



**Original Article**

## **Designing a Sustainable Closed-Loop Supply Chain Considering Carbon Tax and Technology Selection in the Battery Industry**

Mojtaba Farrokh\* 

### **Abstract**

Over the past decade, growing environmental concerns and social legislations have forced decision makers to design their supply chains with regard to the environmental impacts, responsiveness, and economic benefits. In this research, a mixed integer linear programming (MILP) model is developed to optimize the objectives of cost, environmental impacts and responsiveness in order to determine appropriate policies about the decisions of carbon tax, technology selection, location, capacity of facilities. In this model, there are simultaneously two types of disruption and operational risk for some parameters such as demand and costs, which is named hybrid uncertainty. To cope with this type of uncertainty, a possibilistic stochastic programming approach using concepts of credibility constraint programming is proposed to design a closed-loop supply chain. A high-performance flexible programming approach is applied to solve the multi-objective model. Results show that the appropriate rate of carbon tax is around 20000 Rial per kilogram of carbon. The results indicate that in order to optimize the level of responsiveness and reduce the environmental impacts and costs, it is better to use the green technologies in the plants and recycling centers and to establish the plant and distribution centers near the customer zones.

**Keywords:** Closed Loop Supply Chain; Carbon Tax; Green Technology; Possibilistic Stochastic Programming; Responsiveness.

**How to Cite:** Farrokh, Mojtaba (2023). Designing a Sustainable Closed-Loop Supply Chain Considering Carbon Tax and Technology Selection in the Battery Industry, *Ind. Manag. Persp.*, 13(4), 46-84 (*In Persian*).

Received: Jul. 02, 2023; Revised: Aug. 31, 2023; Accepted: Sep. 06, 2023; Published Online: Oct. 04, 2023.


\* Assistant Professor, Department of Operations Management and Information Technology, Faculty of Management, Kharazmi University, Tehran, Iran.  
Corresponding author. Email: [farrokh@khu.ac.ir](mailto:farrokh@khu.ac.ir)



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



## طراحی مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته پایدار با بررسی مالیات کربن و انتخاب فناوری در صنعت باتری

مجتبی فرخ\* 

### چکیده

طی یک دهه گذشته نگرانی‌های زیست‌محیطی و انتظارات اجتماعی، تصمیم‌گیرندگان را مجبور کرده است تا زنجیره‌های تأمین خود را با در نظر گرفتن اثرات زیست‌محیطی و پاسخگویی و همچنین اهداف اقتصادی طراحی کنند. در پژوهش حاضر، یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط با بهینه‌سازی اهداف هزینه، تأثیرات زیست‌محیطی و پاسخگویی توسعه داده شده است تا در خصوص تصمیمات نرخ مالیات کربن، انتخاب نوع فناوری، مکان‌یابی و ظرفیت تسهیلات سیاست مناسبی اتخاذ شود. در این مدل هم‌زمان دو منبع ریسک اختلال و عملیاتی برای برخی پارامترها مثل تقاضا و هزینه‌ها وجود دارد که «عدم قطعیت ترکیبی» نامیده می‌شود. برای کنترل این نوع عدم قطعیت، یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی امکانی با استفاده از مفاهیم برنامه‌ریزی با محدودیت‌های اعتبار برای طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته پیشنهاد می‌شود. برای حل مدل چندهدفه از یک رویکرد برنامه‌ریزی فازی با کارایی بالا استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نرخ مالیات کربن در حدود ۲۰۰۰ تومان به‌ازای هر کیلوگرم کربن عدد مناسبی است؛ همچنین برای بهبود سطح پاسخگویی، کاهش تأثیرات زیست‌محیطی و کاهش هزینه‌ها بهتر است از فناوری‌های سبز در مراکز تولید و بازیافت استفاده شود.

**کلیدواژه‌های:** برنامه‌ریزی تصادفی امکانی؛ پاسخگویی؛ فناوری سبز؛ زنجیره تأمین حلقه‌بسته؛ نرخ مالیات کربن.

**استناددهی:** فرخ، مجتبی (۱۴۰۲). طراحی مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته پایدار با بررسی مالیات کربن و انتخاب فناوری در صنعت باتری. *چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، ۱۳(۴)، ۴۶-۸۴.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۵، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۱۲.

\* استادیار، گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

نویسنده مسئول Email: [farrokh@khu.ac.ir](mailto:farrokh@khu.ac.ir)



## ۱. مقدمه

با توجه به افزایش فشارهای قانونی و نگرانی‌های فزاینده زیست‌محیطی، اخیراً زنجیره تأمین حلقه‌بسته<sup>۱</sup> با توجه به اهمیت روبه‌رشد منافع اقتصادی و تأثیرات محیطی بازبافت محصولات اسقاطی موردتوجه بیشتر صنایع قرار گرفته است [۲۴، ۲۱، ۱۴]. طی چند سال گذشته نه تنها دولت‌ها و سازمان‌ها، بلکه آگاهی مشتریان نسبت به محصولات و خدمات دوستدار محیط‌زیست نیز افزایش یافته است [۲۵، ۱۲]. این امر به افزایش تقاضا برای محصولات دوستدار محیط‌زیست و قابل‌بازبافت و در نتیجه توجه به زنجیره تأمین حلقه‌بسته منجر شده است. نگرانی فزاینده در مورد مسائل زیست‌محیطی باعث تأکید بر تلاش برای کاهش ردپای کربن محصولات و خدمات شده است. این امر صنایع را وادار کرده است تا راه‌هایی را برای کاهش انتشار کربن در تمامی عملیات‌های خود بررسی کنند [۴]. دولت‌های تقریباً همه کشورها روی انواع مختلف سیاست‌های کربن کار می‌کنند. پنج سیاست اصلی که در مقیاس بزرگ در حال اجرا هستند عبارت‌اند از: ۱. سقف کربن<sup>۲</sup>؛ ۲. مالیات بر کربن<sup>۳</sup>؛ ۳. سقف کربن و تجارت<sup>۴</sup>؛ ۴. یارانه کربن<sup>۵</sup>؛ ۵. جبران کربن<sup>۶</sup> [۱۱]. طبق تعریف «بانک جهانی» از قیمت‌گذاری کربن، سیاست کربن دو نوع اصلی دارد که شامل سیستم‌های تجارت کربن و مالیات کربن است. در سیستم اول که به آن «سیستم تجارت و سقف کربن» نیز می‌گویند، یک حد بالایی (سقف) برای کل انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط صنایع تعیین می‌کنند؛ سپس به صنایع با آلاینده‌گی کم اجازه داده می‌شود تا سهمیه کربن باقیمانده خود را به صنایع با آلاینده‌گی بالاتر بفروشند؛ درحالی‌که در سیاست مالیات کربن یک نرخ مالیات بر انتشار گازهای گلخانه‌ای صنایع برای دریافت مستقیم هزینه‌های کربن وضع می‌شود. در این پژوهش، سیاست مالیات کربن در نظر گرفته شده و سعی شده است بهترین ساختار مالیات کربن برای شرکت‌های باتری‌سازی تبیین شود.

امروزه بسیاری از پژوهشگران معتقدند با توجه به ریسک‌های متعدد موجود در زنجیره تأمین، باید مدیریت ریسک را نیز در طراحی سیستم‌های زنجیره تأمین مدل‌سازی کرد [۲۶]. تانگ<sup>۷</sup> (۲۰۰۶)، ریسک را به دو دسته شامل ریسک عملیاتی و ریسک اختلال تقسیم‌بندی کرد [۳۳]. در محیط‌های کسب‌وکار شرایطی به‌وجود می‌آید که باید با یک وضعیت نامطمئن پیچیده برخورد کرد [۶]. در چنین شرایطی عمدتاً عدم قطعیت اختلال و عملیاتی به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهند که «عدم قطعیت ترکیبی»<sup>۸</sup> نامیده می‌شود. برای درک نقش عدم قطعیت ترکیبی در فرمول‌بندی

1. Closed-loop supply chain (CLSC)
2. Carbon Cap
3. Carbon Tax
4. Carbon Cap and Trade
5. Carbon Subsidy
6. Carbon offset
7. Tang
8. Hybrid uncertainty

مدل، یک مسئله مورد بحث قرار می‌گیرد. در کشورهای گرمسیری مانند ایران، تقاضا برای باتری فصلی در نظر گرفته می‌شود. بازار باتری طی فصل‌های سرد سال با کاهش تقاضا مواجه می‌شود و با ورود به ماه‌های گرم سال این بازار مجدد رونق می‌گیرد؛ همچنین نوسانات بالا در تیراژ تولید خودرو در کشور ایران طی چند سال گذشته، تقاضا برای باتری را دست‌خوش تغییر کرده است. برای چنین محصولات پرنوسانی تقاضا را می‌توان تحت سناریوهای مختلف مدل‌سازی کرد؛ همچنین به دلیل عدم قطعیت عملیاتی در هر دوره، نمی‌توان تقاضا تحت هر سناریویی را یک مقدار قطعی فرض کرد. برای این منظور تحت هر سناریو، مقدار تقاضا را می‌توان با استفاده از متغیر فازی تخمین زد. در چنین مواقعی، عدم قطعیت اختلال و عملیاتی به‌طور هم‌زمان اتفاق می‌افتند که «عدم قطعیت ترکیبی» نامیده می‌شود [۵]. روش‌های مختلفی برای کاهش، مدل‌سازی، کمی‌سازی و حل مسائل تحت عدم قطعیت وجود دارد که مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی<sup>۱</sup>، نظریه مجموعه فازی<sup>۲</sup> و بهینه‌سازی استوار<sup>۳</sup> از جمله این روش‌ها هستند. در پژوهش حاضر، مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته برای یک شرکت باتری‌سازی توسعه داده شده است؛ به‌طوری‌که برخی پارامترهای مسئله از جمله تقاضا، هم‌زمان دارای عدم قطعیت اختلال و عملیاتی هستند؛ از این رو پارامترها با عدم قطعیت ترکیبی برای فرمول‌بندی مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است. برای این منظور، یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح مختلط<sup>۴</sup> برای طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته توسعه و با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی امکانی حل خواهد شد. با توجه به تمامی این چالش‌ها، این پژوهش سعی دارد به سؤال‌های پژوهشی زیر پاسخ دهد:

۱. چگونه می‌توان یک مدل چندهدفه برای یک مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته فرموله کرد تا هزینه‌ها و ردپای کربن به حداقل و سطح پاسخگویی به حداکثر برسد؟

۲. مالیات کربن چه تأثیری بر مدل ریاضی مسئله فرموله‌شده دارد؛ به‌طوری‌که تصمیم‌گیرنده یا سیاست‌گذاران می‌توانند درباره مالیات کربن بهینه تصمیم بگیرند؟

۳. طرح مصالحه‌ای برای مسئله چندهدفه پژوهش حاضر چگونه باید باشد؟

در پژوهش حاضر یک مدل بهینه‌سازی زنجیره تأمین حلقه‌بسته برای به حداقل رساندن هزینه‌ها و انتشار کل کربن با گنجاندن مفهوم مالیات کربن ارائه می‌شود. مدل پیشنهادی سه تابع هدف متضاد را در نظر می‌گیرد که شامل به حداقل رساندن کل هزینه‌های زنجیره تأمین حلقه‌بسته، کاهش انتشار کربن در طول فرآیند زنجیره تأمین و حداکثرسازی سطح خدمت و پاسخگویی است. پارامترهای تقاضای باتری به صورت اعداد مبتنی بر سناریوهای فازی در نظر گرفته می‌شوند. برای مقابله با عدم قطعیت ترکیبی، تکنیک معرفی‌شده توسط فرخ و همکاران

---

1. Stochastic programming models  
 2. Fuzzy set theory  
 3. Robust Optimization  
 4. Mixed Integer Linear Programming (MILP)

(۲۰۱۸)، اتخاذ شده است [۵]. برای حل مسئله چندهدفه از تکنیک برنامه‌ریزی فازی استفاده می‌شود؛ سپس سیاست مصالحه‌ای عملیات زنجیره تأمین تجزیه و تحلیل می‌شود و مالیات کربن مناسب برای مسئله تعریف شده با استفاده از تجزیه و تحلیل حساسیت به دست می‌آید. مطالعه موردی «سپاهان باتری» نیز برای نشان دادن کارایی و کاربرد مدل پیشنهادی بررسی می‌شود. تجزیه و تحلیل حساسیت بر روی داده‌ها برای درک اثر نرخ‌های مختلف مالیات کربن بر هزینه کلی زنجیره تأمین صورت می‌گیرد.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

**زنجیره تأمین حلقه‌بسته.** در این قسمت مبانی نظری مرتبط با طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته مورد توجه قرار می‌گیرد. طی یک دهه گذشته، پژوهشگران بسیاری به طراحی زنجیره‌های تأمین حلقه‌بسته پرداخته‌اند [۳۶، ۲۲، ۴]. میراخورلی<sup>۱</sup> (۲۰۱۴)، برای مسئله مدل‌سازی شبکه لجستیک حلقه‌بسته از یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه فازی بهره گرفت و برای حل آن از الگوریتم ژنتیک استفاده کرد [۱۹]. سوبولان و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۵)، یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی فازی برای مسئله برنامه‌ریزی استراتژیک یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته باتری‌های سربی اسیدی پیشنهاد کردند. مدل آن‌ها دارای اهداف حداقل‌سازی هزینه‌ها، حداکثرسازی پوشش باتری‌های مستعمل و حداکثرسازی انعطاف‌پذیری ظرفیت بود [۲۷]. صاحب‌جام‌نیا و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۸)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح مختلط چندهدفه را برای طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته پایدار تایر توسعه دادند. مدل پیشنهادی با هدف بهینه‌سازی هزینه کل، اثرات زیست‌محیطی ایجاد تأسیسات، پردازش تایر و حمل‌ونقل و همچنین اثرات اجتماعی از جمله فرصت‌های شغلی و آسیب‌های کار توسعه داده شد [۲۹]. صالحی امیری و همکاران (۲۰۲۱)، یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته پایدار برای صنعت گردو به کمک یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط طراحی کردند. زنجیره طراحی شده، جریان روبه‌جلو و معکوس را نه تنها برای پاسخگویی به تقاضای بازارهای مختلف، بلکه برای آماده‌سازی محصولات برگشتی برای استفاده مجدد در نظر می‌گرفت [۲۸].

