

Vehicle Routing in a Multi-product Supply Chain using Populated Simulated Annealing Algorithm

Mohammad Ali Beheshtinia*

Assistant Professor, Industrial engineering department, Semnan University, Semnan, Iran, beheshtinia@semnan.ac.ir

Ali Borumand

MA of industrial engineering, Semnan University, Semnan, Iran, ali.borumand@semnan.ac.ir

Mohammad Reza Taheri

MA of industrial engineering, Semnan University, Semnan, Iran, smr.taheri@semnan.ac.ir

Hesam Babaei

MA of industrial engineering, Semnan University, Semnan, Iran, babaei_hessam@semnan.ac.ir

Abstract: This paper aims to examine the scheduling of vehicles in a multi-product supply chain regarding to the mutual relationship between the transportation and the manufacturing units. The integration level in the supply chain consists of a manufacturer and its first tier suppliers, which are linked by a transportation fleet. The problem is determining orders allocation to the suppliers, orders production sequence at the suppliers, orders allocation to the vehicles, and orders transportation priority, in order to minimize the sum of orders delivery time. This issue has not been discussed in the literature, so far. At first, the mathematical model of the problem is presented, then the NP-Hardness of the problem is demonstrated. For solving the problem, a new combination of genetic algorithm and simulated annealing algorithm, named as Populated Simulated Annealing algorithm (PSA) is proposed. For verifying the PSA, its results are compared to results of simulated annealing algorithm (SA) and developed version of DGA algorithm, proposed for the nearest problem in the literature to our problem. Furthermore, relaxing some hypothesis, the results of PSA are compared to DGA results. All of the comparisons show that PSA is more efficient than the other algorithms. Finally, comparison of PSA with exact solution for small size problems demonstrates its proper efficiency.

Keywords: Routing, Genetic Algorithm, Simulated Annealing, Scheduling.

Introduction: The vehicle routing problem (VRP) is one of the most important issues in the world's industry, which, today, is highly regarded because of its practical applications in industries.

We examined the scheduling of production and transportation in a multi-product supply chain considering the interaction between the transportation and the manufacturing units. The supply chain consists of two parts. The first part is suppliers which are located in different geographical locations handling specific orders. The second part consists of several vehicles that collect the orders processed by suppliers and deliver them to the company. The considered transportation system is similar to vehicle routing problem (VRP). The difference between VRP and the problem in this research is that in VRP the amount of goods that should be transported, and is known. However, as it is assumed in this research, the allocation of orders and sequencing of their manufacturing are the decisive variables. Problem objectives are determining the allocation of orders to suppliers, orders production sequence, orders allocation to the vehicles, and transportation sequence, in order to minimize the summation of the orders completion time. Innovation of this paper is as follows:

- A combination of production scheduling problem in suppliers and VRP in a supply chain when the supplier can't process all orders.
- Developing a new mathematical model for solving the problem.
- Three algorithms have been proposed to solve this problem, including: developed DGA, simulated annealing algorithm (SA), and a new combination of these two algorithms, which is named populated simulated annealing algorithm (PSA).

* Corresponding author

A supply chain consists of a set of suppliers, producers and distributors that cooperate with each other in order to satisfy customers' need. A supply chain determines all levels in which the value is added to a product. VRP has several versions. In this study, it is considered that a number of heterogeneous vehicles are collecting orders from suppliers located in different geographical locations.

With considering the integration level of companies in the supply chain, researches can be divided into four categories:

- 1) Researches that examine the relationship between manufacturers and suppliers;
- 2) Researches that examine the relationship between manufacturers and distributors or customers;
- 3) Researches that focus on the relationship between some manufacturers together (Outsourcing);
- 4) Researches that consider combination of the above scenarios.
- 5)

Considering the examination level of supply chain, researches have been divided in two categories: 1) Researches that have a macro planning and coordinating in the completion chain; 2) Researches that have an operational scheduling and coordinating in the supply chain.

The literature shows that the combination of VRP with scheduling problem in supply chains possessing constraint on allocating the orders to suppliers has not been studied.

Materials and Methods: Step 1) Developing a new mathematical model for this problem.

Step 2) Developing the PSA algorithm to solve the problem.

Step 3) Validating PSA algorithm as follows:

Step 3-1) Producing random samples with different structures.

Step 3-2) Comparing PSA with SA and developing DGA.

Step 3-3) Comparing PSA with DGA after adding a relaxation assumption.

Step 3-4) Solving small samples with PSA and comparing with exact solution.

Step 4) Doing sensitivity analysis on the three main parameters. (Number of orders, Number of suppliers, and Number of vehicles)

Results and Discussion: The results of the comparison demonstrate that the populated simulated annealing algorithm shows better results than the other two. This method shows that the combination of genetic algorithm and simulated annealing in this specific way can adapt advantages of both methods. The results show that the mean of answers is increased by increasing number of orders. With increasing suppliers, the objective function is improved because the orders allocate to different suppliers and the delivery time is decreased. By increasing orders processing time, the objective function value gets worse because the waiting time for processing orders is increased. By increasing transport times, the average solution is increased. It's because vehicles should spend more time along the way.

Conclusion

This issue has not been discussed in the literature. At first, the mathematical model is presented and then it is shown that the problem is NP-Hard. Three algorithms have been proposed to solve this problem: Developed DGA, Simulated Annealing Algorithm, and a new combination of these two algorithms, which is named Populated Simulated Annealing Algorithm. Random samples with different structures is created and solved by these three algorithms. Also, relaxation of distance assumption between suppliers that are in the same location has been discussed at Zegordi and Beheshti Nia (2009) and is compared with PSA which shows that PSA is more efficient than the other algorithms. Finally, the comparison of PSA with exact solution for small size problems demonstrates its proper efficiency.

References

- Archetti, C., Jabali, O., & Speranza, M. G. (2015). Multi-period vehicle routing problem with due dates. *Computers & Operations Research*, 61, 122-134 .
- Ray, S., Soeanu, A., Berger, J., & Debbabi, M. (2014). The multi-depot split-delivery vehicle routing problem: Model and solution algorithm. *Knowledge-Based Systems*, 71, 238-265 .
- Zegordi, S., & Beheshti Nia, M. (2009). Integrating production and transportation scheduling in a two-stage supply chain considering order assignment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(9-10), 928-939. doi: 10.1007/s00170-008-1910-x

مسیریابی وسایل نقلیه در زنجیره تأمین چندمحصولی با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید جمعیتی

محمدعلی بهشتی‌نیا^{۱*}، علی برومند^۲، محمدرضا طاهری^۳، حسام بابایی^۴

۱- استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، beheshtinia@semnan.ac.ir

۲- کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ali.borumand@semnan.ac.ir

۳- کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، smr.taheeri@semnan.ac.ir

۴- کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، babaei_hessam@semnan.ac.ir

چکیده: هدف این مقاله، بررسی زمان‌بندی وسایل نقلیه در یک زنجیره تأمین چندمحصولی با در نظر گرفتن رابطه متقابل بین بخش حمل‌ونقل و بخش تولید است. سطح یکپارچگی در نظر گرفته شده در زنجیره تأمین، شامل شرکت سازنده محصولات نهایی و تأمین‌کنندگان رده اول است که یک ناوگان حمل‌ونقل آنها را به یکدیگر مرتبط می‌کند. هدف، نحوه تخصیص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان و تعیین توالی ساخت آنها در هر تأمین‌کننده به همراه تخصیص سفارش‌ها به وسایل نقلیه و تعیین توالی حمل آنها است؛ به‌قسمی که مجموع زمان تحویل سفارش‌ها حداقل شود. این مسأله تاکنون در ادبیات موضوع بررسی نشده است. ابتدا مدل ریاضی مسأله، ارائه می‌شود. پس از نشان‌دادن NP-Hard بودن مسأله، برای حل آن یک الگوریتم ترکیبی - تلفیقی جدید از دو الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید - با نام شبیه‌سازی تبرید جمعیتی (PSA) ارائه می‌شود. برای اعتبارسنجی الگوریتم PSA نتایج آن با نتایج الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و توسعه الگوریتم DGA مقایسه می‌شود. این دو الگوریتم، نزدیک‌ترین مسأله در ادبیات موضوع به مسأله بررسی شده در این مقاله هستند. افزون بر این با ریلکس کردن برخی فرضیات، نتایج الگوریتم PSA با نتایج الگوریتم DGA مقایسه می‌شود. نتایج مقایسه‌ها نشان‌دهنده برتری عملکرد الگوریتم PSA در همه مقایسه‌ها است. همچنین مقایسه نتایج الگوریتم PSA برای مسائل با ابعاد کوچک، نشان‌دهنده کارایی مناسب آن است.

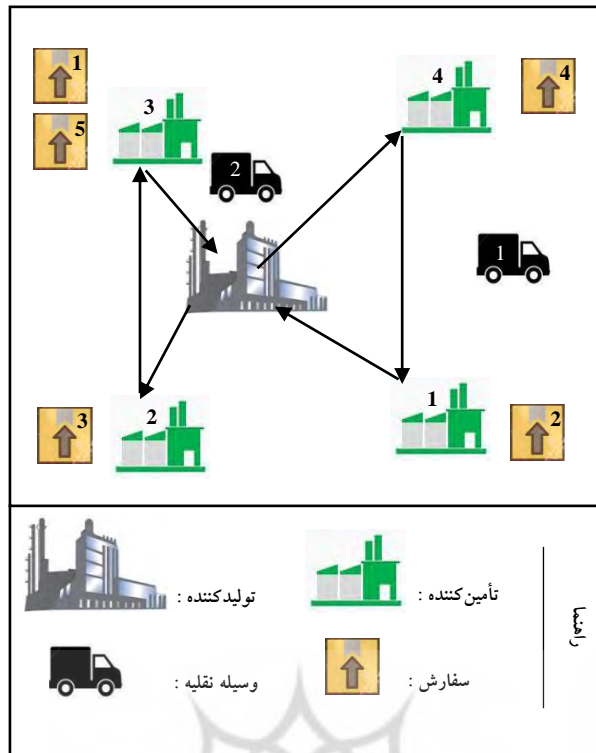
واژه‌های کلیدی: مسیریابی، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، زمان‌بندی تولید

مقدمه

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه (VRP^1) یکی از مهم‌ترین مسائل موجود در صنایع جهان است و امروزه به‌علت کاربردهای واقعی در مسائل صنعتی توجه زیادی به آن شده است. اولین بار این مسئله را دانتزیگ و رامسر مطرح کردند. این مسئله، در زمینه‌های حمل‌ونقل، توزیع و لجستیک مهم است (دانتزیگ و رامسر^۲، ۱۹۵۹). در سال‌های اخیر، برای کاهش قیمت‌ها و افزایش رقابت‌پذیری، فشار زیادی بر صنایع وارد شده است. در این راستا، مدیران از روش‌های مختلفی چون برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید استفاده کرده‌اند و تمرکز آنها به درون بنگاه برای کاهش هزینه‌ها بوده است؛ ولی سازمان‌ها برای ادامه حیات و بقا، ناچار به تعامل با سایر سازمان‌ها هستند؛ از این رو برای کاهش هزینه‌ها باید دیدی فراسازمانی داشت. بنابراین بررسی هم‌زمان نحوه مسیریابی و زمان‌بندی حمل‌ونقل با زمان‌بندی تولید، توجه بسیاری از مدیران را به خود جلب کرده است؛ زیرا این دو نوع زمان‌بندی بر یکدیگر تأثیر متقابل دارند و تصمیماتی که در یکی از این دو مسئله گرفته می‌شود، روی تصمیمات مسائل دیگر اثرگذار است. از این رو این مقاله، زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل در یک زنجیره تأمین را با در نظر گرفتن تأثیر متقابل این دو برهم بررسی می‌کند. زنجیره تأمین شامل مجموعه‌ای از تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان است که هدف واحد آنها، برطرف کردن نیاز مشتری است. یک زنجیره تأمین، تعیین‌کننده تمام سطوحی است که در یک کالای تولیدی، ارزش افزوده ایجاد می‌کند (چانگ و لی^۳، ۲۰۰۴). از سوی دیگر حالت چندمحصولی نیز در این زنجیره تأمین در نظر گرفته شده است. حالت چندمحصولی یعنی یک تأمین‌کننده قادر به پردازش تمام سفارش‌ها نیست و با توجه به ماهیت سفارش‌ها، تنها بخشی از آنها را پردازش می‌کند. مسئله VRP دارای نسخه‌های متعددی است. در این پژوهش حالتی از آن در نظر گرفته می‌شود که تعدادی وسایل نقلیه ناهمگن وظیفه جمع‌آوری سفارش‌ها را از تأمین‌کنندگان در نقاط جغرافیایی متفاوت بر عهده دارند. تفاوت مسئله بررسی شده در این پژوهش با مسئله VRP این است که در مسئله VRP فرض می‌شود مقدار کالایی که باید از هر تأمین‌کننده حمل شود، مشخص است؛ اما در مسئله بررسی شده در این پژوهش، فرض می‌شود تخصیص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان و تعیین توالی تولید آنها، جزء متغیرهای تصمیم مسئله است.

