



Development of Integrated Multi-objective Green Supply Chain Scheduling Model: Production, Distribution and Heterogeneous Vehicle Routing with Customer Time Windows

Maliheh Ganji

PhD Candidate, Department of Industrial Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: maliheh.ganji@yahoo.com

Hamed Kazemipoor

*Corresponding Author, Assistant Prof., Department of Industrial Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: hkazemipoor@iauctb.ac.ir

Seyyed Mohammad Hadji Molana

Assistant Prof., Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: molana@srbiau.ac.ir

Seyed Mojtaba Sajadi

Associate Prof., New Business Department, Faculty of Entrepreneurship, University of Tehran, Tehran, Iran. msajadi@ut.ac.ir

Abstract

Objective: In this study, different ways of delivering goods to customers are created and therefore the vehicle routing decisions are added to this issue. In this case, customers must be divided into clusters and each customer assigned to one means of transportation in order to minimize the cost of orders between customers. In this study, the problem of integrated supply chain scheduling is determined by timely delivery of orders, scheduling orders on a machine in a manufacturing system and batch shipment, allocation to multiple heterogeneous transport modes according to capacity, and finally order delivery. To customers in the time window, it aims to minimize the total cost of distributing orders and the constant and variable costs of fuel and carbon emissions of the vehicle and the total time delay of customer orders.

Methods: The problem programming model is a mathematical model of complex nonlinear integer and has been used for solving multi-objective meta-algorithms MOPSO and NSGA-II.

Results: The results show that NSGA-II algorithm performs well.

Conclusion: This research reduces the costs of production, distribution, inventory maintenance and fuel consumption. It can also help reduce product inventory and maintenance costs.

Keywords: Integrated production and distribution problem, Production scheduling, Heterogeneous vehicle routing, Batch delivery, Time window, Multi-objective meta-algorithm.

Citation: Ganji, M., Kazemipour, M., Haji Molana, S.M., & Sajadi, S.M. (2020). Development of Integrated Multi-objective Green Supply Chain Scheduling Model: Production, Distribution and Heterogeneous Vehicle Routing with Customer Time Windows. *Industrial Management Journal*, 12(1), 47 – 81. (in Persian)

Industrial Management Journal, 2020, Vol. 12, No.1, pp. 47- 81

DOI: 10.22059/imj.2020.294629.1007697

Received: September 27, 2019; Accepted: February 16, 2020

© Faculty of Management, University of Tehran



توسعه مدل دوهدفه یکپارچه زمان بندی زنجیره تأمین سبز: تولید، توزیع و مسیریابی با وسیله نقلیه ناهمگن و پنجره های زمانی مشتریان

ملیحه گنجی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: maliheh.ganji@yahoo.com

حامد کاظمی پور

* نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: hkazemipoor@iauctb.ac.ir

سید محمد حاجی مولانا

استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: molana@srbiau.ac.ir

سید مجتبی سجادی

دانشیار، گروه کسب و کار جدید، دانشکده کارآفرینی دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: msajadi@ut.ac.ir

چکیده

هدف: در این پژوهش مسئله یکپارچه زمان بندی زنجیره تأمین با تعیین واگذاری موعد تحویل، زمان بندی سفارش ها روی یک ماشین در یک سیستم تولیدی و ارسال به صورت دسته ای، واگذاری به چندین وسیله حمل و نقل ناهمگن با توجه به ظرفیت و در نهایت، تحویل سفارش ها به مشتریان در پنجره زمانی با هدف کمینه کردن کل هزینه های توزیع سفارش ها و هزینه های ثابت و متغیر سوخت و انتشار کربن وسیله نقلیه و کل زمان دیرکرد سفارش های مشتریان است.

روش: مدل برنامه ریزی مسئله بیان شده یک مدل ریاضی عدد صحیح غیرخطی مختلط بوده و برای حل آن از الگوریتم های فرابتکاری چندهدفه MOPSO و NSGA-II بهره گرفته شده است. به منظور مقایسه دقیق تر نتایج حاصل از معیارهای عملکردی، از تحلیل آماری t زوجی در سطح اطمینان ۹۵ درصد و $P - value < 0.05$ استفاده شد.

یافته ها: نتایج حل حاصل از الگوریتم ها و تحلیل آماری در سطح اطمینان ۹۵، نشان دهنده عملکرد مناسب الگوریتم NSGA-II است، از این رو الگوریتم NSGA-II، برای مدل پیشنهادی، کارایی مناسب تری دارد.

نتیجه گیری: این پژوهش به کاهش هزینه های تولید، توزیع، نگهداری موجودی و مصرف سوخت منجر می شود. همچنین می توان به کمک این مسئله، موجودی محصولات و هزینه های نگهداری را کاهش داد.

کلیدواژه ها: زمان بندی زنجیره تأمین سبز، مسئله یکپارچه تولید و توزیع، زمان بندی تولید، مسیریابی وسیله نقلیه ناهمگن، تحویل دسته ای، پنجره های زمانی مشتریان.

استناد: گنجی، ملیحه؛ کاظمی پور، حامد؛ حاجی مولانا، سید محمد؛ سجادی، سید مجتبی (۱۳۹۹). توسعه مدل دوهدفه یکپارچه زمان بندی زنجیره تأمین سبز: تولید، توزیع و مسیریابی با وسیله نقلیه ناهمگن و پنجره های زمانی مشتریان. مدیریت صنعتی، ۱۲(۱)، ۴۷-۸۱.

مقدمه

پژوهشگران، به توزیع کالا به مشتریان از طریق شبکه‌های توزیع توجه بسیاری کرده‌اند. به‌طور سنتی، هر یک از اعضای زنجیره تأمین فقط کارهای خود را در محیط کسب‌وکار برنامه‌ریزی کرده و سعی می‌کردند سود خود را بدون در نظر گرفتن منافع سایر اعضا به حداکثر برسانند، اما امروزه، تصمیم‌های هماهنگ و یکپارچه در میان هر یک از اعضای زنجیره تأمین، بسیار حیاتی است. دو مورد از این تصمیم‌های مهم، زمان‌بندی تولید و توزیع^۱ سفارش‌های مشتری است که در سطح برنامه‌ریزی عملیاتی صورت می‌گیرد و به کاهش هزینه‌های عملیاتی و تحویل به‌موقع سفارش‌ها منجر شده و موجب رضایت مشتری می‌شود. در دیدگاه مرسوم و پیشین، مدیریت زنجیره تأمین شامل هدایت تمام اعضای زنجیره تأمین به‌صورت یکپارچه و هماهنگ با هدف بهبود عملکرد، برای ارتقای بهره‌وری و سود بیشتر بود و مدیران زنجیره تأمین به‌دنبال تحویل سریع‌تر کالا و خدمات، کاهش هزینه و افزایش کیفیت بودند. اما بهبود عملکرد زیست‌محیطی زنجیره تأمین و اهمیت هزینه‌های اجتماعی و تخریب محیط زیست لحاظ نمی‌شد. امروزه مدیران زنجیره تأمین سبز در شرکت‌های پیشرو از طریق ایجاد مطلوبیت و رضایت‌مندی از دیدگاه محیطی در سراسر زنجیره تأمین، می‌کوشند تا از لجستیک سبز و بهبود عملکرد زیست‌محیطی خود در کل زنجیره تأمین به‌عنوان یک سلاح استراتژیک برای کسب مزیت رقابتی پایدار سود ببرند و اهداف خود را بر اساس سه موضوع مهم طراحی سبز (محصول)، تولید سبز (فرایند) و بازیافت محصول پایه‌گذاری می‌کنند.

یکپارچگی تصمیم‌گیری در زنجیره تأمین به بررسی وابستگی میان مکان تسهیلات، تخصیص تأمین‌کنندگان و مشتریان به تسهیلات، ساختار سیستم حمل‌ونقل و مسیریابی آنها می‌پردازد (حاجیان، افشار کاظمی، سید حسینی و طلوعی اشلقی، ۱۳۹۸). در محیط‌های تولیدی، ممکن است توجه نداشتن به موعد تحویل^۲ یا سررسید^۳ یک کار، موجب از دست دادن مشتری یا هزینه جبران تأخیر در خط تولید و مونتاژ شود (استرنا^۴، ۲۰۱۱). در یک سیستم یکپارچه، توانایی کنترل کردن موعد تحویل، عاملی مهم در بهبود عملکرد یک سیستم است و افزایش موعد تحویل یک سفارش به هزینه منجر می‌شود (زارعی و راستی برزکی^۵، ۲۰۱۸). هدف از زمان‌بندی زنجیره تأمین^۶، بهینه‌سازی تصمیم‌های کوتاه‌مدت و میان‌مدت با توجه به موازنه اهداف اقتصادی مانند به حداقل رساندن هزینه یا به حداکثر رساندن سود و اهداف غیرملموس مانند رضایت مشتری یا سطح خدمات به مشتریان است (قرایی و جولای^۷، ۲۰۱۸). یکی از روش‌های متداول در صنعت برای ارسال کالاها، تحویل به‌صورت ارسال دسته‌ای^۸، با هدف کاهش هزینه‌های حمل و توزیع است (چن^۹، ۱۹۹۶). مهم‌ترین ایراد روش ارسال تکی، دیرکرد ارسال کالاهاست، زیرا برای اینکه آن دسته فرستاده شود، باید همه سفارش‌های یک دسته تکمیل شوند. برای اتخاذ استراتژی مناسب، باید بین هزینه حمل و دیرکرد سفارش‌ها موازنه صورت گیرد (نوروزی، مزده، حیدری و راستی برزکی^{۱۰}، ۲۰۱۸). مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با ناوگان ناهمگن^{۱۱} شکل

1. Production and Distribution Scheduling
3. Deadline
5. Zarei & Rasti-Barzoki
7. Gharaei & Jolai
9. Chen
11. Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem

2. Due Date
4. Sterna
6. Scheduling Supply Chain
8. Batch delivery
10. Noroozi, Mazdeh, Heydari & Rasti-Barzoki

دیگری از مسئله مسیریابی است که گلدن، اسد، لوی و قیسن^۱ (۱۹۸۴) مطرح کردند و در آن وسایل نقلیه دارای هزینه ثابت و متغیر متفاوتی است. تابع هدف این مسئله به‌طور معمول شامل فاصله، هزینه، تعداد خودرو و ... است (شابندرزاده، نجمی و عطایی، ۱۳۹۶). هدف مسئله HFVRP حداقل کردن کلیه هزینه‌ها، شامل هزینه‌های ثابت و متغیر وسایل نقلیه و تأمین تقاضای مشتریان، برای کسب رضایت‌مندی آنان است (تت و ویگو^۲، ۲۰۰۲). یک نوع بسیار مهم و کاربردی از این مسائل، مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با پنجره زمانی^۳ و مسیریابی با در نظر گرفتن وسایل نقلیه ناهمگن است. سالومون^۴ (۱۹۸۶) برای نخستین بار مسئله مسیریابی VRPTW را مطرح کرد که مسئله تعمیم‌یافته‌ای از مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با ظرفیت محدود (CVRP)^۵ است و باید در آن سرویس‌دهی به هر مشتری در بازه زمانی معینی صورت گیرد.

مدل‌های مسیریابی سبز با هدف تعیین مسیر بهینه به‌منظور کمینه‌سازی آلاینده‌هایی زیست‌محیطی از سال ۲۰۰۶ در ادبیات موضوع مطرح شدند (اصغری زاده، جعفر نژاد، زندیه و جویبار، ۱۳۹۶). امروزه با افزایش وسایل نقلیه برای توزیع کالاها و همچنین افزایش فعالیت‌های راه‌سازی، بشر، به‌طور خواسته یا ناخواسته، برای محیط زیست به‌عنوان خطری بزرگ شناخته می‌شود. فعالیت‌های انسانی مانند استفاده بیشتر از مواد سوختی فسیلی، ایجاد گازهای گلخانه‌ای، تخریب جنگل‌ها برای ایجاد راه‌های ارتباطی و غیره موجب تخریب روزافزون محیط زیست شده‌اند (لی، وانگ و ژنگ^۶، ۲۰۱۸). از این رو، یکی از دغدغه‌های مهمی که در مدیریت توزیع کالا مطرح می‌شود، بررسی مسائل کاهش وسایل نقلیه و یافتن کوتاه‌ترین مسیر برای تحویل کالا به مشتریان با هدف کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و هزینه مصرف سوخت‌های فسیلی و همچنین کسب رضایت‌مندی مشتریان است و یکی از شاخص‌های مهم در مسائل مسیریابی وسیله نقلیه سبز^۷ به شمار می‌رود (دوند و سردا^۸، ۲۰۱۵).

در برنامه‌ریزی عملیات واحدهای مرتبط با تهیه و تدارک یک محصول در غالب واحدهای تولیدی، هنوز دیدگاه سنتی حاکم بوده و واحدهای تشکیل‌دهنده زنجیره عرضه یک محصول، به‌تنهایی در راستای بهینه‌سازی منافع خود تصمیم‌هایی اتخاذ می‌کنند (صادقی مقدم، مؤمنی و نالچیگر، ۱۳۸۸).

در مدل ارائه‌شده، ابتدا درباره اینکه مجموعه سفارش‌ها با چه توالی پردازش شوند، تصمیم‌گیری می‌شود. یک سفارش پس از پردازش می‌تواند بلافاصله ارسال شده یا منتظر بماند تا سایر سفارش‌های آن دسته به‌طور کامل پر شده و سپس محموله ارسال شود. بنابراین زمان تکمیل هر دسته با زمان تکمیل آخرین سفارش واگذار شده به آن دسته برابر است که این عمل باعث افزایش دیرکرد کل می‌شود. پس نیاز است بین هزینه توزیع و اهداف زمان‌بندی (مانند دیرکرد کارها) موازنه‌ای^۹ صورت گیرد. برای انتقال سفارش‌ها، تعدادی وسیله نقلیه ناهمگن با ظرفیت محدود و نرخ هزینه حمل‌ونقل متفاوت در نظر گرفته شده است و مشتریان در پنجره‌های زمانی خود، کالای مد نظر را دریافت می‌کنند. چندین مشتری در نقاط مختلفی قرار دارند و یک مشتری می‌تواند یک یا چند سفارش داشته باشد. همچنین در یک

1. Golden, Assad, Levy & Gheysens

3. Vehicle Routing Problem with Time Windows

5. Capacity Vehicle Routing Problem

7. Green Vehicle Routing Problem

9. Trade-off

2. Toth & Vigo

4. Solomon

6. Li, Wang & Zhang

8. Dondo & Cerdá

دسته فقط سفارش یک مشتری قرار نمی‌گیرد و می‌تواند سفارش‌های مختلف نیز قرار داشته باشد. برای تحویل کالا به مشتریان مسیریابی مختلفی ایجاد می‌شود و تصمیم‌های مسیریابی وسایل نقلیه به این مسئله افزوده می‌شوند. در این حالت باید مشتریان به خوشه‌هایی تقسیم شوند و در هر خوشه تعدادی مشتری به یک وسیله حمل‌ونقل واگذار شود، به طوری که هزینه سفارش‌ها بین مشتریان کمینه شود. مدل ارائه‌شده در این مقاله، چندهدفه بوده و دارای دو تابع هدف حداقل‌سازی کل هزینه‌های توزیع سفارش‌ها، هزینه‌های متغیر سوخت و انتشار کربن و کل زمان دیرکرد مشتریان است. تولید به صورت تک‌دوره‌ای و سیستم سفارش به صورت ساخت برای سفارش^۱ است. مسئله به صورت کلی در شکل ۱ بیان و ترسیم شده است.