گلیپرا و جوانمردان (۲۰۲۲)، طرح‌های انتشار کربن مانند سقف کربن، سقف و تجارت کربن و مالیات کربن را در مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته پایدار بررسی کردند. آن‌ها از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط استوار برای مقابله با عدم قطعیت تقاضا استفاده کردند [۷]. یو و خان<sup>۴</sup> (۲۰۲۲)، یک زنجیره تأمین سه‌سطحی متشکل از کارخانه‌ها، مراکز توزیع و

1. Mirakhorli

2. Subulan, et al.

3. Sahebjamnia, et al.

4. Yu & Khan

خرده‌فروشان ایجاد کردند و موقعیت مراکز توزیع در زنجیره تأمین و انتشار کربن در طول پردازش و حمل‌ونقل مورد مطالعه را با هدف به‌حداقل‌رساندن هزینه زنجیره تأمین و انتشار کربن در یک محیط تصادفی و فازی بررسی کردند [۳۵]. گائو و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۸)، مسئله تراکم بهینه انبارهای خرده‌فروشی و تحویل محصول را در یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته با و بدون سیاست سقف کربن مورد مطالعه قرار دادند [۸]. حدادسی سخت و رایان<sup>۲</sup> (۲۰۱۸)، مالیات کربن نادقیق را در مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که تعدیل جریان محصول با نرخ مالیات کربن سود ناچیزی به همراه دارد؛ اما توانایی تعدیل ظرفیت‌های حالت حمل‌ونقل می‌تواند جایگزین ایجاد تسهیلات اضافی به‌عنوان راهی برای پاسخ به عدم قطعیت مالیات کربن شود [۱۰]. وانگ و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۲۰)، یک مسئله موجودی - مکان‌یابی سبز را برای یک زنجیره تأمین تحت طرح تجارت کربن بررسی کردند که در آن قیمت کربن نادقیق است. پژوهش آن‌ها نشان داد که دولت‌ها در بازارهای نوظهور باید قیمت کربن معقول و پایدار را حفظ کنند [۳۴]. ردی و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۲۰)، در مسئله طراحی شبکه لجستیک معکوس با بررسی تأثیرات سیاست مالیات کربن به تعیین مکان تأسیسات و انتخاب نوع وسیله نقلیه پرداختند [۲۳]. دی و گری<sup>۵</sup> (۲۰۲۰)، مسئله زمان‌بندی و مسیریابی در زنجیره تأمین حلقه‌بسته تحت سیاست‌های سقف کربن، مالیات کربن و سقف کربن و تجارت را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مالیات کربن بالاتر لزوماً به مزایای محیطی بهتر منجر نمی‌شود [۲]. تائو و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۲۰)، مسئله برنامه‌ریزی و عملیات زنجیره تأمین حلقه‌بسته پایدار را تحت عدم قطعیت تقاضا با توجه ویژه به پیکربندی شبکه خرده‌فروشی مطالعه کردند. این مسئله با هدف ارزیابی تأثیر سیاست‌های کربن مختلف بر تصمیم‌گیری‌های برنامه‌ریزی و عملیات زنجیره تأمین حلقه‌بسته به صورت یک برنامه تصادفی دو مرحله‌ای توسعه داده شد [۳۱]. شن و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۲۱)، تأثیر پذیرش فناوری پاک و مالیات‌های زیست‌محیطی را بر زنجیره‌های تأمین منسوجات و پوشاک ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که افزایش نرخ مالیات زیست‌محیطی تولیدکننده را به سرمایه‌گذاری در فناوری‌های سبز تشویق می‌کند [۳۰]. در این پژوهش، مدل طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته برخلاف پژوهش‌های دیگر هم‌زمان دارای اهداف هزینه، زیست‌محیطی و پاسخگویی است که در سایر پژوهش‌ها به آن پرداخته نشده است. در تابع هدف پاسخگویی مدل پیشنهادی، ضمن حداکثر کردن تأمین تقاضای مشتریان، مسافت بین مراکز

- 
1. Gao, et al.
  2. Haddadsisakht & Ryan
  3. Wang, et al.
  4. Reddy, et al.
  5. De & Giri
  6. Tao, et al.
  7. Shen, et al.

تولید و مراکز توزیع با مناطق مشتری نیز حداقل می‌شود تا تولیدکنندگان بتوانند برای پاسخگویی بهتر به بازار نزدیک‌تر شوند.

**مدل‌سازی ریسک‌های اختلال و عملیاتی.** گلپیرا و جوانمردان (۲۰۲۲)، یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته پایدار با بررسی چند طرح انتشار کربن مانند تجارت ظرفیت کربن و مالیات کربن توسعه دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که عملکرد مدل تحت تأثیر ریسک‌گریزی تصمیم‌گیرنده و نوع طرح کربن قرار دارد. باین‌حال، در این پژوهش تأثیر مالیات کربن بر انتخاب نوع فناوری بازیافت بررسی نشد و تنها تأثیر طرح‌های مختلف کربن بر روی نوع فناوری تولید مورد مطالعه قرار گرفت [۷]. یو و خان (۲۰۲۲)، در یک زنجیره تأمین سه‌سطحی، مکان‌یابی مراکز توزیع و انتشار کربن همراه تولید و حمل‌ونقل را با هدف حداقل‌سازی هزینه و انتشار کربن مورد مطالعه قرار دادند [۳۵]. در این پژوهش از تئوری برنامه‌ریزی تصادفی و برنامه‌ریزی فازی برای کنترل پارامترهای تصادفی و فازی استفاده شد؛ همچنین برای کنترل استواری مدل از تابع واریانس و تابع ریسک بهره‌گیری شد. در پژوهش حاضر تقاضای مشتریان فرض می‌شود هم‌زمان دارای عدم قطعیت ترکیبی است. در این نوع عدم قطعیت، تقاضای مشتریان به دلیل اختلالات عمده مثل بلایای طبیعی یا بحران‌های اقتصادی می‌تواند تحت سناریوهای مختلف (برای مثال سناریوهای خوش‌بینانه، بدبینانه و متوسط) مقادیر متفاوتی بگیرد؛ درحالی‌که تقاضا تحت هر سناریو نیز به دلیل وجود ریسک‌های عملیاتی می‌تواند دچار انحرافات محدودی شود. برخی از پژوهشگران در مسئله طراحی زنجیره تأمین، برخی پارامترها مثل تقاضا، عرضه و هزینه را به صورت سناریوهای مختلف در نظر گرفته‌اند و تحت هر سناریو مقدار پارامترها را به صورت نادقیق بررسی کرده‌اند [۱۸، ۱۳، ۹، ۵]. در این پژوهش برای کنترل عدم قطعیت ترکیبی از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی امکانی استفاده می‌شود. جدول ۱، مبانی نظری پژوهش در حوزه طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته را با تأکید بر تدوین سیاست کربن تحت عدم قطعیت نشان می‌دهد.





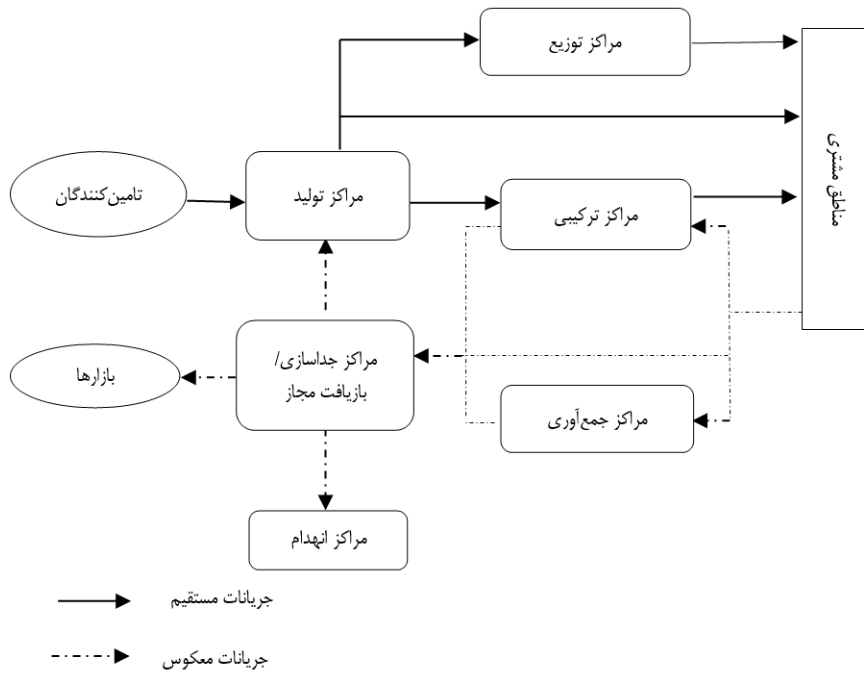
در پژوهش‌های بالا، سیاست‌های مختلف کربن با نادیده‌گرفتن نوع فناوری و سطح پاسخگویی زنجیره تأمین بررسی شده است. سیاست کربن همراه با سطح بهینه پاسخگویی در مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته بررسی نشده است. با توجه به روابط نامشخص بین اهداف محیطی و سطح پاسخگویی، مشخص نیست که آیا با کاهش سطح کربن منتشرشده، سطح پاسخگویی به مشتریان وضعیت بهتری پیدا می‌کند یا خیر؟ علاوه بر این، تأثیرات مشترک نرخ مالیات کربن و عدم قطعیت ترکیبی بر عملکرد یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته پایدار نیز تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است؛ درحالی‌که نرخ مناسب مالیات کربن در اتخاذ چنین تصمیمات استراتژیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و نباید نادیده گرفته شود [۷]. در پژوهش‌های مورد بررسی، تأثیر مالیات کربن بر روی انتخاب نوع فناوری تولید و بازیافت بررسی نشده است؛ در واقع عدم تعیین نرخ مالیات مؤثر برای تشویق تولیدکنندگان به انتخاب فناوری‌های سبز برای تولید و بازیافت از شکاف‌های اصلی است که شناسایی شد. پژوهش حاضر برای پرکردن این شکاف‌های پژوهشی انجام شده است تا مشخص شود که آیا نرخ مالیات کربن بر عملکرد زنجیره تأمین حلقه‌بسته و نوع فناوری مورد استفاده تأثیر می‌گذارد یا خیر؟ بر اساس دانش پژوهشگران، هیچ پژوهشی برای ادغام همه این ویژگی‌ها در یک مدل بهینه‌سازی جامع جدید وجود ندارد. برای پرکردن این شکاف پژوهشی، با توجه به ابعاد اقتصادی، محیطی و اجتماعی، یک مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته از طریق یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مبتنی بر عدم قطعیت ترکیبی فرموله می‌شود. تابع هزینه از جمله هزینه‌های استقرار مراکز تولید و بازیافت با فناوری سبز/ غیرسبز، با توجه به برخی محدودیت‌های منطقی به حداقل می‌رسد و سیاست‌های مالیات کربن در مدل گنجانده شده است. در مدل پیشنهادی تقاضا نامشخص در نظر گرفته شده و رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی فازی برای مقابله با عدم قطعیت ترکیبی استفاده می‌شود. این نخستین باری است که تعیین بهترین نرخ مالیات کربن، انتخاب نوع فناوری تولید و بازیافت و سطح مناسب پاسخگویی تحت عدم قطعیت ترکیبی در مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

**تشریح مسئله و مدل‌سازی ریاضی.** شرکت مورد بررسی در این پژوهش، «باتری‌سازی سپاهان» است. در زنجیره تأمین مستقیم، شرکت‌های تولیدکننده اقدام به خرید مواد خام از تأمین‌کنندگان برای تولید باتری می‌کنند. پس از تولید باتری در کارخانه‌ها، این باتری‌ها به وسیله توزیع‌کنندگان، عمده‌فروشان و خرده‌فروشان به دست مشتریان می‌رسد. بعد از اسقاط باتری، مشتریان باتری را در نقاط جمع‌آوری اولیه تحویل و آن را با یک باتری نو تعویض می‌کنند. در این مراکز پس از بررسی محصولات اسقاطی، آن‌ها برای تعمیرات یا بازیافت جدا می‌شوند. بعد از

بررسی، باتری‌های غیرقابل استفاده منهدم و باتری‌های قابل بازیافت به مراکز جداسازی / بازیافت منتقل می‌شوند. سرب بازیافت‌شده از این باتری‌ها به مراکز تولید باتری منتقل می‌شوند. در زنجیره تأمین حلقه‌بسته باتری که در شکل ۱، نشان داده شده است، در کنار امکان ایجاد مراکز توزیع منطقه‌ای برای توزیع باتری‌های تولیدی و مراکز جمع‌آوری برای دریافت باتری‌های اسقاطی، از مراکز هیبریدی که هم‌زمان قادر به انجام هر دو این وظیفه هستند، نیز می‌توان استفاده کرد. پس از تولید باتری در مراکز باتری‌سازی، باتری‌ها به مراکز توزیع یا تسهیلات هیبریدی منتقل می‌شوند و سپس از طریق خودروسازان، خرده‌فروشان و تعمیرگاه‌های خودرو به دست مصرف‌کنندگان می‌رسند. در زنجیره تأمین معکوس، باتری‌های اسقاطی پس از برگشت از مصرف‌کنندگان نهایی به‌وسیله مراکز جمع‌آوری و تسهیلات هیبریدی جمع‌آوری شده و سپس به مراکز بازیافت انتقال داده می‌شوند. باتری‌های اسقاطی قبل از اینکه به مراکز بازیافت منتقل شوند، بر اساس یکسری ویژگی‌های کیفی کنترل می‌شوند و سپس باتری‌های غیرقابل بازیافت انهدام و باتری‌های قابل استفاده به تسهیلات بازیافت مجاز منتقل می‌شوند. در نهایت سرب حاصل از بازیافت به مراکز تولید باتری منتقل می‌شود و آن‌ها این سرب را در کنار سرب دسته اول استفاده می‌کنند. مدل ریاضی زنجیره تأمین پژوهش حاضر بر اساس فرضیه‌های زیر فرموله شده است:

- زنجیره تأمین موردبررسی چنددوره‌ای است و امکان کمبود محصول وجود ندارد؛
- مقدار تقاضا و هزینه‌های خرید مواد، تولید، توزیع، جمع‌آوری، بازیافت و حمل‌ونقل به‌صورت متغیرهای مبتنی بر سناریوهای فازی بیان می‌شوند؛
- هزینه ثابت استقرار و ظرفیت تسهیلات غیرقطعی هستند که با توزیع‌های فازی تبیین می‌شوند؛
- به‌دلیل رقابتی بودن بازار، قیمت فروش باتری‌های قراضه از یک دلال به دلال دیگر تفاوت چندانی ندارد.



