌شوند؛ بنابراین، برای بارگیری کالاهای رسیده از یک کامیون ورودی، نیازی به منتظرماندن برای رسیدن بارهای تخصیص یافته از سایر کامیون‌ها نیست. حذف محدودیت یادشده و استفاده از این راهبرد برای بارگیری کامیون‌های خروجی، موجب بهبود دامنه عملیات می‌شود. در نظر گرفتن زمان‌های جابه‌جایی بین درهای تخلیه و بارگیری متفاوت، ویژگی دیگر مسئله مورد بررسی است که بر نحوه تخصیص کامیون‌ها به درها تأثیر می‌گذارد.

در ادامه، شکل کلی مسئله تشریح و بر پایه مفروضات ارائه‌شده، یک مدل ریاضی ارائه می‌شود. پس از طرح یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل مسئله در ابعاد بزرگ، صحت مدل ریاضی و کارایی الگوریتم حل از طریق تعدادی مثال عددی ارزیابی می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای مطالعات آتی ارائه می‌شود.

کامیون ورودی i روی کامیون خروجی j
 C_{max} : دامنه عملیات

v_{ij} : اگر حداقل یک واحد محصول از کامیون ورودی i به کامیون خروجی j منتقل شود برابر ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

p_{ij} : اگر در توالی مربوط به در تخلیه l کامیون i قبل از کامیون i' قرار گیرد (برای $i \neq i'$) یا کامیون i اولین کامیون ورودی در توالی محل در تخلیه l باشد (برای $i = i'$) برابر ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

q_{ijm} : اگر در توالی مربوط به در بارگیری m کامیون j قبل از کامیون i' قرار گیرد (برای $j \neq j'$) یا کامیون j اولین کامیون خروجی در توالی محل در تخلیه m باشد (برای $j = j'$) برابر ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

Y_{ij} : اگر کالاهای تخصیص یافته از کامیون ورودی i به کامیون خروجی j قبل از ورود کامیون خروجی j به در بارگیری، آماده بارگیری باشند، برابر ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

G_{ij} : اگر در توالی مربوط به بارگیری محصولات در کامیون خروجی j ، کالاهای تخصیص یافته از کامیون i قبل از کالاهای تخصیص یافته از کامیون i' قرار گیرند (برای $i \neq i'$) یا کالاهای تخصیص یافته از کامیون i در ابتدای توالی بارگیری قرار داشته باشند (برای $i = i'$) برابر ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

H_{ij} : اگر محصولات کامیون i قبل از اتمام بارگیری محصولات کامیون i' روی کامیون j ، به سکوی بارگیری این کامیون وارد شده باشند برابر ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

مدل ریاضی مسئله به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\text{Min } C_{max} \quad (1)$$

Subject to:

$$\sum_j X_{ijk} = r_{ik} ; \forall i, k \quad (2)$$

$$\sum_i X_{ijk} = S_{jk} ; \forall j, k \quad (3)$$

$$\sum_k X_{ijk} \leq N v_{ij} ; \forall i, j \quad (4)$$

• در بارگیری کامیون‌های خروجی، کالاهایی که زودتر وارد شده‌اند، زودتر نیز بارگیری می‌شوند.
 نمادگذاری به کاررفته در مدل ریاضی به شرح زیر است:

مجموعه اندیس‌ها

I : مجموعه کامیون‌های ورودی (i و i' اندیس کامیون‌های ورودی)

J : مجموعه کامیون‌های خروجی (j و j' اندیس کامیون‌های خروجی)

L : مجموعه درهای تخلیه (l اندیس درهای تخلیه)

M : مجموعه درهای بارگیری (m اندیس درهای بارگیری)

K : مجموعه انواع محصولات (k اندیس انواع محصولات)

محصولات

پارامترها

T_{lm} : فاصله زمانی بین در تخلیه l و در بارگیری m

r_{ik} : تعداد واحد محصول نوع k در کامیون ورودی i

s_{jk} : تعداد واحد محصول مورد نیاز نوع k برای کامیون خروجی j

UD : زمان لازم به منظور تخلیه یا بارگیری یک واحد محصول

محصول

T_c : زمان آماده‌سازی بارانداز

N : یک عدد مثبت بزرگ

متغیرهای تصمیم

ID_{ij} : اگر کامیون ورودی i به در تخلیه l تخصیص یابد برابر ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

OD_{jm} : اگر کامیون خروجی j به در بارگیری m تخصیص یابد برابر ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

X_{ijk} : تعداد محصول نوع k که از کامیون ورودی i به کامیون خروجی j انتقال می‌یابد.

EI_i : زمان ورود کامیون ورودی i به در تخلیه

DI_i : زمان خروج کامیون ورودی i از در تخلیه

EJ_j : زمان ورود کامیون خروجی j به در بارگیری

DJ_j : زمان خروج کامیون خروجی j از در بارگیری

LT_{ij} : زمانی که کالاهای تخصیص یافته از کامیون ورودی i به کامیون خروجی j بارگیری می‌شوند.