زنجیره تأمین بررسی شده در این مقاله مربوط به یک زنجیره تأمین دوبخشی است. بخش نخست شامل تأمین‌کنندگان است. این تأمین‌کنندگان در نقاط مختلف جغرافیایی مستقر هستند و هر یک توانایی تولید برخی از سفارش‌ها را دارند. بخش دوم متشکل از چند وسیله نقلیه است که باید سفارش‌های پردازش شده نزد تأمین‌کنندگان را جمع‌آوری کنند و به شرکت سازنده تحویل دهند. شکل ۱ نشان‌دهنده شمای کلی زنجیره تأمین بررسی شده، است. در این زنجیره، ۵ سفارش، ۴ تأمین‌کننده و ۲ وسیله نقلیه در نظر گرفته شده است. در این شکل، تخصیص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان، وسایل نقلیه و مسیر حرکت وسایل نقلیه مشخص شده است. این ساختار در صنایعی نظیر خودروسازی، محصولات الکترونیکی و صنایع شیمیایی وجود دارد.

هدف مسئله، تعیین چگونگی تخصیص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان، تعیین ترتیب پردازش سفارش‌ها تخصیص یافته به یک تأمین‌کننده، تخصیص سفارش‌ها به وسایل نقلیه و تعیین ترتیب حمل به هر وسیله نقلیه است؛ به قسمی که مجموع زمان تحویل سفارش‌ها حداقل شود.



شکل ۱- حالت کلی زنجیره تأمین

در ادامه در بخش ۲، ادبیات در حوزه زنجیره تأمین مرور می‌شود. در بخش ۳ درباره مسأله بررسی شده به تفصیل توضیح داده می‌شود و مسأله با یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرموله می‌شود. در بخش ۴ روش‌های حل پیشنهادی ارائه می‌شوند. در بخش ۵ الگوریتم شبیه‌سازی تبرید جمعیتی با الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید کلاسیک مقایسه می‌شود و در نهایت در بخش ۶ جمع‌بندی و زمینه‌هایی برای پژوهش‌های آتی فراهم می‌شود.

مرور ادبیات

تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه ترکیب زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل در زنجیره تأمین انجام شده است. وانگ و چنگ^۴ (۲۰۰۹) مسأله زمان‌بندی تأمین و تحویل سفارش‌ها را با هدف حداقل کردن بازه ساخت بررسی کرده‌اند. در مسأله آنها وسیله نقلیه با ظرفیت محدود و زمان حمل ثابت، سفارش‌ها را از انبار تأمین‌کنندگان به کارخانه و وسیله‌ای دیگر از کارخانه به مشتریان انتقال می‌دهد. آنها نشان دادند مسأله از نوع NP-hard است و یک الگوریتم ابتکاری برای حل آن ارائه کرده‌اند. یمیر و دمیرلی^۵ (۲۰۱۰) یک الگوریتم ژنتیک برای زمان‌بندی در یک زنجیره تأمین دو مرحله‌ای ارائه کرده‌اند. آنها یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^۶ نیز برای بهینه‌سازی تأمین و مونتاژ قطعات و زمان‌بندی توزیع، ارائه کرده‌اند. اسکولز ریتر و همکاران^۷ (۲۰۱۰) یکپارچگی تولید و حمل‌ونقل در یک زنجیره تأمین عمومی را بررسی و یک مدل ریاضی برای حل مسأله ارائه کرده‌اند. تابع هدف مسأله آنها حداقل کردن مجموع هزینه‌های دیرکرد سفارش‌ها، هزینه‌های پردازش، هزینه‌های نگهداری سفارش‌ها و هزینه‌های ثابت و متغیر حمل‌ونقل هستند. لئو و چن^۸ (۲۰۱۲) یکپارچگی مسیریابی، کنترل موجودی و زمان‌بندی را در یک زنجیره تأمین بررسی کرده‌اند و پس از مدل‌سازی ریاضی مسأله، الگوریتم جستجوی همسایگی برای حل آن ارائه کرده‌اند. تابع هدف مسأله،

حداقل کردن مجموع هزینه‌های موجودی، مسیریابی و استفاده از وسایل نقلیه است. مهرآوران و لجندران^۹ (۲۰۱۲) زمان‌بندی در محیط جریان‌کاری با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی را با دو تابع هدف حداقل کردن سفارش‌های نیمه‌ساخته و حداکثر کردن سطح سرویس بررسی کرده‌اند. آنها یک الگوریتم جستجوی ممنوع^{۱۰} برای حل مسأله، ارائه کرده‌اند. کو و وانگ^{۱۱} (۲۰۱۲) مسأله مسیریابی چندنقطه‌ای وسیله نقلیه را با هزینه بارگیری بررسی کرده‌اند و روش جستجوی همسایگی متغیر را برای حل آن ارائه کرده‌اند. روش آنها شامل سه مرحله است: مرحله اول ایجاد یک روش تصادفی برای تولید جواب اولیه؛ مرحله دوم، انتخاب تصادفی چهار اپراتور برای جستجو در جواب‌های همسایگی و مرحله سوم، ارائه معیارهای مشابه شبیه‌سازی تبرید برای پذیرش پاسخ‌های همسایگی است. عثمان و دمیرلی^{۱۲} (۲۰۱۲) زمان‌بندی تحویل و اندازه انباشته اقتصادی را در یک زنجیره تأمین سه‌مرحله‌ای و چندمحصولی بررسی کرده‌اند. این مراحل شامل تأمین‌کنندگان رده دوم، تأمین‌کنندگان رده اول و مونتاژکننده قطعات هستند. آنها یک مدل جدید بر پایه مسأله تخصیص مضاعف برای مسأله ارائه کرده‌اند. مدل آنها، سیکل مشترکی را برای هماهنگی در پر و تخلیه شدن انبارها، تعیین می‌کند. الریچ^{۱۳} (۲۰۱۳) یکپارچگی زمان‌بندی ماشین‌آلات و مسیریابی وسایل نقلیه را با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی مطالعه کرده است. در این پژوهش یک زنجیره تأمین دو مرحله‌ای بررسی شده است. مرحله نخست شامل یک محیط ماشین‌های موازی^{۱۴} با زمان‌های آمادگی وابسته به ماشین است. مرحله دوم نیز شامل یک ناوگان وسایل نقلیه با ظرفیت‌های حمل متفاوت است. کابرا و همکاران^{۱۵} (۲۰۱۳) زمان‌بندی در زنجیره تأمین داروسازی را برای یک محیط چندمرحله‌ای، چندمحصولی و چنددوره‌ای بررسی کرده‌اند. آنها زمان‌بندی را به صورت پیوسته در نظر گرفته و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای آن ارائه کرده‌اند. آوریباخ و بیسان^{۱۶} (۲۰۱۳) مسأله زمان‌بندی در یک زنجیره تأمین دوسطحی را بررسی و یک الگوریتم تخمینی برای آن ارائه کرده‌اند. در مسأله آنها قطع عملیات مجاز و تحویل سفارش‌ها به صورت دسته‌ای در نظر گرفته شده است. تابع هدف، حداقل کردن مجموع جریان سفارش‌ها و هزینه‌های تحویل کالاها در نظر گرفته شده است. رن و همکاران^{۱۷} (۲۰۱۳) یک زنجیره تأمین دو مرحله‌ای را در نظر گرفتند. در این زنجیره، تعدادی تأمین‌کننده، قطعات لازم برای یک مونتاژکننده را فراهم می‌آورند. زمان تحویل هر محصول برابر حداکثر زمان تحویل قطعاتی است که تأمین‌کنندگان برای مونتاژکننده فراهم می‌آورند. توماس و همکاران^{۱۸} (۲۰۱۴) زمان‌بندی در زنجیره تأمین زغال سنگ را با چند فعالیت مستقل، بررسی کرده‌اند. در این مسأله، محدودیت‌های منابع با هم در ارتباط هستند. مسأله آنها از دو زیرمسأله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تشکیل شده است. آنها یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسأله، ارائه و از تکنیک تولید ستون^{۱۹} برای حل آن استفاده کرده‌اند. ساویک^{۲۰} (۲۰۱۴) ارتباط زمان‌بندی با انتخاب تأمین‌کنندگان را در حالت وجود ریسک‌های قطع، بررسی و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و احتمالی برای مسأله ارائه کرده‌اند. در این پژوهش، فرض شده است تأمین‌کنندگان در دو دسته داخلی ناحیه تولید و خارج آن تقسیم‌بندی شده‌اند. تابع هدف، حداقل کردن هزینه‌ها و افزایش سطح سرویس هستند. سالوارجاه و ژانگ^{۲۱} (۲۰۱۴) زمان‌بندی زنجیره تأمینی را بررسی کرده‌اند که در آن یک تولیدکننده، مواد نیمه‌ساخته را از تأمین‌کنندگان در زمان‌های متفاوت دریافت می‌کند و کالاهای تکمیل شده را به صورت دسته‌ای به مشتریان تحویل می‌دهد. تابع هدف مسأله آنها حداقل کردن مجموع وزنی جریان سفارش‌ها و هزینه‌های تحویل دسته‌ها هستند و برای حل آن یک الگوریتم ابتکاری پیشنهاد کرده‌اند. ری و همکاران^{۲۲} (۲۰۱۴) یک مسأله حمل و نقل

چندانباری را با در نظر گرفتن چندین وسیله حمل بررسی کرده‌اند که امکان تحویل چندنوبته کالا در آن وجود دارد. آنها یک مدل برنامه‌ریزی خطی جدید ارائه داده‌اند. همچنین با ارائه یک الگوریتم ابتکاری، جوابی نزدیک به جواب بهینه به دست آورده‌اند. آرچتی و همکاران^{۲۳} (۲۰۱۵) یک مسأله حمل و نقل چنددوره‌ای را با در نظر گرفتن تاریخ تحویل بررسی کرده‌اند. هدف، یافتن مسیر بهینه برای وسایل نقلیه است؛ به گونه‌ای که تمام هزینه‌های حمل و نقل، انبارداری، جریمه‌ها، هزینه‌های سرویس‌دهی و ... حداقل شوند. آنها یک الگوریتم شاخه‌وکران و یک تحلیل محاسباتی برای حل این مسأله ارائه دادند.

با در نظر گرفتن میزان یکپارچگی شرکت‌ها در زنجیره تأمین، پژوهش‌های انجام‌شده به چهار دسته تقسیم می‌شوند. (۱) پژوهش‌هایی که رابطه شرکت‌های سازنده با تأمین‌کنندگانشان را بررسی کرده‌اند؛ (۲) پژوهش‌هایی که رابطه شرکت سازنده با توزیع‌کنندگان یا مشتریانشان را بررسی کرده‌اند؛ (۳) پژوهش‌هایی که رابطه چند شرکت سازنده را با یکدیگر بررسی کرده‌اند (برون‌سپاری^{۲۴})؛ (۴) پژوهش‌هایی که ترکیبی از حالت‌های بالا را در نظر گرفته‌اند.

از نظر سطح بررسی زنجیره تأمین، پژوهش‌های انجام‌شده به دو دسته تقسیم می‌شوند: (۱) پژوهش‌هایی که به صورت کلان در زنجیره تأمین، برنامه‌ریزی تولید^{۲۵} و هماهنگی را انجام داده‌اند. (۲) پژوهش‌هایی که به صورت عملیاتی زمان‌بندی و هماهنگی را در زنجیره تأمین انجام داده‌اند. بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد، ترکیب مسأله VRP با مسأله زمان‌بندی تولید در زنجیره تأمین در حالت وجود محدودیت در تخصیص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان تاکنون بررسی نشده است.

نخعی و همکاران (۱۳۸۶) و ذگردی و بهشتی‌نیا (۱۳۸۸) در پژوهش خود یک زنجیره تأمین خودروسازی سه‌مرحله‌ای را بررسی کرده‌اند. این زنجیره تأمین شامل تأمین‌کنندگان، ناوگان حمل و شرکت‌های سازنده محصول نهایی است. آنها مسأله را به صورت یکپارچه در نظر گرفته‌اند و یک الگوریتم ژنتیک برای آن ارائه داده‌اند. تفاوت اصلی پژوهش حاضر با این پژوهش‌ها این است که در مسائل آنها فرض شده است، همه تأمین‌کنندگان در یک نقطه مستقر هستند و هر تأمین‌کننده توانایی پردازش هر نوع سفارشی را دارد. همچنین آنها از روش حل متفاوتی استفاده کرده‌اند.

