

# معرفی و مدل سازی منطق بارگیری سفارشات با شکل چیدمان قابل تغییر درون خودروها و کاربرد آن در بهینه سازی سیستم لجستیک میلکران در گروه خودروسازی سایپا

معصوم نجفیان (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

علی حسین زاده کاشان\* (دانشیار)

دانشکده مهندسی صنایع و سیستم ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

علی اکبر اکبری (استاد مشاور)

داوود محمدی تبار (استاد مشاور)

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۴۰۰  
دوری ۱-۳۷، شماره ۲، ص. ۱۱-۹۱، پژوهشی

در لجستیک میلکران پالت های سفارشات مختلف را می توان با آرایش بندی متفاوت درون خودرو چید و بنابراین شکل چیدمان پالت ها درون خودروی حامل می تواند متغیر باشد. در نوشتار حاضر ایده ی بارگیری اقلام با شکل چیدمان قابل تغییر درون خودرو برای نخستین بار معرفی شده و یک مدل برنامه ریزی ریاضی برای کمینه سازی هزینه ها در سیستم لجستیک میلکران ارائه می شود. ملاحظات نظیر اعمال هزینه ی برگشت پالت های خالی، پنجره های زمانی و ناوگان نامتجانس نیز در نظر گرفته می شود. یک الگوریتم استراتژی تکاملی گروه بندی برای حل مسئله معرفی می شود که از روش های کارا برای تولید جواب و تضمین شدنی بودن بارگیری و مسیریابی خودروها استفاده می کند. کارایی مدل و الگوریتم معرفی شده و اثربخشی لجستیک میلکران، با استفاده از داده های جمع آوری شده از گروه خودروسازی سایپا مورد سنجش قرار می گیرد. استفاده ی توانمند از لجستیک میلکران و منطق بارگیری با شکل چیدمان متغیر می تواند منجر به کاهش ۳۲ درصدی هزینه ها نسبت به استراتژی ارسال مستقیم شود.

masoum.najafian@azad.ac.ir  
a.kashan@modares.ac.ir  
a\_akbari@azad.ac.ir  
d\_mohammaditabar@azad.ac.ir

واژگان کلیدی: لجستیک میلکران، استراتژی ارسال مستقیم، بارگیری و بسته بندی، الگوریتم استراتژی تکاملی گروه بندی.

## ۱. مقدمه

این نوع سیستم توزیع، سفارشات از تأمین کنندگان به تولیدکنندگان یا مشتریان، به طور مستقیم ارسال می شوند. هنگامی که کل فضای بارگیری خودروی حامل تنها به یک محموله تخصیص می یابد، از این نوع ارسال به عنوان ارسال با بار کامل (FTL)<sup>۱</sup> یاد می شود. هنگامی که ابعاد محموله به نحوی است که نیازمند تمام فضای بارگیری خودروی حامل نیست، محموله به عنوان بار کمتر از ظرفیت کامل (LTL)<sup>۲</sup> شناخته می شود. مزیت چنین محموله هایی آن است که تأمین کنندگان می توانند از ظرفیت خودروی حامل به صورت اشتراکی برای ارسال این قبیل محموله ها استفاده کنند. دومین استراتژی ارسال، به عنوان سیستم انبارش متقاطع شناخته می شود که در آن محموله های LTL در یک گره میانی تحت عنوان بارانداز تجمیع شده و تشکیل محموله های FTL می دهند. مهمترین مزیت این سیستم آن است که منجر به کاهش موجودی و هزینه های حمل و نقل می شود. با این حال این استراتژی می تواند

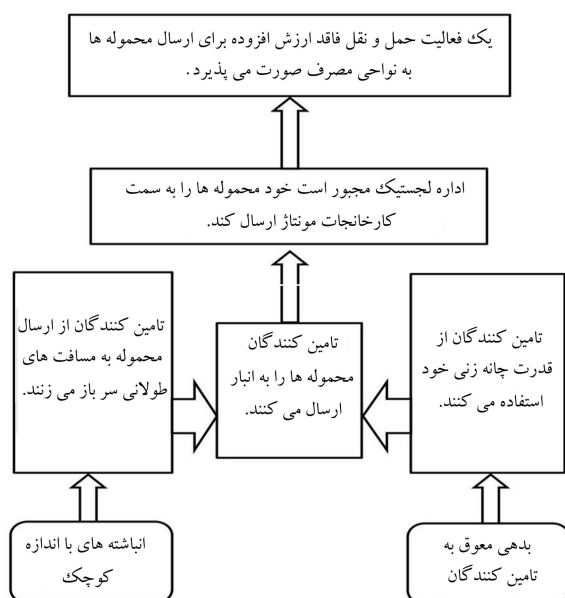
یکی از حوزه های مهم در عملیات لجستیک، حمل و نقل کالا در بستر زنجیره تأمین است. بر اساس گزارش محققان<sup>[۱]</sup>، هزینه های توزیع نزدیک به یک سوم کل هزینه های لجستیکی را شامل می شود. بنابراین بهینه سازی هزینه های توزیع یکی از مراحل مهم در طرح های کاهش هزینه های لجستیکی است. به طور کلی سه دسته شبکه ی توزیع وجود دارد که در بستر آنها، کالا و محصولات از بالادست زنجیره به پایین دست زنجیره جریان می یابد:<sup>[۲]</sup> شبکه های ارسال مستقیم، انبارش متقاطع، لجستیک میلکران.

ساده ترین نوع ارسال محموله می تواند در قالب ارسال مستقیم صورت پذیرد. در

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۲/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۰/۸/۳۰، پذیرش ۱۴۰۰/۹/۲.

DOI:10.24200/J65.2021.57401.2196



شکل ۱. مسائل و مشکلات لجستیکی ناشی از اقتباس رویکرد تولید بهنگام در گروه خودروسازی سایپا.

لجستیک داخلی با هدف طراحی یک سیستم مبتنی بر لجستیک میلکران برای بهبود جریان قطعات به طریقی منطقی و از نقطه‌نظر هزینه‌ی اثربخش‌تر، مشارکت کنند. در این مقاله، ترکیبی از استراتژی ارسال مستقیم و لجستیک میلکران مدل‌سازی می‌شود. مدل ریاضی به گونه‌ی طراحی می‌شود که تمام ترکیبات ممکن از ارسال مستقیم و مسیرهای میلکران را در بر داشته باشد. در کنار آن مفهومی به نام بارگیری سفارشات با شکل چیدمان قابل تغییر درون خودروهای حامل معرفی و مدل‌سازی می‌شود. محدودیت‌های لازم برای پنجره زمانی سفارشات و لحاظ کردن هزینه‌های ناشی از برگشت پالت‌های فلزی نیز اعمال می‌شود. در ادبیات موضوع، مدل‌های ریاضی و روش‌های حل مختلفی برای مسئله‌ی لجستیک میلکران در صنایع مختلف ارائه شده است.<sup>[۱-۳]</sup> همچنین تحقیقات انجام شده در حوزه‌ی لجستیک قطعات در صنعت خودروسازی، بررسی شده است.<sup>[۴]</sup> سؤالاتی که در نوشتار حاضر به دنبال یافتن پاسخی برای آن هستیم عبارت‌اند از:

۱. مدل بهینه‌سازی مناسب برای سیستم توزیع میلکران در زنجیره‌ی تأمین گروه خودروسازی سایپا با در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به توزیع قطعات، پنجره‌ی زمانی سفارشات، به ویژه ملاحظات مربوط به بارگیری سه‌بعدی پالت‌ها درون فضای بارگیری خودروهای حامل چگونه است؟
  ۲. رویکرد حل ابتکاری مناسب برای مسئله، به گونه‌یی که طراحی آن مطابق با ساختار مسئله بوده و از طرح نمایش و عملگرهای مناسب بهره‌برداری شود چگونه است؟ آیا می‌توان از رویکرد ترکیبی مدل ریاضی - الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله استفاده کرد، به طوری که در تشکیل هر جواب، بخشی از متغیرهای تصمیم به صورت بهینه تنظیم شوند؟
  ۳. عملکرد روش معرفی شده و اثربخشی آن در عمل و در مقایسه با منطق فعلی لجستیک داخلی در گروه خودروسازی سایپا (که بر اساس ارسال مستقیم سفارشات است) چگونه است؟
- در ادامه‌ی این نوشتار، در بخش دوم به مرور ادبیات، نوآوری‌ها و مزیت‌های

منجر به طولانی شدن زمان‌های تحویل شود. بر خلاف سیستم انبارش متقاطع که در آن محموله‌ها در یک نقطه‌ی میانی در شبکه‌ی لجستیک دریافت شده و تجمیع می‌شوند، در سیستم توزیع میلکران محموله‌ها درون خودروی حامل و در گذر از گره‌های مختلف در شبکه‌ی لجستیک تجمیع می‌شوند. بدین ترتیب که خودروی حامل به محل چندین تأمین‌کننده برای برداشت سفارشات رجوع کرده و سپس برای تحویل آنها به یک یا چند مقصد اعزام می‌شود. سیستم لجستیک میلکران تمامی مزایای سیستم LTL را داراست. از این رو به کارگیری این سیستم می‌تواند منجر به کاهش سطح موجودی‌ها، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌یی و هزینه‌های توزیع شود. نام «میلکران» برگرفته از سیستم توزیع سنتی شیر در گذشته است: فرد مسئول جمع‌آوری و توزیع شیر، خانه به خانه به مشتریان رجوع کرده، بطری‌های شیر تازه را تحویل داده و بطری‌های خالی را در راه برگشت تحویل می‌گرفته است.<sup>[۳]</sup> بسیاری از صنایع نظیر خودروسازی، از استراتژی توزیع میلکران در شبکه‌ی لجستیک خود بهره برده‌اند.<sup>[۴]</sup>

زنجیره‌ی تأمین در صنعت خودرو یکی از پیچیده‌ترین و گسترده‌ترین انواع زنجیره‌های تأمین است. تعداد بسیار زیادی از تأمین‌کنندگان که در نواحی جغرافیایی مختلف پراکنده شده‌اند، به تولید و ارسال هزاران قطعه‌ی می‌پردازند که در کارخانه‌های مونتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین، در این صنعت باید برنامه‌ریزی دقیقی در مورد لجستیک داخلی و خارجی صورت پذیرد. لجستیک داخلی که گستره آن به تأمین و توزیع قطعات تا خطوط مونتاژ محدود می‌شود، نقش حیاتی در صنعت خودرو ایفا می‌کند. زیرا بر کل فرایندهای زنجیره‌ی تأمین اثرگذار است. اختلال در این حوزه می‌تواند منجر به توقف خطوط تولید شود که این می‌تواند هزینه‌های گزاف بر سیستم تحمیل کند و منجر به صدور جریمه‌های سنگین برای عامل تأخیرکننده شود. از طریق استفاده از استراتژی ارسال مستقیم، احتمال توقف خطوط مونتاژ کاهش می‌یابد. اما در عین حال می‌تواند حجم عظیمی از هزینه‌های حمل و نقل را، هنگامی که تعداد محموله‌های (LTL) قابل توجه است، تحمیل کند. به منظور کاهش در هزینه‌ها، می‌توان میزان بهره‌گیری از تسهیلات حمل و نقل را افزایش داد. هنگامی که تأمین‌کنندگان در یک ناحیه جغرافیایی، متمرکز و نزدیک به یکدیگرند و محموله‌های تولیدی آنها در مقایسه با ظرفیت خودروی حامل از حجم کمی برخوردار است، پتانسیل استفاده از سیستم لجستیک میلکران وجود خواهد داشت. پژوهشگران این پتانسیل را در شرکت‌های خودروسازی تویوتا، وباستو و آئودی مطالعه کرده‌اند.<sup>[۵]</sup> الگوریتم‌هایی نیز برای مسئله‌ی لجستیک میلکران در سیستم توزیع قطعات ارائه است.<sup>[۶]</sup>

به عنوان یکی از بزرگ‌ترین خودروسازان داخلی، گروه خودروسازی سایپا از سیستم تولید به هنگام (JIT) برای کاهش سطوح موجودی در کارخانه‌های مونتاژ بهره می‌برد. هرچند کاهش در سطوح موجودی‌ها به بهای افزایش در توانر تحویل محموله‌هاست. تحت استراتژی ارسال مستقیم که در حال حاضر از سوی سایپا دیکته می‌شود، خودروی حامل - بعد از بارگیری محموله در محل سازنده - سفر خود را مستقیماً به سمت کارخانه مونتاژ آغاز می‌کند؛ بدون این که در طول مسیر هیچ‌گونه سفارش دیگری به محموله‌ی خودروی حامل اضافه شود. نتیجه‌ی این سیاست آن است که روزانه تعداد زیادی خودروی حامل با فضای نیمه پر تردد می‌کنند. تأمین‌کنندگانی که از قدرت چانه‌زنی بالاتری برخوردارند، از ارسال محموله‌ها به نواحی دوردست سر باز زده و مستقیماً سفارشات را به انبارهای مرکزی سایپا ارسال می‌کنند. این رفتار می‌تواند هزینه‌های حمل و نقل اضافی و غیر ارزش‌افزا را برای ارسال از انبارهای مرکزی به سمت نقاط تقاضا تحمیل کند (شکل ۱).

ملاحظات یاد شده، نویسندگان این مقاله را بر آن داشته تا در پروژه‌ی برنامه‌ریزی

جدول ۱. اطلاعات تحقیقات موجود در ادبیات موضوع.

روش حل	مدلسازی ریاضی	سایر محدودیت‌های جانبی	پنجره زمانی	نوع ناوگان	محدودیت ظرفیت	تعداد محصولات	شکست بار	تعداد انبارهای مرکزی	مطالعه موردی	منبع
تولید ستون	✓	-	✓	متجانس	✓	تک	-	تک	-	[۱۸]
تولید ستون	✓	-	✓	متجانس	✓	تک	-	تک	-	[۲۱]
-	✓	-	-	نامتجانس	✓	چند	-	چند	✓	[۲۵]
تولید ستون	-	✓	✓	نامتجانس	✓	چند	✓	چند	✓	[۲۶]
شاخه و برش	✓	-	-	متجانس	✓	چند	-	تک	-	[۲۷]
شبیه سازی	-	-	-	نامتجانس	✓	تک	-	تک	-	[۲۸]
تبرید	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	تک	-	چند	✓	[۲۹]
جستجوی ممنوعه و جستجو با همسایگی متغیر	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	تک	-	چند	✓	[۳۰]
جستجو با همسایگی متغیر	-	-	-	نامتجانس	✓	تک	-	تک	-	[۳۰]
الگوریتم ژنتیک	-	-	✓	متجانس	✓	چند	-	چند	-	[۳۱]
جستجو با همسایگی بزرگ	✓	-	✓	نامتجانس	✓	چند	-	چند	✓	[۳۲]
تطبیق یافته	✓	-	-	نامتجانس	✓	تک	-	چند	-	[۳۳]
جستجوی ممنوعه	✓	-	✓	متجانس	✓	تک	-	تک	-	[۳۴]
جستجو با همسایگی بزرگ	✓	-	-	نامتجانس	✓	چند	-	چند	-	[۳۵]
تطبیق یافته و همسایگی متغیر	✓	-	✓	متجانس	✓	چند	-	تک	-	[۳۶]
شبیه سازی	-	-	✓	متجانس	✓	چند	-	تک	-	[۳۶]
تبرید	✓	-	-	متجانس	✓	تک	-	تک	✓	[۳۷]
جستجو با همسایگی کاهشی	✓	-	-	متجانس	✓	تک	-	تک	✓	[۳۷]
الگوریتم گرسپ و جستجو با همسایگی کاهشی	-	-	✓	متجانس	✓	تک	-	تک	✓	[۳۸]
الگوریتم ژنتیک	-	-	✓	متجانس	✓	تک	-	تک	-	[۳۹]
-	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	چند	-	تک	-	[۴۰]
جستجو با همسایگی بزرگ	-	-	✓	نامتجانس	✓	چند	-	تک	-	[۴۱]
تطبیق یافته	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	چند	-	تک	-	[۴۲]
الگوریتم	-	-	✓	نامتجانس	✓	تک	-	تک	✓	[۴۳]
متاهوریستیک	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	چند	-	تک	-	[۴۴]
برنامه‌ریزی محدودیت و الگوریتم ژنتیک	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	چند	-	تک	-	[۴۴]
شاخه و برش	✓	-	✓	متجانس	✓	تک	-	تک	-	[۴۵]
شبیه سازی	-	-	✓	نامتجانس	✓	تک	-	تک	✓	[۴۶]
تبرید	✓	-	✓	متجانس	✓	تک	-	چند	✓	[۴۷]
الگوریتم ژنتیک و جستجوی ممنوعه ترکیبی	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	تک	-	چند	-	[۴۸]
شبیه سازی	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	تک	-	چند	-	[۴۸]
تبرید	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	تک	-	چند	-	[۴۹]
الگوریتم ژنتیک	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	تک	-	چند	-	[۵۰]
شاخه و برش	✓	-	-	متجانس	✓	تک	-	تک	-	[۵۱]
الگوریتم ابر ابتکاری	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	چند	-	مجازی	✓	[۵۱]
استراتژی تکاملی	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	چند	-	مجازی	✓	[۵۱]
گروه‌بندی	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	چند	-	مجازی	✓	[۵۱]
اقدام با شکل متغیر	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	چند	-	مجازی	✓	[۵۱]

رویکردهای معرفی شده در مقاله خواهیم پرداخت. تعریف دقیق مسئله و مدل‌سازی ریاضی آن در قالب یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط در بخش ۳ آورده می‌شود. در این بخش ایده‌ی بارگیری سفارشات با شکل چیدمان قابل تغییر درون خودروهای حامل رسمیت می‌یابد و بر این اساس، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی معرفی می‌شود. در بخش ۴، یک الگوریتم استراتژی تکاملی گروه‌بندی به همراه الگوریتم‌های ابتکاری مورد نیاز برای ایجاد جواب جدید و تضمین شدنی بودن محدودیت‌های بارگیری و مسیریابی ارائه می‌شود. کارایی و اثربخشی مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط و الگوریتم استراتژی تکاملی گروه‌بندی در بخش ۵ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بخش نشان خواهیم داد که لجستیک میلکران تا چه میزان می‌تواند نسبت به استراتژی ارسال مستقیم بهبود ایجاد کند. در انتها، نتایج حاصل از اجرای روش‌های ارائه شده روی دو نمونه مسئله با داده‌های واقعی مورد آزمون قرار می‌گیرد. در نهایت در بخش ۶، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری صورت می‌پذیرد. در این بخش همچنین بینش‌های مدیریتی و محدودیت‌های تحقیق تشریح و جهت‌گیری برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

## ۲. مرور ادبیات و بیان نوآوری تحقیق

در بطن سیستم لجستیک میلکران، فعالیت برداشت و تحویل قرار دارد. بنابراین مسئله شناخته شده برداشت و تحویل (PDP) <sup>۳</sup> می‌تواند در قالب یک زیرمسئله در فرایند بهینه‌سازی سیستم لجستیک میلکران ظاهر شود. در حال حاضر تحقیقات زیادی پیرامون مسائل برداشت و تحویل صورت پذیرفته است که از آن جمله می‌توان به مسائلی چون برداشت و تحویل بین مشتریان و انبار مرکزی <sup>[۱۳]</sup>، برداشت و تحویل با حمل و نقل بین مکان‌های برداشت و تحویل <sup>[۱۴]</sup>، برداشت و تحویل ایستا <sup>[۱۵]</sup> و برداشت و تحویل پویا <sup>[۱۶]</sup> اشاره کرد.

