Ind. Manag. Persp. 2023, 13(1), 173-198; doi: 10.48308/JIMP.13.1.173

Industrial Management Perspective

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=en

Original Article

Fuzzy Multi-objective Production Distribution Planning by Considering CO_2 Emission Cost and Solving by a Novel Fuzzy Multi-Choice Goal Programming

Mehdi Seifbarghy*, Pardis Shirin Bayan**

Abstract

In today's competitive world, companies need to effectively manage their supply chains in changing market conditions, and they are also obliged to compensate for their environmental damages. In this research, a two-echelon multi-product multi-period supply chain network with production and distribution centers has been modeled with three objectives: minimizing logistic costs, delivery time, and CO2 emission costs. Customer demand parameters, available levels of human and machinery resources are uncertain and considered as fuzzy numbers. Additionally, the possibility of using subcontracting services for production and transportation operations at a higher cost exists. The main innovation of this research is modeling the possibility of using different transportation systems and considering their pollution, and using a novel fuzzy multi-criteria goal programming method (proposed in 2018) for solving the problem. Real data from "Daya Technology" company has also been used for case study and model evaluation.

Keywords: Supply Chain; Integrated Production-distribution Planning; Fuzzy Sets, CO_2 Emission; Multi-choice Goal Programming.

How to Cite: Seifbarghy, Mehdi; Shirin Bayan, Pardis (2023). Fuzzy Multi-objective Production Distribution Planning by Considering CO2 Emission Cost and Solving by a Novel Fuzzy Multi-Choice Goal Programming, *Ind. Manag. Persp.*, 13(1), 173-198 (In Persian).

Received: Aug. 26, 2021; Revised: Oct. 16, 2021; Accepted: Dec. 26, 2021; Published Online: Jan. 18, 2022.

* Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran. Corresponding author. Email: M.Seifbarghy@alzahra.ac.ir

** Ph.D. Students, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran.

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴۰۲، دوره ۱۳، شماره ۱، صص ۱۷۳ – ۱۹۸، doi: 10.48308/JIMP.13.1.173

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=fa

نوع مقاله: پژوهشی

برنامه‌ریزی تولید ـ توزیع چندهدفه فازی با درنظرگرفتن هزینه انتشار گاز CO_2 و رویکرد حل نوین برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ایی فازی

مهدی سیف برقی*، پردیس شیرین‌بیان**

چکیده

در دنیای رقابتی امروز، شرکت‌ها باید زنجیره‌های تأمین خود را به‌طور مؤثر در شرایط متغیر بازار مدیریت کنند؛ همچنین شرکت‌ها ملزم به جبران آسیب‌های زیست‌محیطی خود شده‌اند. در این پژوهش، یک شبکه زنجیره تأمین دوسطحی، چندمحصولی و چنددوره‌ای شامل مراکز تولید و توزیع با سه هدف حداقل‌سازی هزینه‌های لجستیکی، زمان تحویل و هزینه‌های انتشار گاز CO_2 مدل‌سازی شده است. پارامترهای تقاضای مشتریان، سطح نیروی انسانی و ماشین‌آلات در–دسترس دارای عدم‌قطعیت هستند و به‌صورت اعداد فازی در نظر گرفته شده‌اند؛ همچنین امکان بهره‌گیری از خدمات پیمانکاری برای عملیات تولید و حمل با هزینه بالاتر وجود دارد. نوآوری اصلی این پژوهش از منظر مدل‌سازی امکان بهره‌گیری از سیستم‌های حمل‌ونقل مختلف و همچنین توجه به آلایندگی ناشی از آن‌ها و از منظر حل، بهره‌گیری از روش نوین آرمانی چندگزینه‌ای فازی (ارائه‌شده در ۲۰۱۸) است؛ همچنین از داده‌های واقعی شرکت «دایا تکنولوژی» برای مطالعه موردی و ارزیابی عملکرد مدل استفاده شده است.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تأمین؛ برنامه‌ریزی تولید ـ توزیع یکپارچه؛ مجموعه‌های فازی؛ انتشار گاز CO_2؛ برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای.

استناددهی: سیف برقی، مهدی؛ شیرین‌بیان، پردیس (۱۴۰۲). برنامه‌ریزی تولید ـ توزیع چندهدفه فازی با درنظرگرفتن هزینه انتشار گاز CO2 و رویکرد حل نوین برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ایی فازی. *چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، ۱۳(۱)، ۱۷۳ – ۱۹۸.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۰، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸.

* دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران.

نویسنده مسئول: Email: M.Seifbarghy@alzahra.ac.ir

** دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران.

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

۱. مقدمه

زنجیره تأمین متشکل از تمام سازمان‌ها و فرایندهایی است که مستقیم یا غیرمستقیم در تأمین نیازهای مشتری با هدف کاهش هزینه و افزایش پاسخگویی درگیر هستند. یکی از مباحث اثربخش در مدیریت زنجیره تأمین، برنامه‌ریزی تولید ـ توزیع یکپارچه است. تصمیمات تولید شامل تعیین مقدار مناسب تولید برای برآورده‌ساختن تقاضای مشتری و تصمیمات توزیع شامل تصمیماتی به‌منظور مشخص‌کردن راهی برای تحویل کالای تولیدشده از مراکز تولید به مراکز توزیع است. این مسائل به یکدیگر وابسته هستند و شایسته است به‌صورت توأم حل شوند.

در دنیای واقعی به‌دلیل کمبود اطلاعات دقیق، بسیاری از پارامترهای تأثیرگذار بر مسئله توأم با عدم‌قطعیت هستند. در این پژوهش پارامترهای تقاضا (به‌خصوص در صورت جدیدبودن محصول)، سطح نیروی انسانی و ماشین‌آلات دردسترس (به‌خصوص در شرایط ناپایدار اقتصادی و مستهلک‌بودن ماشین‌آلات و یا نیاز به قطعات یدکی وارداتی) دارای عدم‌قطعیت فرض می‌شوند و این عدم‌قطعیت به‌صورت فازی در نظر گرفته شده است.

موضوع دیگری که در مسائل تولید ـ توزیع در نظر گرفته می‌شود، استفاده از سیستم‌های حمل چندوسیله‌ای است؛ به‌عبارت‌دیگر در حمل‌ونقل چندوسیله‌ایی می‌توان سیستم‌های مختلفی از حمل‌ونقل را به‌طور مؤثری در نظر گرفت و بر اساس زمان و هزینه هر مورد، سیستم مناسب را با توجه به شرایط موجود انتخاب کرد.

موضوع دیگری که در دهه‌های اخیر توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده، حفاظت از محیط‌زیست است. حفاظت از محیط‌زیست عبارت است از: تلاشی که به‌منظور حفظ سلامتی محیط و انسان‌ها در سطوح شخصی، سازمانی یا دولت، از محیط طبیعی صورت می‌گیرد. بدین منظور در این پژوهش به‌ازای انتشار آلاینده‌ها در کارخانه‌ها و توسط وسایل نقلیه که باعث آلودگی هوا می‌شوند، هزینه‌ای در نظر گرفته شده است که در کشورهای صنعتی بسیار معمول است؛ بنابراین در رابطه با ضرورت این پژوهش می‌توان گفت امروزه با توجه به گسترش مراکز تولید و توزیع محصولات و افزایش تقاضا و رقابت در بازار، مدیریت یکپارچه تولید ـ توزیع به‌منظور کاهش هزینه‌ها و برآورده‌کردن به‌موقع تقاضای مشتریان، نقش مؤثری در این زمینه ایفا می‌کند. از طرفی نیز حفاظت از محیط‌زیست یک امر مهم است که مراکز تولید و توزیع باید به آن توجه داشته باشند و یکی از نمودهای اصلی آن انتشار کربن است که باید کنترل شود؛ درضمن در دنیای واقعی، تقاضای مشتریان و برخی دیگر از پارامترهای مدل در مسائل تولید ـ توزیع می‌توانند توأم با عدم‌قطعیت باشند و اطلاعات کاملی از آن‌ها دردسترس نباشد. به همین دلیل در این پژوهش، یک مسئله برنامه‌ریزی خطی سه‌هدفه برای تصمیمات تولید ـ توزیع در یک زنجیره تأمین دوسطحی شامل مراکز تولید و مراکز توزیع ارائه شده است. اهداف مسئله شامل کمینه‌سازی هزینه‌های لجستیکی مختلف در زنجیره، زمان تحویل و اثرات زیست‌محیطی است. مدل توسعه‌داده‌شده با

رویکرد نوینی از روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ایی فازی حل می‌شود. در این زنجیره، کالاها توسط مراکز تولید، تولید می‌شوند و سپس به مراکز توزیع ارسال می‌گردند و اگر مراکز توزیع، پاسخگوی تقاضای مشتری نباشند، مقدار کمبود در دوره بعد جبران خواهد شد؛ همچنین از توان پیمانکاران در تولید و حمل محصولات نیز استفاده خواهد شد. محدودیت بودجه و ظرفیت‌های تولید و حمل نیز چه در رابطه با اعضای اصلی زنجیره و چه در رابطه با پیمانکاران در نظر گرفته می‌شوند.

