



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>



Research Article

Presenting a Circular Supply Chain Optimization Model Under Uncertainty: the Case of Mdf Industry

Zahra Sorouri Ehliki¹, Maghsoud Amiri^{2,*}, Laya Olfat³, Iman Raeesi Vanani⁴

1. PhD Student, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran

2. Professor, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran

3. Professor, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran

4. Associate Professor, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran

*Corresponding Author: amiri@atu.ac.ir

PAPER INFO

Paper history:

Received: 18 February 2023

Revised: 27 April 2023

Accepted: 27 June 2023

Keywords:

Circular Supply Chain;

Uncertainty;

Robust Optimization;

Augmented ϵ -Constraint;

Demand.

ABSTRACT

The circular supply chain includes return processes and additional value intends to reduce the waste of resources and improve the efficiency, it plays an important role in reducing costs and increasing the level of sustainability of supply chains. Therefore, in the current research, a multi-objective, multi-level circular supply chain optimization model was presented in uncertain conditions, which minimizes system costs and environmental impact and maximizes social responsibility. In order to face the uncertainty in demand, a scenario-based approach has been used. Then, the multi-objective model was converted into a single-objective model using the enhanced epsilon constraint method and solved with Gams software. The data of an active company in the MDF industry has been used to examine the application of the proposed model. The results of sensitivity analysis carried out on some important parameters showed that paying attention to the maximum number allowed for the establishment of collection and recycling centers has a significant impact on the costs and environmental effects in the system.

© 2023 Published by Semnan University Press.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.29966.2412>

How to cite this article:

sorouri eshliki, Z., amiri, M., olfat, L., & Raeesi Vanani, I. (2023). Presenting a circular supply chain optimization model under uncertainty: the case of MDF industry. *Journal of Modeling in Engineering*, 21(74), 207-230. doi: 10.22075/jme.2023.29966.2412

ارایه مدل بهینه سازی زنجیره تامین چرخشی تحت عدم اطمینان: مورد مطالعه صنعت MDF

زهرا سروری اشلیکی^۱، مقصود امیری^{۲*}، لعیا الفت^۳ و ایمان رئیسی وانانی^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۹ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۰۷ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۰۶	<p>زنجیره تامین چرخشی شامل فرایندهای بازگشتی و ارزش آفرین بوده و به دنبال کاهش اتلاف منابع و بهبود کارایی آن‌ها می‌باشد، از این رو نقش مهمی در کاهش هزینه‌ها و افزایش سطح پایداری زنجیره‌های تامین دارد. در همین راستا، در پژوهش حاضر یک مدل بهینه‌سازی زنجیره-تامین چرخشی چندهدفه و چندسطحی در شرایط عدم اطمینان ارایه شد که ضمن حداقل‌سازی هزینه‌های سیستم و آلودگی زیست محیطی به حداکثرسازی مسئولیت اجتماعی نیز پرداخته است. به منظور مواجهه با عدم اطمینان در تقاضا از رویکرد سناریو محور استفاده شده است. سپس مدل چندهدفه با استفاده از روش محدودیت افسیلون تقویت شده به مدل تک‌هدفه تبدیل و با نرم افزار گمز حل شد. برای بررسی کاربرد مدل ارائه شده، داده‌های یک شرکت فعال در صنعت ام دی اف استفاده شده است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت‌های صورت گرفته بر روی برخی از پارامترهای مهم نیز، نشان دهنده این بود که توجه به حداکثر تعداد مجاز برای احداث مراکز جمع آوری و بازیافت، تاثیر به سزایی بر هزینه‌ها و اثرات زیست محیطی موجود در سیستم دارد.</p>
<p>واژگان کلیدی: زنجیره تامین چرخشی، عدم اطمینان، بهینه‌سازی استوار، محدودیت افسیلون، تقاضا.</p>	

۱- مقدمه

کمیاب منابع طبیعی و افزایش میزان آلودگی زیست محیطی، جوامع مختلف بشری را نگران آینده پیش‌روی بشر می‌کند. اگرچه در طول تاریخ، دستاوردها و توسعه صنعتی باعث بهبود اقتصادی جوامع، افزایش نرخ اشتغال و مزایایی برای افراد و سازمان‌ها شده، اما مشکلات زیست محیطی و اجتماعی پیچیده‌تری را نیز به دنبال داشته، که اخیراً توجه فزاینده‌ای به پایداری ایجاد کرده است [۱]. زنجیره‌های تامین، منبع اصلی انتشار کربن شناخته شده‌اند که باعث گرم شدن کره زمین نیز می‌شوند [۲]. چنانچه در نحوه تامین، تولید، تحویل، استفاده مجدد، بازیافت و بازسازی محصولات در زنجیره‌های تامین تغییری حاصل نگردد، جهان با سطح فعلی مصرف خود، منابع طبیعی بسیاری را در آینده قابل پیش‌بینی از دست خواهد داد [۳]. در دهه‌های اخیر، به موازات توسعه شیوه‌های مدیریت

زنجیره تامین سبز و پایدار که دنبال کاهش نگرانی‌های زیست محیطی بوده‌اند، مفاهیم اقتصاد چرخشی با این ایده که بایستی رو به سمت سیستم‌های تولیدی خود پایداری حرکت کنیم که در آن مواد بارها و بارها استفاده شوند، نیز توسعه یافته است [۴]. حرکت زنجیره‌های تامین از مدل‌های خطی به سمت زنجیره‌های تامین حلقه‌بسته، گام مهمی به سمت اقتصاد چرخشی بوده است [۵]. بدین صورت که به دنبال حفظ محصولات، اجزا و مواد در بالاترین سطح مطلوبیت از نظر زیست محیطی و فنی در همه دوره‌ها می‌باشد. این مفهوم در مقابل زباله‌های صفر قرار دارد و هدف از آن بازگرداندن عناصر مفید به محیط زیست برای تقویت منابع طبیعی است [۶]. اقتصاد چرخشی به یک سیستم صنعتی جایگزین برای مدل خطی مصرف اشاره دارد و این سیستم را به سمت انرژی تجدیدپذیر هدایت می‌کند و سیستم «تولید-مصرف-دفع

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: amiri@atu.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران
۲. استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران
۳. استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران
۴. دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

شبکه زنجیره‌تأمین زمین‌ساز ساختار بهینه‌ای می‌گردد که منجر به برآورده سازی تقاضا با حداقل هزینه و با کمترین اتلاف به صورت کارا و موثر فراهم گردد [۱۵]. به منظور تسهیل تصمیم‌گیری مدیران در مورد طراحی شبکه زنجیره تأمین چرخشی این مطالعه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه می‌دهد که ضمن حداقل‌سازی هزینه‌ها و میزان انتشار CO₂ در کل زنجیره‌تأمین، به دنبال حداکثرسازی مسئولیت اجتماعی می‌باشد. همچنین به دنبال فراهم آوردن شرایط واقعی، مدل به صورت چندسطحی، چند دوره‌ای و چند محصولی تحت شرایط عدم اطمینان با رویکرد سناریو محور در نظر گرفته شد و در صنعت MDF مورد بررسی قرار گرفت، که این مطالعه را کاربردی‌تر می‌کند.

۲- پیشینه پژوهش

مطالعه تحقیقات قبلی در بردارنده دیدگاه‌های مختلفی در ارتباط با طراحی انواع شبکه زنجیره‌تأمین می‌باشد. با توجه به اینکه ادبیات طراحی شبکه زنجیره‌تأمین چرخشی محدود بوده است لذا در این بخش، ادبیات مربوط به طراحی شبکه لجستیک معکوس، حلقه بسته و پایدار نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. برخی از پژوهش‌های پیشین متمرکز بر مفاهیم طراحی شبکه‌های زنجیره‌تأمین بدون در نظر گرفتن عدم اطمینان بوده‌اند که در ابتدا مورد بررسی قرار گرفتند و سپس تحقیقاتی که عدم اطمینان را در مدل خود اعمال نمودند بررسی شدند. صالحی‌امیری و همکاران [۶] در مطالعه‌ای شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته برای صنعت گردو را به عنوان بخشی از محصولات کشاورزی طراحی نمودند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ترکیبی جدید برای شبکه پیشنهادی که هزینه‌های کلی صنعت را به حداقل می‌رساند، ارائه دادند. به منظور حل مدل پیشنهادی، مجموعه‌ای از الگوریتم‌های فراابتکاری و فراابتکاری ترکیبی را مورد استفاده قرار دادند. در آخر، آن‌ها بهترین راه حل‌ها را با ارزیابی بهترین پاسخ‌های اولیه با استفاده از روش تاگوچی بدست آوردند. محب‌علیزاده و همکاران [۱۶] در پژوهشی به طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته پایدار در صنعت الکترونیک پرداختند. اهداف مورد بررسی آنها شامل حداکثرسازی سود و اثرات اجتماعی و حداقل‌سازی میزان انتشار دی اکسید کربن می‌باشد. بدین ترتیب یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح چندهدفه دو مرحله‌ای تصادفی را ارائه دادند و کارایی مدل از طریق تحلیل پوششی داده‌ها بررسی شد و با استفاده از الگوریتم لاگرانژ به حل آن پرداختند. جوزدانی و گویندان [۱۷]

زباله» را که از زمان انقلاب تولید انبوه تاکنون پابرجاست، کنار می‌گذارد [۷]. از این رو با ترکیب مفاهیم زنجیره‌تأمین پایدار و اقتصاد چرخشی، مدیریت زنجیره تأمین چرخشی نیز توسعه یافته است [۸]. زنجیره تأمین چرخشی به عنوان شبکه متصل از سازمان‌هایی است که در طراحی و مدیریت فرآیندهای ارزش افزوده و بازیابی ارزش از محصولات، اجزا و قطعات، درگیر می‌باشند. ارزش قابل بازیابی می‌تواند از نظر منافع اقتصادی، اجتماعی و یا زیست محیطی برای این سازمان‌ها و سایر سازمان‌های ذی‌نفع، قابل مشاهده باشد. فرآیندهای ارزش افزوده، متعلق به جریان‌های رو به جلوست که توسط اعضای زنجیره‌تأمین اولیه و به طور معمول با تولید مواد اولیه شروع می‌شود و با حرکت آنها به سمت تبدیل به محصولات نهایی و با توزیع و فروش کالای نهایی به پایان می‌رسد. فرآیندهای بازیابی ارزش با جریان‌های معکوس و جریان‌های چرخشی همراه می‌باشند. جریان‌های معکوس نشان دهنده حرکت محصول یا مواد در جریان‌های رو به عقب (معکوس) با هدف ایجاد یا باز پس‌گیری ارزش و یا دفع مناسب می‌باشد [۹]. براساس تعریفی که برای زنجیره تأمین چرخشی ارائه شده است گفتنی است، زنجیره تأمین چرخشی مستلزم ادغام زنجیره‌تأمین اصلی با زنجیره‌تأمین ترمیمی است که از اجزای فرآیندهای بازیابی مواد پشتیبانی می‌کند. زنجیره‌تأمین اصلی به زنجیره‌تأمین رو به جلو و سنتی اشاره دارد و از فرآیندهای اصلی تولیدی/خدماتی سازمان حمایت می‌کند. زنجیره‌تأمین ترمیمی به دو جریان اشاره دارد: (۱) چرخشی حلقه‌بسته که بر روی چرخه‌های حلقه‌بسته محصولات و اجزا (برگشتی) که به سازمان بر می‌گردد، تمرکز دارد. (۲) چرخشی حلقه‌باز یا رو به جلو که از جریان آبخاری مواد به سازمان‌های خارج از زنجیره اصلی حمایت می‌کنند [۱۰]. باید خاطر نشان شد که به منظور تصمیم‌گیری مناسب برای پوشش فعالیت‌های مربوط به شبکه زنجیره‌تأمین، مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین به عنوان یکی از مهم‌ترین تصمیمات استراتژیک مورد توجه محققان و دانشگاهیان قرار گرفته است [۱۱]. رویه‌های طراحی زنجیره تأمین مرسوم بر جریان محصولات، فقط در جهت رو به جلو تمرکز می‌کنند [۱۲]. با این حال، به منظور بهره‌مندی از محصولات برگشتی، شرکت‌ها علاوه بر تدارکات رو به جلو، می‌بایست لجستیک معکوس را نیز اتخاذ کنند [۱۳]. یکی از چالش‌برانگیزترین مباحث در طراحی شبکه‌های زنجیره‌تأمین عدم اطمینان می‌باشد [۱۴]. در شرایط عدم اطمینان می‌بایست به برنامه‌ریزی صحیح‌تر و قابل اتکا روی آورد. طراحی مناسب

در نظر گرفتن تصمیمات قیمت‌گذاری و سیاست تخفیف برای محصولات بازگشتی در شرایط عدم‌اطمینان پرداختند. مدل ارایه شده در یک مطالعه موردی شامل زنجیره تامین لامپ روشنایی اجرا شد و با استفاده روش ترابی و حسنی مورد حل قرار گرفت. اتابکی و همکاران [۲۳] در مقاله‌ای تحت عنوان بهینه‌سازی مدل استوار جدید برای زنجیره‌تامین حلقه‌بسته محصولات بادوام: حرکت به سمت اقتصاد چرخشی، به طراحی مجدد شبکه زنجیره‌تامین حلقه‌بسته تحت عدم‌اطمینان پرداختند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را به منظور تصمیم‌گیری در ارتباط با تامین کننده، تخصیص مکان، حالت‌های حمل و نقل، فناوری مونتاژ و سطح بازیابی توسعه دادند. تابع هدف مدل شامل حداقل کردن هزینه‌ها و کاهش انتشار دی اکسید کربن و مصرف انرژی بوده است که از طریق محدودیت اپسیلون حل گردید. نیری و همکاران [۲۴] مدل ریاضی چندهدفه را به منظور طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته پایدار تحت عدم‌اطمینان توسعه دادند. اهداف مدل پیشنهادی آن‌ها شامل بهینه‌سازی اثرات مالی، کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از انتشار آزیست و دی اکسید کربن و اثرات اجتماعی بوده است. به منظور مواجهه با عدم‌اطمینان از رویکرد بهینه‌سازی استوار فازی استفاده نمودند. مردان و همکاران [۲۵] در تحقیقی به طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته سبز دو هدفه پرداختند. اهداف تحقیق شامل به حداقل رساندن کل هزینه‌ها و اثرات ناشی از انتشار دی اکسید کربن از طریق تصمیم‌گیری در مورد مکان تسهیلات، میزان حمل و نقل و موجودی بوده است. با توجه به پیچیدگی ذاتی مسئله و در نظر گرفتن مفروضات چند محصولی و چند دوره‌ای بودن از الگوریتم تجزیه بندرز استفاده شده است. زربخش‌نیا و همکاران [۳۴] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح را به منظور طراحی شبکه لجستیک معکوس و رو به جلو سبز چند محصولی و چند سطحی و چند هدفه ارایه دادند. آن‌ها به دنبال حداقل‌سازی هزینه‌ها و مقدار انتشار دی اکسید کربن و بهینه‌سازی ماشین آلات خط تولید بودن و به منظور حل از روش محدودیت اپسیلون استفاده نمودند. درباری و همکاران [۲۷] در پژوهشی به طراحی یک شبکه زنجیره‌تامین حلقه‌بسته برای یک تولید کننده لپ تاپ در هند پرداختند. بدین منظور یک مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با اهداف فازی برای به حداقل رساندن

