Journal of Business Administration Research
Original Research Article/ Vol. 13, No. 26, Autumn and Winter 2021

Designing a food supply chain network based on customer satisfaction under uncertainty

Hossein Ali Hassanpour[1]**,** Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hussein University, Tehran, Iran
Mohammad Reza Taheri, PhD Student of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hussein University, Tehran, Iran
Faramarz Mikaeli, Expert in Food Science, Logistics and Supply Chain Studies Center, Tehran, Iran

Received: 09-04-2020 Accepted: 07-04-2021

Introduction: In today's world economy, companies must focus all their activities and capabilities on customer satisfaction because customers are the only source of return on investment. Besides, customer satisfaction in supplying and distributing short-lived commodities especially food, due to their special and perishable properties, has doubled the importance of the issue. When a vehicle carries the demand of a number of customers in one shipment, due to the long travel time and the frequent opening of the refrigerator door, the quality of the remaining products in the vehicle decreases and, as a result, the satisfaction of customers reduces. The main purpose of this article is to maximize customer satisfaction in the food supply chain network. The study integrates the decisions of the different parts of a food supply chain under uncertainty. The first part includes food suppliers. Because the studied supply chain is multi-commodity, one supplier is not able to supply all the food. Therefore, it can supply part of the customer needs according to its conditions and expertise. The second part includes the heterogeneous transport fleet, which serves as a VRP problem. Thus, a vehicle can receive food from a supplier and deliver it to customers located in different geographical locations. In addition, the preparation time of vehicles is also considered as a constraint. The transport fleet consists of several refrigerated vehicles with different carrying capacities and speeds. Since one vehicle is not able to carry all the orders, each product, according to the required temperature and storage conditions, must be transported by vehicles specific to that product. Also, due to weather and traffic conditions, the vehicle travel time is not definite. So, in this study, the uncertainty of vehicle travel time (triangular fuzzy) is taken into account too. The third part of this supply chain includes end users, whose geographical location and the amount of demand of each is definite and specific. There is a time window like (x,y) for each user. If the orders are delivered to the customer before time x, it will cause earliness. If it is delivered after time y, it will cause tardiness. The objectives of this study are minimizing the sum of tardiness and earliness of deliveries to customers and maximizing the quality of products delivered to them.
Methodology: A mathematical model of the problem is presented, and the augmented ε constraint method is used to solve the model. It has been shown that the exact solution method cannot solve large-scale problems within a reasonable time. Therefore, meta-heuristic algorithms should be used. This research has presented the MOTTH meta-heuristic algorithm, which is a new development of the genetic

[1]. Corresponding Author Email: hahassan@ihu.ac.ir

algorithm and is inspired by the long-standing human desire to travel throughout history. In this algorithm, the best solutions of the current generation replace the worst solutions of R generations, and, thus, the algorithm's premature convergence is prevented and more solutions are searched in the solution area.

Results and Discussion: As the mathematical model was solved through the augmented ε constraint method, the relationship between the two objective functions was explained. It was also shown that an increase in the quality of the products delivered to customers leads to a rise in the sum of the tardiness and earliness of deliveries to customers. Therefore, considering the importance of each of the objective functions, every company should establish a balance between the two objective functions.

For validation, the results of the NSGA-II and MOTTH algorithms were compared with those of the exact solution of the augmented ε constraint method. The results of the algorithms were also compared. It was shown that the MOTTH meta-heuristic algorithm performs better. For the mathematical modeling of this research and for solving the model, the resources available in the literature and the GAMS and MATLAB software programs were used respectively.

Conclusion: According to the results of this study, a practical suggestion for frozen food supply chain managers is to use the MOTTH algorithm. This algorithm offers better solutions than the NSGA-II algorithm, the sum of tardiness and earliness of deliveries to customers is less, and the quality of the products delivered to customers remains higher. Moreover, the use of frozen food trucks partitioned with separate doors and equipped with cooling systems is another practical suggestion of this research; if the door of a partition is opened and the products are emptied, the other products in the other partitions will not receive a heat shock and their quality does not decline.

Keywords: Perishable items, Supply chain, Meta-heuristic algorithm, Augmented ε constraint, Food.

.

نشریه علمی کاوشهای مدیریت بازرگانی
مقاله پژوهشی/ سال سیزدهم، شماره بیست و ششم، پاییز و زمستان ۱۴۰۰

طراحی شبکه زنجیره‌تأمین مواد غذایی مبتنی بر رضایتمندی مشتری در شرایط عدم قطعیت

حسینعلی حسن‌پور[۱]، استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران
سید محمدرضا طاهری، دانشجو دکتری گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران
فرامز میکائیلی، کارشناس علوم و صنایع غذایی، مرکز مطالعات و پژوهش‌های لجستیکی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۸

چکیده

در اقتصاد جهان امروز شرکت‌ها باید همه فعالیت‌ها و توانمندی‌های خود را متوجه رضایت مشتری کنند، زیرا مشتریان تنها منبع برگشت سرمایه هستند. از طرفی رضایتمندی مشتریان در شرکت‌های تهیه و توزیع کالاهایی با عمر کوتاه به خصوص مواد غذایی، به سبب خصوصیات ویژه و فاسد شدنی محصولات، اهمیت موضوع را دوچندان کرده است. از این رو هدف اصلی این مقاله بیشینه کردن رضایتمندی مشتریان در شبکه زنجیره تأمین مواد غذایی می‌باشد. لذا در این مقاله، مدل ریاضی جدیدی برای یکپارچه‌سازی تصمیمات تأمین و توزیع اقلام غذایی در شرایط عدم قطعیت (مدت زمان سفر وسیله نقلیه) توسعه داده شده است که اهداف آن، کمینه کردن مجموع زمان‌های زودکرد و دیرکرد تحویل سفارشات به مشتریان و بیشینه کردن کیفیت محصولات تحویلی به مشتریان است. مدل ریاضی چند هدفه ارائه داده شده در این مقاله، از نوع مسائل NP-hard است، بنابراین از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II و یک الگوریتم فراابتکاری دیگر به نام «سفر در طول تاریخ چند هدفی» (MOTTH) برای حل مدل استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی، نتایج این الگوریتم‌ها با نتایج حل دقیق روش محدودیت اپسیلون تقویت شده، مقایسه شده است. همچنین نتایج دو الگوریتم NSGA-II و MOTTH نیز با یکدیگر مقایسه شده است که نتایج مقایسات، نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم فراابتکاری MOTTH می‌باشد. برای مدل‌سازی ریاضی این تحقیق، از منابع موجود در ادبیات و برای حل مدل از دو نرم‌افزار GAMS و MATLAB استفاده شده است.

کلمات کلیدی: اقلام فاسدشدنی، زنجیره‌تأمین، فراابتکاری، محدودیت اپسیلون تقویت شده، مواد غذائی.

۱- نویسنده مسئول: hahassan@ihu.ac.ir

مقدمه

یکی از دغدغه‌هایی که مدیران شرکت‌های غذایی در زمینه تهیه و توزیع مواد غذایی با آن‌ها مواجه می‌باشند مربوط به کیفیت مواد غذایی تحویلی به مشتریان است. بدین صورت که هنگام بارگیری، حمل و تحویل مواد غذایی به مشتریان، به دلیل طولانی بودن مدت زمان حمل، تعداد دفعات و مدت زمان باز شدن درب یخچال، شوک دمایی به محصولات وارد می‌شود. تغییرات ناگهانی دما در زنجیره‌تأمین مواد غذایی می‌تواند منجر به کاهش کیفیت مواد غذایی و درنهایت کاهش رضایتمندی مشتریان نهایی و حتی هدررفت مواد غذایی شود. گزارش شده است که تقریباً یک سوم تولید جهانی مواد غذایی هرساله هدر می‌رود (گوستاوسون[1] و همکاران،۲۰۱۱). از این رو یکی از مشخصه‌های مهم مواد غذایی، کیفیت آن‌ها هنگام تحویل به مشتریان است که این کیفیت، به زمان حمل مواد غذایی تحویلی از تأمین‌کننده تا مصرف‌کننده، دمای مطلوب و میزان رطوبت مورد نیاز برای حمل آن‌ها بستگی دارد (سانگ و کو[2]،۲۰۱٦؛ ندویچ[3] و همکاران، ۲۰۱٦).

بنابراین زمانی که یک وسیله نقلیه تقاضای تعدادی از مشتریان را در یک محموله حمل می‌کند، به دلیل زمان حمل طولانی و باز شدن درب یخچال برای سرویس‌دهی به مشتریان، از کیفیت محصولات باقی‌مانده در وسیله نقلیه کاسته می‌شود (هسو[4] و همکاران،۲۰۰۷). از این رو، مسئله مورد بررسی در این تحقیق شامل یک زنجیره‌تأمین مواد غذایی سه بخشی است. بخش اول شامل تأمین‌کنندگان مواد غذایی است. از آنجا که این زنجیره‌تأمین چندکالایی بوده، یک تأمین‌کننده قادر به تأمین تمام مواد غذایی نمی‌باشد و متناسب با شرایط و تخصص خود می‌تواند بخشی از مایحتاج مصرف‌کننده نهایی را تأمین کند. بخش دوم شامل ناوگان حمل‌ونقل ناهمگن می‌باشد که همانند مسئله VRP[5] عمل می‌کند. بدین صورت که یک وسیله نقلیه می‌تواند مواد غذایی را از یک تأمین‌کننده دریافت کند و به مشتریان مستقر در نقاط جغرافیایی مختلف تحویل دهد. این کار باعث کاهش هزینه‌ها و استفاده کاراتر از وسایل نقلیه می‌گردد. علاوه بر این محدودیت زمان آماده‌سازی وسایل نقلیه نیز در نظر گرفته می‌شود. ناوگان حمل‌ونقل

1. Gustavsson
2. Song & Ko
3. Nedović
4. Hsu
5. Vehicle Routing Problem

شامل چندین وسیله نقلیه یخچال‌دار با ظرفیت حمل و سرعت متفاوت می‌باشد که برای جابه‌جایی مواد غذایی و تحویل آن‌ها به مشتری نهایی استفاده می‌شود. از آنجا که زنجیره‌تأمین چند محصولی می‌باشد، یک وسیله نقلیه قادر به حمل تمامی سفارشات نیست و هر محصول با توجه به دما و شرایط نگهداری باید توسط وسایل نقلیه مختص به آن محصول حمل شود. از طرفی به دلیل شرایط جوی و ترافیکی، زمان حمل محصولات قطعی نمی‌باشد، لذا در این پژوهش، عدم قطعیت زمان حمل (فازی مثلثی) نیز ملاحظه می‌شود.

در نهایت بخش سوم زنجیره‌تأمین شامل مصرف‌کنندگان نهایی می‌باشد که موقعیت جغرافیایی و میزان تقاضای هر یک از آن‌ها قطعی و مشخص است. برای هر مشتری یک پنجره زمانی تحویل به صورت (x,y) وجود دارد. اگر سفارشات قبل از زمان x به مشتری نهایی تحویل داده شود باعث زودکرد سفارشات و اگر بعد از زمان y تحویل داده شود باعث دیرکرد محصولات تحویلی می‌شود. این درحالی است که مدیران سعی در تحویل سفارشات بین دو زمان x و y دارند.

هدف اصلی این مقاله بیشینه کردن رضایتمندی مشتریان در شبکه زنجیره‌تأمین مواد غذایی است. رضایتمندی مشتریان به عوامل متعددی بستگی دارد که در این مقاله، کمینه کردن مجموع زمان‌های زودکرد و دیرکرد تحویل سفارشات و بیشینه کردن کیفیت محصولات تحویلی به مشتریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. این زنجیره‌تأمین در حوزه‌های نظامی و یا وزارت‌خانه‌ها و شرکت‌های دولتی و خصوصی کاربرد دارد.

مبانی نظری و پیشنه تحقیق

در این بخش نخست به مبانی نظری تحقیق پرداخته می‌شود و مفاهیمی نظیر زنجیره تأمین اقلام غذایی، توزیع محصولات فاسدشدنی و عدم قطعیت در زنجیره‌تأمین بیان می‌گردد. سپس به پیشینه تحقیق در این حوزه اشاره می‌شود.

زنجیره‌تأمین اقلام غذایی

زنجیره‌تأمین شامل مجموعه‌ای از تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان است که هدف واحد آن‌ها، برطرف کردن نیاز مشتری می‌باشد. یک زنجیره‌تأمین، تمامی سطوحی که موجب ایجاد ارزش افزوده در یک کالای تولیدی می‌شوند را مشخص

می‌کند (چانگ و لی[1]، ۲۰۰٤). در طول یک دهه گذشته، گسترش و به کارگیری مدل‌های تحقیقاتی در زمینه زنجیره‌تأمین صنایع غذایی، مورد توجه محققان زیادی بوده است. غذاهای تازه، میوه و سبزیجات و حتی کالایی مثل خون، به دلیل عمر کوتاه و فساد سریعشان بسیار حساس‌تر از سایر کالاها می‌باشند، چون برخلاف دیگر کالاها، کیفیت آن‌ها در طول زنجیره‌تأمین و مخصوصاً در سطوح پایین زنجیره به طور مداوم کاهش می‌یابد. همچنین قیمت محصول نیز به دلیل کاهش کیفیت در طول زمان، کاهش می‌یابد. پس با توجه به این واقعیت‌ها انتخاب یک زنجیره‌تأمین مناسب، یک فاکتور کلیدی برای موفقیت در بازار رقابتی امروز می‌باشد. بنابراین در زنجیره‌تأمین مواد غذایی بیشترین تمرکز بر روی کیفیت محصولات، کمینه کردن زمان بارگیری و بارگذاری محصولات و سطح خدمت‌دهی به مشتریان می‌باشد (موسوی و بزرگی، ۲۰۱۷).

