



مدلسازی ریاضی و روش حل مساله توزیع میلکران در زنجیره تامین داخلی سایپا تحت ملاحظات پنجره‌های زمانی سفارشات، هزینه برگشت پالت‌های خالی و محدودیت‌های بارگیری درون خودرو

معصوم نجفیان

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

علی حسین‌زاده کاشان

دانشکده مهندسی صنایع و سیستم ها، دانشگاه تربیت مدرس

Email: d.mohamadi@ase.ui.ac.ir

داوود محمدی تبار

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

علی اکبر اکبری

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۱ * تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۰۷/۲۳

چکیده

در سیستم لجستیک میلکران خودروها برای جمع‌آوری سفارشات از محل تامین‌کنندگان و تحویل آنها به خطوط مونتاژ، بر اساس مسیرهای از پیش برنامه‌ریزی شده، اعزام می‌شوند. بدین ترتیب که خودرو به محل چندین تامین‌کننده برای برداشت سفارشات رجوع کرده و سپس برای تحویل آنها به یک یا چند مقصد اعزام می‌شود. در این سیستم لجستیکی، محموله‌ها درون خودرو و در گذر از گره‌های مختلف در شبکه لجستیک تجمیع می‌شوند. در این مقاله یک مدل برنامه ریزی خطی عددصحيح مختلط برای مساله لجستیک میلکران معرفی می‌شود که ملاحظات نظیر بارگیری سه بعدی پالت‌های سفارشات درون خودروها، اعمال ۵۰ درصد هزینه بیشتر برای برگشت پالت‌های خالی، پنجره‌های زمانی سفارشات و ناوگان نامتجانس را در قالب تابع هدف و محدودیت‌ها مدنظر قرار می‌دهد. با توجه به ماهیت مسئله، یک الگوریتم مبتنی بر استراتژی تکاملی گروه‌بندی معرفی می‌شود که از روش‌های ابتکاری کارا برای حصول اطمینان از شدنی بودن بارگیری سفارشات درون خودروها و شدنی بودن مسیریابی خودروها استفاده می‌کند. اثربخشی مدل ریاضی و الگوریتم فراابتکاری معرفی شده با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از گروه خودروسازی سایپا مورد سنجش قرار می‌گیرد. نتایج محاسباتی مبین آن است که در مقایسه با استراتژی ارسال مستقیم که در شرکت سایپا دنبال می‌شود، لجستیک میلکران قابلیت کاهش هزینه‌ها را به میزان ۲۴.۵ درصد (به طور متوسط) دارد.

کلمات کلیدی: سیستم لجستیک میلکران، استراتژی ارسال مستقیم، بارگیری و بسته‌بندی، برنامه‌ریزی خطی عدد صحيح مختلط، الگوریتم استراتژی تکاملی گروه‌بندی.

۱- مقدمه

یکی از حوزه‌های مهم در عملیات لجستیک، حمل و نقل کالا در بستر زنجیره تامین است. هزینه‌های توزیع نزدیک به یک سوم کل هزینه‌های لجستیکی را در بر می‌گیرد (Ghani, Laporte & Musmanno, 2004). بنابراین بهینه‌سازی هزینه‌های توزیع یکی از مراحل مهم در طرح‌های کاهش هزینه‌های لجستیکی است. به طور کلی سه دسته شبکه توزیع وجود دارند که در بستر آنها، کالا و محصولات از بالادست زنجیره به پایین دست زنجیره جریان می‌یابد (Boysen, Emde, Hoeck & Kauderer, 2015)؛ شبکه‌های ارسال مستقیم، انبارش متقاطع و لجستیک میلکران.

ساده‌ترین نوع ارسال محموله می‌تواند در قالب ارسال مستقیم صورت پذیرد. در این نوع سیستم توزیع، سفارشات از تامین‌کنندگان به تولیدکنندگان یا مشتریان، به طور مستقیم ارسال می‌شوند. هنگامی که کل فضای بارگیری خودرو تنها به یک محموله تخصیص می‌یابد، از این نوع ارسال به عنوان ارسال با بار کامل (FTL^۱) یاد می‌شود. هنگامی که ابعاد محموله به نحوی است که نیازمند تمام فضای بارگیری خودرو نمی‌باشد، محموله بعنوان بار کمتر از ظرفیت کامل (LTL^۲) شناخته می‌شود. مزیت چنین محموله‌هایی آن است که تامین‌کنندگان می‌توانند از ظرفیت خودرو به صورت اشتراکی برای ارسال این قبیل محموله‌ها استفاده نمایند. دومین استراتژی ارسال، به عنوان سیستم انبارش متقاطع شناخته می‌شود که در آن محموله‌های LTL در یک گره میانی تحت عنوان بارانداز تجمع شده و تشکیل محموله‌های FTL می‌دهند. مهمترین مزیت این سیستم آن است که منجر به کاهش موجودی و هزینه‌های حمل و نقل می‌شود. با این حال این استراتژی می‌تواند منجر به طولانی شدن زمان‌های تحویل شود. بر خلاف سیستم انبارش متقاطع که در آن محموله‌ها در یک نقطه میانی در شبکه لجستیک دریافت شده و تجمع می‌شوند، در سیستم توزیع میلکران محموله‌ها درون خودرو و در گذر از گره‌های مختلف در شبکه لجستیک تجمع می‌شوند. بدین ترتیب که خودرو به محل چندین تامین‌کننده 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 گلخانه‌ای و هزینه‌های توزیع شود. نام "میلکران" برگرفته از سیستم توزیع سنتی شیر در گذشته است. بدین ترتیب که 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 (Sadjadi, Jafari & Amini, 2009). بسیاری از صنایع نظیر خودروسازی، از استراتژی توزیع میلکران در شبکه لجستیک خود بهره برده‌اند (Kilic, Durmusoglu & Baskak, 2012).

زنجیره تامین در صنعت خودرو یکی از پیچیده‌ترین و گسترده‌ترین انواع زنجیره‌های تامین است. تعداد بسیار زیادی از تامین‌کنندگان که در نواحی جغرافیایی مختلف پراکنده شده‌اند، به تولید و ارسال هزاران قطعه‌ای می‌پردازند که در کارخانه‌های مونتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین، در این صنعت می‌بایست برنامه‌ریزی دقیقی در مورد لجستیک داخلی و خارجی صورت پذیرد. لجستیک داخلی که گستره آن به تامین و توزیع قطعات تا خطوط مونتاژ محدود می‌شود، نقش حیاتی در صنعت خودرو ایفا می‌نماید. زیرا بر کل فرآیندهای زنجیره تامین اثرگذار است. اختلال در این حوزه می‌تواند منجر به توقف خطوط تولید شود که این می‌تواند هزینه‌های گزاف بر سیستم تحمیل نماید و منجر به صدور جریمه‌های سنگین برای عامل تاخیرکننده 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 نماید. به منظور کاهش در هزینه‌ها، می‌توان میزان بهره‌گیری از تسهیلات حمل و نقل را افزایش داد. هنگامی که تامین‌کنندگان در یک ناحیه جغرافیایی، متمرکز و نزدیک به یکدیگر هستند و محموله‌های تولیدی آنها در مقایسه با ظرفیت خودرو از حجم کمی برخوردار است، پتانسیل استفاده از سیستم لجستیک میلکران وجود خواهد داشت. (Nemoto & Rothengatter, 2012) به مطالعه این پتانسیل در شرکت‌های خودروسازی تویوتا، وباستو و آئودی پرداخته‌اند. (Gyulai, Pfeiffer, Sobottka & Vancza, 2013) هم به

¹ Full truckload

² Less than truckload

ارائه الگوریتم‌هایی برای مسئله لجستیک میلکران در سیستم توزیع قطعات پرداخته است. این دو نمونه، از تحقیقات کلیدی در حوزه سیستم لجستیک میلکران هستند.

بر اساس مشاهدات مستقیم بعمل آمده از گروه خودروسازی سایپا و بر اساس جلسات تخصصی برگزار شده با کارشناسان و مدیران، این خودروساز از سیستم تولید بهنگام (JIT) برای کاهش سطوح موجودی در کارخانه‌های مونتاژ بهره می‌برد. هرچند کاهش در سطوح موجودی‌ها به بهای افزایش در تواتر تحویل محموله‌ها است. تحت استراتژی ارسال مستقیم که در حال حاضر از سوی سایپا دیکته می‌شود، بعد از بارگیری محموله در محل سازنده، خودرو سفر خود را مستقیماً به سمت کارخانه مونتاژ آغاز می‌کند؛ بدون اینکه در طول مسیر هیچ‌گونه سفارش دیگری به محموله خودرو اضافه شود. نتیجه این سیاست آن است که روزانه تعداد زیادی خودرو با فضای نیمه پر تردد می‌یابند. تامین‌کنندگانی که از قدرت چانه‌زنی بالاتری برخوردارند، از ارسال محموله‌ها به نواحی دوردست سرباز زده و مستقیماً سفارشات را به انبارهای مرکزی سایپا ارسال می‌کنند. این رفتار می‌تواند هزینه‌های حمل و نقل اضافی و غیر ارزش افزا را برای ارسال از انبارهای مرکزی به سمت نقاط تقاضا تحمیل نماید.

ملاحظات فوق، نویسندگان این مقاله را بر آن داشته است که بر مساله برنامه‌ریزی لجستیک داخلی با هدف طراحی یک سیستم مبتنی بر لجستیک میلکران برای بهبود جریان قطعات به طریقی منطقی و از نقطه‌نظر هزینه‌ای اثربخش‌تر، متمرکز شوند. در این مقاله، ترکیبی از استراتژی ارسال مستقیم و لجستیک میلکران مدلسازی می‌شود. محدودیت‌های لازم برای پنجره زمانی سفارشات، لحاظ کردن هزینه‌های ناشی از برگشت پالت‌های فلزی و بارگیری سفارشات درون خودرو نیز اعمال می‌شوند. در ادبیات موضوع، مدل‌های ریاضی و روش‌های حل مختلفی برای مسئله لجستیک میلکران در صنایع مختلف ارائه شده است (Chuah & Yingling, 2005; Du, Wang & Lu, 2007; Jafari-Eskandari, Sadjadi, Jabalameli & Bozorgi-Amiri, 2009; Sadjadi, Jafari & Amini, 2009; Nemoto, Hayashi & Hashimoto, 2010; Hosseini, Shirazi & Ghomi 2014; Ranjbaran, Husseinzadeh Kashan & Kazemi, 2020). یک مقاله مروری نیز پیرامون تحقیقات انجام شده در حوزه لجستیک قطعات در صنعت خودروسازی، نوشته شده است (Boysen et al., 2015).

در بطن سیستم لجستیک میلکران، فعالیت برداشت و تحویل قرار دارد. بنابراین مسئله شناخته شده برداشت و تحویل (PDP³) می‌تواند در قالب یک زیر مسئله در فرایند بهینه‌سازی سیستم لجستیک میلکران ظاهر شود. در حال حاضر تحقیقات زیادی پیرامون مسائل برداشت و تحویل صورت پذیرفته است که از جمله آن می‌توان به مسئله برداشت و تحویل بین مشتریان و انبار مرکزی (Parragh, Doerner & Hartl, 2008a)، مسئله برداشت و تحویل با حمل و نقل بین مکان‌های برداشت و تحویل مرکزی (Parragh, Doerner & Hartl, 2008b)، مسئله برداشت و تحویل ایستا (Berbeglia, Cordeau, & Laporte, 2010) و مسئله برداشت و تحویل پویا (Berbeglia, Cordeau & Laporte, 2010) اشاره کرد.

برای مسئله برداشت و تحویل با پنجره‌های زمانی، تعدادی از محققین از الگوریتم‌های دقیق برای حل مسئله بهره جسته‌اند (Ropke & Cordeau, 2009; Baldacci, Bartolini & Mingozzi, 2011; Battarra, Cordeau & Iori, 2014; Cherklesly, Desaulniers, Irnich & Laporte, 2015; Veenstra, Cherklesly, Desaulniers, & Li & Lim, 2003; Laporte, 2017). از سوی دیگر برای حل مسائل با ابعاد بزرگ، روش‌های فراابتکاری معرفی شده‌اند (Hosny & Mumford, 2010; Lim, Zhang & Qin, 2017). 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 (Lim, Zhang & Qin, 2017)، الگوریتم استراتژی تکاملی گروه‌بندی برای مسیریابی هلیکوپتر در میدان گازی پارس جنوبی (Abbasi-Pooya & Husseinzadeh Kashan, 2017) و الگوریتم جستجوی ممنوع برای سیستم لجستیک

³ Pickup and delivery problem

شهری (Nguyen, Crainic & Toulouse, 2017) اشاره کرد. از آنجا که خودروها دارای ظرفیت، سرعت و هزینه متفاوت هستند، برخی از محققین مسئله برداشت و تحویل با ناوگان نامتجانس را در نظر گرفته‌اند (Qu & Bard, 2013; Bettinelli, Ceselli & Righini, 2014; Avci & Topaloglu, 2016; Soleimani, Chaharlang & Ghaderi, 2018). 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.