به طراحی شبکه زنجیره‌تامین پایدار در صنعت مواد غذایی فاسد شدنی با هدف دستیابی به اهداف توسعه پایدار پرداختند. آن‌ها بدین منظور مدل برنامه‌ریزی چندهدفه به منظور بهینه سازی هزینه‌ها، مصرف انرژی و ازدحام ترافیک را با رویکرد حل از طریق برنامه‌ریزی آرمانی، توسعه دادند. استاندر و همکاران [۱۸] در تحقیقی شبکه زنجیره‌تامین حلقه‌بسته برای بازیافت پلاستیک با رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را توسعه دادند. آن‌ها منفعت اقتصادی و منفعت زیست محیطی را با توجه به مباحث لجستیکی مورد بررسی قرار دادند. مدل ارایه شده از طریق الگوریتم شاخه و برگ^۲ با استفاده نرم‌افزار گمز حل گردید. لیائو و همکاران [۱۹] در مطالعه‌ای به طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته برای مواد غذایی (میوه) با حداقل کردن هزینه‌ها و کنترل آلودگی ناشی از انتشار دی اکسید کربن پرداختند. بدین منظور آن‌ها یک مدل ریاضی خطی ترکیبی را توسعه دادند و به منظور حل مدل سه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، ژنتیک و کشتل را با هم مقایسه نمودند. محتشمی و همکاران [۲۰] در پژوهشی به طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه‌بسته سبز با استفاده از سیستم صف به منظور کاهش اثر زیست‌محیطی ناشی از مصرف انرژی پرداختند. آن‌ها از الگوریتم ژنتیک به منظور حل مدل پیشنهادی خود استفاده نمودند. عدم‌اطمینان منبع اصلی ریسک در شبکه زنجیره تامین می‌باشد که از جمله از ویژگی‌های ذاتی زنجیره‌تامین است که عملکرد زنجیره تامین و تصمیم‌گیری فوری را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۲۱]. از جمله اینکه عدم‌اطمینان در تقاضا تاثیر قابل توجهی بر تصمیمات زنجیره‌تامین دارد و تمامی تسهیلات درگیر نیز باید مسئولیت جلب رضایت مشتریان خود را بر عهده بگیرند. این عدم‌اطمینان‌ها بر اساس الگوهای مختلف پیش‌بینی شده (به عنوان مثال، تقاضاهای فصلی) و پیش‌بینی نشده (مانند همه‌گیری کووید ۱۹) افزایش می‌یابد [۲۲]. چنانچه این مشکلات به خوبی مدیریت نشوند شبکه زنجیره‌تامین نامتعادل خواهد شد و در صورت پاسخ گویی ضعیف در هر مرحله و در نتیجه فقدان اطمینان، ضرر بزرگتری به شرکت‌ها وارد می‌گردد، لذا در ادامه به بررسی مطالعاتی می‌پردازیم که در پژوهش خود به عدم‌اطمینان در طراحی شبکه پرداخته‌اند. طالعی‌زاد و همکاران [۱] در مطالعه‌ای به مدل‌سازی و حل مسئله زنجیره‌تامین حلقه‌بسته پایدار با

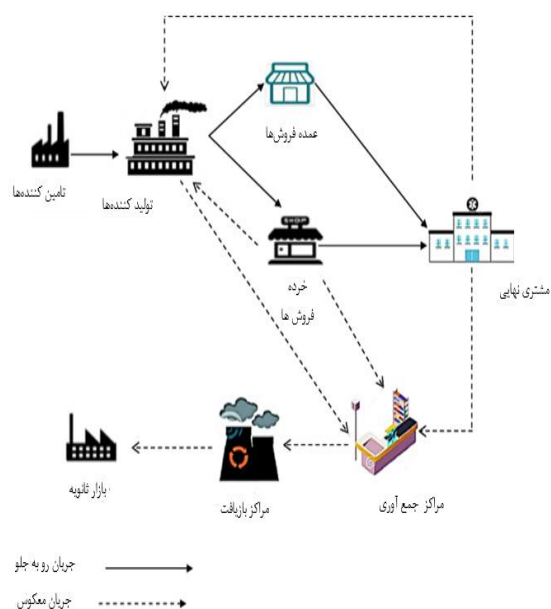
³ Liao⁴ Darbari et al¹ Santander² Branch and Cut

جدول ۱- خلاصه‌ای از پژوهش‌های پیشین

روش حل	رویکرد مدل سازی	عدم اطمینان	ابعاد پایداری				زنجیره تامین			رتبه
			اقتصادی	محیطی	زیست	اجتماعی	پایداری	بسته	حلقه	
الگوریتم فراابتکاری ترکیبی	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط				*		*		[۶]	
الگوریتم لاگرانژ	برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط چندهدفه یکپارچه تصادفی		*	*	*		*	*	[۱۶]	
برنامه ریزی آرمانی	برنامه‌ریزی غیرخطی چندهدفه			*	*			*	[۱۷]	
الگوریتم شاخه و برگ	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط			*	*		*		[۱۸]	
الگوریتم ژنتیک، شبیه سازی تهرید و کشتل	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح			*	*		*		[۱۹]	
الگوریتم ژنتیک	برنامه‌ریزی غیر خطی دو هدفه		*	*			*		[۲۰]	
محدودیت اپسیلون	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط	*		*	*	*	*		[۲۳]	
رویکرد بهینه سازی استوار فازی	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه	*	*	*	*		*	*	[۲۴]	
الگوریتم تجزیه بندرز حل با CPLEX	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط	*		*	*		*		[۲۵]	
روش محدودیت اپسیلون	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط	*		*	*		*		[۲۶]	
TOPSIS و برنامه ریزی آرمانی فازی	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط	*	*	*	*		*		[۲۷]	
رویکرد ترابی و حسنی	بهینه‌سازی عدد صحیح مختلط	*	*	*	*		*	*	[۱]	
روش آزاد سازی لاگرانژ	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح	*		*	*		*	*	[۲۸]	
الگوریتم تجزیه بندرز	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط تصادفی دومرحله‌ای	*			*	*			[۲۹]	
الگوریتم ژنتیک	بهینه‌سازی چندهدفه	*			*		*		[۳۰]	
الگوریتم تجزیه بندرز	برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح	*			*		*		[۳۱]	
رویکرد برنامه ریزی امکانی	برنامه‌ریزی امکانی	*			*		*		[۳۲]	
رویکرد استوار مالوی، محدودیت اپسیلون	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط	*	*	*	*	*	*	*	تحقیق حاضر	

شکل (۱)، زنجیره‌تامین پیشنهادی، در جریان رو به جلو، مواد اولیه از سوی تامین‌کنندگان به مراکز تولیدی ارسال می‌گردند؛ سپس مراکز تولید به تولید محصولات می‌پردازند و محصولات تولید شده را به عمده‌فروش‌ها و خرده‌فروش‌ها ارسال می‌کنند تا بدین ترتیب، عمده‌فروش‌ها و خرده‌فروش‌ها، بتوانند تقاضای مشتریان نهایی را از طریق دریافت محصولات دریافتی از مراکز تولیدی، برآورده سازند. در جهت حفظ محیط‌زیست و استفاده از محصولات بازیافتی با استفاده از جریان معکوس، محصولاتی که توسط خرده‌فروش و مشتری نهایی، معیوب شناخته می‌شوند، به مراکز تولیدی بازگردانده می‌شود و یا همچنین می‌توانند به مراکز جمع‌آوری ارسال گردند. علاوه بر این محصولات معیوب که برای مراکز تولید مورد استفاده نیست به مراکز جمع‌آوری منتقل می‌گردد و این محصولات پس از جمع‌آوری در مراکز بازیافت، به مواد بازیافتی تبدیل شده و برای فروش به بازار ثانویه منتقل می‌گردند. با توجه به مرور مطالعات صورت گرفته که برخی از محققان از جمله [۱]، [۶]، [۲۴] و [۲۷] برای ماده بازیافتی فقط یک بازار ثانویه در نظر گرفته بودند، لذا در تحقیق حاضر نیز به تنها بازار ثانویه اشاره شده است.

باید خاطر نشان شد که تنها مکان مراکز جمع‌آوری و بازیافت، بالقوه و نامشخص است.



شکل ۱- شبکه پیشنهادی زنجیره‌تامین چرخشی

مفروضات پژوهش عبارتند از:

تأثیر زیست‌محیطی ناشی از انتشار دی‌اکسید کربن و حداکثر سازی سود خالص و تأثیرات اجتماعی، تحت شرایط عدم-اطمینان تقاضا و ظرفیت فازی ارایه دادند. آنها از روش ای‌اچ‌پی و تاپسیس^۱ و برنامه‌ریزی آرمانی فازی به حل مدل ارایه شده پرداختند. ژن و همکاران^۲ [۲۸] در مطالعه‌ای به طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه‌بسته پایدار تحت عدم‌اطمینان پرداختند. آنها به ارایه مدل بهینه‌سازی دو هدفه‌ای پرداختند که به دنبال کاهش هزینه‌های عملیاتی و انتشار دی‌اکسید کربن بوده است. به منظور حل مدل در شرایط عدم‌اطمینان از سناریو و مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح از طریق آزاد سازی لاگرانژ استفاده نمودند. سیف و همکاران^۳ [۲۹] در پژوهشی به طراحی شبکه زنجیره‌تامین پسماند جامد شهری مبتنی بر اقتصاد چرخشی و تحت عدم‌اطمینان پرداختند. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح تصادفی دو مرحله‌ای را به منظور بررسی اثر عدم‌اطمینان پارامترهای مدل توسعه دادند. عدم‌اطمینان پارامترها شامل ضرایب فروش محصول، تقاضا محصول و عرضه بوده است. تابع هدف مدل ارایه شده آنها شامل حداقل‌سازی هزینه‌های کل بوده است و الگوریتم تجزیه بندرز را به منظور حل مدل مورد استفاده قرار دادند. زارعی و همکاران [۳۰] به توسعه شبکه زنجیره‌تامین حلقه‌بسته در فضای غیرقطعی پرداختند. آنها در مدل ارائه شده خود به حداقل‌سازی هزینه‌های شبکه، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، ریسک تولیدی-فنی و زمان ارسال محصولات به مشتریان پرداختند. به منظور رفع عدم‌اطمینان از منطق فازی بهره بردند و به منظور حل مدل از الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند. فلاح و همکاران [۳۱] در پژوهشی به طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه‌بسته رقابتی در شرایط عدم‌اطمینان پرداختند. در مواجهه با عدم‌اطمینان از رویکرد فازی استفاده نمودند و از الگوریتم تجزیه بندرز به منظور حل مورد استفاده نمودند. فضلی و همکاران [۳۲] به طراحی پایای شبکه زنجیره‌تامین حلقه‌بسته تحت عدم‌قطعیت پرداختند. آنها به منظور مقابله با عدم قطعیت در پارامترها از رویکرد کارای برنامه‌ریزی امکانی استفاده نمودند.

۳- مدل پیشنهادی پژوهش

پژوهش حاضر به ارایه مدلی بهینه از زنجیره‌تامین چرخشی می‌پردازد که به صورت همزمان مفاهیم پایداری (اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی) را در نظر می‌گیرد. با توجه به

³ Saif

¹ AHP-TOPSIS

² Zhen et al

M	مجموعه مراکز خرده‌فروش
C	مجموعه مشتری
Q	مجموعه مراکز بالقوه جمع‌آوری
S	مجموعه مراکز بالقوه باز یافت
T	مجموعه دوره‌های زمانی
P	مجموعه محصولات
R	مجموعه مواد اولیه
B	مجموعه مواد باز یافتی قابل فروش در بازار ثانویه
Cf_q	هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری در مکان بالقوه q
Cf_s	هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری در مکان بالقوه s
TC_{ijt}	هزینه حمل و نقل هر واحد از ماده اولیه r از تامین کننده i به تولیدکننده j در دوره t
TC_{jkt}^p	هزینه حمل و نقل هر واحد از محصول P از تولیدکننده j به مرکز عمده فروش k در دوره t
TC_{jmt}^p	هزینه حمل و نقل هر واحد از محصول P از تولیدکننده j به مرکز خرده‌فروش m در دوره t
TC_{kct}^p	هزینه حمل و نقل هر واحد از محصول P از عمده فروش k به مشتری نهایی c در دوره t
TC_{mct}^p	هزینه حمل و نقل هر واحد از محصول P از خرده فروش m به مشتری نهایی c در دوره t
TC_{mjt}^p	هزینه حمل و نقل هر واحد از محصول بازگشتی P از خرده فروش m به مراکز تولیدی j در دوره t
TC_{cjt}^p	هزینه حمل و نقل هر واحد از محصول بازگشتی P از مشتری نهایی c به مراکز تولیدی j در دوره t
TC_{jqt}^p	هزینه حمل و نقل هر واحد از محصول بازگشتی P از مراکز تولیدی j به مراکز بالقوه جمع‌آوری q در دوره t
TC_{mqt}^p	هزینه حمل و نقل هر واحد از محصول بازگشتی P از خرده فروشی m به مراکز بالقوه جمع‌آوری q در دوره t
TC_{cqt}^p	هزینه حمل و نقل هر واحد از محصول بازگشتی P از مشتری c به مراکز بالقوه جمع‌آوری q در دوره t
TC_{qst}^p	هزینه حمل و نقل هر واحد از محصول بازگشتی P از مراکز بالقوه جمع‌آوری q به مراکز بالقوه باز یافت s در دوره t
TC_{st}^b	هزینه حمل و نقل هر واحد از ماده باز یافتی b از مرکز باز یافت s به بازار ثانویه در دوره t
VC_{it}^r	هزینه خرید یک واحد ماده خام r از تامین کننده i در دوره t
VC_{jt}^p	هزینه تولید هر واحد محصول p توسط مرکز تولید j در دوره t

- مدل چندسطحی و شامل تامین کننده، تولیدکننده، عمده‌فروش، خرده‌فروش، مشتری، مرکز جمع‌آوری و مرکز باز یافت می‌باشد.
- فقط پارامتر تقاضا تحت عدم اطمینان می‌باشد.
- مکان کلیه تسهیلات به غیر از مراکز جمع‌آوری و باز یافت ثابت و مشخص در نظر گرفته می‌شود و احداث و عدم احداث مراکز جمع‌آوری و باز یافت از جمله متغیرهای تصمیم مدل هستند.
- ظرفیت مرتبط با تسهیلات مشخص و هزینه مرتبط با آنها معین و ثابت می‌باشند؛ برای مراکز تولید، جمع‌آوری و باز یافت هزینه نگهداری و موجودی در نظر گرفته شده است.
- برای مرکز جمع‌آوری هزینه جمع‌آوری محصول برگشتی لحاظ می‌گردد؛ برای مرکز تولید و باز یافت هزینه پردازش در نظر گرفته می‌شود.
- موجودی عمده‌فروش و خرده‌فروش در انبار کارخانه نگهداری می‌گردد.
- عمده فروش‌ها محصولات را به صورت عمده و با بسته بندی کامل دریافت کرده و از این رو امکان بررسی خرابی محصولات، تا پس از باز شدن بسته بندی وجود ندارد و فقط خرده فروش و مشتری نهایی که به صورت خرده، خریداری می‌کنند متوجه خرابی و کیفیت پایین محصول خواهند شد.
- بین تسهیلات موجود در یک سطح هیچ جریانی وجود ندارد.
- کمبود مجاز نبوده و از سیاست تخفیفی در طراحی استفاده نمی‌شود.
- میزان انتشار CO_2 در کل زنجیره تامین اعم از افتتاح مرکز جمع‌آوری و باز یافت و همچنین در فرایندهای مربوط به تولید، حمل و نقل و باز یافت در نظر گرفته می‌شود.
- در یک دوره میزان کالای برگشت داده شده نیز براساس درصدی مشخص از تولیدات دوره قبل تعریف می‌شود.