برای حل مسئله برداشت و تحویل با پنجره‌های زمانی (PDPTW) با ابعاد بزرگ، روش‌های فراابتکاری معرفی شده‌اند. <sup>[۱۷-۱۹]</sup> از جمله این روش‌ها می‌توان به الگوریتم جستجوی محلی تکراری برای مسئله برداشت و تحویل با پنجره‌های زمانی و برنامه‌ریزی نیروی انسانی با کاربرد در حوزه خدمات اورژانس <sup>[۱۹]</sup>، الگوریتم استراتژی تکاملی گروه‌بندی برای مسیریابی هلیکوپتر در میدان‌گازی پارس جنوبی <sup>[۲۰]</sup> و الگوریتم جستجوی ممنوع برای سیستم لجستیک شهری <sup>[۲۱]</sup> اشاره کرد. از آن‌جا که خودروهای حامل دارای ظرفیت، سرعت و هزینه متفاوت‌اند، برخی از محققین مسئله برداشت و تحویل با ناوگان نامتجانس (HVPDP) را در نظر گرفته‌اند. <sup>[۲۲-۲۵]</sup> مسائل مختلفی در حوزه مسیریابی وسیله نقلیه و مسئله برداشت و تحویل وجود دارند. برخی از این تحقیقات در جدول ۱ گردآوری شده‌اند. در این جدول مشخصات مسائل از جمله تعداد انبارهای مرکزی، تعداد محصولات، ملاحظات مرتبط با محدودیت ظرفیت، متجانس یا نامتجانس بودن وسیله نقلیه، پنجره‌های زمانی، وجود یا عدم وجود مدل برنامه‌ریزی ریاضی و نوع روش حل آمده است. وضعیت مسئله تحت بررسی از نقطه نظر این مشخصات، در جدول ۱ بررسی شده است.

در این مقاله به معرفی یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) برای بهینه‌سازی مسئله لجستیک میلکران (MRLP) در صنعت خودرو می‌پردازیم. مسئله در ساده‌ترین شکل شبیه مسئله برداشت و تحویل است. با این حال در مسئله تحت بررسی، سایر ملاحظات نظیر بارگیری سفارشات با

شکل چیدمان قابل تغییر درون خودروها، اعمال هزینه‌های تحویل پالت‌های فلزی در مسیر برگشت، پنجره‌های زمانی برای سفارشات و ناوگان نامتجانس، در قالب محدودیت به مسئله‌ی کلاسیک برداشت و تحویل اضافه می‌شود. از آن‌جا که در تمامی انواع مسائل مسیریابی خودرو هدف گروه‌بندی سفارشات درون خودروهای حامل است، یک الگوریتم فراابتکاری با عنوان استراتژی تکاملی گروه‌بندی (GES) برای حل مسئله ارائه می‌شود که مجهز به روش‌های ابتکاری کارا برای استفاده از دانش ساختاری مسئله است. سازوکار عملکرد این روش‌ها به گونه‌ی بی‌همواره شدنی بودن جواب را از نقطه‌نظر بارگیری سفارشات درون خودروی حامل و شدنی بودن مسیریابی را از منظر پنجره‌های زمانی دریافت و تحویل سفارشات، تأمین می‌کند.

با مراجعه به ادبیات موضوع می‌توان خلاء تحقیقاتی ملموسی را در برنامه‌ریزی بارگیری اقلام درون خودروهای حامل، شناسایی کرد. عمده تحقیقات موجود در حوزه‌ی مسیریابی، تنها محدودیت ظرفیت وزنی بار را لحاظ می‌کنند. به عنوان مثال: وزن بار درون خودروی حامل باید کمتر از ۲۲ تن باشد. این محدودیت تنها زمانی که نسبت وزن به حجم اقلام زیاد است می‌تواند منطقی باشد. برای بارگیری اقلام حجیم نظیر پالت‌ها ممکن است پیش از آن که محدودیت وزن فعال شود، محدودیت در حجم فضای بارگیری خودروی حامل فعال شود. این امر دلالت بر آن دارد که هنگام برنامه‌ریزی برای تخصیص سفارشات به خودروهای حامل، ملاحظات بارگیری پالت‌های سفارشات در فضای سه بعدی باید مورد توجه قرار گیرد. در عین حال، پوشش خلاء مقایسه میان عملکرد هزینه‌ی سیستم لجستیک میلکران و سیستم ارسال مستقیم سفارشات که استفاده از آن در صنعت خودروسازی رایج است، اهمیت ویژه دارد و نخستین بار در این مقاله مورد توجه قرار می‌گیرد.

ایده‌ی بارگیری سفارشات با شکل چیدمان قابل تغییر درون خودروهای حامل، احتمالاً نخستین بار در این مقاله مورد توجه قرار می‌گیرد. در تمامی مسائل بارگیری/بسته‌بندی چند بعدی که در ادبیات مورد اشاره قرار گرفته‌اند، شکل اقلامی که قرار است بارگیری یا بسته‌بندی شوند دانسته فرض می‌شود. در بیشینه‌ی مطالعات اشکال مستطیلی یا مکعبی را در نظر می‌گیرند. در مسئله‌ی تحت بررسی، سفارشات که از جانب تأمین‌کنندگان به سمت کارخانه‌های مونتاژ ارسال می‌شود، می‌تواند در قالب «اقلام» مد نظر گنجانده شود. تفاوتی که در این‌جا وجود دارد آن است که سفارشات هیچ شکل از پیش تعیین شده‌ی ندارند و تنها تعداد پالتی که در بر دارند معلوم است. این پالت‌ها می‌توانند به اشکال مختلف و در قالب یک مکعب یکپارچه درون خودروی حامل بارگیری شوند. به عنوان مثال یک سفارش با ۸ عدد پالت، می‌تواند درون یک خودروی حامل در قالب یک مکعب یکپارچه با ابعاد  $4 \times 2 \times 1$  یا  $2 \times 2 \times 2$  یا حتی  $3 \times 2 \times 1$  بارگیری شود.

انتخاب یکی از این اشکال مکعب‌شکل برای سفارش و چیدمان پالت‌های سفارش درون خودروی حامل در قالب این مکعب یکپارچه می‌تواند از طریق متغیرهای تصمیم صورت پذیرد. توجه داشته باشید که مجموعه‌ی اشکال مرتبط با یک سفارش می‌تواند با تغییر نوع وسیله‌ی نقلیه تغییر یابد که این خود بر پیچیدگی مدل‌سازی برای ناوگان نامتجانس می‌افزاید. در این مقاله از این نوع بارگیری تحت عنوان بارگیری اقلام با شکل متغیر یاد می‌شود. در ادامه نشان خواهیم داد که چگونه مجموعه‌ی محدودیت‌هایی که قیود لازم برای بارگیری سفارشات با شکل متغیر را درون خودروهای حامل فراهم سازند، قابل معرفی هستند.

نوآوری‌ها و مزیت‌های رویکردهای معرفی شده در مقاله به صورت زیر قابل شمردن است:

- معرفی یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و نسخه خطی شده آن برای سیستم لجستیک میلکران با در نظر گرفتن ملاحظات نظیر بارگیری سفارشات با شکل چیدمان قابل تغییر درون خودروهای حامل، اعمال هزینه‌های تحویل پالت‌های فلزی در مسیر برگشت، وجود پنجره‌های زمانی برای سفارشات و ناوگان نامتجانس.

- اگرچه فرض وجود پنجره‌های زمانی یا ناوگان نامتجانس پیشتر در ادبیات بررسی شده است، مفهوم بارگیری سفارشات با شکل چیدمان قابل تغییر درون خودروهای حامل نخستین بار در این مقاله معرفی و مدل‌سازی می‌شود. غالب مقالات موجود در حوزه‌ی مسیریابی خودرو صرفاً محدودیت ظرفیت را در یک بعد (وزن) اعمال می‌کنند و کاری به نحوه‌ی چیدمان سفارشات درون خودروی حامل ندارند. این در حالی است که سفارشات در دنیای واقعی علاوه بر مشخصه‌ی وزن، مشخصات دیگری نظیر تعداد پالت‌ها و ابعاد آنها را دارند که برای سفارشات مختلف متفاوت است. چیدمان پالت‌ها درون فضای بارگیری خودروی حامل از آن جهت مهم است که اگرچه ممکن است محدودیت وزن رعایت شود، محموله به صورت فیزیکی قابل جای‌دهی درون خودروی حامل نیست. بر اساس رویکرد معرفی شده در این مقاله، چیدمان فیزیکی پالت‌ها درون محفظه‌ی بارگیری خودروی حامل همواره شدنی است.

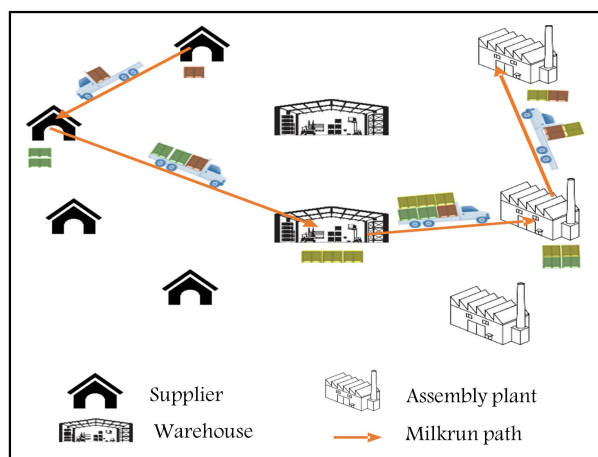
- با توجه به عدم کارایی مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای حل مسائل با ابعاد بزرگ، یک الگوریتم فراابتکاری با عنوان استراتژی تکاملی گروه‌بندی برای حل مسئله ارائه می‌شود که مجهز به روش‌های ابتکاری کارا برای استفاده از دانش ساختاری مسئله است. الگوریتم معرفی شده از نوع Mathheuristic است که از یک رویکرد ابتکاری سازنده برای تولید جواب استفاده می‌کند که درون خود از دو زیر مدل بهینه‌سازی بهره می‌برد؛ یکی برای تعیین چیدمان بهینه پالت‌های سفارشات درون خودروی حامل و دیگری برای مسیریابی بهینه خودروی حامل. مزیت اصلی رویکرد معرفی شده آن است که همواره شدنی بودن جواب را تضمین می‌کند و بنابراین جستجو همواره در فضای شدنی صورت می‌پذیرد. این ویژگی، تأثیر بسیار چشمگیری در حفظ کارایی الگوریتم دارد.

- سیستم توزیع پیشنهادی که از تلفیق سیستم لجستیک میلکران و مفهوم بارگیری سفارشات با شکل چیدمان قابل تغییر درون خودروهای حامل به دست می‌آید، نسبت به سیستم فعلی توزیع قطعات در زنجیره‌ی تأمین داخلی گروه خودروسازی سایپا که بر اساس ارسال مستقیم است قابلیت کاهش چشمگیر هزینه‌ها تا ۳۰ درصد را دارد.

### ۳. تعریف مسئله و مدل‌سازی ریاضی

در بازه زمانی روزانه، برنامه‌ریزی ارسال محموله‌ها از سمت تأمین‌کنندگان به سمت خطوط مونتاژ صورت می‌پذیرد. این برنامه‌ریزی شامل تخصیص پالت‌های هر یک از قطعات یا محصولات به مسیرهای میلکران است که توسط خودروهایی که مسئولیت بارگیری و تحویل آنها را دارند، پیموه می‌شود. هدف تعیین مسیریابی بهینه و زمان‌بندی برداشت و تحویل برای کمینه‌سازی هزینه‌های جمع‌آوری و توزیع است (شکل ۲). سایر ملاحظات که روی بارگیری سفارشات و مسیریابی خودروهای حامل وجود دارد نیز در قالب محدودیت‌ها به مدل معرفی می‌شوند. شرایط و

- درون یک خودروی حامل، پالت‌های یک سفارش نمی‌توانند در مکان‌های مختلف بارگذاری شوند. به عبارت دیگر، پالت‌های یک سفارش باید کمیته در یک وجه به یکدیگر چسبیده باشند و تشکیل یک مکعب یک پارچه بار دهند (زیربخش ۱-۳ را ببینید).
- یک خودروی حامل می‌تواند تنها یکبار از گره‌های مربوط به تأمین‌کنندگان خارج شده و به یکی از گره‌های مربوط به تحویل‌گیرندگان وارد شود.



شکل ۲. نمایی از شبکه‌ی تأمین قطعات در صنعت خودروسازی.

مفروضات زیر در ساخت مدل ریاضی برای مسئله‌ی MRLP در نظر گرفته می‌شوند.

- تعداد زیادی خودروی حامل متعلق به یک ناوگان نامتجانس در دسترس است. خودروهای حامل از نوع کفی بوده و محفظه‌ی بارگیری آنها دارای درب از بغل است. تعداد خودروهای حامل مورد استفاده و همچنین نوع آنها توسط مدل ریاضی تعیین می‌شود.
- قرارگیری درب محفظه‌ی بارگیری در بغل خودروی حامل اجازه می‌دهد که بارگیری توسط لیفتراک از دو طرف خودروی حامل صورت پذیرد. در این شرایط، مسئله‌ی بارگیری می‌تواند معادل با مسئله‌ی بسته‌بندی اقلام باشد. در سرتاسر مقاله از واژگان «بارگیری» و «بسته‌بندی» به صورت مترادف استفاده می‌شود.
- هر خودروی حامل دارای ظرفیت وزنی و حجمی (سه‌بعدی) محدود است.
- در صورتی که کمیته یک پالت فلزی درون محتویات خودروی حامل باشد، هزینه‌ی مسیر به صورت یک و نیم برابر محاسبه می‌شود (زیرا خودروی حامل مجبور است به تعداد پالت‌های فلزی که حامل آنهاست، پالت خالی از محل تحویل برداشت نموده و به سازندگان مربوطه بازگرداند). شایان ذکر است که پالت‌های چوبی در محل مصرف تبدیل به ضایعات چوبی شده و الزامی به بازگرداندن آنها نیست. خودروهایی که صرفاً حامل پالت‌های چوبی هستند، بعد از تحویل سفارشات آزاد می‌شوند.
- پالت‌های چوبی قابلیت قرارگیری روی یکدیگر را ندارند.
- زمان‌های بارگیری و تخلیه مجزا از زمان‌های سفر بوده و تابعی از تعداد پالت‌های در حال بارگیری یا تخلیه‌اند.
- بارگیری و تحویل یک سفارش باید در یک بازه (پنجره‌ی زمانی) معین از زمان در طول روز صورت پذیرد.
- سفارشی که وزن یا حجم آن کم‌تر از ظرفیت وزنی و حجمی بزرگ‌ترین خودروی حامل است نمی‌تواند به سفارشات کوچک‌تر شکسته شود. پالت‌های این‌گونه سفارشات همگی باید به صورت یک پارچه و یک‌باره برداشت و تحویل شوند. در غیراین صورت سفارش به محموله‌های FTL شکسته شده و تمامی خودروهایی که برای ارسال محموله‌های شکسته شده مورد استفاده قرار می‌گیرند دارای بار کامل هستند. البته ممکن است در انتها، یک خودرو باشد که محموله آن LTL بوده و در مسیر میکلران شرکت کند.

### ۱.۳. بارگیری سفارشات/اقلام با شکل قابل تغییر

یکی از پیش‌فرض‌های موجود در مسائل بسته‌بندی اقلام در ظروف دوبعدی و سه‌بعدی آن است که شکل اقلام معین و ثابت است. هیچ‌گونه تغییر شکل یا تغییر ابعاد در اقلام به هنگام بسته‌بندی مجاز نیست. اما در مسئله‌ی مورد بررسی در این مقاله، هریک از سفارشات که متناظر با یک قلم در مسائل بسته‌بندی است، دارای یک پارامتر به نام تعداد پالت است. پالت‌های یک سفارش می‌توانند با آرایش بندی متفاوت درون یک خودروی حامل چیده شوند. به عنوان مثال یک سفارش با ۸ عدد پالت می‌تواند درون یک خودروی حامل در قالب یک مکعب یک پارچه با ابعاد  $1 \times 2 \times 4$  یا  $2 \times 2 \times 2$  یا حتی  $2 \times 2 \times 2$  بارگیری شود. تخصیص سفارشات به خودروهای حامل بایستی برحسب محدودیت‌های بارگیری شدنی باشد.

با در نظر گرفتن سفارش  $m$  با  $f_m$  پالت، فرض کنید  $nh_m$  و  $nw_m$  نمایانگر طول، عرض و ارتفاع مکعب یک پارچه بار (ULC) (برحسب تعداد پالت باشند. منظور از مکعب یک پارچه بار، کوچک‌ترین مکعبی است که طرح چیدمان پالت‌های سفارش درون خودروی حامل را محیط می‌کند. در سرتاسر مقاله، ابعاد ULC برحسب تعداد پالت بیان می‌شود. منطقی است که همواره داشته باشیم  $nh_m = Nh_{m,k}$  که در آن  $Nh_{m,k}$  بیشینه تعداد پالت از سفارش  $m$  است که می‌تواند روی یکدیگر درون خودروی حامل  $k$  چیده شوند. با قرار دادن مقادیر مختلف برای  $nw_m$  و  $nl_m$ ، می‌توان انواع ULC های شدنی را تولید کرد. ایده بارگیری سفارشات با شکل قابل تغییر در فضای دوبعدی<sup>۵</sup> (SC2DL)، معرفی  $nl_m$  و  $nw_m$  به عنوان متغیر تصمیم در مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با در نظر گرفتن  $nw_m = 1, \dots, Nw_{m,k}$  و  $nl_m = \lceil f_m / Nh_{m,k} \rceil / nw_m$  است.  $Nw_{m,k}$  تعداد پالت‌های سفارش  $m$  است که می‌تواند در عرض خودروی حامل  $k$  قرار گیرند. شکل ۳ یک مثال خوب برای نمایش منطق SC2DL به نمایش می‌گذارد.

خاطرنشان می‌شود که به دلیل تنوع در ابعاد پالت‌ها، پالت‌های سفارشات مختلف نمی‌توانند روی یکدیگر قرار گیرند. به این دلیل، محدودیت‌های بارگیری که توسط SC2DL تحمیل می‌شود در فضای دوبعدی نوشته می‌شوند.