DOJ_{ij} : زمان اتمام بارگیری کالاهای تخصیص یافته از

$$DOJ_{ij} - \left(DOJ_{ij} + UD \sum_k x_{ijk} \right) \geq -N(Y_{ij} + G_{ij} + 1 - H_{ij}) ; \forall i, i', j \quad (23)$$

$$DOJ_{ij} - \left(LT_{ij} + UD \sum_k x_{ijk} \right) \geq -N(Y_{ij} + G_{ij} + H_{ij}) ; \forall i, j \quad (24)$$

$$DJ_j \geq DOJ_{ij} ; \forall i, j \quad (25)$$

$$C_{max} \geq DJ_j ; \forall j \quad (26)$$

$$x_{ijk} \geq 0 \text{ \& Integer } ; \forall i, j, k \quad (27)$$

$$EI_i, DI_i, EJ_j, DJ_j, DOJ_{ij}, LT_{ij} \geq 0 ; \forall i, j \quad (28)$$

$$ID_{il}, OD_{jm}, v_{ij}, G_{ij}, Y_{ij}, H_{ij}, P_{il}, q_{ijm} \in \{0, 1\} ; \forall i, i', j, j', l, m \quad (29)$$

رابطه ۱ به عنوان تابع هدف، دامنه عملیات را کمینه می‌سازد. محدودیت ۲ تضمین می‌کند برای هر نوع محصول، حجم کالای انتقالی از هر کامیون ورودی به کامیون‌های خروجی با حجم محصول موجود در آن برابر است. محدودیت ۳ ملزم می‌کند تقاضای هر کامیون تصمیم v_{ij} را تعریف می‌کند. محدودیت‌های ۵ و ۶ به ترتیب تضمین می‌کنند هر کامیون ورودی و خروجی به یکی از درهای تخلیه و بارگیری تخصیص داده شوند. محدودیت‌های ۷ تا ۹ و محدودیت‌های ۱۰ تا ۱۲ به ترتیب تضمین می‌کنند توالی کامیون‌های ورودی و خروجی، یک جایگشت کامل باشند. محدودیت ۱۳ زمان خروج هر کامیون ورودی از بارانداز را تعیین می‌کند. محدودیت ۱۴ بیان می‌کند زمان ورود هر کامیون ورودی به در تخلیه، بزرگ‌تر یا مساوی مجموع زمان خروج کامیون ورودی مقدم بر آن و زمان لازم به منظور آماده‌سازی است. محدودیت ۱۵ کوچک‌ترین زمان ممکن برای بارگیری کالاهای انتقالی از یک کامیون ورودی به یک کامیون خروجی را تعیین می‌کند. محدودیت ۱۶ بیان می‌کند زمان ورود یک کامیون خروجی به در بارگیری، بزرگ‌تر یا مساوی مجموع زمان پایان بارگیری کامیون خروجی مقدم بر آن و زمان مورد نیاز به منظور آماده‌سازی است. محدودیت‌های ۱۷ تا ۱۹ توالی بارگیری بارهای تخصیصی به هر کامیون خروجی را

$$\sum_l ID_{il} = 1 ; \forall i \quad (5)$$

$$\sum_m OD_{jm} = 1 ; \forall j \quad (6)$$

$$\sum_i P_{il} = 1 ; \forall l \quad (7)$$

$$\sum_{i'} P_{i'l} = ID_{il} ; \forall l, i \quad (8)$$

$$\sum_{i', i' \neq i} P_{i'l} \leq ID_{il} ; \forall l, i \quad (9)$$

$$\sum_j q_{ijm} = 1 ; \forall m \quad (10)$$

$$\sum_{j'} q_{j'm} = OD_{jm} ; \forall m, j \quad (11)$$

$$\sum_{j', j' \neq j} q_{j'm} \leq OD_{jm} ; \forall m, j \quad (12)$$

$$DI_i = EI_i + UD \sum_k r_{ik} ; \forall i \quad (13)$$

$$DI_i + T_c \leq EI_{i'} + N \left(1 - \sum_l P_{i'l} \right) ; \forall i, i', i \neq i' \quad (14)$$

$$LT_{ij} = DI_i v_{ij} + \left(\sum_l \sum_m T_{lm} ID_{il} OD_{jm} v_{ij} \right) ; \forall i, j \quad (15)$$

$$DJ_j + T_c \leq EJ_{j'} + N \left(1 - \sum_m q_{ij'm} \right) ; \forall j, j', j \neq j' \quad (16)$$

$$\sum_i G_{ij} = 1 ; \forall j \quad (17)$$

$$\sum_{i'} G_{i'j} = v_{ij} ; \forall i, j \quad (18)$$

$$\sum_{i', i' \neq i} G_{i'j} \leq v_{ij} ; \forall i, j \quad (19)$$

$$DOJ_{ij} - \left(EJ_j + UD \sum_k x_{ijk} \right) \geq -N(2 - Y_{ij} - G_{ij}) ; \forall i, j \quad (20)$$

$$DOJ_{ij} - \left(DOJ_{ij} + UD \sum_k x_{ijk} \right) \geq -N(2 - Y_{ij} - G_{ij} - G_{i'j}) ; \forall i, i', j \quad (21)$$

$$DOJ_{ij} - \left(LT_{ij} + UD \sum_k x_{ijk} \right) \geq -N(2 - Y_{ij} - G_{ij}) ; \forall i, j \quad (22)$$