در ادامه مقاله، در بخش دوم مرور مبانی نظری و پیشینه پژوهش ارائه می‌شود در بخش سوم روش‌شناسی پژوهش ارائه خواهد شد. در بخش چهارم بر اساس داده‌های واقعی یک شرکت تولیدی تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهشی گزارش می‌شود. بخش پنجم نیز به نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی اختصاص دارد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

امروزه در شرکت‌ها، مدیریت یکپارچه فرایندهای تولید ـتوزیع، یک امر اساسی به‌منظور موفقیت آن‌ها محسوب می‌شود. مدیریت زنجیره تأمین، ضمن برنامه‌ریزی برای فرایندهای تولید ـ توزیع، هزینه‌ها را کاهش داده و باعث افزایش سود می‌شود. لیانگ[1] (۲۰۰۸)، یک مدل چندهدفه فازی را برای حل مسئله تولید ـ توزیع با توابع فازی ارائه کرد [۱۲، ۱۳]. پاتاک و سرکار[2] (۲۰۱۱)، یک مدل فازی زنجیره تأمین با درنظرگرفتن برنامه‌ریزی تولید ـ توزیع به‌صورت یکپارچه ارائه کردند. آن‌ها به‌منظور درنظرگرفتن عدم‌قطعیت در تولید، تقاضا و ظرفیت انبار، از عدد فازی مثلثی بهره گرفتند [۲۰]. لیانگ (۲۰۱۲)، یک مدل برنامه‌ریزی تولید ـ توزیع یکپارچه فازی را با دو هدف هزینه و زمان ارسال برای یک زنجیره تأمین دوسطحی ارائه داد. وی همچنین یک روش برنامه‌ریزی خطی فازی توسعه‌یافته را برای برنامه‌ریزی خطی چندهدفه با ضرایب فازی پیشنهاد کرد [۱۴]. پیدرو و همکاران[3] (۲۰۱۲)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه فازی را ارائه کردند که هدف آن‌ها بهینه‌سازی سود، زمان‌های بیکاری و مقادیر برگشت به‌منظور برنامه‌ریزی تولید ـ توزیع در زنجیره تأمین سرامیک بود [۲۱]. نوبیل و کاظمی[4] (۲۰۱۶)، یک مدل دوهدفه فازی برای مسائل تولید ـ توزیع یکپارچه در یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته چهارسطحی شامل کارخانه‌ها، انبارها، مناطق مشتریان و مراکز جمع‌آوری با هدف تعیین مقدار کالاهای ارسالی، مقدار کالاهای نگهداری‌شده و مقدار کالاهای بازیافتی در هر دوره زمانی توسعه دادند [۱۹]. موون و همکاران[5]

1. Liang
2. Pathak & Sarkar
3. Peidro et al.
4. Nobil & Kazemi
5. Moon, et al.

(۲۰۱۶)، یک شبکه تولید ـ توزیع فازی را مدل کردند که شامل چهار سطح تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده و خرده‌فروش است. مدل ارائه‌شده توسط آن‌ها شامل دو تابع هدف است که یکی از توابع هدف سود را حداکثر می‌کند و تابع هدف دوم مقدار کمبود را حداقل می‌سازد؛ آن‌ها همچنین محدودیت انتشار کربن که در اثر فعالیت‌های تولید و توزیع منتشر می‌شود را در نظر گرفتند [۱۷]. محمد و همکاران (۲۰۱۷)، یک مسئله تولید ـ توزیع را برای زنجیره تأمین سبز ارائه کردند. آن‌ها چهار تابع هدف فازی را به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفتند و برای حل آن از روش‌های ال ـ پی متریک، اپسیلون محدودیت و برنامه‌ریزی آرمانی استفاده کردند [۱۵]. امیری و همکاران (۲۰۱۶)، یک مدل برنامه‌ریزی تولید ـ توزیع یکپارچه برای یک زنجیره تأمین سه‌سطحی شامل چندین تولیدکننده، چندین توزیع‌کننده و چندین مصرف‌کننده ارائه کردند. آن‌ها تقاضای مصرف‌کنندگان و هزینه‌های حمل‌ونقل در روش‌های مختلف حمل‌ونقل را به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفتند و از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده کرده‌اند [۱]. راد و همکاران (۲۰۱۶)، یک مسئله زنجیره تأمین دوسطحی با چندین محصول و یک تولیدکننده و همچنین یک توزیع‌کننده و چندین مشتری را بررسی کردند. در مدل ریاضی آن‌ها کمینه‌کردن هزینه‌ها موردتوجه قرار گرفته است که این هزینه‌ها شامل هزینه حمل‌ونقل، هزینه نگهداری موجودی و هزینه جریمه کمبود است [۲۲]. شراحی و همکاران (۲۰۱۸)، یک مسئله تولید ـ توزیع را در یک زنجیره تأمین با در نظر گرفتن عدم قطعیت فازی در عرضه و پردازش و تقاضا حل کردند [۲۶]. بادهوتیا و همکاران[1] (۲۰۱۹)، یک مسئله برنامه‌ریزی تولید ـ توزیع یکپارچه برای یک شبکه زنجیره تأمین دوسطحی ارائه کردند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته چندهدفه فازی با فرض چندمحصولی، چنددوره‌ای و چند مرکز تولید ارائه کردند و سه تابع هدف هزینه، زمان و مقدار برگشت محصولات برگشتی را در مسئله در نظر گرفتند که به‌صورت فازی هستند و با توابع قطعه‌قطعه خطی نمایش داده می‌شوند [۲]. بادهوتیا و همکاران (۲۰۲۰)، یک مدل دوهدفه برای مسئله تولید ـ توزیع با چند دوره زمانی و چند محصول و دو روش حمل‌ونقل دریایی و هوایی تحت شرایط عدم‌قطعیت ارائه کردند. در مسئله آن‌ها دو پارامتر پردازش مجدد محصول و ظرفیت تولید دارای عدم‌قطعیت هستند. آن‌ها با استفاده از تعدادی سناریو و روش برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مسئله را حل کردند [۴]. محمدی و همکاران (۲۰۲۰)، یک مدل دوهدفه زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز تحت شرایط عدم‌قطعیت ارائه کردند. آن‌ها جنبه‌های زیست‌محیطی را در کنار جنبه‌های اقتصادی در نظر گرفتند و مسئله را با روش اپسیلون محدودیت حل کردند [۱۶]. موسی‌خانی و همکاران (۲۰۲۰)، یک مدل برای برنامه‌ریزی تولید ـ توزیع در یک شبکه زنجیره تأمین سه‌سطحی شامل مراکز تولید، مراکز توزیع و مشتریان ارائه کردند. تابع هدف این پژوهش کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی و هزینه‌های

1. Badhotiy, et al.

لجستیکی بوده و پارامترهای تقاضا و سطح خدمت به‌صورت اعداد فازی در نظر گرفته شدند [۱۸]. گودرزیان و همکاران (۲۰۲۱)، یک مدل دوهدفه فازی را برای مسئله تولید ـ توزیع تحت شرایط عدم‌قطعیت ارائه کردند. شبکه زنجیره تأمین آن‌ها چهارسطحی و شامل تأمین‌کننده‌ها، تولیدکننده‌ها، توزیع‌کننده‌ها و مشتریان است. تابع هدف اول مسئله به‌صورت کمینه‌سازی هزینه‌ها و تابع هدف دوم به‌صورت بیشینه‌سازی نرخ قابلیت اطمینان سیستم است و به‌منظور حل مسئله یک روش حل هیبریدی دوفازی را مورداستفاده قرار دادند [۶]. ساجدی و همکاران (۲۰۲۱)، یک مسئله زنجیره تأمین سه‌هدفه چندمحصولی و چنددوره‌ای را با درنظرگرفتن عدم‌قطعیت و سناریوهای بازار با رویکرد ریسک ارائه دادند. آن‌ها مدل پیشنهادی را با داده‌های یک مطالعه موردی واقعی و با استفاده از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II حل کردند [۲۵]. گودرزیان و همکاران (۲۰۲۱)، یک مدل ریاضی چندهدفه جدید را برای مسئله تولید ـ توزیع در یک زنجیره تأمین ارائه کردند که شامل چندین تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده و مشتریان متفاوت است. آن‌ها پارامترهای هزینه، تقاضا و ظرفیت را به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفتند و مسئله را با الگوریتم‌های NSGA-II و PGA حل و نتایج را مقایسه کردند [۷].

با مرور مباحث نظری موضوع می‌توان برخی از شکاف‌های موجود در پژوهش‌ها را از نظر مدل‌سازی و روش حل مشاهده کرد. از نظر مدل‌سازی، تابع هدف کاهش انتشار کربن از منظر جامعه و همین‌طور تابع هدف کاهش هزینه از منظر مدیریت زنجیره تأمین و همچنین تحویل سریع‌تر به مشتریان از منظر مصرف‌کننده نهایی یا همان مشتریان، کمتر موردتوجه پژوهشگران بوده است که درواقع در مدل مسئله جاری این موضوع از منظر سه ذی‌نفع زنجیره تأمین، مشتری و جامعه طراحی شده است؛ همچنین امکان وجود پیمانکار به‌طور هم‌زمان برای حمل‌ونقل محصولات تولیدی و برای تولید محصولات کمتر موردتوجه بوده است. در پژوهش حاضر این موضوع به‌صورت یک نوآوری خاص در نظر گرفته شده و ظرفیت مشخصی نیز بدین منظور برای این نوع خدمات تعریف شده است. درنهایت مدل مسئله در حالت حمل‌ونقل چندوسیله‌ای و چند–محصولی با چند دوره زمانی طراحی شده است. از منظر روش حل نیز اصولاً روش به‌کاررفته بسیار جدید بوده و در پژوهش‌های اخیر ارائه شده است و این پژوهش فرصت خوبی برای ارزیابی این روش نسبت به نسخه‌های سنتی آن است.

۳. روش شناسی پژوهش

بیان مسئله و مفروضات. در پژوهش حاضر، یک شبکه زنجیره تأمین چندهدفه دوسطحی برای مسائل یکپارچه تولید ـ توزیع در نظر گرفته شده است. سطوح زنجیره شامل مراکز تولید کالا و مراکز توزیع است و هدف پژوهش، ارائه طرح تولید ـ توزیع برای چندین نوع محصول مشابه از مراکز تولید به مراکز توزیع با هدف برآورده‌کردن تقاضا در طول دوره برنامه‌ریزی است. سطح

نیروی انسانی به دلایلی مانند شرایط ناپایدار اقتصادی، آسیب‌دیدگی نیروی انسانی، بیماری به‌خصوص بیماری‌های ویروسی مانند کووید ۱۹، عرضه و تقاضای نیروی کار، اخراج کارگران و استعفا می‌تواند توأم با عدم‌قطعیت باشد. سطح ماشین‌آلات دردسترس به دلایلی مانند خرابی و نیاز به تعمیرات، به‌خصوص در وضعیت استهلاک بالای ماشین‌آلات و همچنین خارجی‌بودن ماشین‌آلات و نیاز به واردات قطعات یدکی، به‌خصوص در شرایط غیرعادی مانند تحریم، می‌تواند دارای عدم‌قطعیت باشد.