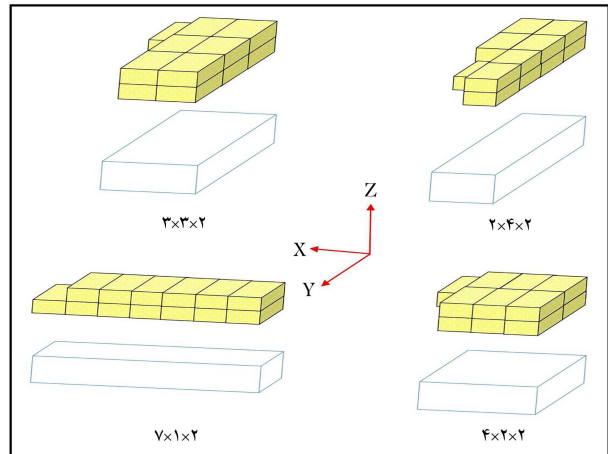
### ۲.۳. نمادگذاری

#### • مجموعه‌ها

- $K$  مجموعه‌ی خودروهای حامل ( $k$ )
- $I$  مجموعه‌ی گره‌ها ( $i, j$ )؛ اولین گره‌ی مجازی است
- $M$  مجموعه‌ی سفارشات ( $m, m'$ )

#### • پارامترها

- $M_+ - M_-$  ضرایب ثابت
- $\varepsilon$  یک مقدار کوچک مثبت



شکل ۳. اشکال مختلف بارگیری سفارش  $m$  و ULC نظیر آنها با فرض  $Nw_{m,k} = 2, 4$  و  $f_m = 13$ .

$\delta_{m,k}$  برابر ۱ است اگر سفارش  $m$  توسط خودروی حامل  $k$  برداشته شود  
 $\gamma_k$  برابر ۱ است محتویات خودروی حامل  $k$  شامل کمینه یک پالت فلزی باشد  
 $a_{m,m'}$  برابر ۱ است اگر ULC سفارش  $m$  در سمت راست ULC سفارش  $m'$  باشد  
 $b_{m,m'}$  برابر ۱ است اگر ULC سفارش  $m$  در پشت ULC سفارش  $m'$  باشد

#### • متغیرهای تصمیم پیوسته

$W_{i,k}$  وزن کل پالت‌های موجود درون خودروی حامل  $k$  بلافاصله پس از ترک  
 گره  $i$   
 $T_{i,k}$  زمان رسیدن خودروی حامل  $k$  به گره  $i$   
 $xs_m$  طول مختصات نقطه‌ی گوشه‌ی راست - پایین - پشت مربوط به ULC  
 سفارش  $m$   
 $ys_m$  عرض مختصات نقطه‌ی گوشه‌ی راست - پایین - پشت مربوط به ULC  
 سفارش  $m$   
 $nl_m$  طول ULC سفارش  $m$  برحسب تعداد پالت  
 $nw_m$  عرض ULC سفارش  $m$  برحسب تعداد پالت

#### ۳.۳. مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط

در این بخش به معرفی یک مدل MILP برای مسئله‌ی MRLP، با استفاده از منطق بارگیری SC2DL می‌پردازیم.

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} \text{cost}_{i,j,k} * (X_{i,j,k} + \circ_{i,j,k} Z_{i,j,k}) \\ & \text{s.t.} \\ & Z_{i,j,k} \leq \circ_{i,j,k} (X_{i,j,k} + \gamma_k) \quad i \in I, j \in I, k \in K \quad (1) \\ & X_{i,j,k} + \gamma_k - 1 \leq Z_{i,j,k} \quad i \in I, j \in I, k \in K \quad (2) \\ & \sum_{m \in M} PT_m \delta_{m,k} \leq \gamma_k \sum_{m \in M} PT_m \quad k \in K \quad (3) \\ & \sum_{m \in M} PT_m \delta_{m,k} \geq \gamma_k \quad k \in K \quad (4) \\ & \sum_{m \in O'_i} \delta_{m,k} + \sum_{m \in D'_i} \delta_{m,k} \geq Y_{i,k} \quad i \in I, i \neq 1, k \in K \quad (5) \\ & \delta_{m,k} \leq Y_{i,k} \quad i \in I, i \neq 1, k \in K, m \in O'_i \quad (6) \\ & \delta_{m,k} \leq Y_{i,k} \quad i \in I, i \neq 1, k \in K \quad (7) \\ & \sum_{k \in K} \delta_{m,k} = 1 \quad m \in M \quad (8) \\ & \sum_{j \in I} X_{1,j,k} \leq 1 \quad m \in M \quad (9) \\ & \sum_{i \in I} X_{i,j,k} = \sum_{i \in I} X_{j,i,k} \quad j \in I, k \in K \quad (10) \\ & \sum_{j \in I} X_{i,j,k} = Y_{i,k} \quad i \in I, k \in K \quad (11) \\ & \sum_{k \in K} Y_{i,k} \geq 1 \quad i \in I \quad (12) \\ & \sum_{k \in K} X_{i,i,k} = 0 \quad i \in I \quad (13) \end{aligned}$$

$L_k$  طول فضای بارگیری خودروی حامل  $k$   
 $W_k$  عرض فضای بارگیری خودروی حامل  $k$   
 $WC_k$  ظرفیت وزنی خودروی حامل  $k$  (Kg)  
 $w_m$  وزن هر پالت از سفارش  $m$  (Kg)  
 $Nw_{m,k}$  تعداد پالت سفارش  $m$  که می‌توان در عرض خودروی حامل  $k$  چید  
 $Nh_{m,k}$  تعداد پالت سفارش  $m$  که می‌توان روی یکدیگر در خودروی حامل  $k$  چید  
 $pl_m$  طول پالت سفارش  $m$   
 $pw_m$  عرض پالت سفارش  $m$   
 $LT_m$  زمان مورد نیاز بارگیری هر پالت از سفارش  $m$   
 $UT_m$  زمان مورد نیاز تخلیه هر پالت از سفارش  $m$   
 $f_m$  اندازه سفارش  $m$  (برحسب تعداد پالت)  
 $Orig_m$  نقطه‌ی مبدأ (شروع) سفارش  $m$   
 $Dest_m$  نقطه‌ی مقصد سفارش  $m$   
 $O'_i$  سفارشات که مبدأ آنها گره  $i$  باشد  
 $D'_i$  سفارشات که محل تحویل آنها گره  $i$  باشد  
 $lb_m$  حد پایین پنجره‌ی زمانی برداشت سفارش  $m$   
 $ub_m$  حد بالای پنجره‌ی زمانی تحویل سفارش  $m$   
 $Cost_{i,j,k}$  هزینه‌ی حمل و نقل از گره  $i$  به گره  $j$  توسط خودروی حامل  $k$   
 $Time_{i,j,k}$  زمان حمل و نقل از گره  $i$  به گره  $j$  توسط خودروی حامل  $k$   
 $ns$  تعداد تأمین‌کنندگان  
 $nk$  تعداد خودروهای حامل در دسترس  
 $nm$  تعداد سفارشات  
 $PT_m$  پارامتر نوع پالت سفارش  $m$  (فلزی = ۱ و چوبی = ۰)

#### • متغیرهای تصمیم صفر و یک

$X_{i,j,k}$  برابر ۱ است اگر یال عبوری از گره  $i$  به گره  $j$  توسط خودروی حامل  $k$  پیموده شود  
 $Z_{i,j,k}$  برابر ۱ است اگر  $X_{i,j,k} = 1$  و کمینه یک پالت فلزی درون خودروی حامل  $k$  باشد  
 $Y_{i,k}$  برابر ۱ است اگر گره  $i$  توسط خودروی حامل  $k$  ملاقات شود

دارد یا خیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای این نوع خودروها هزینه یک و نیم برابر هزینه ی نرمال است. مجموعه ی محدودیت ۶ برای اعمال این شرط است که اگر یک خودروی حامل یک گره خاص را ملاقات کرد، آنگاه باید کمیته یک پالت از یکی از سفارشات آن بردارد یا تحویل دهد. مجموعه ی محدودیت های ۷ و ۸ نمایانگر آن است که اگر سفارش  $m$  درون خودروی حامل  $k$  قرار گیرد، آنگاه خودرو باید گره های مبدأ و مقصد سفارش را ملاقات کند. مجموعه ی محدودیت ۹ اطمینان می‌دهد که سفارشات نباید به اجزاء کوچک تر شکسته شوند. مجموعه ی محدودیت ۱۰ بیانگر آن است که یک خودروی حامل می‌تواند گره مجازی را حداکثر یک بار ترک کند. مجموعه ی محدودیت ۱۱ به بالانس جریان می‌پردازد. مجموعه ی محدودیت ۱۲ تنها یک بار خروج از گره ملاقات شده را جایز می‌داند. مجموعه ی محدودیت ۱۳ بیان می‌دارد که هر گره باید دست کم توسط یک خودروی حامل ملاقات شود. مجموعه ی محدودیت ۱۴ از ایجاد دور جلوگیری می‌کند. مجموعه ی محدودیت ۱۵ اطمینان می‌دهد که یک خودروی حامل می‌تواند از مجموعه ی گره های تأمین کننده/انبار، حداکثر یک بار به سمت مجموعه ی گره های مربوط به کارخانه مونتاژ/انبار خارج شود. مجموعه ی محدودیت ۱۶ کل وزن بار درون خودروی حامل را بعد از هر برداشت یا تحویل به روزرسانی می‌کند. مجموعه ی محدودیت ۱۷، محدودیت ظرفیت وزنی خودروی حامل را اعمال می‌کند. زمان رسیدن هر خودروی حامل به هر گره در مسیر خود، توسط مجموعه ی محدودیت ۱۸ محاسبه می‌شود. مجموعه ی محدودیت ۱۹ اطمینان می‌دهد که به ازای هر سفارش تخصیص یافته به خودروی حامل، گره مبدأ سفارش قبل از گره مقصد آن ملاقات شود. مجموعه ی محدودیت های ۲۰ و ۲۱، محدودیت های مربوط به پنجره های زمانی سفارشات را اعمال می‌کنند. مجموعه محدودیت های ۲۲ و ۲۳ تضمین می‌دهند که ULC های سفارشات  $m$  و  $m'$  با یکدیگر هم پوشانی نداشته باشند. بررسی وجود این هم پوشانی تنها زمانی لازم است که سفارشات  $m$  و  $m'$  در یک خودروی حامل قرار گیرند که این امر توسط مجموعه ی محدودیت ۲۴ تأمین می‌شود. مجموعه ی محدودیت های ۲۴ و ۲۵ اطمینان می‌دهند که هنگامی که یک سفارش درون خودروی حامل قرار می‌گیرد، پالت های مربوط به آن در فضای فیزیکی بارگیری خودروی حامل قرار می‌گیرند. محدودیت ۲۶ موقعیت ULC سفارش  $m$  را در مقایسه با موقعیت ULC سفارش  $m'$  تعیین می‌کند. یعنی این که آیا سفارش  $m$  پشت سر/جلوی سفارش  $m'$  قرار می‌گیرد. مجموعه ی محدودیت ۲۷، شکل ULC سفارش  $m$  را تعیین می‌کند. به کمک این محدودیت، انواع ULC های مرتبط با سفارش  $m$  درون خودروی حامل  $k$  تولید می‌شوند. در نهایت، نوع متغیرها توسط مجموعه ی محدودیت های ۲۸ تعیین می‌شود.

از ضرایب  $M_1 - M_4$  برای غیر فعال کردن محدودیت های نظیرشان به هنگام نیاز استفاده می‌شود. بدین منظور، مقادیر این ضرایب نباید آنقدر بزرگ باشد که منجر به گسترش فضای آزاد سازی خطی شود. به جای استفاده از مقادیر مثبت و بزرگ، می‌توان مقادیر این ضرایب را به صورت زیر تعیین کرد.

$$\begin{aligned} M_1 &= \max(WC_k) + nm^* \max(fn)^* \max(w_m) \\ M_2 &= \max(ub_m - lb_m) + nm^* \max(f_m)^* \\ &\quad (\max(LT_m) + \max(UT_m)) \\ &\quad + \max(time_{i,j,k}) \\ M_3 &= \max(ub_m - lb_m) \\ M_4 &= \max(ub_m) \end{aligned}$$

$$\sum_{i \in I, i \neq j} \sum_{\substack{j \in I, \\ j > ns+1}} X_{i,j,k} \leq 1 \quad k \in K \quad (15)$$

$$\begin{aligned} W_{i,k} + \sum_{m \in O'_j} w_m f_m \delta_{m,k} - \sum_{m \in D'_j} w_m f_m \delta_{m,k} \\ i \in I, j \in I, i \neq j \\ \leq W_{j,k} + M_1(1 - X_{i,j,k}) \quad k \in K \end{aligned} \quad (16)$$

$$W_{i,k} \leq WC_k \quad i \in I, k \in K \quad (17)$$

$$\begin{aligned} T_{i,k} + \sum_{m \in O'_i} LT_m f_m \delta_{m,k} + \sum_{m \in D'_i} UT_m f_m \delta_{m,k} \\ i \in I, j \in I, i \neq j \\ + time_{i,j,k} \leq T_{j,k} + M_2(1 - X_{i,j,k}) \quad k \in K \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} T_{j,k} \leq T_{i,k} - M_3(1 - \delta_{m,k}) \\ k \in K, m \in M', i = Orig_m, j = Dest_m \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} T_{i,k} \geq lb_m \delta_{m,k} \\ k \in K, m \in M, i = Orig_m, \end{aligned} \quad (20)$$

$$T_{i,k} \leq ub_m + M_4(1 - \delta_{m,k}) \quad m \in M, i = Dest_m, k \in K \quad (21)$$

$$\begin{aligned} xs_m - xs_{m'} \leq L_{\max}(1 - a_{m,m'}) - nl_m pw_m \\ m, m' \in M, m \neq m' \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} ys_m - ys_{m'} \leq W_{\max}(1 - b_{m,m'}) - nw_m pl_m \\ m, m' \in M, m \in m' \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} xs_m \leq L_k - nl_m pw_m + (L_{\max} - L_k)(1 - \delta_{m,k}) \\ m \in M, k \in K \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} ys_m \leq W_k - nw_m pl_m + (W_{\max} - W_k)(1 - \delta_{m,k}) \\ m \in M, k \in K \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} a_{m,m'} + a_{m',m} + b_{m,m'} + b_{m',m} \geq \delta_{m,k} + \delta_{m',k} - 1 \\ m, m' \in M, k \in K \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} nl_m = \left\lceil \sum_{k \in K} \left\lfloor \frac{f_m}{N h_{m,k}} \right\rfloor * \delta_{m,k} / nw_m \right\rceil \quad m \in M, k \in K \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} X_{i,j,k}, Y_{i,k}, \gamma_k, \delta_{m,k}, Z_{i,j,k}, a_{m,m'}, b_{m,m'} \in \{0, 1\} \\ W_{i,k}, T_{i,k}, xs_m, ys_m \geq 0 \\ nl_m, nw_m \geq 0, \text{integer} \end{aligned} \quad (28)$$

تابع هدف ۱ به کمینه سازی کل هزینه های حمل و نقل می‌پردازد که مشتمل بر هزینه های حمل و نقل از تأمین کنندگان به کارخانه های مونتاژ و هزینه های برگشت پالت های فلزی خالی به تأمین کنندگان با هزینه یی معادل نیم برابر هزینه ی مسیر رفت است. مجموعه ی محدودیت های ۲ و ۳ برای تحمیل هزینه ی نیم برابر مربوط به برگشت پالت های فلزی خالی به تأمین کنندگان اعمال می‌شوند. مجموعه ی محدودیت های ۴ و ۵ برای تعیین این که آیا کمیته یک پالت فلزی درون خودروی حامل وجود

### ۱.۳.۳. مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط

با مراجعه به مجموعه روابط ۱ تا ۲۸ می‌توان دریافت که تنها رابطه‌ی ۲۷ یک رابطه‌ی غیرخطی است. به طور معادل می‌توان از مجموعه‌ی محدودیت‌های ۲۹ و ۳۰ به جای محدودیت ۲۷ استفاده کرد.

$$nl_m n w_m \geq \sum_{k \in K} [f_m / N h_{m,k}] * \delta_{m,k} \quad m \in M \quad (29)$$

$$nl_m n w_m - (1 - \varepsilon) n w_m \leq \sum_{k \in K} [f_m / N h_{m,k}] * \delta_{m,k} \quad m \in M \quad (30)$$

در محدودیت‌های فوق عبارت  $nl_m n w_m$  یک عبارت غیرخطی است. برای دستیابی به یک مجموعه‌ی خطی از محدودیت‌ها می‌توان محدودیت ۲۹ و ۳۰ را با محدودیت‌های ۳۱-۳۷ جایگزین کرد که در آن  $r_{\max} = \left\lceil \log_2 \frac{L_{\max}}{p^{w_m}} + 1 \right\rceil$  و  $s_{\max} = \left\lceil \log_2 \frac{W_{\max}}{p^{l_m}} + 1 \right\rceil$

$$nl_m = \sum_{r=1}^{r_{\max}} 2^{r-1} * bl_{m,r} \quad m \in M \quad (31)$$

$$n w_m = \sum_{s=1}^{s_{\max}} 2^{s-1} * b w_{m,s} \quad m \in M \quad (32)$$

$$bl_{m,r,s} \leq (bl_{m,r} + b w_{m,s}) / 2 \quad m \in M, r = 1, \dots, r_{\max}, s = 1, \dots, s_{\max} \quad (33)$$

$$bl_{m,r,s} \geq (bl_{m,r} + b w_{m,s}) - 1 \quad m \in M, r = 1, \dots, r_{\max}, s = 1, \dots, s_{\max} \quad (34)$$

$$\sum_{r=1}^{r_{\max}} \sum_{s=1}^{s_{\max}} 2^{r+s-2} * bl_{m,r,s} \geq \sum_{k \in K} [f_m / N h_{m,k}] * \delta_{m,k} \quad m \in M \quad (35)$$

$$\sum_{r=1}^{r_{\max}} \sum_{s=1}^{s_{\max}} 2^{r+s-2} * bl_{m,r,s} - (1 - \varepsilon) n w_m \leq \sum_{k \in K} [f_m / N h_{m,k}] * \delta_{m,k} \quad m \in M \quad (36)$$

$$bl_{m,r}, b w_{m,s}, bl_{m,r,s} \in \{0, 1\} \quad (37)$$

با جایگزین کردن مجموعه‌ی محدودیت‌های ۳۱-۳۷ با مجموعه‌ی محدودیت ۲۷ می‌توان به یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط کامل برای مسئله‌ی MRLP دست یافت.