شکل ۱. نمای کلی مسئله ارائه‌شده

از دیدگاه مدیریتی، این پژوهش ممکن است به کاهش هزینه‌های تولید، توزیع، نگهداری موجودی و مصرف سوخت منجر شود. همچنین می‌توان به کمک این مسئله موجودی محصولات و هزینه‌های نگهداری را کاهش داد. برنامه‌ریزی مناسب در واگذاری سفارش‌ها به کارخانه‌ها و ناوگان حمل‌ونقل، به افزایش بهره‌وری و استفاده مناسب از منابع منجر خواهد شد. همچنین جریان سفارش در میان منابع سیستم مانند ماشین‌آلات، کارخانجات و ناوگان حمل متعادل خواهد شد.

در این مقاله، در بخش مروری بر پژوهش‌های گذشته، پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه زمان‌بندی یکپارچه تولید، توزیع و تحویل دسته‌ای بررسی می‌شوند. در بخش توصیف مدل، مسئله اصلی توصیف می‌شود و یک مدل ریاضی ارائه خواهد شد. در بخش روش حل، یک رویکرد حل با الگوریتم فراابتکاری ارائه شده و در بخش تولید نمونه مسئله، تجزیه و تحلیل می‌شود و مثال عددی ارائه خواهد شد. در بخش حل مسئله، نتایج آزمایش‌های محاسباتی و عملکردی الگوریتم پیشنهادی ارائه و مقایسه می‌شوند و در نهایت در بخش نتیجه‌گیری، نتایج حاصل از پژوهش و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی بیان می‌شوند.

پیشینه تجربی پژوهش

استفاده از زمان‌بندی توزیع و تولید بهینه یکپارچه در مقایسه با تصمیم‌های جداگانه، سود شایان توجهی دارند که در

پژوهش‌های چن و واریسکاتاریس^۱ (۲۰۰۵) و پوندرو و چن^۲ (۲۰۰۵) نشان داده شده است. چنگ و کالباجر^۳ (۱۹۹۳)، نخستین پژوهش را با در نظر گرفتن هزینه حمل‌ونقل برای دسته‌ها ارائه کردند. لی و چن^۴ (۲۰۰۱) به بررسی ظرفیت حمل، به‌عنوان نخستین پژوهش پرداخته‌اند. آنها با روش ارسال مستقیم، مسائل متنوعی را بررسی کرده‌اند. بعضی از مقاله‌ها کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و معیار عملکرد رضایت مشتری را برگزیده‌اند (هال و پوتس^۵، ۲۰۰۳؛ وانگ و لی^۶، ۲۰۰۵؛ جیانگ و لی^۷، ۲۰۰۸ و لی و واریسکاتاریس^۸، ۲۰۰۷). از سوی دیگر، در برخی از مقاله‌ها به کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه کل موجودی اشاره شده است (هرمن و لی^۹، ۱۹۹۳ و گیزمار، لپرت، لی و سربسکانداراجا^{۱۰}، ۲۰۰۸). علاوه بر این، در سال‌های اخیر، مقاله‌ها مروری به این مسئله دارند. در مقاله‌های مولا، پدرو، دیاز و ویسنز^{۱۱} (۲۰۱۰)، فهیم‌نیا، فراهانی، ماریان و لانگ^{۱۲} (۲۰۱۳) و مونز، رمیکرز، کاریس و اردا^{۱۳} (۲۰۱۷)، به عوامل متعددی مانند سطوح تصمیم‌گیری، رویکرد مدل‌سازی، تابع هدف، رویکرد حل یا بر اساس ساختار اشاره شده است.

چنگ، گردن و کوالیو^{۱۴} (۱۹۹۶)، به مسئله زمان‌بندی تک ماشین با تحویل دسته‌ای پرداخته‌اند. هدف مسئله، کمینه‌سازی مجموع دسته‌های تحویلی و جریمه زودکرد^{۱۵} است. جی، هی و چنگ^{۱۶} (۲۰۰۷)، نقش وزن سفارش در یک مسئله مشابه را بررسی کردند و نشان دادند که این مسائل حتی برای حالتی که تعداد دسته ثابت است، NP-Hard می‌ماند. حمیدی نیا، خاک ایبمقانی، مزده و جعفری^{۱۷} (۲۰۱۲)، با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک به حل مسائل زمان‌بندی با هدف کاهش کل دیرکرد^{۱۸} یا زودکرد برای سفارش‌های وزن‌دار در یک سیستم تحویل دسته‌ای پرداختند. مزده، حیدری و کارآموزیان^{۱۹} (۲۰۱۶)، مسئله تحویل دسته‌ای را بررسی کردند که در آن هزینه تأمین مواد از تأمین‌کننده را نیز بهینه می‌کند. لی، لو و لیو^{۲۰} (۲۰۱۶)، به مسئله زمان‌بندی تک ماشین همراه با تولید و تحویل می‌پردازند که در آن فقط یک وسیله برای حمل با ظرفیت محدود وجود دارد. قرایی و جولایی (۲۰۱۸) نیز ارسال دسته‌ای در محیط چندکارخانه‌ای را بررسی کردند.

ین، چنگ، چنگ و وو^{۲۱} (۲۰۱۳)، به مسئله زمان‌بندی با تحویل دسته‌ای در محیط تک ماشین همراه با تخصیص موعد تحویل مشترک^{۲۲} و زمان‌های پردازش قابل کنترل^{۲۳} پرداخته‌اند. راستی برزکی و حجازی^{۲۴} (۲۰۱۵)، یک مسئله یکپارچه واگذاری موعد تحویل، تولید و تحویل دسته‌ای با زمان‌های پردازش قابل کنترل برای چندین مشتری در یک زنجیره تأمین با هدف کمینه‌سازی تعداد سفارش‌های دارای دیرکرد را بررسی می‌کنند. احمدی‌زر و فرهادی^{۲۵} (۲۰۱۵)، به مسئله زمان‌بندی تک ماشین با زمان‌های مختلف دسترسی که به مشتریان مختلف تحویل داده می‌شود، اشاره کرده‌اند.

1. Chen & Vairaktarakis

3. Cheng & Kahlbacher

5. Hall & Potts

7. Xiang & Lee

9. Herrmann & Lee

11. Mula, Peidro, Díaz-Madroño & Vicens

13. Moons, Ramaekers, Caris & Arda

15. Earliness Penalties

17. Hamidinia, Khakabimamaghani, Mazdeh & Jafari

19. Mazdeh, Heydari & Karamouzian

21. Yin, Cheng, Cheng & Wu

23. Controllable Processing Time

25. Ahmadizar & Farhadi

2. Pundoor & Chen

4. Lee & Chen

6. Wang & Lee

8. Li & Vairaktarakis

10. Geismar, Laporte, Lei & Sriskandarajah

12. Fahimnia, Farahani, Marian & Luong

14. Cheng, Gordon & Kovalyov

16. Ji, He & Cheng

18. Lateness

20. Li, Lu & Liu

22. Assignable Common Due Date

24. Rasti-Barzoki & Hejazi

کیم و اون^۱ (۲۰۱۱)، زمان‌بندی پردازش سفارش‌ها روی دو ماشین موازی در مکان‌های مختلف و سپس تحویل به‌صورت دسته‌ای را بررسی می‌کنند. فنگ و ژنگ^۲ (۲۰۱۳)، مسئله یکپارچگی تولید و توزیع با ماشین‌آلات موازی، تولید و تحویل دسته‌ای و با هدف بهینه‌سازی زمان تحویل و هزینه‌های حمل را بررسی کردند. ژنگ و جیانگ^۳ (۲۰۱۵)، به یک مسئله زمان‌بندی با ماشین موازی همراه با تحویل دسته‌ای و با هدف کمینه‌سازی هزینه تحویل و حداکثر زمان ورود کارها پرداخته‌اند. مزده و رستمی^۴ (۲۰۱۴)، به دنبال کمینه‌سازی حداکثر دیرکرد و مجموع هزینه‌های تحویل در یک مسئله جریان کارگاهی با دو ماشین در سیستم تحویل دسته‌ای بودند.

دونگ، ژنگ، چن و یانگ^۵ (۲۰۱۳)، یک مسئله تحویل دسته‌ای را بررسی می‌کنند که در آن ابتدا باید تعدادی سفارش توسط دو ماشین در محیط کارگاه باز^۶ پردازش شده و سپس به یک مشتری و به یک وسیله با ظرفیت محدود تحویل داده می‌شود. گو و گو^۷ (۲۰۱۵)، یک الگوریتم ژنتیک کوانتوم^۸ برای زمان‌بندی یکپارچه زنجیره تأمین همراه با برداشت مواد، زمان‌بندی جریان کارگاهی و تحویل محصولات نهایی را بررسی کردند که هدف کمینه‌سازی زمان تکمیل است. کریمی و دادپور^۹ (۲۰۱۷)، یک مسئله زمان‌بندی جدید در زنجیره تأمین را معرفی می‌کنند که در آن هزینه‌های نگهداری وابسته به مرحله نیز وجود دارد.

از پژوهش‌های انجام‌شده در رابطه با مسائل یکپارچه تولید و توزیع که در حالت‌های مختلف بررسی شدند، نتایج زیر حاصل می‌شوند:

- بیشترین حجم پژوهش‌ها به توابع هدف مربوط به زمان تحویل مربوط است.
- مسائل ارسال دسته‌ای به چند مشتری (ارسال مستقیم و مسیریابی) و مسائل با زمان ارسال، در مقایسه با ارسال تکی و فوری، ثابت پژوهش‌های کمتری را به خود اختصاص می‌دهند که به دلیل سختی و پیچیدگی این گروه از مسائل است.
- در میان مقاله‌های بررسی‌شده، تاکنون به مسئله وسایل حمل‌ونقل غیرهمگن و کمینه‌سازی هزینه‌های مصرف سوخت و انتشار کربن پرداخته نشده است.
- در میان مقاله‌های بررسی‌شده، تاکنون به ارسال کالا در چندین پنجره زمانی اشاره نشده است.

جدول ۱ نمونه‌ای از پژوهش‌های انجام‌شده مسائل تحویل دسته‌ای و تخصیص موعد تحویل را نشان می‌دهد. با توجه به پژوهش‌های بیان‌شده در حوزه مسائل یکپارچه تولید و توزیع، از قبیل پژوهش قرایی و جولای (۲۰۱۸) و سایر پژوهش‌های مشابه که همه آنها کمینه‌سازی زمان تحویل را بررسی کرده‌اند، این پژوهش چندهدفه و دارای دو تابع هدف حداقل‌سازی کل هزینه‌های توزیع سفارش‌ها، هزینه‌های متغیر سوخت و انتشار کربن و کل زمان دیرکرد مشتریان است. تولید به‌صورت تک‌دوره‌ای و سیستم سفارش به‌صورت ساخت برای سفارش است. همچنین با توجه با اینکه چندین مشتری در نقاط مختلفی قرار دارند، برای تحویل کالا به مشتریان، مسیریابی مختلفی ایجاد شده و تصمیم‌های مسیریابی

1. Kim & Oron

3. Zhong and Jiang

5. Dong, Zhang, Chen & Yang

7. Gu, Gu & Gu

9. Karimi & Davoudpour

2. Feng & Zheng

4. Mazdeh & Rostami

6. Open Shop

8. Mutualism Quantum Genetic Algorithm

وسایل نقلیه به این مسئله افزوده می‌شوند. در این حالت باید مشتریان به خوشه‌هایی تقسیم شوند و در هر خوشه تعدادی مشتری به یک وسیله حمل‌ونقل واگذار شوند، به طوری که هزینه سفارش‌ها بین مشتریان کمینه شود. برای اضافه کردن مسیریابی از مقاله لی و همکاران (۲۰۱۸) بهره گرفته شد. این پژوهش فقط مسئله مسیریابی با وسیله نقلیه ناهمگن با در نظر گرفتن کاهش سوخت و انتشار کربن را در نظر گرفته است، در حالی که مقاله ارائه شده علاوه بر مسئله مسیریابی، زمان‌بندی تولید و توزیع در پنجره‌های زمانی مشتریان را نیز لحاظ کرده و مدل یکپارچه زنجیره تأمین سبز را ارائه داده است.

جدول ۱. خلاصه پژوهش‌های انجام شده مسائل تحویل دسته‌ای و تخصیص موعد تحویل

مقاله	تابع هدف	ماشین سری	ماشین موازی	حمل و نقل همگن	حمل و نقل ناهمگن	تحویل دسته‌ای مشتریان	پنجره‌های زمانی مشتریان	هزینه سوخت کربن	هزینه انتشار
چنگ و همکاران (۱۹۹۶)	کمینه‌سازی مجموع دسته‌های تحویلی و جریمه زودکرد	*		*		*			
کیم و اون (۲۰۱۱)	کاهش زمان‌بندی پردازش سفارش‌ها		*	*		*			
حمیدی نیا و همکاران (۲۰۱۲)	کاهش کل دیرکرد یا زودکرد برای سفارش‌های وزن‌دار	*		*		*			
فنگ و ژنگ (۲۰۱۳)	بهبودسازی زمان تحویل و هزینه‌های حمل	*		*		*			
بن و همکاران (۲۰۱۳)	کاهش موعد تحویل مشترک و زمان‌های پردازش قابل کنترل	*		*		*			
مزه و رستمی (۲۰۱۴)	حداقل کردن مجموع تأخیرها و هزینه‌های توزیع		*	*		*			
ژنگ و جیانگ (۲۰۱۵)	کمینه‌سازی هزینه تحویل و حداکثر زمان ورود کارها		*	*		*			
راستی - برزکی و حجازی (۲۰۱۵)	حداقل کردن مجموع وزن‌های تأخیری و زمان تخصیص داده شده		*	*		*			
ژانگ و جیانگ (۲۰۱۵)	حداقل کردن حداکثر زمان ورود محصول و کل هزینه توزیع		*	*		*			
لی و همکاران (۲۰۱۶)	حداقل زمان‌بندی تولید و تحویل	*		*		*			
مزه و همکاران (۲۰۱۶)	حداقل کردن کل هزینه‌های تأخیر، جمع‌آوری از تأمین‌کنندگان و هزینه‌های ارسال به خرده فروش	*		*		*			
کریمی و دادپور (۲۰۱۷)	کمینه‌سازی هزینه‌های نگهداری وابسته به مرحله	*		*		*			
قربانی و جولای (۲۰۱۸)	حداقل کردن هزینه‌های توزیع و زمان تحویل	*		*		*			
لی و همکاران (۲۰۱۸)	حداقل کردن هزینه‌های سوخت و انتشار کربن							*	*
مقاله ارائه شده	حداقل کردن هزینه‌های توزیع و زمان تحویل و هزینه‌های سوخت و انتشار کربن	*		*		*	*	*	*

توصیف مدل

برای این مسئله یکپارچه، چهار متغیر معرفی می‌شوند. نخستین متغیر برای بخش زمان‌بندی ارائه شده است که برای تعیین توالی سفارش‌ها در زنجیره تأمین یا سایت تولیدی استفاده می‌شود. متغیر دوم برای بخش توزیع ارائه شده است که برای تعیین ترتیب تحویل سفارش‌ها در هر وسیله نقلیه استفاده می‌شود. متغیر سوم برای اتصال قسمت زمان‌بندی و توزیع استفاده می‌شود و از آن برای واگذاری سفارش‌ها به وسایل حمل‌ونقل استفاده می‌شود و متغیر چهارم برای تخصیص پنجره‌های زمانی به مشتریان استفاده می‌شود. مدل ارائه‌شده، توسعه مدل قرایی و جولای (۲۰۱۸) و لی و همکاران (۲۰۱۸) است.