مسأله ذگردی و بهشتی‌نیا^{۲۶} (۲۰۰۹) نزدیک‌ترین پژوهش به این پژوهش است. آنها در مسأله خود فرض کرده‌اند، تأمین‌کنندگان در نواحی مختلف جغرافیایی پراکنده شده‌اند و زمان حمل و نقل بین تأمین‌کنندگان در یک ناحیه جغرافیایی، برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین فرض شده است حمل و نقل بین تأمین‌کنندگانی که در نواحی مختلف جغرافیایی پراکنده‌اند مجاز نیست. به عبارت دیگر، در مسأله آنها محاسبات حمل و نقل بین تأمین‌کنندگان انجام نمی‌شود؛ یعنی مسأله مسیریابی وسایل نقلیه مطرح نیست. در این مقاله، مسأله آنها برای توسعه حالتی است که حمل و نقل بین تمام تأمین‌کنندگان مجاز است و زمان‌های حمل و نقل در نظر گرفته می‌شود؛ به عبارتی مسأله مسیریابی نیز در نظر گرفته می‌شود. بررسی مقالات موجود در ادبیات موضوع نشان می‌دهد، ترکیب مسأله VRP با مسأله زمان‌بندی تولید در زنجیره تأمین در حالت وجود محدودیت در تخصیص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان تاکنون بررسی نشده است. همچنین برای حل آن از یک الگوریتم ترکیبی با نام شبیه‌سازی تبرید جمعیتی (PSA) استفاده می‌شود. این الگوریتم، تلفیق جدیدی از دو الگوریتم ژنتیک (GA) و شبیه‌سازی تبرید (SA) است.

جدول ۱- دسته‌بندی مسائل در ادبیات موضوع زمان‌بندی در زنجیره تأمین

مقاله	سطح یکپارچگی				در نظر گرفتن ناوگان حمل و نقل		زمان	
	تامین‌کننده- سازنده	توزیع‌کننده- سازنده	تمرکز روی ساخت	ترکیبی	بله	خیر	دارای افق زمانی	
							زمان گسسته	زمان پیوسته
Wang & Cheng, 2009				*	*			*
Scholz-Reiter et al., 2010		*			*			*
Yimer & Demirli, 2010				*		*		*
Liu & Chen, 2012	*				*			*
Mehravaran and Logendran, 2012		*				*		*
Demirli and Osman, 2012	*					*		*
Kuo & Wang, 2012		*			*			*
Averbakh and Baysan, 2013		*				*		*
Kabra et al., 2013			*			*		*
Ullrich, 2013	*				*			*
Ren, Du, & Xu, 2013	*					*		*
Archetti, Jabali, & Speranza, 2015	*				*			*
Sawik, 2014	*					*		*
Selvarajah and Zhang, 2014		*				*		*
Zegordi & BeheshtiNia, 2009				*	*			*
نخعی و همکاران، ۱۳۸۶				*	*			*
ذگردی و بهشتی‌نیا، ۱۳۸۸				*	*			*
پژوهش حاضر	*				*			*

بنابراین نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر هستند:

- تعمیم مسأله ذگردی (۲۰۰۹) در حالتی که حمل و نقل بین همه تأمین‌کنندگان مجاز است و نباید زمان حمل بین تأمین‌کنندگان را نادیده گرفت.
- ارائه ترکیبی از مسأله VRP و زمان‌بندی تولید در تأمین‌کنندگان یک زنجیره تأمین در حالتی که هر تأمین‌کننده قادر به پردازش تمام سفارش‌ها نباشد.
- توسعه یک مدل ریاضی جدید برای حل مسأله.
- ارائه یک الگوریتم ترکیبی به نام الگوریتم شبیه‌سازی تبرید جمعیتی (PSA^{۲۷}) برای حل مسأله که تلفیق جدیدی از دو الگوریتم GA^{۲۸} و SA^{۲۹} است و همگام‌سازی دو الگوریتم مذکور با فرضیات این مسأله.

تعریف مسأله

در این بخش، ابتدا فرضیات مسأله تبیین و سپس مدل ریاضی مربوط به مسأله ارائه می‌شود. **مفروضات مسأله:** این مقاله به مسأله زمان‌بندی وسایل نقلیه در زنجیره تأمین چندمحصولی تمرکز دارد. هدف آن، حداقل کردن مجموع زمان تحویل سفارش‌ها است. بخش اول از این زنجیره تأمین دو بخشی، شامل مجموعه تأمین‌کنندگان و بخش دوم، شامل ناوگان حمل‌ونقل می‌شود که وظیفه ارسال سفارش‌ها از تأمین‌کنندگان به یک شرکت سازنده محصولات نهایی را بر عهده دارد.

تعاریف و مفروضات مسأله بررسی شده به شرح ذیل هستند:

- تعداد n سفارش وجود دارد. m تأمین‌کننده بدون محدودیت ظرفیت، این سفارش‌ها را پردازش می‌کنند. همچنین این n سفارش با l وسیله نقلیه، جمع‌آوری و به شرکت اصلی انتقال داده می‌شوند. هریک از این n سفارش دارای حجم یا وزن مشخصی هستند؛ اما ممکن است این حجم یا وزن با هم برابر نباشند.
- تأمین‌کنندگان در نقاط مختلف جغرافیایی قرار دارند و فاصله آنها نسبت به هم و نسبت به شرکت اصلی مشخص است. برای کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، وسایل نقلیه مجاز هستند سفارش‌ها را از تأمین‌کنندگان در نواحی جغرافیایی مختلف بارگیری کنند. تأمین‌کنندگان به‌علت داشتن تجهیزات تخصصی، توانایی پردازش تمامی سفارش‌ها را ندارند و فقط سفارش‌های خاصی را پردازش می‌کنند.
- هر وسیله نقلیه، پس از تحویل محموله به شرکت اصلی، از مسأله حذف نمی‌شود و باید دوباره استفاده شود. سفارش‌هایی را که هر بار با یک وسیله نقلیه به شرکت اصلی تحویل داده می‌شوند، یک محموله می‌گویند. هر محموله شامل کالاهای پردازش‌شده چند تأمین‌کننده مختلف است. زمان تحویل به شرکت، برای سفارش‌های موجود در یک محموله، یکسان است. حداکثر محموله هر وسیله در بیشترین حالت ممکن برابر با تعداد سفارش‌ها است؛ آن‌هم وقتی همه سفارش‌ها به یک وسیله نقلیه تخصیص یابد و این وسیله در هر محموله خود یک سفارش را حمل کند.

سوال اصلی پژوهش به صورت زیر است:

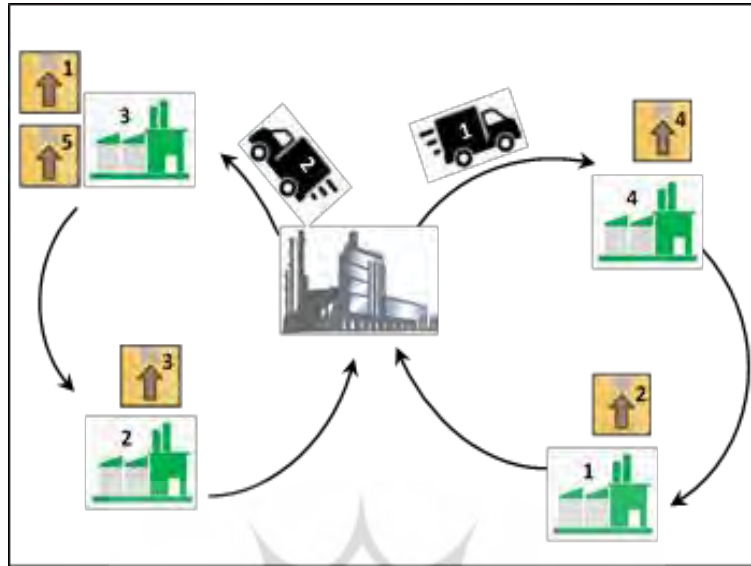
نحوه زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل در زنجیره تأمین شامل یک شرکت سازنده با تأمین‌کنندگان با هدف حداقل کردن مجموع زمان تحویل سفارش‌ها چگونه باشد؟

سوالات فرعی پژوهش نیز به صورت زیر است:

- اختصاص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان چگونه باشد؟
- توالی انجام سفارش‌های تخصیص‌یافته به هر تأمین‌کننده چگونه باشد؟
- نحوه تخصیص محموله‌ها به وسایل چگونه باشد؟
- نحوه تقسیم‌بندی سفارش‌های تخصیص‌یافته به هر وسیله نقلیه به محموله‌های مختلف و مسیریابی حرکت آن چگونه باشد؟

شکل ۲، یک جواب‌شدنی مسأله بررسی شده را نشان می‌دهد؛ به طوری که دو وسیله نقلیه مسئول جمع‌آوری سفارش‌های پردازش‌شده هستند. وسیله نقلیه اول، ابتدا باید سفارش شماره ۴ را نزد تأمین‌کننده چهارم بارگیری

کند، سپس با توجه به ظرفیت باقی مانده، سفارش دوم نزد تأمین کننده اول را بارگیری کرده و به کارخانه سازنده محصولات نهایی تحویل دهد. همچنین وسیله نقلیه دوم باید سفارش های ۱ و ۵ نزد تأمین کننده سوم و سپس سفارش ۳ نزد تأمین کننده دوم را بارگیری و به کارخانه تحویل دهد.



شکل ۲- یک جواب شدنی از مسأله

مدل ریاضی مسأله: در این بخش مدل ریاضی عدد صحیح مختلط مسأله بیان می شود. قبل از ارائه مدل ریاضی مسأله، ابتدا نمادهای استفاده شده معرفی می شوند. مجموعه استفاده شده در مدل عبارت اند از:

- مجموعه ای شامل N سفارش، هر سفارش با اندیس i یا q نشان داده می شود: $i = 1, 2, \dots, N$
- مجموعه ای شامل S تأمین کننده، هر تأمین کننده با اندیس s یا s' نشان داده می شود: $s = 1, 2, \dots, S$
- مجموعه ای شامل V وسیله نقلیه، هر وسیله نقلیه با اندیس m نشان داده می شود: $m = 1, 2, \dots, V$
- ممکن است هر وسیله نقلیه نیز چندین محموله داشته باشد که اندیس آن با b نمایش داده می شود: $b = 1, 2, \dots, N$

- در هر محموله، اولویت بارگذاری سفارش ها با اندیس p نشان داده می شود. بیشترین مقدار برای p برابر N است (وقتی همه سفارش ها به یک محموله از یک وسیله نقلیه اختصاص یابد): $p = 1, 2, \dots, N$

پارامترهای مسأله نیز عبارتند از:

- ظرفیت اشغالی توسط سفارش i/m : Vol_i
- ظرفیت حمل وسیله نقلیه m بر حسب تعداد سفارش ها: Cap_m
- زمان پردازش سفارش i/m : pt_i
- مدت زمان تردد بین تأمین کننده s و کارخانه با وسیله نقلیه m : ttT_{ms}
- مدت زمان تردد بین تأمین کننده s و s' با وسیله نقلیه m : $ttS_{mss'}$
- یک ماتریس با ابعاد $N*S$ ، اگر $a(i,s)$ برابر ۱ باشد به معنای مجاز بودن تخصیص سفارش i به تأمین کننده s است و

بالعکس: A

- یک عدد بزرگ مثبت: M

متغیرهای تصمیم مدل نیز به صورت زیر هستند:

- زمان تکمیل سفارش i در مرحله تأمین کنندگان: c_i

- زمان تحویل سفارش i به کارخانه: D_i

- زمان بارگذاری سفارش i روی یکی از وسایل نقلیه به منظور حمل: L_i

- وقتی وسیله نقلیه m آماده حمل سفارش i در b امین مأموریت خود است: av_{mbi}

- اگر سفارش i به تأمین کننده s داده شود، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است: x_{si}

- اگر در مرحله تأمین کنندگان سفارش i قبل از سفارش q قرار گیرد، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر

است: y_{iq}

- اگر اولویت حمل p در b امین حمل به وسیله نقلیه m مربوط به سفارش i باشد برابر یک و در غیر