اندیس‌ها

I	مجموعه تامین کنندگان
J	مجموعه مراکز تولیدی
K	مجموعه مراکز عمده‌فروش

E_{mq}^p : میزان انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل هر واحد محصول بازگشتی p از مرکز خرده فروش m به مرکز بالقوه جمع‌آوری q
 E_{qs}^p : میزان انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل هر واحد مواد بازیافتی b از مرکز جمع‌آوری q به مرکز بازیافت s
 EB_s^b : میزان انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل هر واحد مواد بازیافت b از مرکز بازیافت s به بازار ثانویه
 Job_q : تعداد فرصت‌های شغلی ناشی از احداث مراکز جمع‌آوری q
 Job_s : تعداد فرصت‌های شغلی ناشی از احداث مراکز بازیافت s
 FL_q : روزهای از دست رفته ناشی از خسارات کار در حین احداث مراکز جمع‌آوری q
 FL_s : روزهای از دست رفته ناشی از خسارات کار در حین احداث مراکز بازیافت s
 Wc : ضریب وزنی فرصت‌های شغلی ایجاد شده
 Ww : ضریب وزنی روزهای از دست رفته کارگران
 CAP_r^i : ظرفیت تامین کننده i برای ماده اولیه r
 CAP_p^j : ظرفیت مرکز تولید j برای تولید محصول p
 CAP_p^q : ظرفیت مرکز جمع‌آوری q برای محصول برگشتی p
 CAP_s^p : ظرفیت مرکز بازیافت s برای محصول برگشتی p
 p_{pt}^c : تقاضا مشتری c برای محصول p در دوره t
 INV_r^j : ظرفیت انبار مرکز تولیدی j برای ماده اولیه r
 INV_p^j : ظرفیت انبار مرکز تولیدی j برای محصول p
 INV_p^q : ظرفیت انبار مرکز جمع‌آوری q برای محصول برگشتی p
 INV_p^s : ظرفیت انبار مرکز بازیافت s برای محصول برگشتی p
 INV_b^s : ظرفیت انبار مرکز بازیافت s برای ماده بازیافتی b
 λ_r^p : میزان ماده اولیه به کار رفته r در تولید محصول p
 RE_c^p : نرخ بازگشت محصول p از مشتری c
 RE_m^p : نرخ بازگشت محصول p از خرده‌فروش m
 δ_b^p : نرخ تبدیل محصول برگشتی p به ماده قابل فروش b در مرکز بازیافت
 $MAXQ$: حداکثر تعداد مجاز برای ساخت مراکز جمع‌آوری q
 $MAXS$: حداکثر تعداد مجاز برای ساخت مراکز بازیافت s
 متغیرها به کار رفته در مدل پیشنهادی عبارتند از :
 Y^q : متغیر صفر و یک / اگر مرکز جمع‌آوری q در مکان بالقوه احداث گردد ۱ در غیر این صورت صفر
 Y^s : متغیر صفر و یک / اگر مرکز بازیافت s در مکان بالقوه

VC_{qt}^p : هزینه جمع‌آوری محصول بازگشتی p در مرکز جمع‌آوری q در دوره t
 VC_{st}^p : هزینه پردازش محصول بازگشتی p در مرکز بازیافت s در دوره t
 P_b : قیمت فروش ماده اولیه بازیافتی b
 HC_{jt}^r : هزینه نگهداری هر واحد ماده اولیه r در مرکز تولیدی j در دوره t
 HC_{jt}^p : هزینه نگهداری هر واحد موجودی محصول p در مرکز تولیدی j در دوره t
 HC_{qt}^p : هزینه نگهداری هر واحد موجودی محصول بازگشتی p در مرکز جمع‌آوری q در دوره t
 HC_{st}^p : هزینه نگهداری هر واحد موجودی محصول بازگشتی p در مرکز بازیافت s در دوره t
 HC_{st}^b : هزینه نگهداری هر واحد موجودی ماده بازیافتی b در مرکز بازیافت s در دوره t
 E_q : میزان انتشار CO_2 ناشی از افتتاح مرکز جمع‌آوری q
 E_s : میزان انتشار CO_2 ناشی از افتتاح مرکز بازیافت s
 E_j^p : میزان انتشار CO_2 ناشی از تولید هر واحد محصول p در مرکز تولید j
 E_s^b : میزان انتشار CO_2 ناشی از بازیافت هر واحد ماده اولیه b در مرکز بازیافت s
 E_{ij}^r : میزان انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل هر واحد ماده اولیه r از تامین کننده i به مرکز تولید j
 E_{jk}^p : میزان انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل هر واحد محصول p از مرکز تولید j به مرکز عمده فروش k
 E_{jm}^p : میزان انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل هر واحد محصول p مرکز تولیدی j به مرکز خرده فروش m
 E_{kc}^p : میزان انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل هر واحد محصول p از مرکز عمده‌فروش k به مشتری c
 E_{mc}^p : میزان انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل هر واحد محصول p از مرکز خرده‌فروش m به مشتری c
 E_{jq}^p : میزان انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل هر واحد محصول p از مرکز تولید j به مرکز جمع‌آوری q
 E_{cj}^p : میزان انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل هر واحد محصول بازگشتی p از مشتری c به مراکز تولیدی j
 E_{mj}^p : میزان انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل هر واحد محصول p برگشتی از مرکز خرده‌فروش m مراکز تولیدی j
 E_{cq}^p : میزان انتشار CO_2 ناشی از حمل و نقل هر واحد محصول بازگشتی p از مشتری c به مرکز بالقوه جمع‌آوری q

انتهای دوره t

توابع هدف. سه تابع هدف مسئله مورد بررسی قرار گرفته است. تابع هدف اول، مربوط به حداقل‌سازی هزینه‌های کل زنجیره‌تامین چرخشی بوده، دومین تابع هدف مربوط به حداقل‌سازی میزان انتشار CO₂ و تابع هدف سوم شامل حداکثرسازی مسئولیت اجتماعی می‌باشد.

تابع هدف اول. شامل هزینه‌های ثابت راه‌اندازی تسهیلات مرکز بازیافت و مرکز جمع‌آوری (FC)، هزینه خرید مواد اولیه، هزینه تولید محصول، هزینه جمع‌آوری و پردازش محصول برگشتی (VC)، هزینه حمل و نقل (TC) و هزینه نگهداری (HC) و درآمد حاصل از فروش مواد بازیافتی، به شرح روابط (۱) الی (۴) محاسبه می‌شوند.

$$FC = \sum_{q \in Q} C_q^f Y^q + \sum_{s \in S} C_s^f Y^s \quad (1)$$

$$VC = \sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} VC_{it}^r X_{ijt}^r + \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} VC_{jt}^p X_{jt}^p + \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} VC_{qt}^p \left(\sum_{j \in J} X_{jqt}^p + \sum_{m \in M} X_{mqt}^p + \sum_{c \in C} X_{cqt}^p \right) \quad (2)$$

$$+ \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} VC_{st}^p X_{st}^p - \sum_{b \in B} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} P_b X_{st}^b$$

$$TC = \sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} TC_{ijt}^r X_{ijt}^r + \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} TC_{jkt}^p X_{jkt}^p + \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} TC_{jmt}^p X_{jmt}^p + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} TC_{kct}^p X_{kct}^p + \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} TC_{mct}^p X_{mct}^p + \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} TC_{mjt}^p X_{mjt}^p + \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} TC_{cjt}^p X_{cjt}^p + \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} TC_{jqt}^p X_{jqt}^p + \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} TC_{mqt}^p X_{mqt}^p + \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} TC_{cqt}^p X_{cqt}^p + \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} TC_{qst}^p X_{qst}^p + \sum_{b \in B} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} TC_{st}^b X_{st}^b \quad (3)$$

$$HC = \sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} HC_{jt}^r I_{jt}^r + \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} HC_{jt}^p I_{jt}^p + \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} HC_{qt}^p I_{qt}^p + \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} HC_{st}^p I_{st}^p + \sum_{b \in B} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} HC_{st}^b I_{st}^b \quad (4)$$

احداث گردد ۱ در غير اين صورت صفر

X_{ijt}^r : مقدار ماده اوليه r حمل شده از تامين کننده i به مرکز توليد j در دوره t

X_{jkt}^p : مقدار محصول p حمل شده از مرکز توليدي j به مرکز عمده فروش k در دوره t

X_{jmt}^p : مقدار محصول p حمل شده از مرکز توليدي j به مرکز خرده فروش m در دوره t

X_{kct}^p : مقدار محصول p حمل شده از مرکز عمده‌فروش k به مشتری c در دوره t

X_{mct}^p : مقدار محصول p حمل شده از مرکز خرده فروش m به مشتری c در دوره t

X_{mjt}^p : مقدار محصول p بازگشتی حمل شده از خرده فروش m به مراکز توليدي j در دوره t

X_{cjt}^p : مقدار محصول p بازگشتی حمل شده از مشتری c به مراکز توليدي j در دوره t

X_{jqt}^p : مقدار محصول p بازگشتی حمل شده از مراکز توليدي j به مرکز جمع‌آوری q در دوره t

X_{mqt}^p : مقدار محصول p بازگشتی حمل شده از خرده‌فروش m به مرکز جمع‌آوری q در دوره t

X_{cqt}^p : مقدار محصول p بازگشتی حمل شده از مشتری c به مرکز جمع‌آوری q در دوره t

X_{qst}^p : مقدار محصول p بازگشتی حمل شده از مرکز جمع‌آوری q به مرکز بازيافت s در دوره t

X_{jt}^p : مقدار محصول توليد شده p در مرکز توليدي j در دوره t

X_{st}^p : مقدار محصول پردازش شده p در مرکز بازيافت s در دوره t

X_{st}^b : مقدار ماده بازيافتی قابل فروش b در مرکز بازيافت s در دوره t

X_{st}^b : مقدار ماده بازيافتی b ارسال شده به بازار ثانويه از مرکز بازيافت s در دوره t

I_{jt}^r : میزان موجودی ماده اوليه r در توليدکننده j در انتهای دوره t

I_{jt}^p : میزان موجودی محصول توليدي p در توليدکننده j در انتهای دوره t

I_{qt}^p : میزان موجودی محصول بازگشتی p در مرکز جمع‌آوری q در انتهای دوره t

I_{st}^p : میزان موجودی محصول بازگشتی p در مرکز بازيافت s در انتهای دوره t

I_{st}^b : میزان موجودی ماده بازيافتی b در مرکز بازيافت s در انتهای دوره t

$$\sum_{p \in P} \lambda_p^r X_{jt}^p \leq \sum_{i \in I} X_{ijt}^r \quad (9)$$

$\forall r \in R, j \in J, t = 1 \in T$

$$\sum_{k \in K} X_{kct}^p + \sum_{m \in M} X_{mct}^p \geq \rho_{pt}^c \quad (10)$$

$\forall p \in P, c \in C, t \in T$

$$\sum_{k \in K} X_{jkt}^p + \sum_{m \in M} X_{jmt}^p \leq X_{jt}^p \quad (11)$$

$\forall j \in J, t = 1 \in T, p \in P$

$$\sum_{k \in K} X_{jkt}^p + \sum_{m \in M} X_{jmt}^p \leq I_{jt-1}^p \quad (12)$$

$\forall j \in J, t > 1 \in T, p \in P$

$$\sum_{c \in C} X_{kct}^p \leq \sum_{j \in J} X_{jkt}^p \quad (13)$$

$\forall k \in K, t \in T, p \in P$

$$\sum_{c \in C} X_{mct}^p \leq \sum_{j \in J} X_{jmt}^p - \sum_{q \in Q} X_{mqt}^p - \sum_{j \in J} X_{mjt}^p \quad (14)$$

$\forall m \in M, p \in P, t \in T$

$$\sum_{j \in J} X_{cjt}^p + \sum_{q \in Q} X_{cqt}^p = RE_c^p \left(\sum_{k \in K} X_{kct}^p + \sum_{m \in M} X_{mct}^p \right) \quad (15)$$

$\forall c \in C, p \in P, t \in T$

$$\sum_{j \in J} X_{mjt}^p + \sum_{q \in Q} X_{mqt}^p = RE_m^p \sum_{j \in J} X_{jmt}^p \quad (16)$$

$\forall m \in M, p \in P, t \in T$

$$\sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} X_{jqt}^p = \sum_{t \in T} \left(\sum_{c \in C} X_{cjt}^p + \sum_{m \in M} X_{mjt}^p \right) \quad (17)$$

$\forall j \in J, p \in P$

$$\sum_{s \in S} \sum_{t \in T} X_{qst}^p = \sum_{t \in T} \left(\sum_{c \in C} X_{cqt}^p + \sum_{j \in J} X_{jqt}^p + \sum_{m \in M} X_{mqt}^p \right) \quad (18)$$

$\forall q \in Q, p \in P$

$$\sum_{t \in T} X_{jt}^p = \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} X_{jkt}^p + \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} X_{jmt}^p \quad (19)$$