## ۴. روش حل پیشنهادی

مدل برنامه‌ریزی ریاضی معرفی شده می‌تواند تنها برای حل مسائل با ابعاد کوچک کارا ظاهر شود. برای مسائل بزرگ‌تر، نیاز است که یک روش حل مناسب برای یافتن جواب‌های با کیفیت قابل قبول در یک زمان معقول طراحی شود. از آن‌جا که در مسئله‌ی تحت بررسی، دسته‌ی اول تصمیمات مربوط به گروه‌بندی یا تخصیص سفارشات به خودروهای حامل است، مسئله‌ی MRLP را می‌توان به عنوان یک مسئله‌ی گروه‌بندی در نظر گرفت. در یک مسئله‌ی گروه‌بندی، تصمیم‌گیرنده به دنبال افزایش یک مجموعه از اقلام درون گروه‌هاست. مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه،

بسته‌بندی اقلام در ظروف، زمان‌بندی ماشین‌های موازی، خوشه‌بندی داده‌ها و غیره از جمله مسائلی هستند که می‌توان به عنوان مسائل گروه‌بندی در نظر گرفت. در مسئله‌ی MRLP، در وهله‌ی نخست، سفارشات (اقلام) درون خودروهای حامل (گروه‌ها) قرار می‌گیرند. بنابراین استفاده از الگوریتم‌های گروه‌بندی می‌تواند یک گزینه ارزشمند برای حل مسئله‌ی MRLP باشد. از آن‌جا که تعداد خودروهای حامل مورد استفاده در جواب‌های مختلف متفاوت‌اند، با یک مسئله‌ی گروه‌بندی با گروه‌های متغیر مواجه هستیم. به علت نامتجانس بودن ناوگان حمل و نقل، مسئله‌ی تحت بررسی یک مسئله‌ی گروه‌بندی با گروه‌های غیر یکسان است. به علاوه، به دلیل نیاز به انجام مسیریابی برای خودروهای حامل، ترتیب (مسیریابی) اقلام تخصیص یافته به گروه‌ها (گروه‌های مبدأ/مقصد متناظر با سفارشات) مهم است. بنابراین مسئله‌ی از نوع مسئله‌ی گروه‌بندی وابسته به ترتیب اقلام است. یک مسئله‌ی گروه‌بندی با ویژگی‌های فوق در زمره سخت‌ترین و پیچیده‌ترین مسائل گروه‌بندی است. [۵۲ و ۵۳]

با توجه به ساختار خاص و اهمیت مسائل گروه‌بندی، روش‌های فراابتکاری مختلفی برای حل آنها معرفی شده‌اند که طراحی آنها به گونه‌ی است که با ساختار مسئله‌ی گروه‌بندی تطبیق یابند. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم گروه‌بندی ژنتیک (GGA)، استراتژی تکاملی گروه‌بندی (GES) و بهینه‌سازی اجتماع ذرات گروه‌بندی (GPSO) اشاره کرد. به خاطر مزایا و برتری‌هایی که الگوریتم GES نسبت به الگوریتم‌های GGA و GPSO دارد، از این الگوریتم برای حل مسئله‌ی MRLP استفاده می‌شود.

GES یک الگوریتم مبتنی بر استراتژی تکاملی (ES) است که برای حل مسائل دارای ساختار گروه‌بندی نخستین بار توسط [۵۴] و بعد از آن توسط [۵۲] معرفی شده است. این الگوریتم به صورت موفقیت‌آمیز روی مسائلی نظیر بسته‌بندی اقلام در ظروف، خوشه‌بندی فازی، زمان‌بندی ماشین‌های پردازنده انباشته، زمان‌بندی ماشین‌های موازی، مسیریابی هلی‌کوپتر و غیره پیاده‌سازی شده است. در زیربخش‌های بعدی، اجرای اصلی الگوریتم GES پیشنهادی برای حل مسئله‌ی MRLP تشریح می‌شوند. به طور خاص طرح رمزگذاری جواب، نحوه تولید جواب اولیه و سازوکار تولید جواب جدید و روش‌های ابتکاری طراحی شده برای تکمیل جواب توضیح داده می‌شوند. شایان ذکر است که در این مقاله، همواره از استراتژی حفظ شدنی بودن جواب‌ها از نظر محدودیت‌های بازگویی و مسیریابی استفاده می‌شود. به علاوه تابع برازندگی برابر با مجموع هزینه‌های حمل و نقل در نظر گرفته می‌شود. چارچوب کلی الگوریتم GES به صورت زیر است. برای کسب اطلاع از جزئیات بیشتر الگوریتم و پارامترهای کنترلی آن، خوانندگان علاقه‌مند می‌توانند به منابع ذکر شده مراجعه کنند.

### • الگوریتم $GES - (1 - \lambda)$

#### شروع

مقادیر اولیه را برای  $r, a^0 < a \leq 1, \lambda, \beta$  تعیین کنید؛

$t \leftarrow 0$ ؛

$a \leftarrow a^0$ ؛

یک جواب شدنی  $X^t$  توسط الگوریتم «بهترین برازش» تولید کنید؛

مادامی که شرایط خاتمه برقرار نیست

به ازای  $i$  از ۱ تا  $\lambda$

الگوریتم NSG را اعمال کرده و جواب  $Y_i^t$  را تولید کنید؛

پایان به ازای

اگر  $rand < r$

از بین  $X^t$  و  $\lambda$  جواب فرزند تولید شده، یک جواب را به طور تصادفی انتخاب



کنید و آن را  $X^{t-1}$  اتلاق کنید؛

در غیر این صورت

از بین  $X^t$  و  $\lambda$  جواب فرزند تولید شده، بهترین جواب را انتخاب کرده و آن را  $X^{t-1}$  اتلاق کنید؛

پایان اگر

$$\alpha \leftarrow \begin{cases} \alpha/a & f(X^{t+1}) < f(X^t) \\ \alpha a & f(X^{t+1}) \geq f(X^t) \end{cases}$$

$$t \leftarrow t + 1$$

$$a^t \leftarrow a$$

پایان مادامی که

پایان

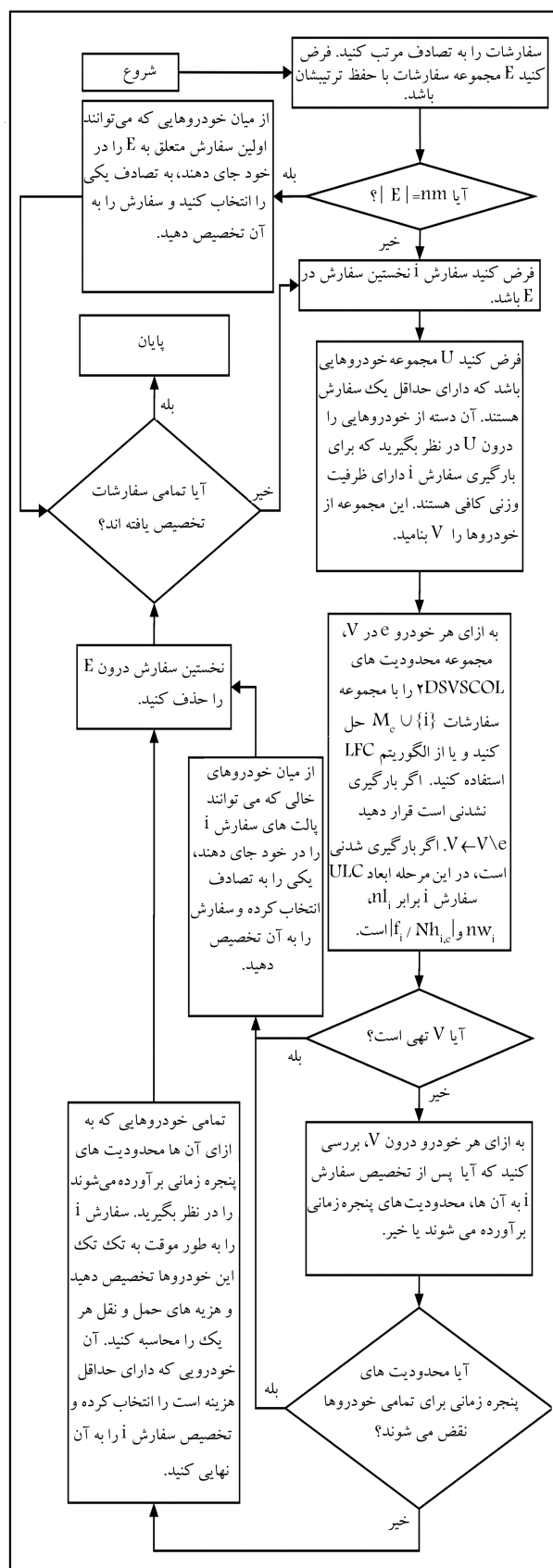
#### ۱.۴. طرح رمزگذاری جواب

از آن جا که مسئله ی تحت بررسی یک مسئله ی گروه بندی است، طرح نمایش جواب باید به گونه یی معرفی شود که از این ویژگی بهره برداری شود. طرح رمزگذاری جواب که الگوریتم GES از آن بهره می برد، مشتمل بر یک آرایه با ابعاد  $1 \times nm$  است که در آن  $nm$  تعداد سفارشات است.  $m$ امین عنصر این آرایه نشان دهنده ی شماره ی خودروی حاملی است که سفارش  $m$  به آن تخصیص می یابد. اپراتور جهش در الگوریتم GES، تخصیص سفارشات به خودروهای حامل را مورد دست کاری قرار می دهد. در نهایت، سایر اجزای جواب از جمله طرح چیدمان پالت های سفارشات درون خودروهای حامل (طرح بارگیری) و مسیریابی خودروهای حامل باید تعیین شود. این اجرا در خلال گام های الگوریتم «بهترین برازش»<sup>۴</sup> تعیین می شوند.

#### ۲.۴. تولید جواب اولیه و الگوریتم «بهترین برازش»

تخصیص سفارشات به خودروهای حامل توسط الگوریتم «بهترین برازش» صورت می پذیرد. طراحی این الگوریتم به گونه یی است که هنگام تخصیص سفارشات به خودروها، شدنی بودن طرح بارگیری سفارشات درون خودروها و شدنی بودن مسیر خودروهای حامل از نظر پنجره های زمانی سفارشات، مد نظر قرار می گیرد. شکل ۴، سازوکار عملکرد الگوریتم «بهترین برازش» را به نمایش می گذارد. به طور کلی روش های مبتنی بر الگوریتم «بهترین برازش» بدین ترتیب عمل می کنند؛ هر بار از بین اقلام تخصیص نیافته، یک قلم را برحسب یک مشخصه ی معین انتخاب کرده و آن را در بهترین گروه شدنی قرار دهید. اگر قلم انتخاب شده قابل تخصیص به هیچ یک از گروه های موجود نبود، یک گروه جدید باز کرده و قلم مورد نظر را به آن تخصیص دهید.

الگوریتم «بهترین برازش» طراحی شده در این مقاله، به تخصیص سفارشات تخصیص نیافته به خودروهای حامل به صورت یک به یک می پردازد. این الگوریتم اولین سفارش تخصیص نیافته را از لیست انتخاب کرده و آن را به صورت موقت به یک خودروی حامل (از میان خودروهای مستعمل موجود) تخصیص داده و به بررسی شدنی بودن تخصیص از نظر محدودیت ظرفیت وزنی خودروی حامل می پردازد. سپس شدنی بودن طرح بارگیری بررسی می شود. سازوکار معرفی شده برای بررسی شدنی بودن طرح چیدمان پالت های سفارشات درون خودروی حامل، در بخش ۴-۴ تشریح می شود. هنگامی که بررسی شدنی بودن طرح بارگیری خاتمه یافت و پالت های سفارش جدید توانستند در کنار پالت های سایر سفارشات موجود



شکل ۴. سازوکار عملکرد الگوریتم «بهترین برازش».

در خودروی حامل درون آن قرار گیرند، نوبت به بررسی شدنی بودن مسیریابی از نظر محدودیت های پنجره ی زمانی سفارشات می رسد. سازوکار معرفی شده برای بررسی شدنی بودن مسیر خودروی حامل در بخش ۴-۵ تشریح می شود. در صورتی که نتیجه ی یکی از این ۳ بررسی مثبت نباشد، بررسی تخصیص سفارش به خودروی حامل بعدی صورت می پذیرد.

سازوکارهای تشریح شده برای بررسی شدنی بودن تخصیص سفارش به خودروی حامل، برای تمامی خودروهای حاملی که در حال حاضر دست کم یک سفارش درون خود دارند صورت می پذیرد. در نهایت، از میان تمامی خودروهای حاملی که می توانند سفارش انتخاب شده را در خود جای دهند، آن خودرویی انتخاب می شود که هزینه ی مسیر طی شده توسط آن از سایرین کم تر باشد و تخصیص سفارش به آن خودروی حامل نهایی می شود. این روش برای تمامی سفارشات تخصیص نیافته تکرار شده و تا حصول یک جواب شدنی کامل ادامه می یابد. برای تولید جواب اولیه، الگوریتم «بهترین برازش»، با یک لیست تصادفی از تمامی سفارشات موجود شروع می کند.

### ۳.۴. الگوریتم تولید جواب جدید (NSG)<sup>۷</sup>

با استفاده از یک جواب والد، تولید جواب جدید در GES مشتمل بر دو فاز است؛ فاز وراثت و فاز تخصیص مجدد. در فاز وراثت، تعدادی از سفارشات تخصیص یافته به خودروی حامل در جواب فرزند، از جواب والد به ارث برده می شوند. در فاز تخصیص مجدد، سفارشات جامانده در فاز وراثت که به هیچ خودروی حاملی تخصیص نیافته اند، به یکی از خودروهای حامل موجود یا جدید، توسط الگوریتم «بهترین برازش» تخصیص می یابند.

فاز وراثت در الگوریتم NSG، مشتمل بر یک اپراتور جهش است که نسخه ی تطبیق یافته از اپراتور جهش اصلی در الگوریتم استراتژی تکاملی (ES) است. روشی که بر اساس آن اپراتور جهش برای مسائل گروه بندی تطبیق می یابد در ادامه آورده می شود. فرض کنید در الگوریتم ES که در فضای پیوسته کار می کند،  $X^t$  جواب والد در تکرار  $t$  باشد  $(x_1^t, x_2^t, \dots, x_n^t) = X^t$  یک جواب برای برای تابع اسکالر  $n$  متغیره است. فرض کنید  $Y_i^t = (y_{i1}^t, y_{i2}^t, \dots, y_{in}^t)$ ،  $i$  امین جواب فرزند حاصل از  $X^t$  باشد. اپراتور جهش در الگوریتم ES برای تولید جواب  $Y_i^t$  به صورت زیر عمل می کند.

$$y_{ik}^t = x_k^t + z_{ik}^t, k = 1, \dots, n, i = 1, \dots, \lambda \quad (38)$$

که در آن  $N_{ik}(0, 1)$  که  $z_{ik}^t = \sigma^t N_{ik}(0, 1)$  یک عدد تصادفی نرمال استاندارد برای بعد  $k$  است و  $\sigma^t$  پارامتر استراتژی است. به منظور تطبیق معادله ی جهش ۳۸ برای مسئله ی MRLP، که یک مسئله ی گروه بندی است، فرض کنید  $S$  و  $S'$  دو مجموعه از سفارشات درون یک خودروی حامل خاص در دو جواب مختلف باشند. می توان از ضریب عدم شباهت جاکارد، برای تعیین درجه تفاوت میان دو مجموعه استفاده کرد:

$$Dis(S, S') = 1 - |S \cap S'| / |S \cup S'| \quad (39)$$

برای دستیابی به اپراتور جهش در GES، با تغییر شکل رابطه ۳۸ به صورت  $y_{ik}^t - x_k^t = z_{ik}^t$  و جایگزینی «-» با «Dis» داریم:

$$Dis(y_{ik}^t, x_k^t) = z_{ik}^t \quad (40)$$

توجه داشته باش ید که در رابطه ی ۴۰،  $x_k^t$  و  $y_{ik}^t$  بر مجموعه ی سفارشات تخصیص یافته به خودروی حامل  $k$  در جواب  $X^t$  و  $Y_i^t$  دلالت دارند. از آن جا که ممکن است نتوان گروه  $y_{ik}^t$  از جواب فرزند را به گونه یی ساخت که درجه ی شباهت آن با گروه  $x_k^t$  از جواب والد دقیقاً برابر  $z_{ik}^t$  شود، از عملگر « $\approx$ » استفاده شده است. به علاوه از تابع چگالی احتمال بتا می توان به جای تابع چگالی نرمال استفاده کرد. زیرا دارای انعطاف پذیری و قابلیت مدل سازی چولگی بوده و دامنه ی آن بازه  $[0, 1]$  است (توجه کنید  $1 \leq Dis(\cdot, \cdot) \leq 0$ ). براساس رابطه ی ۴۰ می توان نوشت:

$$Dis(y_{ik}^t, x_k^t) \cong Beta_{ik}(\alpha^t, \beta) \quad (41)$$

که در آن  $Beta_{ik}(\alpha^t, \beta)$  یک عدد تصادفی بتا به ازای خودروی حامل  $k$  در جواب فرزند  $i$  در تکرار  $t$  است.  $\alpha^t$  پارامتر استراتژی است که در تکرارهای متوالی به روزرسانی می شود. بر اساس معادلات ۳۹ و ۴۱ داریم:

$$Dis(y_{ik}^t, x_k^t) = 1 - n_{ik}^t / |x_k^t| \cong Beta_{ik}(\alpha^t, \beta) \Rightarrow n_{ik}^t = \lfloor 1 - Beta_{ik}(\alpha^t, \beta) |x_k^t| \rfloor \quad (42)$$

که در آن  $n_{ik}^t$  تعداد سفارشات درون خودروی حامل  $k$  در جواب والد است که مستقیماً به خودروی حامل  $k$  در جواب فرزند انتقال می یابد. بنابراین،  $|x_k^t| - n_{ik}^t$  سفارش که درون خودروی حامل  $k$  در جواب والد هستند، به بلاتکلیف مانده و در خلال فاز وراثت به جواب فرزند انتقال نمی یابد. پس از اتمام فاز وراثت، مجموعه ی تمام سفارشات بلاتکلیف در فاز تخصیص مجدد، تکلیف شان مشخص شده و توسط الگوریتم «بهترین برازش» به خودروهای حامل موجود یا جدید تخصیص می یابد. جزئیات الگوریتم تولید جواب جدید در ادامه آمده است.

#### • الگوریتم تولید جواب جدید (NSG)

##### شروع

##### گام ۱ فاز وراثت

فرض کنید  $x_k^t$  مجموعه ی سفارشات تخصیص یافته به خودروی حامل  $k$  در جواب  $X^t$  که یک گروه بندی شدنی از سفارشات درون خودروهای حامل است، در تکرار  $t$  باشد. از میان خودروهای حامل مستعمل در جواب  $X^t$ ، خودروی حامل  $h$  را به تصادف انتخاب کرده و مقدار  $|x_h^t| - n_{ih}^t = \lfloor 1 - Beta_{ih}(\alpha^t, \beta) |x_h^t| \rfloor$  را محاسبه کنید؛ تعداد  $n_{ih}^t$  سفارش را از  $x_h^t$  انتخاب کرده و آنها را به  $y_{ih}^t$  تخصیص دهید. با احتمال ۵۰٪، انتخاب سفارشات به تصادف صورت می پذیرد. در غیر این صورت، سفارشاتنی که وزن بیشتری دارند در اولویت قرار دارند؛

$$g_{ih}^t \leftarrow x_h^t \setminus y_{ih}^t$$

به ازای  $k$  از  $|X^t|$

اگر  $k \neq h$

$$y_{ik}^t \leftarrow x_k^t$$

پایان اگر

پایان به ازای

##### گام ۲ (فاز تخصیص مجدد)

با استفاده از الگوریتم «بهترین برازش»، هر یک از سفارشات درون  $y_{ih}^t$  را به یکی از خودروهای حامل موجود یا جدید تخصیص داده و جواب فرزند  $Y_i^t$  را تولید کنید.

