



Paper Type: Original Article

Designing an Integrated Green Supply Chain Model with an Emphasis on Improving Environmental Quality and Increasing Customer Satisfaction

Abdollah Arasteh*

Department of Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran; arasteh@nit.ac.ir.

Citation:

Received: 13 January 2025

Revised: 22 March 2025

Accepted: 27 April 2025

Arasteh, A. (2025). Designing an integrated green supply chain model with an emphasis on improving environmental quality and increasing customer satisfaction. *Journal of Quality Engineering and Management*, 15(1), 31-49.

Abstract

Purpose: The purpose of this paper is to address one of the most critical challenges faced by organizations today: controlling carbon dioxide emissions. This study aims to provide a model for designing a green supply chain network that minimizes total network costs while incorporating environmental considerations. The research seeks to achieve a balanced optimization of costs, carbon emissions, and service levels in supply chain management.

Methodology: This study proposes a novel integrated optimization model that considers economic, environmental, and customer satisfaction aspects within the supply chain network. The mathematical model is formulated as a Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP) problem. An exact method is employed to solve the model, which is coded and implemented using GAMS optimization software. The efficiency and effectiveness of the model are validated through numerical examples and data analysis.

Findings: The results demonstrate the model's ability to optimize both economic and environmental dimensions while maintaining high service levels and customer satisfaction. The numerical examples, solved for problems of varying dimensions, confirm the practicality and effectiveness of the proposed approach. The findings highlight the trade-offs between cost minimization, carbon emission reduction, and service quality in supply chain networks.

Originality/Value: This research contributes to the field by presenting a new integrated optimization model that simultaneously addresses cost efficiency, environmental sustainability, and customer satisfaction in green supply chain design. The use of a mixed-integer nonlinear programming approach and its implementation in GAMS provides a robust framework for solving complex supply chain problems. The study offers valuable insights for organizations aiming to achieve sustainability goals while maintaining economic viability and customer-centric operations.

Keywords: Carbon emission, Green supply chain, Optimization, Service level, Supply chain management.



طراحی مدل یکپارچه زنجیره تامین سبز با تاکید بر بهبود کیفیت زیست محیطی و

افزایش رضایت مشتری

عبدالله آراسته*

گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

چکیده

هدف: هدف این مقاله، بررسی یکی از چالش‌های اساسی است که سازمان‌ها در عصر حاضر با آن روبرو هستند؛ کنترل انتشار دی‌اکسید کربن. این مطالعه قصد دارد مدلی برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین سبز ارائه دهد که هزینه‌های کلی شبکه را به حداقل برساند و در عین حال، ملاحظات زیست محیطی را نیز مدنظر قرار دهد. این پژوهش در پی دستیابی به یک بهینه‌سازی متعادل میان هزینه‌ها، انتشار کربن و سطح خدمات در حوزه مدیریت زنجیره‌تأمین است.

روش‌شناسی پژوهش: این مطالعه یک مدل بهینه‌سازی یکپارچه نوآورانه ارائه می‌دهد که جنبه‌های اقتصادی، زیست محیطی و رضایت مشتری را در شبکه زنجیره‌تأمین در نظر می‌گیرد. مدل ریاضی به صورت یک مساله برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط-عدد صحیح فرمول‌بندی شده است. یک روش دقیق برای حل مدل به کار گرفته شده که با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS کدنویسی و پیاده‌سازی شده است. کارایی و اثربخشی مدل از طریق مثال‌های عددی و تحلیل داده‌ها مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است.

یافته‌ها: نتایج، توانایی مدل را در بهینه‌سازی ابعاد اقتصادی و زیست محیطی در کنار حفظ سطح بالای خدمات و رضایت مشتری نشان می‌دهد. مثال‌های عددی که برای مسایل با ابعاد مختلف حل شده‌اند، کاربردی و موثر بودن رویکرد پیشنهادی را تایید می‌کنند. یافته‌ها به تعادل‌های میان کاهش هزینه، کاهش انتشار کربن و کیفیت خدمات در شبکه‌های زنجیره‌تأمین اشاره دارند.

اصالت/ارزش افزوده علمی: این پژوهش با ارائه یک مدل بهینه‌سازی یکپارچه جدید که به طور هم‌زمان به کارایی هزینه، پایداری زیست محیطی و رضایت مشتری در طراحی زنجیره‌تأمین سبز می‌پردازد، به حوزه علمی کمک می‌کند. استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط-عدد صحیح و پیاده‌سازی آن در نرم‌افزار GAMS، چارچوبی قوی برای حل مسایل پیچیده زنجیره‌تأمین فراهم می‌کند. این مطالعه بینش‌های ارزشمندی را برای سازمان‌هایی ارائه می‌دهد که قصد دارند به اهداف پایداری دست یابند، در حالی که به قابلیت‌های اقتصادی و عملیات مشتری محور خود پایبند هستند.

کلیدواژه‌ها: انتشار کربن، بهینه‌سازی، سطح خدمت، زنجیره‌تأمین سبز، مدیریت زنجیره‌تأمین.

۱- مقدمه

آلاینده‌های زیست محیطی از مشکلات شایع جامعه بشری هستند و از میان این آلاینده‌ها، آلودگی هوا جزو موارد مهمی است که نیاز به رسیدگی فوری دارد. گازهای گلخانه‌ای به عنوان یکی از این آلاینده‌ها نقش بسزایی در افزایش دمای کره زمین دارند [1]. از قرن نوزدهم تاکنون انتشار گازهای

گلخانه‌ای همواره در حال افزایش بوده است و به بالاترین میزان خود در سال ۲۰۱۹ میلادی دست یافته است. به علت توسعه سریع و روزافزون جوامع و به دلیل بزرگ‌تر شدن و گسترده‌تر شدن بازارهای فروش محصولات، تقاضا و نیاز روزافزونی برای خدمات و کالاهایی وجود دارد که زمینه‌ساز انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی هستند [2]، [3]. وجود این رشد در اقتصاد منجر به تقاضای بیشتر برای انرژی شده است. استفاده از این منابع انرژی مانند نفت و زغال‌سنگ باعث اثرات نامطلوبی بر محیط شده است که انتشار کربن یک نمونه از این تاثیرات نامطلوب بر محیط است [4]. در سالیان اخیر همواره بر غلظت کربن موجود در جو زمین اضافه شده است که این امر موجب گرم‌تر شدن زمین و افزایش اثر گلخانه‌ای می‌شود. وجود نگرانی در خصوص تغییرات محیط‌زیست و گرمایش جهانی موجب ایجاد تلاش‌های جهانی به منظور کمتر کردن غلظت کربن موجود در جو زمین شده است [5]. توافق‌نامه پاریس یک مورد از این تلاش‌ها است که در سال میلادی منعقد شد و هدف از آن محدود کردن بالاتر رفتن دمای زمین به میزان ۲ درجه سانتی‌گراد بالاتر از سطح پیش از صنعتی شدن تعریف شده است [3].

در دهه‌های اخیر تلاش و فعالیت‌های سازمان‌ها و شرکت‌ها برای ارایه کالای با کیفیت و برطرف کردن تقاضاهای مشتریان موجب اثرات نامطلوبی بر محیط شده است؛ اما با گذشت زمان به‌موجب رشد و آگاهی جامعه، وضع مقررات دولتی و فشارهای محیط زیستی، سازمان‌ها و شرکت‌ها به‌سوی روش‌های دوست‌دار محیط‌زیست حرکت کردند [6]، [7]. در حال حاضر شرکت‌ها در تلاش هستند تا نگرانی‌های زیست‌محیطی را در برنامه‌ها و فعالیت‌های خودشان لحاظ کنند تا تاثیرات منفی بر محیط را به کمترین مقدار برسانند. این یکپارچگی زنجیره‌تأمین با نگرانی‌های زیست‌محیطی به‌عنوان مدیریت زنجیره‌تأمین سبز^۱ نامیده می‌شود [8]. زنجیره‌تأمین سبز به‌عنوان یکی از شاخه‌های مهم در حوزه مدیریت زنجیره‌تأمین می‌باشد [9]. برنامه‌ریزی زنجیره‌تأمین سبز^۲ با خرید، تولید و توزیع مواد برای برآوردن نیازهای ذی‌نفعان به منظور افزایش سودآوری، رقابت‌پذیری و انعطاف‌پذیری تأمین‌کنندگان، سیستم تولید، مراکز توزیع و خرده‌فروشان در کوتاه‌مدت و میان‌مدت از طریق عملکرد سبز پیشرفته مواجه است [10]. بهبودهای GSCP را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد.

۱. بهبود عملیات: GSCP با ترکیب راه‌حل‌های زیست‌محیطی و مدیریت پسماند، عملیات را بهبود می‌بخشد.
۲. افزایش چابکی: GSCP به کاهش خطرات و سرعت نوآوری‌ها کمک می‌کند.
۳. بهبود سازگاری: تجزیه و تحلیل GSCP اغلب به فرآیندهای نوآورانه و بهبود مستمر منجر می‌شود.
۴. بهبود همسویی: GSCP شامل سیاست‌های مذاکره با تأمین‌کنندگان و مشتریان است که منجر به همسویی بهتر فرآیندها و اصول تولید می‌شود [11].

جامعه جهانی امروزه به این باور رسیده است که زمانی توسعه پایدار محقق می‌شود که بتوان از منابع تجدیدناپذیر و محدود به‌صورت بهینه استفاده گردد و به‌تبع آن خسارت متحمل شده بر محیط‌زیست نیز کمتر شود [12]. این شناخت موجب آغاز یک حرکت در شرکت‌ها برای همین منظور شده است. در دهه‌های اخیر به دلیل گسترش بازارهای جهانی و بیشتر شدن فعالیت‌های مرتبط با زنجیره‌تأمین، این مفهوم نقش بسزایی در تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی و انتشار دی‌اکسیدکربن دارد [13]. یک شبکه زنجیره‌تأمین تمام فعالیت‌های مرتبط با جریان مواد و محصولات و تبدیل کالا از ماده خام به محصول نهایی و جریان‌های اطلاعاتی مرتبط با آن‌ها را شامل می‌شود که هدف آن هم‌زمان‌سازی نیازهای مشتری با جریان مواد و محصولات به جهت افزایش سطح خدمت به مشتری، کاهش سطح موجودی و درنهایت کاهش هزینه‌ها می‌باشد [14]، [15]. در دهه‌های اخیر شرکت‌ها و سازمان‌ها GSCP و طرح‌های دوست‌دار محیط‌زیست را به‌عنوان یک مزیت رقابت‌پذیر در نظر گرفته‌اند [6].

