




Paper Type: Original-Application Article



Mathematical Model of Sustainable Multilevel Supply Chain with Meta-Heuristic Algorithm Approach (Case Study: Atmosphere Group: Industrial and Manufacturing Power Plant)

Farzaneh Rezaee¹, Nazanin Pilevari^{2,*} 

¹ PhD Student, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Economics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; rezaee.f24@gmail.com.

² Associate Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Management, Tehran West, Visiting Professor of Science and Research University, Islamic Azad University, Tehran, Iran; nazanin.pilevari@gmail.com.

Citation:



Rezaee, F., & Pilevari, N. (2022). Mathematical model of sustainable multilevel supply chain with meta-heuristic algorithm approach (case study: atmosphere group: industrial and manufacturing power plant). *Journal of decisions and operations research*, 7(Spec. Issue), 1-17.

Received: 29/01/2021

Reviewed: 02/03/2021

Revised: 09/04/2021

Accepted: 01/05/2021

Abstract

Purpose: In the current complicated supply chains, sustainability and two social and environmental perspectives have significantly caught researchers' attention due to their significant role in cost reduction. The present study aims to propose a sustainable multi-tier supply chain model for power plant products for industrial and manufacturing factories.

Methodology: To this end, a mathematical model was proposed with three objectives: maximizing the social responsibility, minimizing the emission of environmental pollutants, and reducing the costs of the supply chain. The whale and genetic metaheuristic algorithms were employed to propose and solve the model since sustainable supply chain planning was considered an NH-hard problem.

Findings: In order to solve the proposed model, the experimental sample was designed in three groups including small, medium, and large in terms of the data of Atmosphere Company. The results of whale optimization and genetic algorithms were compared according to the comparative indices of quality, dispersion, uniformity, and solving time.

Originality/Value: According to the results, the whale algorithm was able to provide higher quality and near-optimal solutions than genetic algorithm; in addition, by comparison, it could efficiently explore and extract possible areas of the solution in terms of quality and dispersion indices. However, a shorter amount of time was required for genetic algorithm to uniformly find solutions.

Keywords: Supply chain, Sustainability, Whale optimization algorithm.

Corresponding Author: nazanin.pilevari@gmail.com

 <http://dorl.net/dor/20.1001.1.25385097.1401.7.5.2.5>



Licensee. **Journal of Decisions and Operations Research**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



نوع مقاله: پژوهشی - کاربردی



مدل ریاضی زنجیره تامین چندسطحی پایدار با رویکرد الگوریتم فراابتکاری (مطالعه موردی: گروه کارخانجات صنعتی و تولیدی اتمسفر واحد سازه‌های نیروگاهی)

فرزانه رضایی^۱، نازنین پیله‌وری^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
^۲ دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، تهران غرب، استاد مدعو دانشگاه علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

هدف: در زنجیره‌های تامین پیچیده امروزی، در پایدار بودن علاوه بر اهمیت کاهش هزینه‌ها، دو منظر اجتماعی و زیست‌محیطی نیز اهمیت زیادی به دست آورده‌اند. این تحقیق به دنبال ارایه مدل زنجیره تامین چندسطحی پایدار در بخش تولید محصولات نیروگاهی گروه کارخانجات صنعتی و تولیدی می‌باشد.

روش‌شناسی پژوهش: برای مساله مورد نظر، یک مدل ریاضی ارایه شده است که اهداف آن عبارتند از: حداکثرسازی مسئولیت اجتماعی، کمینه‌سازی انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی و کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره تامین. با توجه به اینکه برنامه‌ریزی پایدار زنجیره تامین مساله‌ای *Np-Hard* است، از الگوریتم فراابتکاری نهنگ و ژنتیک برای ارایه و حل مدل استفاده کرده‌ایم.

یافته‌ها: جهت حل مدل ارایه شده، مسائل نمونه آزمایشی در سه گروه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ با توجه داده‌های شرکت اتمسفر طراحی گردیده و نتایج دو الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ و الگوریتم ژنتیک با توجه به شاخص‌های مقایسه‌ای کیفیت، پراکندگی، یکنواختی و زمان حل با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

اصالت/ارزش افزوده علمی: نتایج نشان داد الگوریتم نهنگ دارای توانایی بالاتر، جهت دستیابی به جواب‌های باکیفیت‌تر و نزدیک بهینه از منظر شاخص کیفیت و اکتشاف و استخراج ناحیه شدنی جواب از منظر شاخص پراکندگی، نسبت به الگوریتم ژنتیک می‌باشد. نتایج شاخص یکنواختی و زمان حل نیز نشان داد، الگوریتم ژنتیک دارای زمان حل کمتر می‌باشد و فضای جواب را به صورت یکنواخت‌تر جستجو می‌کند.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تامین، پایداری، الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ.

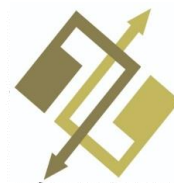
۱- مقدمه

در سال‌های اخیر پایداری در مدیریت زنجیره تامین و همچنین توجه به عوامل محیطی و جنبه‌های اجتماعی، موضوعات مهمی بوده‌اند که موردبررسی قرار گرفته‌اند (رورت و همکاران^۱، ۲۰۱۶؛ گولینی و همکاران^۲، ۲۰۱۴). پایداری محیطی و اجتماعی موضوعات نسبتاً پیچیده

¹ Revert et al.

² Golini et al.





ای هستند که روی توانمندی بخش‌های مختلف زنجیره تامین با اقتباس از تکنولوژی‌ها، ایجاد محیطی دوستانه و توجه به عوامل محیطی اثر می‌گذارند (فانگ و همکاران^۱، ۲۰۱۷). بر اساس مروره‌های انجام‌شده، تعداد کمی از مقالات برای مدیریت پایدار زنجیره تامین از مدل‌های کمی استفاده کرده‌اند. همچنین، در زمینه مسیریابی-مکان‌یابی در زنجیره تامین با در نظر گرفتن ابعاد پایداری و جریمه کربن در صنعت تولید کالاهای نیروگاهی، تحقیقی انجام نشده است. با توجه به اهمیت موضوع و همچنین وجود این شکاف تحقیقاتی، در این مقاله به ارائه مدل ریاضی مسیریابی-مکان‌یابی در زنجیره تامین پایدار با در نظر گرفتن جریمه کربن با اهداف "اقتصادی"، "اجتماعی" و "زیست‌محیطی" پرداخته می‌شود. در نخستین گام، مدل کمی سه هدفه برای بهینه‌سازی هزینه و سطوح اجرای مسئولیت اجتماعی و کاهش تأثیرات محیطی ارائه خواهیم داد. با توجه به اینکه برنامه‌ریزی پایدار زنجیره تامین مساله‌ای $Np-Hard$ است، از روش‌های فراابتکاری نهنگ و ژنتیک برای حل مدل استفاده کرده‌ایم. در این تحقیق به بررسی مساله برنامه‌ریزی بهینه شبکه زنجیره تامین پایدار چندسطحی و چندمحصولی می‌پردازیم. در مدل ارائه‌شده، مکان‌یابی توزیع‌کنندگان، تولید سبز و مسیریابی سبز در نظر گرفته شده است. با توجه به ماهیت غیرقطعی بودن پارامترها در دنیای واقعی، در این تحقیق نیز، پارامترها به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده و عدم قطعیت این پارامترها به صورت اعداد فازی مدل شده‌اند. در تحقیق حاضر به مدل‌سازی مساله زنجیره تامین پایدار در شرکت اتمسفر پرداخته شده است. در حال حاضر موضوعات اصلی فعالیت شرکت شامل سه بخش عمده ریخته‌گری، نیروگاهی و تهویه مطبوع می‌باشد. در این مقاله، تمرکز بر بخش نیروگاهی که در آن تولید و نصب انواع تجهیزات سیستم خنک‌کن نیروگاه شامل انواع مبدل‌های حرارتی (دلتا)، پیک کولر، آگزیلری کولر، جت‌کنندانسور و همچنین ساخت و نصب انواع مخازن و سازه‌های فلزی و استیم داکت انجام می‌شود، می‌باشد. در شبکه زنجیره تامین موردبررسی، کالاها در مراکز تولید، تولیدشده و از مراکز تولید به انبارها یا مراکز توزیع ارسال می‌شوند؛ همچنین مراکز توزیع از انبارهای مراکز تولید نیز کالا دریافت می‌کنند. از مراکز توزیع، کالاها به سمت مشتریان حمل شده و بین آن‌ها توزیع می‌گردد. مساله موردبررسی شامل مسیریابی، تولید، توزیع، موجودی و مکان‌یابی با در نظر گرفتن اهداف پایداری در زنجیره تامین چند سطحی، چند کالایی و چند دوره‌ای می‌باشد. در این تحقیق سه بعد پایداری زنجیره تامین شامل اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است. هر یک از این ابعاد بر اساس معیارها و محدودیت‌های مختلف در مدل در نظر گرفته شده‌اند. برای بررسی بعد زیست‌محیطی، تأثیر پذیری زنجیره تامین بر روی میزان استفاده از انرژی‌های تجدیدناپذیر مانند سوخت‌های فسیلی، پسماندهای حاصل از زنجیره تامین و ... می‌تواند در نظر گرفته شود. برای بررسی بعد اقتصادی، تأثیر پذیری زنجیره تامین بر روی سرمایه‌گذاری، سهم بازار و درآمد می‌تواند در نظر گرفته شود. برای بررسی بعد اجتماعی، تأثیر پذیری زنجیره تامین بر روی پایداری اجتماعی، عدالت اجتماعی، تعداد شغل ایجادشده و آسیب نیروی کار در مراکز تولید می‌تواند در نظر گرفته شود. همچنین، در مدل موردبررسی، آلاینده‌های محیط‌زیست در دو بخش مدنظر است که عبارت‌اند از ۱- انتشار آلودگی‌های ناشی از واحدهای تولیدی و صنعتی و ۲- انتشار آلودگی ناشی از سیستم حمل‌ونقل. با توجه به تشریح مساله و بررسی تحقیقات پیشین، می‌توان گفت که موارد زیر، مدل تحقیق حاضر را از تحقیقات پیشین در زمینه مسیریابی محصول در زنجیره تامین پایدار متمایز می‌کنند:

– در نظر گرفتن ابعاد سه‌گانه پایداری (اقتصادی، اجتماعی و محیطی).

– در نظر گرفتن انتشار آلودگی‌های ناشی از واحدهای تولیدی، صنعتی و سیستم حمل‌ونقل و همچنین اعمال جریمه و تخفیف بر اساس میزان آلاینده‌ها.