راه‌حل فعلی تولید می‌شود. در صورتی که راه‌حل همسایه، راه‌حل بهتری باشد، جایگزین راه‌حل فعلی می‌شود و در غیر این صورت، با احتمال به‌دست‌آمده از تابع بولتزمن $(e^{-\frac{\Delta}{KT}})$ ، این جایگزینی صورت می‌گیرد. در تابع بولتزمن، Δ میزان اختلاف بین مقدار تابع هدف راه‌حل فعلی و همسایه، K ضریب ثابت بولتزمن و عددی در بازه $(0,1)$ و T دمای فعلی سیستم است. الگوریتم دو حلقه داخلی و خارجی دارد. در حلقه داخلی، فرایند جست‌وجوی همسایگی تا تولید تعداد مشخصی راه‌حل همسایه یا راه‌حل‌های همسایه بهبوددهنده تکرار می‌شود. پس از اتمام حلقه داخلی، دمای سیستم در حلقه خارجی کاهش می‌یابد. فرایند کاهش دما تا زمانی ادامه می‌یابد که دمای الگوریتم به دمای انجماد برسد. با کاهش دما، احتمال پذیرش راه‌حل‌های غیربهبوددهنده کاهش می‌یابد و همگرایی به سمت راه‌حلی با تابع هدف بهتر صورت می‌گیرد. تعیین یا طراحی شیوه نمایش راه‌حل و طراحی رویه تولید همسایه، دو عنصر کلیدی در طراحی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید هستند. این دو عامل بر سرعت همگرایی الگوریتم و کیفیت راه‌حل نهایی به‌دست‌آمده به‌شدت تأثیر می‌گذارند.

در نمایش راه‌حل، با تصویرکردن خصوصیات راه‌حل در رشته‌ای از نمادها، یک ارتباط منطقی بین فضای مسئله و فضای جست‌وجو ایجاد می‌شود. مسئله مورد بررسی از سه زیرمسئله تشکیل شده است؛ بنابراین، نحوه نمایش شامل سه نوع ماتریس می‌شود. برای مسئله تخصیص و توالی کامیون‌های ورودی به درهای تخلیه از یک ماتریس دوسطری استفاده می‌شود. در این ماتریس، سطر نخست نحوه تخصیص کامیون‌ها به درهای تخلیه را نشان می‌دهد و یک بردار به طول تعداد کامیون‌ها و مقادیر بازه $[1, \dots, L]$ است. سطر دوم توالی کامیون‌ها را نشان می‌دهد و یک جایگشت کامل از اعداد ۱ تا I است. شکل ۱ نمونه‌ای از ماتریس نخست را با شش کامیون ورودی و سه در تخلیه نشان می‌دهد. براساس شکل ۱، کامیون‌های ورودی ۱، ۵ و ۶ به در ۱ تخصیص یافته‌اند و در توالی تخلیه برای این در، کامیون‌های ۶، ۵ و ۱ به ترتیب در موقعیت‌های اول، دوم و سوم از توالی قرار گرفته‌اند.

به‌صورت یک جایگشت کامل تضمین می‌کنند. محدودیت‌های ۲۰ تا ۲۴ زمان اتمام بارگیری هر نوع کالای تخصیص‌یافته به هر یک از کامیون‌های خروجی را با رعایت وضعیت متغیرهای Y_{ij} ، G_{ij} و H_{ij} محاسبه می‌کنند. محدودیت ۲۵ زمان اتمام بارگیری کامل هر یک از کامیون‌های خروجی را محاسبه می‌کند. محدودیت ۲۶ دامنه عملیات را محاسبه می‌کند. محدودیت‌های ۲۷ تا ۲۹ دامنه متغیرهای تصمیم مدل را مشخص می‌کنند.

در مدل ریاضی ارائه‌شده، محدودیت ۱۵ به‌دلیل وجود حاصل‌ضرب چند متغیر، غیرخطی است. همچنین، تعاریف ارائه‌شده برای متغیرهای تصمیم Y_{ij} و H_{ij} شکل صریحی ندارد؛ یعنی متغیرهای یادشده به سایر متغیرهای تصمیم مدل وابسته‌اند. به‌منظور خطی‌سازی محدودیت ۱۵، از روش متعارف خطی‌سازی ضرب یک متغیر پیوسته در یک متغیر دودویی استفاده می‌شود. همچنین، به‌منظور ارائه شکل ریاضی تعاریف مربوط به Y_{ij} و H_{ij} از دو دسته متغیر دودویی کمکی جدید با اندیس‌های i و j استفاده می‌شود. پس از افزودن محدودیت‌های خطی‌سازی، مدل به یک مدل خطی عدد صحیح مختلط تبدیل می‌شود و می‌توان آن را با حل‌کننده‌های خطی نرم‌افزارهای بهینه‌ساز حل کرد. تعداد محدودیت‌های خطی‌سازی زیاد است؛ بنابراین، در پژوهش حاضر ذکر نمی‌شود.