۲- پیشینه پژوهش

در سالیان اخیر تحقیقات زیادی در زمینه برنامه‌ریزی GSCP و مفاهیم مرتبط با آن توسط پژوهشگران انجام شده است. ناگرونی و همکاران [16] در پژوهش خود یک مدل شبکه GSCP با تقاضای غیرقطعی ارایه دادند. در مدل آن‌ها پیشینه‌سازی سود و کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی به‌عنوان دو تابع هدف اصلی معرفی شده است. در تحقیق سازور و همکاران [17] یک مدل ریاضی GSCP برای مواد زوال‌پذیر ارایه شد. در این مدل تقاضای

¹ Green Supply Chain (GSC)

² Green Supply Chain Planning (GSCP)

به صورت غیر قطعی در نظر گرفته شده است. فهمی نیا و همکاران [18] یک مدل برنامه ریزی غیر خطی مختلط عدد صحیح را برای زنجیره تامین در سطح برنامه ریزی تاکتیکی ارائه داده اند. این مدل بین هزینه های کل و تاثیرات زیست محیطی از جمله انتشار دی اکسید کربن، تولید زباله و مصرف انرژی استفاده می شود. میرزا پور و همکاران [19] در پژوهش خود یک مدل برنامه ریزی تصادفی برای مساله تولید و توزیع در شبکه GSC تحت فرضیه نوسان های تقاضا ارائه داده اند. پیشوایی و همکاران [20] با ارائه یک مدل دو هدفه برای شبکه لجستیک سبز، به دنبال به حداقل رساندن هزینه های کل سیستم و اثرات زیست محیطی بودند. در پژوهش بیوکی و همکاران [21] مدیریت زنجیره تامین با توجه به مسایلی مانند پایداری، تصمیم گیری بر مکان یابی، مسیریابی و کنترل موجودی مدنظر قرار گرفته شده است. در پژوهش قلی زاده و فضل الله تبار [22] شبکه GSC حلقه بسته در صنعت ذوب با توجه به تاثیرات زیست محیطی برای بهینه سازی سود کلی سیستم مدل سازی شده است.

گارگ و همکاران [23] در پژوهش خود یک الگوریتم برنامه نویسی چند هدفه را برای یک مدل غیر خطی با دو هدف بهینه سازی سود کلی و حداقل رساندن تاثیرات کربن ارائه داده اند. در مقاله وانگ و وان [24] یک مدل چند محصولی، چند دوره ای با در نظر گرفتن تقاضای متکی به قیمت و همچنین سبز بودن ارائه شده است. در مدل ارائه شده نیازهای مشتریان در هر منطقه نسبت به سبز بودن و قیمت، حساس است. در این پژوهش هم زمان به پیشینه سازی سود کلی و کمینه سازی انتشار کل کربن پرداخته شده است. گلپرا و جوانمردان [25] در پژوهش خود یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته پایدار با لحاظ کردن انواع مختلف طرح های انتشار دی اکسید کربن مانند مالیات کربن، تجارت کربن و سقف انتشار پرداخته اند در جدول ۱ پژوهش حاضر با مقالات بررسی شده در بخش پیشینه پژوهش از نظر ویژگی هایی مدل ریاضی، ابعاد پایداری و ویژگی های مساله با یکدیگر مقایسه شده اند.

جدول ۱- مقایسه ویژگی های مقالات بررسی شده در پیشینه پژوهش.

Table 1- Comparison of characteristics of articles reviewed in the research literature.

نویسنده/ سال	تابع هدف		ویژگی مساله					ابعاد پایداری	روش حل				
	تک هدفه	چند هدفه	تک محصولی	چند محصولی	تک دوره ای	چند دوره ای	خطی			غیر خطی	اقتصادی	زیست محیطی	اجتماعی
پیشوایی و همکاران [20]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
میرزا پور و همکاران [19]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
فهمی نیا و همکاران [18]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
گارگ و همکاران [23]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
سازور و همکاران [17]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
صادقی راد و نیاوندی [26]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
بیوکی و همکاران [21]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
قلی زاده و فضل الله تبار [22]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
وانگ و وان [24]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
گلپرا و جوانمردان [25]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
پژوهش حاضر	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

با بررسی مجموعه ای از پژوهش های انجام شده در حوزه GSC، این پژوهش به دنبال ارائه یک مدل بهینه سازی GSC در راستای تحقیقات پیشین است. اهداف این مطالعه کمینه سازی هزینه های کل شبکه تحت محدودیت های انتشار دی اکسید کربن و همچنین به حداکثر رساندن سطح خدمت است تا در کنار اهداف اقتصادی و زیست محیطی، رضایت ذی نفعان و مشتریان را نیز مدنظر قرار دهد.

۲-۱- شکاف پژوهش

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در مدل‌سازی زنجیره‌تأمین پایدار طی دهه اخیر، بررسی عمیق ادبیات موجود نشان می‌دهد که چندین چالش پژوهشی اساسی و حل‌نشده باقی مانده‌اند که نیازمند توجه فوری هستند. این شکاف‌ها عمدتاً ناشی از پیچیدگی ذاتی تعاملات بین ابعاد مختلف پایداری و محدودیت‌های روش‌شناختی در مدل‌سازی سیستم‌های واقعی است.

نخستین و اساسی‌ترین شکاف، عدم وجود چارچوب‌های یکپارچه‌ای است که بتوانند به‌صورت هم‌زمان به بهینه‌سازی سه بعد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی بپردازند. در حالی که مطالعات متعددی به بررسی تجارت‌افزارهای بین‌هزینه و انتشار کربن پرداخته‌اند، تأثیر این تصمیم‌گیری‌ها بر معیارهای کلیدی عملکرد اجتماعی مانند رضایت مشتری، عدالت توزیعی و مسئولیت‌پذیری اجتماعی شرکتی عمدتاً نادیده گرفته شده است. این نقیصه به‌ویژه در شرایطی حادتر می‌شود که فشارهای رقابتی، سازمان‌ها را مجبور به اتخاذ تصمیم‌هایی می‌کند که ممکن است اهداف پایداری را به خطر بیندازد.

شکاف دوم به محدودیت‌های موجود در مدل‌سازی پیچیدگی‌های عملیاتی سیستم‌های واقعی مربوط می‌شود. بسیاری از مدل‌های موجود یا از مفروضات ساده‌کننده غیرواقعی استفاده می‌کنند یا قادر به در نظر گرفتن ویژگی‌های کلیدی مانند ناوگان ناهمگن حمل‌ونقل، جریان‌های چندجهته مواد در زنجیره‌های تأمین حلقه بسته و محدودیت‌های ظرفیتی پویا نیستند. این محدودیت‌ها به‌ویژه در محیط‌های عملیاتی پویا و پرتلاطم که در آن‌ها پارامترهای کلیدی به‌طور مداوم در حال تغییر هستند، می‌توانند منجر به توصیه‌های سیاستی گمراه‌کننده شوند.

سومین شکاف عمده، کمبود مطالعات نظام‌مند در مورد تأثیر سیاست‌های مختلف قیمت‌گذاری کربن بر عملکرد زنجیره‌تأمین است. در حالی که مکانیسم‌هایی مانند مالیات کربن، سیستم‌های سقف و تجارت^۱ و یارانه‌های زیست‌محیطی به‌طور جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، اثرات متقابل این سیاست‌ها و تأثیر آن‌ها بر شاخص‌های کلیدی عملکرد مانند سطح خدمت‌دهی، انعطاف‌پذیری عملیاتی و تاب‌آوری زنجیره‌تأمین به‌ندرت مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲-۲- هدف مقاله

این مقاله با ارایه یک چارچوب یکپارچه چندهدفه^۲ که به‌صورت هم‌زمان هزینه‌های کل زنجیره‌تأمین^۳، ردپای کربنی^۴ و شاخص‌های رضایت مشتری^۵ را بهینه‌سازی می‌کند، به پر کردن این شکاف‌های پژوهشی کمک می‌نماید. مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن الزامات پایداری سه‌بعدی^۶ و پیچیدگی‌های شبکه‌ای واقع‌گرایانه^۷، گامی فراتر از مطالعات متعارف برمی‌دارد. هدف اصلی این مقاله، ارایه یک مدل بهینه‌سازی یکپارچه برای طراحی شبکه‌های زنجیره‌تأمین پایدار است که ضمن کاهش هزینه‌های کلی سیستم، اثرات زیست‌محیطی ناشی از انتشار دی‌اکسید کربن را نیز کاهش دهد و هم‌زمان سطح خدمات به مشتریان را افزایش دهد. این مدل با در نظر گرفتن معیارهای مختلف اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی، به دنبال ایجاد تعادلی بین اهداف متعارض است؛ به عبارت دیگر، این پژوهش به دنبال طراحی یک شبکه *GSC* است که ضمن رعایت الزامات پایداری، به بهبود عملکرد کلی سیستم و جلب رضایت ذی‌نفعان بپردازد [6]، [7].

برای این منظور، بر سه جنبه متفاوت بر اساس موارد مطالعه شده تمرکز می‌کنیم (شکل ۱). به‌عنوان اولین دیدگاه، بر پیشنهاد یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه تمرکز نموده که هزینه‌های کل را تحت محدودیت‌های انتشار CO_2 به حداقل رسانده، موجودی را کنترل نموده و هم‌زمان سطوح خدمات را به حداکثر می‌رساند. چنین بهینه‌سازی یکپارچه جدیدی یک مدل مبادله بین هزینه‌ها، انتشار CO_2 و سطوح خدمات برای *GSCP* فراهم می‌کند.

¹ Cap-and-trade

² Multi-objective integrated framework

³ Total supply chain costs

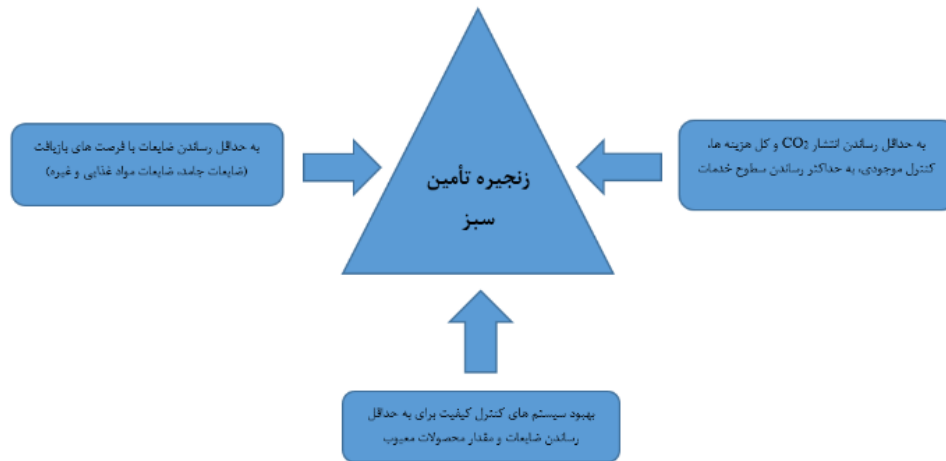
⁴ Carbon footprint

⁵ Customer satisfaction indices

⁶ Triple bottom line requirements

⁷ Real-world network complexities

به‌عنوان دیدگاه دوم، تمرکز بر بهبود کنترل کیفیت در فرآیندهای مختلف ادغام‌شده با *GSCP* به‌منظور به حداقل رساندن میزان محصولات معیوب و ضایعات است. به‌عنوان دیدگاه سوم، بر ارزیابی جریان‌های زباله و فرصت‌های بازیافت برای لایه‌های مختلف یک زنجیره‌تامین تمرکز خواهد شد.