توزیع محصولات فاسدشدنی

توزیع محصولات فاسد شدنی از توزیع محصولات دیگر متفاوت است. محصولات فاسد شدنی، دچار تغییرات کیفیت مداوم در طول زنجیره‌تأمین (در تمام راه تا مصرف نهایی) می‌شوند. مدت نگهداری محدود محصولات فاسد شدنی، الزامات مورد نیاز با توجه به دما، رطوبت و اثرات متقابل احتمالی بین محصولات، زمان محدود مورد نیاز برای حمل‌ونقل محصولات، انتظارات بالای مشتریان و حاشیه سود کم، مدیریت توزیع این محصولات را به یک موضوع چالش برانگیز تبدیل می‌کند (اکرمن[2] و همکاران، ۲۰۱۰). یکی از اهداف مهم در توزیع این‌گونه محصولات، توجه به کیفیت محصول می‌باشد تا زمانی که این محصول به دست مشتری (آخرین لایه زنجیره) برسد، که این موضوع تأثیر مستقیم بر پاسخگویی شبکه دارد. در تعیین کیفیت محصول و یا عمر مفید باقیمانده آن‌ها، درجه حرارت محیط، فاکتور اصلی می‌باشد که منجر به تخریب مواد غذایی می‌شود (لابوزا[3]، ۱۹۸۲). بنابراین کنترل کیفیت محصول در سراسر زنجیره‌تأمین، به تمرکز بر روی زمان و درجه حرارت نیاز دارد (اکرمن و همکاران، ۲۰۱۰).

[1]. Chang & Lee
[2]. Akkerman
[3]. Labuza

عدم قطعیت در زنجیره‌تأمین

امروزه عدم قطعیت یکی از مشکلات و چالش‌های بزرگ در مدیریت زنجیره‌تأمین می‌باشد که از دلایل پیدایش آن می‌توان به فقدان اطلاعات قطعی و دقیق و نیز پویایی و پیچیدگی اجزای زنجیره‌تأمین اشاره کرد. عدم قطعیت را می‌توان به عنوان اختلاف بین مقدار اطلاعات مورد نیاز برای اجرای یک کار و مقدار اطلاعاتی که واقعاً در دسترس می‌باشد تعریف کرد (پیدرو[1] و همکاران، ۲۰۰۹).

در فرآیندهای تصمیم برنامه‌ریزی زنجیره‌تأمین، عدم قطعیت عامل مهمی است که می‌تواند روی کارایی و اثربخشی زنجیره‌های تأمین اثرگذار باشد. پیدرو و همکاران (۲۰۱۰) عدم قطعیت برنامه‌ریزی زنجیره‌تأمین را به ۵ دسته طبقه‌بندی می‌کنند: مدیریت موجودی زنجیره‌تأمین، انتخاب فروشنده، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، برنامه‌ریزی تولید و توزیع، برنامه‌ریزی تأمین-تولید-توزیع.

تأخیر در تحویل یکی از رایج‌ترین مشکلات در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل می‌باشد که این امر در زنجیره‌تأمین مواد غذایی امری مهم می‌باشد. در سال ۱۹۹۸ یک نظرسنجی تکمیلی نشان داد که حدود یک چهارم از مراحل سفر در زنجیره‌تأمین غذا، تأخیرهای قابل توجهی به علل مختلف نظیر مشکل در تحویل به یک نقطه، تراکم ترافیک، اقدامات داخلی شرکت، مشکل در نقطه جمع‌آوری، خرابی تجهیزات و نبود راننده داشتند (پیدرو و همکاران، ۲۰۱۰). با توجه به عوامل بالا نمی‌توان داده کمّی تاریخی برای مدت زمان سفر متصور شد. از این رو، این تحقیق مدت زمان سفر را فازی درنظر می‌گیرد.

پیشینه پژوهش

تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه طراحی شبکه تأمین-توزیع در زنجیره تأمین اقلام غذایی منجمد در شرایط عدم قطعیت انجام شده است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

قاره و اسکرادر[2](۱۹۶۳) اولین کسانی بودند که مدل موجودی را برای کالاهای فسادپذیر بررسی کردند. تارانتیلیس و کرانودیس[3](۲۰۰۱) مسئله مسیریابی وسایل نقلیه ناهمگن را برای بدست آوردن زمانبندی حرکت وسایل نقلیه برای توزیع شیر تازه

[1]. Peidro
[2]. Ghare & Schrader
[3]. Tarantilis & Kiranoudis

حل کرده‌اند. آنان الگوریتم مبتنی بر آستانه پذیرش را برای هدف برآورده ساختن نیازهای یک شرکت توسعه داده‌اند. همچنین آنان در سال ۲۰۰۲ در مقاله‌ای دیگر به مسئله مسیریابی وسایل نقلیه برای توزیع گوشت تازه از انبارها به مشتریان مختلف واقع در یک ناحیه در شهر آتن پرداخته‌اند. آنان یک الگوریتم فراابتکاری احتمالی برای حل مسئله ارائه داده‌اند (تارانتیلیس و کرانودیس،۲۰۰۲).

بلنگیور[1] و همکاران (۲۰۰۵) به ارائه یک برنامه کامپیوتری برای مسیریابی وسایل نقلیه در یک شرکت تأمین گوشت در کشور اسپانیا پرداخته‌اند. آنان محدودیت پنجره زمانی تحویل را در نظر گرفتند و برای حل مسئله از الگوریتم‌های ابتکاری استفاده کرده‌اند. اوسوالد و استریم[2](۲۰۰۸) یک الگوریتم برای توزیع سبزیجات تازه ارائه داده‌اند که ویژگی فسادپذیری عامل مهم محصولات آن‌هاست. آنان همچنین محدودیت‌هایی نظیر پنجره زمانی تحویل و فاصله زمانی حمل بین دو نقطه جغرافیایی را نیز درنظر گرفته‌اند. وانگ و یو[3](۲۰۱۲) یک مدل بهینه‌سازی را برای مسئله توزیع مواد غذایی سرد با پنجره زمانی تحویل با استفاده از انواع مختلف حمل‌ونقل ارائه داده‌اند. علاوه بر این ایجاد یک مرکز توزیع نیز مورد توجه قرار گرفت. اهداف آنان کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های تأسیس مرکز توزیع، هزینه‌های جریمه و خسارات است. لی و وانگ[4] (۲۰۱۳) مدل ریاضی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در زنجیره سرد لبنیاتی با تقاضای تصادفی و پنجره زمانی تحویل را ارائه داده‌اند و با استفاده از الگوریتم اسکن – درج[5] آن را حل کردند، بدین صورت که ابتدا با توجه به ظرفیت وسایل نقلیه و پنجره زمانی تحویل، مشتریان به چند دسته تقسیم می‌شوند. سپس برای هر دسته از مشتریان یک مسیر برای تحویل کالا تولید می‌گردد.

لی[6] و همکاران(۲۰۱۳) به ارائه یک الگوریتم ترکیبی برای حل توزیع مواد غذایی فاسد شدنی با توجه به پنجره زمانی و وابسته به زمان پرداخته‌اند. هدف مسئله آنان کاهش هزینه‌های ثابت و متغیر وسایل نقلیه، هزینه‌های موجودی و هزینه‌های انرژی بوده است. مقاله وانگ و سون[7](۲۰۱۵) به برنامه‌ریزی و انتخاب یک مدل بهینه‌سازی برای

---

1. Belenguer
2. Osvald & Stirn
3. Wang & Yu
4. Li & Wang
5. Scanning-Insert
6. Li
7. Wang & Sun

توزیع و مسیریابی اقلام سرد با تقاضای متغیر مشتری می‌پردازد. هدف مورد نظر آنان، کمینه سازی تمام هزینه‌های توزیع با ملاحظات پنجره زمانی می‌باشد. مسیریابی توزیع توسط الگوریتم صرفه‌جوئی[۱] بهینه‌سازی شده و در نهایت به مقایسه مسیرهای بهینه در حالت مدل توزیع احتمالی (تقاضای احتمالی) و مدل توزیع قطعی پرداختند. لسماواتی[۲] و همکاران(۲۰۱٦) الگوریتم ژنتیکی برای بهینه‌سازی مسئله توزیع مواد غذایی منجمد در زنجیره سرد ارائه دادند که هدف آن‌ها کاهش هزینه‌های حمل می‌باشد که این هزینه‌ها شامل هزینه‌های رفت وسایل نقلیه بارگذاری شده برای سرویس‌دهی به مشتریان و هزینه برگشت وسایل نقلیه خالی به کارخانه می‌باشد. سانگ و کو (۲۰۱٦) به مطالعه مسئله مسیریابی خودروهای یخچال‌دار و عمومی برای تحویل چند نوع کالای خوراکی فاسد شدنی پرداخته‌اند. فرضیاتی نظیر مکان جغرافیایی و میزان تقاضای مشتریان، ظرفیت حمل وسایل نقلیه، حداکثر زمان تحویل سفارشات و تعداد وسایل نقلیه یخچال‌دار و عمومی در مسئله آنان مشخص می‌باشد. تابع هدف مسئله آن‌ها بیشینه کردن سطح کل رضایت مشتری که وابسته به تازگی مواد غذایی است، می‌باشد و برای حل آن یک مدل ریاضی غیر خطی و الگوریتم ابتکاری ارائه شده است. وانگ[۳] و همکاران (۲۰۱۷) در مقاله خود به بررسی بهینه‌سازی مسئله مسیریابی خودرو با پنجره‌های زمانی برای لجستیک زنجیره سرد بر اساس مالیات بر انتشار کربن در چین پرداختند. هدف آنان کمینه کردن هزینه‌های ثابت وسایل نقلیه، هزینه‌های حمل-ونقل، خسارت‌ها، هزینه‌های یخچال، جریمه‌ها، هزینه‌های کمبود و هزینه‌های انتشار کربن می‌باشد. آنان الگوریتم ژنتیک تکاملی چرخه را برای حل مدل پیشنهاد کردند. سیرایت[٤] و همکاران (۲۰۱۷) مدل ریاضی چند هدفه برای مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با چند انبار مرکزی با پنجره زمانی تحویل ارائه دادند، که هدف آنان کمینه کردن هزینه کل که شامل هزینه ثابت وسایل نقلیه و هزینه سوخت آن‌ها به علاوه هزینه دستمزد راننده و بیشینه کردن سطح رضایت مشتری است که به کیفیت محصولات غذایی تحویلی بستگی دارد. لیو[٥] و همکاران (۲۰۱۸) به تجزیه و تحلیل ظرفیت توزیع در ترمینال‌های منطقه‌ای در شهرهای چین، با توجه به سه صنعت تجارت الکترونیک،

[1].Saving Algorithm
[2]. Lesmawati
[3]. Wang
[4]. Sirait
[5]. Liu

سوپر مارکت‌ها و صنایع غذایی و آشامیدنی پرداختند. برای این منظور نویسندگان به مطالعه مشکلات یک ترمینال و یک گره توزیع مشترک می‌پردازند. آنان طرح‌های توزیع مختلفی را مورد مطالعه قرار داده و با استفاده از مدلسازی ریاضی و تحلیل محدودیت پنجره زمانی به حل آن پرداختند. جوشی[1] و همکاران (۲۰۱۸) به مطالعه تأثیر زنجیره سرد و تنوع محصولات بر خواص کیفی قارچ‌های اصلاح شده و بسته‌بندی شده در سرتاسر مرحله توزیع با استفاده از مدل ریاضی پرداختند. همچنین تحلیل حساسیت به منظور آنالیز اثر پارامترهای مختلف بر کیفیت قارچ انجام شد. کارسون و ایست[2](۲۰۱۸) به مطالعه وضعیت زنجیره سرد در صادرات کشور نیوزلند پرداختند. برای این منظور آنان چهار صنعت لبنیاتی، گوشت قرمز، باغبانی و غذاهای دریایی را انتخاب کردند. هدف آنان بهبود کارایی انرژی در فرآیند یخچالی بوده است.

اندراها[3] و همکاران (۲۰۱۹) به ارزیابی شرایط دمایی مواد غذایی منجمد در طی حمل و تحویل آن‌ها به مشتریان نهایی در کشور تایوان پرداختند. برای این منظور مشخصات دمای محصولات در حین حمل ثبت شده و میزان تخمین عمر باقیمانده محصولات تحت سناریوهای مختلف با استفاده از الگوریتم مونت کارلو با ۱۰۰۰۰ تکرار بدست آمده است. نتایج بررسی آنان نشان داد که انحراف از دمای مطلوب نگهداری میگو منجمد می‌تواند میزان عمر باقیمانده این محصول را بیش از ۷۰٪ کاهش دهد. بررسی سناریوهای مختلف نشان داد که بهترین دما برای حفظ بهینه طول عمر میگوی منجمد $-18\pm3^{\circ}C$ می‌باشد. قمی اویلی[4] و همکاران (۲۰۱۹) مدل چندهدفه‌ای از شبکه زنجیره تأمین با تقاضای وابسته به قیمت و کمبود و اختلال تصادفی در لجستیک معکوس را ارائه دادند. این شبکه شامل پنج سطح تولیدکننده، تأمین‌کننده، مراکز بازرسی، مراکز پخش و بازار می‌باشد. تقاضای مشتری بر اساس دو رفتار خطی و نمایی شبیه‌سازی شده است. اهداف مسئله عبارت است از: افزایش درآمد، کاهش زمان رسیدن کالا به مشتریان و کاهش مشتریان از دست رفته. محب علیزاده و همکاران (۲۰۲۰) به مدلسازی زنجیره‌تأمین اقلام غذایی چند محصولی، چند دوره‌ای و چندسطحی با در نظر گرفتن ملاحظات محیط زیستی پرداختند. اهداف مورد بررسی آنان کاهش هزینه‌ها، کاهش انتشار آلاینده‌ها و افزایش ظرفیت تسهیلات می‌باشد و از رویکرد محدودیت

1. Joshi
2. Carson & East
3. Ndraha
4. Ghomi-Avili

اپسیلون تقویت‌شده برای حل مدل استفاده کردند. همچنین از درخت تصمیم برای عدم قطعیت مدل بهره برده شده است.