پایان

#### ۴.۴. ساز و کار بررسی شدنی بودن طرح بارگیری سفارشات درون

##### خودروهای حامل

چنان که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، شدنی بودن طرح بارگیری از نظر محدودیت وزن در باکس<sup>†</sup> بررسی می‌شود.

هنگامی که در الگوریتم «بهترین بارش» افزودن یک سفارش به خودروی حامل صورت می‌پذیرد، ابعاد ULC می‌تواند به صورت  $nl_m, nw_m$  و  $\lceil f_m / (nl_m nw_m) \rceil$  تعیین شود. این مقادیر می‌توانند از طریق حل سیستم معادلات و نامعادلات زیر که از آن به عنوان بارگیری دو بعدی سفارشات با شکل چیدمان قابل تغییر درون یک خودروی حامل (۲DSVSCOL)<sup>۸</sup> تعبیر می‌شود، تعیین شوند (§ را در شکل ۴ ببینید).

$$x_{sm} - x_{sm'} \leq L_e(1 - a_{m,m'}) - nl_m p w_m \quad m, m' \in M_e, m \neq m' \quad (43)$$

$$y_{sm} - y_{sm'} \leq W_e(1 - b_{m,m'}) - nw_m p l_m \quad m, m' \in M_e, m \neq m' \quad (44)$$

$$x_{sm} \leq L_e - nl_m p w_m \quad m \in M_e \quad (45)$$

$$y_{sm} \leq W_e - nw_m p l_m \quad m \in M_e \quad (46)$$

$$a_{m,m'} + a_{m',m} + b_{m,m'} + b_{m',m} \geq 1 \quad m, m' \in M_t, \quad (47)$$

$$nl_m = \sum_{r=1}^{r_{\max}} 2^{r-1} * bl_{m,r} \quad m \in M_e \quad (48)$$

$$nw_m = \sum_{s=1}^{s_{\max}} 2^{s-1} * bw_{m,s} \quad m \in M_e \quad (49)$$

$$bl_{w_{m,r,s}} \leq (bl_{m,r} + bw_{m,s}) / 2 \quad m \in M_e, r = 1, \dots, r_{\max}, s = 1, \dots, s_{\max} \quad (50)$$

$$bl_{w_{m,r,s}} \geq (bl_{m,r} + bw_{m,s}) - 1 \quad m \in M_e, r = 1, \dots, r_{\max}, s = 1, \dots, s_{\max} \quad (51)$$

$$\sum_{r=1}^{r_{\max}} \sum_{s=1}^{s_{\max}} 2^{r+s-2} * bl_{w_{m,r,s}} \geq \lceil f_m / N h_{m,e} \rceil \quad m \in M_e \quad (52)$$

$$\sum_{r=1}^{r_{\max}} \sum_{s=1}^{s_{\max}} 2^{r+s-2} * bl_{w_{m,r,s}} - (1 - \varepsilon)nw_m \leq \lceil f_m / N h_{m,e} \rceil \quad m \in M_e \quad (53)$$

$$a_{m,m'}, b_{m,m'}, bl_{m,r}, bw_{m,s}, bl_{w_{m,r,s}} \in \{0, 1\}$$

$$x_{sm}, y_{sm} \geq 0 \quad nl_m, nw_m \geq 0, \text{ integer} \quad (54)$$

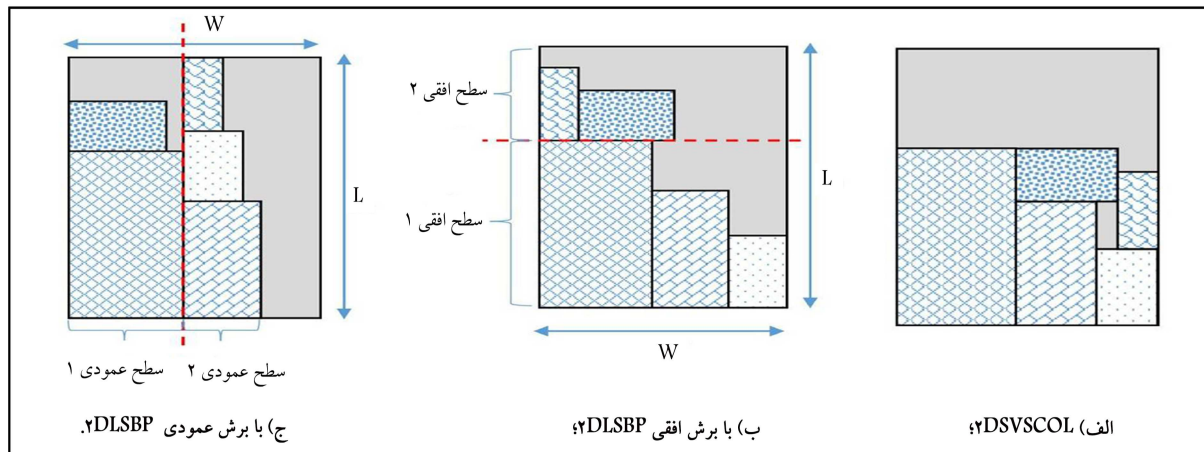
در محدودیت‌های فوق،  $s_{\max} = \left\lceil \log_2 \frac{W_e}{p l_m} + 1 \right\rceil$  و  $r_{\max} = \left\lceil \log_2 \frac{L_e}{p w_m} + 1 \right\rceil$ ، مجموعه سفارشات تخصیص یافته به خودروی حامل  $e$ ،  $L_e$  و  $W_e$  به ترتیب طول و عرض فضای بارگیری خودروی حامل  $e$  هستند. خاطرنشان می‌شود که مجموعه محدودیت‌های ۴۳ تا ۵۴ قابل مقایسه با محدودیت‌های ۲۲ تا ۲۶، ۲۸، ۳۱ و ۳۷ هستند. تنها تفاوت آن است که در این‌جا با مسئله بارگیری، فقط درون یک خودروی حامل مواجه‌ایم و از این رو، اندیس  $k$  دیگر وجود نخواهد داشت. به علاوه، در این‌جا محتویات خودروی حامل معلوم بوده

و نیازی به استفاده از متغیرهای تخصیص سفارش به خودروی حامل نیست. مجموعه محدودیت‌های ۲DSVSCOL باید به تعداد زیاد  $O(nm \times nk)$  بار در بدترین حالت در هر بار اجرای الگوریتم «بهترین بارش»، و بنابراین هزاران بار در هر بار اجرای الگوریتم GES حل شوند. نتایج محاسباتی اولیه نشان از آن دارند که استفاده از این مجموعه محدودیت‌ها برای بررسی شدن بودن طرح بارگیری، از نظر محاسباتی به صرفه نیست. به منظور چاره‌جویی برای ترمیم این ضعف عملکردی، یک روش ابتکاری کارا برای بررسی شدنی بودن طرح بارگیری معرفی می‌شود. البته این روش ابتکاری از خاصیت کامل بودن برخوردار نبوده و ممکن است هنگامی که طرح بارگیری شدنی است، اعلام نشدنی بودن کند.

ایده‌ی روش ابتکاری مورد نظر بر اساس تبدیل مسئله بارگیری، که توسط مجموعه محدودیت‌های ۲DSVSCOL توصیف می‌شود، به یک مسئله بسته‌بندی سطح بندی شده اقلام در یک ظرف دوبعدی (۲DLSBP)<sup>۹</sup> است. هر جواب شدنی برای ۲DLSBP، یک جواب شدنی برای ۲DSVSCOL است.

مسئله ۲DLSBP به صورت زیر قابل تعریف است. یک مجموعه از اقلام مستطیل شکل با طول  $l_i$  و عرض  $w_i$  را در نظر بگیرید. یک ظرف مستطیل شکل نیز با طول  $L$  و عرض  $W$  در نظر بگیرید. هدف بسته‌بندی تمامی اقلام داخل ظرف (بدون هم‌پوشانی و چرخش) به گونه‌ای است که تمامی اقلام از چپ به راست و در ردیف‌هایی که تشکیل یک سطح می‌دهند چیده شوند. درون هر سطح اقلام به گونه‌ای چیده می‌شوند که کف آنها تراز باشد. سطح اول در منتهی الیه پایینی ظرف قرار می‌گیرد و طول بزرگ‌ترین مستطیل در سطح قبلی، کف سطح بعدی را تعیین می‌کند (شکل ۵ ب). یک بسته‌بندی شدنی به گونه‌ای است که مجموع طول‌های بلندترین اقلام در سطوح مختلف از  $L$  کم‌تر باشد. به علاوه در هر سطح، مجموع عرض‌های مستطیل‌های قرار گرفته در آن سطح باید از  $W$  کم‌تر باشد. شکل‌های ۵ الف و ۵ ب، ترتیب طرح بسته‌بندی حاصل از ۲DSVSCOL و ۲DLSBP را نشان می‌دهد. در شکل ۵ ب، سطوح روی یکدیگر از طریق برش‌های افقی تشکیل می‌شوند. البته به طریقی دیگر نیز می‌توان یک جواب برای ۲DSVSCOL از طریق حل ۲DLSBP به دست آورد. چنان که در شکل ۵ ج نشان داده شده است، ایده اصلی استفاده از برش‌های عمودی است. در این شکل سطوح از چپ به راست کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. اولین سطح به صورت عمودی، روی دیواره سمت چپ ظرف قرار می‌گیرد و انتهای عرض مستطیلی که عریض‌ترین مستطیل در سطح است، نقطه‌ی شروع سطح بعدی است. در این‌جا یک بسته‌بندی شدنی به گونه‌ای است که مجموع عرض‌های عریض‌ترین مستطیل‌ها در سطوح مختلف از مقدار  $W$  تجاوز نکند. درون هر سطح نیز مجموع طول‌های مستطیل‌های قرار گرفته در آن سطح نباید از  $L$  متجاوز شود.

تمامی آنچه که تاکنون به دست آورده‌ایم آن است که به جای حل سیستم نامعادلات ۲DSVSCOL، که کار ساده‌ی نیست، می‌توان یک تعداد مسئله ۲DLSBP را بر اساس منطق سطح‌بندی با برش‌های افقی و عمودی حل کرد. به این ترتیب که تعدادی ULC با اشکال مختلف برای هر سفارش به صورت تصادفی تولید شده و اقلام مستطیل شکل نظیر آنها (در سیستم مختصات  $x-y$ )، توسط حل دو نمونه مسئله ۲DLSBP با برش‌های افقی و عمودی بسته‌بندی می‌شوند. این فرایند  $K$  بار تکرار می‌شود. اگر یکی از این طرح‌های بسته‌بندی شدنی باشد، آنگاه مجموعه محدودیت‌های ۲DSVSCOL هم شدنی خواهد بود. برای حل مسئله ۲DLSBP با برش‌های افقی یا عمودی،



شکل ۵. یک بسته‌بندی شدنی بر اساس قسمت‌های الف، ب و ج.

از الگوریتم‌های بهترین بارزاش کاهشی (BFD) <sup>۱۰</sup> به صورت زیر استفاده می‌شود. ساختار کلی الگوریتم بررسی شدنی بودن طرح بارگیری (LCF) <sup>۱۱</sup> در ادامه آمده است.

#### • الگوریتم LFC

##### شروع

مقادیر اولیه را برای  $K, N h_{m,e}, f_m, W_e, L_e$  و  $M_e$  تعیین کنید؛

به ازای هر سفارش  $m \in M_e$

به ازای  $i$  از ۱ تا  $N h_{m,e}$

$$l_i \leftarrow \left\lceil \left\lfloor \frac{f_m}{N h_{m,e}} \right\rfloor / i \right\rceil$$

$$w_i \leftarrow i$$

زوج مرتب  $(l_i, w_i)$  را ذخیره کنید؛

پایان به ازای

پایان به ازای

به ازای  $k$  از ۱ تا  $K$

به ازای هر سفارش  $m \in M_e$

یکی از زوج مرتب‌های ذخیره شده برای سفارش  $m$  را به تصادف انتخاب کرده

و آن را به صورت  $(a, b)$  در نظر بگیرید؛

$$nl_m \leftarrow a$$

$$nw_m \leftarrow b$$

پایان به ازای

اگر  $rand < 0.5$

الگوریتم BFDH را اجرا کنید؛

مجموع طول‌های بلندترین مستطیل‌های واقع در سطوح

$$L_T \leftarrow$$

$$L_T < L_e$$

طرح بارگیری شدنی  $\leftarrow$  خروجی؛

الگوریتم را متوقف کرده و خارج شوید؛

پایان اگر

در غیر این صورت

الگوریتم BFDV را اجرا کنید؛

مجموع عرض‌های عریض‌ترین مستطیل‌های واقع در سطوح عمودی  $W_T \leftarrow$

#### • الگوریتم BFD با برش افقی (BFDH) یا برش عمودی (BFDV)

##### شروع

مقادیر اولیه را برای  $W_e, L_e, pw_m, pl_m, nl_m, nw_m, f_m$  و  $M_e$  تعیین کنید؛

اگر در حال اجرای الگوریتم BFDH هستید

ظرفیت سطح  $W_e \rightarrow$

در غیر این صورت اگر در حال اجرای الگوریتم BFDV هستید

ظرفیت سطح  $L_e \rightarrow$

پایان اگر

به ازای هر سفارش در  $M_e$ ، ULC نظیران را با ابعاد  $nl_m \times nw_m \times \left\lceil \frac{f_m}{nl_m \times nw_m} \right\rceil$  در نظر بگیرید؛

تصویر ULC‌های مربوط به سفارشات را در صفحه  $x-y$  به دست آورده و

مستطیل‌های نظیر آنها را در نظر بگیرید (شایان ذکر است که ابعاد یک ULC

برحسب تعداد پالت و ابعاد مستطیل‌های نظیر آنها در صفحه  $x-y$  برحسب متر

بیان می‌شود)؛

مستطیل‌ها را برحسب مقدار  $nl_m pw_m$  (در الگوریتم BFDH) یا

مقدار  $nw_m pl_m$  (در الگوریتم BFDV) از بزرگ به کوچک مرتب کنید؛

مستطیل  $m$  را از ابتدای لیست برداشته و آن را در نخستین سطح افقی (در الگوریتم

BFDH) یا سطح عمودی (در الگوریتم BFDV) که دارای کمینه مقدار ظرفیت

سطح باقی‌مانده‌ی بزرگ‌تر از مقدار  $nw_m pl_m$  (در الگوریتم BFDH) یا مقدار

$nl_m pw_m$  (در الگوریتم BFDV) است قرار دهید. اگر این مستطیل در هیچ یک

از سطوح افقی (در الگوریتم BFDH) یا سطح عمودی (در الگوریتم BFDV)

موجود قرار نگرفت، یک سطح افقی (در الگوریتم BFDH) یا سطح عمودی (در

الگوریتم BFDV) جدید روی بالاترین سطح (در الگوریتم BFDH) یا در سمت

راست آخرین سطح عمودی (در الگوریتم BFDV) ایجاد کرده و مستطیل مربوطه

را در آن قرار دهید. این گام را تا وقتی که تمامی مستطیل‌ها به یک سطح تخصیص

یابند ادامه دهید؛

پایان

اگر  $W_T < W_e$

طرح بارگیری شدنی ← خروجی؛

الگوریتم را متوقف کرده و خارج شوید؛

پایان اگر

پایان اگر

پایان به ازای

پایان

#### ۵.۴. ساز و کار بررسی شدنی بودن مسیر خودروهای حامل

چنان که قبلاً طرح شد، استراتژی اتخاذ شده در الگوریتم GES، حفظ شدنی بودن جواب‌ها و عدم تولید جواب‌های نشدنی در خلال اجرا است. با فرض معلوم بودن محتویات یک خودروی حامل، هنگامی که طرح بارگیری شدنی باشد (بخش ۴-۴ را ببینید)، نوبت به بررسی شدنی بودن مسیر از نقطه نظر پنجره‌های زمانی می‌رسد (۴ را در شکل ۴ ببینید).

همانند آنچه که در مورد بررسی شدنی بودن طرح بارگیری صورت پذیرفت، بررسی شدن بودن مسیر می‌تواند به دو طریق صورت پذیرد. نخستین روش براساس حل مدل ریاضی مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد با پنجره‌ی زمانی برای سفارشات است. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط زیر به تعیین مسیر بهینه برای یک خودروی حامل با محتویات معلوم می‌پردازد. از آن‌جا که این مدل تنها برای یک خودروی حامل حل می‌شود (خودروی حامل  $e$ )، از اندیس  $k$  صرف‌نظر می‌شود.

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I'} \sum_{j \in I'} (\lambda + \rho_{ij} DP) \cos t_{i,j,e} X_{i,j} \quad (55)$$

$$s.t. \quad \sum_{j \in I'} X_{i,j} = 1 \quad i \in I' \quad (56)$$

$$\sum_{i \in I'} X_{i,j} = 1 \quad i \in I' \quad (57)$$

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1 \quad i \in I', h \in I', i, j \geq 2, i \neq j \quad (58)$$

$$X_{i,i} = 0 \quad i \in I' \quad (59)$$

$$\sum_{i \in I', i \neq 1} \sum_{j \in I', i \leq ns' + 1, j > ns' + 1} X_{i,j} \leq 1 \quad (60)$$

$$T_i + \sum_{m \in O'_i} LT_m f_m + \sum_{m \in D'_i} UT_m f_m + time_{i,j,e} \quad i \in I', j \in I',$$

$$\leq T_j + M_r(1 - X_{i,j}) \quad j \neq 1, i \neq j \quad (61)$$

$$T_j \geq T_i \quad m \in M_e, i = Orig_m, j = Dest_m \quad (62)$$

$$T_i \geq lb_m \quad m \in M_e, i = Orig_m, \quad (63)$$

$$T_i \leq ub_m \quad m \in M_e, i = Dest_m \quad (64)$$

$$X_{i,j} \in \{0, 1\}, T_i, u_i \geq 0 \quad (65)$$

در مدل ریاضی فوق، از متغیر  $u_i$  برای حذف زیرشبه‌گه استفاده می‌شود.  $n$  تعداد گره‌های ملاقات شده توسط خودروی حامل است.  $M_e$  مجموعه‌ی سفارشات تخصیص یافته به خودروی حامل  $e$  است. اگر کمینه یک پالت فازی درون خودروی

حامل موجود باشد، آن‌گاه  $P$  برابر ۱ است.  $I'$  مجموعه‌ی گره‌های مبدأ و مقصد متناظر با سفارشات درون خودروی حامل  $e$  است.  $ns'$  تعداد گره‌های مبدأ (تأمین‌کننده) منحصر به فرد متناظر با سفارشات است. سایر متغیرها نظیر همتهای خود در محدودیت‌های ۱ تا ۲۱ و پس از حذف اندیس  $k$  قابل تعریف هستند. چنان که پیش‌تر گفته شد، مدل ریاضی ۵۵ تا ۶۵ به بهینه‌سازی مسیر برای یک خودروی حامل با محتویات معلوم می‌پردازد. این مدل می‌تواند هزینه‌ی حمل و نقل مرتبط با مسیر بهینه را تعیین کند. همچنین، از این مدل می‌توان برای بررسی این که آیا پس از افزودن یک سفارش به محتویات خودروی حامل، محدودیت‌های پنجره‌ی زمانی برآورده می‌شوند یا خیر استفاده کرد. بدین منظور کافی است تنها یک جواب شدنی برای مجموعه‌ی محدودیت‌های ۵۶ تا ۶۵ یافته شود.