این مقاله شش بخش دارد. بعد از بخش مقدمه به پیشینه تحقیق مربوط به زنجیره تامین پایدار پرداخته شده است. بخش سوم مربوط به روش‌شناسی پژوهش می‌باشد که در آن به مدل‌سازی ریاضی پرداخته و اندیس‌ها، متغیرها و ساختار اصلی مدل (تابع هدف و محدودیت‌ها) مشخص شده‌اند؛ در تابع هدف سه بعد پایداری اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی در نظر گرفته شده است. بخش چهارم مربوط به پیاده‌سازی مدل می‌باشد که در آن توضیحاتی در مورد الگوریتم فراابتکاری نهنگ و ژنتیک داده شده و این دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه شده است. در بخش پنجم، یافته‌ها شامل نتایج به دست آمده از نرم‌افزار مطلب که برای مقایسه این دو الگوریتم استفاده شده است، می‌باشد و با توجه به اهمیت موضوع جریمه کربن که در تابع هدف اول قرار گرفته با تغییر پارامتر تقاضا، تحلیل حساسیت شده است. بخش ششم، به بیان نتایج حاصل از این تحقیق اختصاص یافته است و پیشنهادهایی برای سایر محققین علاقه‌مند به این حوزه ارائه شده است.

¹ Fang et al.

در سال‌های اخیر، محققان زیادی به بررسی و ارایه مدل برای زنجیره تامین پرداخته‌اند. هانسزار^۱ (۲۰۱۲) اعمال یک مساله چند موردی موجودی-مسیریابی در یک مساله توزیع سوخت را پیشنهاد کرد. وی در مقاله‌اش رویکرد جدیدی برای حل مساله مسیریابی موجودی ارایه نمود. بن یوسف و همکاران^۲ (۲۰۱۳) نیز با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان تامین‌کنندگان، رویکردی مبتنی بر لاگرانژ برای طراحی زنجیره تامین ارایه نمودند. آن‌ها با توجه به قابلیت اطمینان تامین‌کنندگان، در مورد مکان‌یابی مراکز توزیع، تخصیص تامین‌کنندگان به مراکز توزیع و تخصیص خرده‌فروشان به مراکز توزیع تصمیم‌گیری نموده‌اند. فلاح تقی و همکاران^۳ (۲۰۱۵) در مقاله خود شبکه زنجیره تامین را به صورت یکپارچه طراحی کرده‌اند. شبکه پیشنهادی آن‌ها یک شبکه چندسطحی شامل مراکز مونتاژ، مشتریان، جمع‌آوری و انهدام می‌باشد. دهقانی و همکاران^۴ (۲۰۱۶) به مدل‌سازی مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی در یک زنجیره تامین یکپارچه تحت شرایط عدم قطعیت پرداخته‌اند. در مساله مورد بررسی آن‌ها، یک مدل یکپارچه برای زنجیره تامین با سه سطح تامین‌کننده، تولیدکننده و مشتری جهت مکان‌یابی و مسیریابی وسایل نقلیه و با در نظر گرفتن ملاحظات موجودی (به صورت مدل غیرخطی عدد صحیح مختلط)، ارایه شده است. همچنین، آن‌ها جهت حل مدل از الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده استفاده کرده‌اند. ایوانو و همکاران^۵ (۲۰۱۷) با در نظر گرفتن شرایط پویا، به ارایه مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی زنجیره تامین پرداخته‌اند. آن‌ها با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی دوره‌ای و پویا، یک زنجیره تامین چندسطحی و چند دوره‌ای را بررسی کرده و برای آن یک مدل ریاضی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره تامین ارایه دادند. لین و همکاران^۶ (۲۰۱۸) برای مساله مکان‌یابی-تخصیص در شبکه زنجیره تامین گردآوری خودروهای فرسوده، یک مدل ریاضی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های مکان‌یابی و تخصیص، ارایه دادند. همچنین، آن‌ها جهت حل مدل، الگوریتم بهبودیافته کلونی زنبور را ارایه کردند. در زمینه پایداری و زنجیره تامین پایدار نیز تحقیقات زیادی انجام شده است. دویکا و همکاران^۷ (۲۰۱۴) به طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته پایدار پرداخته‌اند. آن‌ها برای این مساله، یک مدل ریاضی چند هدفه با در نظر گرفتن ابعاد محیطی، اقتصادی و اجتماعی ارایه داده و برای حل آن از الگوریتم‌های فراابتکاری امپریالیسم و جستجوی همسایگی متغیر استفاده کرده‌اند. پیله وری و همکاران^۸ (۲۰۱۳) به ارزیابی رضایت کاربران رایانش ابری پرداخته‌اند. آن‌ها برای در نظر گرفتن ویژگی‌ها و ارزیابی رضایت کاربران از رایانش ابری در یک شرکت ارایه‌دهنده خدمات اینترنت (ISP) در ایران، یک مدل مفهومی ایجاد نمودند. برای جلوگیری از ابهام ناشی از روش‌های زبانی در این مدل ارزیابی، از سیستم استنتاج فازی (FIS) استفاده شد. ارواندان و پانرسلاوم^۹ (۲۰۱۴) با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی و با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت تسهیلات، به ارایه مدل چندسطحی و چندکالایی برای زنجیره تامین پایدار پرداخته‌اند که در پژوهش آن‌ها به عوامل اقتصادی پرداخته نشده است. باتاچارجی و کروز^{۱۰} (۲۰۱۵) به بررسی مساله پایداری اقتصادی در زنجیره تامین حلقه بسته پرداخته‌اند. آن‌ها جهت بررسی و ارزیابی اعتبار اقتصادی، یک سیستم تصمیم‌گیری یکپارچه طراحی کرده‌اند که بر اساس دوره زندگی محصول و مشتری، تصمیمات بهینه را ارایه می‌دهد. ژاله‌چیان و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۶) زنجیره تامین حلقه بسته پایدار را با اهداف اقتصادی، اجتماعی و محیطی ارایه دادند. آن‌ها ابتدا یک مدل ریاضی سه هدفه بر اساس ابعاد اقتصادی، اجتماعی و محیطی ارایه دادند و سپس مدل را در محیط نرم‌افزار گمز و همچنین با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری حل نموده‌اند. شهریاری و همکاران^{۱۲} (۲۰۱۶) شرکت فولاد مبارکه به عنوان مطالعه موردی انتخاب کردند و با استفاده از روش DEMATEL، پژوهشی در مورد تاثیر سیستم‌های اطلاعاتی بر پایداری زنجیره تامین را انجام دادند. داده‌ها از طریق مصاحبه تخصصی با ۳۲ نفر از متخصصان و مدیران ارشد شرکت فولاد مبارکه به دست آمد و سپس با استفاده از روش DEMATEL مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که کسب‌وکار الکترونیکی، تجارت الکترونیکی و JIT موثرترین سیستم اطلاعاتی در مورد پایداری زنجیره تامین هستند و عوامل اقتصادی و محیطی موثرترین عوامل زنجیره تامین پایدار می‌باشند. نورجان نیا و همکاران^{۱۳} (۲۰۱۷) به ارایه مدل ریاضی برای زنجیره تامین سبز پایدار پرداخته‌اند. آن‌ها در مدل ریاضی خود، هزینه‌های محیطی و سایر هزینه‌های زنجیره تامین را به عنوان کمینه‌سازی هدف مدل ریاضی در نظر گرفته‌اند. داس^{۱۴} (۲۰۱۸) به بررسی سیستم ناب در طراحی زنجیره تامین پایدار پرداخته است. هدف از این تحقیق این است که به منظور بهبود عملکرد پایداری کلی کسب‌وکار، برنامه‌های کاربردی سیستم‌های ناب را در طراحی مدل و برنامه‌ریزی

¹ Hanczar

² Benyoucef et al.

³ Fallah-Tafti et al.

⁴ Dehghani et al.

⁵ Ivanov et al.

⁶ Lin et al.

⁷ Devika et al.

⁸ Pilevari et al.

⁹ Aravendan and Panneerselvam

¹⁰ Bhattacharjee and Cruz

¹¹ Zhalechian et al.

¹² Shahrari et al.

¹³ Nurjan Nia et al.

¹⁴ Das





یک زنجیره تامین ادغام نماید. این مطالعه بر مبنای ادبیات موضوع، تهیه‌کنندگان مواد زنجیره تامین پایدار را شناسایی می‌کند. ساوردا و همکاران^۱ (۲۰۱۸) نیز زنجیره تامین پایدار را مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها جهت حفظ منابع تجدیدپذیر، مدیریت پایدار زنجیره تامین را به صورت مرور ادبیات و تحقیقات پیشین، بررسی کرده‌اند. آن‌ها علاوه بر مدل‌های پایداری زنجیره تامین، روش‌های شبیه‌سازی و حل مدل‌های مورد بررسی را نیز دسته‌بندی نموده‌اند. ماناوالان و جایا کریشنا^۲ (۲۰۱۹) به مرور کاربرد اینترنت اشیا در زنجیره تامین پایدار برای نیازهای صنایع بر اساس انقلاب صنعتی پرداخته‌اند. هدف از مقاله آن‌ها، بررسی جنبه‌های مختلف *IoT*، *ERP*، *SCM* و کشف فرصت‌های بالقوه موجود در زنجیره تامین پایدار است. وفایی نژاد و همکاران^۳ (۲۰۱۹) به ارزیابی مدل ریاضی چندهدفه برای زنجیره تامین سبز پایدار پرداخته‌اند. آن‌ها در مدل خود، یک زنجیره تامین چند دوره‌ای و چندکالایی را مدل‌سازی کرده و از روش محدودیت اسپیلون جهت حل مدل استفاده کردند. ژن و همکاران^۴ (۲۰۱۹) مساله برنامه‌ریزی زنجیره تامین سبز و پایدار را بررسی کردند. این مطالعه یک چشم‌انداز یکپارچه‌سازی برای توسعه یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته سبز و پایدار^۵ تحت تقاضای نامشخص ارائه می‌دهد. در این مطالعه، یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه با اهداف کمینه‌سازی انتشار گاز دی‌اکسیدکربن^۶ و کل هزینه عملیاتی ارائه شده است. همچنین، تصمیماتی در مورد سطح محیط‌زیست و عوامل مؤثر بر سطح ظرفیت تأسیسات نیز در نظر گرفته شده است. به علاوه، روش مبتنی بر سناریو برای نشان دادن تقاضای نامشخص در مدل برنامه‌نویسی تصادفی اتخاذ شده است و همچنین از روش آزادسازی لاگرانژ برای حل مدل استفاده گردید. گوویندان و همکاران^۷ (۲۰۲۰) در یک مقاله مروری، به بررسی مساله زنجیره تامین پایدار چندسطحی پرداختند و یک دسته‌بندی سیستماتیک از این پدیده ارائه کردند. نی و همکاران^۸ (۲۰۲۰) نیز به ارزیابی مدل بهینه‌سازی زنجیره تامین با هدف کاهش انتشار کربن پرداختند. آن‌ها یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط طراحی نموده و توسط یک الگوریتم برنامه‌نویسی طراحی شده پویا حل کردند؛ اما پایداری زنجیره تامین را در نظر نگرفتند. کیانی و سمویی^۹ (۲۰۲۰) با در نظر گرفتن تخفیف در زنجیره تامین حلقه بسته، مقاله‌ای در مورد بازیافت مسیریابی-موجودی پویای چندهدفه برای داروهای مختلف انجام داده‌اند. اهداف آن‌ها در این تحقیق، حداقل کردن هزینه‌ها و کاهش میزان آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار دی‌اکسیدکربن می‌باشد. این اهداف با دو الگوریتم هیبریدی فراابتکاری به نام‌های فوریدیسوبستر ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع ۲ (*NSGAI-FW*) و شبیه‌سازی تبرید چندهدفه (*MOSA*) حل گردیده است. مقایسه‌ها و نتایج محاسباتی تحقیق آن‌ها نشان داد که الگوریتم *NSGAI-FW* کاراتر از الگوریتم *MOSA* می‌باشد. رادفر و نظافتی^{۱۰} (۲۰۱۴) به مقاله‌ای در مورد طبقه‌بندی مشتریان اینترنت بانک با کمک الگوریتم‌های داده‌کاوی پرداخته‌اند. آن‌ها در این پژوهش از انواع مدل‌سازی استفاده نمودند که هدف از این کار، استخراج دانش با توجه به داده‌های آموزشی از الگوریتم انتخابی است. فتحی و همکاران^{۱۱} (۲۰۲۰) به ارزیابی مدل‌سازی ریاضی شبکه زنجیره تامین پایدار در وضعیت عدم قطعیت و حل آن با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری پرداختند. هدف از این مقاله، به حداقل رساندن آثار زیست‌محیطی و حداکثر سازی آثار اجتماعی و اقتصادی بود. نتایج این تحقیق نشان داد که در معیار *MID*، الگوریتم ژنتیک چند هدفه بر الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه برتری دارد و در معیارهای دیگر رابطه معناداری وجود ندارد. سهرابی و همکاران^{۱۲} (۲۰۱۸) مقاله‌ای در مورد مدل‌سازی زنجیره تامین حلقه بسته سبز با در نظر گرفتن ریسک تامین انجام داده‌اند. هدف از این تحقیق، حداقل کردن هزینه کل، حداقل کردن اثرات زیست‌محیطی و حداقل کردن ریسک مواد تامین‌کننده بود. عبیدی و حاجی آقای کشتلی^{۱۳} (۲۰۱۹) با در نظر گرفتن مسیریابی وسایل نقلیه و با استفاده از الگوریتم نوین ترکیبی بهینه‌سازی نهنگ، به بررسی مدل احتمالی چند هدفه برای زنجیره تامین حلقه بسته مدار پایدار پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد که مقایسه دو الگوریتم ژنتیک و الگوریتم نهنگ نشان می‌دهد که الگوریتم نهنگ اثربخش‌تر است. محمودی و همکاران^{۱۴} (۲۰۱۹) با در نظر گرفتن مسایل کنترل موجودی و قیمت‌گذاری، به ارزیابی یک مدل ریاضی جهت انتخاب تامین‌کننده در زنجیره تامین پرداخته‌اند. آن‌ها با در نظر گرفتن هم‌زمان دو مساله کنترل موجودی و قیمت‌گذاری در زنجیره تامین و با استفاده از نرم‌افزار کدنویسی گمز، به ارزیابی یک مدل برای انتخاب تامین‌کنندگان پرداخته‌اند. لذا این پژوهش توانسته است در قالب مساله انتخاب تامین‌کننده و با در نظر گرفتن هم‌زمان پارامترهای موجودی، قیمت‌گذاری و خرید مواد اولیه، به نتایج معتبری دست یابد. قهرمانی نهر^{۱۵} (۲۰۲۰) به بررسی بهبود اثربخشی و کارایی زنجیره تامین حلقه‌ی بسته با رویکرد الگوریتم بهینه‌سازی وال و رمزگذاری جدید مبتنی بر اولویت پرداخته است. هدف اصلی مقاله وی، تعیین تعداد و مکان بهینه تسهیلات بالقوه و همچنین تعیین مقدار بهینه جریان با در نظر گرفتن کاهش هزینه‌های کل شبکه زنجیره تامین می‌باشد. برای