در این مسئله سه پارامتر مقدار تقاضا (به‌عنوان یک متغیر خارجی) و سطح نیروی انسانی و ماشین‌آلات دردسترس (به‌عنوان دو متغیر درونی) به‌دلیل ناکامل‌بودن یا عدم‌دسترسی به اطلاعات دقیق، به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند و عدم‌قطعیت این پارامترها به‌صورت اعداد فازی مثلثی نشان داده می‌شود. با توجه به خطی‌بودن مدل، توسعه یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه فازی چندمحصولی با چندین وسیله حمل در قالب بهینه‌سازی یکپارچه تولید ـ توزیع در یک محیط غیرقطعی طی چند دوره زمانی مدنظر این پژوهش است؛ همچنین به‌دلیل عدم‌کفایت ظرفیت موجود، از پیمانکاران برای حمل‌ونقل و همچنین برای عملیات تولید استفاده شده و فرض می‌شود هزینه استفاده از پیمانکار، اولویت دوم سازمان است و به‌تبع هزینه بیشتری خواهد داشت. در خصوص کلیه هزینه‌ها فرض می‌شود، این هزینه‌ها نسبت به دوره اول خود با نرخ مشخصی رشد داشته باشند و این نرخ برای هزینه‌های مختلف می‌تواند متغیر باشد؛ همچنین کمبود نیز مجاز است؛ بدین‌صورت که تقاضای پیش‌بینی‌شده برای مراکز توزیع در یک دوره زمانی خاص می‌تواند توسط مراکز تولید، برآورده شود و یا به تأخیر بیفتد؛ اما تقاضای به‌تأخیرافتاده باید در دوره آتی برآورده شود. مدل ارائه‌شده در این مقاله توسعه‌یافته لیانگ (۲۰۰۸)، با افزوده‌شدن تابع هدف سوم یعنی کاهش اثرات زیست‌محیطی و در نظر گرفتن چندین نوع وسیله حمل برای توزیع است. درواقع تابع هدف اول (حداقل‌سازی هزینه‌ها) و سوم با یکدیگر در تناقض هستند؛ زیرا کاهش اثرات زیست‌محیطی باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود. توابع هدف دوم (کاهش زمان تحویل) و سوم نیز در تناقض هستند؛ زیرا برای کاهش زمان تحویل باید از وسایل حمل‌ونقل سریع‌تر استفاده کرد که عموماً آلودگی بیشتری را ایجاد می‌کند. بدین ترتیب با وجود توابع هدف متضاد به دنبال بهترین جواب‌های نامغلوب برای مسئله هستیم. به‌منظور تولید جواب‌های نامغلوب از روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای فازی استفاده شده است؛ بنابراین با توجه به اهمیت مسائل زیست‌محیطی، نوآوری این پژوهش درنظرگرفتن تابع هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی در کنار توابع هدف هزینه و زمان از منظر سه ذی‌نفع زنجیره تأمین، مشتری و جامعه است؛ همچنین چندوسیله‌ای‌بودن حمل‌ونقل به تضاد بین تابع هزینه و زمان تحویل منجر خواهد شد. علاوه بر این در زمینه تولید و توزیع، از پیمانکار و خدمات مربوط به برون‌سپاری استفاده می‌شود و درنهایت برای حل مسئله از روش حل جدیدی در مقایسه با سایر نسخه‌های برنامه‌ریزی آرمانی استفاده خواهد شد؛ بنابراین

تفاوت این پژوهش با پژوهش لیانگ (۲۰۰۸) در اضافه‌شدن تابع هدف زیست‌محیطی و فرض چند وسیله حمل‌ونقل است و با درنظرگرفتن محدودیت ظرفیت توزیع و برون‌سپاری توزیع محدودیت‌های مسئله تکمیل‌تر شده و مسئله با روش حل متفاوتی از مقاله لیانگ (۲۰۰۸) حل شده است. مدل ارائه‌شده در پژوهش لیانگ (۲۰۰۸) با ترکیب مفهوم تصمیم‌گیری فازی ارائه شده توسط بلمن و زاده[1] (۱۹۷۰) و روش برنامه‌ریزی فازی ارائه‌شده توسط حنان (۱۹۸۱)، حل شده است [۳، ۱۰]. بدین‌صورت که به‌ازای مقادیر مختلف توابع هدف، درجه عضویت تعیین می‌شود؛ سپس به‌ازای هر تابع هدف، نمودار قطعه‌قطعه خطی توابع عضویت ترسیم می‌شود و با استفاده از روابطی که در پژوهش ارائه شده است، معادلات قطعه‌قطعه خطی برای هر تابع هدف فرموله شده و درنهایت با ارائه یک متغیر کمکی، مدل ریاضی چندهدفه به یک مدل ریاضی با یک تابع هدف تبدیل می‌شود و مسئله با یک تابع هدف حل می‌شود؛ اما در این پژوهش از روش حل برنامه‌ریزی آرمانی فازی استفاده شده است. شکل ۱، شبکه زنجیره تأمین مسئله را نشان می‌دهد. مطابق شکل، تولید محصولات علاوه بر مراکز تولید می‌تواند در محل پیمانکار نیز انجام شود؛ همچنین ارسال محصولات از مراکز تولید به توزیع یا به‌طور مستقیم توسط آن‌ها و یا باواسطه از طریق پیمانکاران حمل انجام می‌شود؛ بنابراین مفروضات مسئله به‌صورت زیر است:

۱. همه توابع هدف و محدودیت‌ها معادلات خطی هستند؛

۲. مقدار ضرایب هزینه/ زمان در توابع هدف و محدودیت‌ها در طول افق برنامه‌ریزی مشخص و قطعی است؛

۳. پارامترهای تقاضا، ظرفیت ماشین و ظرفیت نیروی انسانی به‌صورت فازی در نظر گرفته شده و برای نمایش آن‌ها از الگوی عدد فازی مثلثی استفاده شده است؛

۴. تقاضای پیش‌بینی‌شده برای مقاصد در یک دوره زمانی خاص می‌تواند توسط منابع، برآورده شود و یا به تأخیر بیفتد؛ اما تقاضای به‌تأخیرافتاده باید در دوره بعد برآورده شود؛

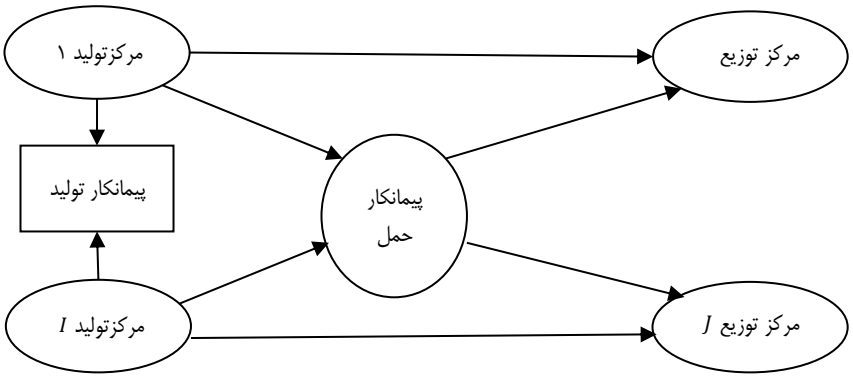
۵. فرض چندمحصولی، چند وسیله حمل‌ونقل، چند دوره زمانی و ارزش زمانی پول در مسئله در نظر گرفته شده است؛

۶. تعداد وسایل حمل‌ونقل دردسترس مشخص بوده و دارای ظرفیت محدود هستند. در صورت نیاز به ظرفیت بیشتر برای توزیع از پیمانکاری استفاده می‌شود؛

۷. با توجه به محدودبودن منابع دردسترس، ظرفیت تولید نیز محدود است و در صورت نیاز به تولید کالای بیشتر از پیمانکار برای تولید استفاده می‌شود؛

۸. مالکیت مراکز تولید و مراکز توزیع به‌صورت واحد فرض شده است. مانند شرکت‌های «کاله» و «میهن» در کشور ایران.

1. Bellman & Zadeh



شکل ۱. *شبکه زنجیره تأمین مسئله*

اندیس مجموعه‌ها

i: اندیس مراکز تولید $(i = 1, 2, \dots, I)$

n: اندیس انواع محصولات $(n = 1, 2, \dots, N)$

h: اندیس دوره زمانی برنامه‌ریزی $(h = 1, 2, \dots, H)$

j: اندیس مراکز توزیع $(j = 1, 2, \dots, J)$

p: اندیس نوع وسیله حمل‌ونقل $(p = 1, 2, \dots, P)$

k: اندیس توابع هدف $(k = 1, 2, \dots, K)$

توابع هدف

Z_1: کل هزینه‌ها

Z_2: کل زمان تحویل

Z_3: اثرات زیست‌محیطی (انتشار CO_2)

متغیرهای تصمیم

Q_{inh}: مقدار تولید محصول n توسط مرکز تولید i در دوره h (units)

V_{inh}: مقدار تولید محصول n توسط پیمانکار برای مرکز تولید i در دوره h (units)

W_{inh}: سطح موجودی محصول n توسط مرکز تولید i در دوره h (units)

E_{inh}: مقدار سفارش پس‌افت محصول n برای مرکز تولید i در دوره h (units)

T^{p}_{inhj}: مقدار محصول n که از مرکز تولید i به مرکز توزیع j با استفاده از روش حمل p در دوره زمانی h ارسال می‌شود (units).

Ts_{inhj}^{p}: مقدار محصول n که از مرکز تولید i به مرکز توزیع j با استفاده از روش حمل p در دوره زمانی h توسط پیمانکار ارسال می‌شود (units).

پارامترها

a_{in1}: هزینه تولید هر واحد محصول n توسط مرکز تولید i در دوره اول ($/unit)

e_a: درصد افزایش ثابت دوره به دوره هزینه تولید

b_{in1}: هزینه تولید هر واحد محصول n برای مرکز تولید i توسط پیمانکار در دوره اول ($/unit)

e_b: درصد افزایش ثابت دوره‌به‌دوره هزینه تولید پیمانکاری

c_{in1}: هزینه نگهداری موجودی هر واحد محصول n در مرکز تولید i در دوره اول ($/unit)

e_c: درصد افزایش ثابت دوره به دوره هزینه نگهداری موجودی

d_{in1}: هزینه پس‌افت هر واحد محصول n توسط در مرکز تولید i در دوره اول ($/unit)

e_d: درصد افزایش ثابت دوره‌به‌دوره هزینه پس‌افت

k_{in1j}^{p}: هزینه تحویل هر واحد محصول n از مرکز تولید i به مرکز توزیع j در دوره اول با استفاده از وسیله حمل p ($/unit)

e_k: درصد افزایش ثابت دوره‌به‌دوره هزینه تحویل بدون استفاده از پیمانکار

g_{in1j}^{p}: هزینه تحویل هر واحد محصول n از مرکز تولید i به مرکز توزیع j در دوره اول با استفاده وسیله حمل p، با استفاده از پیمانکار ($/unit)

e_g: درصد افزایش ثابت دوره‌به‌دوره هزینه تحویل در صورت استفاده از پیمانکار

u_{inhj}^{p}: زمان تحویل هر واحد محصول n از مرکز تولید i به مرکز توزیع j در دوره h با استفاده از وسیله حمل p (hour/unit)

S_{inhj}^{p}: ظرفیت هر وسیله حمل p برای محصول n که از مرکز تولید i به مرکز توزیع j در دوره h ارسال می‌شود (units)

Nt_{inhj}^{p}: تعداد وسیله نقلیه موجود از نوع p برای حمل محصول n، از مرکز تولید i به مرکز توزیع j در دوره h (units)