هنگامی که تعداد سفارشات تخصیص یافته به خودروی حامل اندک باشد، استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای بررسی شدنی بودن مسیر می‌تواند از نظر محاسباتی به صرفه باشد؛ در غیر این صورت استفاده از آن توصیه نمی‌شود. شایان ذکر است که مدل ۵۵-۶۵ باید به تعداد زیاد  $O(nm \times nk)$  بار در بدترین حالت در هر بار اجرای الگوریتم «بهترین برآزش» و بنابراین هزاران بار در هر بار اجرای الگوریتم GES حل شود. نتایج محاسباتی اولیه نشان از آن دارند که استفاده از این روش از نظر محاسباتی به صرفه نیست. روش دیگری که برای بررسی شدنی بودن محدودیت‌های پنجره‌های زمانی سفارشات و تعیین مسیر بهینه وجود دارد براساس شمارش کامل است. در این روش تمامی مسیرهای ممکن برای خودروی حامل ساخته شده و مسیرهای نشدنی برحسب محدودیت‌های پنجره‌ی زمانی حذف می‌شوند. در نهایت، مسیر شدنی که دارای کم‌ترین هزینه است به عنوان مسیر بهینه انتخاب می‌شود. خوشبختانه در عمل، سیستم توزیع قطعات خودرو دارای این ویژگی است که تعداد گره‌های تأمین‌کننده/کارخانه مونتاژ که توسط یک خودروی حامل طی یک روز ملاقات می‌شوند نسبتاً اندک است و بنابراین، روش شمارش کامل می‌تواند از نظر محاسباتی فوق‌العاده به صرفه باشد.

#### ۵. نتایج محاسباتی

در این بخش به سنجش اثربخشی مدل برنامه‌ریزی ریاضی و الگوریتم معرفی شده با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از اداره لجستیک داخلی گروه خودروسازی سایپا می‌پردازیم. به طور خاص می‌خواهیم به بررسی اثربخشی سیستم لجستیک میلکران در قیاس با استراتژی ارسال مستقیم بپردازیم. در این بخش نخست در خصوص تحلیل داده‌های دنیای واقعی و رویه‌ی تولید نمونه مسائل بحث می‌شود. سپس از نرم‌افزار ۲۴.۱.۳ GAMS/CPLEX برای حل مدل MILP روی یک رایانه‌ی دسکتاپ با مشخصات ۳.۴۰ GHz و ۳۲ گیگابایت رم استفاده شده و نتایج محاسباتی گزارش می‌شوند. به علاوه الگوریتم GES در محیط نرم‌افزار متلب برنامه‌نویسی شده و عملکرد آن گزارش می‌شود.

#### ۱.۵. مطالعه موردی در گروه خودروسازی سایپا

اداره‌ی لجستیک داخلی در گروه خودروسازی سایپا، مسئول فراهم آوردن داده‌های مورد نیاز راجع به فهرست تأمین‌کنندگان، فهرست قطعات سفارشات همراه با مشخصه‌هایی نظیر تعداد پالت‌های سفارش، وزن سفارش، نوع پالت و غیره، پنجره‌های زمانی و فهرست نقاط تحویل است. مسئله عبارت است از جمع‌آوری تمامی سفارشات از تأمین‌کنندگان و توزیع آنها به انبارهای مرکزی یا کارخانجات مونتاژ. به طور خاص،

جدول ۲. مشخصات فضای بارگیری ناوگان.

خودرو	ارتفاع (m)	عرض (m)	طول (m)	ظرفیت وزنی (Kg)
تریلر	۲/۵	۲/۶	۱۲/۵	۲۲۰۰۰
خاور	۲/۴	۲/۲	۶	۶۰۰۰
وانت	۱/۸	۱/۷	۲/۳	۱۸۰۰

رسم شده است. در این نمودار از طیف رنگی سفید تا سیاه برای تبیین بزرگی شدت حمل و نقل استفاده شده است. سیاه به منزله حمل و نقل زیاد و سفید به معنی حمل و نقل صفر است. مابین این دو طیف شدت رنگ با بزرگی میزان حمل و نقل متناسب است. در شکل ۷ می‌توان وجود قانون پارتو را ملاحظه کرد. عمده‌ی جریان تأمین توسط تعداد اندکی از نواحی پشتیبانی می‌شود. ۸۰ درصد محموله‌ها از ۱۲ ناحیه اول (از بین ۶۰ ناحیه) به سمت ۳ کارخانه در کاشان، تهران و ساوه و انبارهای مرکزی ارسال می‌شوند. بدین ترتیب می‌توان استفاده از سیستم توزیع میلکران را برای این ۱۲ ناحیه توصیه کرد و از گستره‌ی شبکه‌ی تأمین در برنامه‌ریزی توزیع کاست. چنان که در دستورالعمل حمل و نقل سایپا آمده است، سه نوع وسیله نقلیه برای حمل و نقل محموله‌های سفارشات مورد استفاده قرار می‌گیرند. مشخصات وسایل نقلیه در جدول ۲ آمده است.

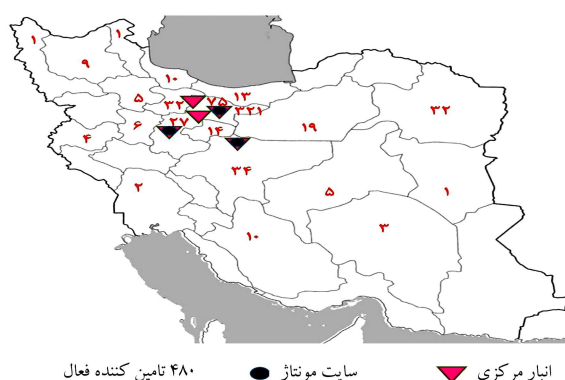
## ۲.۵. تولید مسائل نمونه

تولید مسائل نمونه به طریقی صورت می‌پذیرد که شرایط دنیای واقعی را متبادر سازد. برای تولید یک نمونه مسئله، به یک پارامتر به نام تعداد سفارشات نیاز داریم. به ازای هر سفارش، یک شماره به تصادف از میان تمامی کدهای موجودی موجود در پایگاه داده انتخاب می‌شود. براساس این کد موجودی، کد تأمین‌کننده و مشخصات پالت مربوط به قطعه تعیین می‌شود. سپس تعداد قطعات ارسالی (و بنابراین تعداد پالت‌های مورد نیاز) و کد محل تحویل تعیین می‌شوند. در نهایت پنجره‌های زمانی برای سفارشات در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب، نمونه مسائل تولید شده می‌تواند به نحو مناسب، انعکاسی از مسئله‌ی توزیع روزانه قطعات در شبکه‌ی لجستیک باشد. ۳۰ نمونه مسئله به طور تصادفی تولید شده است که ابعاد آنها برحسب تعداد سفارشات بین ۶ تا ۱۰۰ سفارش، متغیر است ( $nm = 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 50, 100$ ).

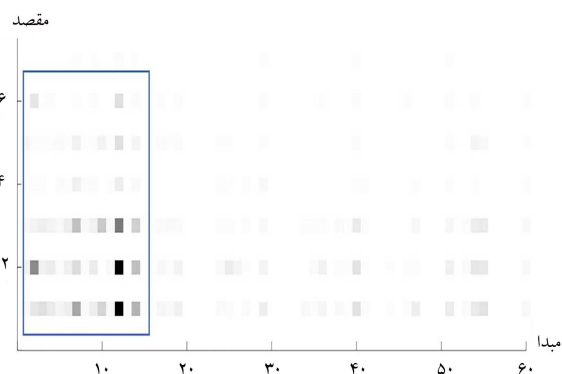
## ۳.۵. نتایج محاسباتی

در این بخش، عملکرد مدل ریاضی و الگوریتم GES روی نمونه مسائل تولید شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهای الگوریتم GES به صورت زیر تنظیم شده اند. بیشینه تعداد تکرار = ۲۰۰۰،  $\lambda = 10$ ،  $r = 2$ ،  $\alpha = 0.997$ ،  $\beta = 1$ ،  $\alpha = 5$ ،  $K = 10$  الگوریتم ۲۰۰۰۰ جواب شدنی را قبل از خاتمه کار تولید و ارزیابی می‌کند. نمونه‌ی مسائل تولید شده توسط نرم‌افزار GAMS/CPLEX و الگوریتم GES حل شده و مقادیر تابع هدف و زمان‌های اجرا در جدول ۳ گزارش شده است. برای حل‌کننده GAMS/CPLEX، تنها مقادیر تابع هدف و زمان‌های اجرا گزارش می‌شوند. برای GES، مقادیر کمینه، متوسط، بیشینه و ضریب تغییرات (C.V) مقادیر تابع هدف در ۱۰ بار اجرا گزارش می‌شوند. شرط خاتمه برای GAMS/CPLEX، ۳۶۰۰ ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که برای مسائل با ابعاد بسیار کوچک با ۶ سفارش، مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط معرفی شده می‌تواند به جواب بهینه برسد.



شکل ۶. تعداد و توزیع تأمین‌کنندگان فعال در استان‌های مختلف کشور.



شکل ۷. شدت جریان پالت میان نواحی مختلف.

جواب مسئله عبارت است از تعیین تعداد خودروهای حامل مورد استفاده، سفارشاتى که باید توسط هر خودروی حامل برداشت و تحویل شوند، نحوه چیدمان پالت‌های سفارش درون خودروهای حامل و برنامه‌ریزی مسیر حرکت خودروهای حامل.

شکل ۶ بیان‌گر توزیع جغرافیایی تأمین‌کنندگان در سرتاسر کشور است. ۴۸۰ تأمین‌کننده‌ی فعال، ۳ کارخانه‌ی مونتاژ و ۵ انبار مرکزی را تأمین می‌کنند. البته سایر مقاصد تحویل نیز وجود دارند که در این شکل به نمایش در نیامده است. اداره‌ی لجستیک داخلی، نقشه‌ی کشور را به شصت ناحیه تقسیم کرده است. تأمین‌کنندگان درون هر ناحیه، تشکیل یک خوشه می‌دهند. هزینه‌های حمل و نقل، بر مبنای داده‌های ناحیه‌ی برای هر نوع خودروی حامل حساب می‌شود.

چنان که پیش‌تر اشاره شد، از استراتژی ارسال مستقیم توسط سایپا استفاده می‌شود. این استراتژی به منظور کاهش پیچیدگی‌های مدیریت ارسال اقتباس شده است. در استراتژی ارسال مستقیم، هریک از تأمین‌کنندگان خود مسئولیت ارسال مستقیم سفارشات به نقاط تحویل را بر عهده دارد؛ بدون این که خودروی حامل ارسالی را با تأمین‌کننده دیگری به اشتراک بگذارد. بنابراین، روانه‌سازی خودروهای حاملی با ظرفیت نیمه‌پر به تعدد رخ می‌دهد. نتایج ناشی از تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که ۹۲ درصد از محموله‌های ارسالی از طریق ارسال مستقیم تحویل شده‌اند و مابقی از محل انبار ارسال شده‌اند.

در ادامه، به تحلیل درجه‌بندی قطعاتی که در شبکه‌ی لجستیک جریان دارند می‌پردازیم. حجم قابل توجهی از قطعات (۴۱٪) از درجه‌ی B هستند؛ یعنی قطعات با ابعاد نسبتاً کوچک و تقاضای نسبتاً ثابت. لجستیک میلکران برای توزیع قطعات این درجه مناسب است. برای تعیین شدت حمل و نقل (برحسب تعداد پالت) میان مبادی و مقاصد، یک نمودار شدت مطابق شکل ۷ با استفاده از داده‌های در دسترس

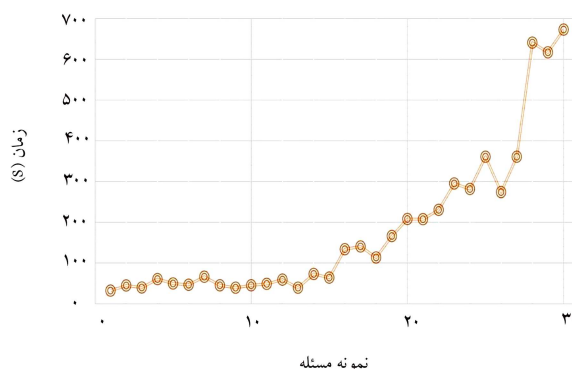
جدول ۳. نتایج مدل MILP، الگوریتم GES و استراتژی ارسال مستقیم.

نمونه مساله	تعداد سفارشات	MILP		GES					هزینه ارسال مستقیم ( $\times 10^3$ )	درصد کاهش در هزینه ارسال مستقیم
		مقدار تابع هدف ( $\times 10^3$ )	زمان (S)	کمینه ( $\times 10^3$ )	متوسط ( $\times 10^3$ )	پیشینه ( $\times 10^3$ )	CV (%)	زمان (S)		
۱	۶	۸۴۰۰	۱۱۰۹	۸۴۰۰	۸۴۰۰	۸۴۰۰	۰	۳۲.۳	۱۲۱۵	۳۰.۹
۲	۶	۶۹۰۰	۱۲۶۷	۶۹۰۰	۶۹۰۰	۶۹۰۰	۰	۴۴.۵	۱۲۴۵	۴۴.۶
۳	۶	۱۲۹۰۰	۳۵۱۸	۱۲۹۰۰	۱۲۹۰۰	۱۲۹۰۰	۰	۳۹.۸	۱۷۰۰	۲۴.۱
۴	۷	۷۳۵۰	۳۶۰۰	۷۳۵۰	۷۳۵۰	۷۳۵۰	۰	۶۰.۳	۱۱۰۰	۳۳.۲
۵	۷	۸۹۰۰	۳۶۰۰	۸۹۰۰	۸۹۰۰	۸۹۰۰	۰	۴۹.۶	۱۷۴۵	۴۹
۶	۷	۱۳۹۵۰	۳۶۰۰	۱۳۹۵۰	۱۳۹۵۰	۱۳۹۵۰	۰	۴۶.۷	۱۵۴۵	۹.۷
۷	۸	۱۸۹۵۰	۳۶۰۰	۱۸۹۵۰	۱۸۹۵۰	۱۸۹۵۰	۰	۶۶.۲	۱۹۰۰	۰.۳
۸	۸	۱۰۳۵۰	۳۶۰۰	۱۰۳۵۰	۱۰۳۵۰	۱۰۳۵۰	۰	۴۵.۲	۱۸۰۰	۴۲.۵
۹	۸	۷۳۵۰	۳۶۰۰	۷۳۵۰	۷۳۵۰	۷۳۵۰	۰	۳۹.۳	۱۱۱۰	۳۳.۸
۱۰	۹	۱۴۲۵۰	۳۶۰۰	۱۴۲۵۰	۱۴۲۵۰	۱۴۲۵۰	۰	۴۵.۳	۲۲۲۵	۳۶
۱۱	۹	۱۵۳۵۰	۳۶۰۰	۱۵۳۵۰	۱۵۳۵۰	۱۵۳۵۰	۰	۴۸.۸	۲۲۱۰	۳۰.۵
۱۲	۹	۱۴۵۵۰	۳۶۰۰	۱۳۹۵۰	۱۳۹۵۰	۱۳۹۵۰	۰	۵۹.۱	۱۵۰۰	۷
۱۳	۱۰	۱۵۰۰۰	۳۶۰۰	۱۴۵۵۰	۱۴۵۵۰	۱۴۵۵۰	۰	۳۹.۲	۱۸۰۰	۱۹.۲
۱۴	۱۰	۱۶۲۵۰	۳۶۰۰	۱۶۲۵۰	۱۶۲۵۰	۱۶۲۵۰	۰	۷۳.۲	۱۹۱۰	۱۴.۹
۱۵	۱۰	۱۱۸۰۰	۳۶۰۰	۱۱۸۰۰	۱۱۸۰۰	۱۱۸۰۰	۰	۶۳.۸	۱۵۱۰	۲۱.۹
۱۶	۲۰	-	۳۶۰۰	۲۳۳۰۰	۲۴۰۴۵	۲۴۹۰۰	۲.۴۶	۱۳۳.۷	۳۵۳۵	۳۴.۱
۱۷	۲۰	-	۳۶۰۰	۲۵۸۵۰	۲۶۵۲۰	۲۷۰۰۰	۱.۴۳	۱۴۰.۲	۳۶۱۵	۲۸.۵
۱۸	۲۰	-	۳۶۰۰	۲۵۳۵۰	۲۵۹۲۰	۲۶۵۵۰	۱.۷۴	۱۱۳.۴	۴۰۸۰	۳۷.۹
۱۹	۳۰	-	۳۶۰۰	۳۸۳۰۰	۳۹۵۶۵	۴۰۶۰۰	۱.۵۱	۱۶۶.۲	۵۲۰۵	۲۶.۴
۲۰	۳۰	-	۳۶۰۰	۳۷۸۰۰	۳۹۴۸۰	۴۱۰۰۰	۲.۳۳	۲۰۷.۷	۵۷۸۰	۳۴.۶
۲۱	۳۰	-	۳۶۰۰	۳۳۰۰۰	۳۴۲۵۵	۳۶۳۰۰	۲.۸۶	۲۰۷.۴	۴۷۲۵	۳۰.۲
۲۲	۴۰	-	۳۶۰۰	۴۷۰۵۰	۴۸۷۸۰	۵۰۳۵۰	۱.۹۹	۲۳۰.۲	۶۶۰۰	۲۸.۷
۲۳	۴۰	-	۳۶۰۰	۴۵۲۰۰	۴۷۱۲۰	۴۸۱۵۰	۱.۸۳	۲۹۵.۱	۷۳۸۰	۳۸.۸
۲۴	۴۰	-	۳۶۰۰	۴۶۸۰۰	۴۷۵۴۵	۴۸۳۰۰	۰.۹۲	۲۸۱.۵	۶۱۶۰	۲۴
۲۵	۵۰	-	۳۶۰۰	۵۷۹۰۰	۶۰۰۶۰	۶۳۰۰۰	۲.۹۹	۳۶۰.۷	۸۸۱۰	۳۴.۳
۲۶	۵۰	-	۳۶۰۰	۵۱۵۰۰	۵۶۰۷۵	۵۹۵۵۰	۴.۴۷	۲۷۳.۷	۸۹۹۵	۴۲.۷
۲۷	۵۰	-	۳۶۰۰	۵۶۲۵۰	۵۸۱۱۵	۵۹۸۰۰	۲.۱۴	۳۶۰.۷	۸۲۶۵	۳۱.۹
۲۸	۱۰۰	-	۳۶۰۰	۱۱۵۱۰۰	۱۱۸۵۹۰	۱۲۱۳۰۰	۱.۶۱	۶۴۰.۵	۱۶۹۲	۳۲
۲۹	۱۰۰	-	۳۶۰۰	۱۰۲۸۰۰	۱۰۷۲۴۰	۱۱۰۱۵۰	۲.۲۱	۶۱۶.۷	۱۴۶۷	۲۹.۹
۳۰	۱۰۰	-	۳۶۰۰	۱۱۸۲۵۰	۱۲۵۷۷۵	۱۳۲۴۵۰	۲.۹۹	۶۷۲.۵	۱۶۰۰	۲۶.۱
متوسط روی تمامی نمونه مسائل										۲۹/۲۵
متوسط روی نمونه مسائل غیر کوچک (۱۶-۳۰)										۳۲/۰۰