شکل ۱. زنجیره تأمین حلقه‌بسته

### مجموعه‌ها

- $c \in C$ : ماده اولیه؛
- $p \in P$ : محصول؛
- $i \in I$ : تأمین‌کننده؛
- $j \in J$ : کارخانه؛
- $k \in K$ : مراکز توزیع، جمع‌آوری و ترکیبی؛
- $l \in L$ : مراکز مشتری؛
- $r \in R$ : مراکز جداسازی/بازیافت؛
- $m \in M$ : مراکز انهدام؛
- $g \in G$ : فناوری‌های تولید؛
- $e \in E$ : فناوری‌های بازیافت؛
- $t \in T$ : مجموعه دوره‌های زمانی؛
- $s \in S$ : مجموعه سناریوها؛

## پارامترها

- $\tilde{a}_{lps}^t$ : تقاضای مشتری  $l$  در دوره  $t$  برای محصول  $p$  تحت سناریو  $s$
- $\tilde{f}m_{jg}$ : هزینه ثابت احداث کارخانه  $j$  با فناوری  $g$
- $\tilde{f}d_k$ : هزینه ثابت احداث مرکز توزیع  $k$
- $\tilde{f}c_k$ : هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری  $k$
- $\tilde{f}h_k$ : هزینه ثابت احداث مرکز ترکیبی  $k$
- $\tilde{f}r_{re}$ : هزینه ثابت احداث کارخانه جداسازی/بازیافت  $r$  با فناوری  $e$
- $\tilde{f}p_m$ : هزینه ثابت احداث مرکز انهدام  $m$
- $\tilde{p}c_{ics}^t$ : هزینه خرید یک کیلوگرم ماده اولیه نوع  $c$  در دوره  $t$  از تأمین‌کننده  $i$  تحت سناریو  $s$
- $\tilde{m}c_{jgps}^t$ : هزینه تولید هر واحد محصول  $p$  در دوره  $t$  در کارخانه  $j$  با فناوری  $g$  تحت سناریو  $s$
- $\tilde{d}c_{kps}^t$ : هزینه توزیع هر واحد محصول  $p$  در دوره  $t$  در مرکز توزیع/ترکیبی  $k$  تحت سناریو  $s$
- $\tilde{c}c_{kps}^t$ : هزینه جمع‌آوری هر واحد محصول اسقاطی  $p$  در دوره  $t$  در مرکز جمع‌آوری/ترکیبی  $k$  تحت سناریو  $s$
- $\tilde{o}c_{reps}^t$ : هزینه آماده‌سازی/جداسازی هر واحد محصول اسقاطی  $p$  در دوره  $t$  در کارخانه جداسازی/بازیافت  $r$  با فناوری  $e$  تحت سناریو  $s$
- $\tilde{r}c_{reps}^t$ : هزینه بازیافت یک کیلوگرم ماده خام  $c$  در دوره  $t$  در کارخانه جداسازی/بازیافت  $r$  با فناوری  $e$  تحت سناریو  $s$
- $\tilde{d}isc_{ms}^t$ : هزینه انهدام هر کیلوگرم ضایعات محصولات اسقاطی در دوره  $t$  در مرکز انهدام  $m$  تحت سناریو  $s$
- $\tilde{p}p_{ps}^t$ : قیمت خرید یک واحد محصول اسقاطی  $p$  در دوره  $t$  از فروشندگان باتری قراضه تحت سناریو  $s$
- $\tilde{s}p_{cs}^t$ : قیمت فروش هر کیلوگرم ماده  $c$  در دوره  $t$  در بازار تحت سناریو  $s$
- $\tilde{h}c_{ps}^t$ : هزینه نگهداری هر یک واحد محصول  $p$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$
- $\tilde{t}c_{cs}^t$ : هزینه انتقال هر تن ماده اولیه  $c$  به‌ازای هر کیلومتر در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$
- $\tilde{t}cn_{ps}^t$ : هزینه حمل هر واحد محصول  $p$  در هر کیلومتر در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$
- $\tilde{t}cs_{ps}^t$ : هزینه حمل هر واحد محصول اسقاطی  $p$  در هر کیلومتر در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$
- $\tilde{t}cm_s^t$ : هزینه حمل هر کیلوگرم ضایعات در هر کیلومتر در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$
- $\tilde{d}i_{ij}$ : مسافت بین تأمین‌کننده  $i$  و کارخانه  $j$  (کیلومتر)
- $\tilde{d}i_{jk}$ : مسافت بین کارخانه  $j$  و مرکز توزیع/ترکیبی  $k$
- $\tilde{d}i_{jl}$ : مسافت بین کارخانه  $j$  و مشتری  $l$
- $\tilde{d}i_{kl}$ : مسافت بین توزیع‌کننده/مرکز ترکیبی  $k$  و منطقه مشتری  $l$
- $\tilde{d}i_{kr}$ : مسافت بین مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی  $k$  و مرکز جداسازی/بازیافت  $r$
- $\tilde{d}i_m$ : مسافت بین مرکز جداسازی/بازیافت  $r$  و مرکز انهدام  $m$

$di_{ij}$ : مسافت بین کارخانه جداسازی/بازیافت  $r$  و کارخانه تولید  $j$   
 $c\tilde{a}s_{ic}$ : ظرفیت عرضه‌کننده  $i$  برای ماده  $c$   
 $c\tilde{a}m_{jgp}$ : ظرفیت کارخانه  $j$  با فناوری  $g$  برای تولید محصول  $p$   
 $c\tilde{a}d_{kp}$ : ظرفیت مرکز توزیع  $k$  برای محصول  $p$   
 $c\tilde{a}c_{kp}$ : ظرفیت مرکز جمع‌آوری  $k$  برای محصول  $p$   
 $c\tilde{a}h_{kp}$ : ظرفیت مرکز ترکیبی  $k$  برای محصول اسقاطی  $p$   
 $c\tilde{a}r_{rec}$ : ظرفیت کارخانه جداسازی/بازیافت  $r$  با فناوری  $e$  برای بازیافت ماده اولیه  $c$  (کیلوگرم)  
 $c\tilde{a}p_m$ : ظرفیت مرکز انهدام  $m$  (کیلوگرم)  
 $\tilde{q}_{cp}$ : مقدار مواد اولیه موردنیاز  $c$  برای تولید یک واحد محصول  $p$  (کیلوگرم)  
 $n_p$ : نرخ ظرفیت استفاده‌شده برای تولید هر یک واحد محصول  $p$   
 $\tilde{t}_l$ : درصد محصول اسقاطی که از مشتری  $l$  به مراکز جمع‌آوری برگشت داده می‌شود  
 $o_p^r$  و  $o_p^{ur}$ : نرخ باتری‌های اسقاطی با قابلیت بازیافت و بدون قابلیت بازیافت ( $o_p^{ur} + o_p^r = 1$ )  
 $Wh_p$ : وزن محصول اسقاطی  $p$  (کیلوگرم)  
 $a_p$  و  $a_{pc}$ : به ترتیب درصد ضایعات و مواد خام  $c$  حاصل از جداسازی و بازیافت باتری‌های اسقاطی قابل-بازیافت  $p$   
 $\pi_s$ : احتمال سناریو  $s$

تأثیرات محیطی حمل‌ونقل بر اساس ضریبی از مسافت بین دو مرکز محاسبه می‌شود. بر اساس واحد استاندارد مصرف سوخت، یک گرم کربن ( $CO_2$ ) در هر کیلومتر معادل  $0.043$  لیتر در هر صد کیلومتر می‌شود. برای مثال، از هر کامیون در هر کیلومتر  $23/3$  گرم  $CO_2$  خارج می‌شود که می‌توان آن را برحسب صد کیلومتر محاسبه کرد. داده‌های محیطی در ادامه آورده شده است:

$ei_{jgp}^{manu}$ : انتشار کربن (به کیلوگرم) به‌ازای تولید هر واحد محصول  $p$  در کارخانه  $j$  با فناوری  $g$   
 $ei_{rec}^{rec}$ : انتشار کربن (به کیلوگرم) به‌ازای بازیافت هر کیلوگرم ماده  $c$  در کارخانه‌های جداسازی/بازیافت  $r$  با فناوری بازیافت  $e$

$ei_m^{disp}$ : انتشار کربن (به کیلوگرم) به‌ازای انهدام هر کیلوگرم ضایعات در مرکز انهدام  $m$   
 $ei_p^{prod}$ : انتشار کربن (به کیلوگرم) به‌ازای انتقال هر واحد محصول جدید  $p$  در هر کیلومتر  
 $ei^{wast}$ : انتشار کربن (به کیلوگرم) به‌ازای انتقال هر کیلوگرم ضایعات از کارخانه‌های جداسازی/بازیافت به مراکز انهدام در هر کیلومتر

$C^{Tax}$ : نرخ مالیات کربن در هر کیلوگرم (میزان مالیات پرداخت‌شده به‌ازای هر واحد منتشرشده)  
 $Et_{kl}$ : متوسط زمان لازم برای طی هر کیلومتر از مرکز توزیع/ترکیبی  $k$  به منطقه مشتری  $l$   
 $Et_{jl}$ : متوسط زمان لازم برای طی هر کیلومتر از مرکز تولید  $j$  به منطقه مشتری  $l$

$WC_{lp}$ : اهمیت نسبی محصول  $p$  برای مشتری  $l$

### متغیرهای صفر و یک

$M_{jg}$ : در صورت احداث مرکز تولید  $j$  با فناوری  $g$ ، یک؛ در غیر این صورت، صفر.  
 $D_k$ : در صورت احداث مرکز توزیع  $k$ ، یک؛ در غیر این صورت، صفر.  
 $H_k$ : در صورت احداث مرکز ترکیبی  $k$ ، یک؛ در غیر این صورت، صفر.  
 $C_k$ : در صورت احداث مرکز جمع‌آوری  $k$ ، یک؛ در غیر این صورت، صفر.  
 $R_{re}$ : در صورت احداث مرکز جداسازی/بازیافت  $r$  با فناوری  $e$ ، یک؛ در غیر این صورت، صفر.  
 $P_m$ : در صورت احداث مرکز انهدام  $m$ ، یک؛ در غیر این صورت، صفر.  
 $Z_{kl}$ : در صورت تخصیص ناحیه مشتری  $l$  به مرکز توزیع/ترکیبی  $k$  یک؛ در غیر این صورت صفر.  
 $Z_{jl}$ : در صورت تخصیص ناحیه مشتری  $l$  به مرکز تولیدی  $j$  یک؛ در غیر این صورت، صفر.  
 $Z_{lk}$ : در صورت تخصیص محصولات قراضه ناحیه مشتری  $l$  به مرکز جمع‌آوری/ترکیبی  $k$  یک، در غیر این صورت، صفر.

### متغیرهای پیوسته

$U_{ijcs}^t$ : مقدار مواد اولیه  $c$  خریداری شده در دوره  $t$  از تأمین‌کننده  $i$  توسط کارخانه  $j$  تحت سناریو  $s$   
 $X_{jgps}^t$ : مقدار محصول تولیدشده  $p$  با فناوری  $g$  در دوره  $t$  در کارخانه  $j$  تحت سناریو  $s$   
 $X_{jkps}^t$ : مقدار ارسال محصول  $p$  در دوره  $t$  از کارخانه  $j$  به توزیع‌کننده/مرکز ترکیبی  $k$  تحت سناریو  $s$   
 $X_{klps}^t$ : مقدار ارسال محصول  $p$  در دوره  $t$  از مرکز توزیع/ترکیبی  $k$  به مشتری  $l$  تحت سناریو  $s$   
 $X_{jlps}^t$ : مقدار ارسال محصول  $p$  در دوره  $t$  از کارخانه  $j$  به مشتری  $l$  تحت سناریو  $s$   
 $Y_{lkps}^t$ : مقدار محصول اسقاطی  $p$  که از فروشندگان قراضه باتری در ناحیه مشتری  $l$  توسط مرکز جمع‌آوری/ترکیبی  $k$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$  خریداری می‌شود.  
 $Y_{ktps}^t$ : مقدار محصول اسقاطی  $p$  که از مرکز جمع‌آوری/ترکیبی  $k$  به کارخانه جداسازی/بازیافت  $r$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$  ارسال می‌شود.  
 $W_{recs}^t$ : مقدار مواد بازیافت‌شده  $c$  در دوره  $t$  در کارخانه جداسازی/بازیافت  $r$  با فناوری بازیافت  $e$  تحت سناریو  $s$  (کیلوگرم)  
 $U_{ijcs}^t$ : مقدار ارسال مواد اولیه احیاشده  $c$  در دوره  $t$  در کارخانه جداسازی/بازیافت  $r$  به کارخانه  $j$  تحت سناریو  $s$   
 $U_{recs}^t$ : مقدار فروش مواد اولیه احیاء شده  $c$  در دوره  $t$  از کارخانه جداسازی/بازیافت  $r$  به اشخاص ثالث تحت سناریو  $s$

$V_{rms}^t$ : مقدار ارسال ضایعات از کارخانه جداسازی / بازیافت  $r$  به مرکز انهدام  $m$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $s$  (کیلوگرم)

$Inv_{kps}^t$ : سطح موجودی محصول  $p$  در مرکز توزیع / ترکیبی  $k$  در پایان دوره  $t$  تحت سناریو  $s$

**توابع هدف.** در این پژوهش توابع هدف مسئله موردبررسی شامل توابع حداقل‌سازی هزینه کل، حداقل‌سازی تأثیرات محیطی و حداکثرسازی پاسخگویی است. در تابع هدف اول هزینه کل زنجیره تأمین حداقل می‌شود:

$$Min Z_1 = FC + \sum_s \sum_t \pi_s (MC_{st} + TC_{st}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

این هزینه‌ها در ادامه به تفکیک آورده شده‌اند. هزینه ثابت احداث کارخانه، مراکز توزیع، جمع‌آوری، ترکیبی، بازیافت و انهدام به‌صورت زیر است:

$$FC = \sum_j \sum_g f \tilde{m}_{jg} M_{jg} + \sum_k f \tilde{d}_k D_k + \sum_k f \tilde{c}_k C_k + \sum_k f \tilde{h}_k H_k + \sum_r \sum_e f \tilde{r}_{re} R_{re} + \sum_m f \tilde{p}_m P_m \quad \text{رابطه (۱-۱)}$$

در رابطه (۱-۲) عبارت‌های اول تا دهم به ترتیب هزینه نگهداری موجودی در انبار، هزینه خرید مواد خام نو برای کارخانه‌های تولید باتری، هزینه خرید باتری‌های مستعمل در مراکز جمع‌آوری / هیبریدی، هزینه تولید، هزینه توزیع، هزینه جمع‌آوری، هزینه بازرسی و جداسازی باتری‌های مستعمل، هزینه بازیافت مواد اولیه، هزینه انهدام باتری‌های غیرقابل‌استفاده و درآمد فروش مواد اولیه به‌دست‌آمده از بازیافت باتری‌های مستعمل هستند.

$$MC_{st} = \sum_k \sum_p h \tilde{c}_{ps}^t Inv_{kps}^t + \sum_i \sum_j \sum_c p \tilde{c}_{ics}^t U_{ijcs}^t + \sum_l \sum_k \sum_p p \tilde{p}_{ps}^t Y_{lkps}^t + \frac{1}{2} \sum_j \sum_g \sum_p m \tilde{c}_{jgps}^t X_{jgps}^t + \sum_k \sum_l \sum_p d \tilde{c}_{kps}^t X_{klps}^t + \sum_l \sum_k \sum_p c \tilde{c}_{kps}^t Y_{lkps}^t + \sum_k \sum_r \sum_e \sum_p o \tilde{c}_{reps}^t Y_{krps}^t + \sum_r \sum_e \sum_c r \tilde{c}_{recc}^t W_{recc}^t + \sum_r \sum_m d \tilde{c}_{ms}^t V_{rms}^t - \sum_r \sum_c s \tilde{p}_{cs}^t U_{recc}^t, \forall t, s \quad \text{رابطه (۲-۱)}$$