¹ Saaverda et al.

² Manavalan and Jayakrishna

³ Vafaenezhad et al.

⁴ Zhen et al.

⁵ CLSC

⁶ CO₂

⁷ Govindan et al.

⁸ Ni et al.

⁹ Kiani and Samouei

¹⁰ Radfar and Nezafati

¹¹ Fathi et al.

¹² Sohrabi et al.

¹³ Abdi and Hajiaghahi Keshteli

¹⁴ Mahmudi et al.

¹⁵ Ghahremani Nahr

حل این مدل، از الگوریتم فرا ابتکاری بهینه‌سازی وال با رمزگذاری جدید مبتنی بر اولویت استفاده شده است. برای نشان دادن کارایی بالای رمزگذاری مبتنی بر اولویت، ۲۱ مساله نمونه در سه سایز کوچک، متوسط و بزرگ طراحی شده و نتایج به دست آمده از رمزگذاری‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقایسه‌ها میان رمزگذاری‌های مساله، با در نظر گرفتن دو شاخص میانگین تابع هدف و میانگین زمان محاسباتی، نشان از کارایی بالای رمزگذاری پیشنهادی در مقایسه با دیگر رمزگذاری‌ها دارد.

۳- روش پژوهش

در این بخش، مدل ریاضی ارائه شده را به تفکیک مورد بررسی قرار خواهیم داد. در ابتدا اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل بررسی می‌شوند و سپس ساختار کلی آن‌ها ارائه می‌گردد. در ادامه، با استفاده از یک روش رتبه‌بندی اعداد فازی، مدل فازی به مدل قطعی نظیرش تبدیل خواهد شد. قلمرو محدوده زمانی آن در بازه نه ماه در نظر گرفته شده است.

۳-۱- اندیس‌ها و پارامترهای مدل

جدول ۱- اندیس‌ها و پارامترهای مدل.
Table 1- Indices and model parameters.

اندیس	شرح اندیس	اندیس	شرح اندیس
I	اندیس مجموعه نقاط ثابت برای مراکز تولید $i \in I$	J	اندیس مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز توزیع
N_j	مجموعه ندهای مراکز توزیع	L	اندیس مجموعه نقاط ثابت برای مشتریان $l_1, l_2 \in L$
N_l	مجموعه ندهای مراکز مشتری	Pf	قیمت سوخت یک واحد حجم
S	اندیس مجموعه محصولات $s \in S$	K	اندیس وسایل نقلیه $k \in K$
dp_{is}	متوسط مواد خطرناک استفاده شده در مرکز تولید ith برای تولید هر واحد از محصول s	w_k	وزن وسیله نقلیه kth
AS	حجم مصرف سوخت در واحد فاصله در هر واحد وزن، سرعت و مسافت	V_k	سرعت وسیله نقلیه kth
w_c	وزن گازهای آلاینده منتشر شده در مصرف هر لیتر سوخت	Pc	قیمت متوسط هر واحد گاز منتشر شده
L_{ij}	مسافت بین مرکز تولیدکننده i و مرکز توزیع کننده j	LQ_{ij}	مسافت بین انبار تولیدکننده i و مرکز توزیع j
Vol_s	حجم محصول S	Ca_j	ظرفیت مرکز توزیع در محل j
L_i	مسافت بین مرکز تولیدکننده i و انبار خودش	L_{ll2}	مسافت بین مرکز مشتری l_1 و مرکز مشتری l_2
λ_{it}^s	میزان کربن منتشر شده برای نگهداری هر واحد کالای sth در انبار تولیدکننده ith در دوره tth	QW_k	ظرفیت وزنی وسیله نقلیه kth
α_k	ضریب تغییر سرعت وسیله نقلیه kth به ازای هر واحد وزن بیشتر	W_s	وزن محصول s
d_{is}^t	میزان تقاضای فازی محصول s توسط مشتری I در دوره t (میزان تقاضای فازی تحویل به مشتری)	QV_k	ظرفیت حجمی وسیله نقلیه kth
α_j	تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده در مرکز توزیع jth	f_j	هزینه فازی احداث مرکز توزیع در محل j
α_{it}^s	میزان کربن منتشر شده برای تولید یک واحد کالای s در کارخانه i در دوره t	T	اندیس دوره $t \in T$
C_{MAX}	بیشترین میزان مجاز برای انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در بخش تولید و انبار	L_{jl}	مسافت بین مرکز توزیع j و مرکز مشتری l
dI_i	متوسط روزهای کاری از دست‌رفته ناشی از آسیب کار در مرکز تولید ith به ازای یک واحد تولید از هر محصول	π	میزان جریمه به ازای هر واحد انتشار بیشتر از حد مجاز گاز دی‌اکسیدکربن
SP_{is}	متوسط ضایعات ایجاد شده در مرکز تولید ith برای تولید هر واحد از محصول s	θ_i	فاکتور وزنی آسیب کار





Z_j : اگر توزیع کننده در نقطه j تاسیس شود برابر با ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

y_{ik}^t : اگر وسیله نقلیه kth از تولیدکننده i به انبار آن در دوره t برود برابر با ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

y_{ijk}^t : اگر وسیله نقلیه kth از تولیدکننده i به توزیع کننده j در دوره t برود برابر با ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

$y_{ijk}^{t_1}$: اگر وسیله نقلیه kth از انبار تولیدکننده i به توزیع کننده j در دوره t برود برابر با ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

$y_{ijk}^{t_2}$: اگر وسیله نقلیه kth از توزیع کننده j به مشتری i در دوره t برود برابر با ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

$y_{ij2k}^{t_1}$: اگر وسیله نقلیه kth از توزیع کننده j_1 به توزیع کننده j_2 در دوره t برود برابر با ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

$y_{i12k}^{t_1}$: اگر وسیله نقلیه kth از مشتری i_1 به مشتری i_2 در دوره t برود برابر با ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

xp_i^{ts} : مقدار کالای s که توسط تولیدکننده i در دوره t تولید می شود.

x_{ik}^{ts} : مقدار کالای s که توسط وسیله نقلیه kth از تولیدکننده i به انبار آن در دوره t ارسال می شود.

x_{ijk}^{ts} : مقدار کالای s که با وسیله نقلیه kth از تولیدکننده i به مراکز توزیع در دوره t ارسال می شود و ابتدا توزیع کننده j را ملاقات می کند.

xi_{ijk}^{ts} : مقدار کالای s که با وسیله نقلیه kth از انبار تولیدکننده i به مراکز توزیع در دوره t ارسال می شود و ابتدا توزیع کننده j را ملاقات می کند.

xw_{ijk}^{ts} : مقدار کالای s که توسط وسیله نقلیه kth از تولیدکننده i به مراکز توزیع در دوره t ارسال می شود و ابتدا مرکز توزیع کننده j را ملاقات کرده و به مرکز توزیع jth تحویل داده می شود.

xiw_{ijk}^{ts} : مقدار کالای s که توسط وسیله نقلیه kth از انبار تولیدکننده i به مراکز توزیع در دوره t ارسال می شود و ابتدا مرکز توزیع کننده j را ملاقات کرده و به مرکز توزیع jth تحویل داده می شود.

xw_{ij2k}^{ts} : مقدار کالای s که با وسیله نقلیه kth که در دوره t از توزیع کننده j_1 به توزیع کننده j_2 سفر کرده و به توزیع کننده j_2 تحویل داده می شود.

wj_{jk}^{ts} : مقدار بار وسیله نقلیه kth از محصول s در دوره t قبل از اینکه مرکز توزیع jth را ملاقات کند.

x_{ijk}^{ts} : مقدار کالای s که توسط وسیله نقلیه kth از توزیع کننده j به مراکز مشتری در دوره t ارسال شده و در ابتدا مشتری i را ملاقات می کند.

xw_{ijk}^{ts} : مقدار کالای s که توسط وسیله نقلیه kth از توزیع کننده j به مراکز مشتری در دوره t ارسال شده و در ابتدا مشتری i را ملاقات کرده و به مرکز مشتری lit تحویل داده می شود.

xw_{i12k}^{ts} : مقدار کالای s که توسط وسیله نقلیه kth که در دوره t از مشتری i_1 به مشتری i_2 سفر کرده و به مشتری i_2 تحویل داده می شود.

wl_{ik}^{ts} : مقدار بار وسیله نقلیه kth از محصول s در دوره t قبل از اینکه مشتری lit را ملاقات کند.

