

Designing a Sustainable and Reliable Supply Chain Network Under Uncertainty (Case Study: West of Carton)

Sajad Amirian, Maghsoud Amiri*, Mohammad Taghi Taghavifard

* Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.

(Received: 13/09/2023; Accepted: 25/10/2023)

Abstract

Customers now care more than ever about the sustainability and reliability of products packaging. This research considers a multi-product and multi-period closed-loop supply chain design problem with three objectives of profitability, social responsibility, and reliability under uncertain conditions. Triangular fuzzy numbers have been used for non-deterministic parameters and a robust probabilistic programming approach with Me scale has been used to deal with fuzzy constraints. The proposed approach eliminates the need for iterative consideration by decision-makers by providing unlimited choices from the optimism-pessimism spectrum. The mathematical model developed in this study is of mixed integer linear programming type, which is implemented Augmented Epsilon Constraint (AEC) method in GAMS software to solve it and find Pareto optimal solutions. The accuracy of the overall performance of the proposed model has been evaluated with four examples (based on the coefficients of the objective functions) from a case study in the Carton-Making Industry. The obtained results indicate the existence of a conflict between the three objective functions. With this account, decision-makers should demand lower profits for increased environmental protection and improved reliability compared to the situation where only the economic aspect is considered. The variability of the justified decision space in the Me criterion has helped to solve the supply chain network design problem more flexibly and closer to reality through the possibility of exchange between the objective function and the risk-taking level of the managers.

Keywords: Sustainability, Reliability, Closed-Loop Supply Chain Network, Robust Possibilistic Programming

علمی - پژوهشی

طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار و قابل اطمینان تحت عدم قطعیت (مطالعه موردی: غرب کارتن)

سجاد امیریان^۱، مقصود امیری^{۲*}، محمدتقی تقوی فرد^۳

۱- دکتری مدیریت صنعتی، 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
(دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۳)

چکیده

مشتریان در حال حاضر بیش از هر زمان دیگری به پایداری و قابلیت اطمینان بسته‌بندی محصولات اهمیت می‌دهند. در این پژوهش یک مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته به صورت چند محصولی و چند دوره‌ای با سه هدف سودآوری، مسئولیت‌پذیری اجتماعی و قابلیت اطمینان تحت شرایط عدم قطعیت مد نظر قرار گرفته است. از اعداد فازی مثلثی برای پارامترهای غیرقطعی و از رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار با مقیاس Me برای مقابله با محدودیت‌های فازی استفاده شده است. رویکرد پیشنهادی نیاز به بررسی تکراری توسط تصمیم‌گیرندگان را با ارائه انتخاب‌های نامحدودی از طیف خوش‌بینی-بدبینی مرتفع کرده است. مدل ریاضی توسعه یافته در این پژوهش از نوع برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط می‌باشد، که برای حل آن و یافتن جواب‌های بهینه پارتو، روش محدودیت افسیلون تقویت شده (AEC) در نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی شده است. صحت عملکرد کلی مدل پیشنهادی با چهار نمونه (بر اساس ضرایب توابع هدف) از یک مطالعه موردی در صنعت کارتن‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از وجود تضاد بین سه تابع هدف حکایت دارد. با این حساب تصمیم‌گیرندگان باید در مقایسه با وضعیتی که فقط جنبه اقتصادی در نظر گرفته می‌شود، برای حفاظت بیشتر از محیط زیست و بهبود قابلیت اطمینان، سود کمتری مطالبه کنند. تغییرپذیری فضای موجه تصمیم در معیار Me از طریق امکان تبادل میان تابع هدف و سطح خطرپذیری مدیران به حل انعطاف‌پذیرتر و نزدیک به واقعیت مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین کمک کرده است.

کلید واژه‌ها: پایداری، قابلیت اطمینان، شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، برنامه‌ریزی امکانی استوار

۱- مقدمه

هزینه‌ها درک شده است و به همین دلیل، بسیاری از تولیدکنندگان تمایلی به پیاده‌سازی آن‌ها ندارند [۲]. با این حال، شرکت‌ها مسئول خروجی‌های اقتصادی، زیست محیطی (ردپای کربن) و اجتماعی ناشی از عملیات داخلی و فرآیندهای تأمین خود هستند [۳]. این مسئولیت از آنجا حیاتی می‌شود که مشتریان برای ارزیابی شرکت‌ها، علاوه بر قیمت و کیفیت، ابعاد محیطی و اجتماعی آن‌ها را نیز رصد می‌کنند. با این حال، روندهای جهانی منبع‌یابی مبتنی بر قیمت، سازمان‌ها را مجبور به خرید از تأمین‌کنندگان ارزان‌تر اما "کمتر قابل اعتماد" و "کمتر پایدار" می‌کند [۴]. یکی از مهمترین عناصر کیفی کسب و کارها پرهیز از انقطاع تولید و اختلال خدمت مانند تحویل ناقص و با تأخیر کالا/خدمت است. با این حال، بر اساس ماهیت و تنوع تجهیزات، انواع مختلفی از خرابی‌ها در زنجیره تأمین ممکن است وجود داشته باشد. خرابی یکی از اجزای شبکه زنجیره تأمین ممکن است عملکرد کل زنجیره تأمین را مختل کند یا در بهترین