انتشار کربن وسایل نقلیه به عوامل متعددی مانند نوع وسایل حمل‌ونقل، نوع سوخت، مصرف سوخت و فاصله بین مبدأ و مقصد بستگی دارد. محاسبه سنتی مصرف سوخت، عملکردی خطی از فاصله سفر است که با آن منطبق نیست. مدل ارائه‌شده عوامل دقیق‌تر، از جمله بار خودرو، سرعت و فاصله را در نظر می‌گیرد. جدول ۲ برخی از نمادها و مقادیر استفاده‌شده در مدل را به‌طور خلاصه بیان می‌کند. این داده‌ها از یک شرکت بزرگ تدارکاتی به دست آمده است (لی و همکاران، ۲۰۱۸).

جدول ۲. مقادیر ارائه‌شده در مدل (لی و همکاران، ۲۰۱۸)

علائم	شرح	مقدار
c_f	هزینه سوخت در هر لیتر مصرفی (CNY)	۷/۳۰
c_e	هزینه انتشار هر لیتر (CNY)	۰/۶۴
v_{ij}	میانگین سرعت در مسیر (kilometers/hour)	۴۰ – ۱۰۰
α_{ij}	مقدار ثابت: عوامل مربوط به سرعت، چرخش جاده (کمان i)	۰/۰۹ – ۰/۱۵
β_v	مقدار ثابت: عوامل مربوط به مقاومت سطح (اصطکاک)، چگالی هوا و مساحت سطح وسیله نقلیه	نوع وسیله نقلیه

مفروضات، مجموعه‌ها، شمارنده‌ها، متغیرهای تصمیم و پارامترها

- وقفه نداشتن در بخش زمان‌بندی.
- دسترس‌پذیری به همه سفارش‌ها در افق برنامه‌ریزی.
- قبل از پردازش سفارش‌ها هیچ زمان راه‌اندازی وجود ندارد و زمان تخلیه و بارگیری در زمان حمل‌ونقل در نظر گرفته شده است.
- افق برنامه‌ریزی تک‌دوره‌ای و سیستم تولید تک‌ماشین و تک‌محصولی است.
- نحوه ارسال به‌صورت مسیریابی و دسته‌ای است.
- برای هر دسته یک زمان آماده‌سازی فرض می‌شود.
- زمان پردازش برای هر کار مشخص و ثابت است.
- وسایل نقلیه با ظرفیت‌های متفاوت و محدود در نظر گرفته شده است که در نتیجه آن یک مجموع هزینه متغیر استفاده از وسایل نقلیه نیز به سیستم اعمال می‌شود.

- طی مسیر هیچ‌گونه اختلالی نظیر تغییرات آب و هوا، عوامل انسانی یا سایر عوامل غیرمنتظره رخ نمی‌دهد.
- تقاضای هر مشتری با یک وسیله نقلیه پاسخ داده می‌شود.
- مسیریابی بدون در نظر گرفتن زمان بیکاری برای وسیله نقلیه صورت می‌گیرد.
- سفارش‌ها در پنجره‌های زمانی تعیین شده به مشتریان تحویل می‌شود.

مجموعه‌ها

I	مجموعه سفارش‌های مشتریان
K	مجموعه وسایل حمل‌ونقل
V	نوع وسایل حمل‌ونقل
TW	مجموعه پنجره زمانی مشتریان

شمارنده‌ها

i, j	اندیس سفارش‌ها یا مشتریان
k	اندیس وسایل حمل‌ونقل
v	اندیس نوع وسایل حمل‌ونقل
tw	اندیس پنجره زمانی مشتریان

پارامترها

n	تعداد سفارش‌ها یا مشتریان
M	یک عدد بزرگ مثبت
p_i	زمان پردازش سفارش i
d_i	موعد تحویل سفارش i
q_i	اندازه سفارش i
t_{ij}	زمان انتقال بین مشتری i و j
t_i	زمان انتقال از سایت تولیدی به مشتری i
r_{ij}	هزینه سفر بین مشتری
FC	هزینه ثابت هر بار انتقال
c_e	هزینه انتشار کربن در هر لیتر مصرفی
c_f	هزینه سوخت در هر لیتر مصرفی
α_{ij}	مقدار ثابت: عوامل مربوط به سرعت و چرخش جاده (کمان ij)
w_v	وزن وسیله نقلیه بدون بار

β_v	مقدار ثابت: عوامل مربوط به مقاومت سطح (اصطکاک)، چگالی هوا و مساحت سطح وسیله نقلیه
v_{ij}	میانگین سرعت وسیله نقلیه در مسیر ij
d_{ij}	فاصله کمان ij
cap_v	ظرفیت وسایل حمل و نقل نوع v
$E_{tw,j}$	حد پایین پنجره زمانی tw برای مشتری j
$L_{tw,j}$	حد بالای پنجره زمانی tw برای مشتری j

متغیرهای تصمیم

x_{ij}	اگر سفارش j بعد سفارش i پردازش شود، ۱ می‌گیرد، در غیر این صورت صفر.
y_{jk}^v	اگر سفارش j به وسیله k نوع v اختصاص یابد، ۱ می‌گیرد، در غیر این صورت صفر.
z_{ijk}^v	اگر سفارش j بلافاصله بعد سفارش i در وسیله k نوع v تحویل شود، ۱ می‌گیرد، در غیر این صورت صفر.
$u_{tw,j}$	اگر پنجره زمانی tw برای مشتریان در نظر گرفته شود، ۱ می‌گیرد، در غیر این صورت صفر.
C_j	زمان تکمیل پردازش سفارش j
CB_{kv}	زمان شروع تحویل وسیله k نوع v
A_j	زمان تحویل سفارش j
T_j	میزان زمان دیرکرد سفارش j
wl_{ij}	مقدار بارگیری وسیله نقلیه مثبت است در غیر این صورت صفر

مدل ریاضی

دو سفارش ساختگی صفر و $n+1$ با زمان پردازش صفر و موعد تحویل صفر برای تعیین نخستین و آخرین سفارش توالی در سایت تولیدی معرفی می‌شوند. همچنین، دو مشتری صفر و $n+1$ نیز تعریف می‌شوند که مشتری صفر به معنای سایت تولیدی و مشتری $n+1$ به معنای بازگشت به سایت تولیدی است. مدل ریاضی به شرح زیر است:

$$\min \sum_{v=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij} z_{ijk}^v + \sum_{v=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n r_j z_{0jk}^v + \sum_{v=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n r_i z_{i,n+1,k}^v \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$+ FC \sum_{v=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n r_j z_{0jk}^v$$

$$+ \sum_{v=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (c_f + c_e) [(\alpha_{ij}(w_v + wl_{ij}) + \beta_v v_{ij}^2) d_{ij}] z_{ijk}^v$$

$$\min \sum_{j=1}^n T_j \quad (\text{رابطه ۲})$$

subject to :

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, n+1 \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} x_{ij} = 1 \quad \forall i = 0, \dots, n \quad \text{رابطه ۴}$$

$$x_{ij} = 0 \quad \forall i = j \quad \text{رابطه ۵}$$

$$x_{0,n+1} = 0 \quad \text{رابطه ۶}$$

$$x_{ij} + x_{ji} \leq 1 \quad \forall i, j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۷}$$

$$\sum_{v=1}^n \sum_{k=1}^n y_{jk}^v = 1 \quad \forall j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\sum_{i=0}^n z_{ijk}^v = y_{jk}^v \quad \forall j = 1, \dots, n+1 \quad \forall k = 1, \dots, n \quad \forall v = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۹}$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} z_{ijk}^v = y_{ik}^v \quad \forall i = 0, \dots, n \quad \forall k = 1, \dots, n \quad \forall v = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$z_{ijk}^v = 0 \quad \forall i = j \quad \forall k = 1, \dots, n \quad \forall v = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$z_{0,n+1,v}^k = 0 \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$z_{ijk}^v + z_{jik}^v \leq 1 \quad \forall i, j = 1, \dots, n \quad \forall k = 1, \dots, n \quad \forall v = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$\sum_{i=0}^n z_{ijk}^v - \sum_{j=1}^{n+1} z_{ijk}^v = 0 \quad \forall i, j = 1, \dots, n \quad \forall k = 1, \dots, n \quad \forall v = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$\sum_{j=0}^n q_j y_{jk}^v \leq cap_v \sum_{j=1}^n z_{0jk}^v \quad \forall k = 1, \dots, n \quad \forall v = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$C_j \geq p_j - M(1 - x_{0j}) \quad \forall j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$C_j \geq C_i + p_j - M(1 - x_{ij}) \quad \forall i \neq j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$$CB_{vk} \geq C_j - M(1 - y_{ik}^v) \quad \forall k, v, j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$A_j \geq CB_{vk} + t_{0j} - M(1 - z_{0jk}^v) \quad \forall k, v, j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$A_j \geq A_i + t_{ij} - M(1 - z_{ijk}^v) \quad \forall k, v, i \neq j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۲۰}$$

$$T_j \geq A_j - d_j \quad \forall j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۲۱}$$

$$T_j \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۲۲}$$

$$Wl_{ij} \leq cap_v \quad \forall v, i, j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۲۳}$$

$$Wl_{ij} \geq \sum_{k=1}^n \sum_{v=1}^n q_j y_{jk}^v \quad \forall i, j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۲۴}$$

$$\sum_{tw=1}^n u_{tw,j} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۲۵}$$

$$A_j - d_j \geq \sum_{tw=1}^n E_{tw,j} u_{tw,j} \quad \forall j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۲۶}$$

$$A_j - d_j \leq \sum_{tw=1}^n L_{tw,j} u_{tw,j} \quad \forall j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۲۷}$$

$$x_{ij}, y_{jk}^v, z_{ijk}^v, u_{tw,j} \in \{0,1\} \quad \forall k, v, i, j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۲۸}$$

$$c_j, CB_{vk}, A_j, T_j, Wl_{ij} \geq 0 \quad \forall k, v, j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۲۹}$$

روابط ۱ و ۲ توابع هدف هستند و شامل کمینه کردن مجموع هزینه‌های توزیع سفارش‌ها و زمان ارسال به مشتریان می‌شوند. عبارت اول هزینه انتقال بین مشتریان، عبارت دوم هزینه انتقال از سایت تولیدی به مشتری نخست، عبارت سوم هزینه بازگشت از مشتری آخر به سایت تولیدی، عبارت چهارم هزینه ثابت هر بار توزیع و عبارت پنجم هزینه مصرف سوخت و انتشار کربن و در نهایت تابع هدف دوم میزان زمان دیرکرد سفارش‌های مشتریان است. روابط ۳ تا ۷ تضمین می‌کنند که هر سفارش، اولین یا آخرین سفارشی است که در زنجیره تأمین پردازش می‌شود (یک سفارش دو بار پردازش نمی‌شود)، در غیر این صورت، این سفارش، نوعی سفارش پیش‌نیازی یا پس‌نیازی در توالی پردازش است. هر سفارش به وسیله رابطه ۸ به یک دسته یا وسیله نقلیه ناهمگن برای عملیات اختصاص داده می‌شود. اگر یک سفارش به یک وسیله نقلیه اختصاص داده شود، روابط ۹ تا ۱۳ تضمین می‌کنند که هر سفارش، اولین یا آخرین سفارش باشد که با یک وسیله حمل‌ونقل ناهمگن به مشتری تحویل داده می‌شود، در غیر این صورت، این سفارش دارای یک سفارش پیش‌نیازی و یک سفارش پس‌نیازی در توالی تحویل است. رابطه ۱۴ توان ورود و خروج در هر گره مشتری را در مسئله مسیریابی وسیله نقلیه تنظیم می‌کند. ظرفیت وسیله نقلیه ناهمگن در رابطه ۱۵ نشان داده شده است. روابط ۱۶ و ۱۷ زمان تکمیل پردازش سفارش نخست و سپس سایر سفارش‌های اختصاص داده‌شده به وسیله نقلیه را محاسبه می‌کنند.

رابطه ۱۸ زمان شروع تحویل یک وسیله نقلیه را تعیین می‌کند که با زمان تکمیل پردازش آخرین سفارش اختصاص یافته به وسیله نقلیه برابر است. روابط ۱۹ و ۲۰ برای محاسبه زمان تحویل هر سفارش استفاده می‌شوند. روابط ۲۱ و ۲۲ زمان دیرکرد هر سفارش را محاسبه می‌کنند. روابط ۲۳ و ۲۴ بیان می‌کنند که بارگیری وسیله نقلیه نمی‌تواند بیشتر از ظرفیت آن باشد. رابطه ۲۵ بیان می‌کند که هر مشتری باید فقط و فقط در یک پنجره زمانی سرویس داده شود. روابط ۲۶ و ۲۷ پنجره زمانی که به هر مشتری سرویس داده می‌شود را نشان می‌دهند. روابط ۲۸ و ۲۹ محدودیت عدد صحیح و غیرمنفی بودن متغیرها را نشان داده‌اند.

مدل ریاضی بالا یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح است و توسط متغیرهای باینری $u_{tw,j}$, x_{ij} , y_{jk}^v , z_{ijk}^v و متغیرهای پیوسته C_j , CB_{vk} , A_j , T_j , Wl_{ij} توصیف می‌شود. این مدل شامل چندین متغیر باینری است که باعث افزایش پیچیدگی مسئله می‌شود. با توجه به پژوهش وانگ و چنگ^۱ (۲۰۰۰) و مزده، زارع‌پور، زارعی و حاجی نژاد^۲ (۲۰۱۰)، مسئله زمان‌بندی سیستم تولیدی با هدف کمینه‌سازی کل زمان دیرکرد یک مسئله NP-Hard است، از سوی دیگر، مسئله مسیریابی به‌تنهایی Strongly NP-Hard است (دمیر، بکتاش و لاپرت^۳، ۲۰۱۲). بنابراین مسئله یکپارچه زمان‌بندی تولید، توزیع و مسیریابی که در آن توابع هدف به حداقل رساندن کل زمان دیرکرد و هزینه توزیع بوده نیز NP-Hard هست و استفاده از روش‌های ابتکاری و فرابتکاری برای آنها توجیه‌پذیر است.