این صورت برابر صفر است: U_{mbip}

مدل ریاضی مسأله به صورت زیر است:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^N D_i \quad \text{S.t. :} \quad (1)$$

$$\sum_{s=1}^S x_{si} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^V \sum_{b=1}^N \sum_{p=1}^N U_{mbip} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N U_{mbip} \leq 1 \quad \begin{matrix} m = 1, 2, \dots, V \\ b = 1, 2, \dots, N \\ p = 1, 2, \dots, N \end{matrix} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^N \text{Vol}_i \times U_{mbip} \leq \text{Cap}_m \quad \begin{matrix} m = 1, 2, \dots, V \\ b = 1, 2, \dots, N \end{matrix} \quad (5)$$

$$c_i \geq pt_i - M(1 - x_{si}) \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, N \\ s = 1, 2, \dots, S \end{matrix} \quad (6)$$

$$c_i + M * (2 + y_{iq} - x_{si} - x_{sq}) \geq c_q + Pt_i \quad \begin{matrix} i, q = 1, 2, \dots, N \\ i < q \end{matrix} \quad (7)$$

$$c_q + M * (3 - y_{iq} - x_{si} - x_{sq}) \geq c_i + Pt_q \quad \begin{matrix} s = 1, 2, \dots, S \end{matrix}$$

$$y_{iq} = 0 \quad \begin{matrix} i, q = 1, 2, \dots, N \\ i \geq q \end{matrix} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N U_{mbi(p+1)} \leq \sum_{i=1}^N U_{mbip} \quad \begin{matrix} m = 1, 2, \dots, V \\ b = 1, 2, \dots, N \\ p = 1, 2, \dots, N-1 \end{matrix} \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N U_{m(b+1)i1} \leq \sum_{i=1}^N U_{mbi1} \quad \begin{matrix} m = 1, 2, \dots, V \\ b = 1, 2, \dots, N-1 \end{matrix} \quad (10)$$

$$L_i \geq av_{mbi} - M * (1 - \sum_{p=1}^N U_{mbip}) \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, N \\ m = 1, 2, \dots, V \\ b = 1, 2, \dots, N \end{matrix} \quad (11)$$

$$L_i \geq c_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

$$av_{mli} \geq ttT_{ms} - M * (2 - U_{mli1} - x_{si}) \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, N \\ m = 1, 2, \dots, V \\ s = 1, \dots, S \end{matrix} \quad (13)$$

$$av_{mbi} \geq D_q + ttT_{ms} - M * (3 - U_{mbi1} - U_{m(b-1)q1} - x_{si}) \quad \begin{matrix} i, q = 1, 2, \dots, N \\ m = 1, 2, \dots, V \\ s = 1, \dots, S \\ b = 2, \dots, N \end{matrix} \quad (14)$$

$$av_{mbi} \geq L_q + ttS_{ms's} - M * (4 - U_{mbqp} - U_{mbi(p+1)} - x_{s'q} - x_{si}) \quad \begin{matrix} i, q = 1, 2, \dots, N \\ m = 1, 2, \dots, V \\ s, s' = 1, \dots, S \\ b = 1, 2, \dots, N \\ p = 1, 2, \dots, N - 1 \end{matrix} \quad (15)$$

$$D_i \geq L_q + ttT_{ms} - M * (3 - \sum_{p=1}^N U_{mbip} - \sum_{p=1}^N U_{mbqp} - x_{sq}) \quad \begin{matrix} m = 1, 2, \dots, V \\ b = 1, 2, \dots, N \\ i, q = 1, 2, \dots, N \\ s = 1, \dots, S \end{matrix} \quad (16)$$

$$x_{is} = 0 \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, N \\ s = 1, \dots, S \mid a(i, s) = 0 \end{matrix} \quad (17)$$

$$x_{si} \in \{0, 1\} \quad \forall i, s \quad U_{mbip} \in \{0, 1\} \quad \forall i, m, b, p \quad y_{iq} \in \{0, 1\} \quad \forall i, q$$

$$c_i, D_i, L_i \geq 0 \quad \forall i \quad av_{mbi} \geq 0 \quad \forall i, m, b$$

مجموعه محدودیت ۲ نشان می دهد، هر سفارش تنها باید به یک تأمین کننده تخصیص داده شود. مجموعه محدودیت ۳ نشان می دهد، هر سفارش باید تنها به یک وسیله نقلیه و به یک محموله از آن تخصیص یابد. مجموعه محدودیت ۴ نشان می دهد، یک سفارش نمی تواند به بیش از یک موقعیت در محموله ها و وسایل نقلیه تخصیص یابد. مجموعه محدودیت ۵ تضمین می کند، در هر محموله مجموع فضای اشغالی سفارش های تخصیص یافته به یک وسیله نقلیه نباید از ظرفیت آن وسیله نقلیه بیشتر شود. مجموعه محدودیت ۶ زمان تکمیل هر سفارش در مرحله تأمین کنندگان را در نظر می گیرد. مجموعه محدودیت ۷ بیان می کند، هر تأمین کننده نمی تواند در هر لحظه بیش از یک سفارش را پردازش کند. مجموعه محدودیت ۸ مقداری از متغیرهای زاید را حذف می کند. مجموعه محدودیت ۹ تضمین می کند، اگر به اولویت p/m محموله b/m از وسیله نقلیه m/m سفارشی تخصیص نیابد، به اولویت $m/p+1$ آن محموله، سفارشی تخصیص داده نمی شود. مجموعه محدودیت ۱۰ تضمین می کند، اگر به محموله b/m از وسیله نقلیه m/m سفارشی تخصیص نیابد، به محموله $b/m+1$ آن سفارشی

تخصیص داده نمی‌شود. مجموعه محدودیت ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهند، زمان بارگذاری هر سفارش برابر بیشینه زمان تکمیل پردازش سفارش و زمان آماده‌بودن وسیله نقلیه مرتبط برای حمل آن است.

مجموعه محدودیت ۱۳ تعیین‌کننده زمان آماده‌بودن یک وسیله نقلیه برای حمل سفارشی است که به اولویت اول اولین محموله آن اختصاص یافته است. مجموعه محدودیت ۱۴ تعیین‌کننده زمان آماده‌بودن یک وسیله نقلیه برای حمل سفارشی است که به اولویت اول یک محموله اختصاص یافته است؛ زمان آماده‌بودن با توجه به زمان تحویل سفارش‌های محموله قبلی، مقصد محموله قبلی و زمان حمل تا تأمین‌کننده مرتبط، تعیین می‌کنند. مجموعه محدودیت ۱۵ تعیین‌کننده زمان آماده‌بودن یک وسیله نقلیه برای حمل سفارشی است که به یک محموله اختصاص یافته است؛ زمان آماده‌بودن با توجه به زمان بارگذاری سفارش اولویت قبلی و زمان حمل بین تأمین‌کنندگان مرتبط تعیین می‌شود. مجموعه محدودیت ۱۶ زمان تحویل یک سفارش را با توجه به زمان بارگذاری کلیه سفارش‌های متعلق به محموله خود و مقصد آن تعیین می‌کنند. مجموعه محدودیت ۱۷ از اختصاص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان غیرمجاز جلوگیری می‌کند.

در واقع زمان بارگذاری یک قطعه هنگامی اتفاق می‌افتد که سفارش نزد تأمین‌کننده آماده و وسیله نقلیه به محل تأمین‌کننده رسیده است.

همان‌گونه که اشاره شد، C_i بیانگر زمان تکمیل سفارش i ام و Av_{mbi} بیانگر زمان آماده‌بودن وسیله نقلیه برای حمل سفارش مربوطه است. زمان بارگذاری واقعی سفارش i ام که با L_i نشان داده می‌شود، بزرگتر یا مساوی هر دو این متغیرها است. محدودیت‌های ۱۱ و ۱۲ بیانگر این نکته هستند.

چانگ و لی (۲۰۰۴) نشان می‌دهند، مسأله بررسی شده در حالت وجود یک وسیله نقلیه، دو تأمین‌کننده و بدون در نظر گرفتن فاصله بین تأمین‌کنندگان، از نوع NP-hard است؛ بنابراین حالت تعمیم‌یافته مسأله شامل S تأمین‌کننده و V وسیله نقلیه از نوع NP-hard خواهد بود.

ارائه روش‌های حل

برای حل مسأله مذکور، سه الگوریتم شامل الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم ترکیبی به نام الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندجمعیتی (PSA) (تلفیقی جدید از الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید)، ارائه می‌شوند.

الگوریتم GA: الگوریتم GA یک الگوریتم فراابتکاری است و در حل مسائل NP-hard استفاده می‌شود. این الگوریتم جواب‌های خوبی در زمان معقول ارائه می‌دهد. ایده اصلی الگوریتم ژنتیک از اصل تنازع بقاء موجودات گرفته شده است. این الگوریتم را جان هالند^{۳۰} در سال ۱۹۷۰ ارائه داده است.

گام‌های الگوریتم فراابتکاری GA برای این مسأله به شرح ذیل است:

گام ۱) ایجاد تعدادی جواب تصادفی (نسل اولیه^{۳۱}).

گام ۲) انجام عملگرهای تلفیق^{۳۲} و جهش^{۳۳} برای تعدادی از جواب‌های این نسل.

گام ۳) انتخاب نسل بعدی با استفاده از عملگر انتخاب^{۳۴}.

گام ۴) اگر معیار خاتمه محقق شد، الگوریتم پایان می‌یابد، در غیر این صورت به گام ۲ بازگشته و این روند تکرار می‌شود.

تعریف ساختاری مناسب برای رمزنگاری^{۳۵} هر جواب به صورت یک کروموزوم، کلیدی‌ترین عنصر در الگوریتم ژنتیک به منظور حل مسائل جدید است. به عبارت دیگر، اگر ساختار کروموزومی در فضای ژنوتایپ^{۳۶} تعریف شود که معادل هر جواب در فضای فنوتایپ^{۳۷} باشد، حل مسأله با الگوریتم ژنتیک میسر است و بالعکس. ساختار کروموزوم در الگوریتم ژنتیک ارائه شده، دو بُعدی است. بُعد عمودی، نشان‌دهنده تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه و بُعد افقی نشان‌دهنده سفارش‌های تخصیص یافته و ترتیب آنها به هریک از تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه است.

تأمین‌کننده ۱	۱
تأمین‌کننده ۲	۲→۳→۵
تأمین‌کننده ۳	۴
وسیله نقلیه ۱	۵→۳→۱→۴
وسیله نقلیه ۲	۲

شکل ۳- سفارش‌های تخصیص یافته و ترتیب آنها

به منظور توضیح بیشتر، فرض کنید ۵ سفارش، ۳ تأمین‌کننده و ۲ وسیله نقلیه وجود دارد و تخصیص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه، همچنین اولویت پردازش و حمل آنها به صورت شکل ۱ است. آنگاه ساختار کروموزومی بیان‌کننده تخصیص شکل ۳، شکل ۴ خواهد بود.

تأمین‌کننده ۱	۱			
تأمین‌کننده ۲	۲	۳	۵	
تأمین‌کننده ۳	۴			
وسیله نقلیه ۱	۵	۳	۱	۴
وسیله نقلیه ۲	۲			

شکل ۴- ساختار کروموزوم در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

در صورت تخصیص سفارش‌ها بیش از ظرفیت وسیله نقلیه به آن، برای وسیله نقلیه مذکور تور (محموله) جدیدی ایجاد می‌شود. نحوه تشکیل این تورهای جدید برای هر وسیله نقلیه با الگوریتم زیر است:

- گام ۱- اولویت سفارش‌های اختصاص داده شده به وسیله نقلیه مورد نظر را براساس ساختار کروموزوم در نظر بگیرید.
- گام ۲- سفارش با اولویت اول را به اولین تور اختصاص دهید.
- گام ۳- سفارشی که اولویت حمل اول را داشته و هنوز به محموله‌ها تخصیص نیافته است، در نظر بگیرید. اگر ظرفیت وسیله نقلیه اجازه تخصیص سفارش مذکور را به تور فعلی می‌دهد، این تخصیص را انجام دهید؛ در غیر این صورت، تور فعلی را بسته و تور جدیدی ایجاد کنید. این سفارش را به تور جدید تخصیص دهید و تور جدید را به جای تور فعلی در نظر بگیرید.

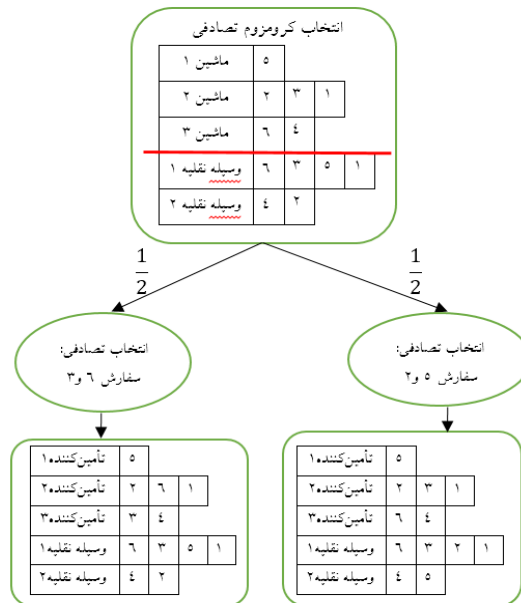
گام ۴- اگر تمامی سفارش‌ها تخصیص داده شده به وسیله نقلیه به تورها تخصیص یافته‌اند، الگوریتم را خاتمه دهید؛ در غیر این صورت به گام ۲ بازگردید. هر وسیله نقلیه پس از جمع‌آوری سفارش‌های یک تور، به کارخانه بازگشته و آنها را تحویل می‌دهد و دوباره برای جمع‌آوری سفارش‌های تور بعدی عازم می‌شود. مانند سایر مسائل زمان‌بندی، در صورت تغییر در ورودی‌های مسئله، نظیر تعداد وسایل نقلیه، تعداد سفارش‌ها و .. مسئله جدید باید دوباره حل شود.