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA) روشی فرا ابتکاری بر مبنای جست‌وجوی محلی است که از فرایند تبرید واقعی نشئت گرفته است. این الگوریتم می‌تواند با پذیرش راه‌حل‌های بدتر نسبت به بهترین راه‌حلی که تاکنون به‌دست آمده است، از گیرافتادن در بهینگی محلی جلوگیری کند. کیفیت راه‌حل‌های حاصل از SA موجب شده است از آن در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیباتی پیچیده در حوزه‌های مختلف استفاده شود. متروپلیس [۲۳] برای نخستین بار SA را در سال ۱۹۴۳ ارائه داد و کیرک پاتریک و همکاران [۲۴] آن را گسترش دادند. SA حرکت خود را از یک راه‌حل تصادفی به‌عنوان نقطه شروع آغاز می‌کند و دمای سیستم را برابر دمای اولیه قرار می‌دهد ($T = T_0$). در هر تکرار، یک راه‌حل در همسایگی

۱	۲	۲	۳	۱	۱
۵	۲	۶	۳	۴	۱

شکل ۱. مثالی از بخش نخست نمایش راه حل

محصولات، زمان‌های ورود و خروج کامیون‌های ورودی به دست می‌آیند. با مشخص شدن زمان‌های ورود کامیون‌های ورودی و حجم بار ارسالی و با در نظر گرفتن زمان لازم برای تخلیه و انتقال محصولات، زمان شروع عملیات بارگیری برای هر کامیون خروجی محاسبه می‌شود. با توجه به ماتریس تخصیص و توالی کامیون‌های خروجی، زمان‌های اتمام بارگیری هر کامیون خروجی قابل محاسبه است. بزرگ‌ترین زمان خروج، مقدار تابع هدف (دامنه عملیات) را نشان می‌دهد.

به منظور ایجاد بردار همسایه برای بردارهای توالی که ماهیتی جایگشتی دارند از سه اپراتور معاوضه، معکوس‌سازی و درج استفاده می‌شود. در هر راه حل، یکی از این اپراتورها با استفاده از چرخ رولت انتخاب می‌شود. برای بردارهای مربوط به تخصیص کامیون‌ها به درها، تولید همسایه به این شیوه است که یکی از درایه‌های بردار تخصیص به صورت تصادفی انتخاب می‌شود، سپس با عدد تصادفی دیگری جایگزین می‌شود. برای تغییر ماتریس‌های مربوط به تخصیص محصولات نیز از اپراتور معاوضه در سطر دوم ماتریس استفاده می‌شود.

دمای اولیه، نرخ کاهش دما و معیار توقف، پارامترهای کلیدی در الگوریتم SA به شمار می‌روند. مقدار دمای اولیه باید به اندازه‌ای باشد که حداقل ۹۰ درصد از راه‌حل‌های غیربهبوددهنده در تکرار اول پذیرفته شوند. اگر دما به آهستگی کاهش یابد، ممکن است راه‌حل‌های بهتری به دست آید، اما در مقابل زمان اجرای الگوریتم، طولانی‌تر می‌شود. در این پژوهش، به منظور بهنگام کردن دما از تابع کاهش دمای هندسی به صورت $T = \alpha T$ استفاده می‌شود که در آن α نرخ کاهش دماست. همچنین، از معیار دمای انجماد به عنوان دستور توقف الگوریتم استفاده شده است.

نتایج محاسباتی

در این قسمت، با ارائه تعدادی مثال عددی، صحت مدل ریاضی ارائه شده بررسی و عملکرد الگوریتم پیشنهادی ارزیابی می‌شود. به دلیل نبود داده‌های واقعی در ادبیات موضوع، چند مسئله نمونه با ابعاد کوچک (مسائل گروه اول) و بزرگ (مسائل گروه دوم) به صورت تصادفی تولید می‌شود. به منظور تشریح نحوه استفاده از مدل پیشنهادی،

ماتریس دوم، تخصیص و توالی کامیون‌های خروجی به درهای بارگیری را نشان می‌دهد و مشابه ماتریس تخصیص و توالی کامیون‌های ورودی است با این تفاوت که تعداد ستون‌های این ماتریس به تعداد کامیون‌های خروجی است، اعداد بردار تخصیص از بازه $[1, \dots, M]$ انتخاب می‌شوند و اعداد بردار توالی، یک جایگشت کامل از اعداد ۱ تا J است. ماتریس‌های نوع سوم که به تعداد انواع محصولات هستند، نحوه تخصیص هریک از محصولات کامیون‌های ورودی به کامیون‌های خروجی را نشان می‌دهند و هریک شامل دو سطر هستند. به منظور تشریح مناسب این بخش، یک مثال ارائه می‌شود. فرض کنید تعداد کل محصول نوع ۱ برابر با ۱۱ واحد باشد. برای این محصول، ماتریسی با دو سطر و ۱۱ ستون تشکیل می‌شود. در سطر اول، شماره هریک از کامیون‌های ورودی به صورت صعودی و به تعداد واحدهای محصول نوع ۱ موجود در هر کامیون تکرار می‌شود. سطر دوم نیز به شیوه‌ای مشابه با شماره‌های کامیون‌های خروجی، تکمیل می‌شود. تعداد دفعات تکرار هر شماره کامیون خروجی با تعداد واحد محصول نوع ۱ مورد نیاز آن برابر است. برخلاف سطر اول، چیدمان شماره‌های موجود در سطر دوم، تصادفی است. شکل ۲، نمونه‌ای از نحوه نمایش راه حل را برای محصول ۱ نشان می‌دهد.

۱	۱	۲	۲	۲	۳	۴	۴	۵	۶	۶
۲	۳	۲	۲	۱	۲	۳	۲	۱	۱	۱

شکل ۲. مثالی از بخش سوم نمایش راه حل

تمام راه‌حل‌های تولید شده به صورت تصادفی، شدنی هستند؛ بنابراین، به حذف، اصلاح یا جریمه کردن راه‌حل‌های نشدنی نیازی نیست. راه حل اولیه الگوریتم SA به صورت تصادفی تولید می‌شود.