با بررسی مقاله‌های اخیر در زمینه زمان‌بندی یکپارچه زنجیره تأمین، برای بهره‌گیری از روش‌های حل، نتایجی حاصل شد. در این پژوهش‌ها، در راستای یافتن راه‌حل‌های بهینه پارتو برای چنین مسائلی بهینه‌سازی‌ای، اغلب از الگوریتم‌های مختلف استفاده می‌شود. الگوریتم‌های فرابتکاری چندهدفه MOPSO^۴ و NSGA-II^۵، دو مورد از الگوریتم‌هایی هستند که در این پژوهش‌ها به‌طور گسترده از آنها استفاده شده است. در برخی از مسائل عملی بهینه‌سازی چندهدفه^۶، تعدادی از متغیرهای مسئله مد نظر، پیوسته و تعدادی دیگر نیز گسسته هستند. همچنین فضای جست‌وجو در این مسائل گاهی نامحدوب یا ناپیوسته است. این دو عامل سبب می‌شوند که استفاده از روش‌های استاندارد بهینه‌سازی برای حل این‌گونه مسائل، ناکارآمد و پرهزینه باشد. الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO از روش‌های پرکاربرد برای بهینه‌سازی مسائل چندهدفه هستند (بشیری و جلیلی، ۱۳۹۳). مزیت اصلی این الگوریتم‌ها دارا بودن رویکردی روشن برای فراهم آوردن چگالی در بین جواب‌های بهینه پارتو است (سیفی و توکلی مقدم^۷، ۲۰۰۸). به همین دلیل، در پژوهش حاضر برای حل مسئله از دو الگوریتم یادشده استفاده شده و نتایج به‌دست‌آمده با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

روش حل

در دنیای واقعی، مسائل بهینه‌سازی اغلب با وجود چندین هدف ناسازگار همراه هستند. بهینه‌سازی چندهدفه به جست‌وجوی نقاط بهینه با در نظر گرفتن توازن بین اهداف موجود می‌پردازد. به‌طور کلی، یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند به‌صورت زیر تعریف شود:

1. Wang & Cheng
3. Demir, Bektaş & Laporte
5. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
7. Seifi & Tavakkoli-Moghaddam

2. Mazdeh, Zaerpour, Zareei & Hajinezhad
4. Multi Objective Particle Swarm Optimization
6. Multi-Objective Optimization Problem

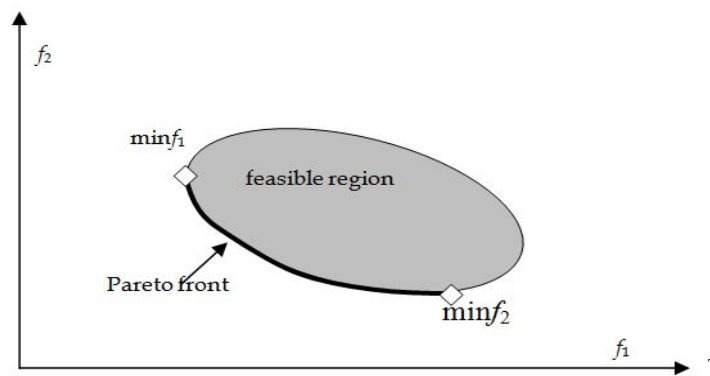
$$\min F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)] \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

$$\text{subject to : } X = (x_1, \dots, x_n) \in S \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

که در آن بردار متغیرهای تصمیم و متعلق به فضای شدنی و غیرتهی S است. همچنین بردار تابع هدف $F: S \rightarrow R^m$ که شامل $m (\geq 2)$ تابع هدف است. اگر $m=2$ باشد مسئله دو هدفه^۱ و اگر $m \geq 3$ مسئله را چندهدفه گویند. در مسائل چندهدفه، مجموعه پاسخ‌های بهینه نامغلوب یا پارتو جایگزین پاسخ بهینه در مسئله تک‌هدفه شده‌اند (کومار و همکاران^۲، ۲۰۱۶).

دو مفهوم اساسی چیرگی (مغلوب) پارتو^۳ و مجموعه ناچیره^۴ (نامغلوب) از جمله مفاهیم مهم در مباحث مربوط به بهینه‌سازی چندهدفه هستند. اگر x و y را دو راه‌حل در ناحیه شدنی S با توابع هدف $f(x)$ و $f(y)$ بنامیم، آنگاه x بر y غلبه می‌کند اگر و تنها اگر $f_i(x) \geq f_i(y) \quad \forall i = 1, \dots, m$ و $f_j(x) > f_j(y) \quad \exists j = 1, \dots, m$ (کوالو، لامرت و وان^۵، ۲۰۰۲).

در یک مجموعه شدنی مجموعه جواب‌های ناچیره شامل نقاطی هستند که مورد چیرگی هیچ یک از نقاط دیگر قرار نمی‌گیرند. به این مجموعه از نقاط مرز پارتو^۶ گفته می‌شود (آتشپز و لوکاس^۷، ۲۰۰۷). شکل ۲ نمونه‌ای از مجموعه پارتوی مربوط به یک مسئله بهینه‌سازی دوهدفه را نشان می‌دهد. در این شکل هر دو تابع هدف از نوع حداقل‌سازی هستند.



شکل ۲. مجموعه پارتوی مربوط به یک مسئله بهینه‌سازی دوهدفه

منبع: آتشپز و لوکاس (۲۰۰۷)

در برخورد با مسائل MOPها چندین مشکل وجود دارد. زمانی که تعداد اهداف افزایش می‌یابند، تعداد پاسخ‌های نامغلوب در فضای هدف نیز افزایش می‌یابند. به بیان دیگر، بیشتر راه‌حل‌های تولیدشده نامغلوب‌اند. این امر ممکن است سرعت جست‌وجو در فضای جواب را آهسته کند، بنابراین تجسم جبهه پارتو و تصمیم‌گیری برای انتخاب راه‌حل مناسب

1. Bi-Objective Optimization Problem
 3. Pareto Dominance
 5. Coello, Lamont & Van Veldhuizen
 7. Atashpaz-Gargari & Lucas

2. Kumar et. al
 4. Non- Dominance
 6. Pareto Front

دشوار است. در نهایت، در مسائل چندهدفه، به دنبال راه‌حلی هستیم که در جبهه پارتو تنوع و پراکندگی مناسبی داشته باشند. تعریف فاصله بین راه‌حل‌های نامغلوب در مسائلی با بیش از دو هدف دشوار است. از این رو، چند الگوریتم تکاملی چندهدفه برای پرداختن به این مشکل‌ها طراحی شده است.

الگوریتم NSGA-II

دب و همکاران^۱ (۲۰۰۲)، به منظور حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم NSGA-II را مطرح کردند. ویژگی‌های عمده این الگوریتم عبارت‌اند از:

- تعریف فاصله ازدحامی^۲ به عنوان ویژگی جایگزین برای شیوه‌هایی مانند اشتراک برزندگی^۳؛
 - استفاده از عملگر انتخاب تورنمنت دودویی^۴؛
 - ذخیره و بایگانی کردن جواب‌های نامغلوب که در مراحل قبلی الگوریتم به دست آمده‌اند. جواب‌های نامغلوب به دست آمده از حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، به نام جبهه پارتو شناخته می‌شوند.
- مراحل اجرای الگوریتمی که درباره آن بحث شد، عبارت‌اند از:

Algorithm 1: Pseudocode of NSGAII

Input: $N', g, f_k(x) \triangleright N'$ member evolved g generations to solve $f_k(x)$
 Initialize Population P' ;
 Generate random population – size N' ;
 Evaluate Objectives Values;
 Assign Rank (level) based on Pareto – sort;
 Generate Child Population;
 Binary Tournament Selection;
 Recombination and Mutation;
for $i=1$ to g **do**
 for each Parent and Child in Population **do**
 Assign Rank (level) based on Pareto – sort;
 Generate sets of non-dominated solution;
 Determine Crowding distance;
 Loop (inside) by adding solution to next generation starting from
 the first front until N' individuals;
end
 select points on the lower front with high crowding distance;
 create next generation;
 Binary Tournament Selection;
 Recombination and Mutation;
end

منبع: کوالو و همکاران (۲۰۰۷)

1. Deb & Pratap
 3. Fitness sharing

2. Crowding Distance
 4. Binary Tournament

ساختار نمایش جواب

بخش نخست نمایش جواب یک ماتریس $۱ * C$ بوده و تعیین‌کننده توالی استفاده از وسایل نقلیه است. این ماتریس دارای ۷ ستون است و در صورتی که تعداد وسایل نقلیه ۴ باشد، این ماتریس به صورت زیر تولید خواهد شد:

وسایل نقلیه	۴	۳	۱	۲
-------------	---	---	---	---

شکل ۳. بخش نخست نمایش جواب

با توجه به شکل ۳ در ابتدا مشتری‌ها به وسیله نقلیه ۴ تخصیص داده می‌شوند و در صورت پر شدن ظرفیت آن، نوبت به تخصیص مشتری‌ها به وسیله نقلیه ۳ می‌رسد. بنابراین سفارش‌های ۱ و ۲ و ۵ به ماشین ۱ و به وسیله نقلیه ۴ تخصیص پیدا می‌کنند. اگر ظرفیت وسیله نقلیه اجازه داد، نوبت به سایر سفارش‌ها می‌رسد، در غیر این صورت، تا حد امکان سفارش‌های مربوط به ماشین ۱ به وسیله نقلیه ۴ و باقی‌مانده سفارش‌ها به وسیله نقلیه ۳ اختصاص داده می‌شوند. به همین ترتیب با رعایت توالی وسایل حمل‌ونقل، سفارش مشتریان تخصیص داده می‌شود. بخش دوم نمایش جواب، توالی تخصیص مشتری‌ها به وسیله نقلیه تعیین می‌شود که یک ماتریس $۱ * C$ است.

مشتری	۱	۵	۳	۴	۲
وسیله نقلیه	۱	۵	۳	۴	۲

شکل ۴. بخش دوم نمایش جواب

توالی تخصیص این مشتری‌ها به وسایل نقلیه بر اساس ماتریس بالا تعیین می‌شود. در ماتریس بالا مشاهده می‌شود که مشتری نخست قبل از مشتری ۵ و ۲ قرار دارد و مشتری ۵ قبل از مشتری ۲. از این رو، ترتیب تخصیص و ملاقات این مشتری‌ها توسط وسایل نقلیه به صورت ۲-۵-۱ است.

ابتدا یک جمعیت تصادفی تولید می‌شود که دارای ساختار و نمایش جوابی است که پیش‌تر توضیح داده شده است. برای هر عضو از جمعیت نمایش جواب و مقدار توابع هدف آن محاسبه و ذخیره می‌شود. سپس اعضای جمعیت بر اساس الگوریتم مرتب‌سازی نامغلوب مرتب می‌شوند و اعضای از جمعیت که توسط هیچ یک از اعضای دیگر جمعیت مغلوب نشده‌اند، جبهه اول را تشکیل می‌دهند. گام بعدی محاسبه فاصله ازدحامی برای هر یک از اعضای جمعیت است. در مرحله بعد روی اعضای جمعیت تقاطع و جهش انجام می‌شود و اعضای جدید تولیدشده با اعضای اصلی جمعیت ترکیب شده و سپس مرتب می‌شوند و جبهه‌های پاره‌تو تشکیل شده و فاصله ازدحامی برای هر یک از اعضای جبهه‌های پاره‌تو محاسبه می‌شود و در نهایت اعضای اضافی جمعیت حذف شده و مرتب‌سازی نامغلوب دوباره انجام می‌شود. در صورتی که شرایط توقف الگوریتم محیا نشده باشد، دوباره فرایند تقاطع، جهش، ترکیب، مرتب‌سازی، حذف جمعیت اضافی و مرتب‌سازی نهایی انجام می‌شود.

الگوریتم MOPSO

در آغاز ابرهات و کندی^۱ (۱۹۹۵)، الگوریتم PSO را بر اساس الگوریتم‌هایی که در آنها، مانند پرندگان، رفتار دسته‌جمعی مشاهده شد، توسعه دادند. در دنیای واقعی، حرکت پرندگان و جست‌وجوی غذا، سیستمی منظم را نشان می‌دهد که در آن هر پرنده موقعیت خود را در بعد زمان بهبود می‌بخشد.

در PSO تک‌هدفه، هر ذره تابع هدف خود را دنبال می‌کند، اما در الگوریتم MOPSO، باید با حرکت در راستای هر تابع هدف تطبیق پیدا کند. بنابراین، هر ذره در هر دسته p_{best} خود را داشته، اما g_{best} هر دسته توسط g_{best} دسته‌های دیگر برای تکرارهای بعدی جایگزین می‌شود. بنابراین، برای تبادل ذرات تولیدشده در هر تکرار، یک آرشیو پویا ساخته می‌شود، ذرات با یکدیگر مقایسه می‌شوند و جواب‌های غیرمغلوب نگهداری شده و بقیه جواب‌ها در پایان تکرار حذف می‌شوند. با این سازوکار، در هر تکرار می‌توان به اعضای آرشیو خارجی^۳ دسترسی داشت. همچنین اندازه آرشیو خارجی به صورت پویا تغییر می‌کند.

بعد از تکرار k ام، مقدار تابع برازندگی موقعیت ذره k ام از رابطه ۳۲ حاصل می‌شود:

$$fit(i, k) = \frac{H(i, k)}{density(i, k)} \quad \text{رابطه ۳۲}$$

که در آن $H(i, k)$ تعداد ذرات مغلوب‌شده توسط ذره k ام در تکرار k ام و $density(i, k)$ تعداد ذرات مشابه با ذره k ام در تکرار k ام است. به‌طور معمول، بیشترین مقدار تابع برازندگی، نشان‌دهنده موقعیت بهتر ذره است.

Algorithm 2: Pseudocode of the standard MOPSO algorithm

```

Begin
for each particle in the swarm
    Initialize its position & velocity randomly
end for
Initialize External Archive (EA) (initially EA empty)
Quality (leader)
do
    for each particle in the swarm
        select a particle (leader) from EA
        Evaluate the fitness function
        if the objective fitness value is better than the personal best objective fitness value
            ( $p_{best}$ ) in history
        then
            current fitness value set as the new personal best ( $p_{best}$ )
        end if
        update the particle velocity
        update the particle position
    end for
    update leader in EA
    Quality (leader)
until stopping criteria is satisfied
    report the result of EA
end begin

```

منبع: رحیمی، عبدالله پوری و مرادی^۴ (۲۰۱۸)

1. Eberhart & Kennedy
3. External Archive (EA)

2. Particle Swarm Optimization
4. Rahimi, Abdollahpouri & Moradi

در ابتدا، موقعیت اولیه هر ذره به‌عنوان p_{best} تنظیم می‌شود. در تکرارهای بعدی، اگر موقعیت فعلی ذره i بر p_{best} غلبه کند، موقعیت فعلی جایگزین می‌شود، در غیر این صورت، p_{best} ذره i بدون تغییر باقی می‌ماند. اگر ارتباط غلبه بودن جود نداشته باشد، مقادیر تابع برازندگی آنها محاسبه می‌شود و موقعیت با مقدار بیشتر به‌عنوان p_{best} انتخاب خواهد شد. در نهایت اگر مقادیر برازندگی نیز برابر شد، یکی از آنها به‌طور تصادفی به‌عنوان p_{best} انتخاب می‌شود (الگوریتم ۲).

برای تولید راه‌حل اولیه الگوریتم MOPSO و NSGA-II از پژوهش‌های گوکسال و همکاران^۱ (۲۰۱۳)، ای و کاجیویچاینوکی^۲ (۲۰۰۹) و قرایی و جولای (۲۰۱۸) بهره گرفته شده است.

جست‌وجوی محلی

با استفاده از جست‌وجوی محلی در الگوریتم‌های تکاملی، کیفیت راه‌حل‌ها بهبود داده می‌شود. این جست‌وجوی محلی در دو مرحله اجرا می‌شود. در مرحله نخست، پس از ایجاد زمان‌بندی کاملی برای مسئله زمان‌بندی، یک راه‌حل انتخاب می‌شود و توالی سفارش‌ها در این راه‌حل بر اساس قاعده اولویت موعده تحویل^۳ تنظیم می‌شود. قانون انتخاب یک راه‌حل بر اساس روش چرخه رولت است. در این روش یک راه‌حل با مقدار احتمال انتخاب بیشتر، برای انتخاب، شانس بالاتری دارد. تابع احتمالات به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_1 = 1 - \frac{1}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

جایی که T_i زمان دیرکرد کل راه‌حل i است.