Ns_{nhj}^{p}: تعداد وسیله نقلیه موجود از نوع p برای حمل محصول n، از پیمانکار به مقصد j در دوره h (فرض می‌شود این تعداد برای کلیه مراکز تولید برابر است) (units)

D_{nhj}: تقاضای محصول n در مرکز توزیع j در دوره h (units)

l_{in}: ساعت کاری نیروی انسانی صرف‌شده برای تولید هر واحد محصول n در مرکز تولید i (man-hour/unit)

F_{ih}: حداکثر نفر ـ ساعت دردسترس برای مرکز تولید i در دوره h (man-hour)

r_{in}: ساعات صرف‌شده ماشین‌آلات برای تولید هر واحد محصول n در مرکز تولید i (machine-hour/unit)

M_{ih}: حداکثر ظرفیت ماشین دردسترس برای مرکز تولید i در دوره h (machine-hour)

ϑ_n: فضای انبارش موردنیاز برای هر واحد محصول n (ft^2/unit)

R_{hj}: حداکثر فضای انبار دردسترس مرکز توزیع j در دوره h (ft^2)

SC_{ih}: حداکثر ظرفیت تولید پیمانکار برای مرکز تولید i در دوره h

B: کل بودجه ($)

dis_{ij}: فاصله بین مرکز تولید i و مرکز توزیع j (km)

Em^p: مقدار CO_2 منتشرشده از حمل هر تُن محصول در واحد فاصله با استفاده وسیله حمل p (gr/ton/km)

Em_{in}: مقدار CO_2 منتشرشده از تولید هر واحد محصول n در مرکز تولید i (gr/unit)

c_{tax}: هزینه مالیات پرداختی برای انتشار CO_2 ($/gr)

مدل ریاضی. با توجه به نمادهای تعریف‌شده، مدل ریاضی مسئله به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} Min\ Z_1 &= \sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H} a_{in1}Q_{inh}(1+e_a)^h \\ &+ \sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H} b_{in1}V_{inh}(1+e_b)^h \\ &+ \sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H} c_{in1}W_{inh}(1+e_c)^h \\ &+ \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{h=1}^{H} d_{in1}E_{inh}(1+e_d)^h + \\ &\sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P} k_{in1j}^{p}T_{inhj}^{p}(1+e_k)^h \\ &+ \sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P} g_{in1j}^{p}\,Ts_{inhj}^{p}\,(1+e_g)^h \end{aligned} \quad (۱)$$

$$Min\ Z_2 = \sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P}\left[\frac{u_{inhj}^{p}}{s_{inhj}^{p}}\right](T_{inhj}^{p} + Ts_{inhj}^{p}) \quad (۲)$$

$$\begin{aligned} Min\ Z_3 &= c_{tax}\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H}(Em_{in})(Q_{inh})\,(1+e_e)^h\right) \\ &+ c_{tax}\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H}(Em_{in})(V_{inh})\,(1+e_e)^h\right) + \\ &c_{tax}\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{S}(Em^p)(T_{inhj}^{p})(dis_{ij})\,(1+e_e)^h\right) \\ &+ c_{tax}\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{S}(Em^p)(Ts_{inhj}^{p})(dis_{ij})(1+e_e)^h\right) \end{aligned} \quad (۳)$$

$Subject\ to$:

$$W_{in(h-1)} - E_{in(h-1)} + Q_{inh} + V_{inh} - (\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P} T_{inhj}^{p} + Ts_{inhj}^{p}) = W_{inh} - E_{inh} \qquad \forall i.n.h \quad (۴)$$

$$Q_{inh} + V_{inh} \geq E_{in(h-1)} \qquad \forall i.n.h \quad (۵)$$

$$\sum_{p=1}^{p}\sum_{i=1}^{I}(T_{inhj}^{p} + Ts_{inhj}^{p}) = \widetilde{D}_{nhj} \qquad \forall n.h.j \quad (۶)$$

$$T_{inhj}^{p} \leq s_{inhj}^{p}.\, Nt_{inhj}^{p} \qquad \forall i.n.h.j.p \quad (۷)$$

$$\sum_{n=1}^{N} l_{in} Q_{inh} \leq \tilde{F}_{ih} \qquad \forall i.h \quad (۸)$$

$$\sum_{n=1}^{N} r_{in} Q_{inh} \leq \widetilde{M}_{ih} \qquad \forall i.h \quad (۹)$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{p=1}^{P} \upsilon_n\,(T_{inhj}^{p} + Ts_{inhj}^{p}) \leq R_{hj} \quad \forall j.h \quad (۱۰)$$

$$Z_1 + Z_3 \leq B \quad (۱۱)$$

$$\sum_{n=1}^{N} V_{inh} \leq SC_{ih} \qquad \forall i.h \quad (۱۲)$$

$$Ts_{inhj}^{p} \leq s_{inhj}^{p}.\, Ns_{nhj}^{p} \qquad \forall i.n.h.j.p \quad (۱۳)$$

$$Q_{inh}.V_{inh}.W_{inh}.E_{inh}.T_{inhj}^{p}.Ts_{inhj}^{p} \geq 0 \qquad \forall i.n.h.j.p \quad (۱۴)$$

توابع هدف ارائه شده در معادلات ۱، ۲ و ۳، به‌ترتیب نمایانگر مجموع هزینه‌ها، زمان تحویل و اثرات زیست‌محیطی است. در تابع هدف نخست، مجموع هزینه‌های تولید چه در مراکز تولید و چه توسط پیمانکاران تولید، هزینه‌های نگهداری موجودی و پس‌افت و البته هزینه‌های حمل توسط مراکز تولید و پیمانکار با درنظرگرفتن افزایش دوره‌به‌دوره هزینه‌ها لحاظ شده است. تابع هدف دوم درواقع کل زمان صرف‌شده برای حمل و تحویل محصولات از مراکز تولید تا مراکز توزیع را فارغ از حمل توسط خود سیستم یا توسط پیمانکار ارائه می‌دهد. تابع هدف سوم نیز هزینه مالیات پرداختی به دولت به‌دلیل انتشار را نشان می‌دهد.

محدودیت ۴، رابطه تعادلی بین میزان تولید، ارسال و سطوح موجودی و کمبود دوره جاری و دوره قبل از آن را برای هر محصول در هر مرکز تولید نشان می‌دهد. طبق محدودیت ۵، مقدار کمبود در دوره قبل الزاماً باید توسط مقدار تولید و موجودی دوره جاری برآورده شود؛ به‌عبارت‌دیگر این محدودیت از تجمیع کمبودها جلوگیری می‌کند. طبق محدودیت ۶، مقدار محصول ارسالی توسط مراکز تولید، چه به‌صورت مستقیم و چه از طریق پیمانکار، تقاضای مراکز لجستیک را برآورده

می‌کند. با توجه به عدم‌قطعیت موجود در تقاضا، در این محدودیت تقاضا به‌صورت فازی نشان داده شده است. محدودیت ۷، نمایانگر محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه موجود در مراکز تولید است. درصورتی‌که به ظرفیت بیشتری برای توزیع نیاز باشد از پیمانکاری با هزینه بیشتر استفاده می‌شود. محدودیت‌های ۸ و ۹، به‌ترتیب نشان‌دهنده محدودیت نیروی انسانی دردسترس و ظرفیت ماشین‌آلات برای هر مرکز تولید در هر دوره زمانی هستند. به‌دلیل عدم‌قطعیت در سطح نیروی کار و ماشین‌آلات پارامترهای مرتبط با آن‌ها به‌صورت فازی نشان داده شده است. محدودیت ۱۰، محدودیت ظرفیت انبار در هر مرکز توزیع در هر دوره زمانی را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۱، نشان‌دهنده محدودیت بودجه است. محدودیت ۱۲، نمایانگر محدودیت ظرفیت تولید پیمانکار در تولید محصولات مختلف است. محدودیت ۱۳، نشان‌دهنده محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه‌ای است که توسط پیمانکار برای توزیع استفاده می‌شود. محدودیت ۱۴، نیز وضعیت متغیرهای تصمیم مدل را نشان می‌دهد.

روش حل مسئله

محدودیت‌های فازی. در مدل ارائه‌شده، سه پارامتر غیرقطعی وجود دارد که به‌صورت فازی در نظر گرفته شده‌اند. این سه پارامتر عبارت‌اند از: تقاضای مشتریان، سطح نیروی انسانی در دسترس و ظرفیت ماشین‌آلات. به‌منظور جلوگیری از پیچیدگی مسئله، این پارامترها به‌صورت اعداد فازی مثلثی نمایش داده شده‌اند. مزیت اصلی عدد فازی مثلثی، سهولت و انعطاف‌پذیری در عملیات حسابی فازی است. تصمیم‌گیرنده می‌تواند توزیع فازی مثلثی را بر اساس سه رویکرد بدبینانه‌ترین مقدار، محتمل‌ترین مقدار و خوش‌بینانه‌ترین مقدار بسازد. این پارامترهای فازی در محدودیت‌های ۶ و ۸ و ۹، به‌کار رفته‌اند. به‌منظور غیرفازی سازی این محدودیت‌ها از روش تبدیل میانگین وزنی استفاده شده است [۱۱، ۲۳، ۲۴، ۲۷]. با درنظرگرفتن حداقل سطح عضویت قابل‌قبول α روابط قطعی معادل با محدودیت‌های ۶، ۸ و ۹، به‌ترتیب با معادلات ۱۵، ۱۶ و ۱۷، قابل‌جایگزینی خواهند بود.

$$\sum_{p=1}^{p}\sum_{i=1}^{I}(T_{inhj}^{p}+Ts_{inhj}^{p}) = w_1 D_{nhj.\alpha}^{p} + w_2 D_{nhj.\alpha}^{m} + w_3 D_{nhj.\alpha}^{o} \quad \forall n.h.j \tag{۱۵}$$

$$\sum_{n=1}^{N} l_{in} Q_{inh} \le w_1 F_{ih.\alpha}^{p} + w_2 F_{ih.\alpha}^{m} + w_3 F_{ih.\alpha}^{o} \quad \forall i.h \tag{۱۶}$$

$$\sum_{n=1}^{N} r_{in} Q_{inh} \le w_1 M_{ih.\alpha}^{p} + w_2 M_{ih.\alpha}^{m} + w_3 M_{ih.\alpha}^{o} \quad \forall i.h \tag{۱۷}$$

در روابط باال $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ است و w_1، w_2 و w_3 به‌ترتیب نشان‌دهنده وزن مقدار بدبینانه، محتمل‌ترین مقدار و مقدار خوش‌بینانه هستند. در این پژوهش $w_1 = w_3 = \frac{1}{6}$ و $w_2 = \frac{4}{6}$ در نظر گرفته شده و $\alpha = 0.5$ در نظر گرفته شده است. در موقعیت‌های عملی مقدار α و همین‌طور مقدار وزن‌ها بر اساس تجربه و دانش تصمیم‌گیرنده و یا نظر خبرگان تعیین می‌شود.

برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای[1] نوین برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه فازی[2]. در مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه (MODM)[3] تصمیم‌گیرنده درصدد یافتن جواب‌هایی برای مسئله‌ای با چند تابع هدف بر اساس محدودیت‌های موجود است که این توابع هدف، ذاتاً با یکدیگر در تضاد هستند. درحقیقت یافتن جوابی که به‌صورت هم‌زمان همه توابع هدف را بهینه کند، تقریباً غیرممکن است. در گذشته به‌منظور حل این‌گونه مسائل از دو روش ۱. برنامه‌ریزی بازه‌ای[4] و ۲. برنامه‌ریزی فازی به‌صورت گسترده‌ای استفاده شده است. از زمان معرفی مطالعه زاده (۱۹۶۵)، نظریه مجموعه‌های فازی برای حل مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه جذابیت زیادی یافته است [۲۸]. این موضوع به توسعه برنامه‌ریزی خطی چندهدفه فازی(FMOLP)[5] منجر می‌شود که به تصمیم‌گیرنده اجازه می‌دهد سطوح مطلوب خود را برای هدف‌های فازی تنظیم کند. روش‌های زیادی برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه فازی مانند روش‌های ماکسی‌مین زیمرمن[6] (۱۹۷۸)، روش میانگین حسابی[7] لی وهمکاران[8] (۱۹۹۲)، روش دوفازی[9] جو و همکاران[10] (۱۹۹۹)، ارائه شده است [۲۹، ۲۴، ۸، ۹، ۱۱]. روش‌های دوفازی و ماکسی‌مین عموماً نمی‌توانند جواب‌های کارآمدی را به‌دست آورند. در این پژوهش به‌منظور دستیابی به جواب‌های مناسب از روش جدید چانگ و همکاران[11] (۲۰۱۸)، استفاده شده است [۵]. در این روش مدل برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای جدیدی برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه ارائه شده است که به جواب‌های ایده‌آل و غیرایده‌آل نیازی ندارد و به همین دلیل پیچیدگی فرایند حل مسئله کاهش می‌یابد. به‌منظور فهم بهتر روش برنامه‌ریزی خطی چندهدفه فازی برای مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه، ابتدا لازم است صورت کلی مسئله به‌صورت ریاضی بیان شود.

1. Multi-choice goal programming(MCGP)
2. Fuzzy multi objective linear programming(FMLOP)
3. Multi objective decision making
4. Interval programming
5. Fuzzy multi-objective linear programming
6. Zimmermann
7. Arithmetical average
8. Lai
9. Two-phase
10. Guu
11. Chung

مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} &Max\ z=[z_k(x)]^T \quad k=۱،۲.....،l \\ &Min\ w=[w_s(x)]^T \quad s=۱،۲.....،r \\ &S.t: \\ &X \in F \ (F، \text{مجموعه ناحیه شدنی است}) \end{aligned} \qquad (۱۸)$$

در رابطه ۱۸، توابع دسته اول از نوع حداکثرسازی و دسته دوم از نوع حداقل‌سازی هستند. بر اساس مدل اول چانگ و همکاران[1] (۲۰۱۸)، از طریق حل مدل برنامه‌ریزی خطی زیرمجموعه جواب‌های پارتو برای مسئله چندهدفه قابل‌تولید خواهد بود:

$$Min \sum_{k=1}^{l}(\alpha_k d_k^- + \xi_k e_k^-) + \sum_{k=1}^{l}(\beta_s d_s^+ + \delta_s e_s^+) \qquad (۱۹)$$
$$S.t:$$

$$z_k(x)+d_k^- = y_k\ , \qquad k=۱،۲.....،l \qquad (۲۰)$$

$$y_k+e_k^- = g_{k.max}\ , \qquad k=۱،۲.....،l \qquad (۲۱)$$

$$w_s(x)-d_s^+ = y_s\ , \qquad s=۱،۲.....،r \qquad (۲۲)$$

$$y_s- e_s^+ = g_{s.min}\ , \qquad s=۱،۲.....،r \qquad (۲۳)$$

$$g_{k.min} \le y_k \le g_{k.max},\ g_{s.min} \le y_s \le g_{s.max} \qquad (۲۴)$$
$$k=۱،۲.....،l,\ s=۱،۲.....،r$$

$$d_k^-.e_k^-.d_s^+.e_s^+ \ge 0, \qquad k=۱،۲.....،l,\ s=۱،۲.....،r \qquad (۲۵)$$

$$X \in F \qquad (۲۶)$$

در روابط بالا d_k^- و d_s^+ متغیرهای غیرمنفی بوده و به‌ترتیب معرف انحرافات منفی و مثبت مرتبط با روابط $z_k(x) - y_k$ و $w_s(x) - y_s$ در معادلات ۲۰ و ۲۲ هستند. مقادیر y_s وy_k نیز متغیرهای پیوسته هستند که به‌ترتیب در بازه‌های $g_{s.min} \le y_s \le g_{s.max}$ و $g_{k.min} \le y_k \le g_{k.max}$ تغییر می‌کنند. e_k^- و e_s^+ به‌ترتیب انحراف منفی و مثبت مرتبط با$-y_k$ $g_{k.max}$و $g_{s.min}$ $y_s - g_{s.min}$ را در معادلات ۲۱ و ۲۳، نشان می‌دهند که در آن $g_{k.max}$ و $g_{s.min}$ به‌ترتیب مقادیر حدود بالا و پایین توابع هدف حداکثر و حداقل هستند. α_k و β_s وزن‌های مربوط

[1] Chung

به انحرافات d_k^- و d_s^+ و ξ_k و δ_s وزن‌های مربوط به انحرافات e_k^- و e_s^+ هستند. محدودیت ۲۶، نیز معرف محدودیت‌های معمول مسئله است.

مدل ریاضی مسئله با استفاده از روش MCGP. با توجه به اینکه مدل ریاضی ارائه‌شده در این پژوهش دارای سه هدف حداقل‌سازی است، بر اساس روابط ۱۹ تا ۲۶ و درنظرگرفتن ضریب واحد برای متغیرهای انحرافات در تابع هدف، به‌صورت ساده‌ای مطابق با روابط ۲۷ تا ۳۵، خواهد شد. به‌ازای هر تابع هدف حداقل باید در تابع هدف جمع عبارات d_s^+ و e_s^+ قرار داده شود و در محدودیت‌های مسئله علاوه بر محدودیت‌های اصلی مسئله، به‌ازای هر تابع هدف حداقل، محدودیت‌های مرتبط به مسئله اضافه می‌شود.

$$Min\ d_1^+ + e_1^+ + d_2^+ + e_2^+ + d_3^+ + e_3^+ \quad (۲۷)$$

$$S.t.$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H} a_{in1}Q_{inh}(1+e_a)^h + \sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H} b_{in1}V_{inh}(1+e_b)^h + \sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H} c_{in1}W_{inh}(1+e_c)^h + \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{h=1}^{H} d_{in1}E_{inh}(1+e_d)^h + \sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P} k_{in1j}^{p}T_{inhj}^{p}(1+e_k)^h + \sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P} g_{in1j}^{p}Ts_{inhj}^{p}\left(1+e_g\right)^h - d_1^+ = y_1 \quad (۲۸)$$

$$y_1 - e_1^+ = g_{1.min} \quad (۲۹)$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P}\left[\frac{u_{inhj}^{p}}{s_{inhj}^{p}}\right]\left(T_{inhj}^{p} + Ts_{inhj}^{p}\right) - d_2^+ = y_2$$

$$y_2 - e_2^+ = g_{2.min} \quad (۳۰)$$

$$c_{tax}\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H}(Em_{in})(Q_{inh})\,(1+e_e)^h\right) + c_{tax}\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H}(Em_{in})(V_{inh})\,(1+e_e)^h\right) + c_{tax}\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{S}(Em^p)(T_{inhj}^{p})(dis_{ij})\,(1+e_e)^h\right) + c_{tax}\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\sum_{h=1}^{H}\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{S}(Em^p)(Ts_{inhj}^{p})(dis_{ij})(1+e_e)^h\right) - d_3^+ = y_3 \quad (۳۱)$$

$$y_3 - e_3^+ = g_{3.min} \quad (۳۲)$$

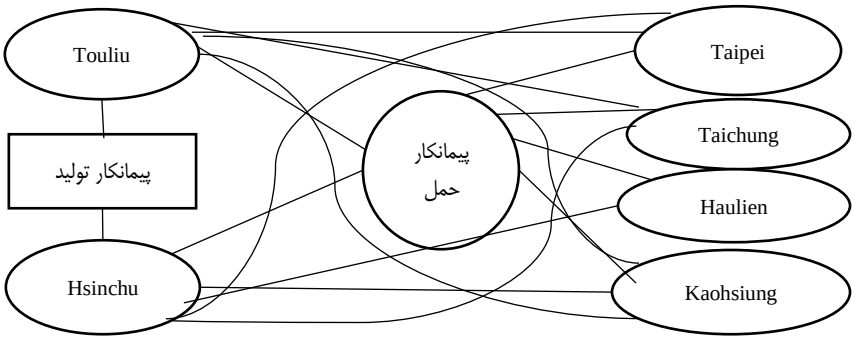
$$g_{k.min} \leq y_k \leq g_{k.max} \quad \forall k = ۱،۲،۳ \quad (۳۳)$$

$$d_k^+ . e_k^+ \geq 0 \quad \forall k = ۱،۲،۳ \quad (۳۴)$$

$$(۴), (۵), (۷), (۱۰)\text{-}(۱۴), (۱۵)\text{-}(۱۷) \quad (۳۵)$$

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

داده‌های مسئله. به‌منظور نشان‌دادن عملکرد مدل پیشنهادی، داده‌های شرکت «دایا تکنولوژی» به‌عنوان یک مطالعه موردی در نظر گرفته شده که یک تولیدکننده پیشرو در زمینه ماشین‌آلات صنعتی در کشور تایوان است. این شرکت نخستین تولیدکننده ماشین بال اسکرو[1] در جهان است که انواع مختلفی از آن را تولید و در نقاط مختلف دنیا توزیع کرده است. شکل ۲، شبکه زنجیره تأمین این شرکت را نشان می‌دهد.



شکل ۲. شبکه زنجیره تأمین مطالعه موردی

با توجه به شکل ۲، شبکه دارای دو مرکز تولید به نام‌های تولین و اچ‌سینچو و دارای چهار مرکز توزیع با نام‌های تایپی، تایچونگ، هااولین و کاسیونگ است.