جدول شماره (۱): اطلاعات تحقیقات موجود در ادبیات موضوع

روش حل	مدلسازی ریاضی	سایر محدودیت‌های جانبی	پنجره زمانی	نوع ناوگان	محدودیت ظرفیت	تعداد محصولات	شکست بار	مطالعه موردی	مرجع
روش تولید ستون	-	✓	✓	نامتجانس	✓	چند	✓	✓	(Ceselli, Righini & Salani, 2009)
روش شاخه و برش	✓	-	-	متجانس	✓	چند	-	-	(Subramanian, Uchoa & Ochi, 2010)
روش تولید ستون	✓	-	✓	متجانس	✓	تک	-	-	(Baldacci, Bartolini & Mingozzi, 2011)
GA	-	-	-	متجانس	✓	تک	-	✓	(Tasan & Gen, 2012)
GA, TS	✓	-	✓	متجانس	✓	تک	-	-	(Liu, Xie, Augusto & Rodriguez, 2014)
VNS	✓	-	✓	متجانس	✓	چند	✓	-	(Chen, Li & Liu, 2014)
روش تولید ستون	-	-	✓	متجانس	✓	تک	-	-	(Muter, Cordeau & Laporte, 2014)
VNS	✓	-	✓	متجانس	✓	تک	-	-	(Polat et al., 2015)
SA-inspired VND	-	-	-	متجانس	✓	تک	-	-	(Avci & Topaloglu, 2015)
Parallel SA	-	-	-	نامتجانس	✓	تک	-	-	(Mu et al., 2016)
روش تولید ستون	✓	-	✓	متجانس	✓	تک	-	-	(Veenstra, Cherklesly, Desaulniers & Laporte, 2017)
VNS, TS	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	تک	-	✓	(Detti, Papalini & de Lara, 2017)
VNS	-	-	-	نامتجانس	✓	تک	-	-	(Bula, Prodhon, Gonzalez, Afsar, & Velasco, 2017)
الگوریتم ژنتیک چند	-	-	✓	متجانس	✓	چند	-	-	(Zhou, Baldacci, Vigo & Wang, 2018)
ALNS	✓	-	✓	نامتجانس	✓	چند	-	✓	(Fernández Cuesta, Andersson, Fagerholt & Laporte, 2017)
-	✓	-	-	نامتجانس	✓	تک	-	-	(Dragomir, Nicola, Soriano & Gansterer, 2018)
TS	✓	-	✓	متجانس	✓	تک	-	-	(Niu, Yang, Chen, & Xioao, 2018)
ALNS, VNS	✓	-	-	نامتجانس	✓	چند	-	-	(Alinaghian & Shokouhi, 2018)
SA	-	✓	-	متجانس	✓	چند	-	-	(Wei, Zhang, Zhang & Leung, 2018)
VND	✓	-	-	متجانس	✓	تک	-	✓	(Belgin, Karaoglan & Altiparmak, 2018)
GRASP-VND	-	-	✓	متجانس	✓	تک	-	✓	(López-Sánchez, Hernández-Díaz, Gortázar & Hinojosa, 2018)
GA	-	-	✓	متجانس	✓	تک	-	-	(Scheffler, Hermann & Kasper, 2018)
-	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	چند	-	-	(Mak-Hau, Moser & Aleti, 2018)
-	✓	-	-	نامتجانس	✓	چند	-	✓	(Soleimani, Chaharlang & Ghaderi, 2018)

روش حل	مدلسازی ریاضی	سایر محدودیت‌های جانبی	پنجره زمانی	نوع ناوگان	محدودیت ظرفیت	تعداد محصولات	شکست بار	مطالعه موردی	مرجع
ALNS	-	-	✓	نامتجانس	✓	چند	-	-	(Hojabri, Gendreau, Potvin & Rousseau, 2018)
-	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	چند	-	-	(Rahbari, Nasiri, Werner, Musavi & Jolai, 2019)
الگوریتم متاهوریستیک	-	-	✓	نامتجانس	✓	تک	-	✓	(Beraldi, De Maio, Laganà & Violi, 2019)
برنامه‌ریزی محدودیت و الگوریتم ژنتیک	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	چند	-	-	(Sitek, Wikarek, Ruczyńska-Wdowiak, Bocewicz & Banaszak, 2020)
روش شاخه و برش	✓	-	✓	متجانس	-	تک	-	-	(Aziez, Cote & Coelho, 2020)
SA	-	-	✓	نامتجانس	-	تک	-	✓	(Bernal, Escobar & Linfati, 2020)
استراتژی تکاملی گروه‌بندی	✓	✓	✓	نامتجانس	✓	چند	-	✓	مطالعه حاضر

- بارگیری ۳ بعدی
سفارشات
- هزینه های
برگشت پالت

در این مقاله به معرفی یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) برای بهینه‌سازی مسئله لجستیک میلکران (MRLP) در صنعت خودرو می‌پردازیم. با توجه به اینکه در لجستیک میلکران، پالت‌های قطعات از محل تامین‌کنندگان جمع‌آوری شده و به خطوط مونتاژ تحویل می‌شوند، مسئله در ساده‌ترین شکل شبیه مسئله برداشت و تحویل است. با این حال در مسئله تحت بررسی سایر ملاحظات نظیر بارگیری سفارشات درون خودروها، اعمال هزینه‌های تحویل پالت‌های فلزی در مسیر برگشت، پنجره‌های زمانی برای سفارشات و ناوگان نامتجانس، در قالب محدودیت به مسئله کلاسیک برداشت و تحویل اضافه می‌شوند. از آنجا که در تمامی انواع مسائل مسیریابی خودرو هدف گروه‌بندی سفارشات درون خودروها است، یک الگوریتم فراابتکاری با عنوان استراتژی تکاملی گروه‌بندی (GES) برای حل مسئله ارائه می‌شود که مجهز به روش‌های ابتکاری کارا برای استفاده مطلوب از دانش ساختاری مسئله است. مکانیزم عملکرد این روش‌ها به گونه‌ای است که همواره شدنی بودن جواب را از نقطه‌نظر بارگیری سفارشات درون خودرو، و شدنی بودن مسیریابی را از منظر پنجره‌های زمانی دریافت و تحویل سفارشات، تامین می‌کند.

در تمامی مسائل بارگیری/بسته‌بندی چند بعدی که در ادبیات مورد اشاره قرار گرفته‌اند، شکل اقلامی که قرار است بارگیری و یا بسته‌بندی شوند دانسته فرض می‌شود. اکثر مقالات اشکال مستطیل شکل و یا مکعب شکل را در نظر می‌گیرند. در مسئله تحت بررسی، سفارشات که از جانب تامین‌کنندگان به سمت کارخانه‌های مونتاژ ارسال می‌شوند، می‌توانند در قالب "اقلام" مد نظر قرار گیرند. تفاوتی که در اینجا وجود دارد آن است که سفارشات دارای هیچ شکل از پیش تعیین شده‌ای نیستند و تنها تعداد پالتی که در بردارند معلوم است. توجه داشته باشید که شکل چیدمان پالت‌ها دون وسیله نقلیه می‌تواند با تغییر نوع وسیله نقلیه تغییر یابد که این خود بر پیچیدگی مدلسازی برای ناوگان نامتجانس می‌افزاید. در ادامه نشان خواهیم داد که مساله بارگیری سه بعدی پالت‌های سفارشات درون خودروها چگونه به طریقی کارا قابل مدیریت است.

ادامه مقاله به شکل زیر سازماندهی می شود. تعریف دقیق مسئله و مدل سازی ریاضی آن در قالب یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط در بخش ۲ آورده می شود. در این بخش یک الگوریتم استراتژی تکاملی گروه بندی به همراه الگوریتم های ابتکاری مورد نیاز برای ایجاد جواب جدید و تضمین شدنی بودن محدودیت های بارگیری و مسیریابی ارائه می شود. کارایی و اثربخشی مدل های برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط و الگوریتم های استراتژی تکاملی گروه بندی در بخش ۳ مورد بررسی قرار می گیرد. در این بخش نشان خواهیم داد که لجستیک میلکران تا چه میزان می تواند نسبت به استراتژی ارسال مستقیم بهبود ایجاد کند. در انتها، نتایج حاصل از اجرای روش های ارائه شده روی دو نمونه مسئله با داده های واقعی مورد آزمون قرار می گیرد. در نهایت در این بخش، جمع بندی و نتیجه گیری صورت می پذیرد.

۲- روش شناسی

الف) تعریف مسئله و مدل سازی ریاضی

در بازه زمانی روزانه، برنامه ریزی ارسال محموله ها از سمت تامین کنندگان به سمت خطوط مونتاژ صورت می پذیرد. این برنامه ریزی شامل تخصیص پالت های هر یک از قطعات و یا محصولات به مسیرهای میلکران است که توسط خودروهایی که مسئولیت بارگیری و تحویل آنها را دارند، پیموده می شوند. هدف تعیین مسیریابی بهینه و زمان بندی برداشت و تحویل برای حداقل سازی هزینه های جمع آوری و توزیع است. سایر ملاحظات که روی بارگیری سفارشات و مسیریابی خودروها وجود دارد نیز در قالب محدودیت ها به مدل معرفی می شوند. شرایط و مفروضات زیر در ساخت مدل های ریاضی برای مسئله *MRLP* در نظر گرفته می شوند:

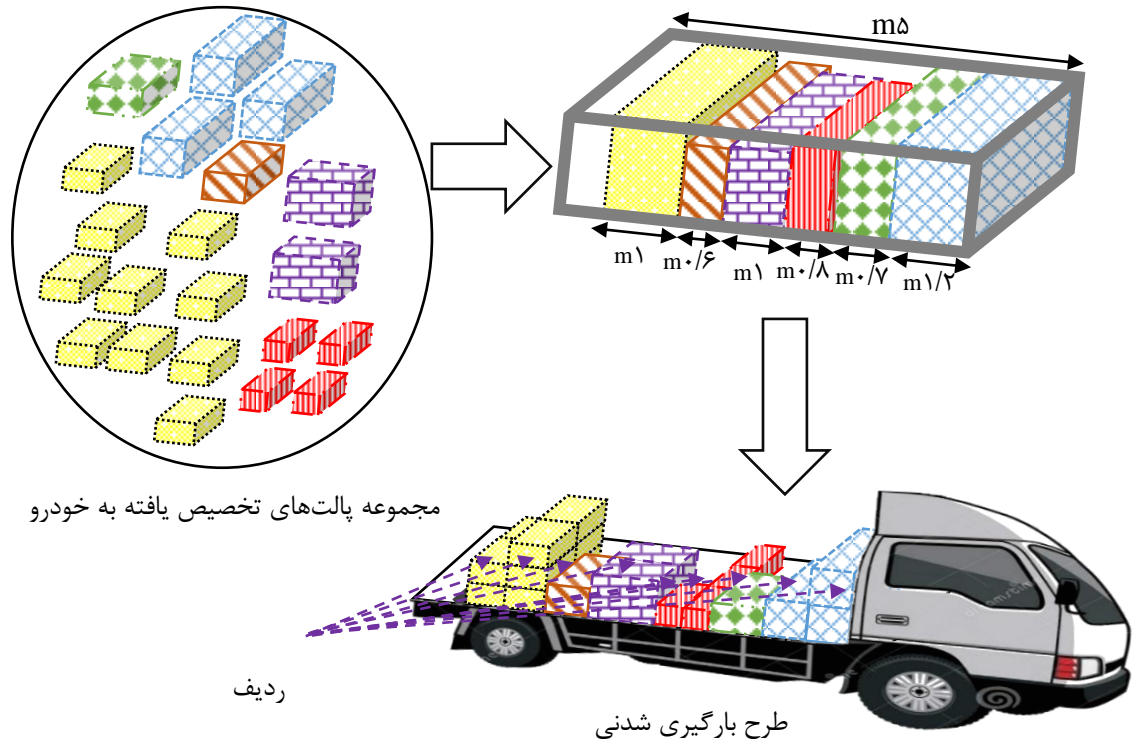
- تعدادی خودرو متعلق به یک ناوگان نامتجانس در دسترس هستند. خودروها از نوع کفی بوده و محفظه بارگیری آنها دارای درب از بغل می باشد. تعداد خودروهای مورد استفاده و همچنین نوع آنها توسط مدل ریاضی تعیین می شود.
- قرارگیری درب محفظه بارگیری در بغل خودرو اجازه می دهد که بارگیری توسط لیفتراک از دو طرف خودرو صورت پذیرد. در این شرایط، مسئله بارگیری می تواند معادل با مسئله بسته بندی اقلام باشد. در سرتاسر مقاله از واژگان "بارگیری" و "بسته بندی" به صورت مترادف استفاده می شود.
- هر خودرو دارای ظرفیت وزنی و ظرفیت حجمی سه بعدی محدود می باشد.
- در صورتی که حداقل یک پالت فلزی درون محتویات خودرو باشد، هزینه مسیر به صورت یک و نیم برابر محاسبه می شود (زیرا خودرو مجبور است به تعداد پالت های فلزی که حامل آنهاست، پالت خالی از محل تحویل برداشت نموده و به سازندگان مربوطه بازگرداند). شایان ذکر است که پالت های چوبی در محل مصرف تبدیل به ضایعات چوبی شده و الزامی به بازگرداندن آنها نیست. خودروهایی که صرفاً حامل پالت های چوبی هستند، بعد از تحویل سفارشات آزاد می شوند.
- پالت های چوبی قابلیت قرارگیری روی یکدیگر را ندارند.
- زمان های بارگیری و تخلیه مجزا از زمان های سفر بوده و تابعی از تعداد پالت های در حال بارگیری و یا تخلیه هستند.
- بارگیری و تحویل یک سفارش می بایست در یک بازه (پنجره زمانی) معین از زمان در طول روز صورت پذیرد.
- درون یک خودرو، پالت های یک سفارش نمی توانند در مکان های مختلف بارگذاری شوند. به عبارت دیگر، پالت های یک سفارش می بایست حداقل در یک وجه به یکدیگر چسبیده باشند.
- یک خودرو می تواند تنها یکبار از گره های مربوط به تامین کنندگان خارج شده و به یکی از گره های مربوط به تحویل گیرندگان وارد شود.