همچنین در مرحله دوم، جست‌وجوی محلی دیگری برای زیر مسئله مسیریابی انجام می‌شود. در این مورد، پس از ایجاد یک راه‌حل کامل مسئله مسیریابی، یک راه‌حل با روش انتخاب چرخه رولت انتخاب می‌شود. سپس، سه عملگر تعویض، تزریق و معکوس‌سازی روی این راه‌حل اعمال می‌شوند. در عملگر مبادله دو سفارش انتخاب شده و سپس موقعیت آنها در راه‌حل عوض می‌شود. در عملگر تزریق، یک مشتری انتخاب شده و سفارش مشتری دیگر انتخاب می‌شود و نخستین سفارش در کنار آن قرار می‌گیرد. علاوه بر این، در عملگر معکوس‌سازی، یک دنباله از مشتریان انتخاب شده و سپس این دنباله معکوس می‌شود. تابع احتمال در این مرحله به شرح زیر محاسبه می‌شود؛ به این معنا که وسیله نقلیه‌ای با هزینه سفر بیشتر و سفارش بیشتر، احتمال انتخاب بیشتری دارد.

$$P_2 = \frac{\text{تعداد مشتری واگذار شده به وسیله}}{\text{کل هزینه حمل}} \times \frac{\text{هزینه سفر یک وسیله}}{\text{تعداد مشتریان}} \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

حال، برای پذیرش راه‌حل‌های جدید از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید^۴ استفاده می‌شود. برای تبرید یک جسم، ابتدا با دمای اولیه بالا شروع کرده و به آرامی دما برای دستیابی به تعادل ترمودینامیکی کاهش داده می‌شود (کیرک پاتریک،

1. Goksal, Karaoglan & Altıparmak
3. Earliest Due Date (EDD)

2. Ai & Kachitvichyanukul
4. Simulated Annealing Approach

گلت و وکچی^۱، ۱۹۸۳). بهترین راه‌حل‌ها در این تعادل پیدا می‌شوند. اگر یک راه‌حل جدید بهتر از راه‌حل قبل باشد، آن را قبول کرده و جایگزین راه‌حل قبلی می‌کنیم. در غیر این صورت، اگر راه‌حل جدید بهتر از راه‌حل قدیمی نیست، با احتمال زیر پذیرفته می‌شود:

$$P_2 = e^{-\Delta f Tem} \quad \text{رابطه (۳۵)}$$

Δf تفاوت تابع هدف بین راه‌حل جدید و راه‌حل قبلی است. برای یک مسئله چندهدفه، برای محاسبه تابع هدف از روش اسکالرسازی به صورت $f = (F_1 \times \delta) + (F_2 \times (1 - \delta))$ استفاده می‌کنیم. علاوه بر این، پارامتر Term دما را نشان می‌دهد. دما، در الگوریتم بر اساس رابطه $Tem_k = 0.99 \times Tem_{k-1}$ که k شمارنده الگوریتم است، به آرامی کاهش داده می‌شود. بر اساس آزمایش‌های دمای اولیه $Tem_0 = 10$ تنظیم شده است.

تنظیم پارامترها

تنظیم پارامترهای الگوریتم تأثیر شایان توجهی در عملکرد آن دارد. کیفیت (بهترین پاسخ، زمان حل و ...) هر روش فرابتکاری برای بهینه‌سازی مسئله، به شدت متأثر از مقدار تنظیم‌شده برای پارامترهای آن است. شایان ذکر است، پارامترهای الگوریتم به صورت تجربی پس از دفعات متوالی زیاد اجرای الگوریتم و از روش آزمایش و خطا تنظیم شده‌اند.

جدول ۳. مقادیر بهینه برای پارامترهای الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO

NSGA-II		MOPSO	
مقدار بهینه	پارامترها	مقدار بهینه	پارامترها
۵۰	N_{pop}	۵۰	N_{pop}
۰/۵	C_r	۷۵	N_r
۰/۲	M_r	۰/۶	ω^t
۱۰۰	It	۱	C_1
		۱/۲۵	C_2
		۱۰۰	It

تولید نمونه مسئله

برای توصیف کارایی مدل و الگوریتم، مجموعه‌ای از داده‌های تصادفی از طریق توزیع‌های یکنواخت گسسته مطابق با جدول ۴ به شرح زیر و با توجه به پژوهش‌های قرایی و جولای (۲۰۱۸) و لی و همکاران (۲۰۱۸) طراحی شده‌اند. در این پژوهش، به دلیل ارتباط سه پارامتر زمان‌های پردازش، زمان‌های حمل و موعده تحویل، ابتدا زمان‌های پردازش بر اساس چندین آزمون و خطا در اجرای مدل طبق جدول طراحی شدند. به دلیل وجود معیار زمان دیرکرد در

مسئله، باید موعد تحویل به گونه‌ای در نظر گرفته شود که مسئله دارای زمان دیرکرد برای برخی از سفارش‌ها باشد. رابطه $d_i \sim U[\frac{\bar{P} + \bar{t}}{4}; 2 \times (\bar{P} + \bar{t})]$ برای زمان‌های تحویل در نظر گرفته شده است (قرایی و جولای، ۲۰۱۸).

جدول ۴. داده‌های تصادفی مسئله

پارامتر	توضیحات	توزیع یکنواخت U[a,b]
p_i	زمان پردازش کار سفارش مشتری i	$U [100 \text{ و } 200]$
q_i	اندازه سفارش i	$U [10 \text{ و } 40]$
t_j, t_{ij}	زمان‌های حمل و نقل بین مشتری	$U [30 \text{ و } 150]$
C_f	هزینه سوخت در هر لیتر مصرفی	۷/۳۰
C_e	هزینه انتشار کربن در هر لیتر مصرفی	۰/۶۴
FC	هزینه ثابت هر بار انتقال	$U [200 \text{ و } 500]$
r_j, r_{ij}	هزینه انتقال بین مشتری i و j	$U [100 \text{ و } 500]$
v_{ij}	میانگین سرعت وسیله نقلیه در مسیر ij	$U [40 \text{ و } 100]$
α_{ij}	مقدار ثابت عوامل سرعت و ...	$U [0/90 \text{ و } 0/15]$
W_v	وزن وسایل نقلیه بدون بار	$U [1500 \text{ و } 5000]$
d_{ij}	فاصله بین دو گره	$U [30 \text{ و } 200]$
M	عدد بزرگ	۱۰۰۰۰
$L_{tw,j}$	حد پایین پنجره زمانی tw برای مشتری j	$U [2 \text{ و } 7]$
$E_{tw,j}$	حد بالای پنجره زمانی tw برای مشتری j	$U [7 \text{ و } 15]$

منبع: قرایی و جولای، ۲۰۱۸ و لی و همکاران، ۲۰۱۸

سایر پارامترها به صورت هشت مسئله و در ابعاد بزرگ ($P3$ تا $P8$) و کوچک ($P1$ و $P2$) به منظور حل مسئله در حالت‌های مختلف، مطابق جدول ۵ طراحی و در نظر گرفته شد. در این جدول، C نشان‌دهنده تعداد مشتری؛ Cap_v ظرفیت وسایل حمل و نقل نوع v ؛ N_v تعداد وسیله نقلیه موجود و β_v مقدار ثابت برای عوامل مربوط به مقاومت سطح (اصطکاک)، چگالی هوا، مساحت سطح وسیله نقلیه است. به طور مثال، در مسئله $P1$ با ۱۵۰ مشتری و دو نوع وسیله نقلیه با ظرفیت‌های ۱۰۰ و ۱۶۰ هر یک به تعداد سه وسیله و با سه پنجره زمانی، طراحی و اقتباس شد.

برای ارزیابی عملکرد روش‌های چندهدفه، زیتلر، دب و تیلی^۱ (۲۰۰۰) سه ویژگی زیر را پیشنهاد داده‌اند:

- فاصله بین راه‌حل‌های نامغلوب و جبهه پارتو به حداقل برسد.
- توزیع یکنواخت راه‌حل‌ها در جبهه بهینه پارتو.
- گستره جواب‌های پارتوی به دست آمده باید حداکثر شود.

جدول ۵. هشت مسئله مسیریابی با وسیله نقلیه ناهمگن

مسائل								
P۸	P۷	P۶	P۵	P۴	P۳	P۲	P۱	
۳۰۰	۳۰۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۵۰	C
۱۲۰	۶۰	۸۰	۱۵۰	۲۰۰	۱۰۰	۱۵۰	۱۰۰	Cap _v
۵	۶	۴	۵	۳	۲	۴	۳	N _v
۲/۶۷	۱/۸۴	۲/۱۱	۳/۰۵	۳/۳۷	۲/۶۰	۳/۰۵	۲/۶۰	β _v
۱۶۰	۱۲۰	۱۲۰	۲۰۰	۲۵۰	۱۶۰	۲۰۰	۱۶۰	Cap _v
۵	۴	۴	۳	۳	۴	۳	۳	N _v
۳/۱۳	۲/۶۷	۲/۶۷	۳/۳۷	۳/۷۰	۳/۱۳	۳/۳۷	۳/۱۳	β _v
۲۰۰	۲۰۰	۱۵۰	۲۵۰	۳۰۰	۲۵۰	۳۰۰		Cap _v
۴	۲	۳	۳	۳	۳	۳		N _v
۳/۳۷	۳/۳۷	۳/۰۵	۳/۷۰	۳/۷۵	۳/۷۰	۳/۷۵		β _v
۳۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۳۰۰	۳۵۰	۳۰۰			Cap _v
۲	۳	۳	۲	۲	۲			N _v
۳/۷۵	۳/۷۰	۳/۳۷	۳/۷۵	۴/۰۵	۳/۷۵			β _v
۳۵۰	۳۰۰	۲۵۰	۴۰۰					Cap _v
۱	۲	۱	۲					N _v
۴/۰۵	۳/۷۵	۳/۷۰	۴/۱۴					β _v
۴۰۰	۳۵۰	۳۵۰						Cap _v
۱	۲	۱						N _v
۱	۲	۴/۰۵						β _v
۵	۵	۴	۴	۲	۲	۳	۳	تعداد پنجره‌های زمانی

منبع: لی و همکاران (۲۰۱۸)

بنابراین، برای مقایسه روش‌های چندهدفه، حداقل سه معیار عملکردی لازم است. در این پژوهش از چهار معیار عملکرد استفاده شده است که به شرح زیر تعریف می‌شوند؛ Q به عنوان مجموعه جواب‌های پارتوی به دست آمده و F* جبهه پارتو است:

نسبت پاسخ‌های نامغلوب (RNI)^۱: تان، لی و خور^۲ (۲۰۰۲) این روش را معرفی کردند. این معیار، نسبت تعداد پاسخ‌های نامغلوب به دست آمده به کل تعداد راه‌حل‌ها را اندازه‌گیری می‌کند:

$$RNI = \frac{|Q|}{n} \quad RNI \in [0,1] \quad \text{رابطه (۳۶)}$$

|Q| نشان‌دهنده اندازه مجموعه راه‌حل‌های نامغلوب و n اندازه جمعیت است و مقادیر بزرگ‌تر RNI بهتر است.

میانگین فاصله ایده‌آل (MID)^۱: این معیار، برای اندازه‌گیری درجه نزدیک بودن پاسخ‌های به‌دست‌آمده به سطح بهینه واقعی پارتو استفاده شده و از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^{|Q|} d_i}{|Q|}; \quad d_i = \sqrt{\sum_{m=1}^M f_m^{(i)} - f_m^{*(i)}} \quad \text{رابطه (۳۷)}$$

در این معادله، d_i فاصله اقلیدسی هر عضو از مجموعه پارتو از نقطه ایده‌آل است که $f_m^{(i)}$ مقدار m امین تابع هدف در راه‌حل λ ام است و مقادیر کوچک‌تر MID مطلوب‌تر است.

معیار فاصله (SP)^۲: اسکات^۳ (۱۹۹۹) این روش را معرفی کرد. این معیار، چگونگی توزیع راه‌حل‌های نامغلوب، روی جبهه پارتو را تعیین می‌کند. در حقیقت، SP برآوردی از فاصله راه‌حل‌های نامغلوب به‌دست‌آمده را محاسبه می‌کند که به شرح زیر است:

$$SP = \sqrt{\frac{1}{|Q|} \sum_{i=1}^{|Q|} (d_i - \bar{d})^2}; \quad \text{رابطه (۳۸)}$$

$$d_i = \min_{k \in Q, k \neq i} \left\{ \sum_{m=1}^M |f_m^{(i)} - f_m^k| \right\} \text{ and } \bar{d} = \frac{1}{|Q|} \sum_{i=1}^{|Q|} d_i$$

بدیهی است، مقادیر کوچک‌تر SP بهتر است.

حداکثر تنوع (MD)^۴: این معیار نشان‌دهنده فاصله بین راه‌حل‌های نامغلوب مرزی (آخرین پاسخ‌ها) به‌دست‌آمده است. به گفته کالیموی^۵ (۲۰۰۱)، اگر توابع هدف دارای دامنه‌های مختلفی باشند، این معیار می‌تواند گمراه‌کننده باشد، بنابراین MD جدیدی معرفی شد که در آن هر مقدار تابع هدف در دامنه خود نرمال شده است.

$$MD = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \left[\frac{\max_{i \in k} f_k^i - \min_{i \in k} f_k^i}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \right]^2} \quad \text{رابطه (۳۹)}$$

در این رابطه؛ m تعداد اهداف، f_k^i مقدار تابع هدف k ام، f_k^{\max} حداکثر مقدار تابع هدف k ام در جبهه پارتو و f_k^{\min} حداقل مقدار تابع هدف k ام است. مقادیر نزدیک به ۱ ترجیح داده می‌شود.

همچنین، برای واضح نشان دادن نتایج حاصل از اندازه‌گیری عملکرد الگوریتم‌ها، معیار وزنی WM که ترکیبی از چهار معیار است، در زیر ارائه شده است:

$$WM = \frac{RNI + (2 \times MID) + (2 \times SP) + (2 \times MD)}{7} \quad \text{رابطه (۴۰)}$$

1. Mean Ideal Distance
3. Schott
5. Kalyanmoy

2. Spacing Metric
4. Maximum Diversity

با توجه به اهمیت بیشتر گستره و توزیع یکنواخت راه‌حل‌ها، وزن آنها بیشتر است. برای استفاده از این معیار، مقدار معیارها باید با رابطه RDI نرمال شود، از این رو، مقادیر کوچک‌تر WM مطلوب‌تر است.