$\forall j \in J, p \in P$

$$\sum_{j \in J} X_{ijt}^r \leq CAP_r^i \quad (20)$$

$\forall r \in R, i \in I, t \in T$

$$X_{jt}^p \leq CAP_p^j \quad (21)$$

$\forall p \in P, \forall j \in J, \forall t \in T$

در نهایت تابع هدف اول که از نوع حداقل‌سازی مجموع هزینه‌ها می‌باشد به صورت رابطه (۵) نشان داده شده است:

$$Minz1 = FC + VC + TC + HC$$

تابع هدف دوم. یکی از چالش‌های مهم سازمان‌ها، کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ایی در سراسر شبکه خود می‌باشد [۳۳] و از جمله اصلی‌ترین گازهای گلخانه‌ای، دی اکسید کربن (CO₂) می‌باشد که منجر به گرم تر شدن کره زمین می‌گردد [۳۴]. لذا در تحقیق حاضر حداقل‌سازی انتشار CO₂ ناشی از تولید، بازیافت و حمل و نقل در شبکه زنجیره‌تامین پیشنهادی در نظر گرفته شده است که به صورت رابطه (۶) نشان داده می‌شود:

$$\begin{aligned} Minz2 = & \sum_{q \in Q} E_q Y^q + \sum_{s \in S} E_s Y^s + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} E_j^p X_{jt}^p + \\ & \sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} E_{ij}^r X_{ijt}^r + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} E_{jk}^p X_{jkt}^p + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} E_{jm}^p X_{jmt}^p + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} E_{kc}^p X_{kct}^p + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} E_{mc}^p X_{mct}^p + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} E_{jq}^p X_{jqt}^p + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} E_{cj}^p X_{cjt}^p + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} E_{mj}^p X_{mjt}^p + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} E_{cq}^p X_{cqt}^p + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} E_{mq}^p X_{mqt}^p + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} E_{qs}^p X_{qst}^p + \\ & \sum_{b \in B} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} E_s^b X_{st}^b \end{aligned}$$

تابع هدف سوم. در این تابع هدف به حداکثرسازی مسئولیت اجتماعی پرداخته شده که به صورت رابطه (۷) نشان داده می‌شود. عبارت اول شامل فرصت‌های شغلی در نتیجه احداث مراکز جمع‌آوری و بازیافت می‌باشد. عبارت دوم تعداد روزهای کاری از دست رفته ناشی از خسارات کار را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} Maxz3 = & Wc \left(\sum_{q \in Q} job_q Y^q + \sum_{s \in S} jobs_s Y^s \right) - \\ & WW \left(\sum_{q \in Q} FL_q Y^q + \sum_{s \in S} FL_s Y^s \right) \quad (7) \end{aligned}$$

محدودیت‌های مساله

$$\sum_{p \in P} \lambda_p^r X_{jt}^p \leq Z_{jt}^r + \sum_{i \in I} X_{ijt}^r \quad (8)$$

$\forall r \in R, j \in J, t > 1 \in T$

$$I_{st}^p = \sum_{q \in Q} X_{qst}^p - \sum_{b \in B} X_{st}^b \delta_b^p \quad (۳۷)$$

$$\forall p \in P, s \in S, t > 1 \in T$$

$$I_{st}^b = I_{st-1}^b + X_{st}^b - X_{st}^b \quad (۳۸)$$

$$\forall b \in B, \forall s \in S, \forall t > 1 \in T$$

$$I_{st}^b = X_{st}^b - X_{st}^b \quad (۳۹)$$

$$\forall b \in B, s \in S, t = 1 \in T$$

$$X_{st}^b \leq X_{st}^b \quad (۴۰)$$

$$\forall b \in B, s \in S, t \in T$$

$$I_{qt}^p \leq INV_p^q \quad (۴۱)$$

$$\forall p \in P, q \in Q, t \in T$$

$$I_{st}^p \leq INV_p^s \quad (۴۲)$$

$$\forall p \in P, s \in S, t \in T$$

$$I_{st}^b \leq INV_b^s \quad (۴۳)$$

$$\forall b \in B, s \in S, t \in T$$

$$X_{ijt}^r, X_{jkt}^p, X_{jmt}^p, X_{kct}^p, X_{mct}^p, X_{mjt}^p, X_{cjt}^p, \quad (۴۴)$$

$$X_{jqt}^p, X_{mqt}^p, X_{cqt}^p, X_{qst}^p, X_{jt}^p, X_{st}^b, X_{st}^b,$$

$$I_{jt}^r, I_{jt}^p, I_{qt}^p, I_{st}^p, I_{st}^b \geq 0$$

$$Y^q, Y^s \in \{0,1\} \quad (۴۵)$$

محدودیت‌های (۸) و (۹) تضمین می‌کنند که مواد اولیه مورد استفاده در محصول تولید شده در هر دوره در مرکز تولید، کوچکتر یا مساوی مجموع مواد اولیه موجود در مرکز تولید باشد. محدودیت (۱۰) بیان می‌کند که جریان خروجی مقدار محصول ارسال شده از مرکز خرده‌فروش و عمده‌فروش به مشتری حداقل مساوی تقاضای مشتری باشد. محدودیت (۱۱) بیان می‌کند که مقدار محصول ارسال شده از مرکز تولید به عمده‌فروش و خرده‌فروش در دوره اول کوچکتر یا مساوی مقدار محصول تولید شده در مرکز تولید باشد. محدودیت (۱۲) کننده این است که مقدار محصول ارسال شده از مراکز تولید به عمده‌فروش و خرده‌فروش در دوره‌های بعد کوچکتر یا مساوی موجودی مرکز تولید در ابتدای دوره فعلی باشد. محدودیت (۱۳) بیان می‌کند که مقدار محصول ارسال شده از عمده‌فروش به مشتری کوچکتر یا مساوی مقدار محصول ارسالی به عمده‌فروش می باشد. محدودیت (۱۴) بیان می‌کند که مقدار محصول ارسال شده از خرده‌فروش به مشتری، مرکز جمع‌آوری و تولیدکننده کوچکتر یا مساوی ارسالی به خرده‌فروش می باشد. محدودیت (۱۵) نشان دهنده جریان

$$I_{jt}^r = \sum_{i \in I} X_{ijt}^r - \sum_{p \in P} X_{jt}^p \quad (۲۲)$$

$$\forall r \in R, j \in J, t = 1 \in T$$

$$I_{jt}^r = I_{jt-1}^r + \sum_{i \in I} X_{ijt}^r - \sum_{p \in P} \lambda_p^r X_{jt}^p \quad (۲۳)$$

$$\forall r \in R, j \in J, t > 1 \in T$$

$$I_{jt}^p = I_{jt-1}^p + X_{jt}^p + \sum_{m \in M} X_{mjt}^p + \sum_{c \in C} X_{cjt}^p \quad (۲۴)$$

$$- \sum_{k \in K} X_{jkt}^p - \sum_{m \in M} X_{jmt}^p$$

$$\forall p \in P, j \in J, t > 1 \in T$$

$$Z_{jt}^p = X_{jt}^p + \sum_{m \in M} X_{mjt}^p + \sum_{c \in C} X_{cjt}^p \quad (۲۵)$$

$$- \sum_{k \in K} X_{jkt}^p - \sum_{m \in M} X_{jmt}^p$$

$$\forall p \in P, j \in J, t = 1 \in T$$

$$I_{jt}^r \leq INV_r^j \quad (۲۶)$$

$$\forall r \in R, j \in J, t \in T$$

$$I_{jt}^p \leq INV_p^j \quad (۲۷)$$

$$\forall p \in P, j \in J, t \in T$$

$$\sum_{j \in J} X_{jqt}^p + \sum_{m \in M} X_{mqt}^p + \sum_{c \in C} X_{cqt}^p \quad (۲۸)$$

$$\leq CAP_p^q Y^q$$

$$\forall p \in P, q \in Q, t \in T$$

$$\sum_{q \in Q} X_{qst}^p \leq CAP_p^s Y^s \quad (۲۹)$$

$$\forall p \in P, s \in S, t \in T$$

$$X_{st}^b = \sum_{p \in P} X_{st}^p \delta_b^p \quad (۳۰)$$

$$\forall b \in B, s \in S, t \in T$$

$$\sum_{q \in Q} Y^q \leq MAX^q \quad (۳۱)$$

$$\sum_{s \in S} Y^s \leq MAX^s \quad (۳۲)$$

$$X_{st}^p = \sum_{q \in Q} X_{qst}^p \quad (۳۳)$$

$$\forall p \in P, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$I_{qt}^p = \sum_{c \in C} X_{cqt}^p + \sum_{m \in M} X_{mqt}^p + \sum_{j \in J} X_{jqt}^p - \quad (۳۴)$$

$$\sum_{s \in S} X_{qst}^p$$

$$\forall p \in P, q \in Q, t = 1 \in T$$

$$I_{qt}^p = I_{qt-1}^p + \sum_{c \in C} X_{cqt}^p + \sum_{m \in M} X_{mqt}^p + \quad (۳۵)$$

$$\sum_{j \in J} X_{jqt}^p - \sum_{s \in S} X_{qst}^p$$

$$\forall p \in P, q \in Q, t > 1 \in T$$

$$I_{st}^p = I_{st-1}^p + \sum_{q \in Q} X_{qst}^p - \sum_{b \in B} X_{st}^b \delta_b^p \quad (۳۶)$$

$$\forall p \in P, s \in S, t > 1 \in T$$

بازیافتی قابل فروش در مراکز بازیافت را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۴۴) و (۴۵) به نوع متغیرها اشاره دارد. **همتای استوار مدل**. به منظور مواجهه با عدم اطمینان مسئله پژوهش از رویکرد سناریو محور استفاده شده است. مدل ارایه شده با استفاده از رویکرد سناریو محور بر مطالعه مالوی و همکارانش [۳۵] به شرح زیر است:

$$\text{Min}z = \sum_{\omega} \pi_{\omega} z_{\omega} + \varphi \left(\sum_{\omega} \pi_{\omega} \varphi_{\omega} \right) + \lambda \left(\sum_{\omega} \pi_{\omega} \left(\sum_{\omega} \pi_{\omega} z_{\omega} - z_{\omega} \right)^2 \right) \quad (46)$$

$$\omega \in \Omega$$

نمادهای ریاضی مدل استوار به شرح جدول زیر می‌باشد:

جدول ۲- نمادهای ریاضی مدل استوار	
اندیس	
ω	سناریو
پارامترها	
π_{ω}	احتمال سناریو
ψ	وزن برای محدودیتهای پاسخ داده نشده
λ	مقدار ضریب استواری
متغیر	
φ	متغیر کمبود و یا مازاد تحت سناریو

اهداف مدل برطبق مدل استوار ذکر شده به صورت زیر می‌باشند:

$$\text{Min}z1_{\text{Mulvey}} = \sum_{\omega} \pi_{\omega} z_{\omega}^1 + \varphi_1 \left(\sum_{\omega} \pi_{\omega} \varphi_{\omega} \right) + \lambda_1 \left(\sum_{\omega} \pi_{\omega} \left(\sum_{\omega} \pi_{\omega} z_{\omega}^1 - z_{\omega}^1 \right)^2 \right) \quad (47)$$

$$\text{Min}z2_{\text{Mulvey}} = \sum_{\omega} \pi_{\omega} z_{\omega}^2 + \varphi_2 \left(\sum_{\omega} \pi_{\omega} \varphi_{\omega} \right) + \lambda_2 \left(\sum_{\omega} \pi_{\omega} \left(\sum_{\omega} \pi_{\omega} z_{\omega}^2 - z_{\omega}^2 \right)^2 \right) \quad (48)$$

$$\text{Max}z3 = Wc \left(\sum_{q \in Q} \text{job}qY^q + \sum_{s \in S} \text{jobs}Y^s \right) - Ww \left(\sum_{q \in Q} FL_q Y^q + \sum_{s \in S} FL_s Y^s \right) \quad (49)$$

محصول برگشتی از مشتری به مراکز تولید و مرکز جمع‌آوری است برابر با درصد خاصی از میزان کالای ارسالی به مشتری است. محدودیت (۱۶) نشان دهنده جریان محصول برگشتی از خرده فروش به مراکز تولید و مرکز جمع‌آوری است که برابر با درصد خاصی از میزان کالای ارسالی به خرده فروش است. محدودیت (۱۷) نشان دهنده جریان محصول برگشتی از مراکز تولید به مرکز جمع‌آوری است که با کل محصول برگشتی به کارخانه برابر است. محدودیت (۱۸) تضمین می‌کند که میزان کل ورودی به مرکز جمع‌آوری با میزان خروجی آن برابر باشد. محدودیت (۱۹) محدودیت تضمین می‌کند که میزان کل تولید در هر کارخانه به مراکز خرده‌فروشی و عمده‌فروشی ارسال شود. محدودیت (۲۰) ظرفیت تامین کننده را نمایش می‌دهند. در رابطه (۲۱) محدودیت ظرفیت هر مراکز تولیدی نشان داده شده است. محدودیت‌های (۲۲) و (۲۳) موجودی مواد اولیه در مراکز تولیدی را نشان می‌دهند. محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵) موجودی محصول در مراکز تولیدی را نشان می‌دهند. در روابط (۲۶) و (۲۷) محدودیت ظرفیت انبار ماده اولیه و محصول در مرکز تولیدی نشان داده شده است. در روابط (۲۸) و (۲۹) محدودیت ظرفیت انبار مراکز جمع‌آوری و بازیافت نشان داده شده است. در محدودیت (۳۰) میزان مواد بازیافتی قابل فروش نشان داده شده است. محدودیت‌های (۳۱) و (۳۲) حداکثر تعداد مراکز جمع‌آوری و بازیافت قابل احداث را تعیین می‌کنند. محدودیت (۳۳) میزان کالای پردازش شده در مرکز بازیافت را مشخص می‌کند. محدودیت‌های (۳۴) و (۳۵) موجودی محصول در مراکز جمع‌آوری را نشان می‌دهند. محدودیت‌های (۳۶) و (۳۷) موجودی محصول در مراکز بازیافت را نشان می‌دهند. محدودیت‌های (۳۸) و (۳۹) موجودی ماده بازیافتی قابل فروش در مراکز بازیافت را نشان می‌دهند. محدودیت (۴۰) حداکثر میزان فروش ماده بازیافتی قابل فروش را مشخص می‌کند. محدودیت‌های (۴۱)، (۴۲) و (۴۳) محدودیت ظرفیت و محصول در مراکز جمع‌آوری و بازیافت و ماده

$$\sum_{p \in P} \lambda_p X_{jtw}^p \leq I_{jtw}^r + \sum_{i \in I} X_{ijtw}^r \quad (52)$$

$$\forall r \in R, j \in J, t > 1 \in T, \omega \in \Omega$$

$$\sum_{p \in P} \lambda_p X_{jtw}^p \leq \sum_{i \in I} X_{ijtw}^r \quad (53)$$

$$\forall r \in R, j \in J, t = 1 \in T, \omega \in \Omega$$

$$\sum_{k \in K} X_{kctw}^p + \sum_{m \in M} X_{mctw}^p \geq \rho_{pt}^c - \varphi_\omega \quad (54)$$

$$\forall p \in P, c \in C, t \in T, \omega \in \Omega$$

$$\sum_{k \in K} X_{jktw}^p + \sum_{m \in M} X_{jmtw}^p \leq X_{jtw}^p \quad (55)$$

$$\forall j \in J, p \in P, t = 1 \in T, \omega \in \Omega$$

$$\sum_{k \in K} X_{jktw}^p + \sum_{m \in M} X_{jmtw}^p \leq I_{jt-1}^p \quad (56)$$

$$\forall j \in J, p \in P, t > 1 \in T, \omega \in \Omega$$

$$\sum_{c \in C} X_{kctw}^p \leq \sum_{j \in J} X_{jktw}^p \quad (57)$$

$$\forall k \in K, p \in P, t \in T, \omega \in \Omega$$

$$\sum_{c \in C} X_{mctw}^p \leq \sum_{j \in J} X_{jmtw}^p - \sum_{q \in Q} X_{mqtw}^p - \sum_{j \in J} X_{mjtw}^p \quad (58)$$