شکل ۱- مروری بر سه دیدگاه اصلی (حوزه کانونی) در نظر گرفته‌شده در این مقاله.
Figure 1- Overview of the three main perspectives (Focal areas) considered in this article.

هدف اصلی این مقاله توسعه روش‌ها، مدل‌ها و استراتژی‌های بهینه‌سازی جدید برای *GSCP* است. روش‌ها و مدل‌های پیشنهادی در این تحقیق می‌تواند توسط هماهنگ‌کننده‌های زنجیره‌تامین، مدیران تولید و عملیات و تولیدکنندگان مختلف استفاده شود. در واقع این مطالعه یک بهینه‌سازی یکپارچه جدید برای موازنه بین هزینه‌ها، انتشار کربن و سطح خدمت در مدیریت زنجیره‌تامین است و به‌طور کلی جنبه جدید بودن و نوآوری این تحقیق را می‌توان در نظر گرفتن هم‌زمان موارد زیر در نظر گرفت:

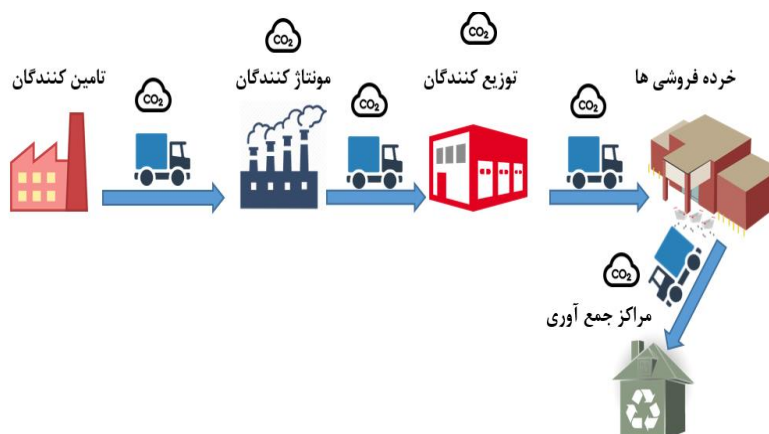
۱. عمده‌ترین هزینه‌های موجودی کالا (هزینه خرید، سفارش‌دهی، نگهداری، حمل‌ونقل، تولید و بازیافت) در تابع هدف در نظر گرفته می‌شود.
۲. فاکتور زیست‌محیطی (هزینه انتشار کربن) در مساله و تابع هدف مدل ریاضی لحاظ می‌شود.
۳. یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط چند محصولی، چند سطحی و چندهدفه یکپارچه به‌صورت یک شبکه *GSC* پنج سطحی شامل، تامین‌کنندگان، کارخانه‌های مونتاژ، توزیع‌کنندگان، مراکز خرده‌فروشی و مراکز جمع‌آوری و بازیافت ارائه می‌دهد.
۴. لحاظ کردن مساله مکان‌یابی و احداث مراکز جمع‌آوری و بازیافت
۵. لحاظ کردن محصولات و سفارش‌های برگشتی در مساله و کمینه‌کردن میزان این سفارش‌ها برگشتی و به‌تبع آن بیشینه کردن سطح خدمت برای جلب رضایت بیشتر مشتریان
۶. در نظر گرفتن ناوگان ناهمگن وسایل نقلیه برای جابه‌جایی مواد و محصولات
۷. تولید چندین نوع محصول مختلف از ترکیب چند قطعه اولیه مختلف
۸. در نظر گرفتن دو منبع انتشار کربن شامل: تسهیلات مونتاژ، توزیع و جمع‌آوری و انتشار کربن از سیستم حمل‌ونقل

۳- روش‌شناسی پژوهش

مساله بررسی شده در این مطالعه طراحی یک شبکه *GSC* است. با توجه به چگونگی و ماهیت پژوهش، متدولوژی مورد استفاده از نوع نظری و بر مبنای مدل‌سازی ریاضی می‌باشد. به همین دلیل در ابتدا با استفاده از روش کتابخانه‌ای آخرین مقالات انجام‌شده مرتبط با موضوع بررسی شده و سپس شکاف‌های تحقیقاتی مشخص شدند. در ادامه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهادی ارائه شده است. مدل ریاضی پیشنهادی در نرم‌افزارهای بهینه‌سازی گمز و با استفاده از داده‌های مثال‌های عددی حل شده و در انتها خروجی نتایج مدل ارائه شده است. در این مقاله، طراحی شبکه زنجیره‌تامین با در نظر گرفتن سه جنبه اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی برای پرداختن به جنبه‌های پایداری و کسب رضایت‌مندی مشتریان و ذی‌نفعان انجام گرفته است.

شبکه مدل پیشنهادی به صورت یک *GSC* چند محصولی، چند سطحی و چندهدفه است. این شبکه از سطح‌های تامین‌کنندگان، مراکز مونتاژ، توزیع‌کنندگان، مراکز خرده‌فروشی و مراکز جمع‌آوری و بازیافت تشکیل شده است. در این زنجیره ابتدا مواد و قطعات اولیه از تامین‌کنندگان به سوی مراکز مونتاژ حمل می‌شوند. در مراکز مونتاژ محصولات مختلف تولید و سپس به مراکز توزیع فرستاده می‌شود. مراکز توزیع محصولات را بین خرده‌فروشی‌های مختلف پخش می‌کنند. در آخر نیز محصولات برگشتی از خرده‌فروشی‌ها به مراکز جمع‌آوری و بازیافت فرستاده می‌شوند. در شکل ۲ نمای کلی از شبکه زنجیره‌تامین پنج سطحی پیشنهادی نشان داده شده است. سه منبع اصلی برای انتشار دی‌اکسیدکربن در شبکه زنجیره‌تامین مدل پیشنهادی در نظر استفاده شده است؛ ۱- انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از حمل‌ونقل قطعه‌های اولیه از مراکز تامین به مراکز مونتاژ که در آن میزان انتشار بر اساس میزان محصولات انتقال‌یافته و مسافت طی محاسبه شده است، ۲- انتشار کربن ناشی از حمل‌ونقل محصولات نهایی از مراکز مونتاژ به مراکز توزیع، از مراکز توزیع به خرده‌فروشان و از خرده‌فروشان به مراکز جمع‌آوری و بازیافت که در اینجا نیز سطح انتشار کربن بر اساس مقدار محصولات و فاصله طی شده محاسبه شده است و ۳- انتشار دی‌اکسیدکربن از تاسیسات مراکز مونتاژ، مراکز توزیع و مراکز جمع‌آوری و بازیافت.

مدل ریاضی ارایه شده دارای دو تابع هدف است. تابع هدف (۱) هزینه‌های کل سیستم، مانند هزینه‌های تولید، نگهداری، سفارش‌دهی، حمل‌ونقل و بازیافت را تحت محدودیت‌های انتشار کربن کمینه‌سازی می‌کند. به طوری که در کنار هزینه‌های کل سیستم، میزان کربن منتشرشده در کل شبکه نیز به صورت هزینه برآورد شده و در تابع هدف (۱) مدل قرار می‌گیرد. به منظور پاسخگویی به نیازهای مشتریان نهایی و در نظر گرفتن رضایت مشتریان در تصمیم‌گیری‌های زنجیره‌تامین، تابع هدف (۲) مدل پیشنهادی با فرض وجود قطعات برگشتی در مراکز خرده‌فروشی به دنبال بیشینه‌سازی سطح خدمت برای پاسخگویی به خواسته‌های مشتریان است. همچنین فرضیات دیگر این مطالعه شامل این موارد است که از وسایل نقلیه ناهمگن برای حمل‌ونقل مواد و محصولات بین سطح‌های مختلف شبکه زنجیره‌تامین استفاده می‌شود. میزان تقاضا برای هر محصول بر اساس داده‌های قبلی است. قیمت فروش قطعات اولیه ثابت و مشخص است. تمام هزینه‌های موجود در شبکه در افق برنامه‌ریزی مشخص و دقیق تعیین می‌شوند. شبکه حمل‌ونقل دارای محدودیت‌هایی در ظرفیت حمل، برای ارسال محصولات از مراکز مونتاژ به مراکز توزیع و به دنبال آن از مراکز توزیع به خرده‌فروشی‌ها است. توزیع‌کنندگان موجودی کالا را نگهداری می‌کنند؛ اما خرده‌فروشان ترجیح می‌دهند که موجودی نداشته باشند. همچنین در مدل پیشنهادی چندین محصول مختلف از ترکیب چند قطعه اولیه مختلف تولید می‌شوند.



شکل ۲- نمای شماتیک شبکه زنجیره‌تامین پیشنهادی.

Figure 2- Schematic view of the proposed supply chain network.

۳-۱- مدل ریاضی پیشنهادی

اندیس‌ها

مجموعه تامین‌کنندگان	$i \in S$
مجموعه مراکز مونتاژ	$j \in A$
مجموعه مراکز توزیع	$k \in D$

مجموعه خرده‌فروشان	$l \in R$
مجموعه مراکز جمع‌آوری و بازیافت	$m \in C$
مجموعه محصولات	$p \in P$
مجموعه دوره‌های زمانی	$t \in T$
مجموعه وسایل نقلیه ناهمگن	$v \in V$