[1] Ball screw

سه نوع وسیله حمل شامل کامیون، قطار و هواپیما در نظر گرفته شده است. به‌منظور حل مسئله از داده‌های مقاله پایه، یعنی لیانگ (a ۲۰۰۸)، استفاده شده و مقادیر سایر داده‌هایی که صراحتاً داده نشده است، به‌صورت مقادیری منطقی و متناسب، تولید شده است که عبارت‌اند از: ظرفیت وسایل نقلیه؛ تعداد وسایل نقلیه دردسترس؛ مقدار انتشار آلاینده‌ها از هر نوع وسیله نقلیه و مراکز تولید؛ هزینه مالیات به‌ازای انتشار هر گرم آلاینده و مقدار پارامترهای $g_{k.min}$ و $g_{k.max}$. انتقال از طریق هواپیما، بیشترین هزینه و از طریق قطار، کمترین هزینه را دارد؛ از طرفی زمان تحویل از طریق هواپیما کمترین و توسط قطار، بیشترین مقدار را دارد.

کل بودجه دردسترس معادل ۶ میلیون دلار در نظر گرفته شده است. درصد افزایش کلیه هزینه‌ها طی دو دوره متوالی معادل ۲ درصد در نظر گرفته شده است. تعداد دوره‌های زمانی شامل ۳ دوره و مربوط به ماه‌های آوریل، می و ژوئن است. دو نوع محصول در نظر گرفته شده است. مقدار پارامترهای $g_{k.min}$ و $g_{k.max}$ معادل مقدار بهینه تابع هدف در حالت حل تک‌هدفه و به‌ترتیب برابر با صفر و برابر با ۲۰ درصد بیشتر از مقدار بهینه در نظر گرفته شده است.

در هر مرکز تولید تعداد ۲ کامیون، ۲ هواپیما و ۱ قطار در هر دوره برای اعزام به هر مرکز توزیع برای هر نوع محصول دردسترس می‌باشد و ظرفیت هر کامیون معادل حمل ۱۰۰۰ واحد محصول، هواپیما ۲۰۰۰ و قطار ۵۰۰۰ واحد است؛ همچنین از هر نوع وسیله حمل متعلق به پیمانکار در هر مرکز تولید برای اعزام به هر مرکز توزیع در هر دوره برای هر محصول صرفاً یکی وجود دارد.

مقدار گاز دی‌اکسید کربن تولیدشده برحسب گرم به‌ازای هر واحد محصول در مرکز تولید تولین برای محصول اول و دوم به‌ترتیب ۶ و ۸ و برای مرکز تولید اچ سینچو ۴ و ۲ است؛ همچنین مقدار کربن تولیدشده برحسب گرم به‌ازای حمل هر تُن محصول در واحد مسافت (کیلومتر) برای کامیون، هواپیما و قطار به‌ترتیب ۳۰، ۳۰۲ و ۱۰ است و مالیات مربوط به تولید گاز مربوطه ۰/۰۲۶ دلار بر گرم در نظر گرفته شده است.

مقدار موجودی اولیه محصولات در مرکز تولید تولین به‌ترتیب ۴۰۰ و ۲۰۰ برای محصولات ۱ و ۲ و در مرکز تولید اچ سینچو معادل ۳۰۰ و ۲۰۰ برای محصولات ۱ و ۲ در نظر گرفته شده است. ظرفیت پیمانکار برای تولید در هر مرکز تولید در هر دوره معادل ۲۰۰۰۰ واحد محصول در نظر گرفته شده است. مقادیر پارامترهای مرتبط با هر مرکز تولید در دوره‌های مختلف و برای محصولات مختلف مطابق جدول ۱، است. مقدار پارامتر حداکثر فضای انبار دردسترس در همه دوره‌های زمانی برای مراکز توزیع تایپی، تایچونگ، هااولین و کاسیونگ به‌ترتیب برابر با ۶۵۰۰۰، ۶۲۰۰۰، ۶۵۰۰۰ و ۵۳۰۰۰ فوت مربع در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. داده‌های مربوط به تولید در مراکز تولید (دلار)

مرکز تولید	دوره زمانی	محصول	a_{in1}	b_{in1}	c_{in1}	d_{in1}	l_{in}	r_{in}	v_n
تولین	آوریل (دوره اول)	۱	۲۰	۲۵	۰/۳۰	۳۲	۰/۰۵	۰/۱۰	۲
		۲	۱۰	۱۲	۰/۱۵	۱۸	۰/۰۷	۰/۰۸	۳
اچ سینچو	آوریل (دوره اول)	۱	۱۸	۲۴	۰/۲۸	۳۰	۰/۰۴	۰/۰۹	۲
		۲	۹	۱۲	۰/۱۴	۱۶	۰/۰۶	۰/۰۷	۳

مقادیر پارامترهای مرتبط با پارامترهای فازی مدل شامل $\widetilde{D}_{nhj}$، $\widetilde{F}_{ih}$ و $\widetilde{M}_{ih}$ که به‌ترتیب تقاضای هر مرکز توزیع در هر دوره برای هر محصول و حداکثر نفر ساعت نیروی کار دردسترس و حداکثر ظرفیت ماشین‌آلات دردسترس در هر مرکز تولید در هر دوره هستند، به‌صورت اعداد فازی در جدول‌های ۲، ۳ و ۴، ارائه شده است.

جدول ۲. مقادیر اعداد فازی مثلثی مربوط به $\widetilde{D}_{nhj}$

مرکز توزیع	دوره زمانی	محصول	کران پایین	کران وسط	کران بالا
تایپی	آوریل	۱	۹۲۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۸۰۰
		۲	۶۰۰۰	۶۵۰۰	۷۰۰۰
	می	۱	۲۷۵۰	۳۰۰۰	۳۲۵۰
		۲	۸۵۰۰	۹۱۰۰	۹۷۰۰
	ژوئن	۱	۱۳۸۰۰	۱۵۰۰۰	۱۶۲۰۰
		۲	۲۷۵۰	۳۰۰۰	۳۲۵۰
تایچونگ	آوریل	۱	۲۲۵۰۰	۲۴۶۰۰	۲۶۷۰۰
		۲	۴۵۰۰	۵۰۰۰	۵۵۰۰
	می	۱	۲۴۸۶۱/۹	۲۷۲۳۰	۲۹۵۹۷/۵
		۲	۶۵۰۰	۷۲۰۰	۷۹۰۰
	ژوئن	۱	۵۶۲۵	۶۰۰۰	۶۳۷۵
		۲	۲۲۰۰۰	۲۴۰۰۰	۲۶۰۰۰
هااولین	آوریل	۱	۲۷۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۳۰۰۰
		۲	۲۶۰۰	۳۰۰۰	۳۴۰۰
	می	۱	۱۰۵۰۰	۱۲۰۰۰	۱۳۵۰۰
		۲	۳۶۵۰	۴۰۰۰	۴۳۵۰
	ژوئن	۱	۱۹۵۰۰	۲۴۰۰۰	۲۸۵۰۰
		۲	۱۰۵۰۰	۱۱۵۰۰	۱۲۵۰۰
کاسیونگ	آوریل	۱	۱۱۰۰۰	۱۲۳۰۰	۱۳۶۰۰
		۲	۶۵۰۰	۷۱۰۰	۷۷۰۰

	می	۱	۱۵۲۵۰	۱۷۰۰۰	۱۸۷۵۰
		۲	۹۵۰۰	۱۰۵۰۰	۱۱۵۰۰
	ژوئن	۱	۱۴۸۵۰	۱۵۹۰۰	۱۶۹۵۰
		۲	۸۵۵۰	۹۳۰۰	۱۰۰۵۰

جدول ۳. مقادیر اعداد فازی مثلثی مربوط به $\tilde{F}_{ih}$

مرکز تولید	دوره زمانی	کران پایین	کران وسط	کران بالا
تولین	آوریل	۱۰۶۱/۲	۱۱۵۱/۲	۱۲۴۱/۲
	می	۱۰۶۱/۲	۱۱۵۱/۲	۱۲۴۱/۲
	ژوئن	۱۰۶۱/۲	۱۱۵۱/۲	۱۲۴۱/۲
اچ سینچو	آوریل	۱۲۳۳/۴	۱۵۰۰	۱۷۶۵/۹
	می	۱۲۳۳/۴	۱۵۰۰	۱۷۶۵/۹
	ژوئن	۱۲۳۳/۴	۱۵۰۰	۱۷۶۵/۹

جدول ۴. مقادیر اعداد فازی مثلثی مربوط به $\tilde{M}_{ih}$

مرکز تولید	دوره زمانی	کران پایین	کران وسط	کران بالا
تولین	آوریل	۲۱۵۷/۷۵	۲۳۱۷/۷۵	۲۴۷۷/۷۵
	می	۲۱۵۷/۷۵	۲۳۱۷/۷۵	۲۴۷۷/۷۵
	ژوئن	۲۱۵۷/۷۵	۲۳۱۷/۷۵	۲۴۷۷/۷۵
اچ سینچو	آوریل	۲۹۷۶/۲۵	۳۱۷۶/۲۵	۳۳۷۶/۲۵
	می	۲۹۷۶/۲۵	۳۱۷۶/۲۵	۳۳۷۶/۲۵
	ژوئن	۲۹۷۶/۲۵	۳۱۷۶/۲۵	۳۳۷۶/۲۵

مقادیر مربوط به فاصله بین مراکز تولید و توزیع در جدول ۵، ارائه شده است.

جدول ۵. مقادیر فواصل بین مراکز تولید و توزیع dis_{ij}

	تایپی	تایچونگ	هااولین	کاسیونگ
تولین	۲۲۵/۱	۷۱	۲۴۷/۸	۱۴۲/۶
اچ سینچو	۸۵/۸	۹۴	۷۰۰	۲۸۲

دامنه مقادیر به هزینه تحویل توسط سیستم، هزینه تحویل توسط پیمانکار به‌ازای واحد بار و همچنین زمان تحویل به‌ازای ساعت بر واحد بار در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. مقادیر هزینه و زمان تحویل بین مراکز تولید و توزیع

k_{in1j}^{p}	کامیون	۰/۹–۵
	قطار	۰/۴–۴/۱
	هواپیما	۴–۴۱
g_{in1j}^{p}	کامیون	۱/۸–۱۰
	قطار	۰/۸–۸/۲
	هواپیما	۸–۸۲
u_{inhj}^{p}	کامیون	۱/۸–۱۵
	قطار	۲/۴–۱۸
	هواپیما	۰/۴–۴

نتایج پیاده‌سازی مدل. مدل ارائه‌شده در پژوهش ابتدا در حالت تک‌هدفه ساده در بسته افزاری گمز حل شد و مقدار هر یک از توابع هدف مطابق جدول ۷، به‌دست آمد. این مقادیر برای تعیین حدود بالا و پایین اهداف مطابق توضیحات داده‌شده در روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای فازی مورداستفاده قرار می‌گیرند. از طرفی رؤیت این اعداد تصور خوبی در رابطه با حدود مناسب نزدیک به بهینه هر یک از اهداف خواهد داد.