اثرات نامطلوب زیست محیطی صنعتی شدن و زندگی پیشرفته ما به یک مشکل جهانی تبدیل شده است و نیاز روزافزونی به راه‌حلی برای این پدیده‌ها وجود دارد. بسیاری از آنچه از نقطه نظر پایداری در کشورهای توسعه یافته حاصل شده، به خاطر حمایت دولت و سیاست‌های مرتبط امکان‌پذیر شده است [۱]. در مقابل، کسب‌وکارها در اقتصادهای نوظهور به دلیل کمبود منابع طبیعی، نیروی کار ماهر، حمایت‌های نظارتی و غیره با چالش‌های اجتماعی و صنعتی زیادی مواجه هستند. در این اقتصادها، صنایع برای رشد بیشتر و برنده شدن در فضای رقابتی کنونی، محیط زیست را به خطر می‌اندازند و بیشتر بر رشد اقتصادی تمرکز می‌کنند. به عبارت دیگر، اقدامات پایداری در کشورهای کمتر توسعه یافته اغلب به معنای سرمایه‌گذاری سنگین یا افزایش

*رایانامه نویسنده مسئول: amiri@atu.ac.ir

مسئله‌ی زیرساختاری مدیریت زنجیره تأمین، اثرات دیرپایی روی سایر تصمیم‌های تاکتیکی و عملیاتی می‌گذارد [۱۳]. تصمیمات برنامه‌ریزی در این سه سطح مدیریتی به هم مرتبط هستند و در نظر گرفتن آن‌ها در هر یک از این سطوح جدا از سطوح دیگر، کارایی و کاربرد تصمیمات را کاهش می‌دهد [۱۴]. بیشترین هزینه عملیاتی سازمان‌ها که معمولاً محسوس نیست، مربوط به تصمیم‌گیری اشتباه در زمینه‌ی طراحی و استقرار تسهیلات می‌باشد. همچنین تصمیم‌گیری و انتخاب ظرفیت مناسب برای تسهیلات جزء مسائل مهم طراحی شبکه می‌باشد که اغلب نادیده گرفته شده است و معمولاً با حداکثر ظرفیت بیان می‌شود. در واقعیت عواملی مثل هزینه نگهداری و یا جریمه کمبود موجودی می‌تواند تصمیم‌گیری در مورد ظرفیت تسهیلات را تحت تأثیر قرار دهد. با این حال، یکپارچگی و همسویی تصمیمات، طراحی و برنامه‌ریزی شبکه را پیچیده‌تر می‌کند. علاوه بر این، اثرات طراحی و تأسیس شبکه زنجیره تأمین برای سال‌های متمادی باقی می‌ماند، در طول این مدت پارامترهای محیط کسب و کار (مثل تقاضای مشتریان) ممکن است، تغییر کنند [۱۵]. این تغییرات عدم قطعیت فزاینده‌ای را ایجاد کرده است [۱۶]. هر چه محیط آشفته‌تر و نرخ تغییرات سریع‌تر باشد روش‌هایی که بر مبنای پیش‌بینی‌های قطعی اقدام به طراحی زنجیره تأمین می‌کنند، کارایی خود را از دست می‌دهند. تا جایی که دیویس اشاره می‌کند که مشکل واقعی در مدیریت و کنترل شبکه‌های پیچیده "مدیریت عدم قطعیت" است [۱۷]. بنابراین، یک شبکه زنجیره تأمین قوی و خوب طراحی شده نیازمند بکارگیری روش‌هایی است که بتواند عدم قطعیت موجود را لحاظ کند. به عبارت دیگر، تصمیمات طراحی شبکه زنجیره تأمین باید به اندازه کافی با دوام باشد تا بتواند تحت محیط‌های نامطمئن و پیچیده کسب و کارها به خوبی عمل کند [۱۳].

از آنجا که تصمیم‌های زنجیره تأمین در دنیای واقعی با عدم قطعیت از جنس شناختی نیز مواجه است. این کمبود دانش در برنامه‌ریزی امکانی توسط توابع توزیع امکانی با استفاده از داده‌های موجود یا نظر تصمیم‌گیرنده و یا با کمک خبره مدل‌سازی می‌شود. سطح اطمینان ارضای محدودیت‌های غیرقطعی در مدل برنامه‌ریزی امکانی طبق نظر تصمیم‌گیرنده و طی اجرای تعداد زیادی آزمایش زمان‌بر به صورت آزمون و خطا به صورت یک پارامتر تعیین می‌شود؛ که ممکن است سطوح اطمینان انتخاب شده همان مقادیر بهینه نباشند. در واقع، این روش‌ها قادر به تضمین بهینه‌سازی سطح رضایت و قابلیت اعتماد نتایج خروجی نیستند [۱۸]. از سوی دیگر، دستیابی به راه‌حل‌های استوار در مدل برنامه‌ریزی امکانی به دلیل عدم

حالت کارایی زنجیره را کاهش دهد. از این رو، در نظر گرفتن عامل قابلیت اطمینان در طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته، به ویژه در زنجیره‌های تأمین پایدار ضروری به نظر می‌رسد.