برای به دست آوردن مقدار تابع هدف به ازای هر راه حل به این ترتیب عمل می‌شود: براساس ماتریس تخصیص و توالی کامیون‌های ورودی و ماتریس‌های تخصیص

مدل ریاضی ارائه‌شده از طریق نرم‌افزار بهینه‌ساز GAMS حل‌کننده CPLEX حل شده است. در راه‌حل بهینه به دست آمده، کامیون‌های ورودی ۱، ۲ و ۳ به ترتیب به درهای تخلیه ۲، ۲ و ۱ و کامیون‌های خروجی ۱، ۲ و ۳ به ترتیب به درهای بارگیری ۱، ۲ و ۱ تخصیص یافته‌اند. زمان‌های ورود و خروج کامیون‌های ورودی و خروجی در جدول ۲ مشاهده می‌شود. با توجه به این جدول، مقدار بهینه تابع هدف برابر با ۱۹۰ واحد زمان است. حجم هریک از انواع محصولات که از هر کامیون ورودی در هریک از کامیون‌های خروجی بارگیری می‌شود در جدول ۳ نشان داده می‌شود.

در این بخش مثالی در اندازه کوچک ارائه می‌شود. یک بارانداز متقاطع را با دو در تخلیه و دو در بارگیری، سه کامیون ورودی و سه کامیون خروجی در نظر بگیرید. فاصله در ورودی ۱ از درهای خروجی ۱ و ۲ به ترتیب ۵ و ۹ واحد زمانی و فاصله در ورودی ۲ از درهای خروجی ۱ و ۲ به ترتیب ۹ و ۵ واحد زمانی است. تعداد محصولات موجود در کامیون‌های ورودی و مورد نیاز کامیون‌های خروجی در جدول ۱ نشان داده می‌شود. همچنین، زمان لازم به منظور تخلیه یا بارگیری هر واحد کالا، ۵ واحد زمانی و زمان مورد نیاز به منظور آماده‌سازی بارانداز ۲۰ واحد زمانی فرض شده است.

جدول ۱. عرضه و تقاضای کامیون‌ها در مثال عددی نخست

نوع کامیون	شماره کامیون	نوع محصول		
		۱	۲	۳
ورودی	۱	۵	۴	۳
	۲	۳	۵	۴
	۳	۴	۳	۵
خروجی	۱	۶	۳	۲
	۲	۳	۵	۷
	۳	۳	۴	۳

جدول ۲. زمان‌های بهینه ورود و خروج در مثال نخست

زمان ورود	زمان خروج	نوع کامیون
۸/۶۰	۶۸/۶	۱
۸۸/۶۰	۱۴۸/۶	۲ کامیون‌های ورودی
۰/۰	۶۰/۰	۳
۱۳۵/۰	۱۹۰/۰	۱ کامیون‌های خروجی
۰/۰	۱۹۰/۰	۲
۰/۰	۱۱۵/۰	۳

جدول ۳. تخصیص بهینه محصولات در مثال نخست

محصول ۳	محصول ۲	محصول ۱	ورودی ↓	
			خروجی ←	ورودی ↓
۳	۲	۱	۳	۱
۳	۲	۲	۳	۲
۵	۱	۲	۳	۳

و برای مسائل گروه دوم (با اندازه بزرگ) نیز به ترتیب ۱۰۰۰، ۲۵۰، ۰/۹۵ و ۰/۱ هستند.

برای حل هریک از مسائل عددی، الگوریتم SA پیشنهادی، چهار بار اجرا شده است. جدول‌های ۴ و ۵ به ترتیب نتایج حل را برای مسائل گروه اول و دوم نشان می‌دهند. در این جدول‌ها، مجموع زمان‌های چهار اجرا به عنوان زمان اجرای الگوریتم SA ثبت شده است. شایان ذکر است در این تحقیق، نرم‌افزار بهینه‌ساز و الگوریتم حل از طریق یک کامپیوتر با پردازشگر مرکزی سری core i7 با

به دلیل تنوع در اندازه مسائل آزمایشی تولیدشده، مقادیر پارامترهای ورودی الگوریتم (دمای اولیه، تعداد تکرارهای حلقه‌های داخلی، نرخ سرمایه‌گذاری و دمای انجماد) به صورت جداگانه برای دو دسته از مسائل (کوچک و بزرگ) تنظیم شده‌اند. برای تنظیم پارامترها در هریک از این دو گروه، از روش طراحی آزمایش‌های فاکتوریل کامل استفاده شده است. مقادیر انتخاب‌شده برای دمای اولیه، تعداد حلقه‌های داخلی، نرخ سرمایه‌گذاری و دمای انجماد برای مسائل گروه اول (با اندازه کوچک) به ترتیب ۰/۹۳، ۵۰، ۸۰ و ۰/۱ است.