در رابطه (۳-۱) که هزینه کل حمل‌ونقل را محاسبه می‌کند عبارت‌های اول تا هشتم به ترتیب هزینه حمل مواد اولیه نو از تأمین‌کنندگان به مراکز تولید، هزینه ارسال باتری از مراکز تولید به مراکز توزیع/هیبریدی، هزینه ارسال باتری از مراکز توزیع/هیبریدی به مشتریان، هزینه حمل باتری از مرکز تولید به مشتریان، هزینه ارسال باتری‌های اسقاطی از مراکز جمع‌آوری/هیبریدی به مراکز جداسازی/بازیافت، هزینه ارسال مواد بازیافت‌شده از مراکز جداسازی/بازیافت به مراکز تولید و هزینه ارسال باتری‌های مستعمل از مراکز جداسازی/بازیافت به مراکز انهدام هستند.

$$\begin{aligned}
 TC_{st} = & \sum_i \sum_j \sum_c t\tilde{c}_{cs}^t di_{ij} U_{ijcs}^t + \sum_j \sum_k \sum_p t\tilde{c}_{ps}^t di_{jk} X_{jkps}^t + \sum_k \sum_l \sum_p t\tilde{c}_{ps}^t di_{kl} X_{klps}^t \\
 & + \sum_j \sum_l \sum_p t\tilde{c}_{ps}^t di_{jl} X_{jlps}^t + \sum_k \sum_r \sum_p t\tilde{c}_{ps}^t di_{kr} Y_{krps}^t + \sum_k \sum_r \sum_p t\tilde{c}_{ps}^t di_{kr} Y_{krps}^t + \\
 & \sum_r \sum_j \sum_c t\tilde{c}_{cs}^t di_{ij} U_{rjcs}^t + \sum_r \sum_m t\tilde{c}_m^t di_{rm} V_{rms}^t, \forall t, s
 \end{aligned}$$

رابطه (۱-۳)

تابع هدف دوم به دنبال حداقل‌سازی تابع محیطی است که هزینه مالیات انتشار کربن حاصل از جایگزینی زنجیره تأمین حلقه‌بسته را محاسبه می‌کند. در این تابع عبارت‌های اول تا سوم به ترتیب هزینه انتشار کربن ناشی از تولید باتری‌ها، بازیافت مواد اولیه و انهدام ضایعات باتری‌های اسقاطی را نشان می‌دهند. عبارات چهارم تا هفتم هزینه انتشار ناشی از انتقال باتری‌های تولیدی، باتری‌های قراضه، مواد اولیه و ضایعات است.

$$\begin{aligned}
 Min Z_2 = & \sum_s \sum_t \pi_s . C^{Tax} \\
 & \left( \sum_j \sum_g \sum_p ei_{jgp}^{manu} X_{jgps}^t + \sum_r \sum_e \sum_c ei_{rec}^{rcyc} W_{recs}^t + \sum_r \sum_m ei_m^{disp} V_{rms}^t + \right. \\
 & \left. \sum_j \sum_k \sum_l \sum_p eit_p^{prod} (d_{jk} X_{jkps}^t + d_{kl} X_{klps}^t + d_{jl} X_{jlps}^t) + \sum_k \sum_r \sum_p eit_p^{scra} d_{kr} Y_{krps}^t \right. \\
 & \left. + \sum_i \sum_j \sum_r \sum_c eit_c^{comp} (d_{ij} U_{ijcs}^t + d_{rj} U_{rjcs}^t) + \sum_r \sum_m eit^{wast} d_{rm} V_{rms}^t \right)
 \end{aligned}$$

رابطه (۲)

تابع هدف سوم درصد حداکثرسازی نسبت تقاضای پوشش داده‌شده و حداقل‌سازی زمان موردنیاز برای تحویل سفارش‌های مشتریان است. در این رابطه با توجه به اینکه مقیاس دو عبارت نسبت تقاضای برآورده‌شده مشتریان و معکوس زمان موردنیاز برای تحویل سفارش‌های



مشتریان یکی نیستند، این دو عبارت در پارامترهای  $w_{lp}^1$  و  $w_{lp}^2$  ضرب شده‌اند تا تصمیم‌گیرندگان بتوانند با تنظیم مقادیر این دو پارامتر، مقدار مطلوب برای هر دو تقاضای برآورده‌شده و زمان موردنیاز تحویل را به‌دست آورند. این تابع به پاسخگویی و سطح خدمت زنجیره تأمین حلقه‌بسته می‌پردازد.

$$\begin{aligned} \text{Max } Z_3 = & \sum_t \sum_s \pi_s \left[ \sum_l \sum_p w_{lp}^1 \left( \sum_k \frac{X_{klps}^t}{\bar{d}_{lps}^t} + \sum_j \frac{X_{jlps}^t}{\bar{d}_{lps}^t} \right) + \right. \\ & \left. \sum_l \sum_p w_{lp}^2 \left( \sum_k \frac{1}{Et_{kl} di_{kl} X_{klps}^t} + \sum_j \frac{1}{Et_{jl} di_{jl} X_{jlps}^t} \right) \right] \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{رابطه} \\ (۳) \end{array}$$

**محدودیت‌ها.** محدودیت ۴، اطمینان می‌دهد که مقدار خرید هر یک از مواد از تأمین‌کنندگان نباید از ظرفیت آن‌ها تخطی کند. محدودیت‌های ۵ تا ۹ به ترتیب اطمینان می‌دهند که میزان تولید در هر یک از مراکز تولیدی، میزان توزیع در هر یک از مراکز توزیع/هیبریدی، میزان جمع‌آوری در هر یک از مراکز جمع‌آوری/ ترکیبی، میزان بازیافت در هر یک از مراکز جداسازی/ بازیافت و میزان انهدام هر یک از مراکز انهدام نباید از ظرفیت تعریف‌شده برای آن‌ها تخطی کند. محدودیت ۱۰، باعث می‌شود که در هر مکان در صورت استقرار فقط یکی از سه نوع تسهیلات توزیع، جمع‌آوری و هیبریدی احداث شود. محدودیت‌های ۱۱ و ۱۲، تضمین می‌کنند که برای هر یک از مراکز تولید و مراکز جداسازی/ بازیافت فقط یک نوع فناوری انتخاب شود.

$$\sum_j U_{ijcs} \leq \bar{c} \bar{a}_s i_c \quad \forall i, c, s \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\sum_p n_p X_{jgps}^t \leq \bar{c} \bar{a}_m j_{gp} M_{jg} \quad \forall j, g, t, s \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\sum_l \sum_p n_p X_{klps}^t \leq \bar{c} \bar{a}_d k D_k + \bar{c} \bar{a}_h k H_k \quad \forall k, t, s \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\sum_l \sum_p n_p Y_{lkps}^t \leq \bar{c} \bar{a}_c^{low} k C_k + \bar{c} \bar{a}_h^{low} k H_k \quad \forall k, t, s \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$W_{recs}^t \leq \bar{c} \bar{a}_{rec} R_{re} \quad \forall r, e, c, t, s \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\sum_r V_{rms}^t \leq \bar{c} \bar{a}_p m P_m, \quad \forall m, t, s \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$D_k + C_k + H_k \leq 1 \quad \forall k \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$\sum_g M_{jg} \leq 1 \quad \forall j \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\sum_e R_{re} \leq 1 \quad \forall r \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

محدودیت ۱۳، اطمینان می‌دهد که باتری‌ها فقط پس از تأمین مواد اولیه آن‌ها از طریق تأمین‌کنندگان یا مراکز بازیافت می‌توانند تولید شوند. محدودیت ۱۴، باعث می‌شود که مقدار حمل باتری‌ها از هر مرکز تولیدی به مراکز توزیع/هیبریدی و مشتریان از مقدار تولید آن تخطی نکند. محدودیت ۱۵، توازن ورودی و خروجی هر مرکز توزیع/ترکیبی را تضمین می‌کند.

$$\sum_p \sum_g \tilde{q}_{cp} X_{jgps}^t \leq \sum_i U_{ijcs}^t + \sum_r U_{rjcs}^t \quad \forall j, c, t, s \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\sum_k X_{jkps}^t + \sum_l X_{jlps}^t \leq \sum_g X_{jgps}^t \quad \forall j, p, t, s \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$Inv_{kps}^{(t-1)} + \sum_j X_{jkps}^t = Inv_{kps}^t + \sum_l X_{klps}^t \quad \forall k, p, t, s \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$\sum_k X_{klps}^t \geq \sum_k \tilde{d}_{lps}^t Z_{kl}, \quad \forall l, p, t, s \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\sum_j X_{jlps}^t \geq \sum_j \tilde{d}_{lps}^t Z_{jl}, \quad \forall l, p, t, s \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$\sum_k Z_{kl} + \sum_j Z_{jl} = 1, \quad \forall l, s \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$\sum_k Y_{lkps}^t = \sum_k \tilde{\tau}_l \tilde{d}_{lps}^t Z_{lk}, \quad \forall l, p, t, s \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$\sum_k Z_{lk} = 1, \quad \forall l \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$\sum_r Y_{krps}^t \leq \sum_l Y_{lkps}^t \quad \forall k, p, t, s \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$\sum_e W_{recs}^t \leq \sum_k \sum_p Wh_p a_{pc} o_p^r Y_{krps}^t \quad \forall r, c, t, s \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$\sum_j U_{rjcs}^t + U_{rcs}^t \leq \sum_e W_{recs}^t \quad \forall r, c, t, s \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$\sum_m V_{ms}^t = \sum_k \sum_p Wh_p o_p^{ur} Y_{krps}^t + \sum_k \sum_p Wh_p o_p^r a_p Y_{krps}^t \quad \forall c, r, t, s \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$X_{jgps}^t, X_{jkps}^t, X_{jlps}^t, X_{klps}^t, Y_{krps}^t, Y_{lkps}^t \geq 0, \quad \forall j, k, l, r, g, p, g, e, t, s \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$U_{ijcs}^t, U_{rjcs}^t, U_{rcs}^t, V_{ms}^t \geq 0, \quad \forall i, j, r, m, c, t, s \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$M_{jg}, D_k, C_k, H_k, R_{re} \in \{0,1\}, \quad \forall j, g, k, r, e \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷، به ترتیب باعث می‌شوند که تقاضای مشتریان از طریق مراکز توزیع/هیبریدی و مراکز تولید باتری پوشش داده شود. محدودیت ۱۸، تضمین می‌کند که تقاضای مشتریان از طریق یکی از مراکز تولیدی یا مراکز توزیع/هیبریدی پوشش داده شود. محدودیت ۱۹، میزان باتری اسقاطی ارسالی از مناطق مشتری به مراکز جمع‌آوری را مشخص می‌کند. محدودیت ۲۰، باعث می‌شود که باتری اسقاطی برگشتی از هر منطقه مشتری، تنها توسط یک مرکز جمع‌آوری شود.

محدودیت ۲۱، اطمینان می‌دهد که میزان حمل باتری‌های اسقاطی از طریق هر یک از مراکز جمع‌آوری/هیبریدی به مراکز بازیافت نباید از میزان باتری اسقاطی جمع‌آوری شده توسط هر یک از این مراکز تخطی کند. محدودیت ۲۲، تضمین می‌کند که میزان مواد اولیه بازیافتی در هر یک از مراکز بازیافت متناسب با باتری‌های اسقاطی قابل بازیافت است. محدودیت ۲۳، باعث می‌شود که مجموع مواد بازیافتی حمل شده به مراکز تولیدی یا فروخته شده در بازار، از میزان مواد بازیافت شده در مراکز بازیافت تجاوز نکند. محدودیت ۲۴، اطمینان می‌دهد که مجموع باتری‌های غیرقابل بازیافت و ضایعات به دست آمده از جداسازی و بازیافت در هر یک از مراکز بازیافت که به مراکز انهدام منتقل می‌شوند، متناسب با باتری‌های اسقاطی دریافتی باشد. محدودیت‌های ۲۵ و ۲۶، متغیرهای تصمیم غیرمنفی و محدودیت ۲۷، متغیرهای تصمیم باینری را تعیین می‌کنند.

در این پژوهش برخی از پارامترهای مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته شامل تقاضای مشتریان و هزینه‌های مختلف دارای عدم قطعیت ترکیبی هستند؛ بنابراین برای مدل‌سازی این پارامترها از رویکردهای برنامه‌ریزی تصادفی امکانی استفاده می‌شود که جزئیات آن در بخش بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

**مقدمات.** در رویکرد پیشنهادی، عدم قطعیت پارامترها به وسیله سناریوهای تصادفی و متغیرهای امکانی مدل‌سازی می‌شود. برای مقابله با محدودیت‌های امکانی از رویکرد برنامه‌ریزی با محدودیت‌های اعتبار<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. تعاریف متعددی از متوسط عدد فازی برای محاسبه هزینه موردانتظار وجود دارد. در ادامه برخی از این تعاریف و نتایج مورد نیاز تبیین می‌شوند.