یکی از پیش فرض های موجود در مسائل بسته بندی اقلام در ظروف دو بعدی و سه بعدی آن است که شکل اقلام معین و ثابت است. هیچگونه تغییر شکل و یا تغییر ابعاد در اقلام به هنگام بسته بندی مجاز نمی باشد. اما در مسئله مورد بررسی در این مقاله، هر یک از سفارشات که متناظر با یک قلم در مسائل بسته بندی است، دارای یک پارامتر به نام تعداد پالت است. تخصیص سفارشات به خودروها بایستی بر حسب محدودیت های بارگیری شدنی باشد. رویه بارگیری سفارشات درون خودرو که توسط شرکت سایپا انجام می شود بدین صورت است: "پالت ها به صورت ردیف های عرضی در طول خودرو چیده می شوند. بدین ترتیب

که اولویت با چیدن پالت‌ها در عرض خودرو است. پس از اتمام ظرفیت یک ردیف، پالت‌ها در ردیف دیگر و جلوتر از ردیف قبلی چیده می‌شوند و این کار تا اتمام طول فضای بارگیری خودرو انجام می‌پذیرد. چیدمان پالت‌ها به گونه‌ای است که طول هر پالت در راستای عرض خودرو می‌باشد. این بدان خاطر است که قابلیت برداشت پالت توسط چنگال‌های لیفتراک وجود داشته باشد. تعداد پالتی که در عرض خودرو قرار می‌گیرد، بر حسب نوع پالت و نوع خودرو برای هر سفارش قابل تعیین است. پالت‌های مربوط به سفارشات مختلف که درون یک خودرو چیده می‌شوند نمی‌توانند روی یکدیگر قرار گیرند. تنها پالت‌های مربوط به یک سفارش می‌توانند روی یکدیگر چیده شوند. تعداد پالت‌هایی که روی یکدیگر چیده می‌شوند نیز بر حسب نوع پالت و نوع خودرو برای یک سفارش قابل تعیین است. پالت‌های سفارشات مختلف نمی‌توانند در یک ردیف عرضی با یکدیگر قرار گیرند. " این استراتژی بارگیری به صورت شماتیک در شکل ۱ آمده است. داده‌های مورد نیاز برای رسم این شکل از جدول ۲ به دست می‌آید. با توجه به این نکته که پالت‌ها به صورت ردیفی در خودرو چیده می‌شوند، بگونه‌ای که طول پالت‌ها موازی با عرض خودرو باشد، و با توجه به تعداد پالتی که می‌توانند روی یکدیگر قرار گیرند، تعداد ردیف پالت‌های سفارش m که در طول خودروی k قرار می‌گیرند می‌تواند به صورت $Q_{m,k} = \left\lfloor \frac{f_m}{Nw_{m,k}Nh_{m,k}} \right\rfloor$ محاسبه شود. f_m تعداد پالت‌های سفارش m است. $Nw_{m,k} = \left\lfloor \frac{W_k}{pl_m} \right\rfloor$ ، تعداد پالت‌های سفارش m است که می‌توانند در عرض خودرو k قرار گیرند. $Nh_{m,k}$ حداکثر تعداد پالت سفارش m است که می‌توانند روی یکدیگر درون خودرو k چیده شوند. طول اشغال شده از فضای بارگیری خودرو توسط مجموع عرض‌های تمامی ردیف پالت‌های درون خودرو قابل محاسبه است. با در نظر گرفتن هر سفارش به عنوان یک قلم، بر اساس دستورالعمل فوق می‌توان مسئله بارگیری سفارشات درون خودرو در فضای سه بعدی (3D) را به یک مسئله بسته‌بندی اقلام در ظروف یک بعدی (1D) تبدیل کرد. در مسئله بسته‌بندی متناظر، ظرفیت ظرف برابر با طول خودرو در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه ناوگان نامتجانس می‌باشد، با یک مسئله بسته‌بندی اقلام در ظروف، با ظرفیت متفاوت برای ظروف مواجه هستیم. به علاوه، اندازه اقلام (یعنی طول مورد نیاز برای چیدمان سفارشات درون خودرو) ممکن است با تغییر ظرفیت ظرف (طول خودرو) تغییر یابد. این نوع مسئله بسته‌بندی، شبیه مسئله تخصیص تعمیم یافته است که یکی از مسائل شناخته شده در بهینه‌سازی می‌باشد.

جدول شماره (۲): داده‌های مورد استفاده برای تبیین رویه بارگیری دیکته شده توسط سایپا

m	f_m	$pw_m(m)$	$Nw_{m,k}$	$Nh_{m,k}$	PT_m	$Q_{m,k}$	طول مورد نیاز سفارش از طول فضای بارگیری خودرو k
							$=Q_{m,k} * pw_m$
آبی	۳	۰/۶	۱	۲	فلزی	۲	۱/۲
قرمز	۴	۰/۴	۳	۱	چوبی	۲	۰/۸
زرد	۱۰	۰/۵	۲	۳	فلزی	۲	۱
نارنجی	۱	۰/۶	۲	۲	فلزی	۱	۰/۶
سبز	۱	۰/۷	۲	۱	چوبی	۱	۰/۷
بنفش	۲	۱	۲	۱	فلزی	۱	۱
جمع							۵/۳



شکل شماره (۱): یک طرح بارگیری شدنی

(ب) نمادگذاری

مجموعه خودروها (k)	K
مجموعه گره ها (i, j): اولین گره مجازی است	I
مجموعه سفارشات (m, m')	M
ضرایب ثابت	$M_1 - M_5$
یک مقدار کوچک مثبت	ε
طول فضای بارگیری خودرو k : $L_{max} = \max(L_k)$	L_k
عرض فضای بارگیری خودرو k : $W_{max} = \max(W_k)$	W_k
ظرفیت وزنی خودرو k (Kg)	WC_k
وزن هر پالت از سفارش m (Kg)	w_m
تعداد پالت سفارش m که می توان در عرض خودرو k چید	$Nw_{m,k}$
تعداد پالت سفارش m که می توان روی یکدیگر در خودرو k چید	$Nh_{m,k}$
طول پالت سفارش m	pl_m
عرض پالت سفارش m	pw_m
زمان مورد نیاز بارگیری هر پالت از سفارش m	LT_m
زمان مورد نیاز تخلیه هر پالت از سفارش m	UT_m
اندازه سفارش m (بر حسب تعداد پالتی که باید ارسال شود)	f_m
نقطه مبدا (شروع) سفارش m	$Orig_m$
نقطه مقصد سفارش m	$Dest_m$
سفارشات i که مبدا آنها گره i است	O'_i

سفارشات‌ی که محل تحویل آنها گره i است	D'_i
حد پایین پنجره زمانی برداشت سفارش m	lb_m
حد بالای پنجره زمانی تحویل سفارش m	ub_m
هزینه حمل و نقل از گره i به گره j توسط خودرو k	$cost_{i,j,k}$
زمان حمل و نقل از گره i به گره j توسط خودرو k	$time_{i,j,k}$
تعداد تامین‌کنندگان	ns
تعداد خودروهای در دسترس	nk
تعداد سفارشات	nm
پارامتر تعیین کننده نوع پالت سفارش m (فلزی = ۱ و چوبی = ۰)	PT_m

متغیرهای تصمیم به صورت زیر قابل تعریف هستند:

یک متغیر باینری که برابر ۱ است اگر یال عبوری از گره i به گره j توسط خودرو k پیموده شود و صفر در غیر اینصورت	$X_{i,j,k}$
یک متغیر کمکی که تعریف آن بر اساس ردیف ۲ در جدول ۳ است	$Z_{i,j,k}$
یک متغیر باینری که برابر ۱ است اگر گره i توسط خودرو k ملاقات شود و صفر در غیر اینصورت	$Y_{i,k}$
یک متغیر باینری که برابر ۱ است اگر سفارش m توسط خودرو k برداشته شود و صفر در غیر اینصورت	$\delta_{m,k}$
یک متغیر باینری که برابر ۱ است اگر محتویات خودروی k شامل حداقل یک پالت فلزی باشد و صفر در غیر اینصورت	γ_k
تعداد ردیف پالت‌های سفارش m که پس از برداشت در خودرو k چیده می‌شوند	$Q_{m,k}$
یک متغیر پیوسته برای تعیین طول اشغال شده از فضای بارگیری خودرو k بلافاصله پس از ترک گره i	$U_{i,k}$
یک متغیر پیوسته برای تعیین وزن کل پالت‌های موجود درون خودرو k بلافاصله پس از ترک گره i	$W_{i,k}$
یک متغیر پیوسته برای تعیین زمان رسیدن خودرو k به گره i	$T_{i,k}$

ج) وابستگی‌های منطقی مرتبط با نوع پالت و محدودیت‌های نظیر آنها

شرایط خاصی حاکم بر مسئله است که می‌بایست هنگام ساخت مدل ریاضی مد نظر قرار گیرد. به طور خاص:

۱. اگر درمیان سفارشات درون یک خودرو حداقل یک پالت فلزی موجود باشد، آنگاه خودرو حامل پالت فلزی است (سطر ۱ جدول ۳).
۲. هزینه سفر خودرویی که در محتویات آن حداقل یک پالت فلزی وجود دارد، یک و نیم برابر محاسبه می‌شود (سطر ۲ جدول ۳)

جدول شماره (۳): وابستگی‌های منطقی مرتبط با نوع پالت و محدودیت‌های نظیر آنها

محدودیت‌های متناظر	وابستگی منطقی	ردیف
$\sum_{m \in M} PT_m \delta_{m,k} \leq \gamma_k \sum_{m \in M} PT_m$ $\sum_{m \in M} PT_m \delta_{m,k} \geq \gamma_k$	$\sum_{m \in M} PT_m * \delta_{m,k} \geq 1 \leftrightarrow \gamma_k = 1$	۱
$Z_{i,j,k} \leq 0.5(X_{i,j,k} + \gamma_k), i \in I, j \in I, k \in K$ $X_{i,j,k} + \gamma_k - 1 \leq Z_{i,j,k}, i \in I, j \in I, k \in K$	$Z_{i,j,k} = \begin{cases} X_{i,j,k}, & \gamma_k = 1 \\ 0, & \gamma_k = 0 \end{cases}$	۲

(د) مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط

در این بخش به معرفی یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) برای مسئله MRLP می پردازیم.

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} \text{cost}_{i,j,k} * (X_{i,j,k} + 0.5Z_{i,j,k}) \quad (۱)$$

s. t.

$$Z_{i,j,k} \leq 0.5(X_{i,j,k} + \gamma_k) \quad i \in I, j \in I, k \in K \quad (۲)$$

$$X_{i,j,k} + \gamma_k - 1 \leq Z_{i,j,k} \quad i \in I, j \in I, k \in K \quad (۳)$$

$$\sum_{m \in M} PT_m \delta_{m,k} \leq \gamma_k \sum_{m \in M} PT_m \quad k \in K \quad (۴)$$

$$\sum_{m \in M} PT_m \delta_{m,k} \geq \gamma_k \quad k \in K \quad (۵)$$

$$\sum_{m \in O'_i} \delta_{m,k} + \sum_{m \in D'_i} \delta_{m,k} \geq Y_{i,k} \quad i \in I, i \neq 1, k \in K \quad (۶)$$

$$\delta_{m,k} \leq Y_{i,k} \quad i \in I, i \neq 1, k \in K, m \in O'_i \quad (۷)$$

$$\delta_{m,k} \leq Y_{i,k} \quad i \in I, i \neq 1, k \in K, m \in D'_i \quad (۸)$$

$$\sum_{k \in K} \delta_{m,k} = 1 \quad m \in M \quad (۹)$$

$$\sum_{j \in I} X_{1,j,k} \leq 1 \quad k \in K \quad (۱۰)$$

$$\sum_{i \in I} X_{i,j,k} = \sum_{i \in I} X_{j,i,k} \quad j \in I, k \in K \quad (۱۱)$$

$$\sum_{j \in I} X_{i,j,k} = Y_{i,k} \quad i \in I, k \in K \quad (۱۲)$$

$$\sum_{k \in K} Y_{i,k} \geq 1 \quad i \in I \quad (۱۳)$$

$$\sum_{k \in K} X_{i,i,k} = 0 \quad i \in I \quad (۱۴)$$

$$\sum_{\substack{i \in I, i \neq 1 \\ i \leq ns+1}} \sum_{\substack{j \in I, \\ j > ns+1}} X_{i,j,k} \leq 1 \quad k \in K \quad (۱۵)$$

$$W_{i,k} + \sum_{m \in O'_j} w_m f_m \delta_{m,k} - \sum_{m \in D'_j} w_m f_m \delta_{m,k} \leq W_{j,k} + M_1(1 - X_{i,j,k}) \quad i \in I, j \in I, j \neq 1, i \neq j, k \in K \quad (۱۶)$$

$$W_{i,k} \leq WC_k \quad i \in I, k \in K \quad (۱۷)$$

$$T_{i,k} + \sum_{m \in O'_i} LT_m f_m \delta_{m,k} + \sum_{m \in D'_i} UT_m f_m \delta_{m,k} + \text{time}_{i,j,k} \leq T_{j,k} + M_2(1 - X_{i,j,k}) \quad i \in I, j \in I, j \neq 1, i \neq j, k \in K \quad (۱۸)$$

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

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

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

$$U_{i,k} + \sum_{m \in O'_j} pw_m Q_{m,k} \leq U_{j,k} + M_5(1 - X_{i,j,k}) \quad i \in I, j \in I, j \neq 1, i \neq j, k \in K \quad (22)$$

$$\frac{f_m \delta_{m,k}}{NW_{m,k} Nh_{m,k}} \leq Q_{m,k} \quad m \in M, k \in K \quad (23)$$

$$Q_{m,k} \leq \frac{f_m \delta_{m,k}}{NW_{m,k} Nh_{m,k}} + 1 - \varepsilon \quad m \in M, k \in K \quad (24)$$

$$U_{i,k} \leq L_k \quad i \in I, k \in K \quad (25)$$

$$pw_m Q_{m,k} \leq L_k \delta_{m,k} \quad m \in M, k \in K \quad (26)$$

$$X_{i,j,k}, Y_{i,k}, \gamma_k, \delta_{m,k}, Z_{i,j,k} \in \{0,1\}; \quad (27)$$

$$U_{i,k}, W_{i,k}, T_{i,k}, Q_{m,k} \geq 0$$

تابع هدف (۱) به حداقل‌سازی کل هزینه‌های حمل و نقل می‌پردازد که مشتمل بر هزینه‌های حمل و نقل از تامین‌کنندگان به کارخانه‌های مونتاژ و هزینه‌های برگشت پالت‌های فلزی خالی به تامین‌کنندگان با هزینه‌ای معادل نیم برابر هزینه مسیر رفت است. مجموعه محدودیت‌های (۲) و (۳) برای تحمیل هزینه نیم برابر مربوط به برگشت پالت‌های فلزی خالی به تامین‌کنندگان اعمال می‌شوند. مجموعه محدودیت‌های (۴) و (۵) برای تعیین اینکه آیا حداقل یک پالت فلزی درون خودرو وجود دارد یا خیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای این نوع خودروها هزینه یک و نیم برابر هزینه نرمال است. مجموعه محدودیت (۶) برای اعمال این شرط است که اگر یک خودرو یک گره خاص را ملاقات کرد، آنگاه می‌بایست حداقل یک پالت از یکی از سفارشات آن بردارد و یا تحویل دهد. مجموعه محدودیت‌های (۷) و (۸) نمایانگر آن هستند که اگر سفارش m درون خودرو k قرار گیرد، آنگاه خودرو باید گره‌های مبدا و مقصد سفارش را ملاقات کند. مجموعه محدودیت (۹) اطمینان می‌دهد که سفارشات نمی‌بایست به اجزاء کوچکتر شکسته شوند.