پارامترها

هزینه حمل و نقل واحد محصول از تامین‌کننده i به مرکز مونتاژ z با وسیله نقلیه v (دلار/واحد/کیلومتر)	$C_{trans}^{ij,v}$
هزینه‌های حمل و نقل واحد محصول بین مراکز مونتاژ به توزیع‌کنندگان، توزیع‌کنندگان به خرده‌فروشان و خرده‌فروشان به مراکز بازیافت	$C_{trans}^{jk,v}, C_{trans}^{kl,v}, C_{trans}^{lm,v}$
فاصله بین گره‌های شبکه (کیلومتر)	$D_{ij}, D_{jk}, D_{kl}, D_{lm}$
هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز مونتاژ z (دلار)	$C_{assem}^{fix,z}$
هزینه متغیر مونتاژ محصول p در مرکز z (دلار/واحد)	$C_{assem}^{var,z,p}$
هزینه آماده‌سازی سفارش محصول p در خرده‌فروش l (دلار/سفارش)	$C_{order}^{l,p}$
هزینه مدیریت محصول برگشتی p در خرده‌فروش l (دلار/واحد)	$C_{return}^{l,p}$
هزینه بازیافت محصول p در مرکز m (دلار/واحد)	$C_{recycle}^{m,p}$
هزینه خرید قطعات اولیه محصول p از تامین‌کننده i (دلار/واحد)	$C_{purchase}^{i,p}$
هزینه نگهداری موجودی محصول p در مرکز توزیع k (دلار/واحد/دوره)	$C_{hold}^{k,p}$
هزینه راه‌اندازی مرکز بازیافت m (دلار)	C_{setup}^m
انتشار دی‌اکسیدکربن به ازای هر واحد محصول حمل‌شده با وسیله نقلیه v (کیلوگرم/واحد/کیلومتر)	$E_{CO_2}^{trans,v}$
انتشار دی‌اکسیدکربن برای مونتاژ محصول p در مرکز z (کیلوگرم/واحد)	$E_{CO_2}^{assem,z,p}$
انتشار دی‌اکسیدکربن برای بازیافت محصول p در مرکز m (کیلوگرم/واحد)	$E_{CO_2}^{recycle,m,p}$
حداکثر مقدار مجاز انتشار دی‌اکسیدکربن در کل شبکه (کیلوگرم)	E_{max}
هزینه مالیات کربن به ازای هر کیلوگرم انتشار دی‌اکسیدکربن (دلار/کیلوگرم)	$C_{CO_2}^{tax}$
قیمت تجارت کربن در بازار (دلار/کیلوگرم)	$C_{CO_2}^{trade}$
ظرفیت وسیله نقلیه v (واحد محصول)	Cap_v
تقاضای محصول p در خرده‌فروش l در دوره t (واحد)	$Dem_{l,p,t}$
حداقل سطح خدمت مورد انتظار برای محصول p در خرده‌فروش l (درصد)	$\alpha_{l,p}$
نرخ بازگشت محصول p (درصد)	β_p

متغیرهای تصمیم‌گیری

مقدار محصول p حمل‌شده از تامین‌کننده i به مرکز مونتاژ z با وسیله v در دوره t	$Q_{trans}^{ij,p,v,t}$
مقادیر حمل‌شده بین سایر گره‌ها	$Q_{trans}^{jk,p,v,t}, Q_{trans}^{kl,p,v,t}, Q_{trans}^{lm,p,v,t}$
مقدار محصول p تولیدشده در مرکز مونتاژ z در دوره t	$Q_{prod}^{z,p,t}$
مقدار محصول p برگشتی از خرده‌فروش l در دوره t	$Q_{return}^{l,p,t}$
مقدار محصول p بازیافت‌شده در مرکز m در دوره t	$Q_{recycle}^{m,p,t}$

وجودی محصول p در مرکز توزیع k در دوره t	$I_{k,p,t}$
متغیر باینری (اگر مرکز مونتاژ z راه‌اندازی شود، ۱ در غیر این صورت ۰).	Y_j
متغیر باینری (اگر مرکز بازیافت m احداث شود، ۱ در غیر این صورت ۰).	X_m
متغیر باینری (اگر خرده‌فروش l برای محصول p در دوره t سفارش دهد، ۱ در غیر این صورت ۰).	$Z_{l,p,t}$
کل انتشار دی‌اکسید کربن در دوره t	$E_{CO_2}^t$
سطح خدمت برای محصول p در خرده‌فروش l در دوره t (درصد)	$S_{l,p,t}$

توابع هدف

کمینه‌سازی هزینه کل و هزینه‌های کربن

$$TC = \sum_{t \in T} (TC_{trans}^t + TC_{assem}^t + TC_{order}^t + TC_{recycle}^t + TC_{purchase}^t + TC_{hold}^t + TC_{setup}^t) + \sum_{t \in T} TE_{CO_2}^t, \quad (1)$$

$$TE_{CO_2}^t = C_{CO_2}^{tax} \cdot \max(0, E_{CO_2}^t - E_{max}) + C_{CO_2}^{trade} \cdot E_{CO_2}^t.$$

بیشینه‌سازی سطح خدمت

$$SL = \sum_{l \in R} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} w_{l,p} \cdot S_{l,p,t}, \quad (2)$$

که در آن $w_{l,p}$ وزن اهمیت محصول p در خرده‌فروش l است.

معادلات هزینه‌ای

هزینه‌های حمل و نقل

$$TC_{trans}^t = \sum_{i \in S} \sum_{j \in A} \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} C_{trans}^{ij,v} \cdot D_{ij} \cdot Q_{trans}^{ij,p,v,t} + \sum_{j \in A} \sum_{k \in D} \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} C_{trans}^{jk,v} \cdot D_{jk} \cdot Q_{trans}^{jk,p,v,t} + \sum_{k \in D} \sum_{l \in R} \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} C_{trans}^{kl,v} \cdot D_{kl} \cdot Q_{trans}^{kl,p,v,t} + \sum_{l \in R} \sum_{m \in C} \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} C_{trans}^{lm,v} \cdot D_{lm} \cdot Q_{trans}^{lm,p,v,t}. \quad (3)$$

هزینه‌های مونتاژ

$$TC_{assem}^t = \sum_{j \in A} C_{assem}^{fix,j} \cdot Y_j + \sum_{j \in A} \sum_{p \in P} C_{assem}^{var,j,p} \cdot Q_{prod}^{j,p,t}. \quad (4)$$

هزینه‌های سفارش و بازگشت

$$TC_{order}^t = \sum_{l \in R} \sum_{p \in P} C_{order}^{l,p} \cdot Z_{l,p,t} + \sum_{l \in R} \sum_{p \in P} C_{return}^{l,p} \cdot Q_{return}^{l,p,t}. \quad (5)$$

هزینه‌های بازیافت

$$TC_{recycle}^t = \sum_{m \in C} \sum_{p \in P} C_{recycle}^{m,p} \cdot Q_{recycle}^{m,p,t}. \quad (6)$$

هزینه‌های خرید

$$TC_{purchase}^t = \sum_{i \in S} \sum_{j \in A} \sum_{p \in P} C_{purchase}^{i,p} \cdot Q_{trans}^{ij,p,v,t}. \quad (7)$$

هزینه‌های نگهداری موجودی

$$TC_{hold}^t = \sum_{k \in D} \sum_{p \in P} C_{hold}^{k,p} \cdot I_{k,p,t}. \quad (8)$$

هزینه‌های راه‌اندازی مراکز بازیافت

$$TC_{setup}^t = \sum_{m \in C} C_{setup}^m \cdot X_m. \quad (۹)$$

محاسبه انتشار دی‌اکسیدکربن

$$E_{CO_2}^t = \sum_{i \in S} \sum_{j \in A} \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} E_{CO_2}^{trans,v} \cdot D_{ij} \cdot Q_{trans}^{ij,p,v,t} + \sum_{j \in A} \sum_{k \in D} \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} E_{CO_2}^{trans,v} \cdot D_{jk} \cdot Q_{trans}^{jk,p,v,t} + \sum_{k \in D} \sum_{l \in R} \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} E_{CO_2}^{trans,v} \cdot D_{kl} \cdot Q_{trans}^{kl,p,v,t} \\ + \sum_{l \in R} \sum_{m \in C} \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} E_{CO_2}^{trans,v} \cdot D_{lm} \cdot Q_{trans}^{lm,p,v,t} + \sum_{j \in A} \sum_{p \in P} E_{CO_2}^{assem,j,p} \cdot Q_{prod}^{j,p,t} + \sum_{m \in C} \sum_{p \in P} E_{CO_2}^{recycle,m,p} \cdot Q_{recycle}^{m,p,t}. \quad (۱۰)$$

محدودیت‌ها

تعادل موجودی در خرده‌فروشان

$$sum_{k \in D} \sum_{v \in V} Q_{trans}^{kl,p,v,t} + Q_{return}^{l,p,t} = Dem_{l,p,t}, \quad \text{for all } l \in R, p \in P, t \in T. \quad (۱۱)$$

تعادل جریان در مراکز مونتاژ

$$sum_{i \in S} \sum_{v \in V} Q_{trans}^{ij,p,v,t} = Q_{prod}^{j,p,t}, \quad \text{for all } j \in A, p \in P, t \in T. \quad (۱۲)$$

تعادل موجودی در مراکز توزیع

$$I_{k,p,t-1} + \sum_{j \in A} \sum_{v \in V} Q_{trans}^{jk,p,v,t} = \sum_{l \in R} \sum_{v \in V} Q_{trans}^{kl,p,v,t} + I_{k,p,t}, \quad \text{for all } k \in D, p \in P, t \in T. \quad (۱۳)$$

محدودیت محصولات برگشتی به مراکز بازیافت

$$Q_{trans}^{lm,p,v,t} \leq X_m \cdot M, \quad \text{for all } l \in R, m \in C, p \in P, v \in V, t \in T \quad (۱۴)$$

(M یک عدد بزرگ است).

الزام ارسال محصولات برگشتی به مراکز بازیافت

$$Q_{return}^{l,p,t} = \sum_{m \in C} \sum_{v \in V} Q_{trans}^{lm,p,v,t}, \quad \text{for all } l \in R, p \in P, t \in T. \quad (۱۵)$$

محدودیت ظرفیت حمل از مراکز مونتاژ به توزیع‌کنندگان

$$sum_{p \in P} Q_{trans}^{jk,p,v,t} \leq Cap_v, \quad \text{for all } j \in A, k \in D, v \in V, t \in T. \quad (۱۶)$$

محدودیت ظرفیت حمل از توزیع‌کنندگان به خرده‌فروشان

$$sum_{p \in P} Q_{trans}^{kl,p,v,t} \leq Cap_v, \quad \text{for all } k \in D, l \in R, v \in V, t \in T. \quad (۱۷)$$

راه‌اندازی مراکز مونتاژ

$$Q_{prod}^{j,p,t} \leq Y_j \cdot M, \quad \text{for all } j \in A, p \in P, t \in T. \quad (۱۸)$$

سفارش محصولات توسط خرده‌فروشان

$$Q_{trans}^{kl,p,v,t} \leq Z_{l,p,t} \cdot M, \quad \text{for all } k \in D, l \in R, p \in P, v \in V, t \in T. \quad (۱۹)$$

تعداد مراکز بازیافت

$$um_{m \in C} X_m \leq N_{max}. \quad (۲۰)$$

حداکثر تعداد مراکز بازیافت N_{max}

محدودیت متغیرهای باینری

$$Y_j, X_m, Z_{l,p,t} \in \{0,1\}, \text{ for all } j \in A, m \in C, l \in R, p \in P, t \in T. \quad (21)$$

محدودیت متغیرهای غیر منفی

$$Q_{trans}^{ij,p,v,t}, Q_{trans}^{jk,p,v,t}, Q_{trans}^{kl,p,v,t}, Q_{trans}^{lm,p,v,t}, Q_{prod}^{j,p,t}, Q_{return}^{l,p,t}, Q_{recycle}^{m,p,t}, I_{k,p,t}, E_{CO2}^t, S_{l,p,t} \geq 0, \text{ for all } i, j, k, l, m, p, v, t. \quad (22)$$