چنان که ملاحظه می‌شود، روی اغلب نمونه مسائل کوچک (۱۳ مسئله از ۱۵ مسئله)، بهترین مقدار تابع هدف یافته شده توسط GES با مقدار تابع هدف گزارش شده برای مدل MILP برابر است. روی دو نمونه مسئله باقی مانده، بهترین مقادیر یافته شده توسط الگوریتم GES از آنچه برای مدل MILP یافته شده بهتر است. نتایج نمایان‌گر آن است که با صرف مقدار زمان اندک، GES قادر به یافتن جواب‌های با کیفیت عالی و با ثبات عملکرد است. ثبات در عملکرد، با استناد به مقادیر صفر برای ضریب تغییرات قابل اثبات است. روی هر ۱۵ مسئله، GES مقادیری یکسان را برای تابع هدف در تمامی ۱۰ اجرا گزارش می‌کند. این سطح از

برای مابقی مسائل، بهینگی نتایج قابل تأیید نیست. با این حال، بهترین جواب‌های یافته شده توسط GAMS/CPLEX روی نمونه مسائل کوچک (مسائل ۱ تا ۱۵)، همگی یکسان یا نزدیک به جواب‌های یافته شده توسط الگوریتم GES هستند. تنها مورد استثنا نمونه مسائل ۱۲ و ۱۳ هستند. در این‌جا حل‌کننده‌ی GAMS/CPLEX پیش از رسیدن به جواب بهینه برای مدل MILP متوقف شده است. بنابراین می‌توان مطمئن بود که روی این دو نمونه مسئله، خروجی یافته شده برای مدل MILP قطعاً بهینه نیست. شایان ذکر است که GAMS/CPLEX قادر به یافتن هیچ جواب شدنی برای نمونه مسائل ۱۶-۳۰ در مدت ۳۶۰۰ ثانیه نیست.





شکل ۸. زمان اجرای الگوریتم GES روی ۳۰ نمونه مسئله.

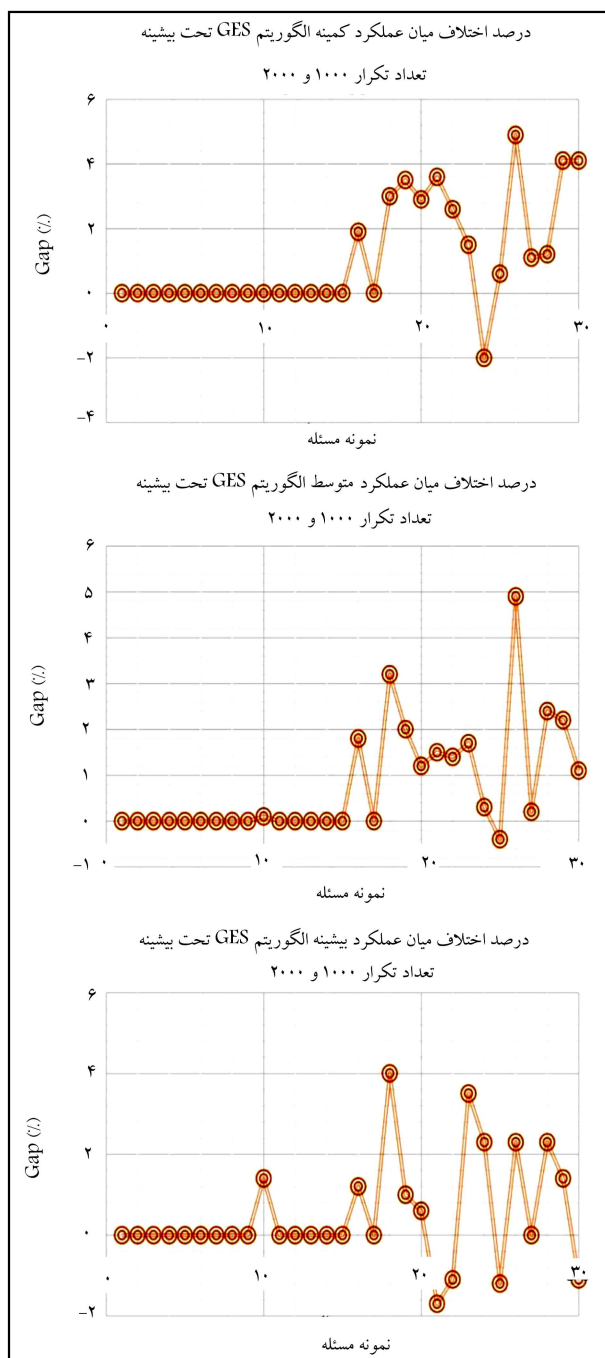
عملکرد نشان‌دهنده‌ی آن است که الگوریتم GES می‌تواند بهینه‌سازی را روی نمونه مسائل کوچک به نحو احسن انجام دهد.

نکته‌ی قابل توجه آن است که عملکرد الگوریتم GES به گونه‌یی است که مقدار ضرایب تغییرات (C.V) گزارش شده توسط آن بسیار کوچک است. ضریب تغییرات یک معیار استاندارد برای تعیین درصد پراکندگی است. مقادیر کوچک ضریب تغییرات بیان‌کننده آن است که رفتار جستجوی الگوریتم GES ثابت است. مقادیر ضریب تغییرات روی نمونه مسائل کوچک، همگی برابر صفر هستند. این امر مبین آن است که الگوریتم همواره قابلیت یافتن جواب یکسان را در اجراهای مختلف دارد. روی نمونه مسائل بزرگ‌تر، مقادیر ضریب تغییرات حول و حوش ۲ درصد نوسان می‌کنند. این مقدار به قدر کافی کوچک است که دلالت بر ثبات در عملکرد الگوریتم GES داشته باشد.

شکل ۸ روند حاکم بر زمان‌های اجرا را به نمایش می‌گذارد. زمان ثبت شده توسط الگوریتم GES روی هر نمونه مسئله، رسم شده است. نکته‌یی که در مورد زمان اجرا وجود دارد آن است که رفتار آن برحسب تعداد سفارشات خطی است. برای GES داریم  $T(nm) = 6/4903 \times nm + 0/054$  و ضریب  $R^2$  برابر  $0/9991$  است.  $T(nm)$  زمان اجرا برحسب تعداد سفارشات است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که زمان اجرای الگوریتم GES یک تابع خطی برحسب تعداد سفارشات است.

در جدول ۳، همچنین به مقایسه هزینه‌ی گزارش شده توسط الگوریتم GES برای مسئله‌ی لجستیک میله‌کران در قیاس با هزینه‌های ارسال مستقیم می‌پردازیم. از آن‌جا که نمونه مسائل ۱ تا ۳۰ به تصادف تولید شده‌اند، نتایج حاصل از اعمال استراتژی ارسال مستقیم روی آنها شبیه‌سازی شده است. البته اداره‌ی لجستیک سایپا نیز شیوه و نتایج این شبیه‌سازی را تأیید کرده است.

چنان که پیش‌تر ذکر شد، در استراتژی ارسال مستقیم هر تأمین‌کننده مسئول ارسال سفارشات مختص خود است. تأمین‌کننده می‌تواند تنها به تجمیع سفارشات که مقصد آنها در تهران است بپردازد. سفارشات که به سایت‌های مونتاژ در کاشان و ساوه ارسال می‌شوند نمی‌توانند در یک خودروی حامل قرار گیرند. از جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت که لجستیک میله‌کران از یک ظرفیت بالقوه برای کاهش هزینه‌ها برخوردار است. ستون آخر جدول ۳ درصد کاهش در هزینه‌های ارسال مستقیم را که از طریق الگوریتم GES قابل دست‌یابی است گزارش می‌کند. روی نمونه‌ی مسائل کوچک، مقدار درصد کاهش در هزینه‌ها از بسیار کم تا خیلی زیاد متغیر است. روی مسائل با ابعاد بزرگ‌تر، مقادیر درصد اختلاف از ثبات بیشتری برخوردارند. بر اساس نتایج به دست آمده روی نمونه مسائل غیرکوچک می‌توان دریافت که لجستیک



شکل ۹. مقایسه‌ی درصد اختلاف میان عملکرد الگوریتم GES تحت دو مقدار مختلف برای بیشترین تعداد تکرار.

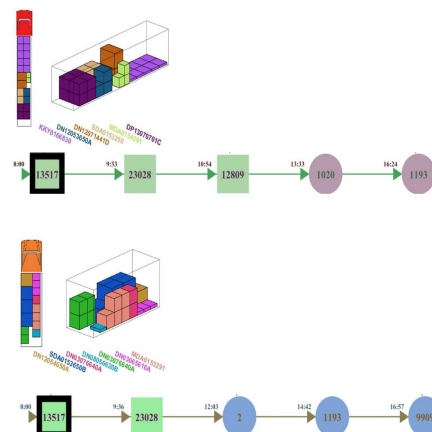
میله‌کران قابلیت کاهش ۳۲ درصدی در هزینه‌های تحمیل شده توسط استراتژی ارسال مستقیم را دارد.

به منظور بررسی تأثیر پارامتر بیشینه تعداد تکرار در عملکرد الگوریتم GES، بیشینه تعداد تکرار را از ۲۰۰۰ به ۱۰۰۰ کاهش داده و الگوریتم را روی تمام نمونه مسائل مجدداً اجرا می‌کنیم. درصد کاهش یا افزایش در مقادیر کمینه، متوسط و بیشینه‌ی مقدار تابع هدف، در شکل ۹ آمده است. مقادیر مثبت دلالت بر عملکرد بهتر الگوریتم تحت بیشینه تعداد تکرار برابر ۲۰۰۰ نسبت به ۱۰۰۰ دارد. چنان که



جدول ۴. نتایج روی مسائل با داده‌های واقعی.

مسئله	تعداد سفارشات	کمینه ( $\times 10^3$ )	متوسط ( $\times 10^3$ )	بیشینه ( $\times 10^3$ )	C.V (%)	هزینه‌ی ارسال مستقیم ( $\times 10^3$ )
۱	۵۳	۴۸۸۰۰	۵۴۱۳۰	۵۷۵۰۰	۴/۶۰	۹۲۸۰۰
۲	۴۴	۴۶۵۰۰	۴۸۵۸۰	۴۹۹۵۰	۲/۵۳	۷۷۵۰۰



شکل ۱۰. طرح بارگیری و مسیریابی برای دو خودروی حامل منتخب در جواب تولید شده توسط الگوریتم GES.

مشاهده می‌شود، انتخاب تعداد تکرارها برابر ۲۰۰۰، در کل عملکرد بهتری را برای الگوریتم به ارمغان می‌آورد. با این حال، قدر مطلق مقادیر اختلاف کم‌تر از ۵ درصد است. البته روی نمونه مسائل کوچک هیچ اختلافی وجود ندارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حتی انتخاب مقدار ۱۰۰۰ برای بیشترین تعداد تکرار می‌تواند نتایج رضایت‌بخشی را فراهم آورد.

### ۱.۳.۵. نتایج روی مسائل با داده‌های واقعی

دو نمونه مسئله با داده واقعی توسط الگوریتم GES حل شده و نتایج در جدول ۴ آمده است. نخستین مسئله شامل ۵۳ سفارش و دومین مسئله شامل ۴۴ سفارش است. چنان که مشاهده می‌شود، یک ظرفیت بالقوه برای کاهش هزینه‌های ارسال مستقیم وجود دارد. با در نظر گرفتن بهترین عملکرد، GES قابلیت کاهش ۴۷/۴٪ و ۴۰٪ در هزینه‌ها را برای مسئله‌ی ۱ و ۲ دارد. با در نظر گرفتن عملکرد متوسط، کاهش در هزینه‌ها به ترتیب برابر ۴۱/۷٪ و ۳۷/۳٪ است. در نهایت از نقطه‌نظر بدترین عملکرد، میزان کاهش به ترتیب برابر ۳۸٪ و ۳۵/۳٪ است.

در شکل ۱۰ طرح بارگیری و مسیریابی مربوط به دو خودروی حامل منتخب، در بهترین جواب‌یافته شده توسط الگوریتم GES، روی نمونه مسئله‌ی دوم با ۴۴ سفارش، نشان داده شده است. در این شکل، طرح بارگیری سه‌بعدی برای هر خودروی حامل و مسیر حرکت آن آمده است (مربع نماد گره تأمین‌کننده و دایره‌ها نمایانگر گره‌های انبار و کارخانجات موتناژ هستند). در جواب مربوطه از ۲ خودروی تریلر و ۹ خودروی خاور استفاده می‌شود. همچنین از هیچ خودروی وانتی استفاده نمی‌شود. به عنوان مثال، خودروی تریلر نخست به تأمین‌کننده‌ی ۱۳۵۱۷ مراجعه کرده و طبق برنامه‌ی برداشت، تعداد ۱۰ پالت از سفارش  $166820 \text{ KKY}$ ، ۲ پالت از سفارش  $71441 \text{ DN}$  و ۳ پالت از سفارش  $154291 \text{ MDA}$  را برمی‌دارد. سپس این تریلر در ساعت ۹:۳۳ دقیقه به محل سازنده‌ی ۲۸۰۲۳ رسیده و ۳ پالت از سفارش  $53650 \text{ DN}$  و ۴ پالت از سفارش  $153250 \text{ SD}$  برمی‌دارد. این

## ۶. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط و روش حل برای مسئله‌ی لجستیک میکران در صنعت خودروسازی ارائه شده است. مهم‌ترین مشخصه‌ی مدل‌سازی ارائه شده آن است که بارگیری سفارشات با شکل چیدمان قابل تغییر درون خودروهای حامل را مد نظر قرار می‌دهد. از آن‌جا که سفارشات تنها توسط تعداد پالت‌هایشان شناسایی می‌شوند، بارگیری آنها درون خودروهای حامل ممکن است در قالب اشکال مکعب شکل مختلف صورت پذیرد. به عنوان مثال یک سفارش با ۸ عدد پالت را می‌توان درون یک خودروی حامل در قالب یک مکعب یک‌پارچه با ابعاد  $4 \times 2 \times 1$  یا  $4 \times 2 \times 1$  یا  $2 \times 2 \times 2$  یا حتی  $3 \times 2 \times 2$  بارگیری کرد. انتخاب یکی از این اشکال برای سفارش و چیدمان پالت‌های آن درون خودروی حامل در قالب یک مکعب یک‌پارچه می‌تواند از طریق متغیرهای تصمیم صورت پذیرد. لازم به ذکر است که مجموعه‌ی اشکال قابل تولید برای یک سفارش، با تغییر نوع خودروی حامل تغییر می‌یابد که این خود بر پیچیدگی‌های مسئله هنگامی که ناوگان نامتجانس است، می‌افزاید. از این طرح بارگیری به عنوان طرح بارگیری دوبعدی با شکل قابل تغییر (SC2DL) یاد شد. سایر ملاحظات نظیر ناوگان نامتجانس، لحاظ کردن هزینه‌ی برگشت پالت‌های خالی و محدودیت‌های پنجره‌ی زمانی نیز در مدل گنجانده شدند.

با در نظر گرفتن ماهیت مسئله، یک الگوریتم استراتژی تکاملی گروه‌بندی معرفی شد که قادر به حل مسائل با ابعاد بزرگ‌تر است. همچنین از ایده‌ی «الگوریتم بهترین برازش» برای دست‌یابی به یک الگوریتم ابتکاری سازنده برای تولید جواب و حصول اطمینان از شدنی بودن آن (از نقطه‌نظر محدودیت‌های بارگیری و مسیریابی) استفاده شد. عملکرد روش‌های معرفی شده با استفاده از داده‌های دنیای واقعی (که از اداره لجستیک گروه خودروسازی سایپا جمع‌آوری شده‌اند) مورد سنجش واقع شد. نتایج محاسباتی گسترده، حکایت از ارزشمندی سیستم لجستیک میکران در قیاس با استراتژی ارسال مستقیم دارد. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های دلالت بر آن دارد که یک پتانسیل بالقوه برای کاهش هزینه‌های ناشی از ارسال مستقیم، به میزان ۳۲ درصد به طور متوسط، از طریق استفاده از سیستم لجستیک میکران وجود دارد.

نتایج این مطالعه تأییدی است بر این حقیقت که استفاده از تکنیک‌ها و مفاهیم تحقیق در عملیات می‌تواند منجر به حصول نتایج مطلوب در امر کاهش هزینه‌ها

شود. نتایج این تحقیق می‌تواند مدیران را در صنعت خودرو سازی و سایر صنایع مشابه، برای استفاده از تکنیک‌های تحقیق در عملیات قانع کند.

### ۱.۶. محدودیت‌های تحقیق

- اگرچه استفاده از منطق SCYDL به صرفه‌تر از منطق مورد استفاده توسط اداره لجستیک سایپاست، کاربرد آن در عمل پیچیده‌تر بوده و نیازمند آن است که بارگیری سفارشات درون خودروی حامل دقیقاً مشابه با آنچه که برنامه‌ریزی شده است باشد. در غیر این صورت، چیدمان بار درون خودروی حامل ممکن است در عمل نشدنی باشد.

- نکته‌ی دیگری که در عمل با آن مواجه‌ایم، مفهوم ممنوع بودن جابه‌جایی بار است. به این معنی که پالت‌ها نباید پس از بارگیری درون خودروی حامل و پیش از تخلیه، جابه‌جا شود. مجموعه‌ی محدودیت‌هایی که برای اعمال شرایط منطق بارگیری SCYDL معرفی شدند، مانع از ممنوعیت جابه‌جایی بار نمی‌شوند.