مجموعه محدودیت (۱۰) بیانگر آن است که یک خودرو می‌تواند گره مجازی را حداکثر یک بار ترک کند. مجموعه محدودیت (۱۱) به بالانس جریان می‌پردازد. مجموعه محدودیت (۱۲) تنها یکبار خروج از گره ملاقات شده را جایز می‌داند. مجموعه محدودیت (۱۳) بیان می‌دارد که هر گره می‌بایست حداقل توسط یک خودرو ملاقات شود. مجموعه محدودیت (۱۴) از ایجاد دور جلوگیری می‌کند. مجموعه محدودیت (۱۵) اطمینان می‌دهد که یک خودرو می‌تواند از مجموعه گره‌های تامین‌کننده/انبار، حداکثر یک بار به سمت مجموعه گره‌های مربوط به کارخانه مونتاژ/انبار خارج شود. مجموعه محدودیت (۱۶) کل وزن بار درون خودرو را بعد از هر برداشت یا تحویل بروزرسانی می‌کند. مجموعه محدودیت (۱۷)، محدودیت ظرفیت وزنی خودرو را اعمال می‌کند. زمان رسیدن هر خودرو به هر گره در مسیر خود، توسط مجموعه محدودیت (۱۸) محاسبه می‌شود. مجموعه محدودیت (۱۹) اطمینان می‌دهد که به ازای هر سفارش تخصیص یافته به خودرو، گره مبدا سفارش قبل از گره مقصد آن ملاقات شود. مجموعه محدودیت‌های (۲۰) و (۲۱)، محدودیت‌های مربوط به پنجره‌های زمانی سفارشات را اعمال می‌کنند. مجموعه محدودیت (۲۲) به محاسبه طول اشغال شده از فضای بارگیری خودرو، توسط ردیف پالت‌های موجود در خودرو می‌پردازد. مجموعه محدودیت‌های (۲۳) و (۲۴) برای محاسبه تعداد ردیف پالت‌های سفارش m در خودرو k مورد استفاده قرار می‌گیرند.

این محدودیت‌ها برای خطی سازی عبارت $Q_{m,k} = \left\lfloor \frac{f_m \delta_{m,k}}{Nw_{m,k} N h_{m,k}} \right\rfloor$ مورد استفاده قرار می‌گیرند. مجموعه محدودیت (۲۵) الزام می‌کند که مجموع عرض تمامی ردیف پالت‌های موجود درون خودرو از طول فضای بارگیری خودرو تجاوز نکند. مجموعه محدودیت (۲۶) یک حد بالا روی تعداد ردیف پالت‌های مربوط به سفارش m درون خودرو k قرار می‌دهد. در نهایت، نوع متغیرها توسط مجموعه محدودیت‌های (۲۷) تعیین می‌شود.

از ضرایب M_1-M_5 برای غیر فعال کردن محدودیت‌های 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.

$$M_1 = \max(WC_k) + nm * \max(f_m) * \max(w_m)$$

$$M_2 = \max(ub_m - lb_m) + nm * \max(f_m) * (\max(LT_m) + \max(UT_m)) + \max(time_{i,j,k})$$

$$M_3 = \max(ub_m - lb_m)$$

$$M_4 = \max(ub_m)$$

$$M_5 = L_{max} + nm * \max(f_m) * \max(pw_m) / (\min(Nh_{m,k}) * \min(Nw_{m,k}))$$

ه) 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 مسئله تحت بررسی، دسته اول تصمیمات مربوط به گروه‌بندی یا تخصیص سفارشات به خودروها است، مسئله $MRLP$ می‌تواند به عنوان یک مسئله گروه‌بندی در نظر گرفته شود. در یک مسئله گروه‌بندی، تصمیم گیرنده به دنبال افزایش یک مجموعه از اقلام درون گروه‌هاست. از جمله مسائلی که می‌توانند به عنوان مسائل گروه‌بندی در نظر گرفته شوند می‌توان به مسئله مسیریابی وسیله نقلیه، بسته‌بندی اقلام در ظروف، زمان‌بندی ماشین‌های موازی، خوشه‌بندی داده‌ها و غیره اشاره کرد. در مسئله $MRLP$ در وهله نخست، سفارشات (اقلام) درون خودروها (گروه‌ها) قرار می‌گیرند. بنابراین استفاده از الگوریتم‌های گروه‌بندی می‌تواند یک گزینه ارزشمند برای حل مسئله $MRLP$ باشد. از آنجا که تعداد خودروهای مورد استفاده در جواب‌های مختلف متفاوت می‌باشند، با یک مسئله گروه‌بندی با گروه‌های متغیر مواجه هستیم. به علت نامتجانس بودن ناوگان حمل و نقل، مسئله تحت بررسی یک مسئله گروه‌بندی با گروه‌های غیر یکسان است. به علاوه، به خاطر نیاز به انجام مسیریابی برای خودروها، ترتیب (مسیریابی) اقلام تخصیص یافته به گروه‌ها (گروه‌های مبدأ/مقصد متناظر با سفارشات) مهم است.

بنابراین مسئله از نوع مسئله گروه‌بندی وابسته به ترتیب اقلام است. یک مسئله گروه‌بندی با ویژگی‌های فوق در زمره سخت‌ترین و پیچیده‌ترین مسائل گروه‌بندی می‌باشد (Husseinzadeh Kashan, Akbari & Ostadi, 2015; Husseinzadeh Kashan, Husseinzadeh Kashan & Karimiyan, 2013). با توجه به ساختار خاص و اهمیت مسائل گروه‌بندی، روش‌های فراابتکاری مختلفی برای حل آنها معرفی شده‌اند که طراحی آنها به گونه‌ای است که با ساختار مسئله 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 مسئله $MRLP$ استفاده می‌شود که در ادامه با جزئیات کافی به تشریح آن می‌پردازیم.

GES یک الگوریتم مبتنی بر استراتژی تکاملی (ES) است که برای حل مسائل دارای ساختار گروه‌بندی نخستین بار توسط (Husseinzadeh Kashan, Jenabi & Husseinzadeh Kashan, 2009) و بعد از آن توسط (Husseinzadeh Kashan, Akbari & Ostadi, 2015) 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 بخش‌های بعدی، اجزای اصلی الگوریتم GES پیشنهادی برای حل مسئله $MRLP$ تشریح

می‌شوند. به طور خاص طرح رمزگذاری جواب، نحوه تولید جواب اولیه و مکانیزم تولید جواب جدید توضیح داده می‌شوند. شایان ذکر است که در این مقاله، همواره از استراتژی حفظ شدنی بودن جواب‌ها از نظر محدودیت‌های بارگیری 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 می‌باشد. برای حصول اطلاع از جزئیات بیشتر الگوریتم و پارامترهای کنترلی آن، خوانندگان علاقمند می‌توانند به منابع ذکر شده مراجعه نمایند.

الگوریتم $GES - (1 + \lambda)$

شروع

مقادیر اولیه را برای $r, \alpha^0 > 0, 0 < a \leq 1, \lambda$ و β تعیین کنید؛

$t \leftarrow 0$

$\alpha \leftarrow \alpha^0$

یک جواب شدنی اولیه به نام X^t توسط الگوریتم بهترین-برازش تولید کنید؛

مادامیکه شرایط خاتمه برقرار نیست

به ازای i از ۱ تا λ

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

پایان به ازای

اگر $\text{rand} < r$

از بین X^t و λ جواب فرزند تولید شده، یک جواب را بطور تصادفی انتخاب کنید و آن را X^{t+1} اتلاق کنید؛

در غیر اینصورت

از بین X^t و λ جواب فرزند تولید شده، بهترین جواب را انتخاب کرده و آن را X^{t+1} اتلاق کنید؛

پایان اگر

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

$t \leftarrow t + 1$

$\alpha^t \leftarrow \alpha$

پایان مادامیکه

پایان

از آنجا که مسئله تحت بررسی یک مسئله گروه‌بندی است، طرح نمایش جواب می‌بایست به گونه‌ای معرفی شود که از این ویژگی بهره‌برداری شود. طرح رمزگذاری جواب که الگوریتم *GES* از آن بهره می‌برد، مشتمل بر یک آرایه با ابعاد $1 \times nm$ است که در آن nm تعداد سفارشات است. m امین عنصر این آرایه نشان دهنده شماره خودرویی است که سفارش m به آن تخصیص می‌یابد. اپراتور جهش در الگوریتم *GES*، تخصیص سفارشات به خودروها را مورد دستکاری قرار می‌دهد. در نهایت، سایر اجزای جواب از جمله طرح چیدمان سفارشات درون خودروها (طرح بارگیری) و مسیریابی خودروها می‌بایست تعیین شود. این اجزا در خلال گام‌های الگوریتم بهترین-برازش^۴ تعیین می‌شوند.

(و تولید جواب اولیه و الگوریتم بهترین-برازش

⁴ Best-fit algorithm

تخصیص سفارشات به خودروها توسط الگوریتم بهترین-برازش صورت می‌پذیرد. طراحی این الگوریتم به گونه‌ای است که هنگام تخصیص سفارشات به خودروها، شدنی بودن طرح بارگیری سفارشات درون خودروها و شدنی بودن مسیر خودروها از نظر پنجره‌های زمانی سفارشات، مد نظر قرار می‌گیرد. نمودار ۲، مکانیزم عملکرد الگوریتم بهترین-برازش را به نمایش می‌گذارد. به طور کلی روش‌های مبتنی بر بهترین-برازش بدین ترتیب عمل می‌کنند؛ هر بار از بین اقلام تخصیص نیافته، یک قلم را برحسب یک مشخصه معین انتخاب کرده و آن را در بهترین گروه شدنی قرار دهید. اگر قلم انتخاب شده قابل تخصیص به هیچ یک از گروه‌های موجود نبود، یک گروه جدید باز کرده و قلم موردنظر را به آن تخصیص دهید.

الگوریتم بهترین-برازش طراحی شده در این مقاله، به تخصیص سفارشات تخصیص نیافته به خودروها به صورت یک به یک می‌پردازد. این الگوریتم اولین سفارش تخصیص نیافته را از لیست انتخاب کرده و آن را به صورت موقت به یک خودرو (از میان خودروهای مستعمل موجود) تخصیص داده و به بررسی شدنی بودن تخصیص از نظر محدودیت ظرفیت وزنی خودرو می‌پردازد. سپس شدنی بودن طرح بارگیری بررسی می‌شود. بدین ترتیب که الگوریتم بررسی می‌کند که آیا پس از تخصیص سفارش به خودرو، مجموع عرض‌های ردیف پالت‌های موجود در خودرو از طول فضای بارگیری خودرو متجاوز می‌شود یا خیر. هنگامی که بررسی شدنی بودن طرح بارگیری خاتمه یافت و پالت‌های سفارش جدید توانستند در کنار پالت‌های سایر سفارشات موجود در خودرو درون خودرو قرار گیرند، نوبت به بررسی شدنی بودن مسیریابی از نظر محدودیت‌های پنجره زمانی سفارشات می‌رسد. مکانیزم معرفی شده برای بررسی شدنی بودن مسیر خودرو در بخش‌های آتی تشریح می‌شود. در صورتی که نتیجه یکی از این ۳ بررسی مثبت نباشد، بررسی تخصیص سفارش به خودروی بعدی صورت می‌پذیرد.

مکانیزم‌های تشریح شده برای بررسی شدنی بودن تخصیص سفارش به خودرو، برای تمامی خودروهایی که در حال حاضر حداقل یک سفارش درون خود دارند صورت می‌پذیرد. در نهایت، از میان تمامی خودروهایی که می‌توانند سفارش انتخاب شده را در خود جای دهند، آن خودرویی انتخاب می‌شود که هزینه مسیر طی شده توسط آن از سایرین کمتر باشد و تخصیص سفارش به آن خودرو نهایی می‌شود. این روش برای تمامی سفارشات تخصیص نیافته تکرار شده و تا حصول یک جواب شدنی کامل ادامه می‌یابد. برای تولید جواب اولیه، الگوریتم بهترین-برازش، با یک لیست تصادفی از تمامی سفارشات موجود شروع می‌کند.

ز) الگوریتم تولید جواب جدید^۵ (*NSG*)

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 خودرو در جواب فرزند، از جواب والد به ارث برده می‌شوند. در فاز تخصیص مجدد، سفارشات جامانده در فاز وراثت که به هیچ خودرویی تخصیص نیافته‌اند، به یکی از خودروهای موجود و یا جدید، توسط الگوریتم بهترین-برازش تخصیص می‌یابند.