عملگر تلفیق: عمل تلفیق به صورت شکل ۵ انجام می‌شود. برای این کار ابتدا دو کروموزوم از چرخ رولت انتخاب می‌شوند. سپس یک آرایه تصادفی صفر و یک تولید می‌شود. تعداد سلول‌های آن به اندازه تعداد سفارش‌ها هستند. سفارشی که در آرایه تولید شده، عدد صفر به آن تعلق گرفته، جایگاه خود را در کروموزوم فرزند از والد اول و سفارش با عدد یک جایگاهش را از والد دوم به ارث می‌برد. اگر این جایگاه قبلاً پر شده، سفارش به اولین سلول خالی سمت راست تخصیص می‌یابد.

عملگر جهش: شکل ۶ چگونگی عملگر جهش را نشان می‌دهد. در این حالت با احتمال 0.5، بخش تأمین‌کننده و یا وسیله نقلیه انتخاب شده و دو سفارش به صورت تصادفی با هم تعویض می‌شوند. در عملگر تعویض استفاده شده، ابتدا یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ تولید می‌شود. اگر عدد تصادفی تولید شده بین ۰ و ۰/۵ باشد، ۲ ژن را از تکه مربوط به تأمین‌کنندگان انتخاب کرده و مکان این ۲ ژن تعویض می‌شود. در تخصیص جدید باید دقت داشت که تأمین‌کننده می‌تواند سفارش تعویض شده را پردازش کند یا خیر. در صورت مثبت بودن جواب، روند کار ادامه پیدا می‌کند؛ در غیر این صورت جریمه زیادی به تابع هدف این کروموزوم اختصاص داده می‌شود. حال اگر عدد تصادفی تولید شده بین ۰/۵ و ۱ باشد، ۲ ژن را از تکه مربوط به وسایل نقلیه انتخاب کرده و مکان این ۲ ژن تعویض می‌شود.



شکل ۵- عملگر تلفیق



شکل ۶- عملگر جهش

با استفاده از روش تاگوچی پارامترهای الگوریتم GA به صورت جدول ۲ تعیین شدند.

جدول ۲- پارامترهای الگوریتم GA

پارامتر	مقدار
جمعیت اولیه	۱۰۰
نرخ تلفیق	۰/۹
نرخ جهش	۰/۱
معیار خاتمه	عدم بهبود بهترین عضو هر جمعیت در ۲۰ تکرار متوالی

الگوریتم SA: کریک پاتریک و وکی^{۳۸} (۱۹۸۳) الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی پیشنهاد کردند. این الگوریتم با الهام گرفتن از نحوه سرد شدن فلزات، مسائل مختلف را بهینه‌سازی می‌کند. گام‌های الگوریتم فرا ابتکاری SA برای این مسأله به شرح ذیل هستند:

گام ۱- دمای اولیه، تابع سرمایش، شرط خاتمه و تابع احتمال پذیرش جواب‌های بد (تابع بولتزمن) را تعیین کنید.

گام ۲- یک جواب اولیه برای ورودی الگوریتم در نظر بگیرید.

گام ۳- با استفاده از عملگر تعویض، تعداد K همسایگی برای جواب فعلی ایجاد کنید.

گام ۴- اگر مقدار بهترین همسایگی به دست آمده از جواب فعلی بهتر باشد، آن را جایگزین جواب فعلی کنید؛ در غیر این صورت یک عدد تصادفی بین صفر و یک ایجاد کنید. اگر این عدد از مقدار تابع بولتزمن کمتر باشد، بهترین همسایگی را جایگزین جواب فعلی کنید؛ در غیر این صورت آن را رد کنید. تابع بولتزمن به صورت $e^{\frac{-0.5\Delta f}{T}}$ است، در آن Δf میزان تفاوت تابع هدف بهترین همسایگی ایجاد شده و جواب فعلی و T میزان دما در هر مرحله است.

گام ۵- با تابع سرمایه‌دما را کاهش دهید. دمای جدید به صورت $T_{new} = (\alpha)T_{old}$ محاسبه می‌شود.
 گام ۶- اگر معیار خاتمه محقق شد، الگوریتم پایان می‌یابد، در غیر این صورت به گام ۳ بازگردید.
 با استفاده از روش تاگوچی پارامترهای الگوریتم SA به صورت جدول ۳ تعیین شدند.

جدول ۳- پارامترهای الگوریتم SA

پارامتر	مقدار
دمای اولیه	۱۰۰۰۰
دمای نهایی	۱۰
α	۰.۷
K	۲۰
معیار خاتمه	رسیدن به دمای نهایی

الگوریتم PSA: برای حل مسأله مذکور، از ترکیب دو الگوریتم قبلی، روشی جدید با نام PSA ارائه می‌شود. گام-
 های الگوریتم PSA برای این مسأله به شرح ذیل هستند:

- گام ۱- پارامترهای الگوریتم نظیر اندازه جمعیت اولیه (PopSize)، تعداد همسایگی (K)، دمای اولیه، تابع سرمایه‌دما، شرط خاتمه و تابع احتمال پذیرش، جواب‌های بد (تابع بولتزمان) را تعیین کنید.
- گام ۲- به اندازه جمعیت اولیه، تعدادی کروموزوم تصادفی ایجاد کنید.
- گام ۳- برای هر کروموزوم، K همسایگی با استفاده از عملگر تعویض، ایجاد کنید.
- گام ۴- بهترین و بدترین جواب هر جمعیت همسایگی را پیدا کنید.
- گام ۵- برای هر کروموزوم با استفاده از عملگر تلفیق بر روی بهترین همسایگی آن کروموزوم و بهترین همسایگی (PopSize-1) کروموزوم دیگر اجرا کنید. همین عمل را یکبار دیگر برای بدترین همسایگی‌ها نیز انجام داده و جواب‌های تولیدشده را به جمعیت همسایگی همان جامعه اضافه کنید.
- گام ۶- از بین کل همسایگی‌های ایجادشده برای هر کروموزوم، اگر مقدار تابع هدف بهترین همسایگی از مقدار تابع هدف خود کروموزوم بهتر است، آن را جایگزین کروموزوم فعلی کنید؛ در غیر این صورت با استفاده از تابع بولتزمان درباره جایگزینی یا رد آن تصمیم‌گیری کنید.
- گام ۷- با تابع سرمایه‌دما را کاهش دهید.
- گام ۸- اگر معیار خاتمه محقق شد، الگوریتم را پایان دهید، در غیر این صورت به گام ۳ بازگردید.

شبه کد الگوریتم PSA

- 1: Procedure populated simulated Annealing
- 2: for $i=1$:population size do
- 3: pop(i)←produce feasible solution;
- 4: fit(i)←pop(i) fitness;
- 5: Globalbestfit=Inf;
- 6: end for
- 7: while $T \geq T_F$ do

```

8:   for i=1:population size do
      %% neighborhood population(i)
9:   for j=1:neighborhood size do
10:      g=1;
11:      check=0;
12:      while check==0 && g<=G do
13:          newpop(j,i)←pop(i) neighborhood;
14:          if newpop(j,i) is feasible do
15:              check=1;
16:          end if
17:          g=g+1;
18:      end while
19:      if check==0 do
20:          newpop(j,i)←produce feasible solution;
21:      end if
22:      newfit(j,i)←newpop(j,i) fitness;
23:  end for
24:  best(i)←best of neighborhood population(i);
25:  bestfit(i)←best(i) fitness;
26:  worst(i)←worst of neighborhood pop(i);
27: end for
28: for i=1:population size do
29:     kk=1;
30:     for k=1: population size , k≠i do
31:         crossover [best(i) & best (k)]
          newpop(j+kk,i) , newpop(j+kk+1,i) ← ;
32:         crossover [worst (i) & worst (k)]
          newpop(j+kk+2,i) , newpop(j+kk+3,i) ← ;
33:         kk=kk+4;
34:     end for
35: end for
36: for i=1:population size do
37:     newbest(i)←best of new neighbor pop(i);
38:     newbestfit(i)←fitness of newbest(i);
39:     if newbestfit(i)<fit(i) do
40:         fit(i)←newbestfit(i);
41:         pop(i)←newbest(i);
42:         if fit(i)<Globalbestfit do
43:             Globalbestfit←fit(i);
44:             Globalbestpop←pop(i);
45:         end if
46:     else do
47:         pr=exp(-(k*(newbestfit(i)-fit(i)))/T);
48:         if random number ∈(0,1)<pr do
49:             fit(i)←newbestfit(i);
50:             pop(i)←newbest(i);
51:         end if
52:     end if
53: end for
54:     T=α ∈(0,1) × T;
55: end while
56: [Finalfit , index]=min(Globalbestfit);
57: Finalpop= Globalbestpop(index);
58: end procedure

```

با استفاده از روش تاگوچی پارامترهای الگوریتم PSA به صورت جدول ۴ تعیین شدند.

جدول ۴- پارامترهای الگوریتم PSA

پارامتر	مقدار
دمای اولیه	۱۰۰۰۰
دمای نهایی	۱۰
α	۰/۷
K	۲۰
اندازه جمعیت اولیه	۱۰
معیار خاتمه	رسیدن به دمای نهایی

نتایج محاسباتی

در این بخش، اعتبار الگوریتم PSA سنجیده می‌شود. به این منظور، ابتدا نتایج حاصل از الگوریتم با الگوریتم SA و توسعه الگوریتم DGA ارائه شده در پژوهش ذگردی و بهشتی نیا (۲۰۰۹) برای مسأله بررسی شده در این پژوهش، مقایسه می‌شود. این مقایسه به ازای مسائل تصادفی با ابعاد مختلف انجام می‌شود. الگوریتم SA ساختاری مشابه ساختار الگوریتم استفاده شده در PSA دارد؛ با این تفاوت که از یک جواب اولیه برای جستجوی فضای جواب استفاده می‌کند. در ادامه با ریلکس کردن فرض وجود زمان حمل‌های متفاوت بین تأمین‌کنندگان مختلف، مسأله را تبدیل به مسأله بررسی شده در پژوهش ذگردی و بهشتی نیا می‌کند و عملکرد PSA و DGA را با هم مقایسه می‌کند. سپس نتایج به دست آمده از الگوریتم PSA برای مسائل با ابعاد کوچک با حل دقیق مقایسه می‌شود. در انتها نیز حساسیت روی برخی پارامترهای اصلی مسأله، تحلیل می‌شود.

تولید مسائل تصادفی: برای مقایسه الگوریتم PSA با الگوریتم‌های GA و SA، ابتدا تعدادی مسائل تصادفی با ابعاد مختلف ایجاد و با هریک از این الگوریتم‌ها حل می‌شوند. سپس با استفاده از آزمون فرض، عملکرد الگوریتم PSA با دو الگوریتم دیگر مقایسه می‌شود. برای تولید مسائل تصادفی سه پارامتر اصلی مسأله شامل تعداد سفارش، تعداد وسیله نقلیه و تعداد تأمین‌کننده انتخاب و برای هریک از آنها ۳ حالت در نظر گرفته شد. برای سایر پارامترها نیز توزیع یکنواختی در نظر گرفته شد و مقادیر آنها از توزیع‌های مربوطه تعیین شد. جدول ۵ پارامترهای مسأله و مقادیر در نظر گرفته شده برای هریک از آنها را نشان می‌دهد.

جدول ۵- مقادیر مختلف پارامترها

سطح بالا	سطح متوسط	سطح پایین	
۱۰۰	۵۰	۱۰	تعداد سفارش‌ها
۱۰	۵	۱	تعداد تأمین‌کنندگان
۱۵	۱۰	۵	تعداد وسایل نقلیه
	U [20 , 30]		زمان پردازش سفارش‌ها
	U [20 , 30]		زمان‌های حمل
	U [1 , 5]		حجم سفارش‌ها
	U [5 , 20]		ظرفیت ماشین

مقایسه با سایر الگوریتم‌ها: از ترکیب حالات مختلف برای پارامترهای مسئله، ۲۷ مسئله تصادفی ایجاد می‌شود. این ۲۷ حالت در جدول ۶ نشان داده شده‌اند. با توجه به تصادفی بودن ماهیت الگوریتم‌های فرا ابتکاری، ممکن است در هر بار اجرا، نتایج متفاوتی به دست آید.

بنابراین برای انجام آزمون فرض، همه ۲۷ مسئله شکل گرفته به تعداد ۲۰ مرتبه با هر سه الگوریتم حل شده‌اند. بهرای آزمون فرض تست برابری میانگین نتایج به دست آمده از الگوریتم PSA با الگوریتم‌های دیگر، از آزمون T استفاده شده است. به ازای هریک از ۲۷ مسئله، دو آزمون فرض تشکیل می‌شود (در مجموع ۵۴ آزمون). فرض‌های آزمون‌ها به صورت زیر هستند:

فرض H_0 : میانگین نتایج به دست آمده از PSA برابر با میانگین نتایج به دست آمده از SA (توسعه DGA) یکسان است.