B : برابر با ۱ است، اگر میزان گاز دی اکسیدکربن منتشر شده از میزان مجاز تعیین شده بیشتر باشد، در غیر این صورت صفر می باشد.

$$cost1 = \sum_{j=1}^J f_j z_j. \quad (1)$$

رابطه (۱) هزینه‌های تاسیس تسهیلات در زنجیره تامین را نشان می‌دهد. همچنین هزینه‌های مربوط به انتشار آلاینده‌ها به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$cost2 = \left(\sum_{k=1}^K (v_f^k \alpha_k^k v_k) * \left(\sum_{s=1}^S \left(\sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^I \left(x_{ik}^{ts} * L_i + \sum_{j=1}^J \left(x_{ijk}^{ts} * L_{Q_{ij}} + x_{ijk}^{ts} * L_{ij} \right) \right) * w_s \right) \right) + \right. \right. \\ \left. \left. \sum_{j=1}^J \left(w_{jk}^{ts} + \sum_{l=1}^L x_{jlk}^{ts} * L_{jl} \right) * w_s + \sum_{l=1}^L \left((w_{lk}^{ts} + \sum_{j=1}^J x_{w_{jlk}}^{ts}) + \sum_{ll=1}^L x_{w_{ll2k}}^{ts} * L_{ll2} \right) * w_s \right) * (p_f + w_c * p_c) \right) + \\ \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \left((x_{p_i}^{ts} * \alpha_{it}^s) + \left(\sum_{k=1}^K x_{ik}^{ts} - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J x_{ijk}^{ts} \right) * \lambda_{it}^s \right). \quad (2)$$

۳-۳-۱- توابع هدف

تفاضل میزان مجاز انتشار گاز دی‌اکسیدکربن و میزان کل برآورد شده زنجیره به صورت $cost2 < cmax$ می‌باشد. در صورتی که $cost2 > cmax$ باشد، شرکت باید برای مقدار اضافی انتشار، جریمه پرداخت کند. در صورتی که $cost2 < cmax$ باشد، شرکت برای مابه‌التفاوت انتشار، از تخفیف مالیاتی برخوردار می‌شود. میزان تخفیف مالیاتی به صورت $\rho \leq 0$ است. به این معنا که شرکت در صورت داشتن شرایط لازم ($cost2 < cmax$) به مقدار $\rho(cost2 - cmax)$ واحد پولی از تخفیف مالیاتی برخوردار می‌شود که این میزان تخفیف به صورت کسر از هزینه در تابع هدف لحاظ شده است. با توجه به توضیحات داده شده، تابع هدف اول به صورت زیر خواهد بود:

$$min z1 = \sum_{j=1}^J f_j z_j + \pi * B * (cost2 - c_{max}) - \rho * (1 - B) * (cost2 - c_{max}). \quad (3)$$

رابطه (۳) نشان‌دهنده تابع هدف اول است که عبارت است از کمیته‌سازی هزینه‌های احداث تسهیلات و هزینه‌های سوخت وسایل نقلیه و هزینه‌های زیست‌محیطی حاصل از انتشار گازهای آلاینده.

$$max z2 = \sum_{t \in T} \left(\sum_{j \in J} \alpha_j z_j \right) - \theta_1 * \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} d_{i1} * x_{i1}^{ts}. \quad (4)$$

رابطه (۴) نشان‌دهنده تابع هدف دوم است که این هدف عبارت است از حداکثرسازی مسئولیت اجتماعی یا فواید اجتماعی.

$$min z3 = \theta_w * \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} s_{p_{is}} * x_{p_{is}}^{ts} + \theta_h * \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} d_{p_{is}} * x_{p_{is}}^{ts}. \quad (5)$$

رابطه (۵) تابع هدف سوم را نشان می‌دهد که این تابع هدف، به صورت کمیته‌سازی تأثیرات زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است.

۳-۳-۲- محدودیت‌های مدل

$$min z3 = \theta_w * \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} s_{p_{is}} * x_{p_{is}}^{ts} + \theta_h * \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} d_{p_{is}} * x_{p_{is}}^{ts}, \quad (6)$$

$$\sum_j y_{jk}^t > 1 \quad \forall l, t, \quad (7)$$

$$\sum_k y_{ik}^t = \sum_j y_{ijk}^t \quad \forall i, t, \quad (8)$$

$$\sum_k \left(\sum_i (y_{ijk}^t + y_{ijlk}^t) + \sum_m y_{mjk}^t \right) = \sum_k \left(\sum_l y_{ilk}^t + \sum_{jl} y_{jlk}^t \right) \quad \forall j, t, \quad (9)$$

$$\sum_k \sum_j y_{jlk}^t = \sum_k \left(\sum_m y_{lmk}^t + \sum_{ll} y_{llk}^t \right) \quad \forall l, t, \quad (10)$$

$$\sum_k \left(\sum_j x_{w_{jlk}}^{ts} + \sum_{ll} x_{w_{llk}}^{ts} \right) = d_{ls}^t \quad \forall l, t, s, \quad (11)$$

$$w_{llk}^{ts} - w_{ll2k}^{ts} \geq \sum_j \left(x_{w_{jlk}}^{ts} * y_{jlk}^t \right) + \sum_l \left(x_{w_{llk}}^{ts} * y_{llk}^t - 1 - y_{ll2k}^t \right) \quad \forall l, l \in L \quad \forall k, t, s, \quad (12)$$





$$xp_i^{ts} = \sum_k (x_{ik}^{ts} + \sum_j x_{ijk}^{ts}) \quad \forall i, t, s, \quad (13)$$

$$\sum_k \left(\sum_i (xw_{ijk}^{ts} + xiw_{ijk}^{ts}) + \sum_{jl} xw_{jlk}^{ts} \right) = \sum_k \sum_l x_{jlk}^{ts} \quad \forall j, t, s, \quad (14)$$

$$w_{j1k}^{ts} - w_{j2k}^{ts} \geq \sum_i (xw_{ijk}^{ts} * y_{ijk}^t + xwi_{ijk}^{ts} * yi_{ijk}^t) + \sum_j (xw_{jlk}^{ts} * y_{jlk}^t) - M * (1 - y_{j12k}^t) \quad \forall j, l, j, 2 \in J \times J \quad \forall k, t, s, \quad (15)$$

$$x_{ik}^{ts} \leq M * y_{ik}^t \quad \forall i, k, t, s, \quad (16)$$

$$x_{ijk}^{ts} \leq M * y_{ijk}^t \quad \forall i, j, k, t, s, \quad (17)$$

$$xi_{ijk}^{ts} \leq M * yi_{ijk}^t \quad \forall i, j, k, t, s, \quad (18)$$

$$xw_{ijk}^{ts} \leq M * y_{ijk}^t \quad \forall i, j, k, t, s, \quad (19)$$

$$xiw_{ijk}^{ts} \leq M * yi_{ijk}^t \quad \forall i, j, k, t, s, \quad (20)$$

$$xw_{jl2k}^{ts} \leq M * y_{jl2k}^t \quad \forall j, l, j, 2, k, t, s, \quad (21)$$

$$x_{jlk}^{ts} \leq M * y_{jlk}^t \quad \forall l, j, k, t, s, \quad (22)$$

$$xw_{l12k}^{ts} \leq M * y_{l12k}^t \quad \forall l, l, 2, k, t, s, \quad (23)$$

$$\sum_{j1 \in N} \sum_{j2 \in N} y_{j1j2k}^t \leq |N| - 1 \quad \forall N \in NJ; |N| \geq 2 \quad \forall k, t, \quad (24)$$

$$\sum_{l1 \in N} \sum_{l2 \in N} y_{l1l2k}^t \leq |N| - 1 \quad \forall N \in NL; |N| \geq 2 \quad \forall k, t, \quad (25)$$

$$\sum_i \sum_s (x_{ik}^{ts} * w_s) \leq QW_k \quad \forall k, t, \quad (26)$$

$$\sum_i \sum_s (x_{ik}^{ts} * vol_s) \leq QV_k \quad \forall k, t, \quad (27)$$

$$\sum_i \sum_s (xi_{ijk}^{ts} * w_s) \leq QW_k \quad \forall j, k, t, \quad (28)$$

$$\sum_i \sum_s (xi_{ijk}^{ts} * vol_s) \leq QV_k \quad \forall j, k, t, \quad (29)$$

$$\sum_i \sum_s (x_{ijk}^{ts} * w_s) \leq QW_k \quad \forall j, k, t, \quad (30)$$

$$\sum_i \sum_s (x_{ijk}^{ts} * vol_s) \leq QV_k \quad \forall j, k, t, \quad (31)$$

$$\sum_j \sum_s (x_{jlk}^{ts} * w_s) \leq QW_k \quad \forall l, k, t, \quad (32)$$

$$\sum_j \sum_s (x_{jlk}^{ts} * vol_s) \leq QV_k \quad \forall l, k, t, \quad (33)$$

$$\sum_s \left((w_{l1k}^{ts} + \sum_j (xw_{jlk}^{ts} * y_{jlk}^t) + \sum_l xw_{l1k}^{ts} * y_{l1k}^t) * w_s \right) \leq QW_k \quad \forall l, k, t, \quad (34)$$

$$\sum_s \left((w_{l1k}^{ts} + \sum_j (xw_{jlk}^{ts} * y_{jlk}^t) + \sum_l xw_{l1k}^{ts} * y_{l1k}^t) * vol_s \right) \leq QV_k \quad \forall l, k, t, \quad (35)$$

$$\sum_s \sum_k \left(\sum_i (xiw_{ijk}^{ts} + xw_{ijk}^{ts}) + \sum_{jl} xw_{jlk}^{ts} \right) \leq ca_j \quad \forall j, t, \quad (36)$$

$$y_{ijk}^t \leq z_j \quad \forall i, j, k, t, \quad (37)$$

$$yi_{ijk}^t \leq z_j \quad \forall i, j, k, t, \quad (38)$$

$$y_{j1j2k}^t \leq z_{j1} * z_{j2} \quad \forall j, l, j, 2, k, t, \quad (39)$$

$$y_{jlk}^t \leq z_j \quad \forall l, j, k, t, \quad (40)$$

$$\sum_j z_j \geq 1, \quad (41)$$

$$z_j * y_{ik}^t * y_{ijk}^t * yi_{ijk}^t * y_{jlk}^t * y_{j1j2k}^t * y_{l12k}^t * y_{pik}^t \in \{0, 1\}, \quad (42)$$

$$xp_i^{ts}, x_{ijk}^{ts}, x_{ik}^{ts}, xi_{ijk}^{ts}, xw_{ijk}^{ts}, xiw_{ijk}^{ts}, w_{j1k}^{ts}, xw_{j12k}^{ts}, x_{jlk}^{ts}, xw_{jlk}^{ts}, xw_{l12k}^{ts}, w_{l1k}^{ts} \geq 0. \quad (43)$$