قابلیت اطمینان تسهیلات و تاب‌آوری در مقابل شرایط اختلال از جمله پیشرفت‌های اخیر است که توسط محققان به زنجیره تأمین اضافه شده است [۵ و ۶]. تحویل کامل و سالم محصولات به مشتریان در زنجیره تأمین، مستلزم عملکرد بدون خرابی تسهیلات، مسیرهای ارتباطی و وسایل نقلیه به عنوان اجزای شبکه زنجیره تأمین است. به بیان دیگر، قابلیت اطمینان در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین اغلب در سطح گره‌های شبکه (تسهیلات) مورد ارزیابی قرار گرفته است، در حالی که عملکرد بدون خطای زنجیره مستلزم ارزیابی قابلیت اطمینان گمان‌های شبکه (مسیرها) نیز می‌باشد. بنابراین، محاسبه قابلیت اطمینان شبکه مستلزم دانستن قابلیت اطمینان هر یک از اجزای موجود در سیستم است. شفی تأکید می‌کند که مدل‌سازی رویدادهای شدید در طراحی شبکه زنجیره تأمین به دلیل انواع فاجعه‌های متعدد و تأثیرات مخربی که بر منابع شبکه می‌گذارند، یک مسئله چالش برانگیز است [۷]. تأثیرات منفی اختلالاتی نظیر اشتباهات انسانی (فاجعه هپارین^۱)، رویدادهای طبیعی (زلزله ترکیه) و بیماری‌های همه‌گیر (کووید-۱۹) بر زنجیره‌های تأمین پایدار، بزرگ‌تر و سریع‌تر است [۸ و ۹]. اگر سیستمی نتواند از اختلالات رهایی یابد، قاعدتاً نمی‌تواند کیفیت اولیه خود را بازیابی کند و بنابراین در دستیابی به اهداف اقتصادی، زیست محیطی، و اجتماعی - نیز ناتوان است [۱۰]. این تأثیرات منفی، عواقب از دسترس خارج شدن فرآیندهای تأمین، تولید و توزیع در زنجیره تأمین است [۱۱]. بنابراین، طراحان زنجیره تأمین نیاز به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار و قابل اطمینان دارند تا توجه بیشتری به قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری و خطر داشته باشند [۱۲]. یکی از بهترین راه‌کارها برای صنایعی که می‌خواهند محصولات خود را با هزینه‌های رقابتی و کیفیتی بالاتر از رقبایشان به بازار عرضه کنند، مدیریت زنجیره تأمین است.

مدیریت زنجیره تأمین، تصمیمات مختلفی را در سطوح (استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی) و مراحل زنجیره تأمین (تأمین، تولید، توزیع، جمع‌آوری، بازیافت و حمل و نقل) شامل می‌شود. مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین، یک تصمیم راهبردی است که به پیکربندی زنجیره تأمین اشاره دارد و به عنوان یک

تحقیقاتی وجود دارد. در این راستا، در پژوهش حاضر با هدف طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار و قابل اطمینان تحت عدم قطعیت، مدل جدیدی از برنامه‌ریزی امکانی استوار بر مبنای مقیاس Me توسعه می‌یابد. مدل‌سازی در قالب مقیاس Me نسبت به مدل‌های با مقیاس Nes و Pos که به ترتیب محدود به خوش‌بینی و بدبینی هستند، ترکیب محدودی از طیف خوش‌بینی-بدبینی را در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار داده و به جواب‌های انعطاف‌پذیر و واقع‌بینانه‌تری می‌رسند. کاهش فرآیند زمانی حل مسئله مزیت دیگر مدل‌سازی بر اساس مقیاس Me است. زیرا حداقل سطح رضایت محدودیت‌های انعطاف‌پذیر با حل مدل پیشنهادی تعیین می‌شود و دیگر نیازی به حل دو مرحله‌ای مسئله نیست.