حل مسئله

در این بخش برای آزمایش اعتبارسنجی، از روش دقیق محدودیت اپسیلون^۱ استفاده می‌شود. در این روش، هدف اصلی به صورت تابع در نظر گرفته شده و سایر اهداف به صورت محدودیت، به مدل اضافه می‌شوند. ماوروتوس و فلوریس^۲ (۲۰۱۳) نسخه تکمیل‌شده‌ای از این رویکرد ارائه می‌دهند که تضمینی برای به دست آوردن راه‌حل بهینه پاره‌تو را فراهم می‌کند. مدل پیشنهادی در GAMS22.3-MINLP اجرا شده و نتایج با الگوریتم NSGA-II مقایسه می‌شوند. نتایج مقایسه در جدول ۶ مشاهده می‌شود. در ابتدا الگوریتم فراابتکاری اجرا شده و پاسخ به دست آمده از آن به صورت $Z_i = (f_i^1, f_i^2); \forall i$ ذخیره می‌شود که مقدار هدف f_i^j از راه‌حل i است. در ادامه $f_j^{min} = \min \{f_j^1, \dots, f_j^n\}$ برای تمامی اهداف محاسبه می‌شود.

جدول ۶. مقایسه روش دقیق با الگوریتم NSGA-II در اندازه کوچک

Relative GAP		Epsilon Constraint			NSGA-II			مسائل	
f_2	f_1	Running Time(min)	f_2	f_1	Running Time (min)	f_2^{min}	f_1^{min}	تعداد مشتری	تعداد سفارش
۰	۰	۶	۵۶۳۴۵	۱۳۷۸۶۹۵۴	۱/۰۱	۵۶۳۴۵	۱۳۷۸۶۹۵۴	۲	۲
۰	۰	۱۹	۹۷۴۳۷	۱۶۵۶۲۱۶۷	۱	۹۷۴۳۷	۱۶۵۶۲۱۶۷	۴	۴
۰	۰	۳۳	۸۳۶۷۵	۱۴۳۵۸۲۷۲	۱/۱۳	۸۳۶۷۵	۱۴۳۵۸۲۷۲	۵	۶
۰/۱۶	۰/۵۵	۴۶	۱۱۳۴۵۱/۸	۱۵۶۷۸۲۴۰/۴۵	۱/۰۹	۱۱۳۴۵۲	۱۵۶۷۸۲۴۱	۷	۸
۰/۷۱	۰/۲۵	۶۰	۱۳۶۷۵۸/۳	۱۵۹۶۷۵۴۸/۷۵	۱/۱۱	۱۳۶۷۵۹	۱۵۹۶۷۵۴۹	۸	۱۰
۰/۰۳	۰/۰۶	۷۰	۱۴۶۷۷۹/۶	۱۷۵۶۷۹۲۲/۹۴	۱	۱۴۶۷۸۰	۱۷۵۶۷۹۲۳	۱۰	۱۲
۰/۲۱	۰/۳۷	۹۰	۱۹۲۴۶۷/۴	۲۰۱۳۵۶۸۶/۶۳	۱/۱۵	۱۹۲۴۶۸	۲۰۱۳۵۶۸۷	۱۱	۱۴
۰/۱۳	۰/۰۲	۹۰	۲۲۸۹۷۴/۹	۲۱۲۳۳۷۶۴/۹۸	۱/۱۸	۲۲۸۹۷۵	۲۱۲۳۳۷۶۵	۱۴	۱۶
*	*	*	*	*	۱/۲۳	۲۴۷۸۹۵	۲۲۴۳۰۰۲۵	۱۸	۱۸
*	*	*	*	*	۱/۲۵	۳۳۶۵۷۸	۳۷۱۱۳۴۵۰	۲۰	۲۲
۰/۲۶	۰/۱۶	۴۶/۲۹			۱/۱۲			میانگین	

برای استفاده از روش اپسیلون محدودیت، با توجه به اینکه مسئله دوهدفه است، هر بار یک هدف را به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته و هدف دیگر به محدودیت‌ها اضافه می‌شود. مقدار حد آستانه هدف دیگر از مقدار به دست آمده برای آن هدف در الگوریتم فراابتکاری و از مقادیر پاسخی که دارای f_j^{min} بود به دست می‌آید. اکنون اگر مقدار به دست آمده از

روش اپسیلون با f_j^{min} ، تفاوت شایان توجهی نداشت، مدل تأیید می‌شود. برای مقایسه بهتر پاسخ‌های به‌دست‌آمده، در دو ستون آخر جدول ۶ شکافی نسبی ارائه شده که انحراف نسبی مقدار تابع هدف بین روش‌های بهینه‌سازی NSGA-II و اهداف دو عامل که توسط روش محدودیت اپسیلون به دست می‌آید را نشان می‌دهد. این فاصله به شرح زیر است:

$$\text{Relative Gap}(\%) = \frac{Z_{\text{NSGA-II}} - Z_{\text{epsilon}}}{Z_{\text{epsilon}}} \quad (\text{رابطه ۴۱})$$

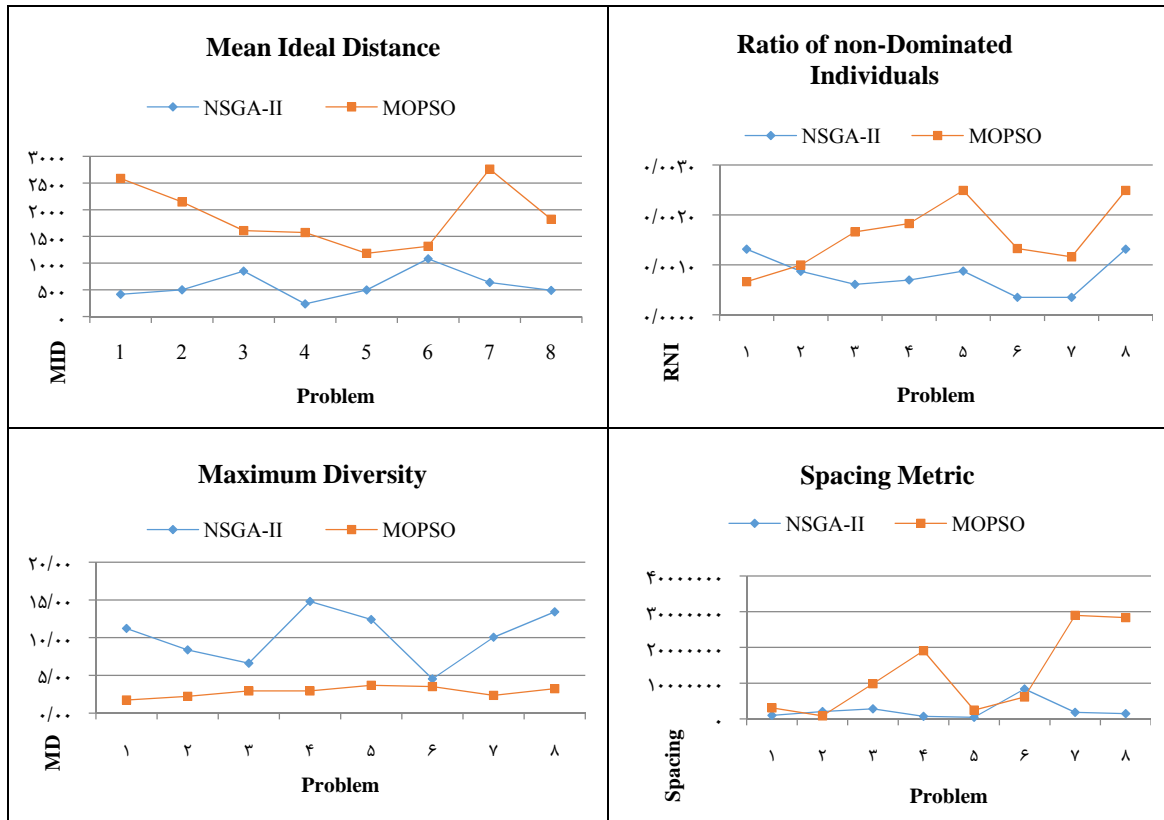
$Z_{\text{NSGA-II}}$ و Z_{epsilon} مقادیر بهینه مقادیر تابع هدف برای الگوریتم NSGA-II و روش اپسیلون هستند. بر اساس جدول ۶، الگوریتم NSGA-II قادر به دستیابی راه‌حل‌های نامغلوب بیشتری در زمان کمتر است و روش دقیق اپسیلون محدودیت قادر به حل دو مسئله آخر نبوده است. در دو ستون آخر، متوسط شکاف نسبی بین راه‌حل الگوریتم NSGA-II و حل دقیق برای تابع هدف اول ۰/۱۶ و برای تابع هدف دوم ۰/۲۶ است. بنابراین الگوریتم NSGA-II می‌تواند راه‌حل پاره‌تو را در جبهه یا بسیار نزدیک به آن پیدا کند و عملکرد الگوریتم معتبر است. در ادامه به‌طور کامل به اعتبارسنجی روش‌های فراابتکاری پیشنهادی پرداخته می‌شود. برای این منظور، در بخش قبل چند معیار ارزیابی و چند مسئله آزمایشی با ابعاد کوچک تعریف شدند و در ادامه عملکرد الگوریتم MOPSO در مقایسه با الگوریتم NSGA-II ارزیابی می‌شود. برای ارزیابی صحیح الگوریتم‌ها، از معیارهای عملکردی معرفی شده در بخش قبلی استفاده شده و نتایج در جدول‌های ۷ و ۸ ارائه شدند. برای ارزیابی اثر جست‌وجوی محلی، نتایج الگوریتم‌ها ابتدا در حالت عدم حضور جست‌وجوی محلی و سپس در حضور جست‌وجوی محلی مقایسه می‌شوند. سپس برای توصیف واضح از نتایج، از معیار ترکیبی استفاده شده و نتایج در جدول ۹ نشان داده شده است.

جدول ۷. مقایسه الگوریتم‌ها بدون جست‌وجوی محلی

NSGA-II				MOPSO				Problem
MD	SP	MID	RNI	MD	SP	MID	RNI	
۱۱/۲۳	۱۰۰۶۷۶۷	۴۱۸	۰/۰۰۱۳	۱/۷۳	۳۱۱۷۲۰۴	۲۵۶۸	۰/۰۰۰۷	P۱
۸/۳۹	۲۰۵۸۷۹۹	۵۰۳	۰/۰۰۰۹	۰/۲۲	۸۶۸۹۲۶	۲۱۴۷	۰/۰۰۱۰	P۲
۶/۶۲	۲۸۲۲۱۲۴	۸۵۲	۰/۰۰۰۶	۲/۹۴	۹۸۷۶۶۹۰	۱۶۱۰	۰/۰۰۱۷	P۳
۱۴/۸۱	۷۳۱۵۰۷	۲۳۸	۰/۰۰۰۷	۲/۹۵	۱۹۰۷۵۵۷۵	۱۵۷۴	۰/۰۰۱۸	P۴
۱۲/۴۲	۴۷۱۷۲۳	۴۹۹	۰/۰۰۰۹	۳/۶۹	۲۴۷۸۱۱۹	۱۱۸۴	۰/۰۰۲۵	P۵
۴/۵۴	۸۳۷۷۳۵	۱۰۸۴	۰/۰۰۰۴	۳/۵۱	۶۱۴۸۶۴۶	۱۳۱۶	۰/۰۰۱۳	P۶
۱۰/۰۷	۱۸۳۸۹۲۹	۶۳۹	۰/۰۰۰۴	۲/۳۴	۲۸۹۷۸۲۸۹	۲۷۶۰	۰/۰۰۱۲	P۷
۱۳/۴۳	۱۴۹۵۷۵۹	۴۹۲	۰/۰۰۱۳	۳/۲۴	۲۸۳۵۳۹۴۱	۱۸۲۳	۰/۰۰۲۵	P۸

همان‌طور که در جدول ۷ و شکل ۵ نشان داده شده است، در غیاب جست‌وجوی محلی، از لحاظ تعداد راه‌حل‌های نامغلوب تولیدشده (RNI)، MOPSO خروجی بهتر در اندازه‌های مختلف دارد که البته این تفاوت در اندازه‌های بزرگ شایان توجه است. از لحاظ معیار MID، NSGA-II در مقایسه با MOPSO راه‌حل پذیرفتنی‌تری ارائه داده است. بر

حسب معیار فاصله SP، الگوریتم با مقادیر کوچکتر، پراکندگی بهتری روی جبهه پارتو دارد، از این رو، NSGA-II عملکرد بهتری دارد. در نهایت MOPSO قادر به تولید راه حل بهتر از الگوریتم NSGA-II در رابطه با معیار MD است که گستره پاسخها را نشان می دهد.