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

$$y_{ik}^t = x_k^t + z_{ik}^t, \quad k = 1, \dots, n, i = 1, \dots, \lambda, \quad (28)$$

در معادله (۲۸) داریم: $z_{ik}^t = \sigma^t N_{ik}(0,1)$ که $N_{ik}(0,1)$ یک عدد تصادفی نرمال استاندارد برای بعد k است و σ^t پارامتر استراتژی است. به منظور تطبیق معادله جهش (۲۸) برای مسئله *MRLP*، که یک مسئله گروه‌بندی است، فرض کنید S و S' دو مجموعه از سفارشات درون یک خودروی خاص در دو جواب مختلف باشند. می‌توان از ضریب عدم شباهت جاکارد، برای تعیین درجه تفاوت میان دو مجموعه به صورت زیر استفاده کرد.

⁵ New solution generation

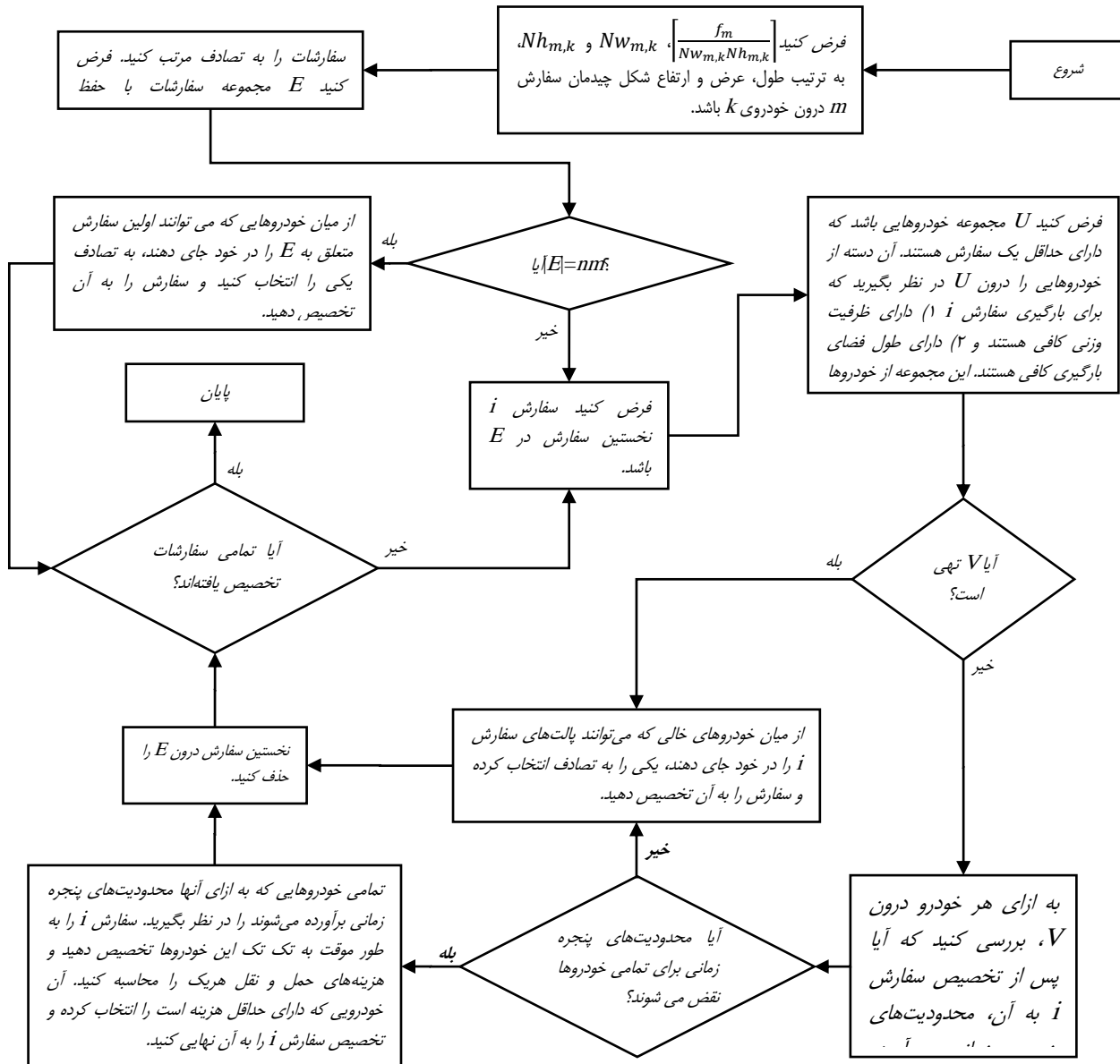
$$Dis(S, S') = 1 - \frac{|S \cap S'|}{|S \cup S'|} \quad (29)$$

که $\cdot /$ نشان دهنده اندازه مجموعه است. برای دستیابی به اپراتور جهش در GES ، با تغییر شکل (28) به صورت

$$Dis(y_{ik}^t, x_k^t) \cong z_{ik}^t \quad (30)$$

و جایگزینی "-" با "Dis" داریم:

$$Dis(y_{ik}^t, x_k^t) \cong z_{ik}^t.$$



نمودار شماره (2): مکانیزم عملکرد الگوریتم بهترین-برازش

توجه داشته باشید که در (30)، y_{ik}^t و x_k^t دلالت بر مجموعه سفارشات تخصیص یافته به خودروی k در جواب Y_i^t و X^t دارند. از آنجا که ممکن است نتوان گروه y_{ik}^t از جواب فرزند را به گونه‌ای ساخت که درجه شباهت آن با گروه x_k^t از جواب والد دقیقاً برابر z_{ik}^t باشد، از عملگر " \cong " استفاده شده است. بعلاوه از تابع چگالی احتمال بتا می‌توان به جای تابع چگالی نرمال استفاده

کرد. زیرا دارای انعطافپذیری و قابلیت مدلسازی چولگی بوده، و دامنه آن بازه $[0-1]$ است (توجه کنید $0 \leq Dis(.,.) \leq 1$). بر اساس (۳۰) می توان نوشت:

$$Dis(y_{ik}^t, x_k^t) \cong Beta_{ik}(\alpha^t, \beta) \quad (31)$$

که در آن $Beta_{ik}(\alpha^t, \beta)$ یک عدد تصادفی بتا به ازای خودروی k در جواب فرزند i در تکرار t است. α^t پارامتر استراتژی است که در تکرارهای متوالی بروزرسانی می شود. بر اساس (۲۹) و (۳۱) داریم:

$$Dis(y_{ik}^t, x_k^t) = 1 - \frac{n_{ik}^t}{|x_k^t|} \cong Beta_{ik}(\alpha^t, \beta) \Rightarrow n_{ik}^t = [1 - Beta_{ik}(\alpha^t, \beta)|x_k^t|] \quad (32)$$

که در آن n_{ik}^t تعداد سفارشات درون خودروی k در جواب والد است که مستقیماً به خودروی k در جواب فرزند انتقال می یابند. بنابراین، $|x_k^t| - n_{ik}^t$ سفارش که درون خودروی k در جواب والد هستند، بابت تکلیف مانده و در خلال فاز وراثت به جواب فرزند انتقال نمی یابند. پس از اتمام فاز وراثت، مجموعه تمام سفارشات بابت تکلیف در فاز تخصیص مجدد، تکلیفشان مشخص شده و توسط الگوریتم بهترین-برازش به خودروهای موجود و یا جدید تخصیص می یابند. 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 سفارشات تخصیص یافته به خودروی k در جواب X^t (که یک گروه بندی شدنی از سفارشات درون خودروها است)، در تکرار t باشد. از میان خودروهای مستعمل در جواب X^t خودروی h را به تصادف انتخاب کرده و مقدار $n_{ih}^t = [1 - Beta_{ih}(\alpha^t, \beta)|x_h^t|]$ 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، سفارشات که وزن بیشتری دارند در اولویت قرار دارند؛

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

به ازای k از 1 تا $|X^t|$

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 g_{ih}^t را به یکی از خودروهای موجود یا جدید تخصیص داده و جواب فرزند Y_i^t را تولید کنید.

پایان

(ح) ساز و کار بررسی شدنی بودن مسیر خودروها

همانطور که قبلاً طرح شد، استراتژی اتخاذ شده برای جستجو، حفظ شدنی بودن جوابها و عدم تولید جوابهای نشدنی در خلال اجرا است. با فرض معلوم بودن محتویات یک خودرو، هنگامی که طرح بارگیری شدنی باشد، نوبت به بررسی شدنی بودن مسیر از نقطه نظر پنجره های زمانی می رسد. بررسی شدن بودن مسیر می تواند به دو طریق صورت پذیرد. نخستین روش بر اساس حل مدل ریاضی مسئله فروشنده دوره گرد با پنجره زمانی برای سفارشات است. مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط زیر

به تعیین مسیر بهینه برای یک خودرو با محتویات معلوم می‌پردازد. از آنجا که این مدل تنها برای یک خودرو حل می‌شود (خودروی e)، از اندیس k صرف نظر می‌شود.

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I'} \sum_{j \in I'} (1 + 0.5P) \text{cost}_{i,j,e} X_{i,j} \quad (33)$$

s. t.

$$\sum_{j \in I'} X_{i,j} = 1 \quad i \in I' \quad (34)$$

$$\sum_{i \in I'} X_{i,j} = 1 \quad j \in I' \quad (35)$$

$$u_i - u_j + nX_{ij} \leq n - 1 \quad j \in I', j \in I', i, j \geq 2, i \neq j \quad (36)$$

$$X_{i,i} = 0 \quad i \in I' \quad (37)$$

$$\sum_{i \in I', i \neq 1} \sum_{j \in I'} X_{i,j} \leq 1 \quad i \leq ns' + 1, j > ns' + 1 \quad (38)$$

$$T_i + \sum_{m \in O'_i} LT_m f_m + \sum_{m \in D'_i} UT_m f_m + \text{time}_{i,j,e} \leq T_j + M_2(1 - X_{i,j}) \quad i \in I', j \in I', j \neq 1, i \neq j \quad (39)$$

$$T_j \geq T_i \quad m \in M_e, i = \text{Orig}_m, j = \text{Dest}_m \quad (40)$$

$$T_i \geq lb_m \quad m \in M_e, i = \text{Orig}_m \quad (41)$$

$$T_i \leq ub_m \quad m \in M_e, i = \text{Dest}_m \quad (42)$$

$$X_{i,j} \in \{0,1\}, T_i, u_i \geq 0 \quad (43)$$

در مدل ریاضی فوق، از متغیر u_i برای حذف زیرتور استفاده می‌شود. n تعداد گره‌های ملاقات شده توسط خودرو است. M_e مجموعه سفارشات تخصیص یافته به خودرو e است. اگر حداقل یک پالت فلزی درون خودرو موجود باشد، آنگاه P برابر یک است. I' مجموعه گره‌های مبدا و مقصد متناظر با سفارشات درون خودرو e است. ns' تعداد گره‌های مبدا (تامین کننده) منحصر به فرد متناظر با سفارشات است. سایر متغیرها نظیر همتای خود در محدودیت‌های (۱) تا (۲۲) و پس از حذف اندیس k قابل تعریف هستند. همانطور که پیشتر گفته شد، مدل ریاضی (۳۳) - (۴۳) به بهینه‌سازی مسیر برای یک خودرو با محتویات معلوم می‌پردازد. این مدل می‌تواند هزینه حمل و نقل مرتبط با مسیر بهینه را تعیین کند. همچنین، از این مدل می‌توان برای بررسی اینکه آیا پس از افزودن یک سفارش به محتویات خودرو، محدودیت‌های پنجره زمانی بر آورده می‌شوند یا خیر استفاده کرد. بدین منظور کافی است تنها یک جواب شدنی برای مجموعه محدودیت‌های (۳۴) - (۴۳) یافته شود.

هنگامی که تعداد سفارشات تخصیص یافته به خودرو 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 (۳۳) - (۴۳) باید به تعداد زیاد ($O(nm \times nk)$ بار در بدترین حالت) در هر بار اجرای الگوریتم بهترین-برازش 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 بر اساس شمارش کامل است. در این روش تمامی مسیرهای ممکن برای خودرو ساخته شده و مسیرهای نشدنی بر حسب محدودیت‌های پنجره 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 تامین کننده/کارخانه مونتاژ

که توسط یک خودرو طی یک روز ملاقات می‌شوند نسبتاً اندک است و بنابراین، روش شمارش کامل می‌تواند از نظر محاسباتی فوق العاده به صرفه باشد.

۳. نتایج و بحث

در این بخش به سنجش اثربخشی مدل‌های 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 رویه تولید نمونه مسائل بحث می‌شود. سپس از نرم‌افزار GAMS/CPLEX 24.1.3 برای حل مدل برنامه‌ریزی ریاضی استفاده شده و نتایج محاسباتی گزارش می‌شوند. به علاوه الگوریتم *GES* در محیط نرم‌افزار متلب برنامه نویسی شده است.

(الف) مطالعه موردی در گروه خودروسازی سایپا

اداره لجستیک داخلی در گروه خودروسازی سایپا، مسئول فراهم آوردن داده‌های مورد نیاز راجع به فهرست تامین‌کنندگان، 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 تامین‌کنندگان و توزیع آنها به انبارهای مرکزی و یا کارخانجات مونتاژ. به طور خاص، جواب مسئله عبارت است از تعیین تعداد خودروهای مورد استفاده، سفارشات که می‌بایست توسط هر خودرو برداشت و تحویل شوند، نحوه چیدمان پالت‌های سفارش درون خودروها و برنامه‌ریزی مسیر حرکت خودروها.