نتایج حل مسئله بر اساس مدل برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای فازی در جدول ۸، نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است روش حل مورداستفاده، عملکرد مناسبی برای مدل پیشنهادی مسئله دارد. مقدار تابع هدف اول نسبت به مقدار بهینه آن اختلافی ندارد و توابع هدف دوم و سوم بیشتر از مقدار بهینه گزارش شده که طبیعی است؛ چراکه در توابع چندهدفه نمی‌توان هم‌زمان همه توابع را در بهینه‌ترین حالت ممکن به‌دست آورد. با توجه به نتایج جدول ۸، ظرفیت تولید برای تولید محصولات کافی نبوده است و از پیمانکار برای تولید محصولات استفاده شده است و مرکز تولید اچ سینچو برای تولید محصول دوم در دوره اول و سوم نیز دچار کمبود شده است که در دوره بعد جبران می‌شود. ظرفیت وسایل حمل نیز برای توزیع کافی نبوده است و از پیمانکاران برای توزیع نیز باید استفاده کرد. به همین دلیل به‌منظور پاسخ به این سؤال که اگر تعداد ماشین‌آلات دردسترس افزایش یابد و ظرفیت توزیع بیشتر شود، مقدار هزینه چه تغییری می‌کند، بررسی بیشتری روی مدل انجام شده و تعداد ماشین‌آلات دردسترس افزایش یافته است و نتایج در جدول ۹، مشاهده می‌شود. با توجه به جدول ۹، با افزایش تعداد کامیون‌ها و قطار مقدار هزینه در تابع هدف اول کاهش می‌یابد؛ چراکه بخش بیشتری از توزیع را خود مرکز توزیع انجام می‌دهد که هزینه کمتری دارد. مقدار تابع هدف دوم نیز کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش تعداد وسایل نقلیه، سرعت توزیع نیز افزایش می‌یابد، مقدار تابع هدف سوم افزایش یافته است که آن هم به‌دلیل

افزایش وسایل نقلیه است؛ زیرا آلودگی بیشتری وارد محیطزیست می‌کنند. نتایج تحلیل حساسیت روی پارامتر افزایش دوره‌به‌دوره هزینه در جدول ۱۰ و شکل ۳، نشان داده شده است.

جدول ۷. مقادیر توابع هدف در حالت تک‌هدفه

مقدار بهینه توابع هدف	$\mathbf{z_1}$ =۵۳۳۷۰۷۸/۵۷
	$\mathbf{z_2}$ =۲۸۵/۳۵
	$\mathbf{z_3}$ = ۳۲۴۹۲/۸۵

جدول ۸. مقادیر متغیرهای تصمیم

متغیر	مقدار
Z_k	$Z_{1=}$ ۵۳۳۷۰۷۸/۵۷ Z_2 = ۶۹۰/۴۱ Z_3 = ۳۹۷۹۹/۸۲
$Q_{inh}(units)$	Q_{111} =۲۳۰۲۴ ، Q_{112} =۲۳۰۲۴ ،Q_{113} = ۲۳۰۲۴ Q_{211} =۳۲۹۱۳/۴۶ ، Q_{212} = ۳۵۲۹۱/۶۷ ، Q_{213} = ۳۵۲۹۱/۶۷ Q_{221} = ۳۰۵۷/۶۹
$V_{inh}(units)$	V_{111} = ۵۹۷۶ ، V_{121} = ۱۴۰۲۴ ، V_{122} = ۲۰۰۰۰ ، V_{123} = ۲۰۰۰۰ V_{123} = ۲۰۰۰۰ ، V_{211} = ۱۵۶۸۶/۵۴ ، V_{212} = ۲۷۹۸/۶۲ ، V_{221} = ۴۳۱۳/۴۶ V_{222} = ۱۷۲۰۱/۳۸ ، V_{223} = ۲۰۰۰۰
$W_{inh}(units)$	W_{111} = ۴۰۰, W_{121} = ۲۰۰, W_{211} = ۳۰۰ W_{221} =۲۰۰, W_{122} = ،۳۵۰۰ ،W_{212} =۲۵۸۴/۳۳ ، W_{222} = ۲۶۹۶/۵۴
$E_{inh}(units)$	E_{221} = ۶۰۴/۸۵ , E_{223} = ۱۶۰۳/۴۶
$T^p_{inhj}(units)$	T^1_{1112} = ۱۶۰۰, T^2_{1112} = ۵۰۰۰, T^1_{1113} = ۲۰۰۰, T^2_{1113} = ۵۰۰۰ . T^3_{1113} =۴۰۰۰. T^1_{1122}= ۲۰۰۰, T^2_{1122} = ۵۰۰۰ T^3_{1122}=۱۲۲۹/۹۵, T^2_{1123} =۴۱۹۴/۰۵, T^2_{1124} =۵۰۰۰, T^2_{1131} =۲۰۰۰, T^2_{1132} = ۱۲۴, T^1_{1133} = ۲۰۰۰, T^2_{1133} = ۵۰۰۰, T^1_{1134} = ۵۰۰۰ T^2_{1212} = ۵۰۰۰ . T^2_{1213} = ۳۰۰۰ . T^1_{1214} = ۸۲۴. T^2_{1214} = ۵۰۰۰ . T^2_{1222} = ۵۰۰۰. T^2_{1223} = ۴۰۰۰. T^1_{1224} = ۲۰۰۰ . T^2_{1224} = ۵۰۰۰, T^1_{1232} = ۲۰۰۰. T^2_{1232} = ۵۰۰۰. T^1_{1233} = ۱۵۰۰. T^2_{1233} = ۵۰۰۰. T^2_{1234} = ۵۰۰۰, T^1_{2111} = ۲۰۰۰, T^2_{2111} = ۵۰۰۰, T^1_{2112} = ۲۰۰۰. T^2_{2112} = ۵۰۰۰, T^1_{2113} = ۲۰۰۰. T^2_{2113} = ۵۰۰۰,T^1_{2114} = ۲۰۰۰, T^2_{2121} = ۳۰۰۰. T^2_{2114} = ۵۰۰۰, T^1_{2122} = ۲۰۰۰, T^2_{2122} = ۵۰۰۰, T^1_{2123} = ۲۰۰۰ T^2_{2123} =۵۰۰۰, T^1_{2124} =۲۰۰۰, T^2_{2124} =۵۰۰۰, T^1_{2131} =۲۰۰۰, T^2_{2131} =۵۰۰۰ T^1_{2132} =۸۷۶,T^2_{2132} =۵۰۰۰,T^1_{2133} =۲۰۰۰,T^2_{2133} =۵۰۰۰,T^1_{2134} =۲۰۰۰, . T^2_{2134} = ۵۰۰۰. T^1_{2211} =۱۵۰۰. T^2_{2211} =۵۰۰۰ ،T^2_{2214} =۱۲۷۶,T^1_{2221} =۲۰۰۰,T^2_{2221} =۵۰۰۰. T^2_{2222} =۱۵۰۰ . T^2_{2224} =۳۵۰۰,T^2_{2231} =۳۰۰۰,T^1_{2232} =۲۰۰۰, T^2_{2232} =۵۰۰۰, T^2_{2233} =۵۰۰۰, T^2_{2234} =۴۳۰۰
$Ts^p_{inhj}(units)$	Ts^2_{1112} =۵۰۰۰, Ts^1_{1113} =۱۰۰۰, Ts^2_{1113} =۵۰۰۰, Ts^2_{1122} = ۱۰۰۰

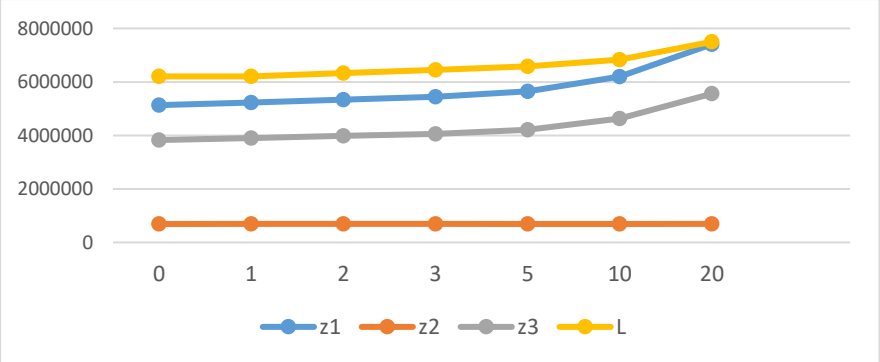
متغیر	مقدار
	Ts^2_{1122} =۵۰۰, Ts^2_{1133} =۵۰۰, Ts^2_{1134} =۱۹۰۰ Ts^2_{1222} =۷۰۰, Ts^2_{1232} =۵۰۰, Ts^2_{2111} =۳۰۰, Ts^1_{2112} =۱۰۰, Ts^2_{2112} =۵۰۰, Ts^1_{2113} =۱۰۰, Ts^2_{2113} =۵۰۰, Ts^1_{2114} =۳۰۰, Ts^2_{2114} =۵۰۰ Ts^1_{2122} =۱۰۰,Ts^2_{2122} =۵۰۰ ,Ts^2_{2123} =۸۰۵, Ts^2_{2124} =۵۰۰, Ts^1_{2131} =۱۰۰, Ts^2_{2131} =۵۰۰, Ts^2_{2133} =۵۰۰, Ts^2_{2221} =۲۱۰۰, Ts^2_{2232} =۵۰۰

جدول ۹. نتایج حل مدل با افزایش تعداد ماشین‌آلات دردسترس

متغیر Ts^p_{inhj}	مقدار توابع هدف	تعداد وسایل حمل‌ونقل
Ts^2_{1113} =۲۰۰۰, Ts^2_{1122} =۱۴۲۴	$Z_{1=}$ ۵۳۰۴۰۸۲/۴۵	۴=کامیون
Ts^2_{2112} =۴۶۱۳/۴۶, Ts^2_{2122} =۱۸۰۵	Z_2 = ۶۲۶/۴۲	۲= قطار
Ts^2_{2131} =۱۰۰۰	Z_3 = ۴۰۱۴۷/۳۰	۲= هواپیما