فرض H_1 : میانگین نتایج به دست آمده از PSA کوچکتر از میانگین نتایج به دست آمده از SA (توسعه DGA) است. سطح اطمینان همه آزمون‌ها برابر با ۹۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. در حالت‌هایی که فرض H_0 رد شود؛ یعنی در آن حالت‌ها، عملکرد الگوریتم PSA بهتر از الگوریتم مقایسه شده است.

جدول ۶ برای هریک از الگوریتم‌ها و به ازای هر حالت، مقادیر میانگین جواب‌ها، بهترین جواب و میانگین زمان‌های حل (بر حسب ثانیه) را نمایش می‌دهد. همچنین در این جدول مقدار p-value حاصل از انجام آزمون‌های فرض نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، در ۷۳ آزمون از ۷۴ آزمون انجام شده، مقدار p-value کمتر از ۰/۰۵ است. این نتیجه، برتری PSA را نسبت به دو الگوریتم دیگر، نشان می‌دهد.

جدول ۶- نتایج آزمون فرض مقایسه PSA, SA و توسعه DGA

مسئله	تعداد سفارش	تعداد وسیله نقلیه	تعداد تأمین کننده	PSA			SA			توسعه DGA			P-Value (PSA-SA)	P-Value (PSA-DGA)
				Best	Avg	Mean CPU Time (Second)	Best	Avg	Mean CPU Time (Second)	Best	Avg	Mean CPU Time (Second)		
۱	۱۰	۱	۵	۸۹۴	۹۲۳/۴۲۵	۲/۴۹۵۵	۹۰۰	۱/۶۶۵	۵۲۸/۰	۹۴۵	۲۴۲/۳۱۱	۳۸۶۹۳/۰۱	۴E-۴	۰/۰۰۱۹
۲	۱۰	۱	۱۰	۸۳۷	۸۸۲/۵۵	۲/۵۴۰۱	۸۴۷	۵۳۸/۴۷۵	۶۳۸/۰	۱۲۷	۱/۱۱	۹/۱۳۹	۲E-۵	۰/۰۰۳۶
۳	۱۰	۱	۱۵	۷۹۷	۸۳۹/۲۲۵	۲/۵۸۶۹	۸۳۰	۵۷۱/۳۷۷	۵۶۸/۰	۳۸۸	۶۰۶	۱۵/۰/۰۱	۵E-۱۱	۰/۰۰۹۱۴
۴	۱۰	۵	۵	۵۶۶	۵۸۲/۱۷۵	۲/۶۱۶۷	۱۸۵	۵۷۰/۳۷۵	۶۱۶/۰	۷۶۵	۸۰۵/۳۱۴	۳۸۳۴۱/۰۱	۶E-۷	۰/۰۰۱۴
۵	۱۰	۵	۱۰	۴۷۰	۱۹۴	۲/۶۵۰۱	۱۸۴	۵۸۱/۱۱۵	۳۱۶/۰	۱/۰۱۵	۵۵۷/۵۵	۶۶۱۳/۰۱	۳E-۸	۰E-۵

ادامه جدول ۶- نتایج آزمون فرض مقایسه PSA، SA و توسعه DGA

مسئله	تعداد سفارش	تعداد وسیله نقلیه	تعداد تأمین‌کننده	توسعه DGA			SA			PSA			P-Value (PSA-SA)	P-Value (PSA-DGA)
				Best	Avg	Mean CPU Time (Second)	Best	Avg	Mean CPU Time (Second)	Best	Avg	Mean CPU Time (Second)		
۶	۱۰	۵	۵۱	۳/۶۷۳	۷۸۵۵/۳۰۶	۱۸۶۱۵/۸۷	۵۳۸۸/۰	۵۸۷۰/۱۵	۸۷۰۸/۲	۵/۷۷۳۳	۵/۸۰۶۳	۵/۸۷۸۳	۱E-۸	۰/۰۰۰۰
۸	۱۰	۰۱	۵	۶/۵۷۳	۶/۵۳۵	۵۶۳۰۳۳/۸	۳۳۸۸/۰	۵/۳۳۵	۳۸۸۸/۲	۵/۸۷۳۳	۵/۵۵/۵۶۳	۳۸۸۸/۲	۱E-۷	۱۰۰۰/۰
۷	۱۰	۰۱	۰۱	۷/۳۲۸	۸۸۸۸/۶۱۵	۳۶۳۳۳۳/۷	۳۳۸۸/۰	۱/۸۸۳	۱۷۸۸/۲	۵/۷۷۳۳	۵/۸۰۶۳	۱۷۸۸/۲	۵E-۸	۱۰۰۰/۰
۵	۱۰	۰۱	۵۱	۶/۷۸۸	۵۸۸۸/۱۶۳	۷۸۸۳۳۳/۸	۶۸۸۸/۰	۷/۱۶۳	۵۰۸۸/۲	۵/۳۷۸	۵/۵۵/۲۰۳	۵۰۸۸/۲	۱E-۶	۷۸۱۰/۰
۰۱	۵۰	۱	۵	۵/۳۶۶	۵/۱۰۳۶۶	۳۳۰۷۷/۶۳	۳۳۵۷/۰	۸۷/۵۰۰۶۱	۸۵۱۵/۶	۵/۳۰۳۶۶۱	۶/۰۱۸۸۱	۸۵۱۵/۶	۸E-۱	۰
۱۱	۵۰	۱	۰۱	۸/۰۳۸	۵/۶۰۲۵۳	۵۰۷۷۳/۶۵	۶۷۶/۰	۰/۸۸۶۱	۸۶۵۶/۶	۱۶۸۸۱	۷/۳۸۳۷۱	۸۶۵۶/۶	۸E-۵	۰
۲۱	۵۰	۱	۵۱	۱۷/۸۸۳	۵۸۸۶۶۰۳	۵۶۵۳۶/۵	۲۳۵/۰	۸۱/۸۸۵۸۸	۰۶۷۳/۸	۳۵۵۱۲	۶/۲۳۰۲۲	۰۶۷۳/۸	۳E-۳	۰
۳۱	۵۰	۵	۵	۸/۸۰۵۱۱	۶/۸۳۵۸۱	۸۸۵۳۷/۳	۳۵۷/۰	۷۶/۳۶۳۸۱۱	۱۱۰۷/۶	۲۶۲۰۱	۳/۸۶۰۱	۱۱۰۷/۶	۵E-۳	۰
۳۱	۵۰	۵	۰۱	۶/۸۶۳۶	۶۸/۸۰۰۱	۶۵۸۸۶۳	۵۰۶/۰	۵۲۸/۰۱۷۸	۶۵۶۷/۶	۵/۶۸۷۶	۵/۶۸۷۶	۶۵۶۷/۶	۸E-۱	۰
۵۱	۵۰	۵	۵۱	۸/۳۸۸۰۱	۲۷/۱۳۱۱	۲۸۵۱۳/۳	۰۷۸/۰	۵۶/۳۶۷۸	۲۳۰۲/۸	۳۷۰۶	۵/۶۸۷۶	۲۳۰۲/۸	۳E-۱	۰

ادامه جدول ۶- نتایج آزمون فرض مقایسه PSA، SA و توسعه DGA

مسأله	تعداد سفارش	تعداد وسیله نقلیه	تعداد تأمین کننده	PSA			SA			توسعه DGA			P-Value (PSA-SA)	P-Value (PSA-DGA)
				Best	Avg	Mean CPU Time (Second)	Best	Avg	Mean CPU Time (Second)	Best	Avg	Mean CPU Time (Second)		
۶۱	۵۰	۱۰	۵	۸۷۸/۵	۹۳۲۱/۳	۶۸۷/۶	۹۲۲۰	۹۳۳۳/۹۲۵	۶۹۳۴/۰	۱/۱۹۲۴/۱	۸۸۰۰/۲۱	۴۷/۵۲۲۲/۱	۹E-۰۵	۰
۷۱	۵۰	۱۰	۱۰	۴۶۵	۳/۳۱۱۶	۸۰۰/۴۷	۶/۱۷۰۶	۶۳۶	۱۰/۸۰/۰	۷۲۲۸	۱۷۵/۶۸	۴۷/۴۰۴۴/۳	۳E-۰۶	۰
۷۱	۵۰	۱۰	۵۱	۴۷۰/۲/۵	۴۸۷۸/۷۵۳	۸۰۸/۸	۱۱۷۳	۵۰۵۸/۶۰۵	۸۸۸۰/۰	۶/۵/۶	۵۸۶/۳۴۳۶	۴۱۳/۴۵۷	۷E-۰۶	۰
۹۱	۱۰۰	۱	۵	۷۸/۱۵/۵	۸۲۵۹۴/۳۵	۸۰۰/۲۰/۱	۵/۵۸۷۵/۵	۸۸/۱۱۶۸	۲۱۷۱/۱	۸۰۴/۱	۸/۴۰۰/۳۱	۴۱/۵/۳۱	۹E-۰۵	۰
۲۰	۱۰۰	۱	۰۱	۶۱۷/۶	۵/۸۷۰/۵۱۸	۲۸۸۷/۲۱	۵/۶۸۰/۸	۳/۳۰۵/۸	۳۱۷۸/۱	۳۱۵/۳۱	۶۳۱/۳۱	۳/۳۶/۵۱	۶E-۰۱	۰
۱۸	۱۰۰	۱	۵۱	۰/۲۰/۸	۷۸/۶۳۰/۳۸	۶۳۸/۳۱	۵/۰۰/۸	۵/۸۶۸	۳۳۸/۱	۱۶۷۸/۱	۶/۳۸۰/۳۱	۷۸۰/۴/۱	۱E-۰۵	۰
۲۱	۱۰۰	۵	۵	۵/۸۳/۳۳/۴	۷۱/۸۷۷/۵۳	۱۶۳۸/۱۱	۷۳۲۳۳	۴۱/۸۷۴/۳	۳۱۷/۱	۲۷۸۵	۶۶/۱۰/۲۶۵	۴۶۳۸/۰/۳۱	۱E-۰۱	۰
۳۱	۱۰۰	۵	۰۱	۳۱۳/۲	۳۶۸۷/۶۱	۳۴۱/۸/۴۱	۵/۱۸۳/۲	۷۳/۸۶۳/۳	۵۶۳/۱	۷/۱۸۶۶/۳	۸۵/۳۸۱/۳	۶۱۶/۳۴۳/۱	۵E-۰۵	۰
۳۱	۱۰۰	۵	۵۱	۲۰۳/۱	۲/۸۷۵/۳	۳۸۶/۳/۱	۵/۸۳۷/۳	۵۶/۵/۱۱/۱	۳۷۸/۱	۲/۳۶۸/۳	۳۷/۳۶۸/۳	۳۵۳۸/۳/۱	۲E-۰۶	۰
۲۵	۱۰۰	۰۱	۵	۵/۱۶/۵	۶/۷۰۵/۶۳	۱۰۰/۵/۱	۱۱۶۶۳	۷۸/۶۹/۱/۳	۱۰۳/۱	۸/۸۷۰/۵	۱۷/۵/۳۱/۵	۱۵/۵/۵۱	۶E-۰۶	۰
۶۱	۱۰۰	۰۱	۰۱	۲۳۳۳/۳/۱	۵۷/۸۷۱/۳۱	۳۵۳/۰/۳/۱	۶۳۳۳	۷/۷۳۷/۵	۱۰۳۳/۱	۱۷/۳۰۰	۵۳/۸۳۳/۳	۱۶۶/۳۳/۱	۲E-۰۵	۰
۲۱	۱۰۰	۰۱	۵۱	۵۶۵	۵۳/۳/۵/۶	۳۸۳/۸/۱	۵/۰/۱/۱	۷۶/۵/۵/۶	۷۶۸/۱	۶/۱۵/۵	۱۰/۵/۵/۶	۶۳۶/۱/۳/۱	۳E-۰۴	۰

اگر تأمین‌کنندگان به چند ناحیه جغرافیایی تقسیم شوند، به نحوی که زمان‌های حمل بین تأمین‌کنندگان داخل یک ناحیه برابر صفر و زمان‌های حمل بین تأمین‌کنندگان نواحی مختلف برابر با عددی بسیار بزرگ باشد، مسأله تبدیل به مسأله در نظر گرفته شده در پژوهش ذگردی و بهشتی نیا (۲۰۰۹) می‌شود. همان‌گونه که اشاره شد، آنها برای حل مسأله از یک الگوریتم ژنتیک به نام DGA استفاده کرده‌اند. برای مقایسات بیشتر، با قراردادن زمان‌های حمل بین تأمین‌کنندگان، نتایج الگوریتم PSA با الگوریتم DGA مقایسه و نتایج در جدول ۷ نشان داده شده است. این جدول نشان می‌دهد، در سطح اطمینان ۹۵ درصد در ۲۳ مورد فرض H_0 رد شده است؛ بنابراین نتیجه می‌شود، الگوریتم PSA نسبت به الگوریتم DGA برتر است.