از یک طرف، اخیراً محققان در طراحی زنجیره‌های تأمین پایدار به افزونه‌های دیگری مانند قابلیت اطمینان روی آورده‌اند. به عنوان مثال، طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن ابعاد پایداری و قابلیت اطمینان در مطالعه امیریان و همکاران [۲۴] به صورت چند هدفه، چند محصولی، چند دوره‌ای و چند وجهی مدل‌سازی شده بود که به دلیل غیر خطی بودن تقریباً زمان زیادی را صرف کرده است. این غیر خطی بودن مدل توسط روابط ریاضی تعریف شده برای هزینه‌های حمل و نقل، انرژی مصرف شده در حمل و نقل، تابع هدف قابلیت اطمینان و حد انتشار دی اکسید کربن ایجاد شد. پژوهش حاضر با خطی کردن این روابط به کاهش زمان حل مسئله کمک کرده است. علاوه بر این، قابلیت اطمینان در زنجیره تأمین پیشنهادی آن‌ها فقط برای انتخاب تأمین‌کننده، احداث تسهیلات بالقوه و زمان سفر در نظر گرفته شده بود. از طرف دیگر، مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت در صنایع مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. مثلاً حسینی دهسیری و همکاران [۲۵] برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته کاغذ سنگی از رویکرد مختلط برنامه‌ریزی محدودیت شانس انعطاف‌پذیر، امکانی، تصادفی استوار استفاده کردند. با این حال، پژوهش حاضر برای کنترل عدم قطعیت در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت کارتن‌سازی از برنامه‌ریزی امکانی استوار با مقیاس Me استفاده می‌کند. در نتیجه، اهم مشارکت‌ها و نوآوری‌های این پژوهش نسبت به مطالعات قبلی به شرح ذیل می‌باشد:

۱. معرفی یک مدل عمومی جدید پایدار و قابل اطمینان برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با محصولات ارزشمند در پایان عمر به صورت چند هدفه، چند محصولی و چند دوره‌ای

حساسیت نسبت به انحرافات تابع هدف از مقدار مورد انتظار خود تضمین نمی‌شود. عدم توجه به انحرافات تابع هدف به واسطه عدم قطعیت پارامترها می‌تواند هزینه‌های سنگین و جبران‌ناپذیری را بر تصمیم‌های مدیران و در نهایت سازمان وارد کند. از این رو، برای مقابله با این وضعیت ناکارآمد رویکرد برنامه‌ریزی استوار توسعه یافته است [۱۹]. روش ریسک‌گریز بهینه‌سازی استوار به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا سطح محافظه‌کاری نتایج را با توجه به عدم قطعیت پارامترها اصلاح کنند [۲۰]. یک مسئله بهینه‌سازی به شرط تأمین همزمان شدنی بودن محدودیت‌ها و بهینگی تابع هدف، استوار محسوب می‌شود. استفاده از یک رویکرد بدبینانه یا خوش‌بینانه برای مقابله با عدم قطعیت پارامترها در برنامه‌ریزی امکانی استوار، به این دلیل که حد نهایی پارامترهای غیرقطععی را در نظر می‌گیرد موجب می‌شود جواب‌های به دست آمده از مقادیر بهینه تابع هدف انحراف زیادی داشته باشد [۲۱]. اگر چه این مشکل با بکارگیری مقیاس اعتبار (حد وسط بین خوش‌بینی و بدبینی) تا حدودی مرتفع گردید [۲۲]. با این وجود حق انتخاب تصمیم‌گیرندگان به میانه‌ی دو سر طیف محدود می‌شود. ژو و ژاو برای رفع این مشکل یک مقیاس فازی جدید به نام مقیاس Me ارائه دادند که انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به مقیاس اعتبار دارد و یک ترکیب محذب از رویکرد خوش‌بینی-بدبینی را در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهد [۲۳]. با این حال، در ادبیات طراحی شبکه زنجیره تأمین برای مواجهه با عدم قطعیت‌های شناختی در محدودیت‌های شانس، بیشتر از مقیاس‌های امکان، الزام، و اعتبار استفاده شده است و محققان به ندرت از مقیاس Me بهره گرفته‌اند.

تحت روند جهانی شدن، تجزیه و تحلیل و بهبود قابلیت اطمینان برای سیستم زنجیره‌های تأمین پایدار ضرورت بیشتری یافته و بیش از پیش در ادبیات مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، ادغام پایداری و قابلیت اطمینان در طراحی شبکه زنجیره تأمین با هدف کسب مزیت‌های بیشتر، بررسی‌های دقیق‌تری را می‌طلبد. علاوه بر این، اغلب مطالعات انجام شده با رویکرد برنامه‌ریزی امکانی در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین، تنها دیدگاه‌های خوش‌بینانه یا بدبینانه تصمیم‌گیرندگان را مدنظر قرار داده‌اند. این محدودیت در مدل‌سازی، دسترسی تصمیم‌گیرندگان را به راه‌حل‌های انعطاف‌پذیر و واقع‌بینانه کاهش می‌دهد. بنابراین، در مورد ترکیب هم‌زمان ابعاد پایداری و قابلیت اطمینان در حوزه مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته و مدل‌سازی آن با استفاده از محدودیت‌های انعطاف‌پذیر به همراه عدم قطعیت شناختی با رویکرد استوار، خلأ