**تعریف ۱:** عدد فازی  $\tilde{A}$  یک عدد فازی LR،  $\tilde{A} = (\underline{a}, \bar{a}, \alpha, \beta)_{LR}$ ، فرض می‌شود که تابع عضویت زیر را دارد [۳]:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} L\left(\frac{a-x}{\alpha}\right) & \underline{a} - \alpha \leq x \leq \underline{a} \\ 1 & \underline{a} \leq x \leq \bar{a} \\ R\left(\frac{\bar{a}-x}{\beta}\right) & \bar{a} \leq x \leq \bar{a} + \beta \end{cases} \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

**قضیه ۱.**  $\tilde{A} = (\underline{a}, \bar{a}, \alpha, \beta)_{LR}$  و  $\tilde{B} = (\underline{b}, \bar{b}, \delta, \Gamma)_{LR}$  را دو عدد فازی LR و  $\lambda \in R$  را هم یک عدد حقیقی در نظر بگیرید. جمع و ضرب اعداد فازی بر اساس اصل گسترش در زیر آورده شده‌اند:

$$\begin{aligned} \tilde{A} + \tilde{B} &= (\underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}, \alpha + \delta, \beta + \Gamma)_{LR} \\ \tilde{A} - \tilde{B} &= (\underline{a} - \underline{b}, \bar{a} - \bar{b}, \alpha + \delta, \beta + \Gamma)_{LR} \\ \lambda \tilde{A} &= \begin{cases} (\lambda \underline{a}, \lambda \bar{a}, \lambda \alpha, \lambda \beta)_{LR} & \lambda > 0 \\ (\lambda \bar{a}, \lambda \underline{a}, |\lambda| \alpha, |\lambda| \beta)_{LR} & \lambda < 0 \end{cases} \end{aligned}$$

**تعریف ۲.** مقدار متوسط امکانی تحتانی و فوقانی عدد فازی  $\tilde{A}$  در رابطه ۲۹، آورده شده است [۱]:

$$\begin{aligned} M_*(\tilde{A}) &= 2 \int_0^1 \rho(\inf \tilde{A}_\rho) d\rho = 2 \int_0^1 \rho L^{-1}(\rho) d\rho \\ M^*(\tilde{A}) &= 2 \int_0^1 \rho(\sup \tilde{A}_\rho) d\rho = 2 \int_0^1 \rho R^{-1}(\rho) d\rho \end{aligned} \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

جایی که  $\inf \tilde{A}_\rho$  و  $\sup \tilde{A}_\rho$  به ترتیب نشان‌دهنده نقاط پایانی چپ و راست برش سطح  $\rho$  برای  $\rho \in [0, 1]$  هستند. طبق تعریف بالا، میانگین امکانی تحتانی و فوقانی به ترتیب به صورت رابطه ۳۰، تعریف می‌شوند.

$$\begin{aligned} M_*(A) &= \underline{a} - \alpha / 3, \\ M^*(A) &= \bar{a} + \beta / 3, \end{aligned} \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

میانگین امکانی با ارزش بازه‌ای در شکل فاصله‌ای در زیر بیان می‌شود [۱]:

$$M(\tilde{A}) = [M_*(\tilde{A}), M^*(\tilde{A})]$$

تعریف ۳: اگر  $\tilde{A}$  یک عدد فازی در نظر گرفته شود، میانگین امکانی قطعی طبق تعریف زیر خواهد بود [۱]:

$$\bar{M}(A) = (M^*(A) + M_*(A)) / 2 = \int_0^1 \rho (\inf \tilde{A}_\rho + \sup \tilde{A}_\rho) d\rho \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

بر اساس تعریف بالا، مقدار میانگین امکانی به صورت رابطه ۳۲، خواهد بود.

$$\bar{M}(A) = \frac{a + \bar{a}}{2} + \frac{\beta - \alpha}{6} \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

طبق تعریف بالا، روابط زیر برای اعداد حقیقی  $\lambda$  و  $\gamma$  مفروض است [۱]:

$$\begin{aligned} \bar{M}(\tilde{A} + \tilde{B}) &= \bar{M}(\tilde{A}) + \bar{M}(\tilde{B}) \\ \bar{M}(\lambda \tilde{A} + \lambda \tilde{B}) &= \lambda \bar{M}(\tilde{A}) + \gamma \bar{M}(\tilde{B}) \end{aligned}$$

در این پژوهش برای مدیریت عدم قطعیت عملیاتی در مسئله مورد بررسی، مدل برنامه ریزی با محدودیت‌های شانس مبتنی بر اعتبار به کار گرفته می‌شود. در تعریف ۴، اندازه اعتبار رابطه بین یک عدد فازی و یک متغیر آورده شده است:

تعریف ۴:  $\tilde{A}$  را یک عدد فازی LR با تابع عضویت  $\mu(x)$  و  $r$  را یک عدد حقیقی در نظر بگیرید. تعریف اندازه اعتبار در رابطه ۳۳، آورده شده است [۱۵].

$$Cr\{\tilde{A} * r\} = \frac{1}{2} (Pos\{\tilde{A} * r\} + Nec\{\tilde{A} * r\}) \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

علامت \* می‌تواند هر یک از روابط  $\leq, =, \geq$  را بگیرد. اندازه اعتبار در روابط ۳۴ و ۳۵، تعیین می‌شوند:

$$Cr(\tilde{A} \leq r) = \begin{cases} 0 & -\infty \leq r \leq \underline{a} - \alpha \\ \frac{r - \underline{a} + \alpha}{2\alpha} & \underline{a} - \alpha \leq r \leq \underline{a} \\ \frac{1}{2} & \underline{a} \leq r \leq \bar{a} \\ \frac{r - \bar{a} + \beta}{2\beta} & \bar{a} \leq r \leq \bar{a} + \beta \\ 1 & \bar{a} + \beta \leq r \leq +\infty \end{cases} \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

$$Cr(\tilde{A} \geq r) = \begin{cases} 1 & -\infty \leq r \leq \underline{a} - \alpha \\ \frac{\underline{a} + \alpha - r}{2\alpha} & \underline{a} - \alpha \leq r \leq \underline{a} \\ \frac{1}{2} & \underline{a} \leq r \leq \bar{a} \\ \frac{\bar{a} + \beta - r}{2\beta} & \bar{a} \leq r \leq \bar{a} + \beta \\ 0 & \bar{a} + \beta \leq r \leq +\infty \end{cases} \quad \text{رابطه (۳۵)}$$

طبق روابط ۳۴ و ۳۵، برای مقادیر بحرانی بزرگ‌تر از ۰/۵، معادله‌های زیر استفاده می‌شود:

$$\begin{aligned} Cr\{\tilde{A} \leq r\} \geq \rho &\Leftrightarrow r \geq (2-2\rho)\bar{a} + (2\rho-1)(\bar{a} + \beta) \\ Cr\{\tilde{A} \geq r\} \geq \rho &\Leftrightarrow r \leq (2\rho-1)(\underline{a} - \alpha) + (2-2\rho)\underline{a} \end{aligned} \quad \text{رابطه (۳۶)}$$

دو نامعادله بالا برای تبدیل محدودیت‌های شانس فازی به محدودیت‌های معادل قطعی استفاده می‌شود [۱۶].

فرمول‌بندی میانگین تصادفی امکانی. در این قسمت ابتدا فرم ساده‌شده مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته به‌صورت رابطه ۳۷، فرموله می‌شود.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \tilde{f}x + \tilde{c}_s y_s \\
 & \text{s.t. } Ay_s \geq \tilde{d}_s \\
 & \quad Bx = 0 \\
 & \quad Dy_s \leq \tilde{H}x \\
 & \quad x \in \{0,1\}, y_s \geq 0
 \end{aligned}
 \tag{۳۷}$$

$x$  و  $y$  به‌ترتیب برداری از متغیرهای طراحی و متغیرهای کنترل هستند. در مسئله موردبررسی، این دو متغیر به‌ترتیب متغیرهای باینری و سایر متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند. ماتریس  $A, B, D, H$  پارامترها هستند و  $f, c, d$  بردار پارامترها را نشان می‌دهند.  $B, D$  به‌صورت قطعی در نظر گرفته می‌شوند و  $f$  و  $E$  به‌ترتیب متغیرهای فازی مرتبط با هزینه استقرار مراکز و ظرفیت هر یک از این مراکز را نشان می‌دهند.  $c$  و  $d$  متغیرهای سناریوهای فازی در نظر گرفته می‌شوند که به‌ترتیب گویای هزینه‌ها و تقاضای مشتریان هستند. یک حالت خاص برای یک پارامتر مبتنی بر سناریو فازی یک سناریو بیان می‌شود که با  $s$  و احتمال مطابق با آن با  $p_s$  نشان داده می‌شود ( $\sum_s p_s = 1$ ).  $S$  مجموعه سناریوها است. ضرایب فازی  $f$  و  $H$  به‌صورت  $\tilde{f}$  و  $\tilde{H}$  و همچنین متغیرهای مبتنی بر سناریو فازی  $d$  و  $c$  به‌صورت  $\tilde{c}_s$  و  $\tilde{d}_s$  آورده می‌شوند. درنهایت متغیر کنترل  $y$  به‌صورت  $y_s$  برای سناریو  $s$  نشان داده می‌شود ( $s=1,2,\dots,S$ ). برای صورت‌بندی برنامه‌ریزی با محدودیت شانس امکانی اولیه، عملگرهای مقدار میانگین امکانی کارلسون و فولر<sup>۱</sup> (۲۰۰۱)، برای تعریف توابع هدف و شاخص اعتبار لیبو و ایوامورا<sup>۲</sup> (۱۹۹۸)، برای مقابله با محدودیت‌های شانس به‌کار گرفته می‌شوند [۱۷، ۱]. بر این اساس، مدل برنامه‌ریزی تصادفی امکانی اولیه در رابطه ۳۸، تشکیل شده است.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \bar{M}[f]x + \sum_s p_s (\bar{M}[\tilde{c}_s]y_s) \\
 & \text{s.t. } Cr(\tilde{A}y_s \geq \tilde{d}_s) \geq \rho_s \quad \forall s \\
 & \quad Bx = 0 \\
 & \quad Cr(Dy_s \leq \tilde{H}x) \geq \varphi_s \quad \forall s \\
 & \quad x \in \{0,1\}, y_s \geq 0
 \end{aligned}
 \tag{۳۸}$$

1. Carlsson & Fullér  
2. Liu & Iwamura

تعیین  $S$  سناریو  $(x, y_s)$  جواب برای هزینه فازی  $\tilde{F}_s(x, y_s) = \tilde{f}x + \tilde{c}_s y_s$  می‌شود. با فرض اینکه هزینه‌های مسئله موردبررسی،  $\tilde{f}_i = (\underline{f}_i, \bar{f}_i, \alpha_i, \beta_i)_{LR}$  و  $\tilde{c}_{js} = (\underline{c}_{js}, \bar{c}_{js}, \alpha_{js}, \beta_{js})_{LR}$  ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, J$ ) به صورت اعداد فازی دوزنقه‌ای تعریف شوند، ترکیب خطی زیر هزینه کل فازی یک سناریو را نشان می‌دهد و به صورت  $\tilde{F}_s(x, y_s)$  آورده می‌شود. برای سادگی، در ادامه  $\tilde{F}_s(x, y_s)$  به صورت  $\tilde{F}_s$  نشان داده می‌شود (همچنین است برای  $\underline{F}_s, \bar{F}_s, M_s, N_s, \underline{F}, \bar{F}, M, \tilde{F}$ ). با استفاده از قضیه ۱، داریم:

$$\tilde{F}_s = \left( \begin{array}{l} \sum_i \underline{f}_i x_i + \sum_j \underline{c}_j y_{js}, \sum_i \bar{f}_i x_i + \sum_j \bar{c}_j y_{js}, \\ \sum_i \alpha_i x_i + \sum_j \alpha_{js} y_{js}, \sum_i \beta_i x_i + \sum_j \beta_{js} y_{js} \end{array} \right)_{LR} = (\underline{F}_s, \bar{F}_s, M_s, N_s)_{LR} \quad \text{رابطه (۳۹)}$$

بنابراین  $\tilde{F}_s$  یک فاصله فازی دوزنقه‌ای در نظر گرفته می‌شود. به همین صورت، به سادگی  $\tilde{F}$  به صورت رابطه ۴۰، تعیین می‌شود.

$$\tilde{F} = \left( \begin{array}{l} \sum_i \underline{f}_i x_i + \sum_j \sum_s p_s \underline{c}_{js} y_{js}, \sum_i \bar{f}_i x_i + \sum_j \sum_s p_s \bar{c}_{js} y_{js}, \\ \sum_i \alpha_i x_i + \sum_j \sum_s p_s \alpha_{js} y_{js}, \sum_i \beta_i x_i + \sum_j \sum_s p_s \beta_{js} y_{js} \end{array} \right)_{LR} \quad \text{رابطه (۴۰)}$$

$$= (\underline{F}, \bar{F}, M, N)_{LR}$$

طبق تعریف ۳، میانگین امکانی در هر سناریو  $(F_s)$  و میانگین موزون تابع هدف در همه سناریوها  $(F)$  به صورت زیر تشکیل می‌شود.

$$F_s = \bar{M}(\tilde{F}_s) = \sum_i \bar{M}(\tilde{f}_i) x_i + \sum_j \bar{M}(\tilde{c}_{js}) y_{js}$$

$$= \sum_i \left( \frac{\underline{f}_i + \bar{f}_i}{2} + \frac{\beta_i - \alpha_i}{6} \right) x_i + \sum_j \left( \frac{\underline{c}_{js} + \bar{c}_{js}}{2} + \frac{\beta_{js} - \alpha_{js}}{6} \right) y_{js}, s = 1, \dots, S \quad \text{رابطه (۴۱)}$$

$$F = \bar{M}(\tilde{F}) = \sum_i \bar{M}(\tilde{f}_i) x_i + \sum_j \sum_s p_s \bar{M}(\tilde{c}_{js}) y_{js}$$

$$= \sum_i \left( \frac{\underline{f}_i + \bar{f}_i}{2} + \frac{\beta_i - \alpha_i}{6} \right) x_i + \sum_j \sum_s p_s \left( \frac{\underline{c}_{js} + \bar{c}_{js}}{2} + \frac{\beta_{js} - \alpha_{js}}{6} \right) y_{js} \quad \text{رابطه (۴۲)}$$



طبق موارد بالا و با فرض  $\tilde{d}_s = (d_s, \bar{d}_s, \alpha_s, \beta_s)_{LR}$  و  $\tilde{H} = (\underline{H}, \bar{H}, \alpha, \beta)_{LR}$  مدل برنامه‌ریزی تصادفی امکانی قطعی به صورت زیر فرموله می‌شود.

$$\text{Min } F \quad \text{رابطه (۴۳)}$$

$$\text{s.t. } Ay_s \geq (2 - 2\rho_s)\bar{d}_s + (2\rho_s - 1)(\bar{d}_s + \beta_s) \quad \text{رابطه (۴۴)}$$

$$Bx = 0 \quad \text{رابطه (۴۵)}$$

$$Dy_s \leq [(2\varphi_s - 1)(\underline{H} - \alpha) + (2 - 2\varphi_s)\underline{H}]x \quad \text{رابطه (۴۶)}$$

$$x \in \{0,1\}, y_s \geq 0 \quad \text{رابطه (۴۷)}$$

$\rho$  و  $\varphi$  حداقل سطح اطمینان لازم برای برآورده کردن محدودیت‌های شانس امکانی را نشان می‌دهند. در روابط ۴۴ و ۴۶، محدودیت‌ها باید با سطح اطمینان بالاتر از  $0.5$  برآورده شوند؛ یعنی  $\rho_s, \varphi_s > 0.5$  باشند. تصمیم‌گیرندگان بسته به سطح ریسک‌گریزی خود می‌توانند مقادیر مناسب را برای این دو ضریب در نظر بگیرند.

**حل مدل چندهدفه.** در رویکرد برنامه‌ریزی منعطف که یکی از شاخه‌های برنامه‌ریزی فازی است، برای حل مدل‌های برنامه‌ریزی چندهدفه توابع هدف به صورت توابع مطلوبیت تعریف می‌شوند. مزیت عمده این رویکرد این است که به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند درجه اقتناع هر تابع هدف را به صورت صریح کمی کنند. در این پژوهش از روش ترابی و حسنی (۲۰۰۸)، استفاده شده است. برتری روش ترابی و حسنی (۲۰۰۸)، بر روش‌های دیگر اثبات شده است [۳۲].