بابایی و همکاران (۱۳۹۳) مسئله مسیریابی وسایل نقلیه ناهمگن با چند جایگاه پخش، همراه با محدودیت بازه‌های زمانی مختص به کالاهای فاسدشدنی را بررسی کرده‌اند. هدف مسئله، کمینه‌سازی مجموع زمان مورد نیاز جهت سرویس‌دهی کل به مشتریان، متناسب با هزینه کل است و برای حل تقریبی مسئله، الگوریتم فراابتکاری مورچگان بیشینه-کمینه ارائه کرده‌اند. وکیلی و همکاران (۱۳۹۶) مسئله مسیریابی موجودی قطعی اقلام دارویی زنجیره‌تأمین دارو را متشکل از یک توزیع‌کننده و مجموعه‌ای از خرده‌فروشان مورد بررسی قرار دادند. مدل عدد صحیح مختلط خطی با هدف کمینه کردن مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل و نگهداری موجودی ارائه شده و برای حل آن از روش ابتکاری مبتنی بر جستجوی همسایگی بزرگ انطباقی استفاده کردند. عمار فیضی (۱۳۹۷) یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی روغن خام خوراکی برای نحوه توزیع روغن خام خوراکی از دو بندر امام خمینی و بندرعباس با محدودیت‌های بودجه‌ای، زمانی (پنجره زمانی) و وجود سه شرکت حمل‌ونقل ارائه داده است. هدف از ارائه این مدل، کمینه‌سازی هزینه‌های توزیع و ذخیره‌سازی روغن خام خوراکی است. احمدی و عبدالله‌زاده (۱۳۹۸) مدل ریاضی یکپارچه تولید- توزیع با انبارهای میانی و سیستم‌های حمل‌ونقل متنوع در زنجیره‌تأمین چنددوره‌ای برای کالاهای فسادپذیر ارائه دادند. تابع هدف مدل پیشنهادی تک‌هدفه بوده و هزینه‌های زنجیره‌تأمین به صورت یکپارچه حداقل می‌شود. مدل پیشنهادی آنان غیرخطی بوده و از الگوریتم ژنتیک برای حل مدل استفاده شده است.

مرور ادبیات نشان می‌دهد که تقریباً هیچ تحقیقی همزمان به اهداف کمینه سازی مجموع زمان‌های زودکرد و دیرکرد تحویل محصولات به مشتریان و بیشینه سازی کیفیت محصولات تحویلی نپرداخته است. از طرفی این پژهش شرایط واقعی یک شبکه زنجیره‌تأمین و توزیع اقلام غذایی نظیر عدم قطعیت در مدت زمان سفر، محدودیت راه‌اندازی وسایل نقلیه، عدم توانایی یک تأمین‌کننده در تأمین تمامی محصولات و عدم توانایی یک وسیله نقلیه در حمل تمامی محصولات را در نظر می‌گیرد که بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید. از این رو نوآوری‌های این پژوهش عبارتند از:

- ارائه مدل ریاضی شبکه زنجیره‌تأمین و توزیع اقلام غذایی که به طور همزمان میزان زودکرد و دیرکرد تحویل محصولات به مشتریان کمینه و کیفیت محصولات تحویلی بیشینه شود.
- استفاده از رویکرد حل دقیق محدودیت اپسیلون تقویت شده برای حل مسئله در ابعاد کوچک.
- استفاده از الگوریتم فراابتکاری TTH با مرتب سازی نامغلوب به نام MOTTH[1] برای حل مسئله در ابعاد بزرگ.

روش‌شناسی تحقیق

از آنجا که تحقیق حاضر یکی از مباحث مهم و ضروری در حوزه زنجیره‌تأمین مواد غذایی و مورد نیاز در صنعت نظامی کشور، با هدف برطرف کردن نیازهای مشتریان در زمان معلوم و با حداکثر کیفیت می‌باشد، از نوع تحقیقات کاربردی (کمی) است. اطلاعات مورد نیاز این پژوهش از طریق مطالعات کتابخانه‌ای (بررسی کتب و اسناد و پایان‌نامه‌ها و مقالات موجود) و نظرات کارشناسان امر و کسانی که به طور مستقیم با زنجیره‌تأمین اقلام غذایی منجمد در ارتباط هستند بدست آمد و با قراردادن مدل سانگ و کو (۲۰۱۶) و مدل طاهری و بهشتی‌نیا (۲۰۱۹) به عنوان مبنای کار، طراحی مدل تحقیق جاری انجام شد. همچنین از نرم‌افزارهای GAMS برای حل دقیق و MATLAB برای حل فراابتکاری مدل استفاده شد.

مفروضات مدل

۱- تعداد N سفارش متشکل از NR محصول وجود دارد که باید از NS تأمین‌کننده خریداری گردد. هر تأمین‌کننده، توانایی تهیه تمامی سفارشات را ندارد.

۲- این N سفارش خریداری شده باید توسط NV وسیله نقلیه به مشتریان تحویل داده شود. این وسایل نقلیه ناهمگن هستند بدین معنی که میانگین سرعت و ظرفیت حمل آن‌ها متفاوت بوده و میزان نرخ کاهش کیفیت محصولات در آن‌ها به ازای هر واحد مسافت پیموده شده و یا باز شدن درب یخچال با توجه به ویژگی‌های آن‌ها (از لحاظ کیفیت یخچال، عایق‌بندی و ...) با یکدیگر متفاوت است. همچنین یک وسیله نقلیه قادر به حمل تمامی محصولات نمی‌باشد.

[1]. Multi Objective Time Travel to History

۳- به منظور استفاده بهینه از ناوگان حمل‌ونقل، اشتراک وسایل نقلیه بین مشتریان مجاز می‌باشد. بدان معنا که هر وسیله نقلیه می‌تواند سفارشات چند مشتری را در یک محموله بارگیری کرده و به آن‌ها تحویل دهد. علاوه بر این، هر وسیله نقلیه پس از تحویل محموله به مشتریان، از مسئله حذف نشده و می‌تواند دوباره مورد استفاده قرار گیرد.

٤- هر وسیله نقلیه دارای یک زمان آماده‌سازی است که بعد از این زمان در دسترس خواهد بود. برای مثال یک وسیله نقلیه ممکن است به علت خرابی از لحظه صفر قابل استفاده نباشد.

٥- هر یک از وسایل نقلیه در ابتدای زمانبندی در یک محل مستقر هستند.

٦- برای تحویل اقلام غذایی به مشتریان، ملاحظات ترافیکی و شرایط جوی راه‌ها نیز در نظر گرفته شده است. از این رو زمان حمل محصولات قطعی نمی‌باشد. از آنجا که

$$\text{مدت زمان حمل محصولات} = \frac{\text{فاصله دو نقطه از هم}}{\text{میانگین سرعت وسیله نقلیه}}$$

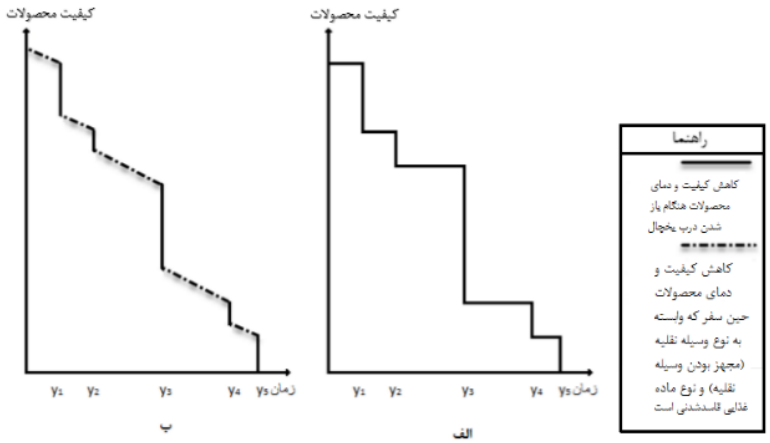
و چون فاصله دو نقطه از هم یک عدد ثابت است، میانگین سرعت وسیله نقلیه دارای عدم قطعیت می‌باشد و این عدم قطعیت به صورت فازی مثلثی درنظر گرفته می‌شود.

۷- کمبود کالا جایز نیست.

۸- برنامه‌ریزی تأمین-توزیع در زنجیره‌تأمین اقلام غذایی برای دوره‌های مختلف صورت می‌گیرد.

۹- کیفیت محصولات به مدت زمان حمل مواد غذایی، تعداد دفعات باز شدن درب یخچال برای سرویس‌دهی به مشتریان و مدت زمان باز بودن آن بستگی دارد (شکل ۱).

شکل ۱-الف- موقعیتی را نشان می‌دهد که زمانی که درب یخچال برای سرویس‌دهی به مشتریان باز می‌شود از کیفیت مواد غذایی باقی‌مانده در وسیله نقلیه کاسته می‌شود و در طول مدت حمل، کیفیت آن کاهش نمی‌یابد. ولی شکل ۱-ب- علاوه بر کاهش میزان کیفیت محصولات هنگام باز شدن درب یخچال، کیفیت مواد غذایی در مدت زمان حمل نیز با شیب مشخصی کاهش می‌یابد و این کاهش کیفیت به نوع وسیله نقلیه و ماده غذایی بستگی دارد. رویکرد کاهش کیفیت محصولات در این مقاله همانند شکل ۱-ب- می‌باشد.



شکل ۱- میزان کاهش کیفیت محصولات با توجه به مدت زمان حمل و باز بودن درب یخچال

مدل ریاضی مسئله

در این بخش مدل عدد صحیح مختلط مسئله ارائه می‌گردد. با قرار دادن مدل ریاضی سانگ و کو (۲۰۱۶) و طاهری و بهشتی‌نیا (۲۰۱۹) به عنوان مبنای کار، طراحی مدل انجام شد.

اندیس‌ها

تعداد مشتریان	NC	تعداد تأمین‌کنندگان	NS
تعداد وسایل نقلیه	NV	تعداد انواع محصولات	NR
مشتریان	i,j	تأمین‌کنندگان	s
وسایل نقلیه	v	محصولات	r
دوره برنامه‌ریزی	t	محموله	b
اولویت حمل سفارشات در یک محموله			p

پارامترها

میزان فضای اشغال شده توسط یک واحد از محصول نوع r	$Size^r$
ظرفیت وسیله نقلیه vام	Cap_v
زمان اولیه راه‌اندازی وسایل نقلیه در دوره tام	$VehInAv_v^t$
میانگین سرعت وسیله نقلیه v (فازی)	$\widetilde{VS}_v$

فاصله بین ترمینال تا تأمین‌کننده sام	$TDIS_s$
فاصله بین تأمین‌کننده s تا مشتری i	$SDIS_{si}$
فاصله بین مشتری i و j	DIS_{ij}
حد بالای پنجره زمانی تحویل محصول rام به مشتری iام در دوره tام	$Udue_i^{rt}$
حد پایین پنجره زمانی تحویل محصول rام به مشتری iام در دوره tام	$Ldue_i^{rt}$
حداکثر رضایتمندی برای محصول rام	SAT^r
نرخ کاهش سطح رضایتمندی برای هر واحد از محصول rام وقتی که وسیله نقلیه vام محصول rام را حمل می‌کند (به ازای واحد مسافت).	RED_v^r
نرخ کاهش سطح رضایتمندی برای هر واحد از محصول rام وقتی که درب یخچال وسیله نقلیه vام برای تحویل محصول rام باز می‌شود (به ازای واحد زمان).	O_v^r
مدت زمان باز بودن درب یخچال برای تخلیه یک واحد از محصول نوع rام	$Time^r$
ظرفیت عرضه کالای rام در تأمین‌کننده sام در دوره tام	SU_s^{rt}
میزان تقاضای مشتری iام برای کالای rام در دوره tام	D_i^{rt}
یک ماتریس با ابعاد $NR\times NS$، اگر $G(r,s)$ برابر یک باشد به معنای توانایی تأمین‌کننده s در تأمین کالای r است و بالعکس.	G
یک ماتریس با ابعاد $NR\times NV$، اگر $N(r,v)$ برابر یک باشد به معنای توانایی وسیله نقلیه v در حمل کالای r است و بالعکس.	N
یک عدد بسیار بزرگ مثبت	M

متغیرهای تصمیم

میزان دیرکرد در تحویل محصول rام به مشتری iام در دوره tام	$Tardiness_i^{rt}$
میزان زودکرد در تحویل محصول rام به مشتری iام در دوره tام	$Earliness_i^{rt}$

H_i^{rt} اگر مشتری iام در دوره tام برای محصول rام تقاضا داشته باشد برابر ۱ در غیراین صورت برابر ۰ است.