علاوه بر زمان بندی کامیون‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین، به دلیل نبود محدودیت زمانی به منظور اسکان کامیون‌های خروجی در سکوی بارگیری، توالی بارگیری کالاهای تخصیصی به هر کامیون خروجی نیز مشخص می‌شود. توالی بارگیری محصولات بر مبنای زمان حضور کالاهای تخصیص یافته روی سکوی بارگیری و براساس سیاست نوبتی در نظر گرفته شده است. استفاده از این نوع سیاست تخصیص و بارگیری محصولات موجب نزدیک تر شدن مسئله مورد بررسی به مسائل دنیای واقعی می‌شود و همچنین، بر تابع هدف مسئله نیز تأثیر مطلوبی می‌گذارد. با توجه به اینکه سیستم بارانداز متقاطع در نظر گرفته شده چندین در تخلیه و بارگیری دارد، زمان لازم به منظور پیمودن مسافت بین درهای تخلیه و بارگیری نیز ممکن است بر نحوه تخصیص کامیون‌ها به درها و نیز چگونگی تخصیص محصولات تأثیر بگذارد. مسئله مطرح شده در قالب یک مدل ریاضی عدد صحیح آمیخته با تابع هدف کمینه کردن دامنه عملیات ارائه شده است. به دلیل پیچیدگی مسئله مورد مطالعه، یک الگوریتم فرا ابتکاری شبیه‌سازی تبرید به منظور حل مسائل با اندازه بزرگ مطرح شده است. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، چندین مثال نمونه در اندازه‌های متفاوت به صورت تصادفی تولید و حل شدند. نتایج حل مسائل کوچک از طریق الگوریتم پیشنهادی نشان داد این الگوریتم در حل مسائل کوچک کارایی لازم را دارد، زیرا در زمانی بسیار کمتر، نتایجی یکسان با راه‌حل‌های بهینه نرم‌افزار بهینه‌ساز GAMS به دست آورده است. در مسائل بزرگ، نرم‌افزار بهینه‌ساز توانایی به دست آوردن راه‌حل بهینه را در محدوده زمانی مورد نظر نداشته است، اما الگوریتم توانسته است در مدت زمان بسیار اندک، نتایجی بهتر و با پراکنش بسیار کم به دست آورد که بیانگر کارایی بالای الگوریتم است.

در تحقیق حاضر فرض شده است تمام کامیون‌های ورودی و خروجی در ابتدای دوره برنامه‌ریزی در دسترس قرار دارند. معمولاً در کاربردهای دنیای واقعی، چنین حالتی وجود ندارد و کامیون‌ها در زمان‌های متفاوتی وارد بارانداز می‌شوند و در بیشتر مواقع، اطلاعات ناقصی در مورد زمان ورود آن‌ها در دسترس است. در نظر گرفتن زمان‌های ورود

سرعت ۲/۵ گیگاهرتز و ۱۶ GB RAM اجرا شده‌اند. همچنین، الگوریتم پیشنهادی در محیط برنامه‌نویسی MATLAB کدنویسی شده است.

نتایج در جدول ۴ نشان می‌دهد الگوریتم طراحی شده توانسته است راه‌حل بهینه به دست آمده از طریق نرم‌افزار بهینه‌سازی را برای تمام مسائل با اندازه کوچک و در تمام اجراها به دست آورد. همچنین، با توجه به زمان‌های اجرای الگوریتم و نرم‌افزار، مشاهده می‌شود زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی برخلاف نرم‌افزار بهینه‌ساز، حساسیت زیادی نسبت به اندازه مسائل نداشته است.

در جدول ۵، نتایج اجرای الگوریتم به همراه بهترین جواب به دست آمده از طریق نرم‌افزار بهینه‌ساز GAMS با در نظر گرفتن محدودیت زمانی هشت ساعت ارائه می‌شود. در ستون بهترین راه‌حل نرم‌افزار GAMS علامت ستاره به این معنی است که نرم‌افزار نتوانسته است در مدت اجرای هشت ساعت، وارد فضای شدنی مسئله شود. از آنجا که در این مسئله کیفیت راه‌حل به دست آمده در مقایسه با زمان حل اهمیت بیشتری دارد، در انجام دادن آزمایش‌های محاسباتی مربوط به ابعاد بزرگ مسئله، به الگوریتم اجازه داده می‌شود تا در زمان بیشتری به جست‌وجوی فضای حل بپردازد. نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد الگوریتم طراحی شده توانسته است در مسائلی که نرم‌افزار GAMS به راه‌حل‌های شدنی دست یافته است، همواره راه‌حلی بهتر از نرم‌افزار را در زمانی بسیار کمتر به دست آورد. همچنین، در سایر مسائل که نرم‌افزار توانایی ورود به فضای شدنی مسئله را نداشته است، پراکنش کم راه‌حل‌های به دست آمده از طریق الگوریتم، بیانگر کارایی مناسب آن است. در هیچ‌یک از مسائل دسته دوم، نرم‌افزار GAMS نتوانسته است به راه‌حل بهینه (تضمین شده) دست یابد.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در این تحقیق، مسئله تخصیص کامیون‌ها به درهای بارانداز و تعیین توالی کامیون‌های ورودی و خروجی در سیستم بارانداز متقاطع با چند در تخلیه و بارگیری بررسی شده است. در مدل ارائه شده، به دلیل ویژگی تعویض پذیری کالاها، تصمیم عملیاتی دیگری مبنی بر نحوه تخصیص محصولات کامیون‌های ورودی به کامیون‌های خروجی نیز