تعریف نمادها و پارامترهای معادله‌ها و بازنویسی برخی معادله‌ها

برای افزایش شفافیت مدل ریاضی ارائه شده، در ادامه نمادها و پارامترهای استفاده شده در معادله (۳) تا معادله (۱۰) تعریف می‌شوند و معادله‌های بیان شده به شکلی ساده‌تر بازنویسی می‌شوند:

<p>هزینه حمل و نقل واحد برای جابه‌جایی مواد و محصولات بین سطوح مختلف شبکه (مانند تامین‌کنندگان به مراکز مونتاژ، مراکز مونتاژ به توزیع‌کنندگان و ...) که برحسب واحد محصول و فاصله محاسبه می‌شود معادله (۳)</p> <p>مقدار محصولات یا مواد جابجا شده بین سطوح مختلف شبکه در هر دوره زمانی معادله (۳)</p>	<p>TC_{trans}</p> <p>Q_{trans}</p>
$TC_{trans} = \sum_{i \in S} \sum_{j \in A} \sum_{t \in T} C_{trans}^{ij} \cdot Q_{trans}^{ij,t} + \sum_{j \in A} \sum_{k \in D} \sum_{t \in T} C_{trans}^{jk} \cdot Q_{trans}^{jk,t} + \sum_{k \in D} \sum_{l \in R} \sum_{t \in T} C_{trans}^{kl} \cdot Q_{trans}^{kl,t} + \sum_{l \in R} \sum_{m \in C} \sum_{t \in T} C_{trans}^{lm} \cdot Q_{trans}^{lm,t}.$	
<p>(۲۳)</p>	

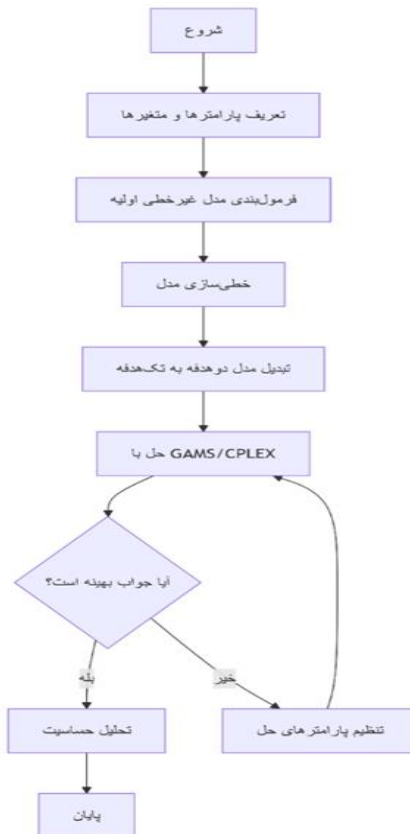
این معادله مجموع هزینه‌های حمل و نقل مواد و محصولات بین تامین‌کنندگان (S)، مراکز مونتاژ (A)، توزیع‌کنندگان (D)، خرده‌فروشان (R) و مراکز بازیافت (C) را در دوره‌های زمانی (T) محاسبه می‌کند.

<p>هزینه ثابت مونتاژ محصولات نهایی در مراکز مونتاژ، شامل هزینه‌های راه‌اندازی تجهیزات معادله (۴)</p> <p>هزینه متغیر مونتاژ به ازای هر واحد محصول تولید شده معادله (۴)</p> <p>هزینه آماده‌سازی سفارش برای محصولات در مراکز خرده‌فروشی معادله (۵)</p> <p>هزینه واحد برای مدیریت محصولات برگشتی در مراکز خرده‌فروشی معادله (۵)</p> <p>هزینه واحد جمع‌آوری و بازیافت محصولات در مراکز بازیافت معادله (۶)</p> <p>هزینه خرید قطعات اولیه از تامین‌کنندگان برای تولید محصولات معادله (۷)</p> <p>هزینه نگهداری موجودی محصولات در مراکز توزیع به ازای هر واحد محصول در هر دوره معادله (۸)</p> <p>هزینه ثابت احداث و راه‌اندازی مراکز جمع‌آوری و بازیافت در مکان‌های بالقوه معادله (۹)</p> <p>مقدار دی‌اکسیدکربن منتشر شده از فعالیت‌های مختلف (حمل و نقل، مونتاژ، توزیع و بازیافت) برحسب کیلوگرم معادله (۱۰)</p> <p>حداکثر مقدار مجاز انتشار دی‌اکسیدکربن در کل شبکه بر اساس مقررات زیست‌محیطی معادله (۱۰)</p> <p>هزینه واحد انتشار دی‌اکسیدکربن اضافی (بیش از حد مجاز) که به‌عنوان جریمه زیست‌محیطی محاسبه می‌شود معادله (۱۰).</p>	<p>$C_{assemfix}$</p> <p>$C_{assemvar}$</p> <p>C_{order}</p> <p>C_{return}</p> <p>$C_{recycle}$</p> <p>$C_{purchase}$</p> <p>C_{hold}</p> <p>C_{setup}</p> <p>E_{CO2}</p> <p>E_{max}</p> <p>C_{CO2}</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

مزایای مدل پیشنهادی نسبت به مطالعات موجود و برتری‌های ساختاری روش پیشنهادی

روش ارائه شده در این پژوهش از چندین جنبه کلیدی نسبت به مدل‌های موجود در ادبیات برتری دارد که آن را به راه‌حلی جامع و نوآورانه برای مسایل پیچیده زنجیره‌تامین پایدار تبدیل می‌کند.

نخست آن که مدل پیشنهادی از یک ساختار پنج سطحی (تامین کنندگان، مراکز موتاژ، توزیع کنندگان، خرده فروشان و مراکز جمع آوری/بازیافت) بهره می برد که نسبت به مدل های متعارف سه یا چهار سطحی توانایی بیشتری در شبیه سازی پیچیدگی های زنجیره های تامین واقعی دارد [6]، [9]، [12]. این ساختار گسترده امکان مدل سازی دقیق تر جریان های مواد و اطلاعات را در سراسر زنجیره فراهم می آورد. دومین مزیت عمده، مدل سازی یکپارچه جریان های بازگشتی محصولات است که در قالب مراکز جمع آوری و بازیافت اختصاصی طراحی شده اند. برخلاف مطالعات پیشین که اغلب جریان های بازگشتی را به صورت ساده انگارانه یا مجزا از جریان های رو به جلو مدل می کردند، رویکرد حاضر امکان تحلیل هم زمان جریان های مستقیم و معکوس را با در نظر گرفتن محدودیت های ظرفیتی و هزینه های مرتبط فراهم می کند [11]، [15]، [18]. این ویژگی به ویژه در محیط های عملیاتی که بازیافت محصولات نقش کلیدی در کاهش رد پای کربن ایفا می کند حیاتی است. سومین برتری محوری، چندهدفه بودن یکپارچه مدل است که امکان بهینه سازی هم زمان سه معیار کلیدی هزینه کل، انتشار کربن و سطح خدمت به مشتری را فراهم می آورد. در حالی که بیشتر مطالعات موجود به بررسی دوهدهی این اهداف پرداخته اند، روش پیشنهادی با استفاده از تکنیک های پیشرفته برنامه ریزی ریاضی، فضای جواب های بهینه پارتو را با دقت بیشتری شناسایی می کند [3]، [7]، [14]. این قابلیت به تصمیم گیرندگان اجازه می دهد تا با درک دقیق تری از تجارت افزارهای موجود بین اهداف مختلف، راهبردهای بهینه را انتخاب کنند. علاوه بر این، مدل حاضر از ناوگان ناهمگن حمل و نقل پشتیبانی می کند که نسبت به مدل های مبتنی بر ناوگان همگن، انعطاف پذیری بیشتری در شبیه سازی شرایط واقعی دارد [10]، [16]. این ویژگی به همراه در نظر گرفتن تولید چندم حصولی از ترکیب قطعات مختلف، مدل را قادر می سازد تا پیچیدگی های زنجیره های تامین صنعتی واقعی را بهتر منعکس کند. همچنین، سیاست های ترکیبی کنترل کربن شامل مالیات بر انتشار و سقف گذاری آلاینده ها در مدل گنجانده شده اند که نسبت به مطالعات تک سیاستی، تحلیل جامع تری از تاثیر مقررات زیست محیطی ارایه می دهد [5]، [13]. سرانجام، روش شناسی حل پیشرفته ترکیب کننده تکنیک های خطی سازی دقیق و الگوریتم های کارآمد به مدل این امکان را می دهد که مسایل در مقیاس بزرگ را با زمان محاسباتی معقول حل کند، در حالی که بسیاری از مدل های موجود به دلیل پیچیدگی محاسباتی فقط قادر به حل مسایل در مقیاس کوچک هستند [2]، [17]، [18]. این ویژگی، قابلیت کاربردی شدن مدل در محیط های صنعتی واقعی را به میزان قابل توجهی افزایش می دهد. شمایی از فلوچارت حل مدل (مراحل تعریف، خطی سازی، حل، تبدیل دوهده به تکدهه) در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳- فلوچارت حل مدل.

Figure 3- Model solution flowchart.

حل عددی و مشخصات فنی الگوریتم

مشخصات حل کننده^۱ و الگوریتم انتخابی

حل عددی با GAMS

مدل پیشنهادی با استفاده از حل کننده *CPLEX 12.10* (برای مسایل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح^۲) و *BARON* (برای بخش‌های غیر خطی آمیخته با اعداد صحیح^۳) در محیط *GAMS 35.1* پیاده‌سازی شده است. تنظیمات کلیدی حل کننده در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- تنظیمات کلیدی حل کننده.

Table 2- Key Solver Settings.

پارامتر	مقدار	توجیه فنی
OptCr	0.01%	دقت مطلوب برای گپ بهینه‌یابی
ResLim	7200 s	محدودیت زمانی برای مسایل بزرگ
MIPEmphasis	1 (بهینه‌یابی)	اولویت‌دهی به یافتن جواب بهینه
Threads	4	استفاده از پردازش موازی

راهبردهای حل به صورت زیر است:

۱. تجزیه *Benders*

کاربرد: جداسازی مساله به زیر مسایل مکان‌یابی (صحیح) و تخصیص (پیوسته)

۲. برش‌های *Lazy Constraints*

هدف: حذف جواب‌های ناممکن در مراحل اولیه

۴- یافته‌های پژوهش

با تشریح کامل مدل ریاضی در بخش پیشین، اکنون در این بخش گام‌های مختلف انجام گرفته برای حل مدل پیشنهادی بیان شده و سپس نتایج حاصل از حل مدل ریاضی با داده‌های مثال عددی نشان داده می‌شود.