X_{si}^{rt} اگر تأمین‌کننده sام تقاضای محصول rام از مشتری iام در دوره tام را برآورد کند برابر ۱ در غیراین صورت برابر ۰ است.

T_{vbip}^{rt} اگر سفارش rام مشتری iام در اولویت حمل pام در محموله bام وسیله نقلیه vام در دوره tام قرار بگیرد برابر ۱ در غیر این صورت برابر ۰ است.

$Load_{ibv}^{rt}$ زمان بارگیری وسیله نقلیه vام برای حمل محموله bام از سفارش کالای rام مشتری iام در دوره tام

$Delivery_i^{rt}$ زمان تحویل محصول نوع rام به مشتری iام در دوره tام

ICS_{iv}^{r} سطح رضایتمندی مشتری iام وقتی که وسیله نقلیه vام محصول نوع rام را تحویل می‌دهد.

PU_s^{rt} میزان خرید محصول rام نزد تأمین‌کننده sام در دوره tام

مدل ریاضی این تحقیق عبارت است از:

$$Minz_1 \quad \sum_t \sum_i \sum_r Tardiness_i^{rt} + \sum_t \sum_i \sum_r Earliness_i^{rt} \quad (۱)$$

$$Max \quad z_2 = \sum_t \sum_i \sum_v \sum_r \sum_b \sum_p TICS_{vbip}^{rt} \quad (۲)$$

$$D_i^{rt} \geq H_i^{rt} \qquad \forall\, i.r.t \quad (۳)$$

$$D_i^{rt} \leq M \times H_i^{rt} \qquad \forall\, i.r.t \quad (٤)$$

$$\sum_s X_{si}^{rt} = H_i^{rt} \qquad \forall\, i.r.t \quad (٥)$$

$$\sum_v \sum_b \sum_p T_{vbip}^{rt} = H_i^{rt} \qquad \forall\, i.r.t \quad (٦)$$

$$\sum_i T_{vbip}^{rt} \leq 1 \qquad \forall\, v.b.p.t.r \quad (٧)$$

$$\sum_i T_{v(b+1)i1}^{rt} \leq \sum_i T_{vbi1}^{rt} \qquad \forall\, v.b.t.r \quad (٨)$$

$$\sum_{i} T_{vbi(p+1)}^{rt} \leq \sum_{i} T_{vbip}^{rt} \qquad \forall\, v.b.p.t.r \qquad (۹)$$

$$\sum_{i}\sum_{p} Size^{r} \times D_{i}^{rt} \times T_{vbip}^{rt} \leq Cap_{v} \qquad \forall\, r.v.b.t \qquad (۱۰)$$

$$Load_{i1v}^{rt} \geq VehInAv_{v}^{t} + \frac{TDIS_{s}}{\widetilde{VS}_{v}} - M(2 - T_{v1i1}^{rt} - X_{si}^{rt}) \qquad \forall\, r.i.v.s.t \qquad (۱۱)$$

$$Load_{ibv}^{rt} \geq TDelivery_{v(b-1)jp}^{rt} + \frac{SDIS_{sj}}{\widetilde{VS}_{v}} \times T_{v(b-1)jp}^{rt} - M(3 - T_{vbi1}^{rt} - T_{v(b-1)jp}^{rt} - X_{si}^{rt}) \qquad \forall\, i \neq j.r.v.\ b \neq 1.s.p.t \qquad (۱۲)$$

$$Delivery_{i}^{rt} \geq Load_{ibv}^{rt} + \frac{SDIS_{si}}{\widetilde{VS}_{v}} - M(2 - T_{vbi1}^{rt} - X_{si}^{rt}) \qquad \forall\, r.i.b.v.s.t \qquad (۱۳)$$

$$Delivery_{i}^{rt} \geq TDelivery_{vbj(p-1)}^{rt} + \frac{DIS_{ij}}{\widetilde{VS}_{v}} \times T_{vbj(p-1)}^{rt} - M(2 - T_{vbip}^{rt} - T_{vbj(p-1)}^{rt}) \qquad \forall\, i \neq j\ .r.v.b.\ p \neq 1.t \qquad (۱٤)$$

$$ICS_{iv}^{r} \leq SAT^{r} - \frac{SDIS_{si}}{\widetilde{VS}_{v}} \times RED_{v}^{r} \times TX_{svbi1}^{rt} - Time^{r} \times O_{v}^{r} \times D_{i}^{rt} \times T_{vbi1}^{rt} \qquad \forall\, i.r.v.b.s.t \qquad (۱۵)$$

$$ICS_{jv}^{r} \leq TICS_{vbi(p-1)}^{rt} - \frac{DIS_{ij}}{\widetilde{VS}_{v}} \times RED_{v}^{r} \times T_{vbi(p-1)}^{rt} - Time^{r} \times O_{v}^{r} \times D_{j}^{rt} \times T_{vbjp}^{rt} + M(2 - T_{vbjp}^{rt} - T_{vbi(p-1)}^{rt}) \qquad \forall i \neq j.v.b.r.\ p \neq 1.t \qquad (۱٦)$$

$$Tardiness_{i}^{rt} \geq Delivery_{i}^{rt} - Udue_{i}^{rt} \qquad \forall\, r.t.i \qquad (۱۷)$$

$$Earliness_i^{rt} \geq Ldue_i^{rt} - Delivery_i^{rt} \qquad \forall r.t.i \qquad (۱۸)$$

$$PU_s^{rt} = \sum_i D_i^{rt} \times X_{si}^{rt} \qquad \forall s.r.t \qquad (۱۹)$$

$$PU_s^{rt} \leq SU_s^{rt} \qquad \forall s.r.t \qquad (۲۰)$$

$$X_{si}^{rt} = 0 \qquad \forall r.t.s.i|\ G(r.s) = 0 \qquad (۲۱)$$

$$T_{vbip}^{rt} = 0 \qquad \forall r.t.v.b.i.p \mid N(r.v) = 0 \qquad (۲۲)$$

$$TICS_{vbip}^{rt} \leq M \times T_{vbip}^{rt} \qquad \forall r.t.v.b.i.p \qquad (۲۳)$$

$$TICS_{vbip}^{rt} \leq ICS_{iv}^{r} \qquad \forall r.t.v.b.i.p \qquad (۲۴)$$

$$TICS_{vbip}^{rt} \geq ICS_{iv}^{r} - M \times (1 - T_{vbip}^{rt}) \qquad \forall r.t.v.b.i.p \qquad (۲۵)$$

$$2 \times TX_{svbip}^{rt} \leq T_{vbip}^{rt} + X_{si}^{rt} \qquad \forall r.t.s.v.b.i.p \qquad (۲۶)$$

$$TX_{svbip}^{rt} \geq T_{vbip}^{rt} + X_{si}^{rt} - 1 \qquad \forall r.t.s.v.b.i.p \qquad (۲۷)$$

$$TDelivery_{vbip}^{rt} \leq M \times T_{vbip}^{rt} \qquad \forall r.t.v.b.i.p \qquad (۲۹)$$

$$TDelivery_{vbip}^{rt} \leq Delivery_i^{rt} \qquad \forall r.t.v.b.i.p \qquad (۳۰)$$

$$TDelivery_{vbip}^{rt} \geq Delivery_i^{rt} - M \times (1 - T_{vbip}^{rt}) \qquad \forall r.t.v.b.i.p \qquad (۳۱)$$

$$Load_{ibv}^{rt} \geq 0 \quad Delivery_i^{rt} \geq 0 \quad ICS_{iv}^{r} \geq 0 \quad PU_s^{rt} \geq 0 \quad Tardiness_i^{rt} \geq 0 \quad Earliness_i^{rt} \geq 0 \quad X_{si}^{rt} \in (0.1) \quad T_{vbip}^{rt} \in (0.1) \quad H_i^{rt} \in (0.1) \qquad (۳۲)$$

تشریح توابع هدف و محدودیت‌های مدل

رابطه ۱ کمینه کردن مجموع میزان زودکرد و دیرکرد تحویل محصولات به مشتریان و رابطه ۲ بیشینه کردن میزان رضایتمندی مشتریان را نشان می‌دهد. روابط ۳ و ٤ نشان می‌دهد که اگر مشتری iام تقاضایی برای محصولrام نداشته باشد H_i^{rt} برابر صفر در غیر این صورت برابر یک می‌باشد. رابطه ٥ بیانگر اطمینان از خرید سفارش rام مشتری iام از یک تأمین‌کننده و رابطه ٦ نیز بیانگر اطمینان از تخصیص سفارش خریداری شده مشتری iام، به یک محموله و در یک اولویت حمل وسیله نقلیه vام

می‌باشد. رابطه ۷ بیان می‌کند که سفارش دو مشتری در دوره t، در یک محموله و در یک اولویت حمل قرار نگیرد. رابطه ۸ بیان می‌کند که اگر در دوره tام به محموله bام سفارشی تخصیص نیافت به محموله $b+1$ام نیز سفارشی تخصیص نمی‌یابد. رابطه ۹ نشان می‌دهد که اگر در دوره tام به اولویت حمل pام از محموله bام سفارشی تخصیص نیافت به اولویت $p+1$ام از محموله bام نیز سفارشی تخصیص نمی‌یابد.

رابطه ۱۰ نشان می‌دهد که ظرفیت اشغال شده توسط سفارشات در یک محموله، از ظرفیت حمل وسیله نقلیه vام بیشتر نشود. رابطه ۱۱ تعیین‌کننده زمان بارگیری محصول rام از سفارش مشتری iام توسط وسیله نقلیه vام در محموله اول و رابطه ۱۲ نیز تعیین‌کننده زمان بارگیری محصول rام از سفارش مشتری iام توسط وسیله نقلیه vام در محموله‌های $b \neq 1$ است. رابطه ۱۳ زمان تحویل محصول rام به مشتری iام وقتی که در اولویت اول حمل وسیله نقلیه vام می‌باشد را نشان می‌دهد و رابطه ۱٤ نیز زمان تحویل محصول rام به مشتری iام در اولویت حمل pام، وقتی که مشتری jام در اولویت حمل $p-1$ام وسیله نقلیه vام است را نشان می‌دهد. رابطه ۱۵ نشان دهنده میزان رضایتمندی مشتری، از کیفیت محصولات تحویلی وقتی که وسیله نقلیه vام در اولویت حمل اول و رابطه ۱٦ نیز نشان‌دهنده میزان رضایتمندی مشتری، از کیفیت محصولات تحویلی وقتی که وسیله نقلیه vام در اولویت‌های حمل $p \neq 1$ به آنان خدمت می‌دهد را نشان می‌دهد. رابطه ۱۷ و ۱۸ به ترتیب میزان دیرکرد و زودکرد تحویل محصولات به مشتریان را نشان می‌دهد. رابطه ۱۹ بیان‌کننده میزان خرید محصول rام از تأمین‌کننده sام است. رابطه ۲۰ بیان می‌کند که میزان خرید، نباید از ظرفیت ارائه تأمین‌کننده sام بیشتر باشد. روابط ۲۱ و ۲۲ به ترتیب محدودیت عدم توانایی یک تأمین‌کننده در تهیه تمامی انواع محصولات و محدودیت عدم توانایی یک وسیله نقلیه در حمل تمامی انواع محصولات را نشان می‌دهد. روابط ۲۳ تا ۳۱ برای خطی‌سازی مدل ریاضی می‌باشد. و در نهایت رابطه ۳۲ نیز مربوط به محدودیت علامت متغیرهای تصمیم است.

مدل قطعی معادل

در این مقاله مدت زمان حمل محصولات بر کیفیت آنان تأثیرگذار است و برای نزدیکی بیشتر مسئله به دنیای واقعی، مدت زمان حمل قطعی نمی‌باشد. از آنجا که

$$\text{مدت زمان حمل محصولات} = \frac{\text{فاصله دو نقطه از هم}}{\text{میانگین سرعت وسیله نقلیه}}$$

و چون فاصله دو نقطه از هم یک عدد ثابت است، میانگین سرعت وسیله نقلیه دارای عدم قطعیت می‌باشد. به سبب کارایی محاسباتی و سادگی در کسب داده‌ها، از توزیع فازی مثلثاتی برای مدل کردن ماهیت غیر دقیق پارامتر $\widetilde{VS_v}$ استفاده می‌شود. بدین صورت که پارامتر $\widetilde{VS_v}$ به صورت $\widetilde{VS_v} = (VS_{1v}.VS_{2v}.VS_{3v})$ درنظر گرفته می‌شود.

در اینجا برای تبدیل مدل غیرقطعی مسئله که شامل ضرایب غیردقیق در محدودیت‌های شماره ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱٤، ۱۵ و ۱٦ می‌باشد، به مدل قطعی معادل از روش خیمنز[1] استفاده شده است. روش مذکور از لحاظ محاسباتی بسیار کارآمد است، زیرا خاصیت خطی بودن را حفظ می‌کند و همچنین تعداد محدودیت‌های نامساوی را افزایش نمی‌دهد. برای مطالعه بیشتر در مورد روش خیمنز به مقاله (خیمنز و همکاران،۲۰۰۷) مراجعه کنید.