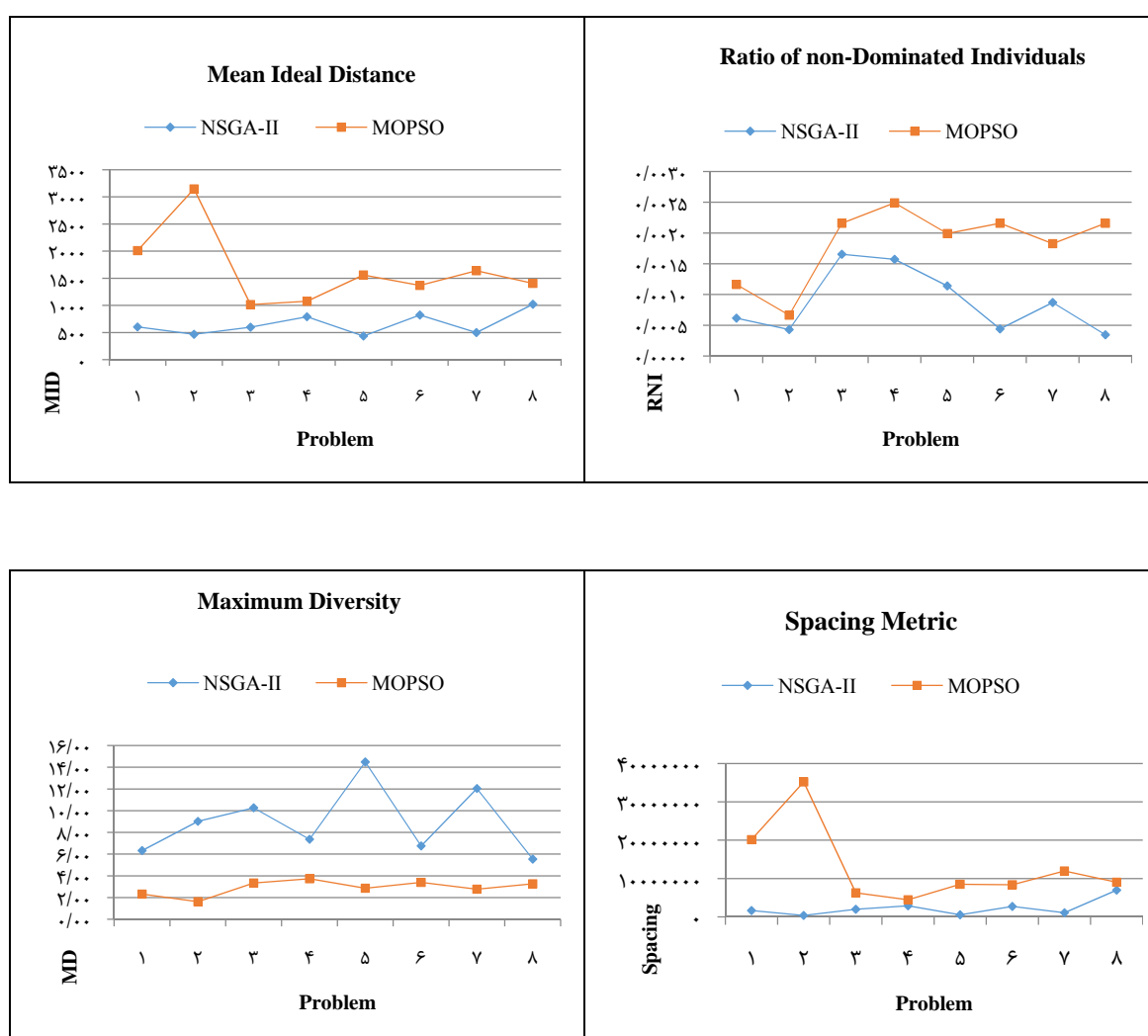


شکل ۵. نمودار معیارهای عملکردی بدون جست و جوی محلی

جدول ۸. مقایسه الگوریتمها بر اساس جست و جوی محلی

NSGA-II				MOPSO				Problem
MD	SP	MID	RNI	MD	SP	MID	RNI	
۶/۳۲	۱۶۷۷۲۶۲	۶۰۲	۰/۰۰۰۶	۲/۳۲	۲۰۱۷۳۵۵۹	۲۰۰۹	۰/۰۰۱۲	P۱
۹/۰۲	۴۰۰۵۶۹	۴۶۷	۰/۰۰۰۴	۱/۶۲	۳۵۲۳۷۷۸۲	۳۱۴۶	۰/۰۰۰۷	P۲
۱۰/۲۷	۲۰۰۲۸۰۵	۵۹۷	۰/۰۰۱۷	۳/۳۳	۶۲۹۸۸۱۶	۱۰۱۵	۰/۰۰۲۲	P۳
۷/۳۷	۲۹۲۰۸۵۵	۷۹۰	۰/۰۰۱۶	۳/۷۳	۴۴۸۲۳۸۳	۱۰۷۷	۰/۰۰۲۵	P۴
۱۴/۵۰	۵۷۶۹۰۰	۴۳۴	۰/۰۰۱۱	۲/۸۶	۸۵۳۲۳۴۳	۱۵۵۹	۰/۰۰۲۰	P۵
۶/۷۵	۲۷۳۰۲۰۶	۸۲۳	۰/۰۰۰۴	۳/۴۰	۸۳۹۹۰۷۳	۱۳۶۷	۰/۰۰۲۲	P۶
۱۲/۰۵	۱۱۱۳۳۷۳	۴۹۷	۰/۰۰۰۹	۲/۷۷	۱۱۹۹۸۰۳۴	۱۶۳۸	۰/۰۰۱۸	P۷
۵/۵۳	۶۹۸۵۵۵۱	۱۰۲۱	۰/۰۰۰۳	۳/۲۶	۹۰۴۸۶۵۶	۱۴۰۶	۰/۰۰۲۲	P۸

برای بررسی کارایی جست‌وجوی محلی، جست‌وجو برای دو الگوریتم بالا اعمال می‌شود و نتایج در جدول ۸ و شکل ۶ ارائه شده است. همانند حالت بدون جست‌وجوی محلی، بر اساس RNI، الگوریتم MOPSO عملکرد بهتری در اندازه‌های مختلف دارد. از لحاظ معیار MID، الگوریتم NSGA-II به‌طور نسبی در مقایسه با MOPSO راه‌حل پذیرفتنی‌تری ارائه داده است. بر حسب معیار فاصله SP، الگوریتم با مقادیر کوچک‌تر پراکندگی بهتری روی جبهه پارتو دارد، از این رو، NSGA-II عملکرد بهتری دارد اما در حضور جست‌وجوی محلی، این معیار برای الگوریتم MOPSO بهبود یافته است. در نهایت MOPSO قادر به تولید راه‌حل بهتر از الگوریتم NSGA-II در رابطه با معیار MD است که گستره پاسخ‌ها را نشان می‌دهد.

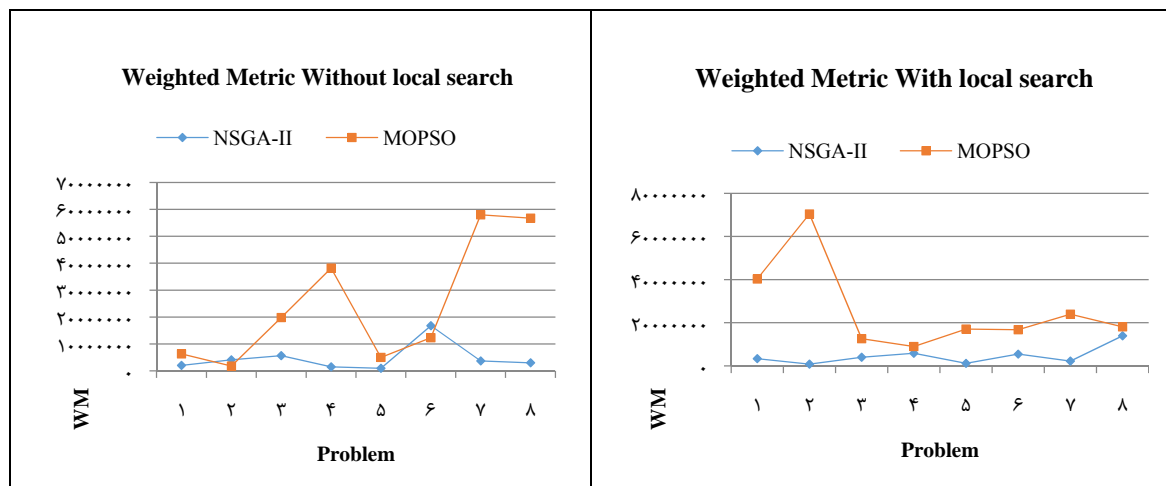


شکل ۶. نمودار معیارهای عملکردی بر اساس جست‌وجوی محلی

همچنین با توجه به جدول ۹ و معیار وزنی (WM)، با اضافه کردن جست‌وجوی محلی، عملکرد متوسط الگوریتم‌ها بهبود یافته است. مقدار کوچک‌تر این معیار مطلوب‌تر است.

جدول ۹. مقایسه معیار وزنی

Weighted Metric With local search		Weighted Metric Without local search		Problem
NSGA-II	MOPSO	NSGA-II	MOPSO	
۳۳۵۵۷۴۱	۴۰۳۵۱۱۴۲	۲۰۱۴۳۹۲	۶۲۳۹۵۸۳	P۱
۸۰۲۰۹۰	۷۰۴۸۱۸۶۰	۴۱۱۸۶۲۰	۱۷۴۲۱۵۰	P۲
۴۰۰۶۸۲۴	۱۲۵۹۹۶۶۹	۵۶۴۵۹۶۵	۱۹۷۵۶۶۰۷	P۳
۵۸۴۳۳۰۵	۸۹۶۶۹۲۷	۱۴۶۳۵۲۰	۳۸۱۵۴۳۰۲	P۴
۱۱۵۴۶۹۷	۱۷۰۶۷۸۱۰	۹۴۴۴۷۰	۴۹۵۸۶۱۳	P۵
۵۴۶۲۰۷۲	۱۶۸۰۰۸۸۶	۱۶۷۵۷۶۴۵	۱۲۲۹۹۹۳۰	P۶
۲۲۲۷۷۶۵	۲۳۹۹۹۳۴۹	۳۶۷۹۱۵۶	۵۷۹۶۲۱۰۲	P۷
۱۳۹۷۳۱۵۶	۱۸۱۰۰۱۳۰	۲۹۹۲۵۲۷	۵۶۷۱۱۵۳۵	P۸



شکل ۷. نمودار مقایسه معیارهای وزنی

با توجه به نتایج به دست آمده معیار WM، الگوریتم NSGA-II در مقایسه با MOPSO عملکرد بهتری دارد. به منظور مقایسه دقیق تر نتایج حاصل از معیارهای عملکردی، از تحلیل آماری t زوجی در سطح اطمینان ۹۵ درصد و $P - value < 0.05$ استفاده شد. علاوه بر این، مسئله P۸ به تعداد ده مرتبه برای هر الگوریتم اجرا شده و نتایج در جدول های ۱۰ و ۱۱ ارائه شد. در بحث آنالیز آماری، هدف این است که میانگین های چندین جامعه با یکدیگر مقایسه شوند و به این موضوع پی برده شود که آیا میانگین های این جوامع با یکدیگر مساوی هستند یا اینکه بین آنها اختلاف بارز و معناداری وجود دارد. بدین منظور، ابتدا خروجی با نرم افزار ۱۸ Minitab تحلیل شده و در جدول ۱۲ ارائه شده است. با توجه به این نتایج، در سطح اطمینان ۹۵ درصد عملکرد الگوریتم MOPSO فقط در معیار MD در مقایسه با الگوریتم NSGA-II بهتر بوده است، از این رو، می توان بیان کرد که الگوریتم NSGA-II برای مدل پیشنهادی کارایی مناسب تری دارد.

جدول ۱۰. نتایج محاسباتی معیارهای عملکردی مسئله PA

MOPSO						
ACT (seconds)	GD	MD	SP	MID	RNI	PA
۴۵	۲۸۳۰۷۷۲۴	۲	۵۴۵۹۶	۲۹۸۸	۰/۰۰۱	۱
۷۳	۲۸۱۹۶۸۵۶	۳	۳۸۳۱۲	۲۷۴۸	۰/۰۰۱	۲
۵۲	۱۹۰۴۴۲۲۲	۳	۹۲۵۹۱	۲۱۱۱	۰/۰۰۳	۳
۸۹	۱۰۷۹۱۶۹۶	۳	۹۴۰۰۷	۱۵۶۵	۰/۰۰۲	۴
۹۶	۳۵۶۵۹۳۰۸	۲	۶۲۵۰۷	۳۶۰۹	۰/۰۰۱	۵
۱۱۶	۷۳۸۸۵۸۰	۳	۱۱۷۱۶۳	۱۲۵۳	۰/۰۰۲	۶
۱۳۰	۱۴۳۹۸۱۷۴۰	۳	۶۰۱۷۵	۱۳۱۴	۰/۰۰۳	۷
۱۳۱	۴۱۴۲۵۴۷۳	۲	۳۱۰۲۰	۳۹۲۳	۰/۰۰۱	۸
۱۳۸	۳۰۱۸۱۹۸۸	۲	۶۹۲۰۹	۳۳۴۲	۰/۰۰۱	۹
۱۳۰	۱۶۷۴۹۲۴۷	۳	۱۲۹۸۰۹	۱۹۶۶	۰/۰۰۱	۱۰

جدول ۱۱. نتایج محاسباتی معیارهای عملکردی مسئله PA

NSGA-II						
ACT (seconds)	GD	MD	SP	MID	RNI	PA
۷۵	۲۶۴۹۸۶۸	۹	۳۸۱۱۳	۵۷۳	۰/۰۰۴	۱
۸۹	۸۱۰۰۱۴	۱۵	۳۷۳۴۷	۳۵۶	۰/۰۰۱	۲
۵۴	۶۰۰۶۸۶	۱۷	۳۱۷۳	۴۶۱	۰/۰۰۴	۳
۹۱	۱۱۰۱۱۴۴	۱۵	۳۰۳۹۲	۵۶۶	۰/۰۰۴	۴
۸۶	۱۳۵۵۵۹۹	۱۳	۳۶۶۷۸	۵۱۳	۰/۰۰۷	۵
۷۸	۱۴۱۷۱۲۵	۱۱	۵۰۵۸۳	۶۸۰	۰/۰۰۴	۶
۸۱	۷۳۹۱۹۳	۱۹	۱۶۲۴	۴۹۴	۰/۰۰۳	۷
۸۲	۹۳۷۹۳۹	۱۰	۳۲۲۲۸	۴۹۱	۰/۰۰۲	۸
۷۵	۷۱۱۳۳۵	۱۳	۲۴۶۷۱	۴۱۸	۰/۰۰۴	۹
۸۳	۱۰۴۶۶۱۵	۱۹	۱۸۵۲	۴۴۹	۰/۰۰۱	۱۰

با توجه به جدول‌های بالا داریم:

 μ_1 : mean of MOPSO μ_2 : mean of NSGA-IIDifference: $\mu_1 - \mu_2$

جدول ۱۲. نتایج آزمون Two Paired Sample T-test

algorithm performance	Alternative hypothesis	Null hypothesis	P-Value	DF	T-Value	SE Mean	StDev	Mean	Algorithm
GD									
-	$H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	./.000	۹	۶/۲۳	۳۵۵۱۲۶۱	۱۱۲۳۰۰۷۲	۳۳۲۸۵۰۸۳	MOPSO
better						۱۸۸۵۰۶	۵۹۶۱۰۸	۱۱۳۶۹۵۲	NSGA-II
RNI									
-	$H_1: \mu_1 - \mu_2 < 0$	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	./.000	۱۴	-۴/۴۵	۰/۰۰۰۲۳	۰/۰۰۰۷۴۱	۰/۰۰۱۷۸۲	MOPSO
better						۰/۰۰۰۴۰	۰/۰۰۱۲۸	۰/۰۰۲۸۶	NSGA-II
MID									
-	$H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	./.000	۹	۶/۴۱	۳۰۸	۹۷۴	۲۴۸۲	MOPSO
better						۲۹	۹۰/۶	۵۰۰	NSGA-II
SP									
-		$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	./.۰۰۱	۱۳	۴/۲۰	۱۰۳۰۶	۳۲۵۸۹	۷۴۹۳۹	MOPSO
better						۵۵۴۷	۱۷۵۴۰	۲۵۷۳۶	NSGA-II
MD									
better		$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	۱/۰۰۰	۹	-۹/۷۹	۰/۱۹	۰/۵۹۶	۲/۶۰۲	MOPSO
-						۱/۱	۳/۶۳	۱۴	NSGA-II
ACT									
-		$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	./.۰۵۱	۱۰	۱/۸۰	۱۱	۳۴/۴	۱۰۰	MOPSO
better						۳/۳	۱۰/۴	۷۹/۵	NSGA-II

نتیجه گیری

در این پژوهش مسئله یکپارچه زمان بندی زنجیره تأمین با تعیین تخصیص موعد تحویل، زمان بندی سفارش ها روی یک ماشین در یک سیستم تولیدی و ارسال به صورت دسته ای و اگدا شده به چندین وسیله حمل و نقل ناهمگن با توجه به ظرفیت و در نهایت تحویل سفارش ها به مشتریان در پنجره زمانی با هدف کمینه کردن کل هزینه های توزیع سفارش ها و هزینه های متغیر سوخت و انتشار کربن و کل زمان دیرکرد سفارش های مشتریان ارائه شد. مدل برنامه ریزی مسئله بیان شده یک مدل ریاضی عدد صحیح غیرخطی مختلط است. وسایل حمل و نقل می توانند در سرعت، ظرفیت یا نرخ هزینه حمل و نقل، تفاوت هایی داشته باشند که این امر باعث سختی بررسی این مسائل می شود. اجرای این پژوهش به کاهش هزینه های توزیع و تحویل در زنجیره تأمین و همچنین دیرکرد در تحویل سفارش ها به مشتریان و افزایش رضایت مندی آنان منجر خواهد شد. همچنین می توان به کمک این مسئله موجودی محصولات و هزینه های نگهداری را کاهش داد. برنامه ریزی مناسب در واگذاری سفارش ها به کارخانه ها و ناوگان حمل و نقل، به افزایش بهره وری و استفاده مناسب از منابع منجر خواهد شد. همچنین جریان سفارش در میان منابع سیستم مانند ماشین آلات، کارخانجات و ناوگان حمل متعادل خواهد شد. در دنیای واقعی، عوامل مختلف مانند مشتریان، تأمین کنندگان، تولید کنندگان و توزیع کنندگان

ممکن است اهداف متضاد مختلفی داشته باشند و باید به منافع همه اعضای زنجیره تأمین توجه شود. به‌طور مثال، در این پژوهش، کاهش کل زمان دیرکرد به افزایش هزینه توزیع و برعکس منجر می‌شود، بنابراین به تعادل بین اهداف نیاز است. همچنین مدیریت می‌تواند یک هدف را به‌عنوان هدف اصلی انتخاب کند و اهداف دیگر را به‌عنوان محدودیت در نظر بگیرد.