$$\forall m \in M, p \in P, t \in T, \omega \in \Omega$$

$$\sum_{j \in J} X_{cjt\omega}^p + \sum_{q \in Q} X_{cqtw}^p = RE_c^p \quad (59)$$

$$\left(\sum_{k \in K} X_{kct\omega}^p + \sum_{m \in M} X_{mct\omega}^p \right)$$

$$\forall c \in C, p \in P, t \in T, \omega \in \Omega$$

$$\sum_{j \in J} X_{mjtw}^p + \sum_{q \in Q} X_{mqtw}^p = RE_m^p \sum_{j \in J} X_{jmt\omega}^p \quad (60)$$

$$\forall m \in M, p \in P, t \in T, \omega \in \Omega$$

$$\sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} X_{jqtw}^p = \sum_{t \in T} \left(\sum_{c \in C} X_{cjt\omega}^p + \sum_{m \in M} X_{mjtw}^p \right) \quad (61)$$

$$\forall j \in J, p \in P, \omega \in \Omega$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{t \in T} X_{qstw}^p = \sum_{t \in T} \left(\sum_{c \in C} X_{cqt\omega}^p + \sum_{j \in J} X_{jqtw}^p + \sum_{m \in M} X_{mqtw}^p \right) \quad (62)$$

$$\forall q \in Q, p \in P, \omega \in \Omega$$

$$\sum_{t \in T} X_{jtw}^p = \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} X_{jkt\omega}^p + \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} X_{jmt\omega}^p \quad (63)$$

$$\forall j \in J, p \in P, \omega \in \Omega$$

$$\sum_{j \in J} X_{ijtw}^r \leq CAP_r^i \quad (64)$$

$$\forall r \in R, i \in I, t \in T, \omega \in \Omega$$

$$X_{jtw}^p \leq CAP_p^j \quad (65)$$

$$\forall p \in P, \forall j \in J, \forall t \in T$$

$$I_{jtw}^r = \sum_{i \in I} X_{ijtw}^r - \sum_{p \in P} \lambda_p X_{jtw}^p \quad (66)$$

$$\forall r \in R, j \in J, t = 1 \in T, \omega \in \Omega$$

$$I_{jtw}^r = I_{jt-1}^r + \sum_{i \in I} X_{ijtw}^r - \sum_{p \in P} \lambda_p X_{jtw}^p \quad (67)$$

$$\forall r \in R, j \in J, t > 1 \in T, \omega \in \Omega$$

$$Z_\omega^1 = \sum_{q \in Q} C_q^f Y^q + \sum_{s \in S} C_s^f Y^s + \quad (50)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} VC_{it}^r X_{ijtw}^r +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} VC_{jt}^p X_{jtw}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} VC_{qt}^p$$

$$\left(\sum_{j \in J} X_{jqtw}^p + \sum_{m \in M} X_{mqtw}^p + \sum_{c \in C} X_{cqtw}^p \right)$$

$$+ \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} VC_{st}^p X_{bst\omega}^p -$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} P_b X_{bst\omega}^p +$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} TC_{ijt}^r X_{ijtw}^r +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} TC_{jkt}^p X_{jkt\omega}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} TC_{jmt}^p X_{jmt\omega}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} TC_{kct}^p X_{kct\omega}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} TC_{mct}^p X_{mct\omega}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} TC_{mjt}^p X_{mjt\omega}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} TC_{cjt}^p X_{cjt\omega}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} TC_{jqt}^p X_{jqtw}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} TC_{mqt}^p X_{mqtw}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} TC_{cqt}^p X_{cqtw}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} TC_{qst}^p X_{qstw}^p +$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} TC_{st}^b X_{bst\omega}^b +$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} HC_{jt}^r I_{jtw}^r +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} HC_{jt}^p I_{jtw}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} HC_{qt}^p I_{qtw}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} HC_{st}^p I_{stw}^p +$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} HC_{st}^b I_{stw}^b$$

$$Z_\omega^2 = \sum_{q \in Q} E_q Y^q + \sum_{s \in S} E_s Y^s + \quad (51)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} E_j X_{jtw}^p +$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} E_{ij} X_{ijtw}^r +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} E_{jk} X_{jkt\omega}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} E_{jm} X_{jmt\omega}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} E_{kc} X_{kct\omega}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} E_{mc} X_{mct\omega}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} E_{mj} X_{mjt\omega}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} E_{cj} X_{cjt\omega}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} E_{jq} X_{jqtw}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} E_{mq} X_{mqtw}^p +$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} E_{qs} X_{qstw}^p +$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} E_s^b X_{bst\omega}^b +$$

$$I_{st\omega}^b = X_{st\omega}^b - XB_{st\omega}^b \quad (۸۳)$$

$$\forall b \in B, \forall s \in S, \forall t = 1 \in T, \omega \in \Omega$$

$$XB_{st\omega}^b \leq X_{st\omega}^b \quad (۸۴)$$

$$\forall b \in B, \forall s \in S, \forall t \in T, \omega \in \Omega$$

$$I_{qt\omega}^b \leq INV_p^q \quad (۸۵)$$

$$\forall b \in B, \forall s \in S, \forall t \in T, \omega \in \Omega$$

$$I_{st\omega}^p \leq INV_p^s \quad (۸۶)$$

$$\forall p \in P, \forall s \in S, \forall t \in T, \omega \in \Omega$$

$$I_{st\omega}^b \leq INV_b^s \quad (۸۷)$$

$$\forall b \in B, \forall s \in S, \forall t \in T, \omega \in \Omega$$

$$X_{ijt\omega}^r, X_{jkt\omega}^p, X_{jmt\omega}^p, X_{kct\omega}^p, X_{mct\omega}^p, X_{mjt\omega}^p, \quad (۸۸)$$

$$X_{cjt\omega}^p, X_{jqt\omega}^p, X_{mqt\omega}^p, X_{cqt\omega}^p, X_{qst\omega}^p, X_{jst\omega}^p,$$

$$X_{st\omega}^b, XB_{st\omega}^b, I_{ijt\omega}^r, I_{jst\omega}^p, I_{qst\omega}^p, I_{st\omega}^p, I_{st\omega}^b \geq 0$$

$$Y^q, Y^s \in \{0,1\} \quad (۸۹)$$

تبدیل مدل چند هدفه به تک هدفه. حل مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه مستلزم استفاده از تکنیک‌های خاصی است که از آن جمله می‌توان به روش‌های محدودیت اسپیلون^۱، برنامه‌ریزی آرمانی^۲، نیل به آرمان^۳ و گونه‌های تقویت شده آنها اشاره کرد. در ادامه با رویکرد محدودیت اسپیلون تقویت^۴ شده مدل چند هدفه پیشین به یک مدل تک‌هدفه تبدیل شده و الگوریتم حل آن برای دستیابی به پاسخ‌های کارای پارتویی^۵ مسئله ارائه شده است. دلیل انتخاب این رویکرد کارایی آن در مقایسه با سایر رویکردهای چندهدفه در تولید جواب‌های کارای پارتویی است. این روش به جواب‌های بهینه گوشه‌ای محدود نبوده و از مقیاس توابع هدف تاثیر نمی‌پذیرد (نیاز به نرمال‌سازی ندارد). همچنین تعداد جواب‌های پارتویی تولیدی (فاصله/دقت جواب‌های مرز پارتویی^۶) به سادگی و با کنترل اندازه‌گیری قابل کنترل است. لازم به ذکر است، منظور از جواب کارای پارتویی جوابی می‌باشد که در هیچ یک از توابع هدف از دیگر جواب‌ها عملکرد بدتری نداشته و حداقل در یک تابع هدف از دیگر جواب‌ها عملکرد بهتری داشته است. مجموعه این جواب‌های کارای پارتویی، مرز پارتویی مسئله را تشکیل می‌دهند. انتخاب یک جواب از میان جواب‌های واقع در مرز پارتویی مسئله بستگی به اولویت ذهنی اهداف

$$I_{jt\omega}^p = I_{jt-1}^p + X_{jt\omega}^p + \sum_{m \in M} X_{mjt\omega}^p + \sum_{c \in C} X_{cjt\omega}^p - \quad (۹۸)$$

$$\sum_{k \in K} X_{jkt\omega}^p - \sum_{m \in M} X_{jmt\omega}^p$$

$$\forall p \in P, \forall j \in J, t > 1 \in T, \omega \in \Omega$$

$$I_{jt\omega}^p = X_{jt\omega}^p + \sum_{m \in M} X_{mjt\omega}^p + \sum_{c \in C} X_{cjt\omega}^p - \quad (۹۹)$$

$$\sum_{k \in K} X_{jkt\omega}^p - \sum_{m \in M} X_{jmt\omega}^p$$

$$\forall p \in P, \forall j \in J, t \geq 1 \in T, \omega \in \Omega$$

$$I_{jt\omega}^r \leq INV_r^j \quad (۱۰۰)$$

$$\forall r \in R, \forall j \in J, \forall t \in T, \omega \in \Omega$$

$$I_{jt\omega}^p \leq INV_p^j \quad (۱۰۱)$$

$$\forall p \in P, \forall j \in J, \forall t \in T, \omega \in \Omega$$

$$\sum_{j \in J} X_{jqt\omega}^p + \sum_{m \in M} X_{mqt\omega}^p + \sum_{c \in C} X_{cqt\omega}^p \leq \quad (۱۰۲)$$

$$CAP_p^q Y^q$$

$$\forall p \in P, \forall q \in Q, \forall t \in T, \omega \in \Omega$$

$$\sum_{q \in Q} X_{qst\omega}^p \leq CAP_p^s Y^s \quad (۱۰۳)$$

$$\forall p \in P, \forall s \in S, \forall t \in T, \omega \in \Omega$$

$$X_{st\omega}^b = \sum_{p \in P} X_{st\omega}^p \delta_b^p \quad (۱۰۴)$$

$$\forall b \in B, \forall s \in S, \forall t \in T, \omega \in \Omega$$

$$\sum_{q \in Q} Y^q \leq MAX^q \quad (۱۰۵)$$

$$\sum_{s \in S} Y^s \leq MAX^s \quad (۱۰۶)$$

$$X_{st\omega}^p = \sum_{q \in Q} X_{qst\omega}^p \quad (۱۰۷)$$

$$\forall p \in P, \forall s \in S, \forall t \in T, \omega \in \Omega$$

$$I_{qt\omega}^p = \sum_{c \in C} X_{cqt\omega}^p + \sum_{m \in M} X_{mqt\omega}^p + \quad (۱۰۸)$$

$$\sum_{j \in J} X_{jqt\omega}^p - \sum_{s \in S} X_{qst\omega}^p$$

$$\forall p \in P, \forall q \in Q, \forall t = 1 \in T, \omega \in \Omega$$

$$I_{qt\omega}^p = I_{qt-1}^p + \sum_{c \in C} X_{cqt\omega}^p + \sum_{m \in M} X_{mqt\omega}^p \quad (۱۰۹)$$

$$+ \sum_{j \in J} X_{jqt\omega}^p - \sum_{s \in S} X_{qst\omega}^p$$

$$\forall p \in P, \forall q \in Q, \forall t > 1 \in T, \omega \in \Omega$$

$$I_{st\omega}^p = I_{st-1}^p + \sum_{q \in Q} X_{qst\omega}^p - \sum_{b \in B} X_{st\omega}^b \delta_b^p \quad (۱۰۰)$$

$$\forall p \in P, \forall s \in S, \forall t > 1 \in T, \omega \in \Omega$$

$$I_{st\omega}^p = \sum_{q \in Q} X_{qst\omega}^p - \sum_{b \in B} X_{st\omega}^b \delta_b^p \quad (۱۰۱)$$

$$\forall p \in P, \forall s \in S, \forall t > 1 \in T, \omega \in \Omega$$

$$I_{st\omega}^b = I_{st-1}^b + X_{st\omega}^b - XB_{st\omega}^b \quad (۱۰۲)$$

$$\forall b \in B, \forall s \in S, \forall t > 1 \in T, \omega \in \Omega$$

⁴ AUGMented ϵ -CONstraint 2 (AUGMECON2)

⁵ Pareto Efficient

⁶ Pareto Front

¹ ϵ -constraint

² Goal Programming

³ Goal Attainment

گام ۵: چنانچه تغییر در مقادیر سمت راست هیچ یک از توابع هدف تبدیل شده به محدودیت تغییری در جواب ایجاد نکنند، حل خاتمه یافته و مقادیر ذخیره شده از حل‌های پیشین به عنوان مجموعه جواب‌های کارآی پارتویی ارائه خواهد شد [۳۶].

در ادامه مدل غیر قطعی چندهدفه ارائه شده در بخش پیشین با رویکرد محدودیت اپسیلون تقویت شده به یک مدل تک‌هدفه تبدیل شده و الگوریتم حل آن برای دستیابی به پاسخ‌های کارآی پارتویی مسئله ارائه شده است. توابع هدف مدل قطعی چند هدفه بند پیشین به شرح ذیل تغییر می‌کنند:

$$\text{Min} z_{\text{Mulvey}} - \varepsilon \left(\frac{S_2}{r_2} + \frac{S_3}{r_3} \right) \quad (92)$$

$$Z2_{\text{Mulvey}} + S_2 = \varepsilon_2 \quad (93)$$

$$Z3 - S_3 = \varepsilon_3 \quad (94)$$

$$S_2, S_3 \geq 0 \quad (95)$$

$$s.t(52-89)$$

۴- یافته‌های پژوهش

کاربرد و ارزیابی مدل پیشنهادی.

برای بررسی کاربرد مدل ارائه شده، داده‌های یک شرکت فعال در صنعت ام دی اف استفاده شده است. به دلیل محرمانگی بودن اطلاعات، از ذکر نام شرکت خوداری شده است. این شرکت در مسیر توسعه توانسته با بهره‌مندی از ظرفیت عرضه این محصول تا حد بیش از ۱۵,۰۰۰,۰۰۰ متر مکعب سالیانه گام بزرگی در صنعت کشور بردارد و سهم بالایی از بازار ایران را به خود اختصاص دهد. محصولات فیبر فشرده چوبی این شرکت به صورت خام(ام دی اف، اچ دی اف و سی ان سی) و روکش(سفید صابونی، سفید آینه‌ایی و هایگلاس) در ۵ مرکز تولیدی دو استان گیلان و مازندران با بهره‌مندی از تکنولوژی روز دنیا در حال تولید و عرضه به عمده فروش و خرده‌فروش می‌باشد. با توجه به اینکه ماده اولیه و اصلی ساخت محصول ام دی اف چوب می‌باشد و به واسطه طرح صیانت از جنگل‌ها، میزان برداشت چوب در سال‌های اخیر روندکاهشی در پیش داشته، استفاده از مواد بازیابی شده برای این صنعت و سایر صنایع سلولزی از جمله نئوپان، کاغذ، میلمان، بسته بندی و... از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. لذا این پژوهش به

برای تصمیم‌گیرنده دارد و بدون چنین اولویت‌بندی هیچ یک از این جواب‌ها بر دیگران برتری (غلبه^۱) ندارند. با فرض مسئله بهینه‌سازی چند هدفه نمونه ذیل که در آن x بردار متغیرهای تصمیم و K فضای شدنی مسئله را نمایش می‌دهند، رویکرد محدودیت اپسیلون تقویت شده یافته شامل ۵ گام به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} & \min [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)] \\ & s.t: \\ & X \in S \end{aligned} \quad (90)$$

گام ۱: مسئله برای هر یک از توابع هدف به ترتیب و با رویکرد لکزیکوگرافیک^۲ حل شود. به عبارت دیگر در هر مرحله تابع هدف آن مرحله با مقدار سمت راست (e_i) معادل جواب بهینه آن به محدودیت‌ها منتقل می‌گردد. از این طریق مقادیر غیر کارآی پارتویی از فضای حل حذف و از تکرارهای بی‌مورد الگوریتم اجتناب می‌شود.