جدول ۷- نتایج آزمون فرض مقایسه PSA و DGA

مسأله	تعداد سفارش	تعداد وسیله نقلیه	تعداد تأمین‌کننده	PSA			DGA			P-Value (PSA-DGA)
				Best	Avrg	Mean CPU Time (Second)	Best	Avrg	Mean CPU Time (Second)	
۱	۱۰	۱	۵	۶۱۵	۶۴۶	۲/۵۴۲۳	۸۰۰	۸۱۶/۲۷۲۲	۶/۹۱۵۴	۰/۰۰۱
۲	۱۰	۱	۱۰	۵۲۶	۵۵۷	۲/۵۶۶۹	۵۹۰	۵۹۰	۶/۱۳۷۸	۰/۱
۳	۱۰	۱	۱۵	۴۷۵	۴۷۵	۲/۵۲۸۱	۷۰۰	۷۰۰	۵/۵۷۳۷	۰
۴	۱۰	۵	۵	۵۰۸	۵۱۵/۲۶۵	۲/۵۹۳۷	۵۰۱	۵۲۳/۸۴۹۵	۵/۹۱۴۷	۰/۲
۵	۱۰	۵	۱۰	۴۲۸	۴۴۵/۷۵	۲/۵۶۰۷	۴۷۰	۴۷۳/۶۶۷	۷/۶۲۶۷	۰/۰۰۱
۶	۱۰	۵	۱۵	۳۶۵	۳۷۳/۵۷۵	۲/۶۵۰۰	۵۱۰	۵۱۰	۶/۳۲۷۵	۰
۷	۱۰	۱۰	۵	۴۶۲	۴۸۶/۶۶۷	۲/۶۰۰۲	۴۹۰	۴۹۶/۹۴۷۵	۶/۴۱۷۴	۰/۰۴۷
۸	۱۰	۱۰	۱۰	۳۶۸	۴۰۶	۲/۶۲۵۲	۳۷۵	۴۰۸/۳۵	۱۱/۰۳۵۶	۰/۴
۹	۱۰	۱۰	۱۵	۳۶۷	۴۰۰/۴۴۹۰	۲/۶۶۲۴	۳۹۹	۴۰۳	۵/۶۶۸۵	۰/۲
۱۰	۵۰	۱	۵	۱۱۵۵۳	۱۲۳۱۴/۳۳	۶/۳۳۳۵	۱۸۴۵۰	۱۹۱۳۰	۶۳/۱۹۵۴	۰
۱۱	۵۰	۱	۱۰	۱۲۰۲۵	۱۲۳۳۴	۶/۹۰۲۵	۲۳۲۰۰	۲۳۲۵۰	۳۱/۳۵۱۹	۰
۱۲	۵۰	۱	۱۵	۱۸۰۰۰	۱۸۲۶۴/۶۷	۷/۴۶۰۴	۳۷۷۵۰	۳۸۴۵۰	۴۳/۷۷۴۶	۰
۱۳	۵۰	۵	۵	۹۵۲۶	۹۷۷/۴	۶/۵۱۰۵	۱۲۱۴۱	۱۲۲۸۲/۶۷	۴۳/۷۱۹۳	۰
۱۴	۵۰	۵	۱۰	۵۹۹۲	۶۰۷۶/۶۲۵	۶/۵۹۹۳	۷۳۶۵	۷۴۲۳/۷۹	۴۵/۸۰۰۰	۰
۱۵	۵۰	۵	۱۵	۴۸۱۲	۴۹۰۹/۸	۷/۰۶۹۳	۱۰۴۱۸	۱۰۶۴۳/۳۵	۴۷/۷۹۰۹	۰/۰۰۱
۱۶	۵۰	۱۰	۵	۸۹۲۰	۹۰۶۷/۱۷۵	۶/۷۷۰۸	۱۱۸۲۵	۱۱۸۷۷	۴۷/۳۱۳۲	۰
۱۷	۵۰	۱۰	۱۰	۵۳۴۳	۵۴۴۴/۴۵	۶/۹۴۴۵	۶۷۵۶	۶۸۴۷/۸۵	۴۴/۶۶۹۲	۰
۱۸	۵۰	۱۰	۱۵	۳۹۸۴	۴۱۴۱/۹۷۵	۷/۲۲۳۷	۴۸۹۴	۵۰۳۰/۷۷	۴۱/۴۹۶۵	۰/۰۰۴
۱۹	۱۰۰	۱	۵	۵۳۹۶۲	۵۶۲۷۲	۱۲/۰۶۵۳	۸۹۰۱۸	۹۰۲۸۵/۶	۱۲۷/۱۵۵۰	۰
۲۰	۱۰۰	۱	۱۰	۴۰۲۱۳	۴۰۸۰۷/۷۵	۱۲/۶۸۱۶	۷۰۹۸۲	۷۱۲۲۱/۸۱	۱۵۵/۳۳۲۱	۰
۲۱	۱۰۰	۱	۱۵	۴۳۰۸۰	۴۳۴۸۵	۱۳/۵۱۷۴	۸۴۴۱۰	۸۵۴۲۳/۷	۱۴۴/۳۷۲	۰
۲۲	۱۰۰	۵	۵	۴۰۰۲۱	۴۰۸۶۰	۱۱/۶۲۹۸	۵۰۳۷۴	۵۱۳۱۴	۱۴۵/۸۹۶	۰
۲۳	۱۰۰	۵	۱۰	۲۴۲۸۸	۲۴۹۳۸/۲۸	۱۲/۹۰۶۸	۴۰۰۰۲	۴۰۲۱۷	۱۳۶/۰۹۴۹	۰/۰۰۱
۲۴	۱۰۰	۵	۱۵	۱۷۲۸۲	۱۸۰۱۹	۱۳/۲۰۳۹	۲۲۶۲۵	۲۲۶۵۶	۱۲۴/۱۱۲۶	۰/۰۱۱
۲۵	۱۰۰	۱۰	۵	۳۷۸۳۲	۳۸۵۲۰/۴۵	۱۲/۳۱۱۴	۴۸۲۵۰	۴۸۷۳۲/۶۹	۱۴۴/۲۷۴۷	۰
۲۶	۱۰۰	۱۰	۱۰	۲۱۶۳۴	۲۲۰۵۰/۱۸	۱۲/۹۸۰۷	۲۷۳۰۵	۲۷۳۴۷	۱۳۹/۱۷۵۲	۰/۰۰۱
۲۷	۱۰۰	۱۰	۱۵	۱۶۱۸۳	۱۶۴۶۵	۱۳/۳۷۴۱	۲۰۷۱۹	۲۱۲۵۱/۵۷	۱۳۳/۷۷۰۷	۰

مقایسه با حل دقیق: به علت NP-Hard بودن مسأله، به دست آوردن جواب بهینه برای مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ در زمان معقول امکان پذیر نیست؛ بنابراین برای مقایسه با حل دقیق، تعدادی مسأله با ابعاد کوچک ایجاد و با الگوریتم PSA حل شده‌اند. نتایج به دست آمده با الگوریتم PSA با جواب بهینه محاسبه شده با نرم‌افزار GAMS مقایسه و در جدول ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول نشان داده شده است، PSA در برخی مسائل جواب دقیق را ارائه داده است و در برخی مسائل جواب به دست آمده با جواب بهینه فاصله دارد؛ اما این اختلاف ناچیز است. همچنین زمان حل الگوریتم PSA از نرم‌افزار GAMS بسیار کمتر است.

جدول ۸- مقایسه با حل دقیق

درصد اختلاف نسبی	PSA		GAMS		وسیله نقلیه	تأمین‌کننده	سفارش	مسأله
	زمان	تابع هدف	زمان	تابع هدف				
۰	۱/۰۷	۲۴۹	۴۷۲/۷	۲۴۹	۳	۲	۴	۱
۰	۰/۹۷	۲۴۰	۳۳۴/۱	۲۴۰	۲	۳	۴	۲
۰	۰/۹۷	۱۹۵	۲۹۵/۴۱	۱۹۵	۳	۳	۴	۳
۰	۰/۹۷	۱۸۵	۲۷۵/۳۲	۱۸۵	۴	۴	۴	۴
۰/۴۴	۱/۰۶	۴۵۰	۵۶۹۴/۹۵	۴۴۸	۳	۲	۶	۵
۰	۱/۰۹	۳۸۱	۴۰۶۱/۶۷	۳۸۱	۲	۳	۶	۶
۰	۱/۱۲	۳۹۴	۳۷۴۱/۳۵	۳۹۴	۳	۳	۶	۷
۰	۱/۰۶	۳۱۰	۳۵۳۲/۷۳	۳۱۰	۴	۴	۶	۸
۲.۲۱	۱/۲	۴۹۷	۶۸۵۳/۹۸	۴۸۶	۳	۳	۷	۹
۱	۱/۰۶	۴۰۲	۶۲۳۱/۳۴	۳۹۸	۴	۴	۷	۱۰

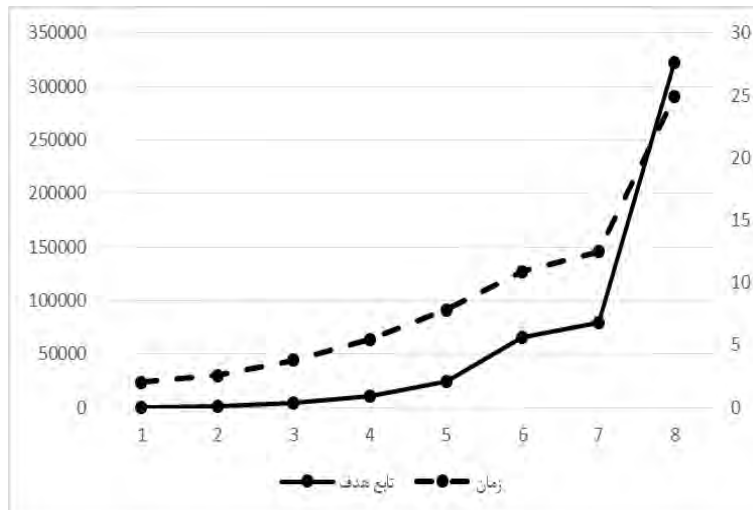
تحلیل حساسیت: در ادامه برای تحلیل بیشتر، حساسیت روی سه پارامتر اصلی تحلیل می‌شود؛ به همین دلیل سه پارامتر اصلی شامل، تعداد سفارش‌ها، تعداد تأمین‌کنندگان و تعداد وسایل نقلیه، انتخاب و با تغییر مقادیر آنها به صورت صعودی (ضمن ثابت نگه داشتن مقدار سایر پارامترها) تغییرات مقدار تابع هدف، بررسی می‌شود. جدول ۹ مقادیر در نظر گرفته شده برای هر پارامتر و نتایج به دست آمده در هر حالت را نشان می‌دهد. شکل‌های ۷، ۸، ۹ و نمودارهای تغییر تابع هدف و زمان حل برای تغییرات تعداد سفارش، تعداد وسیله نقلیه و تعداد تأمین‌کننده را نشان می‌دهند.

شکل ۷ نشان می‌دهد، با افزایش تعداد سفارش‌ها میزان تابع هدف و زمان حل نیز افزایش می‌یابد؛ زیرا سفارش‌های بیشتری باید به تعداد ثابتی از تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه تخصیص یابد و در نتیجه به‌طور متوسط بار کاری تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه افزایش و زمان تحویل سفارش‌ها طولانی‌تر خواهد شد. در صورتی که افزایش زمان‌های تحویل در این حالت برای مدیریت خوشایند نباشد، پیشنهاد می‌شود با استفاده از سیاست خرید قطعات آماده از بازار، تعداد سفارش‌ها را برای برنامه‌ریزی کاهش داده و میانگین زمان‌های تحویل را به مقدار هدف رساند. شکل ۸ و شکل ۹ نشان می‌دهند با افزایش تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه روند نمودار نزولی می‌شود

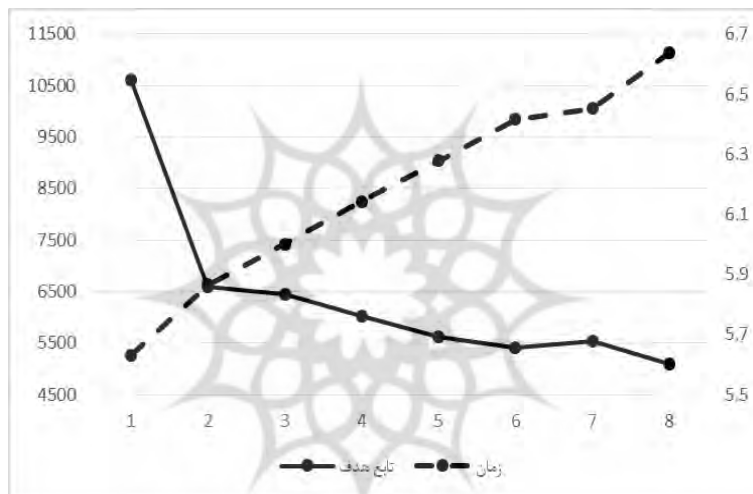
و تابع هدف کاهش می‌یابد؛ زیرا سفارش‌های مشخصی به تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه مختلفی تخصیص داده شده و به‌طور متوسط بار کاری هر یک از آنها کمتر و زمان‌های تحویل کوتاه‌تر می‌شود؛ اما زمان حل، همچنان به دلیل افزایش فضای جواب، افزایش می‌یابد. اگر میانگین زمان‌های تحویل برای مدیریت، خوشایند نباشد، پیشنهاد می‌شود، تعداد تأمین‌کنندگان طرف قرارداد یا تعداد وسایل نقلیه استفاده‌شده افزایش و متوسط بارکاری روی هر یک از تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه کاهش یابد؛ در نتیجه میانگین زمان‌های تحویل به مقدار هدف برسد.