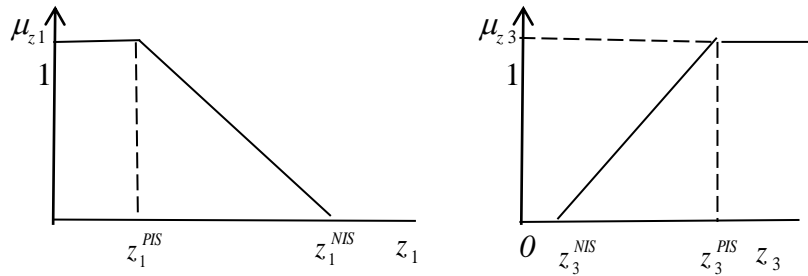
در این روش، ابتدا باید راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت (PIS) و راه‌حل‌های ایده‌آل منفی (NIS) توابع هدف بالا به دست آورده شود:

$$\begin{aligned} z_1^{PIS} &= \min_{x \in X} z_1, & z_1^{NIS} &= \max_{x \in X} z_1, \\ z_2^{PIS} &= \min_{x \in X} z_2, & z_2^{NIS} &= \max_{x \in X} z_2, \\ z_3^{PIS} &= \max_{x \in X} z_3, & z_3^{NIS} &= \min_{x \in X} z_3, \end{aligned} \quad \text{رابطه (۴۸)}$$

سپس تابع عضویت خطی درجه اقتناع توابع هدف را می‌توان محاسبه کرد که نمودار آن‌ها در شکل ۲، ترسیم شده است.

$$\mu_{z_1} = \begin{cases} 1 & Z_1 < Z_1^{PIS} \\ \frac{Z_1^{NIS} - Z_1}{Z_1^{NIS} - Z_1^{PIS}} & Z_1^{PIS} \leq Z_1 \leq Z_1^{NIS} \\ 0 & Z_1 > Z_1^{NIS} \end{cases} \quad \text{رابطه (۴۹)}$$

$$\mu_{z_3} = \begin{cases} 1 & Z_3 > Z_3^{PIS} \\ \frac{Z_3 - Z_3^{NIS}}{Z_3^{PIS} - Z_3^{NIS}} & Z_3^{PIS} \leq Z_3 \leq Z_3^{NIS} \\ 0 & Z_3 < Z_3^{NIS} \end{cases} \quad \text{رابطه (۵۰)}$$



شکل ۲. تابع عضویت اهداف،  $z_1$  و  $z_3$

روشن است که تابع عضویت درجه اقلان توابع هدف ۲ ( $\mu_{z_2}$ ) مشابه تابع عضویت تابع هدف اول ( $\mu_{z_1}$ ) است. برای حل مشکل ناکارایی و رسیدن به جواب مصالحه‌ای بهتر، ترابی و حسنی (۲۰۰۸)، یک رویکرد جدید به صورت زیر توسعه داده‌اند:

$$\max \quad \gamma \lambda_0 + (1-\gamma) \frac{\sum w_h \mu_{z_h}(x)}{4}$$

$$s.t. \quad \mu_{z_h}(x) \geq \lambda_0, \quad h=1,2,3$$

Constraints (4)-(27)  
 $\lambda_0$  and  $\gamma \in [0,1]$

رابطه (۵۱)

در اینجا  $\gamma$  ضریب جبران بوده که در بازه  $[0,1]$  تعریف شده است.  $w_{h_i}$  اهمیت  $h_i$  تأمین تابع هدف را نشان می‌دهد. مقدار بهینه متغیر  $\{\mu_{Z_h}(x)\}$  حداقل درجه اقناع توابع هدف است.

#### ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، مسئله زنجیره تأمین حلقه‌بسته شرکت «باتری‌سازی سپاهان» بررسی و نتایج آن در این قسمت تبیین می‌شود. مجموعه سپاهان باتری در سال ۱۳۸۴ افتتاح شد و امروزه با برندهای سوزوکی، اوربیتال و بارکاس محصولات خود را با کیفیت و تنوع مطلوب ارائه می‌کند. مدیران این شرکت به دلیل عملکرد پاسخگویی ضعیف و همچنین فشارهای قانونی برای کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی که طی دو دهه گذشته با آن روبه‌رو بوده‌اند و همچنین افزایش تقاضای بازار تصمیم گرفته‌اند تغییراتی در زنجیره تأمین خود با برنامه‌ریزی و طراحی مجدد آن به عمل آورند. در این پژوهش، مسئله زنجیره تأمین مجتمع سپاهان دارای ۸ تأمین‌کننده و ۷ محل بالقوه برای تأسیس مراکز تولید جدید هستند که به‌عنوان مراکز نامزد از قبل تعیین شده‌اند. ۶ محل برای مراکز توزیع/جمع‌آوری/هیبریدی، ۶ محل برای مراکز بازیافت و ۴ محل برای مراکز انهدام از پیش تعیین شده است. یک نوع باتری و یک نوع ماده اولیه (سرب) با ۱۴ ناحیه مشتری، هر یک دارای تقاضای با توزیع یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. سه نوع فناوری برای استقرار مراکز تولیدی و بازیافت تعیین شده است که فناوری نوع اول غیرسبز و ارزان، فناوری نوع دوم نیمه‌سبز و تقریباً گران و فناوری نوع سوم سبز و گران است. ظرفیت تسهیلات با فناوری نوع اول، دوم و سوم به ترتیب پایین، متوسط و بالا است. سناریوهایی برای چهار وضعیت اقتصادی با احتمال نابرابر تعریف می‌شوند.

**بررسی کارایی حل مدل.** در مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط که در قسمت قبل توسعه داده شد، با افزایش اندازه مسئله به زمان محاسباتی بالایی برای حل آن احتیاج می‌شود. نتایج در جدول ۲، برای ۷ مسئله نمونه نشان داده شده است. برای تشکیل مسائل نمونه، پارامترهای امکانی برای هر سناریو تولید می‌شوند. برای انجام این کار، پارامترهای فازی به کمک اعداد فازی LR برای نمونه عددی مدل پژوهش حاضر تعریف می‌شود. برای تولید پارامترهای امکانی، مقادیر محتمل تحتانی و فوقانی  $a$  و  $\bar{a}$  و مقادیر بازه سمت راست و چپ  $\alpha$  و  $\beta$  برای هر پارامتر غیرقطعی به کمک یک توزیع احتمال به‌دست آورده می‌شود. به این منظور، ابتدا یکی از محتمل‌ترین مقادیر هر پارامتر (در اینجا  $a$ ) به‌صورت تصادفی از طریق توزیع احتمال یکنواخت تولید می‌شود ( $a = \text{uniform}(a,b)$ ). در ادامه سه عدد تصادفی به کمک توزیع یکنواخت به

ترتیب بین صفر و  $0/4$ ، صفر و  $0/2$  و صفر و  $0/2$  تولید می‌شود. در نهایت مقادیر محتمل فوقانی، بازه سمت راست و چپ به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$\bar{a} = (1 + r_1)a$$

$$\alpha = r_2 a$$

$$\beta = r_3 a$$

رابطه (۵۲)

با توجه به جدول ۲، با افزایش اندازه مسئله، زمان حل و شکاف نسبی حل کننده CLPEX افزایش می‌یابد.

جدول ۲. خلاصه نتایج محاسباتی برای مسائل نمونه

شماره مسئله نمونه	$c - p - i - j - k - l - r - m - g - e - t - s$	تعداد متغیرهای عدد صحیح	تعداد متغیرهای صفر و یک	تعداد کل متغیرها	تعداد محدودیت‌ها	CPLEX relative gap (%)	زمان حل (ثانیه)
۱	۱-۱-۱-۷-۶-۱۰-۶-۴-۲-۲-۴-۶	۴۰۶۰	۲۳۰	۷۹۱۶	۲۹۰۰	۰/۴۸	۱۷
۲	۱-۱-۱-۸-۷-۱۲-۷-۵-۲-۲-۴-۸	۷۳۶۰	۲۸۴	۱۴۰۲۸	۴۴۵۹	۰/۵۸	۱۸۰
۳	۱-۱-۱-۹-۸-۱۴-۸-۶-۲-۲-۴-۸	۱۱۵۷۸	۳۳۲	۲۵۴۴۱	۶۲۴۱	۰/۶۱	۳۲۰
۴	۱-۱-۱-۱۰-۹-۱۵-۹-۷-۲-۲-۶-۸	۱۸۷۶۵	۳۶۰	۳۲۷۹۹	۸۳۰۸	۰/۷۵	۱۰۰۶
۵	۱-۱-۱-۱۱-۱۰-۱۶-۱۰-۹-۲-۲-۶-۱۰	۲۳۲۴۱	۴۲۵	۴۸۲۵۴	۱۲۵۴۵	۰/۸۱	۱۸۷۵
۶	۱-۱-۱-۱۲-۱۲-۱۸-۱۲-۱۰-۲-۲-۶-۱۰	۳۴۵۸۷	۵۷۴	۶۴۵۴۲	۱۵۴۵۲	Not able to solve	
۷	۱-۱-۱-۱۲-۱۲-۱۸-۱۲-۱۰-۲-۲-۸-۱۲	۵۵۲۵۴	۵۷۴	۹۵۴۷۵	۳۲۱۵۴	Not able to solve	

**تحلیل حساسیت مدل چندهدفه.** برای حل مدل چندهدفه مسئله پژوهش حاضر، ابتدا مسئله برای هر یک از توابع هدف شامل تابع هزینه، تابع محیطی و تابع پاسخگویی، دو بار به صورت جداگانه در حالت حداکثرسازی و حداقلسازی حل می‌شود تا مقادیر ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی هر یک از توابع هدف محاسبه شود؛ به طوری که جواب‌های ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی هر یک از توابع هدف برای تشکیل توابع عضویت فازی به صورت جداگانه به دست آورده می‌شود. جدول ۳، جزئیات مربوط به این مقادیر را نشان می‌شود.

جدول ۳. راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی برای تعیین توابع عضویت فازی (توابع ۱ و ۲ به میلیارد تومان)

$Z_1$		$Z_2$		$Z_3$	
$Z_1^{NIS}$	$Z_1^{PIS}$	$Z_2^{NIS}$	$Z_2^{PIS}$	$Z_3^{NIS}$	$Z_3^{PIS}$
۲۸۶۰	۶۲۵۰	۲۸	۶۲	۰/۰۴۴	۰/۰۲

در این قسمت بر روی برخی از پارامترهای مهم از جمله ضریب جبران ( $\gamma$ ) و وزن توابع هدف ( $W_h$ ) با تحلیل حساسیت انجام گرفته و نتایج در جدول‌های ۴ و ۵، گزارش شده است.

**تحلیل حساسیت ضریب جبران.** همان‌طوری که قبلاً تشریح شد، در روش ترابی و حسنی (۲۰۰۸)، از ضریب  $\gamma$  برای ایجاد توازن بین حداقل درجه اقناع توابع و متوسط درجه اقناع موزون توابع هدف استفاده می‌شود. طبق جدول ۴، با انتخاب مقادیر  $0/6$  تا  $0/8$  برای ضریب  $\gamma$  به‌جای انتخاب مقادیر نزدیک به یک، درجه اقناع کلیه اهداف دارای مقدار نزدیک به ایده‌آل مثبت متناظر خود هستند.

جدول ۴. تحلیل حساسیت توابع هدف براساس ضریب جبران

ضریب جبران $\gamma$	مقدار تابع هدف ۱ و ۲ (میلیارد تومان)			درجه اقناع		
	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$\mu(Z_1)$	$\mu(Z_2)$	$\mu(Z_3)$
۰	۳۵۳۰	۲۹	-/۰۵۶	۰/۸۰۲	۰/۸۹۹	۰/۶۲۲
۰/۱	۳۸۰۰	۳۱	-/۰۵۹	۰/۷۲۳	۰/۸۶۹	۰/۶۸۶
۰/۲	۴۰۶۰	۳۳	-/۰۶۱	۰/۶۴۳	۰/۸۳۸	۰/۷۴۹
۰/۳	۳۹۲۰	۳۳	-/۰۶۱	۰/۶۸۵	۰/۸۴۶	۰/۷۳۸
۰/۴	۳۷۸۰	۳۲	-/۰۶۰	۰/۷۲۷	۰/۸۵۴	۰/۷۲۷
۰/۵	۱۸۹۰	۱۶	-/۰۳۰	۰/۳۶۴	۰/۴۲۷	۰/۳۶۴
۰/۶	۳۷۱۰	۳۸	-/۰۰۶	۰/۷۴۹	۰/۷۶۸	۰/۷۴۹
۰/۷	۳۶۵۰	۳۷	-/۰۶۲	۰/۷۶۷	۰/۷۸۳	۰/۷۶۷
۰/۸	۳۵۹۰	۳۶	-/۰۶۳	۰/۷۸۵	۰/۷۹۷	۰/۷۸۵
۰/۹	۳۷۰۰	۴۰	-/۰۴۷	۰/۷۵۳	۰/۷۳۹	۰/۴۳۳
۱	۳۸۱۰	۴۳	/۰۳۱۰	۰/۷۲۰	۰/۶۸۱	۰/۰۸۱

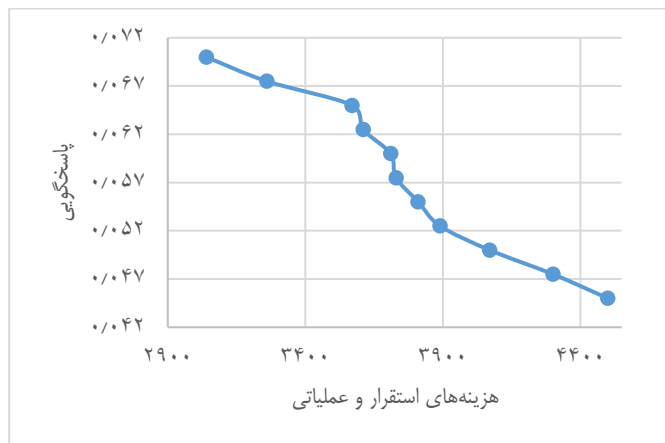
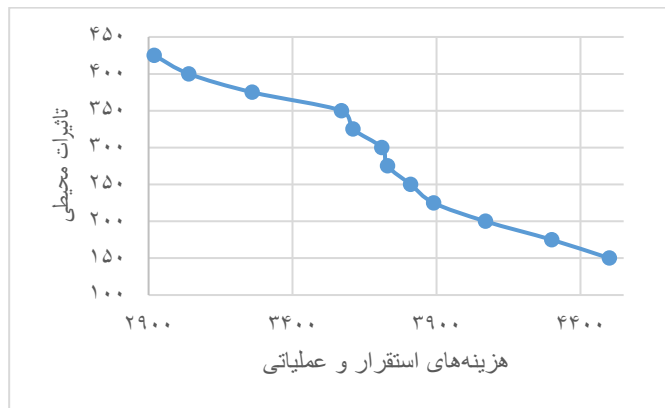
**تحلیل حساسیت وزن توابع هدف.** با توجه به جدول ۵، با یک مقدار ثابت برای  $\gamma$  که در این مسئله  $0/7$  تعیین شده است، افزایش وزن اهمیت یک تابع هدف خاص به اقناع بهتر این تابع هدف در جواب نهایی منجر می‌شود. با افزایش وزن تابع هدف اول، مراکز با تسهیلات غیرسبز بیشتری انتخاب می‌شوند. با توجه به اینکه مراکز با هزینه استقرار پایین و غیرسبز دارای هزینه کمتری نسبت به استقرار مراکز سبز هستند، با افزایش وزن تابع هدف اول و در نتیجه انتخاب مراکز غیرسبز، تسهیلات سبز انتخاب شده کاهش می‌یابد؛ همچنین در صورت افزایش وزن تابع هدف دوم که درصد کاهش کربن منتشر شده است، مراکز با هزینه استقرار بالا که مجهز به فناوری سبز هستند انتخاب و در نتیجه تعداد تسهیلات سبز (تسهیلات نوع دوم و سوم) افزایش

می‌یابد؛ همچنین با افزایش وزن تابع هدف سوم، تعداد تسهیلات سبز انتخاب‌شده و سطح پاسخگویی زنجیره تأمین افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد با توجه به اینکه فناوری‌های سبز از انعطاف‌پذیری بیشتری در حجم و زمان تحویل نسبت به فناوری‌های غیرسبز (فناوری نوع اول) برخوردار هستند، با انتخاب این نوع فناوری شرکت اصلی قادر است عملکرد بهتری در پاسخگویی به مشتریان داشته باشد.