شبکه لجستیک داخلی مشتمل بر ۴۸۰ تامین‌کننده فعال، ۳ کارخانه مونتاژ و ۵ انبار مرکزی می‌باشد. البته سایر مقاصد تحویل نیز وجود دارند. اداره لجستیک داخلی، نقشه کشور را به شصت ناحیه تقسیم کرده است. تامین‌کنندگان درون هر ناحیه، تشکیل یک خوشه می‌دهند. هزینه‌های حمل و نقل، بر مبنای داده‌های ناحیه‌ای برای هر نوع خودرو حساب می‌شود.

همانطور که پیشتر اشاره شد، اداره لجستیک سایپا از استراتژی ارسال مستقیم برای جمع‌آوری و توزیع قطعات استفاده می‌کند. این استراتژی به منظور کاهش پیچیدگی‌های مدیریت ارسال اقتباس شده است. در استراتژی ارسال مستقیم، هر یک از تامین‌کنندگان خود مسئولیت ارسال مستقیم سفارشات به نقاط تحویل را بر عهده دارد؛ بدون اینکه خودرو ارسالی را با تامین‌کننده دیگری به اشتراک بگذارد. بنابراین، روانه‌سازی خودروهایی با ظرفیت نیمه پر 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. حجم قابل توجهی از این قطعات از نوع *B* گرید هستند؛ یعنی قطعات با ابعاد نسبتاً کوچک و تقاضای نسبتاً ثابت. لجستیک میلکران برای توزیع قطعات این گرید مناسب است. همانطور که در دستورالعمل حمل و نقل سایپا آمده است، سه نوع وسیله نقلیه به شرح زیر برای حمل و نقل محموله‌های سفارشات مورد استفاده قرار می‌گیرند.

- تریلر (ارتفاع موثر فضای بارگیری=۲/۵ متر، عرض موثر فضای بارگیری=۲/۶ متر، طول موثر فضای بارگیری=۱۲/۵ متر، ظرفیت وزنی=۲۲ تن)
- خاور (ارتفاع موثر فضای بارگیری=۲/۴ متر، عرض موثر فضای بارگیری=۲/۲ متر، طول موثر فضای بارگیری=۶ متر، ظرفیت وزنی=۶ تن)
- نیسان وانت (ارتفاع موثر فضای بارگیری=۱/۸ متر، عرض موثر فضای بارگیری=۱/۷ متر، طول موثر فضای بارگیری=۲/۳ متر، ظرفیت وزنی=۱/۸ تن)

(ب) تولید مسائل نمونه

تولید مسائل نمونه به طریقی صورت می‌پذیرد که شرایط دنیای واقعی را مدنظر قرار دهد. برای تولید یک نمونه مسئله، به پارامتر تعداد سفارشات نیاز داریم. به ازای هر سفارش، یک شماره به تصادف از میان تمامی کدهای موجودی موجود در پایگاه داده انتخاب می‌شود. بر اساس این کد موجودی، کد تامین‌کننده 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 می‌شوند. بدین ترتیب، نمونه مسائل تولید شده می‌توانند به نحو مناسب، انعکاسی از مسئله توزیع روزانه قطعات در شبکه لجستیک باشند. ۳۰ نمونه مسئله به طور تصادفی تولید شده‌اند که ابعاد آنها برحسب تعداد سفارشات بین ۶ تا ۱۰۰ سفارش، متغیر است.

(ج) نتایج محاسباتی

در این بخش، عملکرد مدل ریاضی و الگوریتم *GES* روی نمونه مسائل تولید شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهای الگوریتم‌های *GES* در جدول ۴ آمده‌اند. هر الگوریتم ۲۰۰۰۰ جواب شدنی را قبل از خاتمه کار تولید و ارزیابی می‌کند.

جدول شماره (۴): پارامترهای الگوریتم *GES*

پارامتر	مقدار
حداکثر تعداد تکرار	۲۰۰۰
λ	۱۰
r	۰/۲
a	۰/۹۹۷
β	۱
α^0	۵

نمونه مسائل تولید شده توسط نرم افزار *GAMS/CPLEX* و الگوریتم *GES* حل شده و مقادیر تابع هدف و زمان‌های اجرا در جدول ۵ گزارش شده‌اند. برای حل کننده *GAMS/CPLEX*، تنها مقادیر تابع هدف و زمان‌های اجرا گزارش می‌شوند. برای الگوریتم *GES*، مقادیر حداقل، متوسط، حداکثر 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.

از نتایج جدول ۵ می‌توان ملاحظه کرد که برای مسائل با ابعاد بسیار کوچک با ۶ سفارش، مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط معرفی شده می‌تواند به جواب بهینه برسد. برای مابقی مسائل، بهینگی نتایج قابل تایید نیست. با این حال، بهترین جواب‌های یافته شده توسط *GAMS/CPLEX* روی نمونه مسائل کوچک (مسائل ۱ تا ۱۵)، همگی یکسان و یا نزدیک به جواب‌های یافته شده توسط الگوریتم *GES* هستند. تنها مورد استثنا نمونه مسائل ۹ و ۱۳ هستند. در اینجا حل کننده *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 نمی‌باشد.

همانطور که می‌توان ملاحظه نمود، 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 است، 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 ۱۴ مسئله از ۱۵ مساله، *GES* مقادیری یکسان را برای تابع هدف در تمامی ۱۰ اجرا گزارش می‌کند. تنها روی نمونه مساله ۱۳ است که *GES* در ۹ اجرا از ۱۰ اجرا می‌تواند بهترین جواب یافته شده را تکرار نماید. این سطح از عملکرد نشان دهنده آن است که الگوریتم *GES* می‌تواند بهینه‌سازی را روی نمونه مسائل کوچک به نحو احسن انجام دهد.

جدول شماره (۵). نتایج مدل *MILP*، الگوریتم *GES* و استراتژی ارسال مستقیم

نوع مسأله	تعداد سفارشات	MILP		GES				هزینه ارسال مستقیم ($\times 10^3$)	درصد کاهش در هزینه ارسال مستقیم	
		زمان (ثانیه)	تایم هدف ($\times 10^3$)	میانگین ($\times 10^3$)	حداکثر ($\times 10^3$)	C.V (%)	زمان (ثانیه)			
۱	۶	۹۴۵/۳	۸۴۰۰	۸۴۰۰	۸۴۰۰	۰	۲۳/۴	۱۲۱۵۰	۳۰/۹	
۲	۶	۷۵۷/۹	۸۹۰۰	۸۹۰۰	۸۹۰۰	۰	۲۳/۲	۱۲۴۵۰	۲۸/۵	
۳	۶	۱۹۲۰	۱۴۴۵۰	۱۴۴۵۰	۱۴۴۵۰	۰	۲۵	۱۷۰۰۰	۱۵	
۴	۷	۳۶۰۰	۸۵۵۰	۸۵۵۰	۸۵۵۰	۰	۲۴/۳	۱۱۰۰۰	۲۲/۳	
۵	۷	۳۶۰۰	۹۹۰۰	۹۹۰۰	۹۹۰۰	۰	۴۰/۳	۱۷۴۵۰	۴۳/۳	
۶	۷	۱۹۹۷/۹	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۰	۳۹/۶	۱۵۴۵۰	۹/۴	
۷	۸	۳۶۰۰	۱۸۹۵۰	۱۸۹۵۰	۱۸۹۵۰	۰	۳۷/۹	۱۹۰۰۰	۰/۳	
۸	۸	۳۶۰۰	۱۰۳۵۰	۱۰۳۵۰	۱۰۳۵۰	۰	۳۷/۷	۱۸۰۰۰	۴۲/۵	
۹	۸	۳۶۰۰	۹۳۰۰	۹۳۰۰	۹۳۰۰	۰	۲۷	۱۱۱۰۰	۱۶/۲	
۱۰	۹	۳۶۰۰	۱۴۲۵۰	۱۴۲۵۰	۱۴۲۵۰	۰	۳۵/۵	۲۲۲۵۰	۳۶	
۱۱	۹	۳۶۰۰	۱۷۷۵۰	۱۷۷۵۰	۱۷۷۵۰	۰	۴۰/۷	۲۲۱۰۰	۱۹/۷	
۱۲	۹	۳۶۰۰	۱۳۹۵۰	۱۳۹۵۰	۱۳۹۵۰	۰	۵۰	۱۵۰۰۰	۷	
۱۳	۱۰	۳۶۰۰	۱۷۵۵۰	۱۵۹۰۰	۱۵۹۴۵	۰/۸۹	۳۷/۱	۱۸۰۰۰	۱۱/۷	
۱۴	۱۰	۳۶۰۰	۱۶۲۵۰	۱۶۲۵۰	۱۶۲۵۰	۰	۵۲/۱	۱۹۱۰۰	۱۴/۹	
۱۵	۱۰	۳۶۰۰	۱۳۸۰۰	۱۳۸۰۰	۱۳۸۰۰	۰	۳۶/۶	۱۵۱۰۰	۸/۶	
۱۶	۲۰	-	-	۲۴۳۵۰	۲۵۴۷۵	۲۶۴۰۰	۲/۶۹	۶۷/۱	۳۵۳۵۰	۳۱/۱
۱۷	۲۰	-	-	۲۸۱۵۰	۲۸۹۲۰	۲۹۸۰۰	۱/۶۴	۷۵/۳	۳۶۱۵۰	۲۲/۱
۱۸	۲۰	-	-	۲۸۶۵۰	۲۹۳۷۰	۳۰۰۰۰	۱/۲۸	۸۷/۸	۴۰۸۰۰	۲۹/۸
۱۹	۳۰	-	-	۴۳۶۰۰	۴۴۸۵۵	۴۶۷۰۰	۲/۳۹	۹۲/۶	۵۲۰۵۰	۱۶/۲
۲۰	۳۰	-	-	۴۱۵۵۰	۴۳۱۲۰	۴۴۹۰۰	۲/۹	۱۰۸/۵	۵۷۸۰۰	۲۸/۱
۲۱	۳۰	-	-	۳۶۲۰۰	۳۷۹۴۰	۳۸۷۵۰	۲/۰۷	۱۰۷/۹	۴۷۲۵۰	۲۳/۴
۲۲	۴۰	-	-	۵۲۳۰۰	۵۴۳۹۵	۵۶۵۰۰	۲/۲۶	۱۲۰/۶	۶۶۰۰۰	۲۰/۸
۲۳	۴۰	-	-	۵۰۴۰۰	۵۳۱۱۰	۵۵۶۵۰	۳/۶۳	۱۴۶/۲	۷۳۸۰۰	۳۱/۷
۲۴	۴۰	-	-	۵۰۷۰۰	۵۳۲۲۰	۵۵۹۰۰	۳/۲۹	۱۲۶/۱	۶۱۶۰۰	۱۷/۷
۲۵	۵۰	-	-	۶۴۲۵۰	۶۷۳۱۰	۷۱۸۵۰	۳/۶۴	۱۵۶/۶	۸۱۱۰۰	۲۷/۱
۲۶	۵۰	-	-	۶۳۳۰۰	۶۶۴۸۰	۶۹۱۵۰	۲/۹۶	۱۶۶/۹	۸۹۹۵۰	۲۹/۶
۲۷	۵۰	-	-	۶۰۰۵۰	۶۲۱۳۰	۶۵۱۵۰	۲/۵۲	۱۶۳/۹	۸۲۶۵۰	۲۷/۳
۲۸	۱۰۰	-	-	۱۲۶۱۰۰	۱۳۱۳۴۵	۱۳۶۷۰۰	۲/۴۷	۳۰۱/۳	۱۶۹۲۰۰	۲۵/۵
۲۹	۱۰۰	-	-	۱۱۵۳۰۰	۱۱۸۲۶۷	۱۲۱۹۷۱	۲/۲	۲۹۳/۳	۱۴۶۷۵۰	۲۱/۴
۳۰	۱۰۰	-	-	۱۳۴۶۵۰	۱۳۸۳۶۰	۱۴۳۰۰۰	۲/۱۱	۲۹۹/۷	۱۶۰۰۵۰	۱۵/۹
								متوسط روی تمامی نمونه مسائل	۲۲/۴۶	
								متوسط روی نمونه مسائل غیر کوچک (۱۶-۳۰)	۲۴/۵۱	

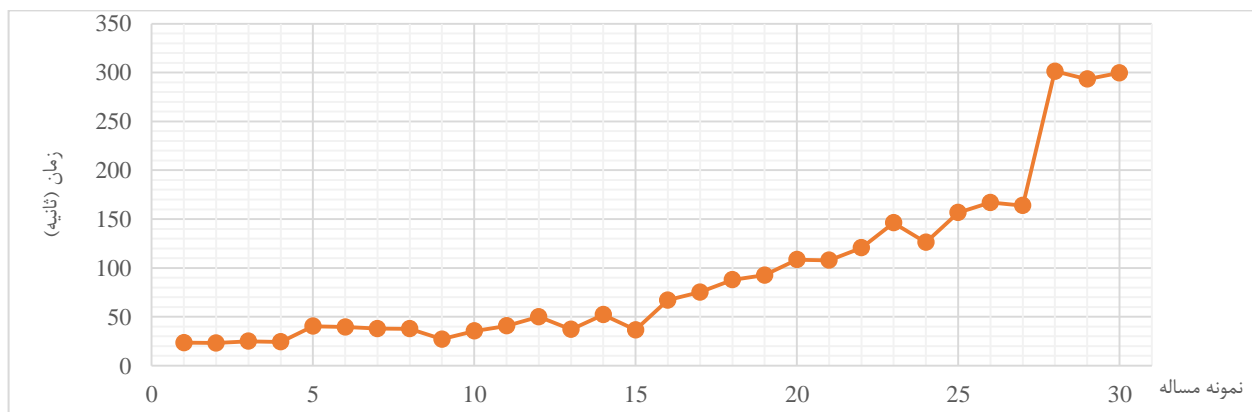
نکته قابل توجه آن است که عملکرد الگوریتم *GES* به گونه‌ای است که مقدار ضرایب تغییرات (*C.V*) گزارش شده توسط آن بسیار کوچک است. ضریب تغییرات یک معیار استاندارد برای تعیین درصد پراکندگی است. مقادیر کوچک ضریب تغییرات

بیان کننده 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 عملکرد در الگوریتم GES داشته باشد.