گام ۲: در این گام بازه مقادیر سمت راست (r_i) هر یک از توابع هدف تبدیل شده به محدودیت گریدبندی می‌شود. هر چه فاصله مقادیر گریدها کمتر باشد، دقت جواب‌ها افزایش یافته اما تعداد تکرارهای الگوریتم و در نتیجه زمان حل نیز افزایش می‌یابند.

گام ۳: تمامی توابع هدف به غیر از یکی با افزودن متغیر کمکی s_i به محدودیت‌هایی از نوع تساوی تبدیل می‌شوند. تابع هدف جدید شامل حاصل جمع تنها تابع هدف باقی‌مانده (تبدیل نشده به محدودیت) و مضربی (ε) از مقادیر نرمال شده متغیرهای کمکی دیگر توابع هدف (با استفاده از بازه به دست آمده در گام دوم) است. بر این اساس مدل نهایی عبارت است از:

$$\begin{aligned} & \min \left[f_1(x) + \varepsilon \left(\frac{S_2}{r_2} + \frac{S_3}{r_3} + \dots + \frac{S_n}{r_n} \right) \right] \\ & s.t: f_i(x) - s_i = e_i \\ & \forall i \in 2, \dots, n \\ & X \in S \end{aligned} \quad (91)$$

گام ۴: با شروع از سهل‌گیرانه‌ترین مقادیر برای سمت راست محدودیت‌های متناظر توابع هدف، مسئله را حل و پس از ذخیره مقادیر به دست آمده مقادیر سمت راست محدودیت‌ها را اضافه می‌کنیم. این گام تا جایی که با افزودن به مقادیر سمت راست تغییری در مقدار تابع هدف حاصل نشود ادامه می‌یابد.

² Lexicographic

¹ Dominance

قطعی و استوار در جدول ۴ نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۴ نشان داده شده است، بهینه‌سازی هر تابع هدف، مقدار توابع هدف دیگر را از مقدار بهینه دور کرده است. مقدار بهینه تابع هدف اول در حالت قطعی از همتای استوار آن بیشتر است چرا که جریمه نقض قیود در تابع اول به صورتی در نظر گرفته شده که امکان تخطی از قیود وجود دارد اما در مورد تابع هدف دوم چون جریمه نقض قیود به شکلی تنظیم شده که میزان تخطی برابر صفر است، مقدار تابع هدف در مدل همتای استوار بیشتر از مدل قطعی است.

تحلیل مرز پارتو. اشکال (۲) و (۳) مرز پارتو مدل پیشنهادی را در برای حالت قطعی مساله و همتای استوار مدل نشان می‌دهند.

تحلیل حساسیت. جداول ۵ و ۶ مقدار توابع هدف با تغییر در مقدار جریمه نقض و تخطی از محدودیت‌ها را نشان می‌دهد. براین اساس با افزایش ضریب جریمه، میزان تخطی از محدودیت کاهش می‌یابد. جداول ۷ و ۸ مقدار توابع هدف با تغییر در مقدار جریمه انحرافات از میانگین براین اساس با افزایش ضریب جریمه، میزان انحرافات کاهش می‌یابد.

دنبال امکان سنجی مراکز جمع‌آوری و بازیافت و تعداد بهینه آن‌ها بوده که آیا با احداث این مراکز، عملکرد شرکت از نظر ابعاد پایداری بهبود می‌یابد یا خیر، و چه فواید برای زنجیره‌تامین مربوطه ایجاد خواهند کرد. علاوه بر موارد ذکر شده تاثیر عدم‌اطمینان تقاضا نیز بر روی تصمیمات قبلی در این زنجیره‌تامین مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات کلی مدل پیشنهادی در جدول ۳ نشان داده شده است. برای حل مدل از نرم‌افزار GAMS 24.1.2 و حل‌کننده CPLEX استفاده شده است. در ادامه در ابتدا نتایج مدل‌های قطعی و برنامه‌ریزی استوار با هم مقایسه شده‌اند.

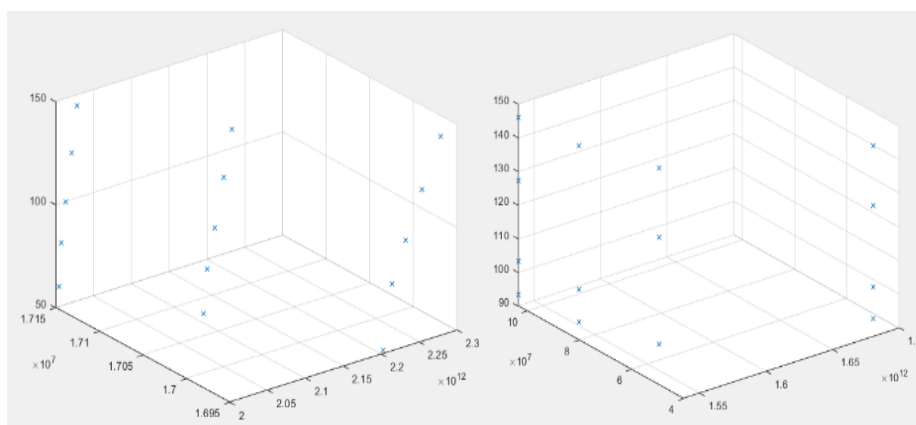
جدول ۳- مشخصات کلی مدل پیشنهادی

$ I $	$ J $	$ K $	$ M $	$ C $	$ Q $	$ S $	$ p $
۴	۵	۵	۸	۱۰	۷	۷	۶

عملکرد مدل استوار. لازم به ذکر است مقدار پارامتر تقاضا در مدل قطعی، مقدار متوسط مقادیر تقاضا برای سناریوهای مختلف در مدل استوار در نظر گرفته شده است. هنگام بهینه‌سازی چند تابع هدف به طور همزمان به دلیل تضاد اهداف، بهبود مقدار یک تابع هدف می‌تواند مطلوبیت توابع دیگر را کاهش دهد. رفتار متضاد توابع هدف در حالت

جدول ۴- مقادیر بهینه توابع هدف در مدل قطعی در مقایسه با مدل استوار

قطعی		Z_1 (ریال)	Z_2 (کیلوگرم)	Z_3
	Z_1	$1/618258E+12$	$2/509273E+12$	$1/618263E+12$
Z_2	$2/19885E+12$	$1/6853E+07$	$1/6897E+07$	
Z_3	$1/153647E+02$	$4/99847E+01$	$1/4601E+02$	
استوار		Z_1 (ریال)	Z_2 (کیلوگرم)	Z_3
	Z_1	$1/537757E+12$	$1/540471E+12$	$1/537764E+12$
Z_2	$1/0336E+08$	$2/0158E+07$	$2/0192E+07$	
Z_3	$1/05891E+02$	$5/98303E+01$	$1/4601E+02$	



شکل ۳- مرز پارتو مدل همتای استوار

شکل ۲- مرز پارتو مدل قطعی

جدول ۵- مقدار تابع هدف اول با تغییر در مقدار جریمه نقض و تخطی از محدودیتها ($\lambda_1 = .15$)

$\sum_{\omega} \pi_{\omega} \varphi_{\omega}$	$\sum_{\omega} \pi_{\omega} Z_{\omega}^1$	$z1_{Mulvey}$ (ریال)	ψ_1
$9/385441E+01$	$5/99E+11$	$1/54E+12$	$1/00E+10$
$1/79E+02$	$2/28E+02$	$1/79E+11$	$1/00E+09$
$1/78959E+02$	$1/664851E+02$	$1/78959E+10$	$1/00E+08$
$1/78959E+02$	$5/805796E+03$	$1/789596E+09$	$1/00E+07$
$1/78959E+02$	$2/62995E+03$	$1/789616E+08$	$1/00E+06$
$1/78959E+02$	$2/4981315E+03$	$1/78984E+07$	$1/00E+05$
$1/78959E+02$	$1/319104E+03$	$1/790909E+06$	$1/00E+04$
$1/78959E+02$	$2/539057E+03$	$1/81492E+05$	$1/00E+03$

جدول ۶- مقدار تابع هدف دوم با تغییر در مقدار جریمه نقض و تخطی از محدودیتها ($\lambda_2 = .15$)

$\sum_{\omega} \pi_{\omega} \varphi_{\omega}$	$\sum_{\omega} \pi_{\omega} Z_{\omega}^2$	$z2_{Mulvey}$ (کیلوگرم)	ψ_2
$0/00E+00$	$2/02E+07$	$2/02E+07$	$1/00E+08$
$0/00E+00$	$2/02E+07$	$2/02E+07$	$1/00E+07$
$0/00E+00$	$2/02E+07$	$2/02E+07$	$1/00E+06$
$1/45E+02$	$1/99E+06$	$1/64E+07$	$1/00E+05$
$1/76E+02$	$2/04E+04$	$1/79E+02$	$1/00E+04$
$1/79E+02$	$1/53E+02$	$1/79E+05$	$1/00E+03$

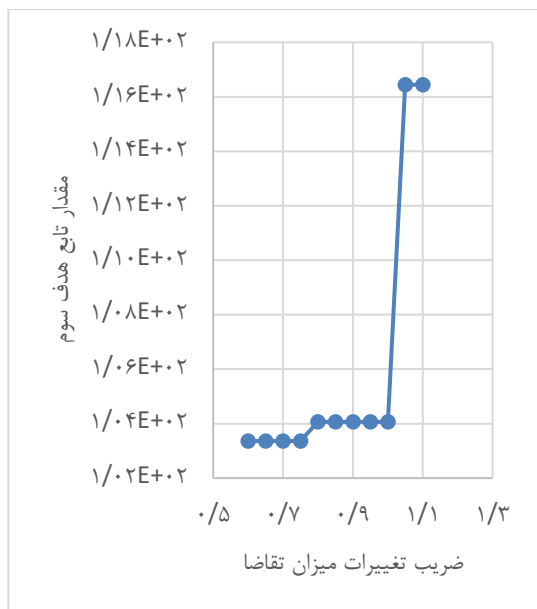
جدول ۷- مقدار تابع هدف اول با تغییر در مقدار جریمه انحرافات از میانگین

$\sum_{\omega} \pi_{\omega} \left(\sum_{\omega} \pi_{\omega} Z_{\omega}^1 - Z_{\omega}^1 \right)^2$	$\sum_{\omega} \pi_{\omega} Z_{\omega}^1$	$z1_{Mulvey}$ (ریال)	λ_1
$0/000064026$	$1/547E+09$	$1/77200E+11$	$0/1$
$0/000064026$	$1/550E+09$	$1/77202E+11$	$0/5$
$0/000064026$	$1/551E+09$	$1/77202E+11$	5
$0/000064026$	$1/549E+09$	$1/77202E+11$	10
$0/000064026$	$1/548E+09$	$1/77202E+11$	50

جدول ۸- مقدار تابع هدف دوم با تغییر در مقدار جریمه انحرافات از میانگین

$\sum_{\omega} \pi_{\omega} \left(\sum_{\omega} \pi_{\omega} Z_{\omega}^2 - Z_{\omega}^2 \right)^2$	$\sum_{\omega} \pi_{\omega} Z_{\omega}^2$	$z2_{Mulvey}$ (کیلوگرم)	λ_2
$0/099687$	$1/9868E+06$	$1/64458E+07$	$0/1$
$0/004971$	$1/9867E+06$	$1/64458E+07$	$0/5$
$0/001508$	$1/9867E+06$	$1/64459E+07$	5
$0/000053$	$1/9868E+06$	$1/64458E+07$	10
$0/000114$	$1/9864E+06$	$1/64459E+07$	50

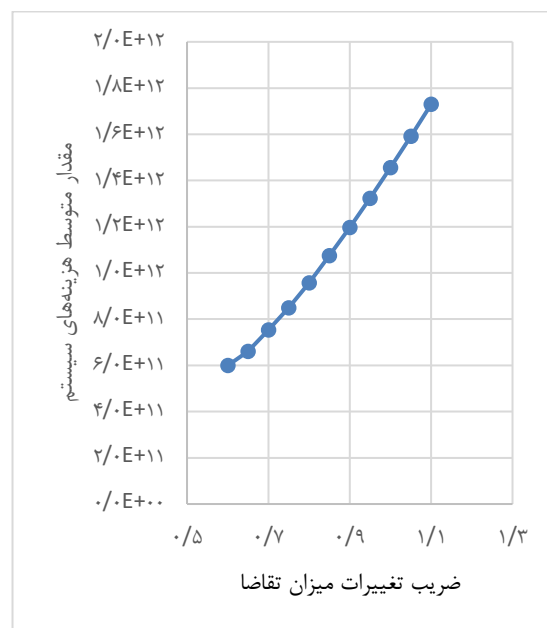
تغییر می‌کند. چون بخش بزرگی از توابع اول و دوم را هزینه‌ها و آلودگی ناشی از حمل و نقل تشکیل می‌دهد، این افزایش به طور واضحی در شکل‌های (۳) و (۴) مشخص نیست.



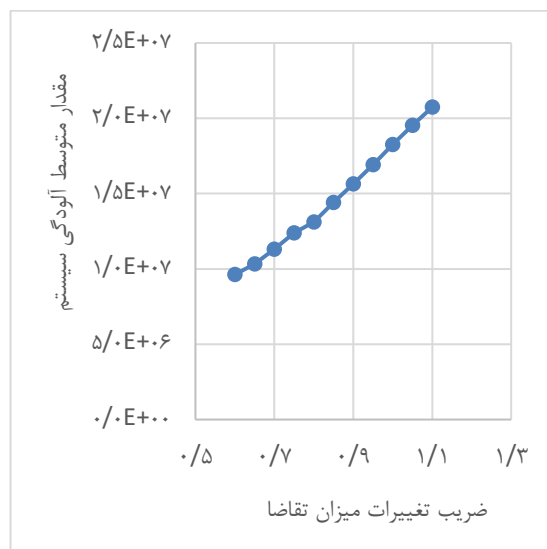
شکل ۵- روند تغییرات تابع هدف سوم بر اثر تغییر در میزان تقاضا برای مدل همتای استوار

تغییرات مقادیر توابع هدف در اثر تغییر مقدار محصولات بازگشتی در شکل‌های (۶) تا (۸) مشخص شده است. افزایش میزان محصولات بازگشتی به دنبال افزایش تعداد تسهیلات تاسیس شده، منجر به افزایش تولید و حمل و نقل، میزان هزینه‌ها، آلودگی ایجاد شده در سیستم و همین‌طور مقدار تابع هدف مسئولیت اجتماعی می‌شود. در شکل (۸) مشاهده می‌شود که مشابه افزایش تقاضا، با افزایش ۵ درصدی میزان محصولات برگشتی به دلیل افزایش تعداد تسهیلات مقدار تابع هدف به طور ناگهانی تغییر می‌کند. با افزایش تقاضا هزینه‌ها، در بخش تولید و حمل‌ونقل در تمامی سطوح شبکه افزایش می‌یابد و با افزایش میزان محصولات بازگشتی تولید افزایش نمی‌یابد و حمل‌ونقل در مسیر بازگشتی تغییر می‌کند، بنابراین شیب افزایش هزینه‌ها و آلودگی زیست‌محیطی با افزایش میزان تقاضا بیشتر است.