جدول ۹- تحلیل حساسیت برای سه پارامتر اصلی

مسئله	وسيله نقلیه	تأمین کننده	سفارش	تابع هدف	زمان
۱	۱	۵	۵	۳۰۰	۲/۰۲۶۳
۲			۱۰	۸۶۸	۲/۵۴۴۲
۳			۲۰	۴۱۸۳	۳/۸۰۱۱
۴			۴۰	۱۰۰۸۲	۵/۴۶۰۸
۵			۶۰	۲۴۶۶۱/۵	۷/۸۲۲۱
۶			۸۰	۶۵۱۰۶/۵	۱۰/۸۸۳۶
۷			۱۰۰	۷۸۹۵۹/۵	۱۲/۴۸۵۶
۸			۲۰۰	۳۲۲۰۰۲/۵	۲۴/۹۵۱۸
مسئله	وسيله نقلیه	تأمین کننده	سفارش	تابع هدف	زمان
۱	۱	۵	۴۰	۱۰۶۱۹/۵	۵/۶۳۲۳
۲	۵			۶۵۸۶۹	۵/۸۶۵۴
۳	۱۰			۶۴۴۰۳	۶/۰۰۱۴
۴	۱۵			۶۰۳۲/۵۵	۶/۱۴۲۷
۵	۲۰			۵۶۲۱/۷	۶/۲۷۹۱
۶	۲۵			۵۴۰۷	۶/۴۱۷
۷	۳۰			۵۵۴۴/۷۵	۶/۴۵۲۲
۸	۴۰			۵۱۰۱/۴۵	۶/۶۳۷۹
مسئله	وسيله نقلیه	تأمین کننده	سفارش	تابع هدف	زمان
۱	۱۰	۲۰	۵	۱۶۶۹	۳/۸۳۴۱
۲			۱۰	۱۱۷۶	۳/۸۱۰۵
۳			۱۵	۱۱۰۷	۳/۹۰۹۹
۴			۲۰	۹۹۵/۵	۴/۰۰۵۷
۵			۲۵	۹۸۵	۴/۰۶۷۴
۶			۳۰	۹۵۶/۵	۴/۱۵۵۰
۷			۴۰	۹۵۵	۴/۴۸۴۶
۸			۵۰	۹۷۳	۴/۸۱۸۷



شکل ۷- تغییرات تعداد سفارش



شکل ۸- تغییرات تعداد وسیله نقلیه



شکل ۹- تغییرات تعداد تأمین کننده

خلاصه، نتیجه‌گیری و زمینه پژوهش‌های آتی

در این مقاله زمان‌بندی وسایل نقلیه در زنجیره تأمین با در نظر گرفتن اثرات متقابل بین بخش حمل‌ونقل و بخش تولید، بررسی شده است. زنجیره تأمین بررسی شده، شامل مجموعه‌ای از تأمین‌کنندگان است. در این زنجیره، یک ناوگان حمل‌ونقل مشترک، سفارش‌های تخصیص داده شده به خود را به یک شرکت سازنده محصولات نهایی منتقل می‌کند. این مجموعه از تأمین‌کنندگان مستقر در نقاط جغرافیایی مختلف، قابلیت پردازش تمامی سفارش‌ها را ندارند و با توجه به توانایی‌های خود، بخشی از آنها را پردازش می‌کنند. همچنین ناوگان حمل‌ونقل، متشکل از چندین وسیله نقلیه با ظرفیت بارگیری محدود و میانگین سرعت متفاوت است، این میانگین سرعت، در کل دوره برنامه‌ریزی ثابت است. هدف، نحوه تخصیص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان و تعیین توالی ساخت آنها در هر تأمین‌کننده به همراه تخصیص سفارش‌ها به وسایل نقلیه و تعیین توالی حمل آنها است؛ به قسمی که مجموع زمان تحویل سفارش‌ها حداقل شود. این مسأله تاکنون در ادبیات موضوع بررسی نشده است. ابتدا برای این مسأله یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط ارائه شد و برای حل آن سه الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی تبرید و شبیه‌سازی تبرید جمعیتی (ترکیبی از دو الگوریتم GA و SA)، ارائه شد. برای بررسی کیفیت جواب‌های PSA، ابتدا تعدادی مسأله تصادفی با ابعاد مختلف ایجاد شد و نتایج آن با الگوریتم SA و توسعه الگوریتم DGA ارائه شده مقایسه شد. سپس با ریلکس کردن فرض وجود مسافت بین تأمین‌کنندگان موجود در یک ناحیه جغرافیایی، مسأله تبدیل به مسأله‌ای شد که ذگردی و بهشتی‌نیا (۲۰۰۹) آن را مطرح کرده‌اند و نتایج PSA در این حالت با نتایج DGA ارائه شده آنها، مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد در همه مقایسه‌ها الگوریتم PSA برتر است. برای اثبات برتری الگوریتم PSA، از آزمون فرض استفاده شده است. به علاوه به ازای مسائل با ابعاد کوچک، نتایج الگوریتم PSA با جواب بهینه مقایسه شد. نتایج مقایسه شده نشان از کارایی بالای الگوریتم PSA دارد. در نهایت با انجام تحلیل حساسیت روی پارامترهای اصلی (تعداد سفارش‌ها، تعداد تأمین‌کنندگان و تعداد وسایل نقلیه) تأثیر تغییرات آنها بر تغییرات تابع هدف و زمان حل نشان داده شد.

در انتها نیز چند زمینه برای پژوهش‌های آتی به شرح زیر پیشنهاد می‌شود:

- بسط مسأله بررسی شده در این پژوهش در حالتی که چند شرکت سازنده محصول نهایی و چند پایانه حمل‌ونقل در نقاط مختلف جغرافیایی قرار داشته باشند.
- اضافه کردن محدودیت ظرفیت تولید در تأمین‌کنندگان.
- اضافه کردن فرضیاتی مانند وجود حالت ساخت و مونتاژ در شرکت سازنده مرکزی.
- ارایه روش‌های حل دیگر، مانند الگوریتم زنبور عسل^{۳۹} و جستجوی ممنوعه برای این مسأله.

منابع

ذگردی، سیدحسام الدین، بهشتی‌نیا، محمدعلی، (۱۳۸۸). یکپارچگی زمان‌بندی حمل‌ونقل در زنجیره تأمین با وسائط نقلیه دارای ظرفیت‌های متفاوت. پژوهشنامه حمل و نقل، ۳.

نخعی کمال آبادی، عیسی، نیکبخش جوادیان، مهری گوران، مهدوی، ا. (۱۳۸۶). یکپارچه‌سازی زمان‌بندی و حمل و نقل در زنجیره تأمین چندکارخانه‌ای. نخستین کنفرانس بین‌المللی مدیریت زنجیره تأمین و سیستم‌های اطلاعات.

Archetti, C., Jabali, O., & Speranza, M. G. (2015). "Multi-period vehicle routing problem with due dates". *Computers & Operations Research*, 61, 122-134 .

Averbakh, I., & Baysan, M. (2013). "Approximation algorithm for the on-line multi-customer two-level supply chain scheduling problem". *Operations Research Letters*, 41(6), 710-714. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.orl.2013.10.002>

Chang, Y.-C., & Lee, C.-Y. (2004). "Machine scheduling with job delivery coordination". *European Journal of Operational Research*, 158 (2): 470-478 doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00364-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00364-3)

Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). "The truck dispatching problem". *Management science*, 6(1), 80-91 .

Holland, J. H. (1975). "Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence: U Michigan Press.

Kabra, S., Shaik, M. A., & Rathore, A. S. (2013). "Multi-period scheduling of a multi-stage multi-product bio-pharmaceutical process". *Computers & Chemical Engineering*, 57(0), 95-103. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.03.009>

Kirkpatrick, S., & Vecchi, M. (1983). "Optimization by simulated annealing". *science*, 220(4598), 671-680 .

Kuo, Y., & Wang, C.-C. (2012). "A variable neighborhood search for the multi-depot vehicle routing problem with loading cost". *Expert Systems with Applications*, 39(8), 6949-6954 .

Liu, S.-C., & Chen, A.-Z. (2012). "Variable neighborhood search for the inventory routing and scheduling problem in a supply chain". *Expert Systems with Applications*, 39(4), 4149-4159 .

Mehravaran, Y., & Logendran, R. (2012). "Non-permutation flowshop scheduling in a supply chain with sequence-dependent setup times". *International Journal of Production Economics*, 135(2), 953-963 .

Osman, H., & Demirli, K. (2012). "Economic lot and delivery scheduling problem for multi-stage supply chains". *International Journal of Production Economics*, 136(2), 275-286. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.12.001>

Ray, S., Soeanu, A., Berger, J., & Debbabi, M. (2014). The multi-depot split-delivery vehicle routing problem: Model and solution algorithm. *Knowledge-Based Systems*, 71, 238-265 .

Ren, J., Du, D., & Xu, D. (2013). "The complexity of two supply chain scheduling problems". *Information Processing Letters*, 113(1), 609-612. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ipl.2013.05.005>

Sawik, T. (2014). "Joint supplier selection and scheduling of customer orders under disruption risks: Single vs. dual sourcing". *Omega*, 43(0), 83-95. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2013.06.007>

Scholz-Reiter, B., Frazzon, E. M., & Makuschewitz, T. (2010). "Integrating manufacturing and logistic systems along global supply chains". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(3), 216-223 .

Selvarajah, E., & Zhang, R. (2014). "Supply chain scheduling at the manufacturer to minimize

inventory holding and delivery costs". *International Journal of Production Economics*, 147, Part A(0), 117-124. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.08.015>

Thomas, A., Venkateswaran, J., Singh, G., & Krishnamoorthy, M. (2014). "A resource constrained scheduling problem with multiple independent producers and a single linking constraint: A coal supply chain example". *European Journal of Operational Research*, 236(3), 946-956. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.006>

Ullrich, C. A. (2013). "Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows". *European Journal of Operational Research*, 227(1), 152-165. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.049>

Wang, X., & Cheng, T. E. (2009). "Production scheduling with supply and delivery considerations to minimize the makespan". *European Journal of Operational Research*, 194(3), 743-752 .

Yimer, A. D., & Demirli, K. (2010). "A genetic approach to two-phase optimization of dynamic supply chain scheduling". *Computers & Industrial Engineering*, 58(3), 411-422 .

Zegordi, S., & Beheshti Nia, M. (2009). "Integrating production and transportation scheduling in a two-stage supply chain considering order assignment". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(9-10), 928-939. doi: 10.1007/s00170-008-1910-x.

¹- Vehicle Routing Problem

²- Dantzig & Ramser

³- Chang & Lee

⁴- Wang & Cheng

⁵- Yimer & Demirli

⁶- Mixed integer linear program

⁷- Scholz-Reiter, Frazzon, & Makuschewitz

⁸- Liu & Chen

⁹- Mehravaran & Logendran

¹⁰- Tabu search

¹¹- Kuo & Wang

¹²- Osman & Demirli

¹³- Ullrich

¹⁴- Parallel machine

¹⁵- Kabra, Shaik, & Rathore

¹⁶- Averbakh & Baysan

¹⁷- Ren, Du, & Xu

¹⁸- Thomas, Venkateswaran, Singh, & Krishnamoorthy

¹⁹- Column generation

²⁰- Sawik

²¹- Selvarajah & Zhang

²²- Ray, Soeanu, Berger, & Debbabi

²³- Archetti, Jabali, & Speranza

²⁴- Outsourcing

²⁵- Planning production

²⁶- Zegordi & Beheshti Nia

²⁷- Populated Simulated annealing

²⁸- Genetic algorithm

²⁹- Simulated Annealing

³⁰- Holland

³¹- First generation

³²- Crossover

³³- Mutation

³⁴- Selection

³⁵- Coding

³⁶- Genotype

³⁷- Phenotype

³⁸- Kirkpatrick & Vecchi

³⁹- Bee colony