بنابراین محدودیت‌های قطعی ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱٤، ۱۵ و ۱٦ به روابط ۳۳، ۳٤، ۳۵، ۳٦، ۳۷ و ۳۸ تبدیل می‌شود.

$$Load_{i1v}^{rt} \geq VehInAv_v^t + (\alpha \times \frac{\frac{TDIS_s}{VS_{2v}} + \frac{TDIS_s}{VS_{1v}}}{2} + (1-\alpha) \times \frac{\frac{TDIS_s}{VS_{3v}} + \frac{TDIS_s}{VS_{2v}}}{2}) - M(2 - T_{v1i1}^{rt} - X_{si}^{rt}) \qquad \forall r.i.v.s.t \qquad (۳۳)$$

$$Load_{ibv}^{rt} \geq TDelivery_{v(b-1)jp}^{rt} + (\alpha \times \frac{\frac{SDIS_{sj}}{VS_{2v}} + \frac{SDIS_{sj}}{VS_{1v}}}{2} + (1-\alpha) \times \frac{\frac{SDIS_{sj}}{VS_{3v}} + \frac{SDIS_{sj}}{VS_{2v}}}{2}) \times T_{v(b-1)jp}^{rt} - M(3 - T_{vbi1}^{rt} - T_{v(b-1)jp}^{rt} - X_{si}^{rt}) \qquad \forall i \neq j.r.v. \; b \neq 1.s.p.t \qquad (۳٤)$$

$$\forall r.i.b.v.s.t \qquad (۳۵)$$

[1]. Jimenes

$$Delivery_i^{rt} \geq Load_{ibv}^{rt} + (\alpha \times \frac{\frac{SDIS_{sj}}{VS_{2v}} + \frac{SDIS_{sj}}{VS_{1v}}}{2} + (1-\alpha) \times \frac{\frac{SDIS_{sj}}{VS_{3v}} + \frac{SDIS_{sj}}{VS_{2v}}}{2}) - M(2 - T_{vbi1}^{rt} - X_{si}^{rt})$$

$$Delivery_i^{rt} \geq TDelivery_{vbj(p-1)}^{rt} + (\alpha \times \frac{\frac{DIS_{ij}}{VS_{2v}} + \frac{DIS_{ij}}{VS_{1v}}}{2} + (1-\alpha) \times \frac{\frac{DIS_{ij}}{VS_{3v}} + \frac{DIS_{ij}}{VS_{2v}}}{2}) \times T_{vbj(p-1)}^{rt} - M(2 - T_{vbip}^{rt} - T_{vbj(p-1)}^{rt}) \quad \forall i \neq j.r.v.b. \; p \neq 1.t \quad (۳۶)$$

$$ICS_{iv}^{r} \leq SAT^{r} - (\alpha \times \frac{\frac{SDIS_{si}}{VS_{2v}} + \frac{SDIS_{si}}{VS_{1v}}}{2} + (1-\alpha) \times \frac{\frac{SDIS_{si}}{VS_{3v}} + \frac{SDIS_{si}}{VS_{2v}}}{2}) \times RED_v^r \times TX_{svbi1}^{rt} - Time^r \times O_v^r \times D_i^{rt} \times T_{vbi1}^{rt} \quad \forall i.r.v.b.s.t \quad (۳۷)$$

$$ICS_{jv}^{r} \leq TICS_{vbi(p-1)}^{rt} - (\alpha \times \frac{\frac{DIS_{ji}}{VS_{2v}} + \frac{DIS_{ji}}{VS_{1v}}}{2} + (1-\alpha) \times \frac{\frac{DIS_{ji}}{VS_{3v}} + \frac{DIS_{ji}}{VS_{2v}}}{2}) \times RED_v^r \times T_{vbi(p-1)}^{rt} - Time^r \times O_v^r \times D_j^{rt} \times T_{vbjp}^{rt} + M(2 - T_{vbjp}^{rt} - T_{vbi(p-1)}^{rt}) \quad \forall i \neq j.v.b.r. \; p \neq 1.t \quad (۳۸)$$

حل مدل ریاضی

در این قسمت ابتدا روش محدودیت اپسیلون تقویت شده به عنوان روش حل دقیق و سپس الگوریتم‌ها NSGA-II و MOTTH به عنوان الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مدل ارائه می‌شود.

روش‌های مختلفی برای حل مسائل چندهدفه وجود دارد که در این مقاله از روش محدودیت ε تقویت‌شده که توسعه یافته روش محدودیت ε است استفاده می‌شود. روش

محدودیت ε که توسط چانکونگ و هیمز[1] (۱۹۸۳) معرفی شد، یک تابع هدف را زمانی که مابقی توابع هدف به محدودیت‌هایی با حدود بالا یا پایین مناسب، تبدیل می‌شوند؛ بهینه می‌کند. این حدود با سطوح مختلف ε بدست می‌آید و جواب بهینه پارتو را ارئه می‌دهد. اما، روش محدودیت ε تقویت‌شده که توسط ماورتاس[2] (۲۰۰۹) معرفی شده است، توجه محققان را به خاطر بعضی از مزایای آن جلب کرده است. برای نمونه، این روش کارایی جواب‌های بهینه پارتو را تضمین می‌کند و یا زمانی که مسائل بیش از دو تابع هدف داشته باشند، زمان حل مسئله را کاهش می‌دهد. برای مطالعه بیشتر روش محدودیت اپسیلون تقویت شده به مقاله ماورتاس (۲۰۰۹) مراجعه کنید.

گام‌های روش محدودیت ε تقویت شده عبارتند از:

گام ۱) یک تابع هدف را به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب کنید. در این تحقیق تابع هدف اول (کمینه کردن مجموع زودکرد و دیرکرد تحویل محصولات) به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب می‌شود.

گام ۲) جدول نتیجه نهایی را برای یافتن دامنه توابع هدف ایجاد کنید. برای این کار هر بار با توجه به یکی از توابع هدف، مسئله را حل کنید و مقادیر بهینه و ندیر هر تابع هدف را بدست آورید. در این تحقیق برای هر تابع هدف ۲ مقدار وجود دارد که برای بدست آوردن بیشترین و کمترین مقدار توابع هدف استفاده می‌شود.

گام ۳) بازه بین دو مقدار بهینه و ندیر توابع هدف فرعی (در این مقاله تابع هدف دوم که کیفیت محصولات می‌باشد به عنوان تابع هدف فرعی درنظر گرفته می‌شود) را به تعداد از قبل مشخص شده (q) تقسیم‌بندی کنید. هر تقسیم‌بندی یک مسئله جدید بوجود می‌آورد که باید جداگانه حل شود.

گام ٤) مدل پیشنهادی را به صورت زیر تغییر دهید:

$$Min\ Z_1$$
$$s.t.$$
$$Z_2 \geq Z_{2(min)} + v.\Delta\varepsilon_{z_2}$$
$$Where\ v=0,1,2,\ldots,q$$
$$\Delta\varepsilon_{z_2} = \frac{Z_{2(max)} - Z_{2(min)}}{q}$$

گام٥) تابع هدفی که به محدودیت انتقال داده شده را با اضافه کردن متغیر کمبود یا مازاد به مساوی تبدیل می‌کنیم. این کار باعث کارایی جواب‌های بهینه پارتو می‌شود.

[1]. Chankong & Haimes
[2]. Mavrotas

به علاوه متغیر کمبود یا مازاد را باید به تابع هدف اصلی نیز اضافه کرد. بنابراین مدل این مقاله به صورت زیر می‌شود. در واقع مدل ریاضی زیر باید q مرتبه به صورت جداگانه حل شود.

$Min\ (Z_1+\beta(S_1))$
$s.t.$
محدودیت‌های ۳-۱۰ و ۳۳-۳۸ و ۱۷-۳۲
$Z_2-S_1 = Z_{2(min)}+v.\Delta\varepsilon_{Z_2}$
$v=0,1,2,\ldots,q$

که β عدد بسیار کوچکی است که معمولاً بین 10^{-6} تا 10^{-3} می‌باشد و تأثیر زیادی بر روی تابع هدف اصلی مسئله ندارد. همچنین متغیر S_1 باید برابر صفر یا نزدیک به صفر باشد تا جواب بهینه پارتو کارایی بدست آید. لازم به ذکر است که هیچ راه حل واحدی وجود ندارد که به طور همزمان هر دو تابع هدف را بهینه کند. بنابراین باید مجموعه جواب بهینه پارتو که با استفاده از روش محدودیت ε تقویت‌شده محاسبه می‌شود را بدست آورد. بهینه بودن راه حل پارتو زمانی تضمین می‌شود که هیچ راه حل شدنی وجود نداشته باشد که بتواند تابع هدف اول را بدون تغییر دادن مقدار تابع هدف دوم بهبود بخشد.

مسائل طراحی شبکه زنجیره‌تأمین که پژوهش حاضر نمونه‌ای از آن است، به دلیل پیچیدگی‌های محاسباتی در گروه خانواده مسائل NP-Hard قرار دارد و برای حل مسئله در ابعاد بزرگ باید از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شود تا در زمان معقول به جواب بهینه یا نزدیک به بهینه دست یافت. از این رو در این تحقیق از دو الگوریتم NSGA-II و MOTTH برای حل مسئله استفاده می‌شود.

الگوریتم فراابتکاری NSGA-II

NSGA-II با حفظ تنوع جبهه بهینه پارتو درحالی که به مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه سراسری همگرا است، یکی از شناخته شده‌ترین الگوریتم‌های تکاملی در حل مسائل چندهدفه است. برای مطالعه بیشتر درباره الگوریتم NSGA-II و گام‌های اجرای این الگوریتم به مقاله دب[1] و همکاران (۲۰۰۸) رجوع شود.

شبه کد الگوریتم NSGA-II ارائه شده برای حل این مسئله مطابق شکل۲ است.

[1]. Deb

شروع
به تعداد جمعیت نسل (Popsize) جواب اولیه تصادفی ایجاد کن.
بهترین اعضای جمعیت که مقدار تابع هدف بهتری را برای مسئله درنظر می‌گیرند انتخاب کن (ارزیابی برازندگی).
به تعداد ماکزیمم نسل (Maxiter) مراحل زیر را تکرار کن (حلقه اصلی):
انتخاب والد برای عملگرهای تقاطع و جهش.
انجام عملگر تقاطع و ایجاد جمعیت فرزندان.
انجام عملگر جهش و ایجاد جمعیت جهش‌یافتگان.
یکپارچه کردن جمعیت (مجموع نسل کنونی و فرزندان حاصل از تقاطع و جهش).
اعمال روش مرتب‌سازی نامغلوب.
محاسبه پارامتر کنترلی فاصله ازدحامی.
مرتب کردن جمعیت و حذف جمعیت اضافی.
بررسی شرایط خاتمه و تکرار در صورت نیاز.
پایان حلقه اصلی
جواب نامغلوب نهایی را چاپ کن.

شکل۲- شبه کد الگوریتم ژنتیک چندهدفه پیشنهادی

ساختار کرومزوم مورد استفاده در این تحقیق مشابه ساختار کرومزوم مورد استفاده در تحقیق طاهری و بهشتی‌نیا (۲۰۱۹) و عملگر تلفیق و جهش مورد استفاده در این تحقیق نیز مشابه عملگر تلفیق و جهش مورد استفاده در تحقیق الریچ[1](۲۰۱۳) است.

الگوریتم فراابتکاری MOTTH

طاهری و بهشتی‌نیا بسط جدیدی از الگوریتم ژنتیک به نام TTH ارائه دادند که از مفهوم رویایی آرزوی دیرینه انسان‌ها جهت سفر به تاریخ الهام گرفته شده است. این الگوریتم، با جایگزین کردن بهترین جواب‌های نسل فعلی با بدترین جواب‌های R نسل قبل، شانس جستجوی بخش‌های بیشتری از فضای جواب مسئله را فراهم می‌آورد و این امر همگرایی را به تأخیر می‌اندازد (طاهری و بهشتی‌نیا،۲۰۱۹). از طرفی این الگوریتم، الگوریتمی تک هدفه بود ولی در تحقیق جاری، بسط جدیدی از الگوریتم TTH برای حل مسائل چند هدفه، به نام الگوریتم فراابتکاری MOTTH ارائه می‌شود.

در الگوریتم MOTTH یک شرط و دو پارامتر جدید به الگوریتم NSGA-II افزوده می‌شود.

شرط بازگشت: پس از محقق شدن این شرط، عملیات بازگشت به تاریخ آغاز می‌شود. در این تحقیق شرط برگشت به تاریخ، رسیدن متغیر شماره نسل به عدد مشخصی

[1]. Ullrich

است که با *GB* نشان داده می‌شود.

R: بوسیله این پارامتر شماره نسلی از گذشته که کرومزوم‌ها به آن انتقال داده می‌شوند مشخص می‌شود. اگر *current* نشان دهنده شماره نسل فعلی باشد، کرومزوم‌های انتخاب شده به نسل *current-R* منتقل می‌شوند.

Transrate: که نشان دهنده تعدادی از کرومزوم‌های نسل فعلی است که باید به تاریخ انتقال داده شود. به عبارت دیگر تعداد *Transrate* از کرومزوم‌های موجود در جبهه نامغلوب اول نسل فعلی که در نسل *current-R* وجود ندارند انتخاب و به نسل *current-R* انتقال داده می شوند. از طرفی تعداد *Transrate* عدد از کرومزوم‌های نسل *current-R* که در آخرین جبهه نامغلوب وجود دارند (بدترین کرومزوم) حذف می‌شوند.

بنابراین گام‌های الگوریتم MOTTH عبارت است از:

گام ۱- تعدادی کرومزوم تصادفی به عنوان جمعیت اولیه ایجاد کنید و قرار دهید *CURRENT=1* (*CURRENT* نشان دهنده شماره نسل است)

گام ۲- جمعیت نسل فعلی را توسط دو عملگر تلفیق و جهش افزایش دهید.

گام ۳- اگر معیار بازگشت به تاریخ محقق شده است (*CURRENT>GB*)، به گام ٦ بروید در غیر اینصورت به گام ٤ بروید.