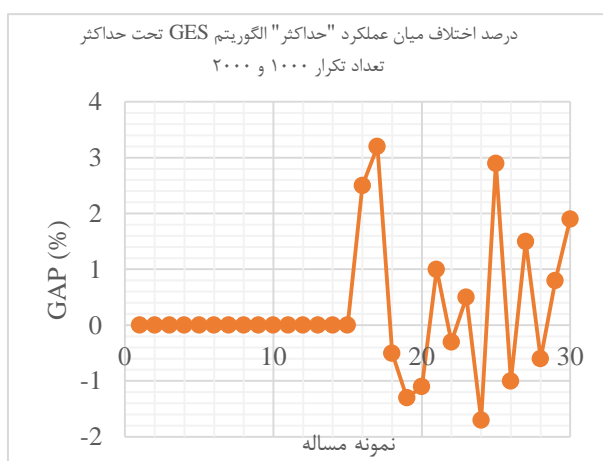
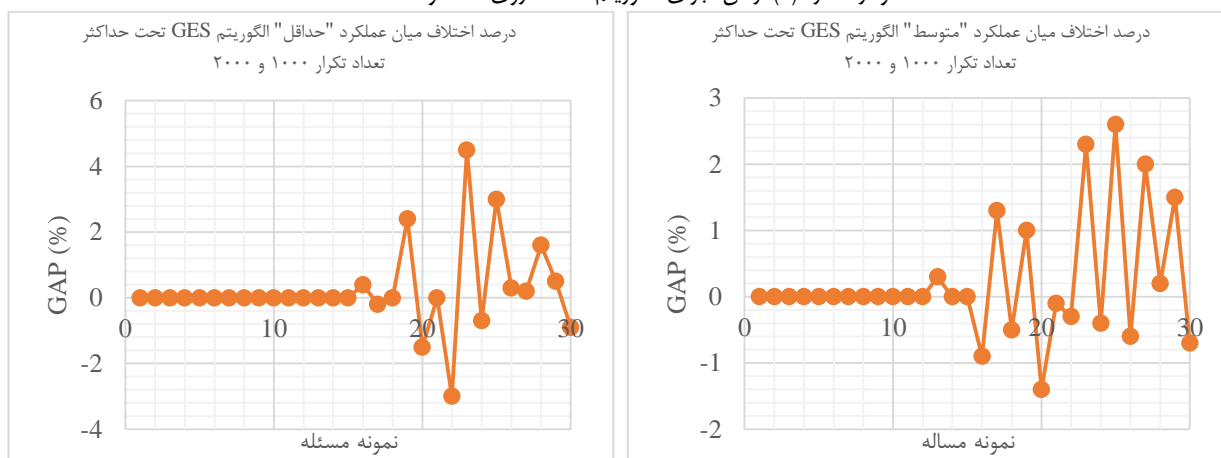
نمودار ۳ روند حاکم بر زمان‌های اجرا را به نمایش می‌گذارد. زمان ثبت شده توسط الگوریتم GES روی هر نمونه مسئله رسم شده است. نکته‌ای که در مورد زمان اجرا وجود دارد آن است که رفتار آن برحسب تعداد سفارشات خطی است. برای GES داریم $T(nm) = 2.878 * nm + 14.218$ و ضریب R^2 برابر ۰/۹۹۷۹ است. $T(nm)$ زمان اجرا بر حسب تعداد سفارشات است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که زمان اجرای الگوریتم GES یک تابع خطی برحسب تعداد سفارشات است.

در جدول ۵، همچنین به مقایسه هزینه گزارش شده توسط الگوریتم GES برای مسئله لجستیک میلکران در قیاس با هزینه‌های ارسال مستقیم می‌پردازیم. از آنجاکه نمونه مسائل ۱ تا ۳۰ به تصادف تولید شده‌اند، نتایج حاصل از اعمال استراتژی ارسال مستقیم روی آنها شبیه‌سازی شده است. البته اداره لجستیک سایپا نیز شیوه و نتایج این شبیه‌سازی را تایید کرده است. همانطور که پیشتر ذکر شد، در استراتژی ارسال مستقیم هر تامین‌کننده مسئول ارسال سفارشات مختص خود است. تامین‌کننده 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 خودرو قرار گیرند. بر اساس نتایج جدول ۵ می‌توان نتیجه گرفت که لجستیک میلکران از یک ظرفیت بالقوه برای کاهش هزینه‌ها برخوردار است. ستون آخر جدول ۵، درصد کاهش در هزینه‌های ارسال مستقیم را که از طریق الگوریتم GES قابل حصول است گزارش می‌کند. روی نمونه 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 بدست آمده روی نمونه مسائل غیر کوچک می‌توان دریافت که لجستیک میلکران قابلیت کاهش ۲۴/۵ درصدی در هزینه‌های تحمیل شده توسط استراتژی ارسال مستقیم را دارد.

به منظور بررسی تاثیر پارامتر حداکثر تعداد تکرار^۶ در عملکرد الگوریتم GES ، حداکثر تعداد تکرار را از ۲۰۰۰ به ۱۰۰۰ کاهش داده و الگوریتم را روی تمامی نمونه مسائل مجدداً اجرا می‌کنیم. درصد کاهش یا افزایش در مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر مقدار تابع هدف، در نمودار ۴ آمده است. مقادیر مثبت دلالت بر عملکرد بهتر الگوریتم تحت حداکثر تعداد تکرار برابر ۲۰۰۰ نسبت به ۱۰۰۰ دارد. همانطور که می‌توان ملاحظه نمود، 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 حداکثر تعداد تکرار می‌تواند نتایج رضایت بخشی را فراهم آورد.



⁶ Maximum iterations

نمودار شماره (۳): زمان اجرای الگوریتم *GES* روی ۳۰ نمونه مسئلهنمودار شماره (۴): مقایسه درصد اختلاف میان عملکرد الگوریتم *GES* تحت دو مقدار مختلف برای حداکثر تعداد تکرار

(د) نتایج روی مسائل با داده‌های واقعی

دو نمونه مسئله با داده واقعی توسط الگوریتم *GES* حل شده و نتایج در جدول ۶ آمده‌اند. نخستین مسئله شامل ۵۳ سفارش و دومین مسئله شامل ۴۴ سفارش می‌باشد. همانطور که می‌توان ملاحظه نمود، یک ظرفیت بالقوه برای کاهش هزینه‌های ارسال مستقیم وجود دارد. با در نظر گرفتن بهترین عملکرد، *GES* قابلیت کاهش ۳۹/۱٪ و ۳۳/۷٪ در هزینه‌ها را برای مسئله یک و دو داراست. با در نظر گرفتن عملکرد متوسط، کاهش در هزینه‌ها به ترتیب برابر ۳۳/۱٪ و ۳۱/۴٪ است. در نهایت از نقطه نظر بدترین عملکرد، میزان کاهش به ترتیب برابر ۳۰/۱٪ و ۲۹/۱٪ است.

شکل ۵ طرح بارگیری و مسیریابی را در بهترین جواب یافته شده توسط الگوریتم *GES*، روی نمونه مسئله دوم با ۴۴ سفارش، نشان می‌دهد. در این شکل، طرح بارگیری سه بعدی برای هر خودرو و مسیر حرکت آن آمده است (مربع نماد گره تامین‌کننده و دایره‌ها نمایانگر گره‌های انبار یا کارخانجات مونتاژ می‌باشند). در جواب مربوطه از ۴ خودروی تریلر و ۶ خودروی خاور استفاده می‌شود. همچنین از هیچ خودروی وانتی استفاده نمی‌شود.

جدول شماره (۶): نتایج روی مسائل با داده‌های واقعی

مسئله	تعداد سفارشات	GES				هزینه ارسال مستقیم
		حداقل	متوسط	حداکثر	C.V (%)	
۱	۵۳	۵۵۸۰۰۰۰۰	۶۲۱۰۷۱۰۰	۶۴۸۵۰۰۰۰	۴/۰۵	۹۲۸۰۰۰۰۰

۲

۴۴

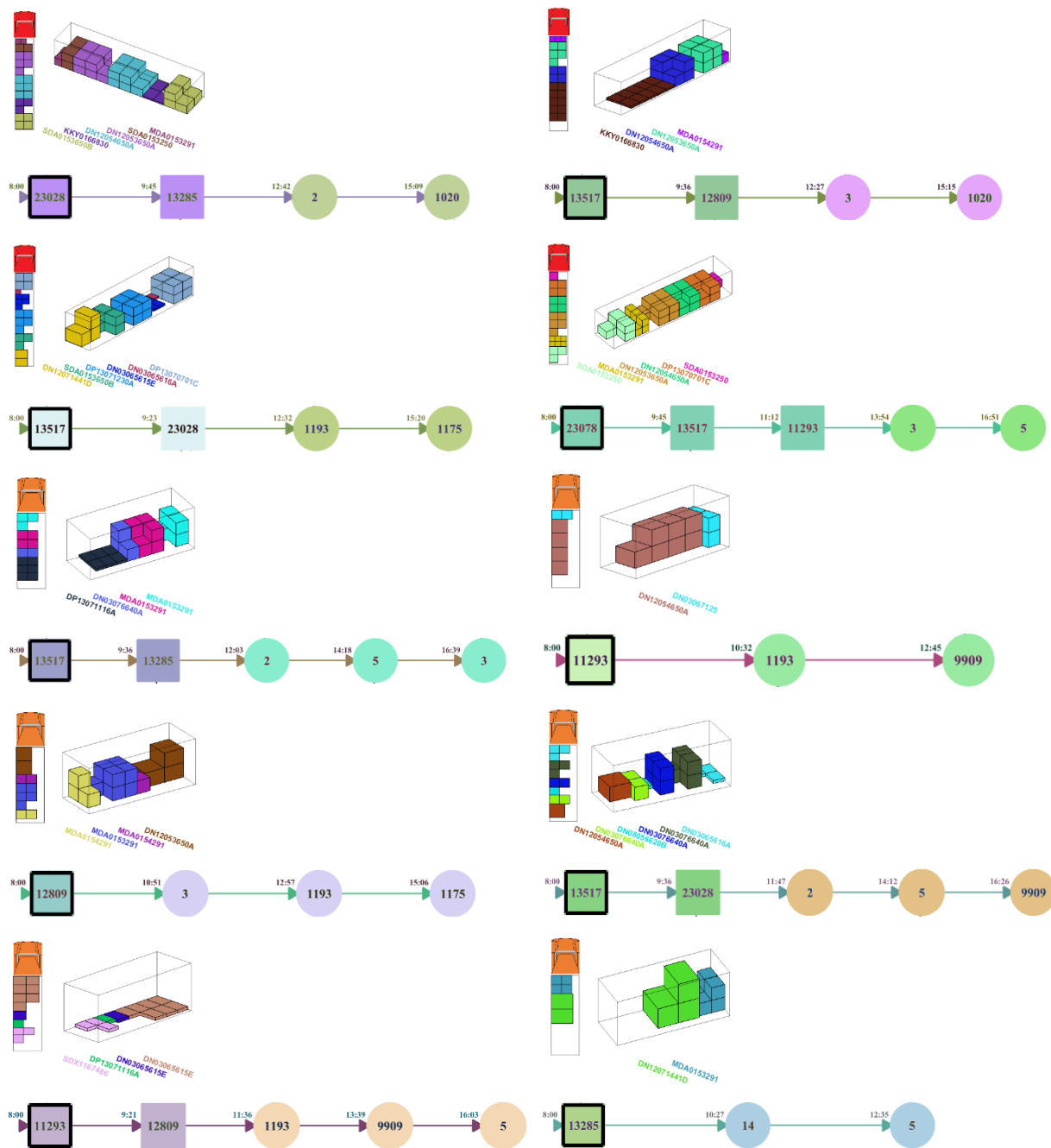
۵۱۳۵۰۰۰۰

۵۳۱۵۵۰۰۰

۵۴۹۵۰۰۰۰

۲/۳۵

۷۷۵۰۰۰۰۰



شکل شماره (۵): طرح بارگیری و مسیریابی تولید شده توسط الگوریتم GES

۵) جمع‌بندی و نتیجه گیری

مقاله حاضر به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط و روش حل برای مسئله لجستیک میلکران در صنعت خودروسازی پرداخته است. مدلسازی ارائه شده بارگیری سفارشات با شکل چیدمان قابل تغییر درون خودروها را مدنظر قرار می‌دهد. سایر ملاحظات نظیر اعمال ۵۰ درصد هزینه بیشتر برای برگشت پالت‌های خالی، پنجره‌های زمانی سفارشات و ناوگان نامتجانس نیز مد نظر قرار گرفتند. با در نظر گرفتن ماهیت مسئله، یک الگوریتم استراتژی تکاملی گروه‌بندی معرفی شد که قادر

به حل مسائل با ابعاد بزرگتر می‌باشد. همچنین از ایده الگوریتم بهترین-برازش برای دستیابی به یک الگوریتم ابتکاری سازنده برای تولید جواب و حصول اطمینان از شدنی بودن آن (از نقطه نظر محدودیت‌های بارگیری و مسیریابی) استفاده شد. عملکرد مدل ریاضی و الگوریتم 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 قابلیت کاهش قابل توجه هزینه‌ها توسط سیستم لجستیک میلکران در قیاس با استراتژی ارسال مستقیم دارند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها دلالت بر آن دارد که یک پتانسیل بالقوه برای کاهش هزینه‌های ناشی از ارسال مستقیم، به میزان ۲۴/۵ درصد به طور متوسط، از طریق استفاده از سیستم لجستیک میلکران وجود دارد.