از دیدگاه مدیریتی، این پژوهش ممکن است به کاهش هزینه‌های تولید، توزیع، نگهداری موجودی و مصرف سوخت منجر شود. همچنین می‌توان به کمک این مسئله موجودی محصولات و هزینه‌های نگهداری را کاهش داد. برنامه‌ریزی مناسب در واگذاری سفارش‌ها به کارخانه‌ها و ناوگان حمل‌ونقل، به افزایش بهره‌وری و استفاده مناسب از منابع منجر خواهد شد. همچنین جریان سفارش در میان منابع سیستم مانند ماشین‌آلات، کارخانجات و ناوگان حمل‌ونقل متعادل خواهد شد.

به‌منظور اعتبارسنجی و ارزیابی مدل، الگوریتم MOPSO با الگوریتم NSGA-II در آزمایش‌های عددی مقایسه شده و برای ارزیابی راه‌حل‌ها، برخی از معیارهای عملکرد برای مسائل چندهدفه استفاده شدند. نتایج نشان دادند که عملکرد NSGA-II بالاتر است.

مسائل مربوط به تصمیم‌گیری یکپارچه زمان‌بندی زنجیره تأمین و مدل‌های مربوط به آن از تنوع بالایی برخوردار هستند. از این رو با به‌کارگیری فرضیه‌های جدید می‌توان مدل‌های پیشین را توسعه داد و به دنیای واقعی نزدیک‌تر کرد. به‌منظور بهبود این پژوهش موارد زیر پیشنهاد می‌شوند:

- تمام پارامترهای این مدل پیشنهادی قطعی در نظر گرفته شده‌اند، این در حالی است که در عمل برخی از پارامترها (از جمله زمان حرکت وسایل نقلیه) ماهیت غیرقطعی دارند. از این رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی با رویکردهای بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت (مثل برنامه‌ریزی تصادفی یا استوار) این مهم در نظر گرفته شود.
- استفاده از سایر الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مدل ارائه‌شده و مقایسه با روش پیشنهادی.
- در نظر گرفتن چندین دوره زمانی برای مسئله ارائه‌شده.

منابع

- اصغری‌زاده، عزت‌اله؛ جعفر نژاد، احمد؛ زندیه، مصطفی؛ جویبار، سبحان (۱۳۹۶). تبیین الگوی مدل‌سازی ترافیک در مسائل مسیریابی خودرو مبتنی بر پارادایم حمل‌ونقل سبز (مورد مطالعه: شرکت زمزم). مدیریت صنعتی، ۹(۲)، ۲۱۷-۲۴۴.
- بشیری، مهدی؛ جلیلی، مجید (۱۳۹۳). الگوریتم ژنتیک در فضای تک‌هدفه و چندهدفه (مفاهیم و ابزارها). تهران: انتشارات دانشگاه شاهد.
- حاجیان، سیما؛ افشار کاظمی، محمدعلی؛ سید حسینی، سید محمد؛ طلوعی اشلقی، عباس (۱۳۹۸). ارائه مدل چندهدفه برای مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی در شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز چنددوره‌ای و چندمحصولی برای کالاهای فاسدشدنی. مدیریت صنعتی، ۱۱(۱)، ۸۳-۱۱۰.

شاهبندرزاده، حمید؛ نجمی، محمد حسن؛ عطایی، علیرضا (۱۳۹۶). ارائه مدل ریاضی بر اساس مسئله مسیریابی خودروی ظرفیت‌دار با پنجره‌های زمانی برای جمع‌آوری زباله. *مدیریت صنعتی*، ۹(۱)، ۱۴۷-۱۶۶.

صادقی مقدم، محمدرضا؛ مؤمنی، منصور؛ نالچیگر، سروش. (۱۳۸۸). برنامه‌ریزی یکپارچه تأمین، تولید و توزیع زنجیره تأمین با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک. *مدیریت صنعتی*، ۱(۲)، ۷۱-۸۸.

References

- Ahmadizar, F., & Farhadi, S. (2015). Single-machine batch delivery scheduling with job release dates, due windows and earliness, tardiness, holding and delivery costs. *Computers & Operations Research*, 53, 194-205.
- Ai, T. J., & Kachitvichyanukul, V. (2009). A particle swarm optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Operations Research*, 36(5), 1693-1702.
- Asgharizadeh, E., Jafarnejad, A., Zandieh, M., & Joybar, S. (2017). Explaining the model of traffic modeling in vehicle routing problems based on the green transportation paradigm (Case study: Zamzam Company). *Journal of Industrial Management*, 9 (2), 217-244. (in Persian)
- Atashpaz-Gargari, E., & Lucas, C. (2007, September). Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. In *2007 IEEE congress on evolutionary computation* (pp. 4661-4667). IEEE.
- Bashiri, M., Jalili, M. (2014). *Genetic algorithm in single-objective and multi-objective space (concepts and tools)*. Tehran: Shahed University Press. (in Persian)
- Chen, Z. L. (1996). Scheduling and common due date assignment with earliness-tardiness penalties and batch delivery costs. *European Journal of Operational Research*, 93(1), 49-60.
- Chen, Z. L., & Vairaktarakis, G. L. (2005). Integrated scheduling of production and distribution operations. *Management Science*, 51(4), 614-628.
- Cheng, T. C. E., & Kahlbacher, H. G. (1993). Scheduling with delivery and earliness penalties. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 10(2), 145-152.
- Cheng, T. E., Gordon, V. S., & Kovalyov, M. Y. (1996). Single machine scheduling with batch deliveries. *European Journal of Operational Research*, 94(2), 277-283.
- Coello, C. A. C., Lamont, G. B., & Van Veldhuizen, D. A. (2007). *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems* (Vol. 5, pp. 79-104). New York: Springer.
- Deb, K., & Pratap, A. (2002). *A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization*, NSGA-II.
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2012). An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 346-359.

- Dondo, R., & Cerdá, J. (2015). The heterogeneous vehicle routing and truck scheduling problem in a multi-door cross-dock system. *Computers & Chemical Engineering*, 76, 42-62.
- Dong, J., Zhang, A., Chen, Y., & Yang, Q. (2013). Approximation algorithms for two-machine open shop scheduling with batch and delivery coordination. *Theoretical Computer Science*, 491, 94-102
- Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995, November). Particle swarm optimization. *In Proceedings of the IEEE international conference on neural networks* (Vol. 4, pp. 1942-1948).
- Fahimnia, B., Farahani, R. Z., Marian, R., & Luong, L. (2013). A review and critique on integrated production–distribution planning models and techniques. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1), 1-19.
- Feng, X., & Zheng, F. (2013, December). Integrated Job Scheduling with Parallel-Batch Processing and Batch Deliveries. *In International Conference on Combinatorial Optimization and Applications* (pp. 72-83). Springer, Cham.
- Geismar, H. N., Laporte, G., Lei, L., & Sriskandarajah, C. (2008). The integrated production and transportation scheduling problem for a product with a short lifespan. *INFORMS Journal on Computing*, 20(1), 21-33.
- Gharaei, A., & Jolai, F. (2018). A multi-agent approach to the integrated production scheduling and distribution problem in multi-factory supply chain. *Applied Soft Computing*, 65, 577-589.
- Goksal, F. P., Karaoglan, I., & Altiparmak, F. (2013). A hybrid discrete particle swarm optimization for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Industrial Engineering*, 65(1), 39-53.
- Golden, B., Assad, A., Levy, L., & Gheysens, F. (1984). The fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 11(1), 49-66.
- Gu, J., Gu, M., & Gu, X. (2015). A mutualism quantum genetic algorithm to optimize the flow shop scheduling with pickup and delivery considerations. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/387082>.
- Hajian, S., Afshar Kazemi, M. A., Seyed Hosseini, S. M., Toloui Ashlaghi, A. (2019). Presenting a multi-objective model for the location-routing-inventory problem in the multi-cycle green supply chain network of multi-period and multi-product for perishable goods. *Journal of Industrial Management*, 11 (1), 83-110. (in Persian)
- Hall, N. G., & Potts, C. N. (2003). Supply chain scheduling: Batching and delivery. *Operations Research*, 51(4), 566-584
- Hamidinia, A., Khakabimamaghani, S., Mazdeh, M. M., & Jafari, M. (2012). A genetic algorithm for minimizing total tardiness/earliness of weighted jobs in a batched delivery system. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 29-38.
- Herrmann, J. W., & Lee, C. Y. (1993). On scheduling to minimize earliness-tardiness and batch delivery costs with a common due date. *European Journal of Operational Research*, 70(3), 272-288.

- Ji, M., He, Y., & Cheng, T. E. (2007). Batch delivery scheduling with batch delivery cost on a single machine. *European journal of operational research*, 176(2), 745-755.
- Kalyanmoy, D. (2001). *Multi objective optimization using evolutionary algorithms* (pp. 124-124). John Wiley and Sons.
- Karimi, N., & Davoudpour, H. (2017). Integrated production and delivery scheduling for multi-factory supply chain with stage-dependent inventory holding cost. *Computational and Applied Mathematics*, 36(4), 1529-1544.
- Kim, E. S., & Oron, D. (2013). Coordinating multi-location production and customer delivery. *Optimization Letters*, 7(1), 39-50.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M.P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.
- Kumar, R. S., Kondapaneni, K., Dixit, V., Goswami, A., Thakur, L. S., & Tiwari, M. K. (2016). Multi-objective modeling of production and pollution routing problem with time window: A self-learning particle swarm optimization approach. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 29-40.
- Lee, C. Y., & Chen, Z. L. (2001). Machine scheduling with transportation considerations. *Journal of scheduling*, 4(1), 3-24.
- Li, C. L., & Vairaktarakis, G. (2007). Coordinating production and distribution of jobs with bundling operations. *IIE transactions*, 39(2), 203-215.
- Li, G., Lu, X., & Liu, P. (2016). The coordination of single-machine scheduling with availability constraints and delivery. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 12(2), 757-770.
- Li, J., Wang, D., & Zhang, J. (2018). Heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem based on fuel and carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 201, 896-908
- Mavrotas, G., & Florios, K. (2013). An improved version of the augmented ϵ -constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 219(18), 9652-9669.
- Mazdeh, M. M., & Rostami, M. (2014). A branch-and-bound algorithm for two-machine flow-shop scheduling problems with batch delivery costs. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 1(2), 94-104.
- Mazdeh, M. M., Zaerpoor, F., Zareei, A., & Hajinezhad, A. (2010). Parallel machines scheduling to minimize job tardiness and machine deteriorating cost with deteriorating jobs. *Applied Mathematical Modelling*, 34(6), 1498-1510
- Mazdeh, M., Heydari, M., & Karamouzian, A. (2016). An integrated model of scheduling, batch delivery and supplier selection in a make-to-order manufacturing system. *Decision Science Letters*, 5(2), 189-200.
- Moons, S., Ramaekers, K., Caris, A., & Arda, Y. (2017). Integrating production scheduling and vehicle routing decisions at the operational decision level: a review and discussion. *Computers & Industrial Engineering*, 104, 224-245.

- Mula, J., Peidro, D., Díaz-Madroñero, M., & Vicens, E. (2010). Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research*, 204(3), 377-390.
- Noroozi, A., Mazdeh, M. M., Heydari, M., & Rasti-Barzoki, M. (2018). Coordinating order acceptance and integrated production-distribution scheduling with batch delivery considering Third Party Logistics distribution. *Journal of manufacturing systems*, 46, 29-45.
- Pundoor, G., & Chen, Z. L. (2005). Scheduling a production–distribution system to optimize the tradeoff between delivery tardiness and distribution cost. *Naval Research Logistics (NRL)*, 52(6), 571-589.
- Rahimi, S., Abdollahpouri, A., & Moradi, P. (2018). A multi-objective particle swarm optimization algorithm for community detection in complex networks. *Swarm and Evolutionary Computation*, 39, 297-309.
- Rasti-Barzoki, M., & Hejazi, S. R. (2015). Pseudo-polynomial dynamic programming for an integrated due date assignment, resource allocation, production, and distribution scheduling model in supply chain scheduling. *Applied Mathematical Modelling*, 39(12), 3280-3289.
- Sadeghi Moghadam, M.R., Momeni, M., Nalchiger, S. (2010). Integrated Supply Chain Planning, Production and Distribution Using Genetic Algorithm. *Journal of Industrial Management*, 1 (2), 71-88. (in Persian)
- Schott, J. R. (1995). *Fault Tolerant Design Using Single and Multicriteria Genetic Algorithm Optimization* (No. AFIT/CI/CIA-95-039). Air Force Inst of Tech Wright-Patterson Afb Oh.
- Seifi, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2008). A new bi-objective model for a multi-mode resource-constrained project scheduling problem with discounted cash flows and four payment models. *International Journal of Engineering*, 21(4), 347-360.
- Shahbandarzadeh, H., Najmi, M.H., Ataiee, A. (2017). Provide a mathematical model based on the problem of routing a capacity vehicle with time windows for waste collection. *Journal of Industrial Management*, 9 (1), 147-166. (in Persian)
- Solomon, M. M. (1986). On the worst-case performance of some heuristics for the vehicle routing and scheduling problem with time window constraints. *Networks*, 16(2), 161-174.
- Sterna, M. (2011). A survey of scheduling problems with late work criteria. *Omega*, 39(2), 120-129.
- Tan, K. C., Lee, T. H., & Khor, E. F. (2002). Evolutionary algorithms for multi-objective optimization: Performance assessments and comparisons. *Artificial intelligence review*, 17(4), 251-290.
- Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2002). *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Wang, G., & Cheng, T. E. (2000). Parallel machine scheduling with batch delivery costs. *International Journal of Production Economics*, 68(2), 177-183.

- Wang, H., & Lee, C. Y. (2005). Production and transport logistics scheduling with two transport mode choices. *Naval Research Logistics (NRL)*, 52(8), 796-809
- Xiang, W., & Lee, H. P. (2008, June). Ant colony intelligence in agent coordination for dynamic manufacturing scheduling. *In 2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation* (pp. 3527-3532). IEEE.
- Yin, Y., Cheng, T. C. E., Cheng, S. R., & Wu, C. C. (2013). Single-machine batch delivery scheduling with an assignable common due date and controllable processing times. *Computers & Industrial Engineering*, 65(4), 652-662
- Zarei, H., & Rasti-Barzoki, M. (2018). Mathematical programming and three metaheuristic algorithms for a bi-objective supply chain scheduling problem. *Neural Computing and Applications*, 1-21.
- Zhong, X. and Jiang, D. (2015). Parallel machine scheduling with batch delivery to two buyers. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Zitzler, E., Deb, K., & Thiele, L. (2000). Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. *Evolutionary computation*, 8(2), 173-195.