مستقیم زنجیره بر روی به حداقل رساندن هزینه و جریان معکوس بر روی اقدامات سبز مانند قابلیت اطمینان اجزای استفاده شده، سهولت بازیابی و سهولت جداسازی قطعات تمرکز دارند. خلیفه‌زاده و همکاران [۲۷] نیز به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین چهارسطحی با اهداف حداقل کردن هزینه‌های عملیاتی کل عناصر زنجیره تأمین و حداکثرسازی قابلیت اطمینان سیستم و در نظر گرفتن کمبود پرداختند. رحمانی و ماهودیان [۲۸] مدل مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین را با توجه به انتشار دی اکسید کربن و عامل قابلیت اطمینان پیشنهاد دادند. لی و همکاران [۲۹] اقدام به طراحی یک سامانه انرژی تجدیدپذیر ترکیبی به همراه سیستم نمک‌زدایی به صورت پایدار و قابل اطمینان با در نظر گرفتن سناریوهای عملیاتی مختلف با نوسان در تأمین انرژی تجدیدپذیر و تقاضای متغیر برای آب کردند. این مطالعات تنها یک یا دو بعد از ابعاد پایداری را در مقایسه با قابلیت اطمینان مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند. این در حالی است که برای ارائه یک تحلیل همه جانبه از تقابل پایداری با قابلیت اطمینان، باید به هر سه بعد پایداری توجه شود. این دیدگاه سیستمی جایگاه مهمی در تحقیقات طراحی شبکه زنجیره تأمین یافته است. به نحوی که فهیم‌نیا و جبارزاده [۴] یک رویکرد برنامه‌ریزی چند هدفه فازی تصادفی در جهت تجزیه و تحلیل مبادله بین پایداری و مقاومت در مسئله طراحی زنجیره تأمین در نظر گرفتند. ظهیری و همکاران [۳۰] برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین دارویی پایدار و تاب‌آور، اهداف به حداقل رساندن هزینه کل، به حداکثر رساندن تأثیرات اجتماعی و به حداقل رساندن اقدامات زیست محیطی را در نظر گرفتند. فتاحی و گوویندان [۳۱] برای طراحی و برنامه‌ریزی یک شبکه زنجیره تأمین سوخت زیستی با هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها، یک حد بالا برای انتشار گازهای گلخانه‌ای و یک حد پایین برای مسئولیت‌پذیری اجتماعی در نظر گرفتند. جبارزاده و همکاران [۳۲] برای طراحی یک زنجیره تأمین پایدار و مقاوم طی دو مرحله، ابتدا برای ارزیابی عملکرد پایداری هر تأمین‌کننده از یک روش خوشه‌بندی c-means فازی استفاده کردند. سپس، یک مدل بهینه‌سازی تصادفی با دو هدف حداقل کردن هزینه کل مورد انتظار و حداکثرسازی عملکرد پایداری کل در مقابله با اختلالات را توسعه دادند. فضلی‌خلف و همکاران [۳۳] پایداری و قابلیت اطمینان را در طراحی یک شبکه رو به جلو زنجیره تأمین هیدروژن با وجود سه سطح تولیدکننده، انبار و مشتری در نظر گرفتند. تیرکلایی و همکاران [۳۴] در یک مطالعه موردی از

۲. در نظر گرفتن همزمان برنامه‌ریزی راهبردی (به عنوان مثال، تصمیم‌گیری در مورد مکان تسهیلات و الگوی تخصیص آن‌ها) و برنامه‌ریزی تاکتیکی (یعنی جریان محصول بین تسهیلات رده‌های مختلف و سیاست بهینه موجودی در هر مرکز توزیع) در مدل پیشنهادی

۳. اعمال سیاست سقف و مبادله برای به حداقل رساندن انتشار کل کربن در مدل پیشنهادی ناشی از احداث تأسیسات، انرژی مصرفی در فرآیندهای عملیاتی و سوخت مصرف شده در شبکه حمل و نقل

۴. اندازه‌گیری بعد اجتماعی پایداری با در نظر گرفتن تعداد مشاغل ایجاد شده، روزهای از دست رفته ناشی از اختلالات کاری، نرخ بیکاری و توسعه متوازن اقتصادی مناطق به دو صورت ثابت (ناشی از احداث تأسیسات) و متغیر (به ازای هر ساعت فعالیت عملیاتی)

۵. ارزیابی و توسعه کمی قابلیت اطمینان در مدل پیشنهادی به دو صورت ثابت (قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان انتخابی و تأسیسات احداث شده) و متغیر (نرخ خرابی هر ساعت فعالیت عملیاتی در تسهیلات و مجموع نرخ خرابی مسیر و وسیله نقلیه در حمل و نقل شبکه)

۶. توسعه یک رویکرد بهینه‌سازی ترکیبی امکانی استوار چند هدفه جهت برخورد با عدم قطعیت در پارامترهای مهم مدل (مانند تقاضای محصولات نهایی، قیمت فروش محصولات و مواد بازیافتی، تعداد فرصت شغلی ایجاد شده، قابلیت اطمینان تأمین‌کننده)