زمان طولانی وجود ندارد. امکان اعمال وقفه در عملیات تخلیه یا بارگیری کامیون‌ها در شرایطی که تعداد کامیون‌ها از تعداد درهای بارانداز بیشتر است، موجب پیچیده‌تر شدن مدل‌سازی مسئله مذکور می‌شود، اما می‌توان با بهره‌گیری از روش‌های ابتکاری، عملیات سیستم بارانداز متقاطع را بهبود بخشید. در نظر گرفتن اهدافی دیگر مانند کمینه کردن تعداد کالاهایی که به صورت موقتی ذخیره می‌شوند و مدل‌سازی مسئله به صورت یک مدل چندهدفه موجب بهبود کارایی مدل پیشنهادی و واقعی‌تر شدن آن می‌شود. توسعه روش‌های حل ابتکاری و فرا ابتکاری دیگر برای حل مسئله عنوان شده با هدف بهبود نتایج این تحقیق، یکی دیگر از زمینه‌های تحقیقات آتی تلقی می‌شود.

به صورت قطعی یا غیرقطعی ممکن است به واقعی‌تر شدن مدل پیشنهادی کمک کند. علاوه بر این، در مفروضات این تحقیق، ظرفیت تجهیزات انتقالی بارانداز، یکسان و تعداد آن‌ها بی‌نهایت فرض شده است. در کاربردهای واقعی، باید تصمیمات تخصیص و زمان‌بندی تجهیزات حمل‌ونقل نیز در مدل ریاضی در نظر گرفته شوند. همچنین، لحاظ کردن ظرفیت محدود ناحیه ذخیره‌سازی موقت سبب می‌شود فضای در دسترس به منظور استقرار کالاهای تخصیص یافته به کامیون‌های خروجی کاهش یابد که این امر موجب می‌شود زمان‌بندی صورت گرفته کارایی بیشتری داشته باشد، زیرا امکان نگهداری محصولات تخصیص یافته به یک کامیون خروجی روی سکوی بارگیری متناظر برای مدت

جدول ۴. نتایج مسائل گروه اول

زمان اجرا (S)	SA				GAMS				
	تابع هدف				زمان اجرا (S)	تابع هدف	K	M/L	J/I
	اجرای (۴)	اجرای (۳)	اجرای (۲)	اجرای (۱)					
۱۵	۱۳۵	۱۳۵	۱۳۵	۱۳۵	۰	۱۳۵	۳	۲/۲	۲/۲
۱۶	۱۸۹	۱۸۹	۱۸۹	۱۸۹	۲۹۱۹	۱۸۹	۳	۱/۳	۳/۳
۱۶	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰	۱۶۹۸	۱۹۰	۳	۲/۲	۳/۳
۱۶	۲۸۵	۲۸۵	۲۸۵	۲۸۵	۱۱۰۲	۲۸۵	۳	۲/۱	۳/۳
۲۴	۳۵۴	۳۵۴	۳۵۴	۳۵۴	۲۰۵۹۳	۳۵۴	۳	۲/۱	۴/۴

جدول ۵. نتایج مسائل گروه دوم

زمان اجرا (S)	GAMS		SA				K	M/L	J/I
	تابع هدف	زمان اجرا (S)	تابع هدف						
			اجرای (۴)	اجرای (۳)	اجرای (۲)	اجرای (۱)			
۵۴۰۰۰	۱۹۹	۸	۱۹۵	۱۹۵	۱۹۵	۱۹۵	۳	۳/۳	۴/۴
۲۸۸۰۰	۲۸۰	۲۵۹	۲۳۴	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۴	۳	۲/۲	۴/۴
۲۸۸۰۰	۴۳۷	۲۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳	۱/۲	۴/۴
۲۸۸۰۰	۲۸۰	۲۹۲	۲۸۵	۲۸۰	۲۸۰	۲۸۰	۳	۲/۲	۳/۵
۲۸۸۰۰	*	۸۰۵	۲۸۸	۲۸۰	۲۸۵	۲۸۰	۳	۳/۳	۴/۸
۴۸۶۰۰	۲۵۶	۴۶۰	۲۴۹	۲۴۵	۲۴۴	۲۴۴	۳	۳/۳	۵/۷
۲۸۸۰۰	*	۵۲۸	۳۲۹	۳۳۵	۳۳۰	۳۳۵	۴	۳/۳	۵/۷
۲۸۸۰۰	*	۶۰۸	۳۵۵	۳۵۷	۳۵۰	۳۵۵	۳	۳/۳	۵/۱۰
۲۸۸۰۰	*	۶۳۶	۳۰۵	۳۰۵	۳۰۵	۳۰۵	۳	۴/۵	۵/۱۰
۲۸۸۰۰	*	۶۳۲	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۳	۳/۶	۵/۱۰
۲۸۸۰۰	*	۷۲۴	۴۳۴	۴۳۹	۴۵۰	۴۵۵	۳	۳/۳	۵/۱۲
۲۸۸۰۰	*	۱۱۰۰	۲۷۹	۲۷۹	۲۸۰	۲۸۳	۳	۴/۵	۷/۱۲
۲۸۸۰۰	*	۱۴۰۰	۲۳۰	۲۲۵	۲۲۹	۲۲۵	۳	۶/۷	۱۰/۱۲
۲۸۸۰۰	*	۳۰۰۰	۲۰۰	۲۰۵	۱۹۸	۱۹۸	۳	۸/۱۰	۱۳/۱۷