گام ٤- اگر معیار توقف محقق شده است، الگوریتم را خاتمه دهید. در غیر اینصورت به گام ٥ روید.

گام ٥- نسل بعد را براساس مرتب‌سازی نامغلوب و فاصله ازدحامی اعضای جمعیت تشکیل دهید و قرار دهید *CURRENT= CURRENT+1* و به گام ۲ بروید.

گام ٦- تعداد *Transrate* از کرومزوم‌های موجود در جبهه نامغلوب اول نسل فعلی که در *R* نسل قبل‌تر وجود ندارند انتخاب و به نسل *current-R* انتقال دهید. از طرفی تعداد *Transrate* عدد از کرومزوم‌های نسل *current-R* که در آخرین جبهه نامغلوب وجود دارند (بدترین کرومزوم) را حذف کنید و قرار دهید *CURRENT= 1* و به گام ۲ بازگردید.

با استفاده از آزمون تاگوچی، مقادیر زیر برای پارامترهای الگوریتم NSGA-II و MOTTH درنظر گرفته شد.

جدول۱- مقادیر پارامترهای الگوریتم NSGA-II و MOTTH

پارامتر	مقدار
اندازه جمعیت اولیه	۱۰۰
نرخ تقاطع	۰/۷
نرخ جهش	۰/٤
GB	۲۰
R	۱۵
خاتمه الگوریتم	بررسی ۲۰۰ نسل

در ادامه به ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II و MOTTH پرداخته می‌شود.

تجزیه‌وتحلیل یافته‌ها

با توجه به اینکه مدل ریاضی ارائه شده از نوآوری‌های تحقیق و مورد نیاز در صنعت نظامی کشور می‌باشد، لذا در این بخش ابتدا رابطه بین ۲ تابع هدف (کمینه کردن مجموع زودکرد و دیرکرد تحویل سفارشات به مشتریان و بیشنه کردن کیفیت محصولات تحویلی) با یکدیگر نشان داده می‌شود. سپس به ارزیابی عملکرد الگوریتم MOTTH (الگوریتم پیشنهادی این تحقیق) از طریق مقایسه با حل دقیق و مقایسه با عملکرد الگوریتم NSGA-II پرداخته می‌شود.

رابطه بین دو تابع هدف

برای حل مدل این مقاله، یک مسئله تصادفی با پارامترهای زیر تولید شده است که با روش محدودیت ε تقویت‌شده با $q=8$ و توسط نرم افزار GAMS 25.1.2 با کامپیوتر Corei5 2.5GHz CPU حل شده است. شکل ۳ نشان‌دهنده جواب بهینه پارتو برای این مسئله تصادفی است که نشان می‌دهد با افزایش کیفیت محصولات تحویلی به مشتریان، مجموع میزان زودکرد و دیرکرد تحویل سفارشات نیز افزایش می‌یابد و بالعکس. با این حال تصمیم‌گیرنده متناسب با شرایط خود یک جواب را برمی‌گزیند.

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها، ابتدا عملکرد آنان در ابعاد کوچک با حل دقیق مقایسه می‌شود و درنهایت ۲۷ مسئله تصادفی در ابعاد مختلف تولید شده و عملکرد دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه می‌شود. تمام برنامه نویسی‌های کامپیوتری این مقاله توسط نرم افزار MATLAB نوشته شده و با یک کامپیوتر Intel Corei5 و 2.5 GHz اجرا گردیده است.

جدول ۲- پارامترهای مسئله تصادفی

$NC=6$	$NS=3$	$NV=3$	$NR=3$
$t=1$		$SAT^r=100$	
SU_s^{rt}=300		α=0.4	
$Size^r$= U{1,5}		$VehInAv_v^t$=U{1,5}	
Cap_v=U{250,300}		$TDIS_s$=U{1,20}	
$SDIS_{si}$=U{1,20}		DIS_{ij}=U{1,20}	
D_i^{rt}=U{0,50}		$Ldue_i^{rt}$=U{5,8}	
$Udue_i^{rt}$=U{12,15}		VS_v= U{1,6}	
O_v^r=U(1,0)		RED_v^r=U(1,0)	
$Time^r$=U(1,0)			

$$G=N=\begin{matrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{matrix}$$

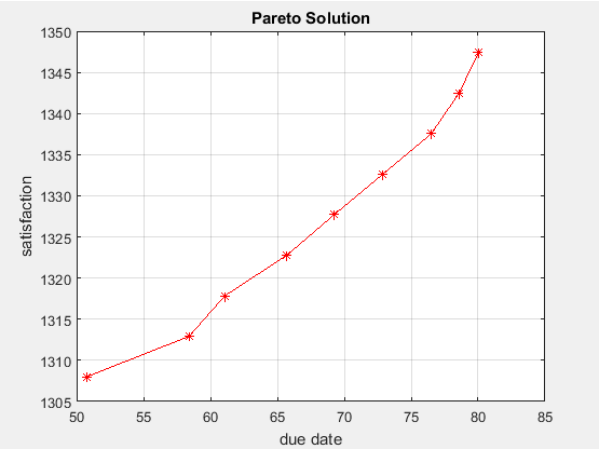
جدول۳- جدول نتیجه نهایی برای نشان دادن دامنه Z_2

تابع هدف	Z_1	Z_2
Minimize Z_1	۵۰/۷۴۰۱	۱۳۰۸
Maximize Z_2	۸۰/۰۳۳۳	۱۳۴۷/۴

$$\Delta\varepsilon_{Z_2}=\frac{1347/4-1308}{8}=4/925$$

جدول ۴- جواب بهینه پارتو

Z_2	Z_1	v
۱۳۰۸	۵۰/۷۴۰۱	۰
۱۳۱۲/۹۲۵	۵۸/۴۰۷۴	۱
۱۳۱۷/۸۵	۶۱/۰۷۶۷	۲
۱۳۲۲/۷۷۵	۶۵/۷۰۶۷	۳
۱۳۲۷/۷	۶۹/۲۴۰۱	۴
۱۳۳۲/۶۲۵	۷۲/۸۸۳۳	۵
۱۳۳۷/۵۵	۷۶/۵۰۱۶۵	۶
۱۳۴۲/۴۷۵	۷۸/۵۷۳۵	۷
۱۳۴۷/۴	۸۰/۰۳۳۳	۸



شکل ۳- جواب بهینه پارتو برای مسئله دوهدفه

در این بخش ٦ مسئله تصادفی در ابعاد مختلف تولید و به روش محدودیت ε تقویت‌شده و الگوریتم‌های NSGA-II و MOTTH حل شد. هر مسئله تصادفی، توسط سه پارامتر تعداد مشتریان، تعداد تأمین‌کنندگان و تعداد وسایل نقلیه نشان داده شده است. مابقی پارامترها مطابق جدول ۲ می‌باشد.

نتایج مقایسات در جدول ٥ نشان داده شده است. در این جدول چهار ستون اول مربوط به مشخصات مسئله است. بهترین جواب یافته شده برای توابع هدف اول و دوم در بین نقاط پارتویی روش محدودیت ε تقویت‌شده و زمان حل مسئله به ترتیب در ۳ ستون بعدی ارائه شد. در ستون‌های ۸ تا ۱۰ مقادیر مرتبط با روش NSGA-II و ستون-های ۱۱ تا ۱۳ مقادیر مرتبط با روش MOTTH و زمان حل آنان نشان داده شده است. در ٤ ستون انتهایی خطای حاصل از روش NSGA-II و MOTTH مطابق با فرمول زیر در هر یک از توابع هدف گزارش شده است.

$$\text{درصد اختلاف جواب} = \left|\frac{\text{جواب روش دقیق} - \text{جواب الگوریتم فراابتکاری}}{\text{جواب روش دقیق}}\right| \times 100 \qquad (۳۹)$$

جدول ۵- مقایسه NSGA-II و MOTTH با حل دقیق

ردیف	تعداد مشتریان (NC)	تعداد تأمین کنندگان (NS)	تعداد وسایل نقلیه (NV)	محدودیت ε تقویت-شده			NSGA-II			MOTTH			درصد خطای NSGA-II		درصد خطای MOTTH	
				هدف اول	هدف دوم	زمان حل (ثانیه)	هدف اول	هدف دوم	زمان حل (ثانیه)	هدف اول	هدف دوم	زمان حل (ثانیه)	هدف اول	هدف دوم	هدف اول	هدف دوم
۱	۳	۳	۳	۰	۷۱۲/۹	۳/۴	۰	۷۱۲/۹	۲۹/۳	۰	۷۱۲/۹	۳۱/۴	۰	۰	۰	۰
۲	۶	۳	۳	۱۳/۱	۱۱۱۹/۵	۶/۱	۱۵/۷	۱۰۳۵/۳	۳۸/۹	۱۵/۴	۱۰۴۳	۳۸/۷	۱۹/۸	۷/۵	۱۷/۵	۶/۸
۳	۶	۴	۵	۳/۴	۱۴۴۳/۳	۵۳/۷	۴/۲	۱۴۴۲/۹	۵۰/۳	۳/۴	۱۴۴۳/۳	۵۰/۹	۲۳/۵	۰/۰۲	۰	۰
۴	۱۰	۶	۶	۷۸/۳	۲۲۸۷/۷	۱۲۳۷/۵	۸۰/۹	۲۲۸۳	۸۶/۴	۸۱/۱	۲۲۸۴	۸۵/۵	۳/۳	۰/۲	۳/۶	۰/۲
۵	۱۰	۷	۹	۹/۸	۲۲۶۶/۷	۳۹۸۲/۷	۱۱/۵	۲۲۶۱/۵	۸۷/۹	۱۰/۸	۲۲۵۹/۲	۹۰/۴	۱۷/۳	۰/۲	۱۰/۲	۰/۳
۶	۲۵	۸	۹	–	–	–	۴۱۷/۹	۵۳۶۰/۳	۲۲۲/۶	۳۱۶/۹	۵۳۷۹	۲۲۵/۹	–	–	–	–
میانگین (به غیر از مسئله ۶)				۲۰/۹۲	۱۵۶۶/۰۲	۱۰۵۶/۶۸	۲۲/۴۶	۱۵۴۷/۱۲	۵۸/۵۶	۲۲/۱۴	۱۵۴۸/۴۸	۵۹/۳۸	۱۲/۷۸	۱/۵۸۴	۶/۲۶	۱/۴۶

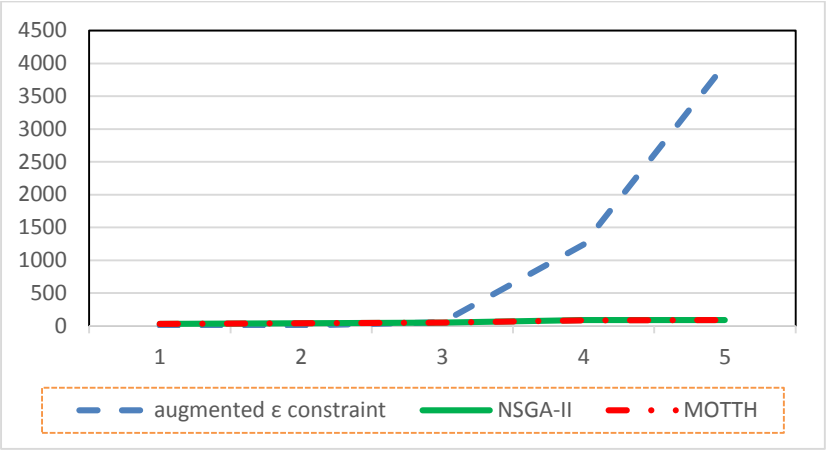
بررسی جدول ۵ نشان می‌دهد که الگوریتم MOTTH جواب‌های نزدیکتری به حل دقیق نسبت به الگوریتم NSGA-II از نظر بهترین جواب حاصل برای هر یک از توابع هدف ارائه می‌دهد. زیرا به طور میانگین الگوریتم NSGA-II در ٦٪ زمان حل دقیق به ۹۳٪ جواب بهینه تابع هدف اول و ۹۹٪ جواب بهینه تابع هدف دوم رسیده است این در حالی است که الگوریتم MOTTH به طور میانگین در ٦٪ زمان حل دقیق به ۹۵٪ جواب بهینه تابع هدف اول و ۹۹٪ جواب بهینه تابع هدف دوم رسیده است. همچنین بررسی زمان حل مسائل نیز نشان می‌دهد که زمان حل مسائل با روش محدودیت ε تقویت‌شده به طور نمایی افزایش می‌یابد. این در حالی است که زمان حل مسئله توسط الگوریتم‌های NSGA-II و MOTTH به طور خطی افزایش ناچیزی دارد (شکل٤). این امر نشان از زمان حل بسیار مناسب روش فراابتکاری دارد. از طرفی به دلیل NP-Hard بودن مسئله، روش حل دقیق قابلیت حل مسئله ٦ را نداشته است.

مقایسه الگوریتم‌ها

به منظور مقایسه عملکرد دو الگوریتم NSGA-II و MOTTH، ابتدا ۲۷ مسئله تصادفی در ابعاد مختلف تولید و سپس توسط هر دو الگوریتم حل شد.

تولید مسائل تصادفی

این مسئله دارای ۳ پارامتر اصلی تعداد مشتریان، تعداد تأمین‌کنندگان و تعداد وسایل نقلیه است که برای هر پارامتر سه سطح بالا، متوسط و پایین مطابق جدول زیر در نظر گرفته می‌شود. مابقی پارامترها مطابق جدول ۲ می‌باشد.