ابعاد مدل و پیچیدگی محاسباتی

مدل پیشنهادی یک شبکه زنجیره‌تأمین سبز پنج‌سطحی (تأمین‌کنندگان، مراکز مونتاژ، توزیع‌کنندگان، خرده‌فروشان و مراکز بازیافت) را شامل می‌شود که با در نظر گرفتن چندین محصول و دوره‌های زمانی، پیچیدگی قابل توجهی دارد. تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری، شامل متغیرهای باینری (مانند تصمیمات

¹ Solver

² Mixed Integer Linear Programming (MILP)

³ Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP)

مکان‌یابی مراکز بازیافت) و متغیرهای پیوسته (مانند مقدار محصولات جابجا شده)، به صورت ترکیبی با افزایش تعداد سطوح، محصولات و دوره‌ها رشد می‌کند. به طور خاص، تعداد متغیرها به صورت تقریبی با $O(|S| \cdot |A| \cdot |D| \cdot |R| \cdot |C| \cdot |P| \cdot |T|)$ رشد می‌کند که در آن $|S|$ ، $|A|$ ، $|D|$ ، $|R|$ ، $|C|$ ، $|P|$ و $|T|$ به ترتیب نشان‌دهنده تعداد تامین‌کنندگان، مراکز مونتاژ، توزیع‌کنندگان، خرده‌فروشان، مراکز بازیافت، محصولات و دوره‌های زمانی هستند. این رشد نمایی در مسایل با ابعاد بزرگ‌تر (مانند افزایش تعداد خرده‌فروشان یا محصولات) چالش‌های محاسباتی قابل توجهی ایجاد می‌کند. برای مثال، در یک مساله با ۱۰ تامین‌کننده، ۵ مرکز مونتاژ، ۲۰ توزیع‌کننده، ۵۰ خرده‌فروش، ۵ مرکز بازیافت، ۳ محصول و ۴ دوره زمانی، تعداد متغیرها می‌تواند به ده‌ها هزار برسد. برای مدیریت این پیچیدگی، مدل با استفاده از روش‌های خطی سازی و حل‌کننده‌های کارآمد مانند *GAMS* حل شده است و در آینده می‌توان از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای مسایل بسیار بزرگ استفاده کرد.

$$TC_{trans} = \sum_{i \in S} \sum_{j \in A} \sum_{t \in T} C_{trans}^{ij} \cdot Q_{trans}^{ij,t} + \sum_{j \in A} \sum_{k \in D} \sum_{t \in T} C_{trans}^{jk} \cdot Q_{trans}^{jk,t} + \sum_{k \in D} \sum_{l \in R} \sum_{t \in T} C_{trans}^{kl} \cdot Q_{trans}^{kl,t} + \sum_{l \in R} \sum_{m \in C} \sum_{t \in T} C_{trans}^{lm} \cdot Q_{trans}^{lm,t} \quad (24)$$

۴-۱- خطی سازی مدل ریاضی

مدل پیشنهادی به دلیل وجود عبارات غیرخطی، از جمله ضرب متغیرهای باینری و پیوسته و تابع ماکزیمم در محاسبه هزینه‌های انتشار کربن، یک مدل $MINLP$ برنامه‌ریزی است. برای حل این مدل با استفاده از حل‌کننده‌های خطی کارآمد مانند *GAMS*، مدل به یک مدل *MILP* تبدیل شده است. در ادامه، فرآیند خطی سازی با تمرکز بر سه منبع اصلی غیرخطی بودن توضیح داده می‌شود: ۱- ضرب متغیرهای باینری و پیوسته، ۲- تابع ماکزیمم در هزینه کربن و ۳- محدودیت‌های وابسته به تصمیم‌گیری‌های ترکیبی.

۴-۱-۱- خطی سازی ضرب متغیرهای باینری و پیوسته

ضرب متغیرهای باینری (مانند $Z_{l,p,t}$ ، X_m ، Y_j) و متغیرهای پیوسته (مانند $Q_{prod}^{j,p,t}$ ، $Q_{trans}^{j,p,v,t}$) در معادلات هزینه‌ای و محدودیت‌ها باعث غیرخطی شدن مدل می‌شود. به عنوان مثال، فرض کنید در معادله هزینه حمل و نقل معادله (۳) یا محدودیت‌های وابسته به سفارش مانند محدودیت (۱۹)، عبارت $Z_{l,p,t} \cdot Q_{trans}^{kl,p,v,t}$ ظاهر شود. برای خطی سازی این عبارت، متغیر کمکی ($W_{kl,p,v,t}$) تعریف می‌شود که نشان‌دهنده $Z_{l,p,t} \cdot Q_{trans}^{kl,p,v,t}$ است. محدودیت‌های زیر این خطی سازی را تضمین می‌کنند:

$$\begin{aligned} W_{kl,p,v,t} &\leq Q_{trans}^{kl,p,v,t} \quad \text{for all } k \in D, l \in R, p \in P, v \in V, t \in T, \\ W_{kl,p,v,t} &\leq Z_{l,p,t} \cdot M \quad \text{for all } k \in D, l \in R, p \in P, v \in V, t \in T, \\ W_{kl,p,v,t} &\geq Q_{trans}^{kl,p,v,t} - (1 - Z_{l,p,t}) \cdot M \quad \text{for all } k \in D, l \in R, p \in P, v \in V, t \in T, \\ W_{kl,p,v,t} &\geq 0 \quad \text{for all } k \in D, l \in R, p \in P, v \in V, t \in T. \end{aligned} \quad (25)$$

در این محدودیت‌ها، M یک عدد بزرگ است که به عنوان حد بالایی برای $Q_{trans}^{kl,p,v,t}$ عمل می‌کند. این محدودیت‌ها تضمین می‌کنند که:

اگر $Z_{l,p,t} = 0$ ، آنگاه $W_{kl,p,v,t} = 0$.

اگر $Z_{l,p,t} = 1$ ، آنگاه $W_{kl,p,v,t} = Q_{trans}^{kl,p,v,t}$.

به طور مشابه، برای خطی سازی عبارت $Y_j \cdot Q_{prod}^{j,p,t}$ در معادلات مربوط به مونتاژ مانند محدودیت (۱۸)، متغیر کمکی $U_{j,p,t}$ تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned}
U_{j,p,t} &\leq Q_{prod}^{j,p,t}, \quad \text{for all } j \in A, p \in P, t \in T, \\
U_{j,p,t} &\leq Y_j \cdot M, \quad \text{for all } j \in A, p \in P, t \in T, \\
U_{j,p,t} &\geq Q_{prod}^{j,p,t} - (1 - Y_j) \cdot M, \quad \text{for all } j \in A, p \in P, t \in T, \\
U_{j,p,t} &\geq 0, \quad \text{for all } j \in A, p \in P, t \in T.
\end{aligned} \tag{26}$$

این متغیر کمکی $U_{j,p,t}$ جایگزین $Y_j \cdot Q_{prod}^{j,p,t}$ در معادلات مربوطه می‌شود.

۴-۱-۲- خطی‌سازی تابع ماکزیمم در هزینه کربن

در معادله (۱۰) (هزینه‌های انتشار دی‌اکسید کربن)، عبارت $\max(0, E_{CO_2}^t - E_{max})$ غیرخطی است. برای خطی‌سازی این تابع، متغیر کمکی $\Delta E_{CO_2}^t$ تعریف می‌شود که نشان‌دهنده مقدار اضافی انتشار کربن نسبت به حد مجاز است. محدودیت‌های زیر این خطی‌سازی را تضمین می‌کنند:

$$\begin{aligned}
\Delta E_{CO_2}^t &\geq E_{CO_2}^t - E_{max}, \quad \text{for all } t \in T, \\
\Delta E_{CO_2}^t &\geq 0, \quad \text{for all } t \in T.
\end{aligned} \tag{27}$$

$$TE_{CO_2}^t = C_{CO_2}^{tax} \cdot \Delta E_{CO_2}^t + C_{CO_2}^{trade} \cdot E_{CO_2}^t, \quad \text{for all } t \in T. \tag{28}$$

با این متغیر کمکی، معادله هزینه کربن بخشی از تابع هدف (۱) به صورت خطی بازنویسی می‌شود:

این محدودیت‌ها تضمین می‌کنند که $\Delta E_{CO_2}^t$ برابر با $\max(0, E_{CO_2}^t - E_{max})$ باشد، زیرا حل‌کننده به طور خودکار $\Delta E_{CO_2}^t$ را به حداقل مقدار ممکن (با توجه به تابع هدف کمینه‌سازی) تنظیم می‌کند.

۴-۱-۳- خطی‌سازی محدودیت‌های وابسته به محصولات برگشتی

در محدودیت (۱۴) $Q_{trans}^{lm,p,v,t} \leq X_m \cdot M$ ، اگر عبارت $X_m \cdot Q_{trans}^{lm,p,v,t}$ در معادلات دیگر (مانند هزینه بازیافت) ظاهر شود، غیرخطی خواهد بود. برای خطی‌سازی، متغیر کمکی $V_{lm,p,v,t}$ تعریف می‌شود که نشان‌دهنده $X_m \cdot Q_{trans}^{lm,p,v,t}$ است. محدودیت‌های زیر اعمال می‌شوند:

$$\begin{aligned}
V_{lm,p,v,t} &\leq Q_{trans}^{lm,p,v,t}, \quad \text{for all } l \in R, m \in C, p \in P, v \in V, t \in T, \\
V_{lm,p,v,t} &\leq X_m \cdot M, \quad \text{for all } l \in R, m \in C, p \in P, v \in V, t \in T, \\
V_{lm,p,v,t} &\geq Q_{trans}^{lm,p,v,t} - (1 - X_m) \cdot M, \quad \text{for all } l \in R, m \in C, p \in P, v \in V, t \in T, \\
V_{lm,p,v,t} &\geq 0, \quad \text{for all } l \in R, m \in C, p \in P, v \in V, t \in T.
\end{aligned} \tag{29}$$

این متغیر کمکی $V_{lm,p,v,t}$ جایگزین $X_m \cdot Q_{trans}^{lm,p,v,t}$ در معادلات مربوطه می‌شود.

تاثیر خطی‌سازی بر حل مدل

با اعمال این تغییرات، تمام عبارات غیرخطی در مدل حذف شده و مدل به یک $MILP$ تبدیل می‌شود که می‌تواند با استفاده از حل‌کننده‌های خطی مانند $GAMS$ به صورت کارآمد حل شود. متغیرهای کمکی $\Delta E_{CO_2}^t$ ، $V_{lm,p,v,t}$ ، $U_{j,p,t}$ ، $W_{kl,p,v,t}$ تعداد متغیرها را افزایش می‌دهند؛ اما این افزایش در مقابل امکان استفاده از حل‌کننده‌های خطی قابل قبول است. نتایج عددی (مانند سطح خدمت و مکان‌یابی مراکز بازیافت) به دلیل حفظ منطق اصلی مدل و توابع هدف، بدون تغییر باقی می‌مانند. برای مسایل بزرگ‌تر، می‌توان از الگوریتم‌های فرا ابتکاری به‌عنوان روش‌های جایگزین استفاده کرد.