محدودیت (۶) تضمین می‌کند که کلیه مشتریان در همه دوره‌ها حداقل توسط یک وسیله نقلیه ملاقات شوند. **محدودیت‌های (۹)**-**(۷)** نشان می‌دهند که وسایل نقلیه وارد شده به مراکز و انبارهای تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان حتماً از این نقاط خارج می‌شوند. **محدودیت (۱۰)** تضمین می‌کند که همه تقاضای مشتریان پاسخ داده شود. **محدودیت (۱۱)** مقدار موجودی کالای s در دوره t در بار وسیله نقلیه kth ، قبل از ملاقات مراکز مشتری را محاسبه می‌کند. **محدودیت‌های (۱۲)** و **(۱۳)** تعادل جریان کالا را در ندها تضمین می‌کنند. **محدودیت (۱۴)** مقدار موجودی کالای s در دوره t در بار وسیله نقلیه kth ، قبل از ملاقات مراکز توزیع را محاسبه می‌کند. **محدودیت‌های (۲۳)**-**(۱۵)** تضمین می‌کنند که در صورتی کالا توسط وسیله نقلیه از یک مرکز به مرکز دیگری فرستاده می‌شود که بین آن دو توسط آن وسیله نقلیه سفر صورت گرفته باشد. **محدودیت‌های (۲۴)** و **(۲۵)** از ایجاد زیرتور در هنگام سفر وسایل نقلیه، به ترتیب بین نقاط توزیع‌کننده و نقاط مشتری جلوگیری می‌کنند. **محدودیت‌های (۳۵)**-**(۲۶)** تضمین می‌کنند که کالای حمل شده توسط وسیله نقلیه k از ظرفیت وزنی و حجمی آن تجاوز نکند. **محدودیت (۳۶)** تضمین‌کننده محدودیت ظرفیت مراکز توزیع است که این محدودیت ظرفیت بر اساس تعداد اقلام کالاها می‌باشد. **محدودیت‌های (۴۰)**-**(۳۷)** تضمین می‌کنند، در صورتی بین دو مرکز توسط وسیله نقلیه سفر صورت می‌گیرد که آن مراکز تاسیس شده باشند. **محدودیت (۴۱)** تضمین می‌کند که حداقل یک مرکز برای تسهیلات توزیع‌کننده تاسیس گردد. **محدودیت‌های (۴۲)** و **(۴۳)** در رابطه با علامت و مقادیر مجاز برای متغیرهای تصمیم مدل می‌باشند.

همان‌طور که مشاهده می‌گردد، مدل ارائه شده، سه هدفه بوده و دارای پارامترهای فازی است. مدل فازی بر اساس روش رتبه‌بندی جیمینز به مدل قطعی نظیرش تبدیل می‌شود (جیمینز و همکاران^۱، ۲۰۰۷). **رابطه (۴۴)** شکل قطعی تابع هدف اول پس از دیفازی را نشان می‌دهد:

$$\min z1 = \sum_{j=1}^I \left(\frac{f_j^1 + 2f_j^2 + f_j^3}{2} \right) z_j + \pi * B * \text{cost}2 - C_{\max} - \rho * (1-B) * \text{cost}2 - C_{\max}. \quad (44)$$

اکثر مدل‌های طراحی شبکه لجستیک، از جمله مساله موردبحث در این مقاله، جزو مسایل سخت هستند. مساله طراحی شبکه لجستیک موردبررسی در این تحقیق نیز به دسته *Np-Hard* تعلق دارد. به علت پیچیدگی زمانی بالا، برای حل این‌گونه مسایل در اندازه‌های بزرگ نمی‌توان از روش‌های دقیق استفاده کرد. لذا در این تحقیق برای حل مساله موردبررسی از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ بر پایه آرشو پار تو استفاده گردیده است که نتایج این الگوریتم با نتایج الگوریتم شناخته‌شده ژنتیک مقایسه گردیده‌اند.

محدودیت (۴۵) پس از دیفازی:

$$\sum_k \left(\sum_j xw_{jlk}^{ts} + \sum_{ll} xw_{llk}^{ts} \right) = (1-\alpha) \frac{d_{ls}^{t1} + d_{ls}^{t2}}{2} + \alpha \frac{d_{ls}^{t2} + d_{ls}^{t3}}{2} \quad \forall l, t, s. \quad (45)$$

۴- پیاده‌سازی مدل

در این مقاله برای پیاده‌سازی مدل، از دور روش الگوریتم ژنتیک و نهنگ استفاده شده است.

۴-۱- الگوریتم ژنتیک

یکی از مشهورترین روش‌هایی که می‌توان برای بهینه‌سازی مسایل پیچیده استفاده کرد الگوریتم ژنتیک می‌باشد. الگوریتم ژنتیک برای حل مسایل *NP-HARD* استفاده می‌شود. الگوریتم ژنتیک از مفاهیم تکاملی زیست‌شناسی برای شبیه‌سازی استفاده می‌کند. ساختار داده اصلی الگوریتم ژنتیک به صورت برداری از ژن‌ها می‌باشد (که کروموزوم نامیده می‌شود) که هر کروموزوم نشان‌دهنده نمونه‌ای از یک راه‌حل برای مساله می‌باشد. اعضای کروموزوم که (ژن‌ها نامیده می‌شوند) شامل بخشی از راه‌حل مساله‌اند. کیفیت نمونه راه‌حل (یعنی یک کروموزوم) با نزدیکی آن به راه‌حل بهینه (که تابع برازندگی نامیده می‌شود) تعریف می‌شود. الگوریتم ژنتیک با استفاده از عملگرهای تکاملی (که عملگرهای ژنتیک هم نامیده می‌شوند) راه‌حل بهینه را جستجو می‌کند. در ابتدا با حالت تصادفی ضعیف،

¹ Jiménez et al.



کروموزوم‌ها برای نمایش مجموعه راه‌حل‌های مختلف تولید می‌شوند. سپس عملگرهای ژنتیک روی کروموزوم‌های ضعیف اعمال می‌شوند و کروموزوم‌های جدیدی را برای مرحله‌ی بعد تولید می‌کنند.

۲-۴- الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ

برای به‌روزرسانی موقعیت عوامل جستجو، دو حالت در نظر گرفته می‌شود. اگر متغیر $I/A > 1$ باشد، آن‌گاه عامل جستجوی تصادفی انتخاب می‌گردد و اگر $I/A < 1$ باشد آن‌گاه بهترین راه‌حل انتخاب می‌گردد. بسته به مقدار p ، نهنگ قادر به سوئیچ بین دو حرکت مارپیچ و دورانی است. در نهایت الگوریتم نهنگ پس از رسیدن به معیار رضایت تعیین شده، خاتمه می‌یابد. شکل ۱، ساختار الگوریتم نهنگ پیشنهادی را نشان می‌دهد؛ در تحقیق حاضر، این الگوریتم به‌صورت تلفیقی با یک رویه بهبود طراحی گردیده که رویه بهبود بر اساس ساختار جستجوی همسایگی متغیر^۱ است.

در این مقاله جهت تولید جواب‌های اولیه^۲ از یک رویکرد تصادفی استفاده شده است. جهت تولید جواب‌های اولیه، ابتدا به‌طور تصادفی ماتریس z_j ، تولید شده و سپس با توجه محدودیت‌های مدل، بقیه ماتریس‌های جواب (متغیرهای مدل) به‌صورت شدنی مقداردهی می‌گردند. به‌عنوان مثال، فرض کنید ماتریس‌های مکان‌یابی به‌صورت زیر تولید شده باشند:

جدول ۲- ماتریس z_j .

Table 2- Matrix z_j .

Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
1	0	1	1

حال جهت تعیین مقدار متغیر X_{ijk}^{ts} ، از هر مرکز تولید، تنها مقادیر X_{iik}^{ts} ، X_{i3k}^{ts} و X_{i4k}^{ts} می‌توانند بزرگ‌تر از صفر باشند و سایر اندیس‌ها، مقدار صفر می‌گیرند. همچنین، مقادیر موردنظر بر اساس ظرفیت وزنی و حجمی وسایل نقلیه در هر دوره به‌صورت تصادفی تعیین می‌شوند. از طرفی، مقادیر متغیر Y_{ijk}^t نیز بر اساس ارسال کالا (متغیر X_{ijk}^{ts}) برای مسیرهای ممکن (تولیدکنندگان به مراکز توزیع ۱، ۳ و ۴) تعیین می‌شوند. برای تعیین مقادیر متغیرهای XW_{ij2k}^{ts} ، XW_{ij1k}^{ts} و سایر متغیرهای مرتبط با میزان کالای ارسالی از توزیع‌کنندگان ۱، ۳ و ۴ به سایر ندها و همچنین متغیرهای مسیریابی وسایل نقلیه، بر اساس کالاهای دریافت شده توسط توزیع‌کنندگان مذکور و محدودیت‌های تعادل جریان، ظرفیت و محدودیت‌های مسیریابی انجام می‌شود.

۳-۴- رویه بهبود

پیاده‌سازی رویه بهبود در این تحقیق بر پایه جستجوی همسایگی متغیر^۳ است. ساختار جستجوی همسایگی متغیر از ۳ ساختار جستجوی همسایگی^۴ استفاده می‌کند. عملگرهای جستجوی همسایگی استفاده‌شده در ساختار جستجوی همسایگی متغیر، به شرح زیر هستند:

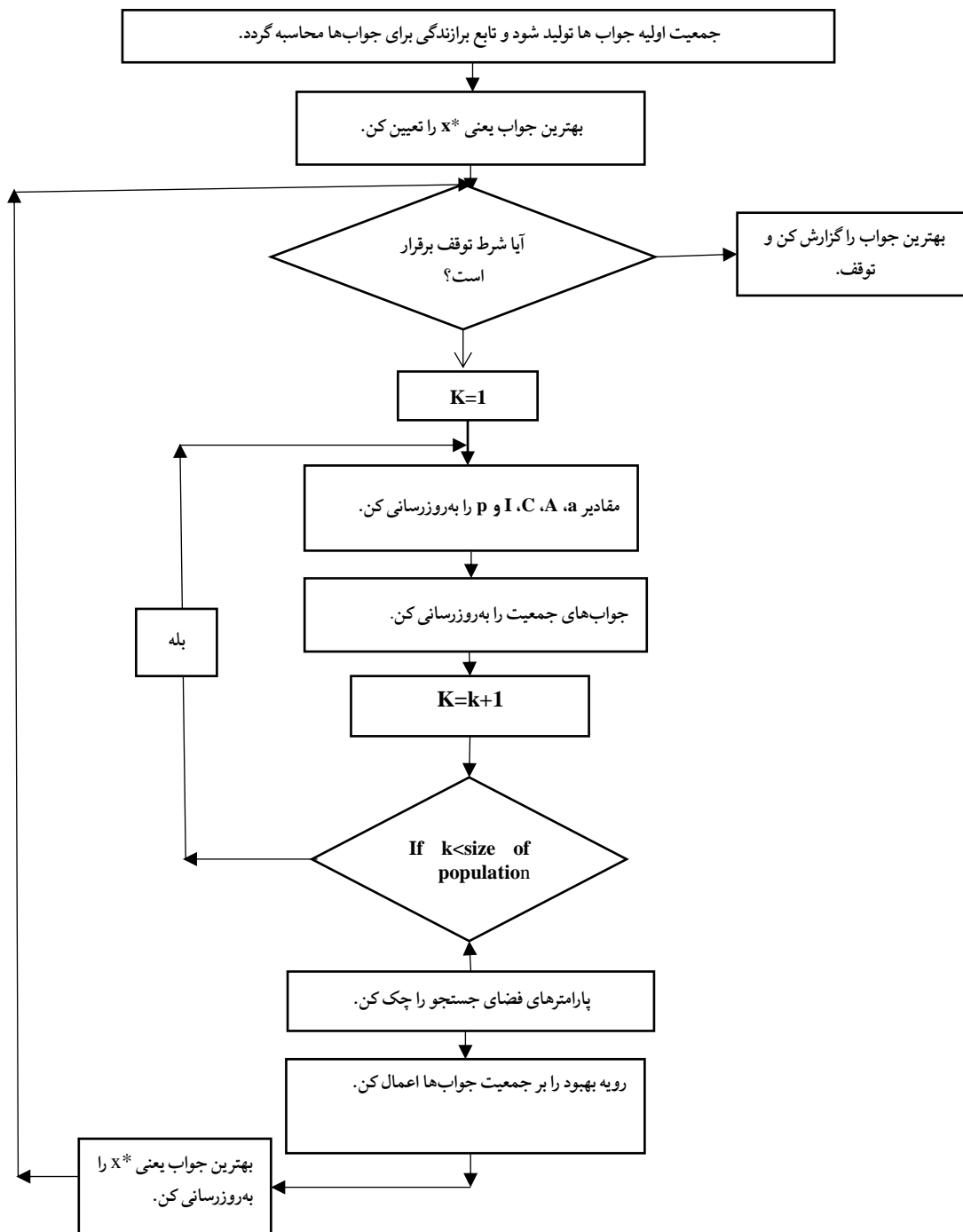
- عملگر جستجوی همسایگی اول: در این ساختار به تصادف یکی از تسهیلات توزیع‌کننده انتخاب گردیده و ماتریس مربوط به مکان‌یابی آن تغییر خواهد کرد.
- عملگر جستجوی همسایگی دوم: در این ساختار به تصادف دو اندیس از مراکز توزیع انتخاب گردیده و مقادیر مربوط به این دو اندیس در ماتریس مکان‌یابی، با یکدیگر تعویض می‌شود.
- عملگر جستجوی همسایگی سوم: در این ساختار به تصادف دو عدد از مراکز توزیع انتخاب گردیده و مقادیر بین این دو اندیس در ماتریس محدودیت‌های مسیریابی اقدام می‌شود.

¹ VNS

² Solution initialization method

¹ Variable Neighborhood Search (VNS)

² Neighborhood Search Structure (NNS)



شکل ۱- ساختار پیشنهادی الگوریتم بهینه سازی الگوریتم نهنگ.

Figure 1- Proposed structure of the whale algorithm optimization algorithm.

۴-۴- به روزرسانی جواب ها و پارامترهای جستجو

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (46)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (47)$$

در رابطه (۴۶) و (۴۷)، \vec{D} ، فضای جستجو؛ \vec{C} و \vec{A} ، ضریب؛ $\vec{X}^*(t)$ ، بهترین جواب در تکرار t ؛ $\vec{X}(t)$ ، جواب های تکرار t و $\vec{X}(t+1)$ جواب های تکرار $t+1$ می باشند.

همچنین جهت به روزرسانی، \vec{C} و \vec{A} از روابط زیر استفاده می گردد:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (48)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r} \quad (49)$$



در رابطه (۴۸)، \vec{a} با مقدار اولیه ۲ شروع شده و به صورت خطی در هر تکرار کاهش می‌یابد؛ همچنین، \vec{r} ، مقدار تصادفی در بازه $[0,1]$ است. در پروسه به‌روزرسانی، جواب‌ها نشدنی شده و نیازمند اعمال یک رویه جهت تبدیل جواب‌های نشدنی به جواب‌های شدنی است. در این راستا، ابتدا برای متغیر Y در هر جواب، خانه‌های غیر صفر با رعایت محدودیت‌های مربوطه به صورت \circ و \bullet در آمده و سپس مقادیر خانه‌های متغیر X بر اساس مقادیر متغیر Y ، با توجه به محدودیت‌های مدل، مقداردهی می‌گردند.

۴-۵- انتخاب جواب‌های نسل بعد و آرشیو پارتو

در هر مرحله از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ، از بین جواب‌های قبلی و جواب‌های جدید، N (اندازه جمعیت) با کیفیت و پراکندگی بالاتر به‌عنوان جواب‌های نسل بعد انتخاب می‌گردند. همچنین جواب‌های جدید و جواب‌های موجود در آرشیو پارتو در کنار هم، سطح‌بندی شده و جواب‌های موجود در سطح ۱ به‌عنوان مجموعه آرشیو پارتو جدید انتخاب می‌شوند. همچنین جهت به‌روزرسانی بهترین جواب از بین تمام جواب‌هایی که تا به حال پیدا شده‌اند، اگر بهترین جواب از \vec{X}^* بهتر باشد، \vec{X}^* با آن جایگزین شده و در غیر این صورت بدون تغییر باقی می‌ماند.

۴-۶- تنظیم پارامترها

پارامترهای الگوریتم به‌صورت زیر تنظیم شده‌اند:

- در الگوریتم نهنگ، اندازه جمعیت برابر با ۱۵۰، تعداد تکرار جستجوی همسایگی متغیر^۱ برابر با ۵ و تعداد تکرار الگوریتم برابر با ۳۰۰ در نظر گرفته می‌شود.
- در الگوریتم ژنتیک، نرخ $\circ/۸$ برای تقاطع و $\circ/۸$ برای جهش در نظر گرفته شده و اندازه جمعیت برابر با ۱۵۰ انتخاب شده است.

جهت تنظیم و مقداردهی پارامترهای مدل، از نظرات خبرگان و کارشناسان شرکت اتمسفر استفاده شده و بر اساس نظرات آنان، پارامترهای مدل در بازه‌های خاص تولید شده است. در بازه یکنواخت، به‌صورت عدد فازی $(m1, 6000, m3)$ تولید می‌شود؛ کلیه فواصل بین تسهیلات به‌طور تصادفی در بازه یکنواخت $[500 \dots 2000]$ تولید شده‌اند. جهت تولید اعداد مثالی مربوط به هر کدام از پارامترهای فازی $(m1, m2, m3)$ ، ابتدا $m2$ تولید شده سپس عدد تصادفی r در بازه $(0, 1)$ تولید شده، $m1$ با استفاده از رابطه $m2 * (1-r)$ و $m3$ نیز با استفاده از رابطه $m2 * (1+r)$ تولید خواهند شد. جهت مقداردهی، پارامترهای فازی $m2$ تعیین شده و دو مقدار $m1$ و $m3$ با استفاده از نرم‌افزار مطلب تعیین می‌شوند. به همین دلیل در بخش تنظیم این پارامترها فقط به ذکر مقدار $m2$ اکتفا می‌کنیم. در تولید مسایل نمونه مقادیر زیر در نظر گرفته شده است.

در هر دوره میزان تقاضای مشتری ۱ از محصول s عدد فازی مثالی $(m1, 100, m3)$ لحاظ گردیده است؛ ظرفیت همه مراکز توزیع برابر با ۴۰۰۰ در نظر گرفته شده است؛ هزینه تأسیس مراکز توزیع قیمت یک واحد سوخت برابر با ۱۰۰۰، حجم مصرف سوخت در واحد فاصله در هر وزن خودرو واحد برابر با ۲، وزن و حجم هر واحد محصول در بازه یکنواخت $[1, 20]$ ، وزن گازهای آلاینده منتشر شده در مصرف هر لیتر سوخت برابر با ۲، قیمت متوسط هر واحد گاز منتشر شده برابر با ۵۰۰، سرعت هر وسیله نقلیه در بازه یکنواخت $[70, 100]$ ، وزن هر وسیله نقلیه در بازه یکنواخت $[2000, 4000]$ ، ضریب تغییر سرعت وسیله نقلیه در بازه یکنواخت $[0/1, 0/2]$ تولید شده‌اند؛ مقدار α برای رتبه‌بندی اعداد فازی برابر با $\circ/۸$ در نظر گرفته شده است. در تولید مسایل نمونه مقادیر زیر در نظر گرفته شده است.

متوسط ضایعات تولید شده ۱۰% مقدار تولید در نظر گرفته شده است؛ متوسط مواد خطرناک تولید شده ۱۵% مقدار تولید در نظر گرفته شده است؛ متوسط روزهای کاری اذ دست‌رفته در بازه یکنواخت $[5, 10]$ در نظر گرفته شده است؛ مقادیر فاکتورهای وزنی ضایعات تولید شده، مواد خطرناک و آسیب نیروی کار بر اساس مقادیر متوسط تعریف شده برای تولید ضایعات، مواد خطرناک و آسیب‌های نیروی کار محاسبه می‌شود. به این ترتیب که به‌عنوان مثال، مجموع هر پارامتر متوسط ضایعات، مواد خطرناک تولید شده و متوسط روزهای کاری اذ دست‌رفته به‌طور جداگانه و همچنین مجموع همه آن‌ها با یکدیگر محاسبه می‌شود. سپس برای محاسبه هر فاکتور از تقسیم عددی مجموع

^۱ VNS



پارامتر مربوطه بر مجموع هر سه پارامتر استفاده می‌گردد؛ بیشترین میزان مجاز برای انتشار گاز دی‌اکسیدکربن ۳۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است؛ میزان جریمه به ازای هر واحد انتشار بیشتر از حد مجاز گاز دی‌اکسیدکربن ۳۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است؛ میزان تخفیف مالیاتی به ازای هر واحد انتشار کمتر از حد مجاز گاز دی‌اکسیدکربن ۳۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است؛ میزان برآورد کربن منتشرشده برای نگهداری هر واحد کالای sth در انبار ith در دوره tth برابر با 0.081 در نظر گرفته شده است؛ میزان برآورد کربن منتشرشده برای تولید هر واحد tth کالای sth در مرکز تولید ith در دوره tth برابر با 0.225 در نظر گرفته شده است.