تغییرات مقادیر توابع هدف بر اثر تغییر پارامتر حداکثر تعداد مراکز جمع‌آوری مجاز برای ساخت در شکل‌های (۹) تا (۱۱) مشخص شده است. با کاهش تعداد مراکز جمع‌آوری قابل ساخت مدل برای جبران هزینه حمل‌ونقل



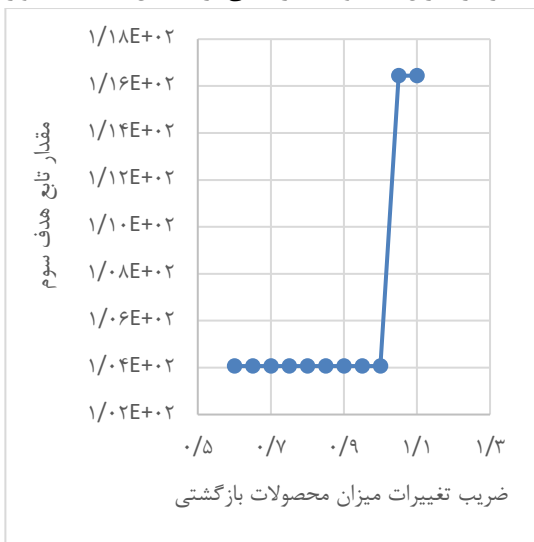
شکل ۳- روند تغییرات متوسط هزینه‌های سیستم بر اثر تغییر در میزان تقاضا برای مدل همتای استوار



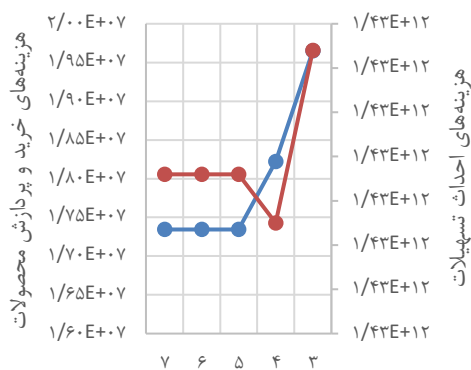
شکل ۴- روند تغییرات متوسط آلودگی سیستم بر اثر تغییر در میزان تقاضا برای مدل همتای استوار

تغییرات مقادیر توابع هدف در اثر تغییر مقدار تقاضا در شکل‌های (۳) تا (۵) مشخص شده است. با افزایش تقاضا به دنبال افزایش تعداد تسهیلات تاسیس شده و همچنین افزایش تولید و حمل و نقل، میزان هزینه‌ها، آلودگی ایجاد شده در سیستم و همین‌طور مقدار تابع هدف مسئولیت اجتماعی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود با افزایش ۵ درصدی میزان تقاضای فعلی به دلیل افزایش تعداد تسهیلات مقدار تابع هدف به طور ناگهانی

شکل ۷- روند تغییرات مقدار متوسط آلودگی سیستم بر اثر تغییر در میزان محصولات بازگشتی برای مدل همتای استوار

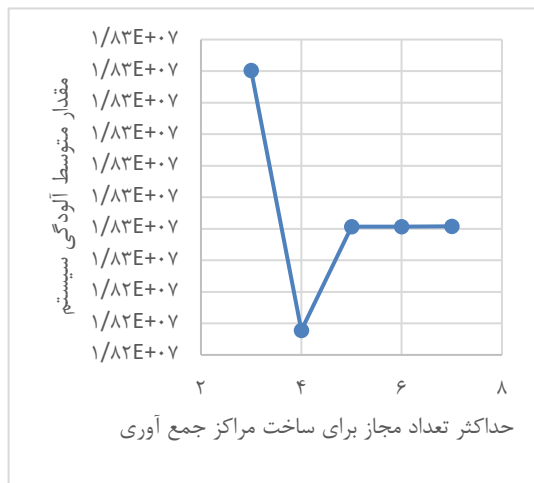


شکل ۸- روند تغییرات تابع هدف دوم بر اثر تغییر در میزان محصولات بازگشتی برای مدل همتای استوار

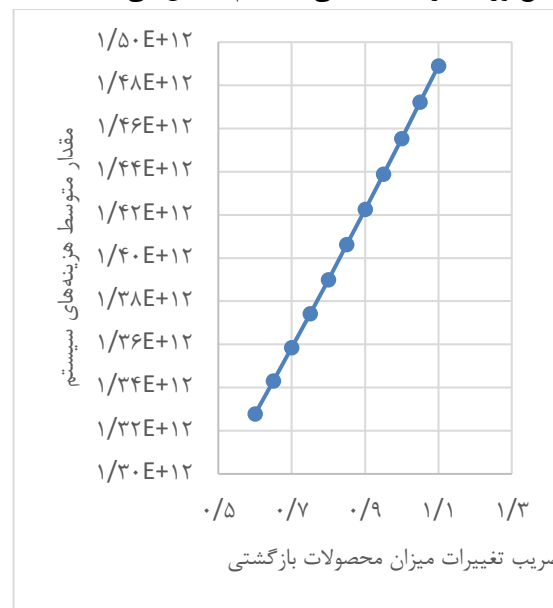


شکل ۹- تغییرات اجزای هزینه بر اثر تغییر پارامتر حداکثر تعداد مجاز برای ساخت مراکز جمع‌آوری

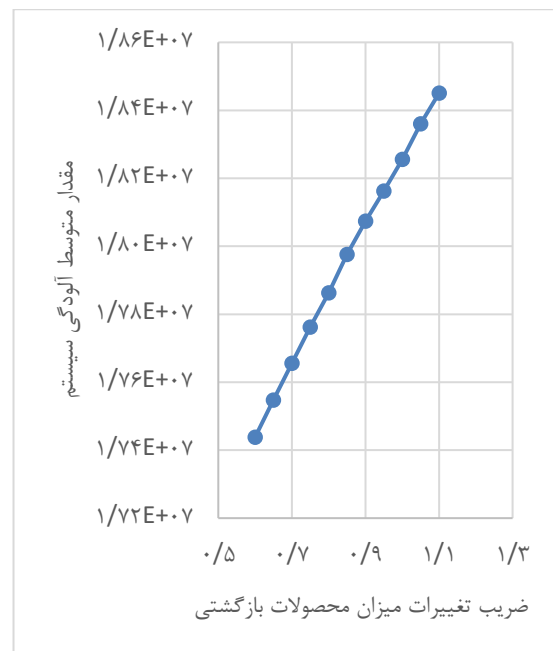
شکل ۹- تغییرات اجزای هزینه بر اثر تغییر پارامتر حداکثر تعداد مجاز برای ساخت مراکز جمع‌آوری

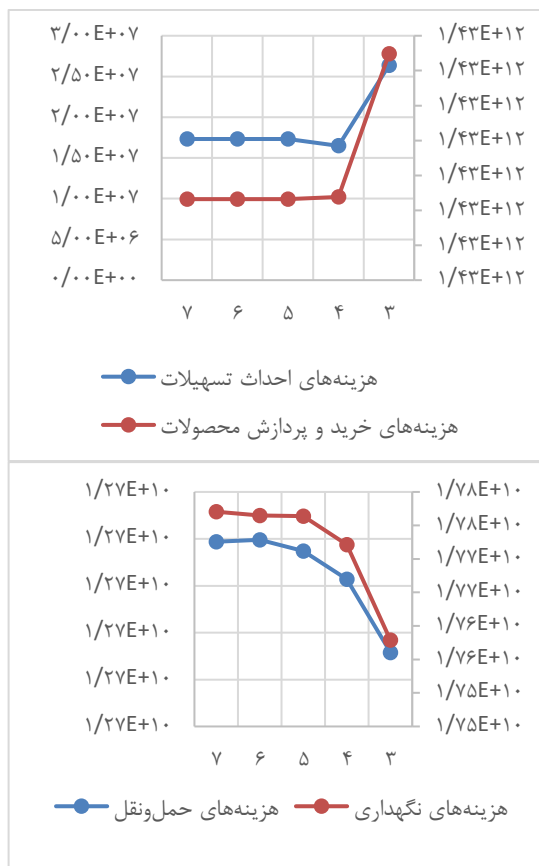


تعداد مراکز بازیافت احداث شده را زیاد می‌کند، به همین دلیل با کاهش این پارامتر هزینه‌های احداث در مدل افزایش می‌یابد (در جدول ۸ تعداد مراکز احداث شده نمایش داده شده‌اند). با احداث حداکثر ۴ مرکز جمع‌آوری، هزینه‌های خرید و پردازش محصولات، حمل‌ونقل و نگهداری و متوسط آلودگی سیستم به حداقل و تابع هدف اجتماعی به حداکثر می‌رسد اما به دلیل افزایش مقدار تقاضای تامین نشده (ϕ)، با احداث تعداد بیشتری از مراکز جمع‌آوری، هزینه‌های کلی سیستم کاهش می‌یابد.

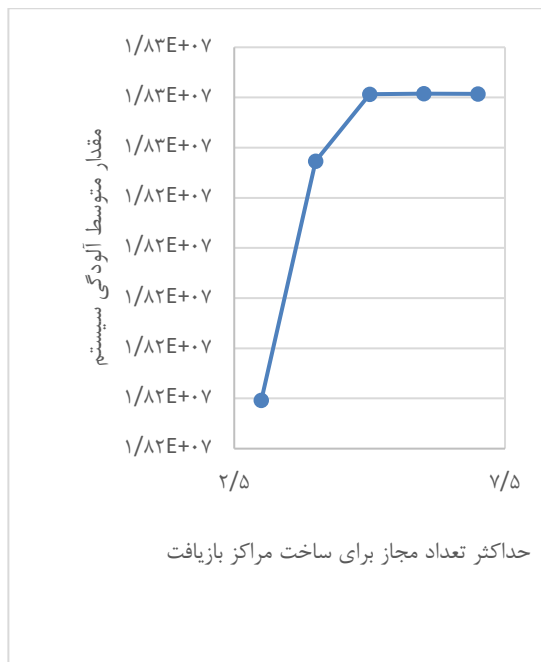


شکل ۶- روند تغییرات متوسط هزینه‌های سیستم بر اثر تغییر در میزان محصولات بازگشتی برای مدل همتای استوار



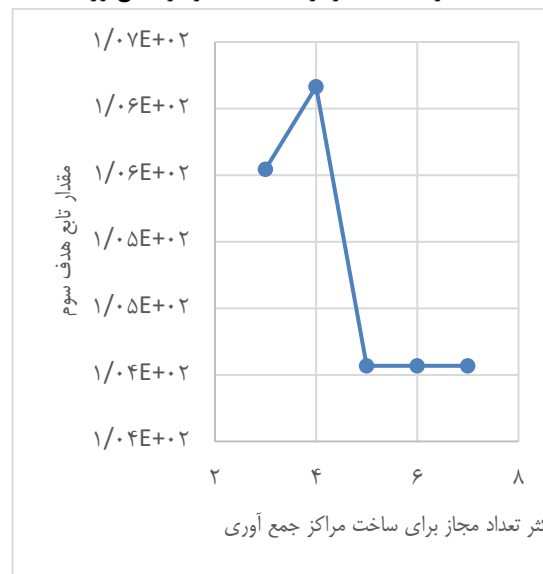


شکل ۱۲- تغییرات اجزای هزینه بر اثر تغییر پارامتر حداکثر تعداد مجاز برای ساخت مراکز بازیافت



شکل ۱۳- تغییرات متوسط آلودگی سیستم بر اثر تغییر پارامتر حداکثر تعداد مجاز برای ساخت مراکز بازیافت

شکل ۱۰- تغییرات متوسط آلودگی سیستم بر اثر تغییر پارامتر حداکثر تعداد مجاز برای ساخت مراکز جمع‌آوری



شکل ۱۱- تغییرات تابع هدف سوم بر اثر تغییر پارامتر حداکثر تعداد مجاز برای ساخت مراکز جمع‌آوری

جدول ۹ تعداد مراکز جمع‌آوری و بازیافت احداث شده با تغییر حداکثر تعداد مجاز برای ساخت مراکز جمع‌آوری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشخص است با کاهش تعداد مجاز برای ساخت مراکز جمع‌آوری، تعداد مراکز بازیافت احداث شده، برای کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، افزایش می‌یابد.

جدول ۹- تعداد مراکز جمع‌آوری و بازیافت متناسب با حداکثر تعداد مجاز برای ساخت مراکز جمع‌آوری

حداکثر تعداد مجاز برای ساخت مراکز جمع‌آوری	مراکز جمع‌آوری احداث شده	مراکز بازیافت احداث شده
۷	۱,۲,۴,۶,۷	۱,۲,۳,۴,۶
۶	۱,۲,۴,۶,۷	۱,۲,۴,۶,۷
۵	۱,۲,۴,۶,۷	۱,۲,۳,۴,۶
۴	۲,۴,۷	۱,۲,۳,۴,۶,۷
۳	۲,۴,۷	۱,۲,۳,۴,۵,۶,۷

تغییرات مقادیر توابع هدف بر اثر تغییر پارامتر حداکثر تعداد مراکز بازیافت مجاز برای ساخت در شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) مشخص شده است. با کاهش تعداد مراکز بازیافت قابل ساخت، مدل برای جبران هزینه حمل‌ونقل، تعداد مراکز جمع‌آوری احداث شده را زیاد می‌کند، به همین دلیل با کاهش این پارامتر هزینه‌های احداث در مدل افزایش می‌یابد (در جدول ۹ تعداد مراکز بازیافت احداث شده نمایش داده شده‌اند).

در تقاضا به چالش‌های مهمی در زنجیره‌های تامین تبدیل می‌گردند. از این رو در چنین شرایطی به منظور دستیابی به مزیت رقابتی و انطباق با اهداف اقتصاد چرخشی، لجستیک معکوس از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. بدین ترتیب زنجیره‌تامین چرخشی می‌تواند فرصتی را برای بازیابی ارزش از ضایعات، از طریق همکاری در همان زنجیره‌تامین و در سایر زنجیره‌های تامین فراهم کند.