جدول ۱۰. نتایج تحلیل حساسیت مدل با تغییر درصد افزایش هزینه دوره‌به‌دوره

درصد افزایش دوره‌به‌دوره هزینه‌ها	مقدارتابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	مقدار تابع هدف سوم	مجموع اختلاف توابع هدف از مقادیر بهینه
۰	۵۱۳۳۸۸۵/۴۹	۶۹۰/۴۱	۳۸۲۸۵/۹۴	۱/۶
۱	۵۲۳۵۰۶۷/۰۴	۶۹۰/۴۱	۳۹۰۲۵/۶۸	۱/۶۲
۲	۵۳۳۷۰۷۸/۵۷	۶۹۰/۴۱	۳۹۷۹۹/۸۲	۱/۶۴
۳	۵۴۴۰۸۱۳/۷۵	۶۹۰/۴۱	۴۰۵۸۵/۵۴	۱/۶۷
۵	۵۶۵۱۸۳۷/۱۴	۶۹۱/۲۰	۴۲۱۸۸/۲۹	۱/۷۲
۱۰	۶۲۰۳۲۳۱/۴۱	۶۹۱/۲۰	۴۶۳۷۸/۳۶	۱/۸۵
۲۰	۷۴۰۸۶۹۳/۱۹	۶۹۰/۷۷	۵۵۶۰۴/۴۰	۲/۱۴



شکل ۳. مقادیر تابع هدف با تغییر درصد افزایش هزینه دوره به دوره

با توجه به نتایج جدول ۱۰ و شکل ۳، تابع هدف اول با افزایش درصد یادشده روند صعودی داشته، درحالی‌که تابع هدف دوم تقریباً ثابت مانده است و تابع هدف سوم نیز روندی صعودی را نشان می‌دهد؛ همچنین منظور از مقدار L همان مقدار تابع هدف با روش حل برنامه‌ریزی آرمانی است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش یک مسئله یکپارچه تولید ـ توزیع در زنجیره تأمین با درنظرگرفتن فرض چندمحصولی و چند دوره زمانی و عدم‌قطعیت در برخی پارامترهای کلیدی ارائه شد؛ به‌علاوه با درنظرگرفتن فرض امکان استفاده از چندین وسیله حمل، امکان بهره‌گیری از ترکیب بهتری از آن از نظر هزینه و زمان فراهم می‌شود؛ همچنین با درنظرگرفتن اثرات زیست‌محیطی سیستم‌های مختلف حمل می‌توان به هدف مسئولیت اجتماعی سازمانی نیز رسید. مسئله پیشنهادی با استفاده از روش حل نوین برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای فازی حل و نتایج محاسباتی آن ارائه شد.

یافته‌های این پژوهش از منظر کاربردی برای مدیران صنعت عبارت‌اند از:

۱. ارائه بینش گسترده‌تر به تصمیم‌گیرندگان در طراحی شبکه زنجیره تأمین با لحاظ‌کردن منافع مشتریان (با حداقل‌کردن زمان تحویل محصول) و منافع جامعه (با حداقل‌کردن اثرات تولید کربن) در کنار حداقل‌کردن هزینه‌های طراحی زنجیره تأمین. لازم به ذکر است وجوه یادشده عملاً در بلندمدت به انتفاع زنجیره تأمین با وفاداری بیشتر مشتریان و رعایت الزامات زیست‌محیطی با توجه به فشارهای وارده از طرف دولت منجر خواهد شد.

۲. توجه به برون‌سپاری فعالیت‌های لجستیکی مانند حمل‌ونقل و حتی عملیات تولید از طریق استفاده از پیمانکاران تولید و حمل. این مورد حتی اگر از نظر اقتصادی نیز هزینه‌های بیشتری داشته باشد، می‌تواند به تمرکز بیشتر مدیریت زنجیره بر فعالیت‌های کلیدی منجر شود و مزیت رقابتی بیشتر برای زنجیره تأمین ایجاد کند.

۳. ارائه بینش بهتر به مدیریت زنجیره تأمین در خصوص نحوه مواجهه با پارامترهای عدم‌قطعیت و امکان ایجاد سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری برای مدیریت. لازم به ذکر است مواجهه با عدم‌قطعیت یکی از پیچیدگی‌های مدیریت زنجیره تأمین در کنار تضاد منافع اعضا است.

مدل ارائه شده در پژوهش را می‌توان با روش‌های مختلفی ازجمله موارد زیر توسعه داد:

ـ درنظرگرفتن بیش از دو سطح برای شبکه زنجیره تأمین؛

ـ اضافه‌کردن تصمیماتی مانند مکان‌یابی برای هر کدام از سطوح زنجیره؛

ـ درنظرگرفتن عدم‌قطعیت در پارامترهای مربوط به هزینه و زمان و غیره؛

ـ استفاده از سایر روش‌های حل و مقایسه آن با روش حل مورداستفاده در مقاله؛

ـ درنظرگرفتن سطح خدمت در برآورده‌سازی تقاضا و قراردادن مسئولیت اجتماعی به‌عنوان یک تابع هدف مجزا.

تعارض منافع. برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به عنوان شاهدی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافعی ندارند.

منابع

1. Amiri, M., Barzegar, M., & Niknamfar, A. (2016). A Robust Optimization Approach for an Integrated Production Distribution Planning in a Supply Chain. *The Journal of Industrial Management Perspective, 6(3),* 9-28. (In Persian)
2. Badhotiya, G.K., Soni, G. & Mittal, M.L. (2019). Fuzzy multi-objective optimization for multi-site integrated production and distribution planning in two echelon supply chain. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 102,* 635–645.
3. Bellman, R. E., & Zadeh, L. A. (1970). Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science, 17,* 141–164.
4. Ben Abid, T., Ayadi, O., & Masmoudi, F. (2020). An integrated production-distribution planning problem under demand and production capacity uncertainties: new formulation and case study. *Mathematical Problems in Engineering, 1,* 1-15.
5. Chung, C.K., Chen, H.M., Chang, C.T., & Hau-Lieng Huang, H.L. (2018). On fuzzy multiple objective linear programming problems. *Expert Systems with Applications, 114,* 552-562.
6. Goodarzian, F., & Hosseini-Nasab, H. (2021). Applying a fuzzy multi-objective model for a production-distribution network design problem by using a novel self-adoptive evolutionary algorithm. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics, 8(1),* 1-22.
7. Goodarzian, F., Shishebori, D., Nasseriand, H., & Dadvar, F. (2021). A bi-objective production-distribution problem in a supply chain network under grey flexible conditions. *RAIRO Operations Research, 55,* 1287-1316.
8. Guu, S.M., & Wu, Y.K. (1999). Weight coefficients in two-phase approach for solving the multiple objective programming problems. *Fuzzy Sets and Systems, 85,* 45-48.
9. Guu, S.M., & Wu, Y.K. (1999). Two-phase approach for solving the fuzzy linear programming problems. *Fuzzy Sets and Systems, 107,* 191-195.
10. Hannan, E. L. (1981). Linear programming with multiple fuzzy goals. *Fuzzy Sets and Systems, 6,* 235–248.
11. Lai, Y. J., & Hwang, C. L. (1992). A new approach to some possibilistic linear programming problems. *Fuzzy Sets and Systems, 49,* 121–133.
12. Liang, T.F. (2008a). Fuzzy multi-objective production/distribution planning decisions with multi-product and multi-time period in a supply chain. *Computers and Industrial Engineering, 55(3),* 676–694.
13. Liang, T.F. (2008b). Integrating production-transportation planning decision with fuzzy multiple goals in supply chains. *International Journal of Production Research, 46(6),* 1477–1494, (2008b).

14. Liang, T.F. (2012). Integrated manufacturing/distribution planning decisions with multiple imprecise goals in an uncertain environment. *Quality and Quantity, 46*, 137-153.
15. Mohammed, A., & Wang, Q. (2017). The fuzzy multi-objective distribution planner for a green meat supply chain. *Int J Prod Econ, 184*, 47–58.
16. Mohammadi, M., & Soleimani, H. (2020). Investigating Open Loop and Closed-Loop Supply Chain under Uncertainty (Case Study: Iran Teransfo Company). *The Journal of Industrial Management Perspective, 10(2)*, 33-53. (In Persian)
17. Moon, I., Jeong, Y. J., & Saha, S. (2016). Fuzzy Bi-Objective Production-Distribution Planning Problem under the Carbon Emission Constraint. *Sustainability, 8(8)*, 798-811.
18. Mousakhani, S., & Sangari, M.S. (2020). An integrated location-production-distribution model in the green supply chain considering customer service level. *Industrial Management Studies, 18(56)*, 275- 304.
19. Nobil, A.H., Kazemi, A. (2016). Presenting a fuzzy multi-objective model for integrated production-distribution planning in a four-echelon closed-loop supply chain. *International Journal of Industrial Engineering & Production Management, 27(1)*, 91-104. (In Persian)
20. Pathak, S., & Sarkar, S. (2011). A fuzzy optimization model to the aggregate production/distribution planning decision in a multi-item supply chain network. *International Journal of Management Science and Engineering Management, 6(1)*, 163-173.
21. Peidro, D., Mula, J., Alemany, M.M.E., & Lario, F.-C. (2012). Fuzzy multi-objective optimisation for master planning in a ceramic supply chain. *International Journal of Production Research, 50*, 3011-3020.
22. Raad, A., Sadeghi, A., & Ghasemi, B. (2016). Mathematical Modeling of Two-Echelon with Multiple Manufacturers and Transportation in the Supply Chain. *The Journal of Industrial Management Perspective, 6(3)*, 77-100. (In Persian)
23. Ramik, J., & Rimanek, J. (1985). Inequality relation between fuzzy numbers and its use in fuzzy optimization. *Fuzzy Sets and Systems, 16*, 123–138.
24. Rommelfanger, H. (1996). Fuzzy linear programming and applications. *European Journal of Operational Research, 92*, 512–527.
25. Sajedi, S., Sarfaraz, A., Bamdad, S., & Khalili-Damghani, K. (2021). Mathematical model of location, multi-commodity and multi-period in sustainable closed-loop supply chain considering risk and demand and quality uncertainty (A case Study). *Journal of Industrial Management Perspective, 11(2)*, 271-304. (In Persian)
26. Sharahi, S., Khalili-Damghani, K., Abtahi, A.R., & Rashidi-Komijan, A. (2018). Type-II fuzzy multi-product, multi-level, multi-period location–allocation, production–distribution problem in supply chains: modelling and optimisation approach. *Fuzzy Information Engineering, 10(2)*, 260–283.
27. Tanaka, H., Ichihashi, H., & Asai, K. (1984). A formulation of fuzzy linear programming problem based on comparison of fuzzy numbers. *Control and Cybernetics, 13*, 185–194.
28. Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control, 8*, 338-353.
29. Zimmermann, H.J. (1978). Fuzzy programming and linear programming with several objective functions. *Fuzzy Sets and Systems, 1*, 45-55.