- در رویکرد معرفی شده در این مقاله، بارگیری سفارشات با شکل چیدمان قابل تغییر درون خودروهای حامل، در فضای دوبعدی صورت می‌پذیرد. می‌توان این امر را چنین توجیه کرد که به صورت پیش‌فرض، خودروهای حامل تا ارتفاع مجازشان توسط پالت‌های انباشته شده بر یکدیگر، پر می‌شوند. بنابراین باید برای استفاده از فضای بارگیری دوبعدی روی کف خودروی حامل برنامه‌ریزی شود. هر چند ممکن است کاربردهای دیگری موجود باشد که در آنها بارگیری اقلام با شکل قابل تغییر در فضای سه‌بعدی مطرح شود.

### ۲.۶. پیشنهاد تحقیقات آتی

- بر اساس آنچه در بخش محدودیت‌های تحقیق گفته شد، اضافه کردن محدودیت‌هایی برای ممنوع کردن جابه‌جایی بار تحت منطق SCYDL، می‌تواند یک جهت‌گیری تحقیقاتی ارزشمند در آینده باشد. اعمال این محدودیت در برنامه‌ریزی مسیر خودروی حامل، تأثیرگذار است. از این رو باید در الگوریتم حل، سازوکاری برای حفظ شدنی بودن جواب از منظر ممنوع کردن جابه‌جایی بار طراحی شود.

- رویکرد معرفی شده در این مقاله را می‌توان برای بارگیری سفارشات با شکل چیدمان قابل تغییر در فضای سه‌بعدی مورد استفاده قرار داد. برای چنین کاربردهایی، محدودیت بارگیری ۲۷ و الگوریتم LFC در مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط و الگوریتم GES تطبیق‌پذیرند.

- اگرچه روش حل ارائه شده در این مقاله یک روش حل خاص منظوره، کارا و اثربخش است، با این حال استفاده از سایر روش‌های فراابتکاری برای حل مسئله می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. به علاوه، توسعه‌ی روش‌های حل دقیق مبتنی بر تکنیک‌های آزادسازی یا تجزیه نیز می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

### ۳.۶. بینش‌های مدیریتی

در حال حاضر گروه خودروسازی سایپا با بیش از ۵۰۰ قطعه ساز داخلی همکاری می‌کند. تحقیقات نشان از آن دارند که هزینه‌های لجستیک داخلی مشتمل بر هزینه‌های حمل و نقل قطعات از سازندگان داخلی تا سایت‌های تولیدی، بسته‌بندی قطعات، خواب سرمایه ناشی از انبارش قطعات، بهای فضای انبارها، تجهیزات و نیروی انسانی به کارگرفته شده، بین ۵ تا ۱۰ درصد ارزش هر خودرو است. هزینه‌ی

حمل و نقل قطعات از تأمین‌کنندگان نزدیک به یک درصد از ارزش هر خودروی تولیدی است که با توجه به حجم تولید سالیانه خودرو در شرکت سایپا، میزان این هزینه‌ها بسیار چشمگیر است. بنابراین بهبود جریان مواد و قطعات برای افزایش رضایت مشتری و کاهش هزینه‌ها، امری ضروری است. اولین راهکار برای کاهش هزینه‌های حمل و نقل، استقرار و طراحی یک شبکه‌ی توزیع مناسب و کارا است. از جمله انتقاداتی که به سیستم تحویل بهنگام وارد است، افزایش ترافیک خودروهای حامل ارسالی و بعضاً، کامل نبودن بار آنهاست. گرچه این سیستم موجب پایین نگاه داشتن سطح موجودی انبارها می‌شود، اما با توجه به افزایش تواتر ارسال قطعات، می‌تواند موجب افزایش هزینه‌های حمل شود. از این رو پیاده‌سازی سیستم لجستیک میلکران می‌تواند مکملی برای کانبان باشد که دسترسی به سطح بهره‌برداری ظرفیتی بیش از ۹۰ درصد را میسر می‌سازد.

نوشتر حاضر یک مبنای علمی و در عین حال کاربردی برای طراحی یک سیستم یک‌پارچه لجستیک فراهم آورده است که در آن قطعات با حجم متوسط و کم (قطعات کلاس B و C) می‌توانند از طریق سیستم لجستیک میلکران تأمین شوند و قطعات حجیم (قطعات کلاس A) از طریق منطق ارسال مستقیم، از تأمین‌کننده به کارخانجات ارسال شوند.

نتایج حاصل از رویکرد حل معرفی شده در این نوشتار برای بهینه‌سازی مسیرهای میلکران، حکایت از وجود قابلیت کاهش بیش از ۳۰ درصدی هزینه‌های توزیع در صورت به کارگیری منطق میلکران دارد. به علاوه با استفاده از منطق چیدمان پالت‌های سفارشات با آرایش قابل تغییر، می‌توان در جهت افزایش بهره‌برداری از فضای بارگیری و کاهش تعداد خودروهای حامل مورد استفاده برای توزیع گام برداشت. در مجموع، از طریق کاربرد استراتژی توزیع میلکران می‌توان به صورت توانمند هم از مزایای سیستم کانبان بهره برد و هم رضایت تأمین‌کنندگان را در ارسال محموله‌های کوچک با تواتر بالا جلب کرد. البته پیاده‌سازی این استراتژی ممکن است برای شبکه‌ی تأمین به وسعت شبکه‌ی تأمین گروه خودروسازی سایپا در ابتدا دشوار باشد. آنچه که در عمل برای اجرای لجستیک میلکران لازم است، برنامه‌ریزی زمانی دقیق است به گونه‌ی که محموله‌ها در زمان‌های از پیش تعیین شده آماده‌ی بارگیری باشند. لذا موارد زیر ممکن است از دشواری‌های پیاده‌سازی این سیستم باشند که باید برای آن راهکار تدبیر کرد.

- از آن‌جا که لجستیک میلکران برای تأمین‌کنندگان قطعات با حجم کم قابل کاربرد است و این‌گونه تأمین‌کنندگان ممکن است از امکانات لجستیک مناسب بهره‌مند نباشند، لذا ممکن است انعطاف‌پذیری در بارگیری کاهش یابد و منجر به اتلاف زمان شود.

- موقعیت مکانی برخی قطعه‌سازان ممکن است به گونه‌ی بی‌باشد که امکان تردد خودروی سنگین به مکان آنها وجود نداشته باشد.

- آماده نبودن بار و تأخیر در بارگیری.

- با توجه به این نکته که تأمین‌کنندگانی که در سیستم لجستیک میلکران محموله‌ی خود را در یک خودروی حامل مشترک تحویل می‌دهند باید از نظر موقعیت جغرافیایی نزدیک به یکدیگر باشند، ممکن است به علت تعدد مراجعه خودروی حامل به محل تأمین‌کنندگان، شرکت ترابری که بتواند مسئولیت حمل قطعات را بر عهده گیرد به سختی قبول مسئولیت کند.

- اجرای سیستم لجستیک میلکران نیازمند وجود یک سیستم یک‌پارچه برای هماهنگی و اطلاع‌رسانی به تأمین‌کنندگان برای آماده‌سازی محموله‌های تحویلی و زمان مراجعه خودروی حامل به محل آنهاست.

1. full truckload
2. less than truckload
3. pickup and delivery problem
4. unified load cube
5. Size Changeable 2 Dimensional Loading
6. best-fit algorithm
7. new solution generation
8. 2D single vehicle shape changeable order loading
9. 2D level single bin packing problem
10. best-fit decreasing
11. loading feasibility check

## منابع (References)

1. Ghiani, G., Laporte, G. and Musmanno, R. "Introduction to logistics systems planning and control", *Igarss 2014. John Wiley & Sons* (2004).
2. Boysen, N., Emde, S., Hoeck, M. and et al. "Part logistics in the automotive industry: Decision problems, literature review and research agenda", *European Journal of Operational Research*, **242**, pp. 107-120 (2015).
3. Sadjadi, S.J., Jafari, M. and Amini, T. "A new mathematical modeling and a genetic algorithm search for milk run problem (an auto industry supply chain case study)", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **44**, pp. 194-200 (2009).
4. Kilic, H.S., Durmusoglu, M. B. and Baskak, M. "Classification and modeling for in-plant milk-run distribution systems", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **62**, pp. 1135-1146 (2012).
5. Nemoto, T. and Rothengatter, W. "Efficient green logistics in urban areas: milk run logistics in the automotive industry", *In Sustainable Transport for Chinese Cities*, **3**, pp. 319-337 (2012).
6. Gyulai, D., Pfeiffer, A., Sobottka, T. and et al. "Milkrun vehicle routing approach for shop-floor logistics", *Procedia CIRP*, **7**, pp. 127-132 (2013).
7. Nemoto, T., Hayashi, K. and Hashimoto, M. "Milk-run logistics by Japanese automobile manufacturers in Thailand", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, **2**, pp. 5980-5989 (2010).
8. Hosseini, S.D., Shirazi, M. A. and Fatemi Ghomi, S. M. T. "Harmony search optimization algorithm for a novel transportation problem in a consolidation network", *Engineering Optimization*, **46**, pp. 1538-1552 (2014).
9. Ranjbaran, F., Husseinzadeh Kashan, A. and Kazemi, A. "Mathematical formulation and heuristic algorithms for optimisation of auto-part milk-run logistics network considering forward and reverse flow of pallets", *International Journal of Production Research*, **58**, pp. 1741-1775 (2020).
10. Jafari-Eskandari, M., Sadjadi, S. J., Jabalameli, M. and et al. "A robust optimization approach for the milk run problem (An auto industry supply Chain case study)", *International Conference On Computers And Industrial Engineering*, CIE 2009, pp. 1076-1081 (2009).
11. Du, T., Wang F.K. and Lu, P. Y. "A real-time vehicle-dispatching system for consolidating milk runs", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **43**, pp. 565-577 (2007).
12. Chuah, H. H. and Yingling, J. C. "Routing for a just-in-time supply pickup and delivery system", *Transportation Science*, **39**, pp. 328-339 (2005).
13. Parragh S. N., Doerner, K. F. and Hartl, R. F. "A survey on pickup and delivery problems: part I: transportation between customers and depot", *Journal fur Betriebswirtschaft*, **58**, pp. 21-51 (2008).
14. Parragh, S. N., Doerner, K. F. and Hartl, R. F. "A survey on pickup and delivery problems: part II: transportation between pickup and delivery locations", *Journal fur Betriebswirtschaft*, **58**, pp. 81-117 (2008).
15. Berbeglia, G., Cordeau, J. F., Gribkovskaia, I. and et al. "Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey", *Top*, **15**, pp. 1-31 (2007).
16. Berbeglia, G., Cordeau, J. F. and Laporte, G. "Dynamic pickup and delivery problems", *European Journal of Operational Research*, **202**, pp. 8-15 (2010).
17. Li, H. and Lim, A. "A metaheuristic for the pickup and delivery problem with time windows", *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, **12**, pp. 173-186 (2003).
18. Hosny, M. I. and Mumford, C. L. "The single vehicle PDPTW: intelligent operators for heuristic and metaheuristic algorithms", *Journal of Heuristics*, **16**, pp. 417-439 (2010).
19. Lim, A., Zhang, Z. and Qin, H. "Pickup and delivery service with manpower planning in Hong Kong public hospitals", *Transportation Science*, **51**, pp. 688-705 (2010).
20. Abbasi-Pooya, A. and Husseinzadeh Kashan, A. "New mathematical models and a hybrid grouping evolution strategy algorithm for optimal helicopter routing and crew pickup and delivery", *Computers and Industrial Engineering*, **112**, pp. 35-56 (2017).
21. Nguyen, P. K., Crainic, T. G. and Toulouse, M. "Multi-trip pickup and delivery problem with time windows and synchronization", *Annals of Operations Research*, **253**, pp. 899-934 (2017).
22. Qu, Y. and Bard, J. F. "The heterogeneous pickup and delivery problem with configurable vehicle capacity", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **32**, pp. 1-20 (2013).
23. Bettinelli, A., Ceselli, A. and Righini, G. "A branch-and-price algorithm for the multi-depot heterogeneous-fleet pickup and delivery problem with soft time windows", *Mathematical Programming Computation*, **6**, pp. 171-197 (2014).
24. Avci, M. and Topaloglu, S. "A hybrid metaheuristic algorithm for heterogeneous vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery". *Expert Systems with Applications*, **53**, pp. 160-171 (2016).
25. Soleimani, H., Chaharlang, Y. and Ghaderi, H. "Collection and distribution of returned-remanufactured products in a vehicle routing problem with pickup and delivery considering sustainable and green criteria", *Journal of Cleaner Production*, **172**, pp. 960-970 (2018).

26. Ceselli, A., Righini, G. and Salani, M. "A column generation algorithm for a rich vehicle-routing problem", *Transportation Science*, **43**, pp. 56-69 (2009).
27. Subramanian, A., Uchoa E. and Ochi, L. S. "New lower bounds for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery", *In International Symposium on Experimental Algorithms*, Springer, pp. 276-287 (2010).
28. Mu, D., Wang, C., Zhao, F. and et al. "Solving vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery using parallel simulated annealing algorithm", *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, **8**, pp. 81-106 (2016).
29. Detti, P., Papalini, F. and de Lara, G. Z. M. "A multi-depot dial-a-ride problem with heterogeneous vehicles and compatibility constraints in healthcare", *Omega*, **70**, pp. 1-14 (2017).
30. Bula, G. A., Prodhon, C., Gonzalez, F. A. and et al. "Variable neighborhood search to solve the vehicle routing problem for hazardous materials transportation", *Journal of Hazardous Materials*, **324**, pp. 472-480 (2017).
31. Zhou, L., Baldacci, R., Vigo, D. and et al. "A multi-depot two-echelon vehicle routing problem with delivery options arising in the last mile distribution", *European Journal of Operational Research*, **265**, pp. 765-778 (2018).
32. Fernández Cuesta, E., Andersson, H., Fagerholt, K. and et al. "Vessel routing with pickups and deliveries: An application to the supply of offshore oil platforms", *Computers and Operations Research*, **79**, pp. 140-147 (2017).
33. Dragomir, A. G., Nicola, D., Soriano, A. and et al. "Multidepot pickup and delivery problems in multiple regions: a typology and integrated model", *International Transactions in Operational Research*, **25**, pp. 569-597 (2018).
34. Niu, Y., Yang, Z., Chen, P. and et al. "Optimizing the green open vehicle routing problem with time windows by minimizing comprehensive routing cost", *Journal of Cleaner Production*, **171**, pp. 962-971 (2018).
35. Alinaghian, M. and Shokouhi, N. "Multi-depot multi-compartment vehicle routing problem, solved by a hybrid adaptive large neighborhood search", *Omega*, **76**, pp. 85-99 (2018).
36. Wei, L., Zhang, Z., Zhang, D. and et al. "A simulated annealing algorithm for the capacitated vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints", *European Journal of Operational Research*, **265**, pp. 843-859 (2018).
37. Belgin, O., Karaoglan, I. and Altıparmak, F. "Two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: mathematical model and heuristic approach". *Computers and Industrial Engineering*, **115**, pp. 1-16 (2018).
38. López-Sánchez, A.D., Hernández-Díaz, A.G., Gortázar, F. et al. "A multiobjective GRASP-VND algorithm to solve the waste collection problem", *International Transactions in Operational Research*, **25**, pp. 545-567 (2018).
39. Scheffler, M., Hermann, C. and Kasper, M. "Splitting procedure of genetic algorithm for column generation to solve a vehicle routing problem", *In Fink A, Fügenschuh A, Geiger M. J (eds) Operations Research Proceedings, Springer International Publishing*, pp. 321-328 (2018).
40. Mak-Hau, V., Moser, I. and Aleti, A. "An exact algorithm for the heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows and three-dimensional loading constraints", *In Sarker, R. et al. (eds) Data and Decision Sciences in Action, Springer International Publishing*, pp. 91-101 (2018).
41. Hojabri, H., Gendreau, M., Potvin, J. P. and et al. "Large neighborhood search with constraint programming for a vehicle routing problem with synchronization constraints", *Computers & Operations Research*, **92**, pp. 87-97 (2018).
42. Rahbari, A., Nasiri, M. M., Werner, F. and et al. "The vehicle routing and scheduling problem with cross-docking for perishable products under uncertainty: two robust bi-objective models", *Applied Mathematical Modelling*, **70**, pp. 605-625 (2019).
43. Beraldi, P., De Maio, A., Laganà, D. and et al. "A pick-up and delivery problem for logistics e-marketplace services", *Optimization Letters*, <https://doi.org/10.1007/s11590-019-01472-3> (2019).
44. Sitek, P., Wikarek, J., Ruczyńska-Wdowiak, K. and et al. "Optimization of capacitated vehicle routing problem with alternative delivery, pick-up and time windows: A modified hybrid approach", *Neurocomputing*, **423**, pp. 670-678 (2021).
45. Aziez, I., Cote, J. F. and Coelho, L. C. "Exact algorithms for the multi-pickup and delivery problem with time windows", *European Journal of Operational Research*, **284**, pp. 906-919 (2020).
46. Bernal, J., Escobar, J. W. and Linfati, R. "A simulated annealing-based approach for a real case study of vehicle routing problem with a heterogeneous fleet and time windows", *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, **13**, pp. 185-204 (2021).
47. Wang, Y., Li, Q., Guan, X. and et al. "Collaborative multi-depot pickup and delivery vehicle routing problem with split loads and time windows", *Knowledge-Based Systems*, **231**, 107412 (2021).
48. Ancele, Y., Hoàng Hàb, M., Lersteau, C. and et al. "Toward a more flexible VRP with pickup and delivery allowing consolidations", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **128**, 103077 (2021).
49. Park, H., Son, D., Koob, B. and et al. "Waiting strategy for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery using genetic algorithm", *Expert Systems with Applications*, **165**, 113959 (2021).
50. Salazar-González, J.J. "The pickup and delivery problem with split loads and transshipments: A branch-and-cut solution approach", *European Journal of Operational Research*, **289**, pp. 470-484 (2021).
51. Olgun, B., Koç, Ç. and Altıparmak, F. "A hyper heuristic for the green vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery", *Computers & Industrial Engineering*, **153**, 107010 (2021).
52. Husseinzadeh Kashan, A., Akbari, A. A. and Ostadi, B. "Grouping evolution strategies: An effective approach for

- grouping problems”, *Applied Mathematical Modelling*, **39**, pp. 2703-2720 (2015).
53. Husseinzadeh Kashan, A., Husseinzadeh Kashan, M. and Karimiyan, S. “A particle swarm optimizer for grouping problems”. *Information Sciences*, **252**, pp. 81-95 (2013).
54. Husseinzadeh Kashan, A., Jenabi, M. and Husseinzadeh Kashan, M. “A new solution approach for grouping problems based on evolution strategies”, *In 2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition*, pp. 88-93 (2009).