شکل۴- مقایسه زمان حل (ثانیه) توسط روش دقیق و الگوریتم‌های فراابتکاری

جدول۶- مقادیر مختلف برای سه پارامتر اصلی مسئله

	سطح پایین	سطح متوسط	سطح بالا
تعداد مشتریان	۱۰	۵۰	۱۰۰
تعداد تأمین‌کنندگان	۳	۱۵	۲۵
تعداد وسایل نقلیه	۳	۱۵	۲۵

از ترکیب مسائل فوق (۳*۳*۳) تعداد ۲۷ مسئله تصادفی تولید می‌شود.

مقایسه نتایج

تمامی ۲۷ مسئله تصادفی تولید شده، توسط هر دو الگوریتم حل شده و نتایج آن در جدول ۷ نشان داده شده است. عملکرد الگوریتم‌های چندهدفه از عملکرد الگوریتم‌های تک هدفه بسیار پیچیده‌تر است و یک شاخص ارزیابی نمی‌تواند برای بررسی جواب‌های حاصل از الگوریتم‌های ارائه شده کافی باشد. از این رو در این مقاله، برای بررسی کیفیت جواب‌های حاصل از دو الگوریتم، از دو شاخص مقایسه‌ای Q metric[1] (تعداد جواب‌های غیرمغلوب یافت شده) و S metric[2] (شاخص پراکندگی) استفاده می‌شود. هرچه Q metric بیشتر و S metric کمتر باشد، کیفیت جواب ارائه شده بهتر است. از این رو جدول ۷ پنج شاخص دارد:

۱- بهترین جواب یافته شـــده برای تابع هدف اول و جواب متناظر آن برای تابع هدف

[1]. Quantity Metric
[2]. Spacing Metric

دوم

۲- بهترین جواب یافته شـــده برای تابع هدف دوم و جواب متناظر آن برای تابع هدف اول

۳- Q metric

٤- S metric

٥- زمان حل توسط الگوریتم‌ها (بر حسب ثانیه)

جدول ۷- مقایسه الگوریتم MOTTH و NSGA-II

ردیف	NC	NS	NV	NSGA-II							MOTTH						
				بهترین مقدار Z_1	Z_2 متناظر با بهترین مقدار Z_1	بهترین مقدار Z_2	Z_1 متناظر با بهترین مقدار Z_2	S metric	Q metric	CPU time	بهترین مقدار Z_1	Z_2 متناظر با بهترین مقدار Z_1	بهترین مقدار Z_2	Z_1 متناظر با بهترین مقدار Z_2	S metric	Q metric	CPU time
۱	۱۰	۳	۳	۱۳/٤	۷۵۰/۷	۷۷۸/۳	۲٤/٥	۰/٦۲	۷	۲۸/٦	۱٥/٤	۷٥٤/٤	۷۸٦/۸	۳۳/۳	۰/۹٦	۷	۲٤/۹
۲	۱۰	۳	۱٥	۰	۱۱۸۹/۷	۱۲۷٥	۱۱۳/۷	٤/۳۱	۱٥	۳٥/۳	۰	۱۰۷۷	۱۲۷٦/٥	٦٦/٥	۲/٥۲	۲۰	۳٥/۷
۳	۱۰	۳	۲٥	۰	۱۱۹۹/٦	۱۲٥٦/۲	٥۳/٤	٤/۰۷	۱۰	۳۸/۳	۰	۱۲۳۲/٦	۱۲٥۲/٥	٥/۱۳۳	۳/۰۳	٥	۳۸/۱
٤	۱۰	۱٥	۳	۳٤/۱	۱۳۰۷/۸	۱۳۳٥/۲	۷۱/٦	۱/٦۱	٤	٥۰/۸	۹/٥	۱۳۱۰/۳	۱۳۲۲/٤	۳٤/٥	۱/۱٥	٦	٤۷/٤
٥	۱۰	۱٥	۱٥	۰	۱۱٦۰	۱۲۲۱/۹	۲۹/۲	۳/٤٤	٦	٤۸/۳	۰	۱۱۸۸/٥	۱۲۲۲/۸	۱۰/۱	۰/۹۹	۱۲	٤۹/٥
٦	۱۰	۱٥	۲٥	۰	۱۱۹۸/۷	۱۲۲۲/۳	۲۱/۸	٤/٤٤	٤	٥٤/۳	۰	۱۱۸۲/۳	۱۲۲۳/٦	۳/۲	۲/۲۹	٦	٥۳/٥
۷	۱۰	۲٥	۳	۳۰/۷	۱۳۷۹/۸	۱۳۹٦/۸	۱۲٤/۷	٥/۰۸	٥	٥۷/۲	٤۷/٤	۱۳۹۳/٥	۱٤۰۰	۱۰٦/۱	٤/۳۷	٥	٦۰/٥
۸	۱۰	۲٥	۱٥	۰	۱۳۲۱/۷	۱۳٤۷/۳	٥٦/۱	۲/۱۱	۱۰	٦۱/۲	۰	۱۳۲۷/٤	۱۳٤۸/۸	۱۷/۱	۱/٥٤	۱۲	٦۰/۱
۹	۱۰	۲٥	۲٥	۰	۱۲۱۹/٥	۱۲٥۳/٤	۰/۲	۰	۲	٦۱/۱	۰	۱۲۳٥	۱۲٦٥/۸	۹/۳	۱/۷۲	۳	٦۲/۱
۱۰	٥۰	۳	۳	٦۸۳٤/٥	۹۹۹۷/٥	–	–	–	۱	۳۲۲/۲	٦۱٤۳	۱۰۰۳۲	–	–	–	۱	۳۲۷/۸
۱۱	٥۰	۳	۱٥	۱٦۳۹/۳	۱۱٥۱۱	۱۱۷٥۲	۳٤۲۸/۷	۱۰/۲۳	۱۹	٤٤۹/٥	۱٥۱۲/۹	۱۱٥٥۲	۱۱۸۲۳	۳۳۲٦	۱۳/۱۳	۱۳	٤٥۰/۸
۱۲	٥۰	۳	۲٥	۷۰۰	۹۲۳۸	۱۰٤۹٤	۱۳۲۹	۷/٦٥	۱۳	٤۱۲/۲	٦۰٦/۷	۹٦۸۰	۱۰٦٤۱	۱٤٤۰/۳	٤/۳	۱۹	٤۳۰/۳
۱۳	٥۰	۱٥	۳	۷۹۹٥/٤	۱۰٥٦۳	۱۰۷۱٤	۸۸۷۳	۱۰/۷۷	۹	٥۱۰/۹	۷٦۰۲/۸	۱۰٦٥۸	۱۰۷٤٤	۷۸۹۸/٤	٤/۷۷	۱۱	٥۱۳/۹
۱٤	٥۰	۱٥	۱٥	۱٤٦٤/۸	۱۰۹۳۱	۱۱٤۰۹	۳٤۸۹/٤	۷/۷۹	۱٦	۸۱۷/۲	۱٥۹٦/۹	۱۰۸۳۲	۱۱۳۲۸	٤۰٥۹/۸	۱٦/۱۳	۲۱	۸۱۹/٦
۱٥	٥۰	۱٥	۲٥	۲۹۷/٥	۱۰۷۷۹	۱۱۲٥۷	۹۰۹/۹	٥/۲٥	۱٥	۸۲٥/۸	۳۱۷/۸	۱۰۷۷۲	۱۱۲۱٦	۱۱۲۳/٥	٦/٦۱	۲۲	۸٦٤/٤
۱٦	٥۰	۲٥	۳	۸۰٦۸/۹	۹۸۲٦/٦	۹۸۳۹/۹	۸۱۰۱/٤	۸/۲٤	۳	۱۰۲۰/٤	۷۲٦۸/٦	۹٥٦۱	۹۷۱۷/۸	۷۳۹۸/۹	۱/٥۹	۸	۱۰۹۲/٤
۱۷	٥۰	۲٥	۱٥	۱۱۸۱/۲	۸۸۷٤/٥	۹٦٥٥/۳	۲۷۹٤/۱	۱۱/٦۸	۱۳	۱۰۳۳/۸	۱۲۹۸/۹	۸٤۲٦/۸	۹٦۷۸/٦	۲۳۹۱/۳	۹/۷۳	۱۹	۱۰۸۷/٦
۱۸	٥۰	۲٥	۲٥	۳۷۰	۱۰۱٤۸	۱۰۸۱۱	۱۳٦۹/۲	۹/۳۲	۱۱	۹۰۹/۰۷	۳٥۱/۷	۱۰۳۳٥	۱۰۸٤۰	۸۹۰/۳	٦/٤۸	۱۰	۹۹۲/۷
۱۹	۱۰	۳	۳	۳۰۰۳۳	۱٦۱٥۰	۱۷۰۲۷	۳۲۳۷٥	۳۲/۳	٥	۹۲۱/٥	۲۷۱٤٤	۱٦۸۱۲	۱۷۳۱۷	۲۹۱۸٦	۳۳/۳	٤	۹۳۷/۹

۲۰	۱۰۰	۳	۱۵	۷۸۷۳	۱۹۱۰۰	۲۰۹۳۲	۱۲۰۶۷	۱۴/۹۲	۱۷	۱۷۸۷/۹	۷۷۸۸	۱۸۹۷۸	۲۰۸۵۹	۱۱۱۶۲	۱۳/۵۷	۲۵	۱۷۷۲/۹
۲۱	۱۰۰	۳	۲۵	۲۴۳۱۱	۱۷۸۶۶	۲۰۳۴۷	۶۱۰۵۸	۱۸/۰۵	۱۶	۱۱۰۸/۵	۲۳۸۹۲	۱۷۶۲۵	۲۰۶۶۴	۷۱۶۴۶	۱۸/۵۵	۱۶	۱۱۱۱/۲
۲۲	۱۰۰	۱۵	۳	۴۰۴۹۵	۲۱۶۱۲	۲۱۷۸۴	۴۲۱۰۰	۷/۷۸	۸	۲۸۳۸/۳	۳۸۱۷۹	۲۱۷۵۷	۲۱۷۹۱	۳۸۲۳۶	۲/۳۹	۳۵	۲۸۳۰/۸
۲۳	۱۰۰	۱۵	۱۵	۷۳۳۹	۲۱۰۴۰	۲۱۷۶۵	۱۳۲۹۳	۳۲/۲۲	۱۳	۲۴۹۷	۷۳۱۸	۲۱۱۷۴	۲۱۸۲۹	۱۰۱۸۲	۱۲/۲۴	۱۱	۲۶۱۴/۲
۲۴	۱۰۰	۱۵	۲۵	۲۲۰۶۷	۲۰۲۷۸	۲۱۴۱۲	۳۸۶۸/۲	۹/۸	۱۳	۲۷۴۸	۲۳۴۱/۱	۲۰۵۲۴	۲۱۳۱۸	۳۷۱۷,۴	۸/۸۱	۱۵	۲۷۸۰/۵
۲۵	۱۰۰	۲۵	۳	۳۸۸۰۱	۲۰۳۳۵	۲۰۵۱۹	۴۳۳۴۷	۳۱/۶۷	۹	۳۸۰۴/۵	۳۹۱۷۳	۲۰۳۷۰	۲۰۵۴۷	۴۰۷۷۶	۱۹/۹۷	۲۱	۳۸۵۲/۵
۲۶	۱۰۰	۲۵	۱۵	۷۰۷۶	۲۰۱۴۸	۲۱۰۴۰	۱۰۶۵۰	۱۸/۹۷	۱۵	۳۷۰۷/۱	۷۲۳۷	۲۰۰۴۶	۲۱۱۱۶	۱۰۶۷۹	۱۵/۰۴	۱۸	۳۶۷۷/۶
۲۷	۱۰۰	۲۵	۲۵	۲۲۳۰/۲	۲۱۰۳۴	۲۱۶۴۸	۴۳۶۴/۳	۱۰/۵۴	۱۴	۳۴۳۳/۲	۲۱۸۶/۶	۲۰۹۷۶	۲۱۵۲۵	۳۸۴۴	۱۷/۶۵	۱۰	۳۴۳۰/۱
میانگین				۶۹۹۹/۸۰۴	۱۰۳۷۶/۲۶	۱۰۹۰۳/۱۸	۹۷۶۵/۸۶	۱۰/۴۹	۱۰/۱۱	۱۰۹۵/۶۳	۶۷۴۱/۸۶۳	۱۰۴۰۰/۴۴	۱۰۹۲۵/۱۴	۹۵۴۳/۹۲۸	۸/۵۷	۱۳/۱۴	۱۱۱۱/۸۱

از ۲۷ مسئله تصادفی فوق، الگوریتم MOTTH موفق شد که در ۹ مسئله (۵-۸-۱۰-۱۱-۱۳-۱۸-۱۹-۲۲-۲۳) جواب‌های بهتری را برای هر دو تابع هدف نسبت به الگوریتم NSGA-II ارائه دهد. برای مابقی مسئله‌ها، بررسی دو پارامتر Q metric و S metric نشان می‌دهد که عملکرد الگوریتم MOTTH بهتر است. علت این امر آن است که در NSGA-II پس از چند نسل، الگوریتم به سمت یک جواب، همگرا می‌شود و ساختار کرومزوم‌های نسل آخر، مشابه یکدیگر خواهد شد. اگر دو کرومزوم مشابه هم باشند، در عمل تقاطع فرزندشان نیز شبیه آن‌ها خواهد شد و امکان جستجو و یافتن جواب‌های جدیدتر از بین خواهد رفت و ادامه ایجاد نسل‌های جدیدتر منجر به بهبود قابل توجهی در بهترین جواب فعلی نخواهد شد. اما از آنجا که الگوریتم ژنتیک از اصل تنازع بقا برای یافتن جواب بهینه استفاده می‌کند، مکانیزم بازگشت به تاریخ، با جایگزین کردن بهترین جواب‌های نسل فعلی با بدترین جواب‌های R نسل قبل، شانس تلفیق جواب‌های خوب یک نسل با جواب‌های خوب نسل قبل را افزایش داده و جواب‌های بهتری نسبت به الگوریتم NSGA-II ارائه می‌دهد.