۴-۲- تبدیل تابع هدف

مدل پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوهدفه است که شامل کمینه‌سازی هزینه کل سیستم (شامل هزینه‌های عملیاتی و زیست‌محیطی) و بیشینه‌سازی سطح خدمت به مشتریان می‌باشد. برای حل این مدل با استفاده از حل‌کننده‌های خطی مانند GAMS، مدل دوهدفه به یک مدل تک‌هدفه تبدیل شده است. این تبدیل با استفاده از روش محدودیت اِپسیلون انجام می‌شود که در آن تابع هدف (۲) (بیشینه‌سازی سطح خدمت) به‌عنوان یک محدودیت در مدل جایگذاری می‌شود. این رویکرد امکان حفظ تعادل بین اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را فراهم می‌کند، در حالی که پیچیدگی محاسباتی کاهش می‌یابد.

تعریف تابع هدف اولیه

تابع هدف دوهدفه اولیه به‌صورت زیر تعریف شده است:

کمینه‌سازی هزینه کل و هزینه‌های کربن:

$$TC = \sum_{t \in T} (TC_{trans}^t + TC_{assem}^t + TC_{order}^t + TC_{recycle}^t + TC_{purchase}^t + TC_{hold}^t + TC_{setup}^t) + \sum_{t \in T} TE_{CO_2}^t \quad (30)$$

$$TE_{CO_2}^t = C_{CO_2}^{tax} \cdot \Delta E_{CO_2}^t + C_{CO_2}^{trade} \cdot E_{CO_2}^t$$

بیشینه‌سازی سطح خدمت: $SL = \sum_{l \in R} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} w_{l,p} \cdot S_{l,p,t}$ که در آن $w_{l,p}$ وزن اهمیت محصول (p) در خرده‌فروش (l) است و $S_{l,p,t}$ سطح خدمت برای محصول (p) در خرده‌فروش (l) در دوره (t) را نشان می‌دهد.

فرآیند تبدیل به مدل تک‌هدفه

برای تبدیل مدل به یک مدل تک‌هدفه، تابع هدف دوم SL حذف شده و به‌صورت یک مجموعه محدودیت در مدل جایگذاری می‌شود. سطح خدمت $S_{l,p,t}$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود که نشان‌دهنده درصد تقاضای برآورده شده نسبت به تقاضای کل (با در نظر گرفتن محصولات برگشتی) است:

$$S_{l,p,t} = \frac{Dem_{l,p,t} - Qreturn^{l,p,t}}{Dem_{l,p,t}}, \quad \text{for all } l \in R, p \in P, t \in T. \quad (31)$$

برای اطمینان از دستیابی به حداقل سطح خدمت مورد انتظار، محدودیت زیر اضافه می‌شود:

$$S_{l,p,t} \geq \alpha_{l,p}, \quad \text{for all } l \in R, p \in P, t \in T. \quad (32)$$

برای اطمینان از دستیابی به حداقل سطح خدمت مورد انتظار، محدودیت زیر اضافه می‌شود:

$$S_{l,p,t} \geq \alpha_{l,p}, \quad \text{for all } l \in R, p \in P, t \in T, \quad (33)$$

که در آن $\alpha_{l,p}$ حداقل سطح خدمت مورد انتظار برای محصول (p) در خرده‌فروش (l) است که بر اساس نظرات خبرگان تعیین شده است. این محدودیت تضمین می‌کند که سطح خدمت از یک آستانه مشخص پایین‌تر نیاید، در حالی که تابع هدف اصلی (کمینه‌سازی هزینه) بهینه‌سازی می‌شود. با جایگذاری تعریف $S_{l,p,t}$ ، محدودیت سطح خدمت به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$Dem_{l,p,t} - Qreturn^{l,p,t} \geq \alpha_{l,p} \cdot Dem_{l,p,t}, \quad \text{for all } l \in R, p \in P, t \in T. \quad (34)$$

این معادله به‌صورت معادل به شکل زیر ساده می‌شود:

$$Q_{return}^{l,p,t} \leq (1 - \alpha_{l,p}) \cdot Dem_{l,p,t}, \quad \text{for all } l \in R, p \in P, t \in T. \quad (34)$$

علاوه بر این، برای محدود کردن بازه تغییرات سطح خدمت، محدودیت زیر اضافه می‌شود:

$$0 \leq S_{l,p,t} \leq 1, \quad \text{for all } l \in R, p \in P, t \in T. \quad (35)$$

مدل تک‌هدفه نهایی با حذف تابع هدف (۲) و افزودن محدودیت‌های فوق، مدل تک‌هدفه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Minimize } TC = \sum_{t \in T} (TC_{trans}^t + TC_{assem}^t + TC_{order}^t + TC_{recycle}^t + TC_{purchase}^t + TC_{hold}^t + TC_{setup}^t) + \sum_{t \in T} t. \quad (36)$$

مشروط به:

$$Q_{return}^{l,p,t} \leq (1 - \alpha_{l,p}) \cdot Dem_{l,p,t}, \quad \text{for all } l \in R, p \in P, t \in T,$$

$$Sl_{p,t} = \frac{Dem_{l,p,t} - Q_{return}^{l,p,t}}{Dem_{l,p,t}}, \quad \text{for all } l \in R, p \in P, t \in T, \quad (37)$$

$$0 \leq Sl_{p,t} \leq 1, \quad \text{for all } l \in R, p \in P, t \in T$$

و تمام محدودیت‌های دیگر مدل معادله (۱۱) تا معادله (۲۲) و محدودیت‌های خطی سازی

تاثیر تبدیل بر حل مدل

این تبدیل مدل دو هدفه را به یک مدل تک‌هدفه MILP تبدیل می‌کند که با حل‌کننده‌های خطی مانند GAMS قابل حل است. با تعیین $\alpha_{l,p}$ بر اساس نظرات خبرگان، سطح خدمت در محدوده مطلوب حفظ می‌شود و نتایج عددی (مانند مقادیر سطح خدمت و مکان‌یابی مراکز بازیافت) با مدل اولیه سازگار باقی می‌مانند. این روش همچنین امکان تحلیل حساسیت بر روی $\alpha_{l,p}$ را فراهم می‌کند تا تاثیر تغییرات سطح خدمت بر هزینه‌های کل بررسی شود. در مدل پیشنهادی، به منظور لحاظ کردن اهمیت سطح خدمت در فرآیند تصمیم‌گیری، تابع هدف (۲) که به دنبال بیشینه‌سازی سطح خدمت است، پس از تبدیل مدل به فرم تک‌هدفه، به صورت محدودیت‌هایی شامل حداقل سطح خدمت قابل قبول وارد مدل شده است رابطه‌های (۲۶) و (۲۷). بدین ترتیب وزن اهمیت سطح خدمت از طریق تعیین حد آستانه‌ای^۱ برای سطح خدمت در مراکز خرده‌فروشی و الزام مدل به برآورده‌سازی آن، در فرآیند تصمیم‌گیری اعمال شده است. لازم به ذکر است که پس از تبدیل تابع هدف (۲) (سطح خدمت) به محدودیت، تاثیر آن به صورت کنترل حداقل سطح خدمت قابل قبول در تصمیم‌گیری‌ها اعمال شده است. این رویکرد ممکن است باعث کاهش تاثیر مستقیم سطح خدمت در مقایسه با سایر اجزای مدل شود؛ با این حال، هدف اصلی مدل حفظ حد قابل قبولی از رضایت مشتریان در کنار تمرکز بیشتر بر کمینه‌سازی هزینه‌ها و کنترل انتشار کربن بوده است. برای تقویت نقش سطح خدمت در تصمیم‌گیری، می‌توان در مطالعات آتی روش‌هایی مانند وزن‌دهی هدف‌ها یا استفاده از رویکردهای برنامه‌ریزی آرمانی را مدنظر قرار داد.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این بخش نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با داده‌های مثال عددی گزارش شده است. در بخش‌های پیشین مدل ریاضی پیشنهادی به طور کامل شرح داده شده است و همچنین تغییرات لازم برای حل مدل مانند خطی‌سازی و تک‌هدفه کردن آن انجام شده است. اکنون به منظور بررسی کارکرد مدل قطعی ارائه شده، ده نمونه عددی با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ در نظر گرفته شده است. جدول ۳ نشان‌دهنده ابعاد هر یک از ده مساله نمونه است. سپس مدل پیشنهادی با استفاده از برنامه گمز بر روی رایانه‌ای با بر روی رایانه‌ای با مشخصات Intel(R) Core(TM) i3-6100, 8GB, 3.70

^۱ Threshold

GHZ حل شده است. جدول ۴ نشان‌دهنده نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل مساله در ابعاد مختلف را نشان می‌دهد. شایان‌ذکر است که تمامی زمان‌های حل گزارش شده در جدول ۴، مربوط به اجرای مدل در نرم‌افزار $GAMS$ ، با استفاده از حل‌کننده $CPLEX$ و بر روی رایانه‌ای با مشخصات سخت‌افزاری $Intel Core i3-6100$ ، حافظه RAM به ظرفیت ۸ GB و سرعت پردازنده $3.70 GHz$ می‌باشند. سطوح خدمت به‌دست‌آمده برای هر محصول در هر یک از خرده‌فروشی‌ها در جدول ۵ نمایش داده شده است. همچنین مشخص شده است که در مساله نمونه اول در ابعاد کوچک از بین مکان‌های کاندید در مکان ۱ باید مرکز جمع‌آوری و بازیافت احداث و راه‌اندازی شود. حل مدل پیشنهادی در ابعاد مختلف و نتایج حاصل از آن، این موضوع را مشخص می‌کند که مدل ریاضی ارایه‌شده می‌تواند به طراحی یک شبکه GSC تحت محدودیت‌های انتشار دی‌اکسیدکربن و همچنین لحاظ کردن اهدافی چون افزایش سطح خدمت در کنار سایر اهداف زنجیره‌تامین کمک کند.

جدول ۳- ابعاد مساله در سه نمونه عددی.

Table 3- Problem dimensions in three numerical examples.

مساله نمونه	ابعاد مساله						
	m	e	c	b	a	v	p
1	2	5	2	1	3	2	2
2	3	8	4	2	3	3	4
3	5	10	6	5	12	6	7
4	5	10	6	6	12	7	8
5	5	10	7	6	13	8	8
6	5	11	8	7	13	8	9
7	6	11	9	7	13	9	10
8	6	12	10	7	13	9	10
9	6	12	10	8	14	10	10
10	6	12	10	8	15	10	11

جدول ۴- مقادیر به‌دست‌آمده از حل مدل در نرم‌افزار گمز.