۷. ارائه ترکیب محدبی از نگرش‌های تصمیم‌گیرندگان و همچنین کاهش فرآیند حل از دو مرحله به یک مرحله با توسعه برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر توسط مقیاس Me

۸. ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی در دنیای واقعی با ارائه یک مورد مطالعاتی جدید در صنعت چاپ و بسته‌بندی

سازمان‌دهی ادامه مقاله به این صورت است که در بخش ۲ تقابل پایداری و قابلیت اطمینان در ادبیات مربوط به مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین بررسی می‌شود. بخش ۳ به مواد و روش تحقیق مربوط می‌شود. یافته‌های پژوهش در بخش ۴ ارائه می‌گردد. مقاله با ارائه نتیجه‌گیری و پیشنهادات مرتبط در بخش ۵ خاتمه می‌یابد.

۲- پیشینه تحقیق

در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین، مقاله غایب‌لو و همکاران [۲۶] جزء اولین مطالعاتی است که بعد پایداری اقتصادی و قابلیت اطمینان را به صورت همزمان در نظر گرفته است. جریان

خدمات از جمله مراقبت‌های بهداشتی و آموزشی اشاره کرد. علاوه بر این، حل مدل آن‌ها به دلیل غیر خطی بودن تقریباً زمان زیادی را صرف کرده است. این در حالی است که ماهیت بقیه مدل‌ها در مقالات بررسی شده برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح (MILP) می‌باشد. طالعی‌زاده و همکاران [۳۹] برای بهینه‌سازی یک زنجیره تأمین پایدار با وجود عوامل تاب‌آوری و تصمیمات قیمت‌گذاری، یک برنامه‌ریزی دو سطحی بر اساس مدل بازی استکلبرگ^۱ با رهبری دولت و پیروی تولیدکننده برای بررسی تأثیر نرخ مالیات انتشار بر ایفای تعهدات مسئولیت زیست محیطی و اجتماعی دولت ارائه دادند. کارایی مدل پیشنهادی با اجرای آن در یک مرکز تولید/بازسازی کارت‌ریج در ایران بررسی شده است.

ورود قابلیت اطمینان به حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار با هدف اجتناب از خرابی، اختلال و قطع جریان تولید زنجیره تأمین موجب گسترش بیشتر مدل‌های ریاضی غیرقطعی شده است. دلیل این ادعا، در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل‌سازی ۱۸ مقاله از مجموع ۲۲ مقاله بررسی شده است که به نزدیک شدن مدل به شرایط دنیای واقعی کمک می‌کند. به عنوان مثال، حسینی مطلق و همکاران [۴۰] برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین برق تاب‌آور و پایدار در شرایط عدم قطعیت، یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه شامل حداقل‌سازی هزینه، حداقل کردن اقدامات کاهنده‌ی تاب‌آوری و حداکثرسازی برخی از جنبه‌های مسئولیت‌پذیری اجتماعی شرکتی توسعه دادند. آن‌ها از یک رویکرد استوار جدید برای مقابله با عدم قطعیت تقاضای برق براساس بهینه‌سازی استوار و تئوری امکان در منطق فازی استفاده کردند. تسائو و سان [۴۱] از رویکرد برنامه‌ریزی استوار فازی چند هدفه در حل یک مسئله طراحی سیستم برق پایدار و قابل اعتماد در یک محیط نامشخص استفاده کردند. مدل پیشنهادی عدم قطعیت در تقاضا، ماهیت متناوب منابع انرژی تجدیدپذیر و پارامترهای هزینه را در نظر می‌گیرد. یک مطالعه موردی در ویتنام برای نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی هزینه کل سیستم برق، از جمله هزینه‌های پایداری و قابلیت اطمینان را تقریباً ۴/۲ درصد بهبود می‌بخشد و زمان محاسباتی را تا ۲۰ درصد در مقایسه با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور کاهش می‌دهد. فضلی خلف و همکاران [۴۲] نیز به طراحی یک شبکه