در حالی که پژوهش‌های گذشته به صورت جامع مبحث چرخشی بودن در زنجیره‌تامین نپرداخته‌اند، در این پژوهش به ارایه یک مدل بهینه‌سازی زنجیره‌تامین چرخشی چندهدفه، چندسطحی در شرایط عدم اطمینان پرداخته شد، که در کنار اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی، اهداف اجتماعی نیز در نظر گرفته شد. به منظور مواجهه با عدم اطمینان در تقاضا از رویکرد سناریو محور استفاده شده است. از روش محدودیت اسپیلون تقویت شده به منظور تبدیل مدل چند هدفه به تک هدفه و برای حل از نرم افزار گمز استفاده شد.

نتایج حاصل از حل بهینه پارتو نشان داد که بهبود تابع هدف زیست‌محیطی موجب افزایش هزینه‌های سیستم و کاهش تابع هدف مسئولیت اجتماعی می‌شود که نشان از عملکرد مناسب مدل ارایه شده دارد. در برخی از شرایط مدیران ممکن است براساس قضاوت‌های ذهنی به تعیین اهداف مختلف بپردازند، لذا به مدیران یادآوری می‌گردد که از قضاوت‌های ذهنی دوری کنند و از رویکردهای کمی برای تصمیم‌گیری منطقی استفاده نمایند. آنان می‌توانند بر طبق نتایج تحلیل‌های صورت گرفته بر توابع هدف، متناسب با دستورالعمل‌ها و خط‌مشی‌های سازمان خود، بهترین تصمیمات را اخذ نمایند. با بررسی‌های انجام شده این نتیجه نیز حاصل شد که با افزایش تقاضا به دنبال افزایش تعداد تسهیلات احداث شده و همچنین افزایش تولید و حمل و نقل، میزان هزینه‌ها و آلودگی ایجاد شده در سیستم افزایش می‌یابد، بنابراین مدیران باید ضمن توجه ویژه به تغییرات تقاضا، استراتژی‌هایی به منظور کنترل هزینه‌ها و کاهش سطح آلودگی سیستم، توسعه دهند.

به عبارتی در نظر گرفتن عدم اطمینان در مورد تقاضای موجود تاثیر زیادی بر توابع هدف دارد و نادیده گرفتن آن منجر به تخمین نادرست این توابع می‌شود، زمانی که تصمیم بر آورده‌سازی تقاضا تحت عدم اطمینان باشد هزینه‌های زنجیره‌تامین نیز افزایش می‌یابد، راه حل ارایه شده، پیشنهاد می‌کند که به منظور جبران هزینه‌ها، تعداد مراکز جمع‌آوری و بازیافت که به صورت بالقوه در نظر گرفته شده، بیشتر گردد.



شکل ۱۴- تغییرات تابع هدف سوم بر اثر تغییر پارامتر حداکثر تعداد مجاز برای ساخت مراکز بازیافت

جدول ۱۰- تعداد مراکز جمع‌آوری و بازیافت احداث شده با تغییر حداکثر تعداد مجاز برای ساخت مراکز بازیافت را نشان می‌دهد. مشابه جدول قبل با کاهش تعداد مجاز برای ساخت مراکز بازیافت، تعداد مراکز جمع‌آوری احداث شده، برای کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، افزایش می‌یابد.

جدول ۱۰- تعداد مراکز جمع‌آوری و بازیافت متناسب با حداکثر تعداد مجاز برای ساخت مراکز بازیافت

مراکز بازیافت احداث شده	مراکز جمع‌آوری احداث شده	حداکثر تعداد مجاز برای ساخت مراکز بازیافت
۱,۲,۳,۴,۶	۱,۲,۴,۴,۷	۷
۱,۲,۳,۴,۶	۱,۲,۴,۶,۷	۶
۱,۲,۳,۴,۶	۱,۲,۴,۶,۷	۵
۱,۲,۳,۴	۱,۲,۴,۵,۶,۷	۴
۲,۳,۳	۱,۲,۳,۴,۵,۶,۷	۳

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

توجه به ارزش قابل بازیابی محصولات در سال‌های اخیر مبحث طراحی زنجیره‌تامین چرخشی را بیش از پیش با اهمیت نموده است. زنجیره‌تامین چرخشی به دنبال حفظ محصولات، اجزا و مواد در بالاترین سطح مطلوبیت از نظر زیست‌محیطی و فنی در همه دوره‌ها می‌باشد. علاوه بر دستیابی به ضایعات صفر و نگرانی‌های ناشی از انتشار CO₂، اهمیت بازیابی محصولات زمانی برجسته تر می‌گردد که کمبود مواد اولیه و عدم اطمینان

فرآیند جمع‌آوری، بازیافت، ملاحظات زیست‌محیطی و در عین حال کاهش هزینه‌ها به بهبود مسئولیت اجتماعی جهت پیاده‌سازی شبکه زنجیره تامین مدور گام بردارند. با توجه به اینکه مدل ارایه شده با استفاده از داده‌های یک نمونه موردی در صنعت ام دی اف هم مورد ارزیابی قرار گرفت، اما این مدل بدون محدودیت نیست و فرصتهایی به منظور در نظر گرفتن سایر تصمیمات وجود دارد. ارزیابی تامین کنندگان با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری و سیاست‌های تخفیف در خرید از جمله مفروضاتی است که می‌تواند جهت توسعه مدل به آن اضافه گردد. با افزایش ابعاد مدل (مانند افزایش تعداد مکان‌های بالقوه مراکز جمع‌آوری و بازیافت، نقاط تقاضا، دوره‌های زمانی و...) زمان حل به صورت نمایی افزایش می‌یابد و به کارگیری رویکردهای فراابتکاری به منظور حل مدل برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌گردد.

همچنین نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که با افزایش میزان محصولات برگشتی به دنبال افزایش تعداد تسهیلات افتتاح شده، میزان تابع هدف اجتماعی بهبود اما هزینه‌ها و آلودگی زیست‌محیطی افزایش می‌یابد، از این رو ممکن است تمایل مدیران به این موضوع زیاد نباشد، لذا به مدیران صنعت فوق پیشنهاد می‌گردد که توجه به تعداد بهینه مراکز جمع‌آوری و بازیافت به منظور افزایش محصولات برگشتی می‌تواند تعادل مناسب بین اهداف پایداری را فراهم نماید و ضمن صرفه جویی در هزینه‌ها و کاهش آلودگی زیست‌محیطی، فرصت‌های شغلی را افزایش دهند و بدین ترتیب در جهت دستیابی به اهداف اقتصاد چرخشی و کسب مزیت رقابتی پیش روند. از منظر سازمانی رویکرد مدل‌سازی تحقیق حاضر به مدیران صنایع دیگر از جمله کاغذ و نئوپان که بازیافت در آنها از اولویت بالاتری برخوردار است، کمک می‌کند که با در نظر گرفتن

مراجع

- [1] A.A. Taleizadeh, F. Haghghi, and S.T Akhavan Niaki, "Modeling and solving a sustainable closed loop supply chain problem with pricing decisions and discounts on returned products", *Journal of cleaner production*, Vol. 207, Jul 2019, pp.163-181.
- [2] A.Waqas, and B. Sarkar, "Impact of carbon emissions in a sustainable supply chain management for a second generation biofuel", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 186, Jun 2018, pp. 807-820.
- [3] B.T. Hazen, D.A. Mollenkopf, and Y. Wang, "Remanufacturing for the circular economy: An examination of consumer switching behavior", *Business Strategy and the Environment*, Vol. 26, No. 4, May 2017, pp. 451-464.
- [4] A. Genovese, A. A. Acquaye, A. Figueroa, and S.C. Lenny Koh, "Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications", *Omega*, Vol. 66, Jan 2017, pp. 344-357.
- [5] Y. Miying, P. Smart, M. Kumar, M. Jolly, and S. Evans, "Product-service systems business models for circular supply chains", *Production Planning & Control*, Vol. 29, No. 6, Apr 2018. pp. 498-508.
- [6] A.H. Salehi-Amiri, A. Zahedi, N. Akbapour, and M. Hajiaghahi-Keshteli, "Designing a sustainable closed-loop supply chain network for walnut industry", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 141, May 2021, pp. 110821.
- [7] M. Hasanaj, and A.Jansson, "Supply Chain Management—A Way to Achieve Circular Economy", PhD diss., Chalmers University of Technology, 2018.
- [8] M. Theofilos D., A. Nizamis, S. Terzi, D. Gkortzis, A. Papadopoulos, N. Tsagkalidis, D. Ioannidis, K. Votis, and D. Tzovaras, "Introducing an application of an industry 4.0 solution for circular supply chain management", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 300, Jun 2021, pp. 126886.
- [9] M. Lieder, and A. Rashid, "Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry", *Journal of cleaner production*, Vol. 115, Mar 2016, pp. 36-51.
- [10] M. Farooque, A. Zhang, M. Thürer, T. Qu, and D. Huisingh, "Circular supply chain management: A definition and structured literature review", *Journal of cleaner production*, Vol. 228, Aug 2019, pp. 882-900.
- [11] A. Abdi, A. Abdi, A.M. Fathollahi-Fard, and M. Hajiaghahi-Keshteli, "A set of calibrated metaheuristics to address a closed-loop supply chain network design problem under uncertainty", *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, Vol. 8, No. 1, Jan 2021, pp. 23-40.
- [12] H.F. Wang, and H.Hsin-Wei, "A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm", *Computers & operations research*, Vol. 37, No. 2, Feb 2010, pp. 376-389.

- [13] M. Al-Salem, A. Diabat, D. Dalalah, and M. Alrefaei, "A closed-loop supply chain management problem: Reformulation and piecewise linearization", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 40, Jul 2016, pp. 1-8.
- [14] A.M. Fathollahi-Fard, M. Hajiaghaei-Keshteli, and S.A. Mirjalili, "Multi-objective stochastic closed-loop supply chain network design with social considerations", *Applied Soft Computing*, Vol. 71, Oct 2018, pp. 505-525.
- [۱۵] مهسا محمدی و حامد سلیمانی، "بررسی زنجیره تأمین حلقه باز و حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت (مورد مطالعه: شرکت ایران ترانسفو)"، چشم انداز مدیریت صنعتی، دوره ۱۰، شماره ۳۸، تابستان ۱۳۹۹، صفحه ۳۳-۵۳.
- [16] H. Moheb-Alizadeh, R. Handfield, and D. Warsing, "Efficient and sustainable closed-loop supply chain network design: A two-stage stochastic formulation with a hybrid solution methodology", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 308, Jul 2021, pp. 127323.
- [17] J. Jouzdani, and K. Govindan, "On the sustainable perishable food supply chain network design: A dairy products case to achieve sustainable development goals", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 278, Jan 2021, pp. 123060.
- [18] P. Santander, F.A. Cruz Sanchez, H. Boudaoud, and M. Camargo, "Closed loop supply chain network for local and distributed plastic recycling for 3D printing: a MILP-based optimization approach", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 154, Mar 2020, pp. 104-531.
- [19] L. Yi, M. Kaviyani-Charati, M. Hajiaghaei-Keshteli, and A. Diabat, "Designing a closed-loop supply chain network for citrus fruits crates considering environmental and economic issues", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 55, 2020, pp. 199-220.
- [20] Z. Mohtashami, A. Aghsami, and F. Jolai, "A green closed loop supply chain design using queuing system for reducing environmental impact and energy consumption", *Journal of cleaner production*, Vol. 242, Apr 2020, pp. 1-19.
- [21] N. Xu, and L. Nozick, "Modeling supplier selection and the use of option contracts for global supply chain design", *Computers & Operations Research*, Vol. 36, No. 10, Oct 2009, pp. 2786-2800.
- [22] B. Khorshidvand, H. Soleimani, S. Sibdari, and M.M. Seyyed Esfahani, "A hybrid modeling approach for green and sustainable closed-loop supply chain considering price, advertisement and uncertain demands", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 157, Jul 2021, pp. 107-126.
- [23] M.S. Atabaki, M. Mohammadi, and B. Naderi, "New robust optimization models for closed-loop supply chain of durable products: Towards a circular economy", *Computers & industrial engineering*, Vol. 146, Aug 2020, pp. 106-120.
- [24] S. Nayeri, M.M. Paydar, E. Asadi-Gangraj, and S. Emami, "Multi-objective fuzzy robust optimization approach to sustainable closed-loop supply chain network design", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 148, Oct 2020, pp. 106-116.
- [25] E. Mardan, K. Govindan, H. Mina, and S.M. Gholami-Zanjani, "An accelerated benders decomposition algorithm for a bi-objective green closed loop supply chain network design problem", *Journal of Cleaner Production*. 235, Oct 2019, pp. 1499-1514.
- [26] N. Zarebakhshnia, H. Soleimani, M. Goh, and S.S. Razavi, "A novel multi-objective model for green forward and reverse logistics network design", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 208, Jan 2019, pp. 1304-1316.
- [27] J. D. Darbari, D. Kannan, V. Agarwal, and P. C. Jha, "Fuzzy criteria programming approach for optimising the TBL performance of closed loop supply chain network design problem." *Annals of operations research*, Vol. 273, Feb 2019, pp. 693-738.
- [28] Z. Lu, L. Huang, and W. Wang, "Green and sustainable closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 227, Aug 2019, pp. 1195-1209.
- [29] Y. Saif, M. Rizwan, A. Almansoori, and A. Elkamel, "A circular economy solid waste supply chain management-based approach under uncertainty", *Energy Procedia*, Vol. 142, Dec 2017, pp. 2971-2976.
- [۳۰] مهسا زارعی، مهدی نصراللهی و امیر یوسفلی، "توسعه شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته در فضای غیرقطعی"، مدل سازی در مهندسی، دوره بیستم، شماره ۶۸، بهار ۱۴۰۱، صفحه ۱۶۵-۱۸۷.

[۳۱] حامد فلاح، حمیدرضا اسکندری، سید حسام‌الدین ذگردی و سیدکمال چهارسوقی، "ارائه مدل دوسطحی طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت و رقابت بین زنجیره‌های: حل با رویکرد تجزیه بندرز"، مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۲۰۱-۲۱۵.

[۳۲] محمدرضا فضلی خلف، سید کمال چهارسوقی و میر سامان پیشوایی، "طراحی پایای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت: مطالعه موردی یک تولیدکننده باتری اسیدی"، مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۹، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۴۵-۶۰.

[33] M. Taleai, B. Moghaddam, M.S. Pishvae, A. Bozorgi-Amiri, and S. Gholamnejad, "A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry", *Journal of cleaner production*, Vol. 113, Feb 2016, pp. 662-673.

[34] S.C. Tseng, and S.W. Hung, "A strategic decision-making model considering the social costs of carbon dioxide emissions for sustainable supply chain management", *Journal of environmental management*, Vol. 133, Jan 2014, 315-322.

[35] J.M. Mulvey, R.J. Vanderbei, and S.A. Zenios, "Robust optimization of large-scale systems", *Operations research*, Vol. 43, No. 2, Apr 1995, pp. 264-281

[36] G. Mavrotas, "Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems", *Applied mathematics and computation*, Vol. 213, No. 2, Jul 2009, pp. 455-465.