میانگین زمان حل مسائل در الگوریتم NSGA-II از الگوریتم MOTTH کمتر است و دلیل آن مکانیزم برگشت در الگوریتم MOTTH می‌باشد. البته زمان حل مسائل با سرعت پردازش کامپیوتر در ارتباط مستقیم است و استفاده از کامپیوترهایی با سرعت

پردازش بیشتر، باعث بهبود زمان حل خواهد شد.

نتیجه‌گیری

این مقاله به یکپارچه‌سازی تصمیمات تأمین و توزیع اقلام غذایی در شرایط عدم قطعیت (مدت زمان سفر) می‌پردازد. اهداف مورد بررسی شامل کمینه کردن مجموع زمان‌های دیرکرد و زودکرد تحویل محصولات به مشتریان و بیشینه کردن کیفیت محصولات تحویلی به آنان است. ابتدا مدل ریاضی مسئله ارائه شد و از روش محدودیت ε تقویت-شده برای حل دقیق مدل استفاده شد. با استفاده از این روش رابطه بین دو تابع هدف تبیین و نشان داده شد که با افزایش کیفیت محصولات تحویلی به مشتریان، مجموع زودکرد و دیرکرد تحویل سفارشات به آنان نیز افزایش می‌یابد. زیرا با توجه به محدودیت‌های شماره ۱۵ و ۱۶، افزایش کیفیت زمانی اتفاق می‌افتد که تعداد محموله‌های با یک اولویت حمل افزایش یابد. در این صورت هر وسیله نقلیه فقط به یک مشتری خدمت می‌دهد و محصولات غذایی دیگری در وسیله نقلیه یخچال‌دار باقی نمی‌ماند که باعث شوک حرارتی و کاهش کیفیت شود. از طرفی افزایش تعداد محموله‌های با یک اولویت حمل، باعث می‌شود که یک وسیله نقلیه برای خدمت‌دهی به چند مشتری، ابتدا مسیر بین یک مشتری و تأمین‌کننده را بپیماید و پس از تحویل محصولات به آن مشتری، به نزد تأمین‌کننده برگردد و پس از بارگیری سفارشات مشتری دوم، مسیر بین مشتری دوم و تأمین‌کننده را بپیماید و این روند برای همه مشتریان ادامه می‌یابد که این امر باعث افزایش زمان دیرکرد تحویل محصولات به مشتریان می‌شود. از این رو هر شرکت با توجه به اهمیت هر یک از توابع هدف و با درنظر گرفتن شرایط شرکت خود، یک جواب را برمی‌گزیند.

همچنین در جدول ۵ نشان داده شد که روش حل دقیق، نمی‌تواند مسائل با ابعاد بزرگ را در زمان معقول حل کند. از این رو باید از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شود، که این تحقیق الگوریتم فراابتکاری MOTTH را ارائه داده است که بسط جدیدی از الگوریتم ژنتیک بوده و از آرزوی دیرینه انسان‌ها جهت سفر در طول تاریخ الهام گرفته شده است. این الگوریتم با جایگزین کردن بهترین جواب‌های نسل فعلی با بدترین جواب‌های R نسل قبل، از همگرایی زودرس جلوگیری کرده و محدوده بیشتری از فضای جواب را مورد پایش قرار می‌دهد.

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، ابتدا عملکرد آن با حل دقیق و سپس با عملکرد الگوریتم NSGA-II مقایسه شد. نتایج مقایسات نشان می‌دهد که عملکرد الگوریتم MOTTH بهتر از عملکرد الگوریتم NSGA-II است. بنابراین با توجه به نتایج این تحقیق، پیشنهاد کاربردی برای مدیران زنجیره‌تأمین مواد غذایی منجمد، استفاده از الگوریتم MOTTH برای مشخص کردن اینکه از کدام تأمین‌کننده، سفارش کدام مشتری را بخرد و توسط کدام وسیله نقلیه یخچال‌دار در چندمین محموله و در چندمین اولویت حمل تحویل دهد، می‌باشد. زیرا این الگوریتم نسبت به الگوریتم NSGA-II، جواب‌های بهتری ارائه می‌دهد که مجموع میزان زودکرد و دیرکرد تحویل سفارشات به مشتریان کمتر و میزان کیفیت محصولات تحویلی به مشتریان بیشتر است. همچنین استفاده از وسایل نقلیه حمل مواد غذایی منجمد پارتیشن‌بندی شده با درب جداگانه و سیستم خنک‌کننده مجزا پیشنهاد کاربردی دیگر این تحقیق می‌باشد. زیرا در صورت باز شدن درب یک پارتیشن و تخلیه محصولات آن، به دیگر محصولات باقی‌مانده در دیگر پارتیشن‌ها شوک حرارتی وارد نمی‌شود و باعث کاهش کیفیت آنان نمی‌گردد. با توجه به تحقیقات پیشین، مقاله حاضر به ارائه مدل ریاضی جهت کمینه کردن مجموع زمان‌های دیرکرد و زودکرد تحویل محصولات به مشتریان و بیشینه کردن کیفیت محصولات تحویلی به آنان می‌پردازد و برای حل مدل ریاضی، الگوریتم فراابتکاری MOTTH را پیشنهاد داده است که وجه تمایز با تحقیقات گذشته بوده است. همچنین با توجه به نتایج تحقیق می‌توان پیشنهادهایی به شرح زیر برای تحقیقات آتی ارائه نمود:

- این تحقیق فقط دو متغیر زمان تحویل و کیفیت محصولات را بر میزان رضایتمندی مشتری در نظر گرفته است. در نظر گرفتن متغیرهای دیگر نظیر هزینه محصولات و یا کاهش آلایندگی می‌تواند حوزه‌ای برای تحقیقات آتی باشد.
- در این تحقیق فقط تحویل محصولات به مشتریان در نظر گرفته شده است. بنابراین بازگرداندن محصولات مرجوعی و یا تاریخ گذشته می‌تواند زمینه‌ای دیگر برای تحقیقات آتی باشد.
- همچنین ترکیب الگوریتم MOTTH با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر شبیه‌سازی تبرید و زنبور عسل نیز می‌تواند زمینه دیگری برای تحقیقات آتی باشد.

References

Ahmadi, D. K., & Abdollahzadeh. M. S. (2019). Integrated mathematical model for optimizing the production-distribution system of the supply chain of perishable goods with intermediate warehouses. Production and Operations Management, 10 (2), 37-53.

Akkerman, R., Farahani, P., & Grunow. M. (2010). Quality, safety and sustainability in food distribution: a review of quantitative operations management approaches and challenges. OR Spectrum, 32(4), 863-904.

Babaei, T. E., Sailpour, S. & Mir Mohammadi. H. (2014). The problem of routing heterogeneous vehicles with multiple distribution points and limited time periods for perishable goods. Supply Chain Management, 16 (44), 14-23.

Belenguer, J. M., Benavent, E., & Martínez. M. C. (2005). RutaRep: a computer package to design dispatching routes in the meat industry. Journal of food engineering, 70(3), 435-445.

Carson, J. K., & East. A. R. (2018). The cold chain in New Zealand–A review. International Journal of Refrigeration, 87, 185-192.

Chang, Y. C., & Lee. C. Y. (2004). Machine scheduling with job delivery coordination. European Journal of Operational Research, 158(2), 470-487.

Chankong, V., & Haimes. Y. (1983). Multi-objective Decision Making Theory and Methodology. Elsevier Science, New York.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan. T. A. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE transactions on evolutionary computation, 6(2), 182-197.

Faizi, A. (2018). Designing a mathematical model for planning transportation and storage of edible crude oil. Elite of Science and Engineering, 10 (3), 94-103.

Ghare, P. M., & Schrader. G. F. (1963). An inventory model for exponentially deteriorating items. Journal of Industrial Engineering, 14(2), 238-243.

Ghomi-Avili, M., Khosrojerdi, A., & Tavakkoli-Moghaddam. R. (2019). A multi-objective model for the closed-loop supply chain network design with a price-dependent demand, shortage and disruption. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 36(6), 5261-5272.

Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., Van Otterdijk, R., & Meybeck. A. (2011). Global food losses and food waste. The Swedish Institute for Food and Biotechnology, Save Food Congress, Düsseldorf 16 May 2011.

Hsu, C. I., Hung, S. F., & Li. H. C. (2007). Vehicle routing problem with time-windows for perishable food delivery. Journal of food engineering, 80(2), 465-475.

Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., & Rodrı. M.V. (2007). Linear programming with fuzzy parameters: an interactive method resolution. European Journal of Operational Research, 177(3), 1599-1609.

Joshi, K., Warby, J., Valverde, J., Tiwari, B., Cullen, P. J., & Frias, J. M. (2018). Impact of cold chain and product variability on quality attributes of modified atmosphere packed mushrooms (Agaricus bisporus) throughout distribution. Journal of Food Engineering, 232, 44-55.

Labuza, T. P. (1982). Shelf-life dating of foods. Food & Nutrition Press, Inc.

Lesmawati, W., Rahmi, A., & Mahmudy. W.F. (2016). Optimization of frozen food distribution using genetic algorithms. Journal of enviromental engineering and sustainable technology, 3(1), 51-58.

Li, L., Yao, F., & Niu. B. (2013). DEABC algorithm for perishable goods vehicle routing problem. In International Conference on Intelligent Computing Springer, Berlin, Heidelberg, 624-632.

Li, Z. P., & Wang. S. (2013). Research on end distribution path problem of dairy cold chain. In The 19th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Springer, Berlin, Heidelberg, 983-992.

Liu, H., Pretorius, L., & Jiang. D. (2018). Optimization of cold chain logistics distribution network terminal. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 18(1), 1-9.

Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems. Applied mathematics and computation, 213(2), 455-465.

Mohebalizadehgashti, F., Zolfagharinia, H., & Amin. S. H. (2020). Designing a green meat supply chain network: A multi-objective approach. International Journal of Production Economics, 219, 312-327.

Musavi, M., & Bozorgi-Amiri. A. (2017). A multi-objective sustainable hub location-scheduling problem for perishable food supply chain. Computers & Industrial Engineering, 113, 766-778.

Ndraha, N., Sung, W. C., & Hsiao. H. I. (2019). Evaluation of the cold chain management options to preserve the shelf life of frozen shrimps: A case study in the home delivery services in Taiwan. Journal of food engineering, 242, 21-30.

Nedović, V., Raspor, P., Lević, J., Šaponjac, V. T., & Barbosa-Cánovas. G. V. (2016). Emerging and traditional technologies for safe, healthy and quality food. Springer International Publishing, 257-268.

Osvald, A., & Stirn. L. Z. (2008). A vehicle routing algorithm for the distribution of fresh vegetables and similar perishable food. Journal of food engineering, 85(2), 285-295.

Peidro, D., Mula, J., Jiménez, M., & Botella. M. (2010). A fuzzy linear programming based approach for tactical supply chain planning in an uncertainty environment. European Journal of Operational Research, 205(1), 65-80.

Peidro, D., Mula, J., Poler, R., & Verdegay. J. L. (2009). Fuzzy optimization for supply chain planning under supply, demand and process uncertainties. Fuzzy sets and systems, 160(18), 2640-2657.

Sirait, K. J., Suwilo, S., & Mardiningsih. M. (2017). Vehicle Routing Problem for Delivery Perishable Food. Bulletin of Mathematics, 9(01), 9-25.

Srinivas, N., & Deb. K. (1994). Muiltiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. Evolutionary computation, 2(3), 221-248.

Song, B. D., & Ko. Y. D. (2016). A vehicle routing problem of both refrigerated-and general-type vehicles for perishable food products delivery. Journal of food engineering, 169, 61-71.

Taheri, M. R., & Beheshtinia. M. A. (2019). A Genetic Algorithm Developed for a Supply Chain Scheduling Problem. Iranian Journal of Management Studies, 12(2), 107-132.

Tarantilis, C. D., & Kiranoudis. C. T. (2001). A meta-heuristic algorithm for the efficient distribution of perishable foods. Journal of food Engineering, 50(1), 1-9.

Tarantilis, C. D., & Kiranoudis. C. T. (2002). Distribution of fresh meat. Journal of Food Engineering, 51(1), 85-91.

Ullrich. C. A. (2013). Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows. European Journal of Operational Research, 227(1), 152-165.

Vakili, P., Hosseini Motlagh, M., Gholamian, M., & Jokar. A. (2017). Provide a

mathematical model of routing-multi-product inventory for pharmaceutical items in a cold supply chain and an innovative solution method based on adaptive neighborhood search. Journal of Industrial Management. 9(2), 407-383.

Wang, S., Tao, F., Shi, Y., & Wen. H. (2017). Optimization of vehicle routing problem with time windows for cold chain logistics based on carbon tax. Sustainability, 9(5), 694.

Wang, S. Y., & Sun. H. (2015). Distribution Route Planning for Cold Chain Items under Variable Demand. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 9(2), 103-110.

Wang, Y., & ying Yu. L. (2012). Optimization model of refrigerated food transportation. In ICSSSM12, 220-224.