۵- یافته‌های پژوهش

در این مقاله به منظور آزمودن کارایی الگوریتم‌های نهنگ و ژنتیک، آن‌ها را در محیط نرم‌افزار مطلب پیاده‌سازی کرده و نتایج حاصل از اجرای آن با توجه به شاخص‌های مقایسه‌ای کیفیت، یکنواختی، پراکندگی و زمان حل، در مسایل آزمایشی تولیدشده توسط آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای ارزیابی کیفیت و پراکندگی الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه، شاخص‌های متعدد و متنوعی وجود دارند. در این مقاله، برای انجام مقایسه، سه شاخص کیفیت، یکنواختی و پراکندگی موردتوجه قرار گرفتند. در این بخش تعدادی مسایل آزمایشی طراحی شده، با استفاده از دو الگوریتم نهنگ و ژنتیک حل گردیده و نتایج آن‌ها تحلیل خواهند شد. نتایج حاصل از اجرای دو الگوریتم با توجه به شاخص‌های مقایسه‌ای، در جداول زیر نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که مسایل نمونه در جداول زیر با فرمت $S/T/I/J/K/L/V$ نشان داده شده که S ، تعداد محصول، T ، تعداد دوره، I ، تعداد تامین‌کننده، V ، J ، K ، L تعداد توزیع‌کننده، V تعداد مشتری و L تعداد مشتری و V تعداد وسایل هستند.

جدول ۳- نتایج حل مسایل با اندازه کوچک نقلیه.

Table 3- Results of solving problems with small vehicle size.

Prob.	Whales Optimization Algorithm (WOA)			GA		
	Quality Metric	Spacing Metric	Diversity Metric	Quality Metric	Spacing Metric	Diversity Metric
1/1/2/2/2/2/2	100	1.1	698.2	0	0.70	445.8
1/1/2/2/2/3/2	95.05	1.13	605.2	4.95	0.70	356.2
2/1/2/2/2/2/2	87.9	0.84	717.2	12.1	0.46	287.4
2/1/2/2/2/3/2	73.1	0.71	732.8	26.9	0.31	557.3

جدول ۴- نتایج حل مسایل با اندازه متوسط.

Table 4- Results of solving medium-sized problem.

Prob.	Whales Optimization Algorithm (WOA)			GA		
	Quality Metric	Spacing Metric	Diversity Metric	Quality Metric	Spacing Metric	Diversity Metric
1/4/3/3/7/7/10	85.2	0.92	985.2	14.8	0.78	740.7
2/8/3/3/7/7/10	83.5	0.51	1365.9	16.5	0.47	840.9
3/12/3/3/7/7/10	88.1	0.64	1439.9	11.9	0.56	850.2
1/4/6/6/8/10/10	100	1.06	1468.9	0	0.71	1130.6
2/8/6/6/8/10/10	87.7	0.68	1582.2	12.3	0.44	1220.4
3/12/6/6/8/10/10	87.6	0.91	1702.3	12.4	0.78	1261.3
1/4/7/7/9/15/10	83.4	0.71	1708.9	16.6	0.47	1349.1
2/8/7/7/9/15/10	85.8	0.73	1763.2	14.4	0.62	1360.6
3/12/7/7/9/15/10	88.1	1.01	1930.2	11.9	0.49	1218.4

همان‌طور که در جدول‌های ۳، ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، در همه مسایل با اندازه کوچک، متوسط و بزرگ، مقدار شاخص‌های کیفیت و پراکندگی به‌دست‌آمده برای الگوریتم نهنگ از مقادیر نظیر محاسبه‌شده برای الگوریتم ژنتیک بزرگ‌تر بوده که این نشان‌دهنده توانایی و قدرت بالای الگوریتم نهنگ نسبت به الگوریتم ژنتیک در دستیابی به جواب نزدیک بهینه و همچنین توانایی بالاتر برای اکتشاف و استخراج ناحیه شدنی جواب است. همچنین مقدار شاخص یکنواختی نشان می‌دهد که در بیشتر موارد، الگوریتم ژنتیک، ناحیه جواب را با یکنواختی بیشتری جستجو می‌کند. در شکل ۲ مشاهده می‌شود که زمان حل مسایل توسط الگوریتم نهنگ در مقابل الگوریتم ژنتیک در همه موارد بیشتر بوده و این بدین معناست که الگوریتم نهنگ جهت حل این مسایل به زمان بیشتری نسبت به الگوریتم ژنتیک

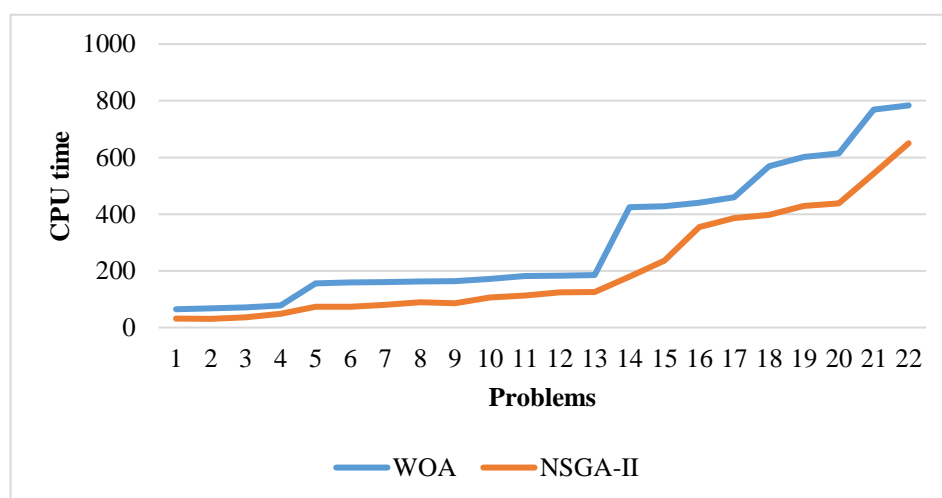


نیاز دارد. لازم به ذکر است که با بزرگ‌تر شدن اندازه مساله، زمان حل الگوریتم به‌طور فزاینده تغییر می‌کند و زمان حل مسایل با اندازه بزرگ، بسیار بالاتر از مسایل با اندازه کوچک و متوسط است که این نشان‌دهنده سخت بودن مساله است. شکل ۲ مقایسه زمان اجرای دو الگوریتم را برای همه مسایل نشان می‌دهد.

جدول ۵- نتایج حل مسایل با اندازه بزرگ.

Table 5- Results for solving large size problems.

GA	Whales Optimization Algorithm (WOA)				GA	
	Spacing Metric	Diversity Metric	Spacing Metric	Diversity Metric	Spacing Metric	Diversity Metric
1/4/10/10/20/30/20	90	0.75	2871.6	10	0.74	1901.6
2/8/10/10/20/30/20	85.9	1.72	2685.3	14.1	0.64	1954.2
3/12/10/10/20/30/20	87.6	1.67	3063.5	12.4	0.76	2112.5
1/4/15/15/40/70/20	70.9	0.73	2636.5	29.1	0.65	1901.5
2/8/15/15/40/70/20	89.9	0.71	2816.5	10.1	0.70	2265.1
3/12/15/15/40/70/20	66.8	1.70	3486.5	33.2	0.54	2793.6
1/4/15/15/45/90/20	87.2	1.17	4121.9	12.8	0.65	3278.6
2/8/15/15/45/90/20	100	1.13	4565.9	0	0.64	3397.7
3/12/15/15/45/90/20	88.4	1.04	5054.1	11.6	0.73	4758.7

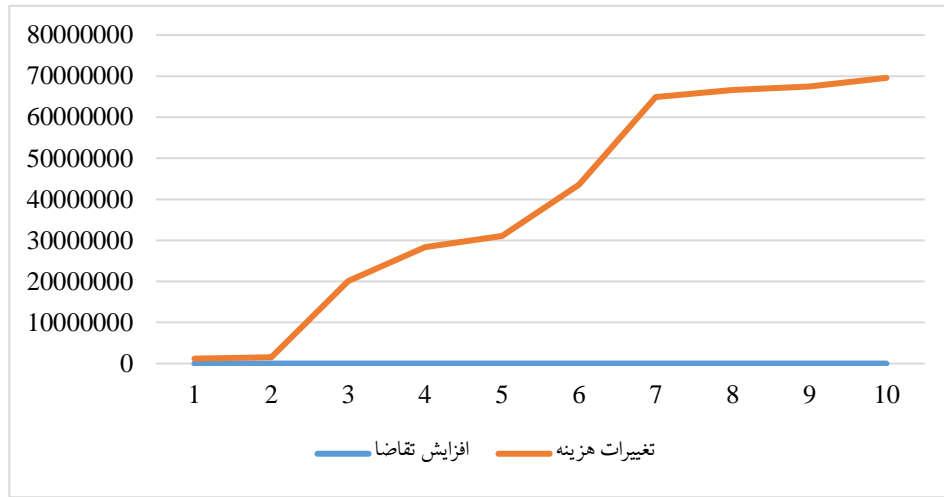


شکل ۲- مقایسه زمان اجرا (واحد زمان ثانیه است).

Figure 2- Comparison of runtime (unit of time is seconds).

با توجه به اینکه، جریمه کرن در این مقاله در تابع هدف اول در نظر گرفته شده است، در این بخش، تغییرات تابع هدف اول با تغییر پارامتر تقاضا به تحلیل حساسیت پرداخته شده است. جهت بررسی تغییرات هزینه (تابع هدف اول) در مقابل تغییرات تقاضا، مقدار تقاضا ابتدا به اندازه 0.25 کاهش و سپس در مقادیر افزایشی $1/5$ برابر، $2/5$ برابر، $3/5$ برابر، 3 برابر، $3/5$ برابر، 4 برابر، $4/5$ برابر و در نهایت 5 برابر بررسی شده است. نتایج حاصل شامل بهترین مقدار تابع هدف گزارش شده توسط الگوریتم نهنگ می‌باشد. نتایج این بررسی در شکل ۳ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۳، مشاهده می‌شود که با کاهش 25% تقاضا، مقدار هزینه کاهش یافته است. همچنین مطابق این شکل، با افزایش تقاضا، مقدار هزینه افزایش یافته اما روند افزایش هزینه تا $2/5$ برابر تقاضا، آهسته، از 3 تا 4 برابر تند و در بقیه موارد بسیار ناچیز می‌باشد. به نظر می‌رسد تغییرات به دلیل افزایش هزینه‌های ارسال کالا و یا هزینه‌هایی از این قبیل باشد؛ زیرا با افزایش تقاضا، سطح تولید بالا رفته و در نتیجه هزینه‌های تولید نیز افزایش می‌یابد و یا اینکه جهت پاسخ دادن به همه تقاضا، میزان کالای ارسالی و در نتیجه هزینه‌های مربوط به آن افزایش می‌یابد. البته از آنجایی که سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است، نمی‌توان نتایج تاثیر تقاضا را به دنیای واقعی تعمیم داد؛ زیرا در دنیای واقعی با افزایش تقاضا اگر قیمت فروش محصولات نیز افزایش یابد، بدیهی است که سرعت افزایش سود بیشتر می‌شود. از طرفی اگر هم‌زمان با افزایش قیمت فروش، قیمت خرید مواد اولیه نیز افزایش یابد، دیگر پیش‌بینی رفتار سود به راحتی تحلیل نمی‌گردد.



شکل ۳- تغییرات تابع هدف هزینه در مقابل تغییرات تقاضا.
Figure 3- Changes in the cost target function versus demand changes.