جدول ۵. تحلیل حساسیت توابع هدف بر اساس وزن آن‌ها

وزن اهداف			درجه افتناع			مقدار تابع هدف (تابع ۱ و ۲ به میلیارد تومان)			تعداد تسهیلات سبز	تعداد تسهیلات
$w_1$	$w_2$	$w_3$	$\mu(Z_1)$	$\mu(Z_2)$	$\mu(Z_3)$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$		
۰/۷	۰/۱	۰/۲	۰/۹۳	۰/۶۵	۰/۷۳	۳۱۰۰	۴۶	۰/۰۷۲	۱۵	۲
۰/۶	۰/۲		۰/۹۴	۰/۷۱	۰/۷۳	۳۰۶۰	۴۱	۰/۰۷۲	۱۳	۴
۰/۵	۰/۳		۰/۸۳	۰/۷۷	۰/۷۱	۳۴۴۰	۳۷	۰/۰۷۱	۱۲	۵
۰/۴	۰/۴		۰/۷	۰/۸۴	۰/۷	۳۸۷۰	۳۳	۰/۰۷۱	۱۱	۵
۰/۳	۰/۵		۰/۷۲	۰/۸۵	۰/۷۳	۳۸۱۰	۳۲	۰/۰۷۲	۱۱	۶
۰/۲	۰/۶		۰/۶۳	۰/۸۸	۰/۷۱	۴۱۳۰	۳۰	۰/۰۷۱	۱۰	۶
۰/۱	۰/۷		۰/۶	۰/۹۶	۰/۷۲	۴۲۲۰	۲۵	۰/۰۷۲	۱۰	۷
۰/۶	۰/۱	۰/۳	۰/۹۵	۰/۷۳	۰/۷۹	۳۰۲۰	۴۰	۰/۰۷۵	۱۴	۳
۰/۵	۰/۲		۰/۸۲	۰/۷۹	۰/۸	۳۴۷۰	۳۶	۰/۰۷۵	۱۳	۳
۰/۴	۰/۳		۰/۷۴	۰/۸۸	۰/۷۹	۳۷۵۰	۳۱	۰/۰۷۵	۱۲	۴
۰/۳	۰/۴		۰/۷۷	۰/۸۵	۰/۷۷	۳۶۳۰	۳۳	۰/۰۷۴	۱۰	۴
۰/۲	۰/۵		۰/۷۴	۰/۹۱	۰/۸	۳۷۳۰	۲۸	۰/۰۷۶	۱۰	۵
۰/۱	۰/۶		۰/۶۸	۰/۹۵	۰/۷۹	۳۹۳۰	۲۶	۰/۰۶۵	۱۰	۷
۰/۵	۰/۱	۰/۴	۰/۹۷	۰/۷۲	۰/۹۲	۲۹۶۰	۴۰	۰/۰۶۴	۱۳	۴
۰/۴	۰/۲		۰/۸۹	۰/۷۹	۰/۸۷	۳۲۲۰	۳۶	۰/۰۶۴	۱۲	۵
۰/۳	۰/۳		۰/۸۲	۰/۸۸	۰/۸۳	۳۴۵۰	۳۱	۰/۰۶۴	۱۲	۵
۰/۲	۰/۴		۰/۸۱	۰/۸۵	۰/۸۷	۳۵۱۰	۳۳	۰/۰۶۳	۱۱	۶
۰/۱	۰/۵		۰/۷۶	۰/۹۱	۰/۹	۳۶۷۰	۲۸	۰/۰۶۳	۱۰	۷
۰/۴	۰/۱	۰/۵	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۹۱	۳۲۴۰	۲۹	۰/۰۶۲	۱۱	۵
۰/۳	۰/۲		۰/۸۴	۰/۸۹	۰/۹۷	۳۴۲۰	۳۰	۰/۰۶۲	۱۰	۷
۰/۲	۰/۳		۰/۸۲	۰/۹۱	۰/۸۹	۳۴۷۰	۲۹	۰/۰۶۱	۱۰	۸
۰/۱	۰/۴		۰/۷۴	۰/۹۴	۰/۹۴	۳۷۵۰	۲۷	۰/۰۶۱	۹	۹

نتایج حاکی از وجود تعارض بین تابع هدف هزینه با تابع هدف زیست‌محیطی و پاسخگویی است. در اینجا بهترین نتیجه زمانی به دست می‌آید که وزن تابع هزینه بین  $0/2$  و  $0/4$  باشد، وزن تابع محیطی بین  $0/1$  و  $0/3$  و وزن تابع پاسخگویی بین  $0/4$  و  $0/5$  تعیین شده باشد. همان‌طوری که در شکل ۳، مشخص است، به دلیل رفتار توابع هدف، با افزایش وزن تابع هزینه، مراکز با فناوری کم هزینه انتخاب می‌شوند. با این حال، افزایش وزن تابع هزینه باعث افزایش نامطلوب تأثیرات محیطی و همچنین کاهش سطح پاسخگویی می‌شود.



شکل ۳. تحلیل حساسیت بر روی توابع هدف (ارقام تابع هدف ۱ و ۲ به میلیارد تومان)

**تحلیل حساسیت مالیات کربن.** طرح مالیات کربن که به تفصیل مورد بحث قرار گرفت، در مدل اعمال می‌شود. در اینجا، تحلیل حساسیت تابع هزینه کل زنجیره تأمین حلقه‌بسته بر حسب تغییر نرخ مالیات کربن بررسی می‌شود. در ایران مالیات کربن توسط دولت در بیشتر صنایع هنوز گرفته نمی‌شود. در سال ۱۴۰۱، چندین سازمان بزرگ کشور، قیمت‌گذاری داخلی کربن را بین ۵۰۰ تا

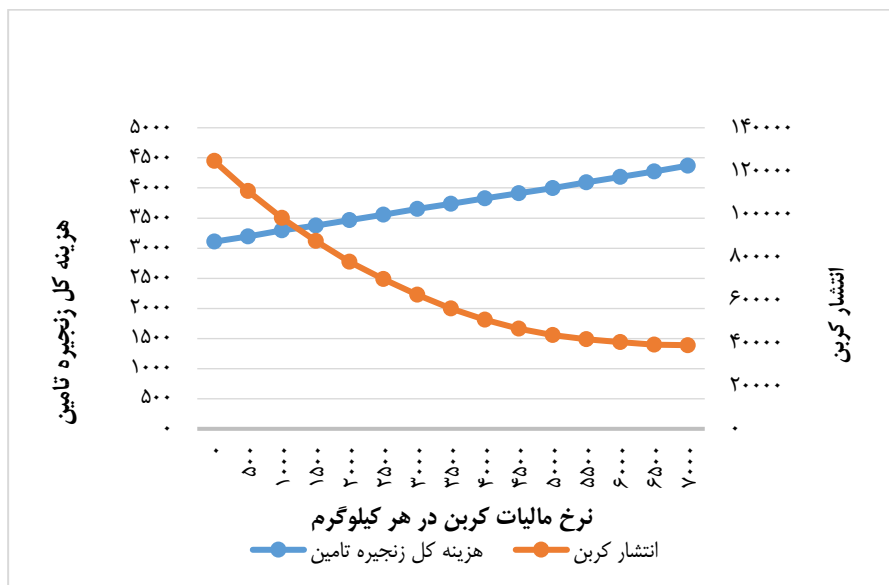
۱۵۰۰ تومان به‌ازای هر کیلوگرم انتشار کربن منطقی دانسته‌اند. شرکت‌های بزرگ، کوچک و متوسط در ایران هنوز فعالیت‌های عملیاتی خود را با در نظر گرفتن حداقل‌سازی انتشار کربن مورد بررسی قرار نداده‌اند. در پژوهش حاضر با توجه به چندین توصیه ارائه‌شده در مبانی نظری (مانند [۲۰])، کل هزینه زنجیره تأمین را برای قیمت کربن از صفر تومان تا ۷ هزار تومان به‌ازای هر کیلوگرم انتشار کربن به‌دست آورده شده است. تغییرات در مقادیر انتشار کربن، هزینه تولید و بازیافت برحسب فناوری تولید و بازیافت سبز و غیرسبز و هزینه کل زنجیره تأمین حلقه‌بسته برای نرخ‌های مختلف مالیات کربن در جدول ۶ آورده شده است.

با افزایش قیمت مالیات کربن، انتشار کل کربن کاهش می‌یابد تا هزینه‌های تولید و بازیافت به کمک تسهیلات سبز و غیرسبز و سایر هزینه‌های عملیاتی موجود در مدل متعادل شود. با این حال کل هزینه زنجیره تأمین را می‌توان با افزایش قیمت کربن به‌طور مداوم افزایش داد. مقدار هزینه کل زنجیره تأمین حلقه‌بسته و مقدار انتشار کربن با افزایش قیمت کربن در شکل ۴، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با محدوده قیمت کربن از ۵۰۰۰ تا ۷۰۰۰ تومان هیچ تغییری در انتشار کربن ایجاد نمی‌شود؛ درحالی‌که هزینه کل زنجیره تأمین افزایش می‌یابد. محتمل‌ترین قیمت کربن برای اجرا توسط دولت ایران توسط بسیاری از کارشناسان در حدود ۲۰۰۰ تومان در هر کیلوگرم پیشنهاد شده است که در آن سطح هزینه کل زنجیره تأمین ۳۲۲۸ میلیارد تومان و انتشار کل کربن ۷۷۷۲۰ کیلوگرم است. با نرخ مالیات کربن ۲۰۰۰ تومان در هر کیلوگرم، کاهش انتشار کربن ۳۷ درصد و افزایش در هزینه زنجیره تأمین حلقه‌بسته ۱۱ درصد است؛ همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ مالیات کربن، هزینه تولید و بازیافت به کمک فناوری‌های سبز افزایش می‌یابد که نمایانگر استفاده بیشتر از این تسهیلات بجای تسهیلات غیرسبز است.



جدول ۶. نتایج حل مدل برای نرخ‌های متفاوت مالیات کربن (هزینه‌ها به میلیارد تومان)

قیمت کربن در هر کیلوگرم (تومان)	هزینه تولید		هزینه بازیافت		مقدار انتشار کربن	هزینه کل زنجیره تأمین
	فناوری غیرسبز	فناوری سبز	فناوری غیرسبز	فناوری سبز		
۰	۶۲۲	۰	۲۳۳	۰	۱۲۴۵۲۰	۳۱۰۸
۵۰۰	۵۹۳	۴۶	۲۲۳	۱۷	۱۱۰۵۲۰	۳۱۹۵
۱۰۰۰	۵۶۵	۹۴	۲۱۲	۳۵	۹۸۱۲۰	۳۲۹۴
۱۵۰۰	۵۳۰	۱۴۵	۱۹۹	۵۴	۸۷۳۲۰	۳۳۷۵
۲۰۰۰	۴۹۵	۱۹۸	۱۸۶	۷۴	۷۷۷۲۰	۳۴۶۸
۲۵۰۰	۴۵۷	۲۵۴	۱۷۱	۹۵	۶۹۶۴۰	۳۵۵۵
۳۰۰۰	۴۱۸	۳۱۳	۱۵۷	۱۱۷	۶۲۴۰۰	۳۶۵۴
۳۵۰۰	۳۷۴	۳۷۴	۱۴۰	۱۴۰	۵۶۰۰۰	۳۷۳۵
۴۰۰۰	۳۲۸	۴۳۷	۱۲۳	۱۶۴	۵۰۷۲۰	۳۸۲۵
۴۵۰۰	۲۷۹	۵۰۳	۱۰۵	۱۸۹	۴۶۵۲۰	۳۹۱۲
۵۰۰۰	۲۲۸	۵۷۱	۸۶	۲۱۴	۴۳۵۲۰	۳۹۹۶
۵۵۰۰	۱۷۵	۶۴۳	۶۶	۲۴۱	۴۱۷۲۰	۴۰۹۲
۶۰۰۰	۱۲۰	۷۱۷	۴۵	۲۶۹	۴۰۳۲۰	۴۱۸۵
۶۵۰۰	۶۱	۷۹۴	۲۳	۲۹۸	۳۹۱۲۰	۴۲۷۵
۷۰۰۰	۰	۸۷۴	۰	۳۲۸	۳۸۹۰۰	۴۳۷۱



شکل ۴. تحلیل حساسیت نرخ مالیات کربن بر روی هزینه کل زنجیره تأمین و انتشار کربن

شرکت‌های تولیدی در سراسر جهان در تلاش هستند تا عملیات پایدار و سبز را به‌طور کامل اتخاذ کنند. مدیریت نرخ کمتر ردپای کربن برای دستیابی به اهداف پایدار بسیار مهم است. با پیشرفت‌های نظری در زمینه مدیریت زنجیره تأمین، این واقعیت ثابت شده است که زنجیره‌های تأمین حلقه‌بسته به‌طور قابل توجهی ردپای کربن را کاهش می‌دهند. پژوهش حاضر، یک مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته را برای یافتن طرح مالیات کربن بهینه با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های مختلف و ردپای کربن مورد بحث قرار می‌دهد.