به منظور انجام تحقیقات آتی می‌توان برای تهیه طرح بارگیری پالت‌های سفارشات درون خودرو، از روش‌های پیشرفته‌تر از جمله استفاده از مدل‌های بارگیری ۳ بعدی اقلام درون کانتینر بهره جست. البته این امر به طور فزاینده‌ای از کارایی حل می‌کاهد. روش ارائه شده در این مقاله برای بارگیری اقلام درون خودرو، طرح بارگیری دیکته شده توسط شرکت سایپا را اعمال می‌کند. همچنین، استفاده از روش‌های مبتنی بر آزادسازی یا تجزیه نیز می‌تواند زمینه تحقیقاتی مناسبی باشد.

۴-منابع

- Ghiani, G, Laporte, G, Musmanno, R. (2004). *Introduction to logistics systems planning and control*, Igarss 2014. John Wiley & Sons.
- Boysen, N, Emde, S, Hoeck, M, Kauderer, M. (2015). Part logistics in the automotive industry: Decision problems, literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research*, 242, 107-120.
- Sadjadi, S. J, Jafari, M, Amini, T. (2009). 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, 194-200.
- Kilic, H. S, Durmusoglu, M. B, Baskak, M. (2012). Classification and modeling for in-plant milk-run distribution systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62, 1135-1146.
- Nemoto, T, Rothengatter, W. (2012). Efficient Green Logistics in Urban Areas: Milk Run Logistics in the Automotive Industry. In: Mackett, R, May, A, Kii M, Pan H. (eds), *Sustainable Transport for Chinese Cities*, 319-337.
- Gyulai, D, Pfeiffer, A, Sobottka, T, Vancza, J. (2013). Milkrun vehicle routing approach for shop-floor logistics. *Procedia CIRP*, 7, 127-132.
- Nemoto, T, Hayashi, K, Hashimoto, M. (2010). Milk-Run logistics by Japanese automobile manufacturers in Thailand. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2, 5980-5989.
- Hosseini, S. D, Shirazi, M. A, Fatemi Ghomi, S. M. T. (2014). Harmony search optimization algorithm for a novel transportation problem in a consolidation network. *Engineering Optimization*, 46, 1538-1552.
- Ranjbaran, F, Husseinzadeh Kashan, A, Kazemi, A. (2020). 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, 1741-1775.
- Jafari-Eskandari, M, Sadjadi, S. J, Jabalameli, M, Bozorgi-Amiri, A. (2009). 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*, 1076-1081.
- Du, T, Wang, F. K, Lu, P. Y. (2007). A real-time vehicle-dispatching system for consolidating milk runs. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43, 565-577.
- Chuah, K. H, Yingling, J. C. (2005). Routing for a Just-in-Time Supply Pickup and Delivery System. *Transportation Science*, 39, 328-339.
- Parragh, S. N, Doerner, K. F, Hartl, R. F. (2008a). A survey on pickup and delivery problems: Part I: Transportation between customers and depot. *Journal fur Betriebswirtschaft*, 58, 21-51.
- Parragh, S. N, Doerner, K. F, Hartl, R. F. (2008b). A survey on pickup and delivery problems: Part II: Transportation between pickup and delivery locations. *Journal fur Betriebswirtschaft*, 58, 81-117.

15. Berbeglia, G, Cordeau, J. F, Gribkovskaia, I, Laporte, G. (2007). Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey. *Top*, 15, 1–31.
16. Berbeglia G, Cordeau J. F, Laporte, G. (2010). Dynamic pickup and delivery problems. *European Journal of Operational Research*, 202, 8–15.
17. Ropke, S, Cordeau, J. F. (2009). Branch and Cut and Price for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. *Transportation Science*, 43, 267–286.
18. Baldacci, R, Bartolini, E, Mingozzi, A. (2011). An Exact Algorithm for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. *Operations Research*, 59, 414–426.
19. Battarra, M, Cordeau, J. F, Iori, M. (2014). Pickup-and-Delivery Problems for Goods Transportation, In: Toth, P, Vigo, D. (eds), *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*, *MOS-SIAM Series on Optimization*, 161–191, Philadelphia.
20. Cherkesly, M, Desaulniers, G, Irnich, S, Laporte, G. (2015). Branch-price-and-cut algorithms for the pickup and delivery problem with time windows and multiple stacks. *European Journal of Operational Research*, 250, 782-793.
21. Veenstra, M, Cherkesly, M, Desaulniers, G, Laporte, G. (2017). The pickup and delivery problem with time windows and handling operations. *Computers and Operations Research*, 77, 127–140.
22. Li, H, Lim, A. (2003). A metaheuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 12, 173–186.
23. Hosny, M. I, Mumford, C. L. (2010). The single vehicle PDPTW: Intelligent operators for heuristic and metaheuristic algorithms. *Journal of Heuristics*, 16, 417–439.
24. Lim, A, Zhang, Z, Qin, H. (2017). Pickup and Delivery Service with Manpower Planning in Hong Kong Public Hospitals. *Transportation Science*, 51, 688–705.
25. Abbasi-Pooya, A, Husseinzadeh Kashan, A. (2017). New mathematical models and a hybrid Grouping Evolution Strategy algorithm for optimal helicopter routing and crew pickup and delivery. *Computers and Industrial Engineering*, 112, 35–56.
26. Nguyen, P. K, Crainic, T., Toulouse, M. (2017). Multi-trip pickup and delivery problem with time windows and synchronization. *Annals of Operations Research*, 253, 899–934.
27. Qu, Y, Bard, J. F. (2013). The heterogeneous pickup and delivery problem with configurable vehicle capacity. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 32, 1–20.
28. Bettinelli, A, Ceselli, A, Righini, G. (2014). A branch-and-price algorithm for the multi-depot heterogeneous-fleet pickup and delivery problem with soft time windows. *Mathematical Programming Computation*, 6, 171–197.
29. Avci, M, Topaloglu, S. (2016). A hybrid metaheuristic algorithm for heterogeneous vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Expert Systems with Applications*, 53, 160–171.
30. Soleimani, H, Chaharlang, Y, Ghaderi, H. (2018). 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, 960–970.
31. Ceselli, A, Righini, G, Salani, M. (2009). A Column Generation Algorithm for a Rich Vehicle-Routing Problem. *Transportation Science*, 43, 56–69.
32. Subramanian, A, Uchoa, E, Ochi, L. S. (2010). New lower bounds for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *International Symposium on Experimental Algorithms*, 276–287.
33. Tasan, A. S, Gen, M. (2012). A genetic algorithm based approach to vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries. *Computers and Industrial Engineering*, 62, 755–761.
34. Liu, R, Xie, X, Augusto, V, Rodriguez, C. (2013). Heuristic algorithms for a vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows in home health care. *European Journal of Operational Research*, 230, 475–486.
35. Chen, Q, Li, K, Liu, Z. (2014). Model and algorithm for an unpaired pickup and delivery vehicle routing problem with split loads. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 69, 218–235.
36. Muter, I, Cordeau, J, Laporte, G. (2014). A Branch-and-Price Algorithm for the Multidepot

- Vehicle Routing Problem with Interdepot Routes. *Transportation Science*, 48, 425–441.
37. Polat, O, Kalayci, C. B, Kulak, O, Günther, H. O. (2015). A perturbation based variable neighborhood search heuristic for solving the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery with Time Limit. *European Journal of Operational Research*, 242, 369-382.
 38. Avci, M, Topaloglu, S. (2015). An adaptive local search algorithm for vehicle routing problem with simultaneous and mixed pickups and deliveries. *Computers and Industrial Engineering*, 83, 15–29.
 39. Mu, D, Wang, C, Zhao, F, Sutherland, J. (2016). Solving vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery using parallel simulated annealing algorithm. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 8, 81-106.
 40. Detti, P, Papalini, F, de Lara, G. Z. M. (2017). A multi-depot dial-a-ride problem with heterogeneous vehicles and compatibility constraints in healthcare. *Omega*, 70, 1–14.
 41. Bula, G. A, Prodhon, C, Gonzalez, F. A, Afsar, M, Velasco N. (2017). Variable neighborhood search to solve the vehicle routing problem for hazardous materials transportation. *Journal of Hazardous Materials*, 324, 472–480.
 42. Zhou, L, Baldacci, R, Vigo, D, Wang, X. (2018). A Multi-Depot Two-Echelon Vehicle Routing Problem with Delivery Options Arising in the Last Mile Distribution. *European Journal of Operational Research*, 265, 765–778.
 43. Fernández Cuesta, E, Andersson, H, Fagerholt, K, Laporte, G. (2017). Vessel routing with pickups and deliveries: An application to the supply of offshore oil platforms. *Computers and Operations Research*, 79, 140–147.
 44. Dragomir, A. G, Nicola, D, Soriano, A, Gansterer, M. (2018). Multidepot pickup and delivery problems in multiple regions: a typology and integrated model. *International Transactions in Operational Research*, 25, 569–597.
 45. Niu, Y, Yang, Z, Chen, P, Xioao, J. (2018). Optimizing the green open vehicle routing problem with time windows by minimizing comprehensive routing cost. *Journal of Cleaner Production*, 171, 962–971.
 46. Alinaghian, M, Shokouhi, N. (2018). Multi-depot multi-compartment vehicle routing problem, solved by a hybrid adaptive large neighborhood search. *Omega*, 76, 85-99.
 47. Wei, L, Zhang, Z, Zhang, D, Leung, S. C. H. (2018). A simulated annealing algorithm for the capacitated vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research*, 265, 843–859.
 48. Belgin, O, Karaoglan, I, Altiparmak, F. (2018). Two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Mathematical model and heuristic approach. *Computers and Industrial Engineering*, 115, 1–16.
 49. López-Sánchez, A. D, Hernández-Díaz, A. G, Gortázar, F, Hinojosa, M.A. (2018). A multiobjective GRASP-VND algorithm to solve the waste collection problem. *International Transactions in Operational Research*, 25, 545–567.
 50. Scheffler, M, Hermann, C, Kasper, M. (2018). Splitting Procedure of Genetic Algorithm for Column Generation to Solve a Vehicle Routing Problem. In Fink A, Fügenshuh A, Geiger M. J. (eds), *Operations Research Proceedings 2016*, Springer International Publishing, 321–328.
 51. Mak-Hau, V, Moser, I. b, Aleti, A. (2018). 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, 91–101.
 52. Hojabri, H, Gendreau, M, Potvin, J. Y, Rousseau, L. M. (2018). Large neighborhood search with constraint programming for a vehicle routing problem with synchronization constraints. *Computers & Operations Research*, 92, 87–97.
 53. Rahbari, A, Nasiri, M. M, Werner, F, Musavi, M. M, Jolai F. (2019). The vehicle routing and scheduling problem with cross-docking for perishable products under uncertainty: Two robust bi-objective models. *Applied Mathematical Modelling*, 70, 605-625.
 54. Beraldi, P, De Maio, A, Laganà, D, Violi, A. (2019). A pick-up and delivery problem for logistics e-marketplace services. *Optimization Letters*, <https://doi.org/10.1007/s11590-019-01472-3>.

55. Sitek, P, Wikarek, J, Ruczynska-Wdowiak, K, Bocewicz, G, Banaszak, Z. (2020). Optimization of capacitated vehicle routing problem with alternative delivery, pick-up and time windows: A modified hybrid approach. *Neurocomputing*, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.02.126>
56. Aziez, I, Cote, J. F, Coelho, L. C. (2020). Exact algorithms for the multi-pickup and delivery problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 284, 906-919.
57. Bernal, J, Escobar, J. W, Linfati, R. (2020). 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*. In Press.
58. Husseinzadeh Kashan, A, Akbari, A. A, Ostadi, B. (2015). Grouping evolution strategies: An effective approach for grouping problems. *Applied Mathematical Modelling*, 39, 2703–2720.
59. Husseinzadeh Kashan, A, Husseinzadeh Kashan, M, Karimiyan, S. (2013). A particle swarm optimizer for grouping problems. *Information Sciences*, 252, 81–95.
60. Husseinzadeh Kashan, A, Jenabi, M, Husseinzadeh Kashan, M. (2009). A New Solution Approach for Grouping Problems Based on Evolution Strategies. *2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition*, 88–93.

Mathematical Modeling and Solution Method of Milkran Logistics in Saipa Group's Inbound Supply Chain under Consideration of Order Time Windows Return Cost of Empty Pallets and In-Vehicle Loading Restrictions

Masoum Najafian

Faculty of Industrial Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Ali Husseinzadeh Kashan (Corresponding Author)

Associate Professor at the Faculty of Industrial and Systems Engineering, Tarbiat Modares University

Email: d.mohamadi@ase.ui.ac.ir

Davood Mohammaditabar

Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Aliakbar Akbari

Faculty of Industrial Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

In the Milkran logistics system, vehicles are sent to collect orders from suppliers and deliver them to assembly lines, according to pre-planned routes. In this way, the vehicle goes to the location of several suppliers to pick up orders and then is sent to one or more destinations for delivery. In this logistics system, cargoes are aggregated within the vehicle and through various nodes in the logistics network. This paper introduces a mixed integer linear programming model for the Milkran logistics problem that takes into account considerations such as three-dimensional loading of the order pallets into vehicles, 50% higher cost for returning empty pallets, order timewindows, and heterogeneous fleets. Given the nature of the problem, an algorithm based on grouping evolutionary strategy is introduced that uses heuristic methods to ensure vehicles' loading and routing feasibility. The effectiveness of the introduced mathematical model and meta-heuristic algorithm is measured using data collected from Saipa Automotive Group. The computational results show that Milkran Logistics has the ability to reduce costs by 24.5% (on average), compared to the direct shipping strategy pursued by Saipa.

Keywords: Milkran Logistics System, Direct Shipping Strategy, Loading and Packing, Mixed Integer Linear Programming, Grouping Evolution Strategy Algorithm.