مراجع

1. Apte, U. M. and Viswanathan S. (2000). "Effective cross docking for improving distribution efficiencies", *International Journal of Logistics: Research and Applications*, Vol. 3, No. 3, PP. 291– 302.
2. Yu, W. and Egbelu, J. P. (2013). "Development of dispatching strategy for inbound and outbound trucks in cross docking system", *Journal of the Korea Safety Management and Science*, Vol. 15, No. 2, PP. 167-184.
3. Konur, D. and Golias, M. M. (2013). "Analysis of different approaches to cross-dock truck scheduling with truck arrival time uncertainty", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 65, No. 4., PP. 663– 672.
4. Lim, A., Ma, H. and Miao, Z. (2006). "Truck dock assignment problem with time windows and capacity constraint in transshipment network through crossdocks", In: *Computational Science and Its Applications-ICCSA*, Springer Berlin Heidelberg, PP. 688- 697.
5. Lim, A., Ma, H. and Miao, Z. (2006). "Truck dock assignment problem with operational time constraint within crossdocks", In: *Advances in applied artificial intelligence*, Springer Berlin Heidelberg, PP. 262-271.
6. Miao, Z., Lim, A. and Ma, H. (2009). "Truck dock assignment problem with operational time constraint within crossdocks", *European Journal of Operational Research*, Vol. 192, No. 1, PP. 105- 115.
7. Boysen, N. (2010). "Truck scheduling at zero-inventory cross docking terminals", *Computers & Operations Research*, Vol. 37, No. 1, PP. 32- 41.
8. Lee, K., Kim, B. S. and Joo, C. M. (2012). "Genetic algorithms for door-assigning and sequencing of trucks at distribution centers for the improvement of operational performance", *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 17, PP. 12975- 12983.
9. Joo, C. M. and Kim, B. S. (2013). "Scheduling compound trucks in multi-door cross-docking terminals", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 64, No. 5- 8, PP. 977- 988.
10. Shakeri, M., Low, M. Y. H. and Li, Z. (2008). "A generic model for crossdock truck scheduling and truck-to-door assignment problems", In *Industrial Informatics, 6th IEEE International Conference on*. IEEE, PP. 857- 864.
11. Li, Z. P., Low, M. Y. H., Shakeri, M. and Lim, Y. G. (2009). "Crossdocking planning and scheduling: Problems and algorithms", *SIMTech Technical Reports*, Vol. 10, No. 3, PP. 159-167..
12. Liao, T. W., Egbelu, P. J. and Chang, P. C. (2012). "Two hybrid differential evolution algorithms for optimal inbound and outbound truck sequencing in cross docking operations", *Applied Soft Computing*, Vol. 12, No. 11, PP. 3683- 3697.
13. Arabani, A. B., Ghomi, S. F. and Zandieh, M. (2011). "Metaheuristics implementation for scheduling of trucks in a cross-docking system with temporary storage", *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No. 3, PP. 1964- 1979.
14. Yu, W. and Egbelu, P. J. (2008). "Scheduling of inbound and outbound trucks in cross docking systems with temporary storage", *European Journal of Operational Research*, Vol. 184, No. 1, PP. 377- 396.
15. Kuo, Y. (2013). "Optimizing truck sequencing and truck dock assignment in a cross docking system", *Expert Systems with Applications*, Vol. 40, No. 14, PP. 5532- 5541.
16. Mohtashami, A. (2015). "Scheduling trucks in cross docking systems with temporary storage and repetitive pattern for shipping trucks", *Applied Soft Computing Journal*, Vol. 36, PP. 468- 486.
17. Yu, W. (2002). *Operational strategies for cross docking systems*, Ph.D. thesis, Iowa State University.
18. Yu, W. (2015). "Truck scheduling for cross docking systems with multiple receiving and shipping docks", *International Journal of Shipping and Transport Logistic*, Vol. 7, No. 2, PP. 174– 196.
19. Assadi, M. T. and Bagheri, M. (2016). "Scheduling trucks in a multiple-door cross docking system with unequal ready times", *European Journal of Industrial Engineering*, Vol. 10, No. 1, PP. 103- 125.

20. Li, J., Ye, Y. and Fu, H. (2016). "Research on truck scheduling with preemption in cross-docking systems", *Proceedings of the 22nd International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* 2015, PP. 147- 156.
21. Assadi, M. T. and Bagheri, M. (2016). "Differential evolution and Population-based simulated annealing for truck scheduling problem in multiple door cross-docking systems", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 96, PP. 149- 161.
22. Arkat, J., Qods, P. and Ahmadizar, F. (2016). "Truck scheduling problem in a cross-docking system with release time constraint", *Journal of Industrial and Systems Engineering*, In Press.
23. Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H. and Teller, E. (1953). "Equation of state calculations by fast computing machines", *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 21, No. 6, PP. 1087-1092.
24. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P. (1983). "Optimization by simulated annealing", *Science*, Vol. 220, No. 4598, PP. 671- 680.

واژگان انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Cross-docking System
 2. Consolidation of Shipments
 3. Pre-emption
 4. Product Interchangeability
 5. Dock Door Assignment
 6. Truck scheduling
 7. Self-evolution Algorithm
 8. Makespan
 9. Dependency Ranking Search Heuristic
 10. Hybrid Differential Evolution Algorithm
-