**پیشنهاد‌های نظری و مدیریتی.** به دست آوردن تعادل بین هزینه و انتشار کربن برای شرکت‌های تولیدی چالش برانگیز است. اتخاذ سیاست‌ها و عملیات سبز و پایدار به افزایش هزینه‌های کلی تولید و توزیع محصولات منجر می‌شود. با قوانین و سیاست‌های سخت‌گیرانه در مورد نیاز به اتخاذ روش‌های سبز و پایدار، شرکت‌ها چاره‌ای جز استفاده از فناوری‌های سبز برای چالش‌های پیش‌آمده ندارند. در ایران، به دلیل نبود قوانین مالیات بر کربن هنوز شرکت‌ها سیاست داخلی مالیات کربن را برای کنترل انتشار کربن خود ندارند. این روند هنوز در شرکت‌های مختلف دیده نمی‌شود؛ بنابراین به سهم گسترده شرکت‌ها در کل انتشار کربن ملی منجر می‌شود. برای کاهش انتشار خالص کربن، شرکت‌ها باید از اتخاذ سیاست‌ها و عملیات سبز و پایدار اطمینان حاصل کنند. مدل مورد بحث در مطالعه حاضر می‌تواند برای تصمیم‌گیرندگان مدیریتی برای به دست آوردن مبادله مطلوب بین هزینه‌ها، سطح پاسخگویی و انتشار کربن بسیار مفید باشد. شرکت‌ها همچنین می‌توانند در مورد نرخ بهینه مالیات کربن داخلی تصمیم بگیرند؛ به روشی که طرح توزیع در زنجیره تأمین را بهینه می‌کند.

در حال حاضر، ایران در شرایط سختی از نظر اقتصادی قرار دارد که وضع قوانین سخت‌گیرانه، به‌خصوص برای شرکت‌های کوچک و متوسط، بار پولی غیرقابل‌تحملی را به آن‌ها وارد می‌کند. با این حال با مطالعه موردی مورد بحث در این پژوهش، مشخص شد که مالیات کربن ۲۰۰۰ تومان در هر کیلوگرم باید توسط دولت اعمال شود؛ اما این مقدار بار زیادی را برای شرکت‌های کوچک و متوسط، مانند باتری‌سازان وارد می‌کند که در حال حاضر با قیمت‌گذاری دستوری باتری و کمبود مواد اولیه دست‌وپنجه نرم می‌کنند. بهترین راه برون‌رفت از این وضعیت می‌تواند افزایش آگاهی گروه‌های مدیریتی شرکت‌ها نسبت به استفاده از فناوری‌های سبز و منابع تجدیدپذیر انرژی باشد؛ همچنین با ایجاد انگیزه در آن‌ها برای حرکت به سمت فناوری‌های سبز و منابع تجدیدپذیر با ارائه نرخ‌های یارانه‌ای در ابتدا و در مرحله بعد، پس از رسیدن به سطح خاصی از ثبات، سیاست‌گذاران می‌توانند مالیات کربن را طبق پیشنهاد اعمال کنند.

همان‌طوری که مشاهده شد، برای ارتقای جنبه زیست‌محیطی زنجیره تأمین و طراحی سبز آن توصیه می‌شود از تسهیلات سبز بیشتری استفاده شود. با اهمیت بیشتر دادن به جنبه

محیطی، مراکز با هزینه استقرار بالا که مجهز به فناوری سبز هستند، انتخاب و در نتیجه تعداد مراکز سبز افزایش خواهد یافت. در این صورت، به‌رغم افزایش هزینه‌های زنجیره تأمین، بعد زیست‌محیطی زنجیره تأمین بهبود خواهند یافت؛ هرچند به دلیل ظرفیت بالای تسهیلات نوع سبز، افزایش در هزینه‌های زنجیره تأمین کم است. از سوی دیگر، در صورت توجه بیشتر به بعد پاسخگویی زنجیره تأمین، هزینه‌ها افزایش خواهد یافت. برای بهبود سطح پاسخگویی زنجیره تأمین پیشنهاد می‌شود مراکز تولیدی، مراکز توزیع و هیبریدی در مناطقی مستقر شوند که در نزدیکی مشتریان قرار داشته باشند. در نهایت برای کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین باتری‌سازی، استقرار مراکز هیبریدی به‌جای مراکز توزیع و مراکز جمع‌آوری، استفاده از سرب بازیافت‌شده به‌جای خرید آن از تأمین‌کنندگان، انتخاب مکان بهینه برای استقرار تسهیلات و جمع‌آوری باتری‌های مستعمل پیشنهاد می‌شود.

##### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در پژوهش حاضر برای حل مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته تحت شرایط عدم قطعیت ترکیبی، یک رویکرد برنامه‌ریزی جدید موسوم به «برنامه‌ریزی تصادفی امکانی» به‌کار گرفته شد. این مدل به‌صورت چنددوره‌ای و چندمحصولی است که تصمیمات مکان‌یابی، تخصیص، انتخاب فناوری و سطح ظرفیت را تعیین می‌کند. توابع هدف در مدل‌سازی مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته شامل توابع حداقل‌سازی هزینه‌ها، حداقل‌سازی تأثیرات محیطی و حداکثرسازی پاسخگویی است. مبادله‌ای بین هزینه، سطح پاسخگویی، تأثیرات محیطی ناشی از انتشار کربن جهت تعیین نوع فناوری و نرخ مالیات کربن مؤثر ایجاد شد. نتایج نشان می‌دهد که بهتر است مالیات کربن ۲۰۰۰ تومان در هر کیلوگرم توسط دولت اعمال شود تا هم بار مالی زیادی به شرکت‌های کوچک و متوسط تحمیل نکند و هم باعث تشویق آن‌ها به ارتقای فناوری‌های تولید و بازیافت خود شود. پژوهش‌های پیشین مانند گلپیرا و جوانمردان (۲۰۲۲) و هاشمی و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان دادند که در نظر گرفتن یک سطح معقول برای مالیات کربن باعث کمک به ارتقای فناوری و بهبود سودآوری تولیدکنندگان می‌شود. طبق نتایج حل مدل، برای بهبود سطح پاسخگویی، کاهش تأثیرات زیست‌محیطی و بهبود پاسخگویی بهتر است از فناوری‌های سبز در مراکز تولید و بازیافت استفاده شود و مراکز تولید و توزیع نیز در نزدیک مشتریان تأسیس شوند. استفاده از تسهیلاتی ترکیبی به‌جای تسهیلات توزیع و جمع‌آوری به کاهش هزینه‌های استقرار و نزدیکی به بازار کمک می‌کند. فناوری‌های سبز از انعطاف‌پذیری بیشتری در حجم و زمان تحویل برخوردار هستند و می‌توانند شرکت اصلی را قادر سازند تا عملکرد بهتری در پاسخگویی به مشتریان داشته باشند؛ همچنین شرکت‌ها با انتخاب فناوری‌های سبز الزامات و قوانین زیست‌محیطی را به نحو بهتری رعایت می‌کنند. به‌وضوح نتیجه‌گیری می‌شود که برای دستیابی

به هدف پایداری با هدف مدیریت انتشار کربن، تجزیه و تحلیل کامل زنجیره تأمین صنایع موردنیاز است. دولت‌ها باید برنامه‌های ملموس‌تری در خصوص سیاست‌های مالیات کربن، نه تنها برای صنایع بزرگ، بلکه برای شرکت‌های خرد، کوچک و متوسطی مانند باتری‌سازان نیز انجام دهند. این امر صنایع را به سرمایه‌گذاری بیشتر بر روی زیرساخت‌ها یا فناوری‌های سبزی سوق می‌دهد که در نهایت به آن‌ها در کاهش انتشار کربن کمک می‌کند. این تحلیل ممکن است به سیاست‌گذاران کمک کند تا در مورد مالیات بهینه کربن بر روی شرکت‌های باتری‌سازی در ایران و سایر شرکت‌ها تصمیم بگیرند.

در پژوهش‌های آتی می‌توان به بررسی بُعد پایداری در زنجیره تأمین حلقه‌بسته پرداخت تا ضمن بررسی اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی، اهداف اجتماعی نیز بررسی شود؛ همچنین می‌توان از رویکردهای حل چندهدفه دیگر مثل برنامه‌ریزی آرمانی برای انتخاب مقادیر مناسب برای تصمیمات مختلف استفاده کرد.

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

## منابع

1. Carlsson, C., & Fullér, R. (2001). On possibilistic mean value and variance of fuzzy numbers. *Fuzzy sets and systems*, 122(2), 315-326.
2. De, M., & Giri, B. C. (2020). Modelling a closed-loop supply chain with a heterogeneous fleet under carbon emission reduction policy. *Transportation research part e: logistics and transportation review*, 133, 101813.
3. Dubois, D., & Prade, H. (1980). Systems of linear fuzzy constraints. *Fuzzy Sets and Systems*, 3(1), 37-48.
4. Devika, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (2014). Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques. *European Journal of Operational Research*, 235(3), 594-615.
5. Farrokh, M., Azar, A., Jandaghi, G., & Ahmadi, E. (2018). A novel robust fuzzy stochastic programming for closed loop supply chain network design under hybrid uncertainty. *Fuzzy Sets and Systems*, 341, 69-91.
6. Farrokh, M., Azar, A., & Jandaghi, G. (2016). Developing a Robust Fuzzy Programming Approach for Closed Loop Supply Chain Design. *The Journal of Industrial Management Perspective*, 6(2), 9-43. (In Persian)
7. Golpîra, H., & Javanmardan, A. (2022). Robust optimization of sustainable closed-loop supply chain considering carbon emission schemes. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 640-656.
8. Gao, J., Xiao, Z., Cao, B., & Chai, Q. (2018). Green supply chain planning considering consumer's transportation process. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 109, 311-330.
9. Guo, Y., Shi, Q., Guo, C., Li, J., You, Z., & Wang, Y. (2022). Designing a sustainable-remanufacturing closed-loop supply chain under hybrid uncertainty: Cross-efficiency sorting multi-objective optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 172(PA), 108639.
10. Haddadsisakht, A., & Ryan, S. M. (2018). Closed-loop supply chain network design with multiple transportation modes under stochastic demand and uncertain carbon. *International journal of production economics*, 195, 118-131.
11. Hashmi, N., Jalil, S. A., & Javaid, S. (2022). A multi-objective model for closed-loop supply chain network based on carbon tax with two fold uncertainty: An application to leather industry. *Computers & Industrial Engineering*, 173, 108724.
12. Khan, M. S., Saengon, P., Alganad, A. M. N., Chongcharoen, D., & Farrukh, M. (2020). Consumer green behaviour: An approach towards environmental sustainability. *Sustainable Development*, 28(5), 1168-1180.
13. Keyvanshokoh, E., Ryan, S. M., & Kabir, E. (2016). Hybrid robust and stochastic optimization for closed-loop supply chain network design using accelerated Benders decomposition. *European Journal of Operational Research*, 249(1), 76-92.
14. Linton, J. D., Klassen, R., & Jayaraman, V. (2007). Sustainable supply chains: An introduction. *Journal of operations management*, 25(6), 1075-1082.
15. Liu, B., & Liu, Y. K. (2002). Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, 10(4), 445-450.
16. Lin, B. (2004). Uncertainty theory: an introduction to its axiomatic foundations.

17. Liu, B., & Iwamura, K. (1998). Chance constrained programming with fuzzy parameters. *Fuzzy sets and systems*, 94(2), 227-237.
18. Li, X., Lu, S., Li, Z., Wang, Y., & Zhu, L. (2022). Modeling and optimization of bioethanol production planning under hybrid uncertainty: A heuristic multi-stage stochastic programming approach. *Energy*, 245, 123285.
19. Mirakhorli, A. (2014). Fuzzy multi-objective optimization for closed loop logistics network design in bread-producing industries. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(1), 349-362.
20. Pradhan, B. K., Ghosh, J., Yao, Y. F., & Liang, Q. M. (2017). Carbon pricing and terms of trade effects for China and India: A general equilibrium analysis. *Economic Modelling*, 63, 60-74.
21. Pishvaei, M. S., & Razmi, J. (2012). Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied Mathematical Modelling*, 36(8), 3433-3446.
22. Ramezani, M., Bashiri, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. *Applied Mathematical Modelling*, 37(1), 328-344.
23. Reddy, K. N., Kumar, A., Sarkis, J., & Tiwari, M. K. (2020). Effect of carbon tax on reverse logistics network design. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 106184.
24. Seifbarghy, M. (2022). A multi-objective sustainable closed loop supply chain model considering suppliers evaluation and using SWARA-WASPAS method, to appear. *The Journal of Industrial Management Perspective*, 12(3), 63-88. (In Persian).
25. Seif Barghi, M., & Shirin Bayan, P. (2023). Fuzzy Multi-objective Production Distribution Planning by Considering CO2 Emission Cost and Solving by a Novel Fuzzy Multi-choice Goal Programming. *The Journal of Industrial Management Perspective*, 13(1), 173-198. (In Persian).
26. Soleimani, H., Chhetri, P., Fathollahi-Fard, A. M., Mirzapour Al-e-Hashem, S. M. J., & Shahparvari, S. (2022). Sustainable closed-loop supply chain with energy efficiency: Lagrangian relaxation, reformulations and heuristics. *Annals of Operations Research*, 1-26.
27. Subulan, K., Taşan, A. S., & Baykasoğlu, A. (2015). A fuzzy goal programming model to strategic planning problem of a lead/acid battery closed-loop supply chain. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 243-264.
28. Salehi-Amiri, A., Zahedi, A., Akbapour, N., & Hajiaghahi-Keshteli, M. (2021). Designing a sustainable closed-loop supply chain network for walnut industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110821.
29. Sahebjamnia, N., Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghahi-Keshteli, M. (2018). Sustainable tire closed-loop supply chain network design: Hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks. *Journal of cleaner production*, 196, 273-296.
30. Shen, B., Zhu, C., Li, Q., & Wang, X. (2021). Green technology adoption in textiles and apparel supply chains with environmental taxes. *International Journal of Production Research*, 59(14), 4157-4174.
31. Tao, Y., Wu, J., Lai, X., & Wang, F. (2020). Network planning and operation of sustainable closed-loop supply chains in emerging markets: Retail market

- configurations and carbon policies. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 144, 102131.
32. Torabi, S. A., & Hassini, E. (2008). An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. *Fuzzy Sets and Systems*, 159(2), 193-214.
33. Tang, C.S., 2006. Perspectives in supply chain risk management. *International Journal of Production Economics*, 103, 451-488.
34. Wang, M., Wu, J., Kafa, N., & Klibi, W. (2020). Carbon emission-compliance green location-inventory problem with demand and carbon price uncertainties. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 142, 102038.
35. Yu, Z., & Khan, S. A. R. (2022). Green supply chain network optimization under random and fuzzy environment. *International Journal of Fuzzy Systems*, 24(2), 1170-1181.
36. Zeballos, L. J., Méndez, C. A., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2014). Multi-period design and planning of closed-loop supply chains with uncertain supply and demand. *Computers & Chemical Engineering*, 66, 151-164.