۶- بحث و نتیجه گیری

۱-۶- جمع بندی یافته ها

در این مقاله به بهینه سازی برنامه ریزی زنجیره تامین پایدار با در نظر گرفتن جریمه کربن برای شرکت اتمسفر پرداخته شد. در راستای دستیابی به هدف این پژوهش، یک مدل بهینه سازی سه هدفه ارایه گردیده که جهت حل آن از الگوریتم بهینه سازی نهنگ و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است که در تابع هدف اول کمیته سازی هزینه های ایجاد تسهیلات و هزینه های سوخت وسایل نقلیه و هزینه های زیست محیطی حاصل از انتشار گازهای آلاینده در نظر گرفته شده، در تابع هدف دوم حداکثر سازی مسئولیت اجتماعی یا فواید اجتماعی و در تابع هدف سوم به کمیته سازی تاثیرات زیست محیطی پرداخته است. جهت حل مدل ارایه شده، مسایل نمونه آزمایشی در سه گروه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ با توجه داده های شرکت اتمسفر طراحی گردیده و نتایج دو الگوریتم بهینه سازی نهنگ و الگوریتم ژنتیک با توجه به شاخص های مقایسه ای کیفیت، پراکندگی، یکنواختی و زمان حل با یکدیگر مقایسه شده اند. نتایج حاصل نشان دادند از منظر شاخص یکنواختی و زمان حل، الگوریتم ژنتیک نسبت به الگوریتم نهنگ بهتر عمل کرده است؛ در سایر موارد، الگوریتم نهنگ دارای توانایی بالاتر جهت اکتشاف و استخراج ناحیه شدنی جواب و دستیابی به جواب های نزدیک بهینه می باشد. از آنجایی که این پژوهش به دنبال محاسبه جریمه کربن در شرکت اتمسفر بوده و به این منظور، جریمه کربن را در تابع هدف اول قرار داده، از الگوریتم نهنگ در تحلیل حساسیت تابع هزینه در مقابل تغییرات تقاضا که بهترین مقادیر را ارایه داده، استفاده شده است. این الگوریتم نشان می دهد با تغییرات کاهش تقاضا، مقادیر هزینه کاهش و با افزایش تقاضا، مقادیر هزینه افزایش می یابد اما روند افزایش به صورت خطی و ثابت نیست. دلیل این رفتار متغیر، عمدتاً افزایش هزینه های ارسال می باشد. با افزایش تقاضا، میزان سطح تولید و هزینه های مرتبط با آن افزایش می یابد. برای پاسخ دادن به تقاضا نمی توان انتظار داشت که هزینه ها با یک شیب ثابت و مشخص تغییر نماید؛ از طرفی به این دلیل که سایر پارامترها ثابت فرض شده است، نتایج تاثیر تقاضا در تابع هزینه در دنیای واقعی متفاوت بوده و نیاز به تحلیل بیشتر و عمیق تری دارد. همچنین بررسی تغییرات زمان حل با افزایش اندازه مساله، تایید دیگری بر *NP-HARD* بودن مساله مورد بررسی می باشد.

۲-۶- آینده نگری

برای پژوهش های آتی، پیشنهاد می شود بهینه سازی زنجیره تامین پایدار، با لحاظ کردن پارامتر دولت (با توجه به این که نقش دولت در اقتصاد ایران اساسی است)، مورد بررسی قرار گیرد. به منظور ایجاد پایداری در زنجیره تامین، عوامل اقتصادی نقش تعیین کننده ای دارند به گونه ای که بدون در نظر گرفتن شاخص های اقتصادی مانند نرخ تولید ناخالص ملی، رشد اقتصادی، تورم و تراز تجاری نمی توان زنجیره تامین پایدار و بهینه پیش بینی کرد.

بر این اساس، پیشنهاد می‌گردد بهینه‌سازی زنجیره تامین پایدار با در نظر گرفتن نقش ارز موردبررسی قرار گیرد. همچنین، می‌توان با افزایش تابع هدف مانند کاهش زمان حمل، کمینه کردن ریسک مالی و ... این پژوهش را توسعه داد. به‌علاوه، می‌توان مساله را به‌صورت چند دوره‌ای، به‌گونه‌ای که تقاضا در دوره‌های مختلف تغییر کند، مدل‌سازی کرد.

منابع

- Abdi, A., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2019). Investigation of a possible multi-objective model for the problem of stable closed loop supply chain by considering vehicle routing using new and hybrid Meta-Heuristic algorithms. *Journal of modeling in engineering*, 17(59), 67-85. (In Persian). DOI: [10.22075/jme.2019.14151.1389](https://doi.org/10.22075/jme.2019.14151.1389)
- Aravendan, M., & Panneerselvam, R. (2014). An integrated multi-echelon model for a sustainable closed loop supply chain network design. *Intelligent information management*, 6(6), 257-279. DOI: [10.4236/iim.2014.66025](https://doi.org/10.4236/iim.2014.66025)
- Benyoucef, L., Xie, X., & Tanonkou, G. (2013). Supply chain network design with unreliable suppliers: a Lagrangian relaxation-based approach. *International journal of production research*, 51(21), 6435-6454.
- Bhattacharjee, S., & Cruz, J. (2015). Economic sustainability of closed loop supply chains: a holistic model for decision and policy analysis. *Decision support systems*, 77, 67-68. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2015.05.011>
- Das, K. (2018). Integrating lean systems in the design of a sustainable supply chain model. *International journal of production economics*, 198, 177-190.
- Dehghani, E., Behfar, N., & Jabalameli, M. S. (2016). Optimizing location, routing and inventory decisions in an integrated supply chain network under uncertainty. *Journal of industrial and systems engineering*, 9(4), 93-111.
- Devika, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (2014). Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: a comparison of metaheuristics hybridization techniques. *European journal of operational research*, 235(3), 594-615.
- Fallah-Tafti, A., Sahreian, R., Tavakkoli-moghadam, R., & Moeinpour, M. (2015). An interactive possibilistic programming approach for a multi-objective closed-loop supply chain network under uncertainty. *International journal of systems science*, 45(3), 283-299.
- Fang, X., Du, Y., & Qiu, Y. (2017). Reducing Carbon emissions in a closed-loop production routing problem with simultaneous pickups and deliveries under Carbon Cap-and-Trade. *Economic and business aspects of sustainability*, 9(12), 2198-2210. <https://doi.org/10.3390/su9122198>
- Fathi, M. R., Nasrollahi, M., & Zamanian, A. (2020). Mathematical modeling of sustainable supply chain networks under. *Industrial management journal Tehran University*, 11(4), 621-652. (In Persian). DOI: [10.22059/IMJ.2019.280393.1007588](https://doi.org/10.22059/IMJ.2019.280393.1007588)
- Ghahremani Nahr, J. (2020). Improvement the efficiency and efficiency of the closed loop supply chain: Whale optimization algorithm and novel priority-based encoding approach. *Decisions and operational research*, 4(4), 299-315. (In Persian). DOI: [10.22105/dmor.2020.206930.1132](https://doi.org/10.22105/dmor.2020.206930.1132)
- Golini, R., Longoni, A., & Cagliano, R. (2014). Developing sustainability in global manufacturing networks: the role of site competence on sustainability performance. *International journal of production economics*, 147, 448-459. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.06.010>
- Govindan, K., Shaw, M., & Majumdar, A. (2020). Social sustainability tensions in multi-tier supply chain: a systematic literature review towards conceptual framework development. *Journal of cleaner production*, 279, 123075. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123075>
- Hanczar, P. (2012). A fuel distribution problem – application of new multi-item inventory routing formulation. *Procedia - social and behavioral sciences*, 54, 726-735. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.790>
- Ivanov, D., Dolgui, A., Sokolov, B., & Ivanov, M. (2017). Optimal control representation of the mathematical programming model for supply chain dynamic reconfiguration. *IFAC-papers online*, 50(1), 4994-4999. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.900>
- Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., & Rodríguez, M. V. (2007). Linear programming with fuzzy parameters: an interactive method resolution. *European journal of operational research*, 177(3), 1599-1609.
- Kiani, S., & Samouei, P. (2020). Multi-objective dynamic recycling-routing-inventory for different pharmaceutical items with considering discount in a closed-loop supply chain. *Decision and operational research*, 3(5), 290-311. (In Persian). DOI: [10.22105/dmor.2020.237709.1170](https://doi.org/10.22105/dmor.2020.237709.1170)
- Lin, Y., Jia, H., Yang, Y., Tian, G., Tao, F., & Ling, L. (2018). An improved artificial bee colony for facility location allocation problem of end-of-life vehicles recovery network. *Journal of cleaner production*, 205, 134-144. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.086>
- Mahmudi, A., Mojibian, F., & Nouri Sabet, A. (2019). A mathematical model for supplier selection in supply chain considering inventory control and pricing problems. *Journal of decisions and operational research*, 4(1), 89-99. (In Persian). DOI: [10.22105/DMOR.2019.89845](https://doi.org/10.22105/DMOR.2019.89845)
- Manavalan, E., & Jayakrishna, K. (2019). A review of internet of things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers & industrial engineering*, 127, 925-953. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.030>
- Nie, D., Li, H., Qu, T., Liu, Y., & Li, C. (2020). Optimizing supply chain configuration with low carbon emission. *Journal of cleaner production*, 271, 122539. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122539>





- Nurjan Nia, K. P., Carvalho, M., & Costa, L. (2017). Green supply chain design: a mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model. *International journal of production economics*, 183, 421-432. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.028>
- Pilevari, N., Toloei, A., & Sanaei, M. (2013). A model for evaluating cloud-computing users. *African journal of business management*, 7(16), 1405-1413. <https://academicjournals.org/journal/AJBM/article-full-text-pdf/16EC44326635>
- Radfar, R., & Nezafati, N. (2014). Classification of internet banking customers using data mining algorithms. *Journal of information technology management*, 6(1), 71-90. (In Persian). DOI: 10.22059/JITM.2014.50051
- Revert, C., Gómez-Melero, E., & Cegarra-Navarro, J. G. (2016). The influence of corporate social responsibility practices on organizational performance: evidence from Eco-Responsible Spanish firms. *Journal of cleaner production*, 112(4), 2870-2884. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.128>
- Saaverda, M., Cricardo, M., Olive, C. H. D., & Freires, F. G. Me. (2018). Sustainable and renewable energy supply chain: a system dynamics overview. *Renewable and sustainable energy reviews*, 82, 247-259. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.033>
- Shahriari, M. R., Pilevari, N., & Gholami, Z. (2016). The effect of information systems on the supply chain sustainability using DEMATEL method. *Advanced computational science with application*, 1, 47-56. DOI: 10.5899/2016/cacsa-00053
- Sohrabi, T., Etemad, M., & Fathi, M. R. (2018). Mathematical modeling of green closed loop supply chain network with consideration of supply risk. *Advances in mathematical modeling*, 7(2), 103-112. (In Persian). DOI: 10.22055/JAMM.2018.18354.1303
- Vafaenezhad, T., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Cheikhrouhou, N. (2019). Multi-objective mathematical modeling for sustainable supply chain management in the paper industry. *Computers & industrial engineering*, 135, 1092-1102. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.05.027>
- Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Mohammadi, M. (2016). Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 89, 182-214. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.02.011>
- Zhen, L., Huang, L., & Wang, W. (2019). Green and sustainable closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of cleaner production*, 227, 1195-1209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.098>