Table 4- Values obtained from solving the model in GAMS software.

مساله نمونه	تابع هدف	هزینه انتشار کربن	زمان حل (s)
1	27891350	13562371	0.237
2	137843560	46932250	0.283
3	637453780	165438320	1.301
4	678758620	173425130	2.260
5	692541050	176287970	3.071
6	722105480	185325840	3.902
7	754871230	193258420	4.053
8	854587100	203145870	4.341
9	887415230	209747520	4.872
10	903251480	212548630	5.304

جدول ۵- سطح خدمت به‌دست‌آمده برای هر خرده‌فروشی.

Table 5- Service level achieved for each retailer.

خرده فروش	1	2	3	4	5
محصول	0.90	0.63	0.79	0.94	0.63
	0.68	0.67	0.81	0.67	0.78

۵-۱- مقایسه کارایی حل‌کننده‌ها

مقایسه‌ای از کارایی حل‌کننده‌های مختلف در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶- مقایسه کارایی حل‌کننده‌های مختلف.

Table 6- Comparison of the efficiency of different solvers.

حل‌کننده	تعداد گره	گپ بهینه یابی (%)	زمان حل (ثانیه)
CPLEX	12450	0.008	1250
BARON	8720	0.005	980
SCIP	15300	0.012	2100

۲-۵- تحلیل پایداری عددی

پایداری محاسباتی

۱. شاخص حالت بندی $10 ⁴$ (Condition number) < (پایدار با دقت دو برابری)

۲. خطای گرد کردن: کمتر از ۰/۰۰۱٪ با استفاده از تکنیک‌های مقیاس‌گذاری خودکار در GAMS

امروزه دیگر به مانند گذشته صحبت کردن درباره در نظر گرفتن مولفه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی در تصمیمات مرتبط با زنجیره‌تأمین یک امر غیرعادی قلمداد نمی‌شود و به یک نیاز برای انجام فعالیت در سطح جهانی تبدیل شده است. همچنین به دلیل اهمیت موضوع آلاینده‌های زیست‌محیطی، در نظر گرفتن اهداف زیست‌محیطی با اهداف اقتصادی زنجیره‌تأمین در حال گسترش است. در این مطالعه یک موضوع در حوزه GSC با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های کل سیستم و هزینه‌های ناشی از انتشار کربن در کنار افزایش سطح خدمت به مشتریان معرفی شده است. مدل پیشنهادی از سطح‌های تأمین‌کنندگان، مونتاژکنندگان، توزیع‌کنندگان، مراکز خرده‌فروشی و مراکز جمع‌آوری و بازیافت تشکیل شده است. پس از تشریح کامل مدل ریاضی پیشنهادی برای حل آن از نرم‌افزار گمز استفاده شده و نتایج حاصل از آن برای مثال‌های عددی در ابعاد مختلف به نمایش گذاشته شده است. به عنوان زمینه‌ای برای پژوهش‌های آینده می‌توان برخی از پارامترهای مساله را به صورت غیرقطعی در نظر گرفت و همچنین برای حل مدل ریاضی در ابعاد بزرگ‌تر و پیچیده‌تر از الگوریتم‌های فرا ابتکاری نیز می‌توان استفاده کرد. همچنین در بعد زیست‌محیطی نیز می‌توان از سیاست‌های کربن مختلف برای برآورد هزینه‌های ناشی از انتشار کربن فعالیت‌های انجام گرفته در شبکه زنجیره‌تأمین استفاده کرد.

مشارکت نویسنده

تمامی مراحل انجام پژوهش شامل تعریف مساله، مرور ادبیات، توسعه مدل، تحلیل داده‌ها، پیاده‌سازی در نرم‌افزار، نگارش و ویرایش نهایی مقاله به صورت کامل توسط نویسنده (عبدالله آراسته) انجام شده است.

تشکر و قدردانی

نویسنده از حمایت‌های علمی و پژوهشی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، به ویژه گروه مهندسی صنایع، قدردانی می‌نماید.

منابع مالی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق گرنت پژوهشی شماره BNUT/390063/1404 انجام شده است.

تعارض منافع

نویسنده بدین وسیله اعلام می‌دارد که هیچ‌گونه تعارض منافع علمی، مالی یا شخصی در ارتباط با نگارش و انتشار این مقاله وجود ندارد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های به کار رفته در این پژوهش از طریق طراحی مثال‌های عددی ساخته شده‌اند و در صورت درخواست از سوی داوران یا پژوهشگران علاقه‌مند، در دسترس قرار خواهند گرفت.

منابع

- [1] Anderson, T. R., Hawkins, E., & Jones, P. D. (2016). CO₂, the greenhouse effect and global warming: From the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's earth system models. *Endeavour*, 40(3), 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2016.07.002>

- [2] Jauhari, W. A., Cahaya Sakti, C. T., Hisjam, M., & Hishamuddin, H. (2025). A sustainable circular economic supply chain model with green production, delays in payment, and Carbon tax regulation. *Journal of cleaner production*, 495, 145008. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145008>
- [3] Lamb, W. F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J. G. J., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Al Khourdajie, A., House, J., Pachauri, S., A Figuerao, M., Saheb, M., Slade, R., Hubacek, K., Sun, L., Kahn Ribeiro, S., Khennas, S., De La Rue Du Can, S., Chapungu, L., J Davis, S., Bashmakov, I., Dai, H., Dhakal, SH., Tan, X., Geng, Y., Gu, B., & Minx, J. (2021). A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. *Environmental research letters*, 16(7), 73005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ABEE4E>
- [4] Amiri, M., & Bayatzadeh, S. (2025). Identifying and ranking digital solutions for managing supply chain disruptions (Case study: Steel industry). *Modern research in performance evaluation*, 3(4), 240–253. <https://doi.org/10.22105/mrpe.2025.499771.1137>
- [5] Leung, D. Y. C., Caramanna, G., & Maroto-Valer, M. M. (2014). An overview of current status of Carbon Dioxide capture and storage technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 39, 426–443. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.07.093>
- [6] Min, H., & Kim, I. (2012). Green supply chain research: Past, present, and future. *Logistics research*, 4, 39–47. <https://doi.org/10.1007/s12159-012-0071-3>
- [7] Saadati, H., & Hakimi, A. (2024). Optimizing the ticket response process in customer support systems using data-driven and machine learning methods: A Case study of IFDA. *Optimality*, 1(2), 188–204. <https://doi.org/0.22105/opt.v1i2.57>
- [8] Tseng, M. L., Islam, M. S., Karia, N., Fauzi, F. A., & Afrin, S. (2019). A literature review on green supply chain management: Trends and future challenges. *Undefined*, 141, 145–162. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2018.10.009>
- [9] Aldrighetti, R., Battini, D., Ivanov, D., & Zennaro, I. (2021). Costs of resilience and disruptions in supply chain network design models: A review and future research directions. *International journal of production economics*, 235, 108103. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2021.108103>
- [10] Ekram Nosrati, N., & Taghavi Fard, M. T. (2023). A proposed model for the assessment of supply chain management using DEA and knowledge management. *Computational algorithms and numerical dimensions*, 2(3), 136–147. <https://doi.org/10.22105/cand.2023.191008>
- [11] Edalatpanah, S. A., Komazec, N., & Pamucar, D. (2024). Making two-channel pricing decisions in a multi-objective closed-loop supply chain network under uncertainty considering reliability (Case study: Steel industry). *Big data and computing visions*, 4(3), 201–218.
- [12] Letafat, F., Gholamian, M. R., & Arabi, M. (2024). Designing a reliable supply chain network for perishable crops considering the risk of disruption (Case study: Tomato supply chain). *Journal of decisions and operations research*, 9(3), 666–689. <https://doi.org/10.22105/dmor.2024.419272.1797>
- [13] ValizadehDizaj, Z., Fazlzadeh, A., Ahmadian, V., & Nagdi, S. (2025). Investigating the role of dynamic capability and supply chain resilience on companies' financial performance during disruptions. *Innovation management and operational strategies*. <https://doi.org/10.22105/imos.2025.501248.1429>
- [14] Carter, C. R., & Liane Easton, P. (2011). Sustainable supply chain management: Evolution and future directions. *International journal of physical distribution & logistics management*, 41(1), 46–62. <https://doi.org/10.1108/09600031111101420>
- [15] Rakshit, I. (2025). AI-driven cloud solutions for smart city data analytics. *Systemic analytics*, 3(1), 27–34. <https://doi.org/10.31181/sa31202540>
- [16] Nagurney, A., Liu, Z., & Woolley, T. (2007). Sustainable supply chain and transportation networks. *International journal of sustainable transportation*, 1(1), 29–51. <https://doi.org/10.1080/15568310601060077>
- [17] Sazvar, Z., Sepehri, M., & Baboli, A. (2016). A multi-objective multi-supplier sustainable supply chain with deteriorating products, case of cut flowers. *IFAC-papersonline*, 49(12), 1638–1643. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.815>
- [18] Fahimnia, B., Sarkis, J., & Eshragh, A. (2015). A tradeoff model for green supply chain planning: A leanness-versus-greenness analysis. *Omega (United Kingdom)*, 54, 173–190. <https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2015.01.014>
- [19] Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J., Baboli, A., & Sazvar, Z. (2013). A stochastic aggregate production planning model in a green supply chain: Considering flexible lead times, nonlinear purchase and shortage cost functions. *European journal of operational research*, 230(1), 26–41. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.03.033>
- [20] Pishvae, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy sets and systems*, 206, 1–20. [10.1016/j.fss.2012.04.010](https://doi.org/10.1016/j.fss.2012.04.010)
- [21] Biuki, M., Kazemi, A., & Alinezhad, A. (2020). An integrated location-routing-inventory model for sustainable design of a perishable products supply chain network. *Journal of cleaner production*, 260, 120842. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120842>
- [22] Gholizadeh, H., & Fazlollahtabar, H. (2020). Robust optimization and modified genetic algorithm for a closed loop green supply chain under uncertainty: Case study in melting industry. *Computers & industrial engineering*, 147, 106653. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106653>
- [23] Garg, K., Kannan, D., Diabat, A., & Jha, P. C. (2015). A multi-criteria optimization approach to manage environmental issues in closed loop supply chain network design. *Journal of cleaner production*, 100, 297–314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.075>
- [24] Wang, J., & Wan, Q. (2022). A multi-period multi-product green supply network design problem with price and greenness dependent demands under uncertainty. *Applied soft computing*, 114, 108078. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108078>
- [25] Golpîra, H., & Javanmardan, A. (2022). Robust optimization of sustainable closed-loop supply chain considering carbon emission schemes. *Sustainable production and consumption*, 30, 640–656. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.028>
- [26] Sadeghi Rad, R., & Nahavandi, N. (2018). A novel multi-objective optimization model for integrated problem of green closed loop supply chain network design and quantity discount. *Journal of cleaner production*, 196, 1549–1565. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.034>