زنجیره تأمین لامپ به دنبال کمینه کردن هزینه کل زنجیره، به حداکثر رساندن ارزش وزنی محصولات و به حداکثر رساندن قابلیت اطمینان بودند. این مطالعات علیرغم رعایت همزمان الزامات زیست محیطی و مسئولیت‌پذیری‌های اجتماعی در زنجیره تأمین طراحی شده، فقط جریان مستقیم زنجیره را در نظر گرفته‌اند. در واقع، این مقالات از این ظرفیت غافل شده‌اند که ادغام زنجیره مستقیم و معکوس می‌تواند از فرآیندهای شفاف، قابل اعتماد و سازگار با فن‌آوری‌های پایداری پشتیبانی کند [۳۵]. این مزیت برای زنجیره‌های تأمین حلقه بسته به واسطه‌ی اعضای بیشتر، ارزشمندتر است. در این راستا، زارع مهرجردی و لطفی [۳۶] با در نظر گرفتن رویکردهای پایداری، تاب‌آوری، استحکام و خطرگریزی در طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته به دنبال به حداقل رساندن هزینه‌ها، انتشار CO₂ و انرژی و به حداکثر رساندن اشتغال بودند. همچنین زارع مهرجردی و شفییعی [۳۷] در یک زنجیره تأمین حلقه بسته برای در نظر گرفتن همزمان تاب‌آوری و ابعاد مختلف پایداری به مواردی نظیر کاهش کل هزینه، مصرف انرژی و آلودگی و افزایش فرصت‌های شغلی توجه کردند. با این حال، مدل‌سازی سامانه حمل و نقل در این مطالعات به صورت تک‌وجهی بوده است. به طور کلی، از مجموع ۲۲ مقاله مورد بررسی تنها ۷ مقاله سیستم حمل‌ونقل را به صورت چندوجهی در نظر گرفتند. دلیل اقبال بیشتر محققان به سیستم‌های تک وجهی را می‌توان به ساده‌تر بودن مدل‌های تک‌وجهی نسبت داد. در مقایسه با ساختار شبکه سنتی، شبکه چندوجهی با پیوند چند ویژگی (از جمله به حداقل رساندن هزینه کل و انتشار) و گره‌های انتقال وابسته، به طور قابل توجهی پیچیدگی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین را افزایش می‌دهد [۳۸].

قابلیت اطمینان در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین اغلب در سطح گره‌های شبکه (تسهیلات) مورد ارزیابی قرار گرفته است، در حالی که عملکرد بدون خطای زنجیره مستلزم ارزیابی قابلیت اطمینان کمان‌های شبکه (مسیرها) نیز می‌باشد. به عنوان مثال، قابلیت اطمینان در زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار پیشنهادی توسط امیریان و همکاران [۲۴] فقط برای انتخاب تأمین‌کننده، احداث تسهیلات بالقوه و زمان سفر در نظر گرفته شده است. با این حال، در برخی از صنایع تولیدی، زنجیره تأمین و سیستم‌های لجستیکی وجود دارد که در آن‌ها انواع اختلالات ممکن است رخ دهد. به عنوان مثال می‌توان به خطوط لوله آب و گاز، زیرساخت‌های شبکه هوایی و ریلی و سیستم‌های ارائه

¹ Stackelberg Game

برنامه‌نویسی محدودیت‌شانس (CCP) را برای مواجهه با تقاضاهای تصادفی در مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار طی شیوع COVID-19 در نظر گرفتند. اخیراً، اسلامی‌پور و نوبری [۵۲] یک مدل چند هدفه برای ایجاد یک زنجیره تأمین خون پایدار شامل اهداکنندگان، مراکز جمع‌آوری، مراکز توزیع و بیمارستان‌ها ارائه کردند. مدل پیشنهادی از ظرفیت زنجیره تأمین در پاسخگویی به نیازهای خونی بیمارستان‌ها به‌عنوان قابلیت اعتماد و وسیله‌ای برای دستیابی به هدف اجتماعی و همچنین از محدود کردن هزینه کلی و اثرات زیست‌محیطی طراحی شبکه زنجیره تأمین و حمل و نقل خون تحت عنوان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در نظر گرفته شده‌اند. برای حل مدل چند هدفه پیشنهادی، ابتدا از رویکرد محدودیت اسیلون بهبود یافته برای ساخت یک مدل تک هدفه استفاده می‌شود. سپس، یک الگوریتم رقابتی امپریالیستی برای حل مدل تک هدفه توسعه داده شده است. در نهایت، برای تعیین اثربخشی تکنیک چندین مسئله آزمایشی تجزیه و تحلیل می‌شوند.

لازم به ذکر است که در این حوزه نوظهور از ادبیات طراحی شبکه زنجیره تأمین، بیشترین سهم از انتشار (۴۵ درصد) مربوط به دو صنعت تأمین انرژی و بهداشت و درمان (هر کدام با ۵ مقاله) می‌باشد. تمایل بیشتر محققان عمدتاً به حساسیت بیشتر این صنایع نسبت به ارائه راهبردهای پایدار و قابل اطمینان برمی‌گردد. با این حال، تعداد تحقیقات طراحی شبکه زنجیره تأمین در صنایع معدنی بسیار کمتر از سایر صنایع بوده است. مقاله اکبری کاسگری و همکاران [۵۳] تنها مطالعه‌ای است که به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین برای فلز مس می‌پردازد. آن‌ها از تأمین‌کنندگان پشتیبان به عنوان یک استراتژی تاب‌آوری برای کاهش اثرات زلزله بر عملیات معدن استفاده کردند. اگر چه مدل بدون پشتیبان و مدل با پشتیبان به صورت چند هدفه مقایسه شدند. اما این مدل‌ها در فضای قطعیت مدل‌سازی و حل شده است. علیرغم افزایش تقاضا برای بسته‌بندی در سال‌های اخیر، تحقیقاتی از جمله محمدی نعمت‌آباد و همکاران [۵۴] به شناسایی و اولویت‌بندی مؤلفه‌های تولید پایدار در صنعت کارتن‌سازی پرداخته‌اند. آن‌ها از میان هفت مؤلفه اصلی (شامل قوانین و مقررات، اقتصادی، زیست‌محیطی، تکنولوژیکی، اجتماعی، انسانی، مواد و محصول) تأثیرگذار بر تولید پایدار، اهمیت بیشتری برای دو مؤلفه‌ی زیست‌محیطی و قوانین و مقررات قائل شدند. همچنین، اسدگی و همکاران [۵۵] با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره به شناسایی شاخص‌های تولید

زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار و تاب‌آور با اهداف چهارگانه حداقل‌سازی هزینه‌های کل شبکه، حداکثرسازی قابلیت اطمینان عملیاتی تسهیلات، حداقل‌سازی انتشار CO2 در افق‌های برنامه‌ریزی استراتژیک و تاکتیکی، و حداکثرسازی مسئولیت اجتماعی شبکه پرداختند. در این مطالعه، برای رسیدگی به نقض محدودیت‌ها و عدم قطعیت پارامترها از یک روش برنامه‌ریزی فازی امکانی منعطف ترکیبی استفاده شده است. گوویندان و قلی‌زاده [۴۳] از یک الگوریتم متقاطع آن‌تروپی (CE) به همراه بهینه‌سازی استوار سناریو محور در طراحی یک شبکه لجستیک معکوس پایدار و تاب‌آور با ویژگی‌های داده‌های بزرگ و احتمال اختلال در ظرفیت تسهیلات برای وسایل نقلیه پایان عمر با هدف به حداقل رساندن هزینه کل استفاده کردند. سازور و همکاران [۴۴] در طراحی یک زنجیره تأمین پایدار-تاب‌آور از برنامه‌ریزی ظرفیت بر اساس افزونگی و رویکرد بهینه‌سازی فازی استوار به ترتیب برای مواجهه با انعطاف‌پذیری تقاضا و مقابله با عدم قطعیت‌ها استفاده کردند. برای سنجش اعتبار مدل پیشنهادی زنجیره تأمین واکسن آنفلوانزا در ایران را مورد مطالعه قرار دادند. علیرغم تلاش‌های مدل‌سازی غیر قطعی برای طراحی زنجیره تأمین پایدار و قابل اطمینان، اکثر تحقیقات فاقد رویکردی جامع و انعطاف‌پذیر برای مدل‌سازی عدم قطعیت می‌باشند و کمبودهایی در زمینه استفاده همزمان از عدم قطعیت‌های شناختی با رویکرد استوار، کنترل محدودیت‌های امکانی و تحلیل تغییرپذیری امکانی به طور همزمان در فضای کاربردی صنعت وجود دارد [۴۵ و ۴۶]. به عنوان مثال در تعدادی از مطالعات فقط از رویکرد برنامه‌ریزی استوار مبتنی بر سناریو استفاده شده است [۴۷ و ۴۸]. صالحی و همکاران [۴۹] در طراحی یک شبکه زنجیره تأمین زیست توده تاب‌آور و پایدار با هدف حداکثرسازی سود از یک رویکرد استوار برای غلبه بر عدم قطعیت در تقاضای انرژی زیستی استفاده کردند. کاربرد رویکرد پیشنهادی از طریق مطالعه موردی در سازمان «ساتبا»^۱ در ایران مورد بررسی قرار گرفته است. گودرزبان و همکاران [۵۰] به طراحی یک شبکه مراقبت‌های بهداشتی با ادغام جوانب تاب‌آوری و پایداری طی دوره همه‌گیری COVID-19 تحت عدم قطعیت پرداختند. برای مقابله با پارامترهای نامعین، برنامه‌ریزی تصادفی محدودیت‌شانس پیشنهاد شده است. محمدی و نیکزاد [۵۱] رویکرد

¹Renewable Energy and Electricity Efficiency Organization (SATBA)

چند دوره زمانی (۶۸ درصد)، با سیستم حمل و نقل تک‌وجهی (۶۸ درصد) و در شرایط عدم قطعیت (۸۲ درصد) مدل‌سازی شده‌اند. بنابراین، مدل‌سازی طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته بر پایه‌ی ابعاد پایداری و قابلیت اطمینان در صنعت چاپ و بسته‌بندی رویکرد بهینه‌سازی امکانی استوار برای مقابله با عدم قطعیت موجود، هنوز حاوی یک شکاف تحقیقاتی است. برخلاف کارهای قبلی، این پژوهش به بررسی موضوع طراحی شبکه زنجیره تأمین برای شرکت‌های تولیدکننده محصولات با ارزش در پایان عمر با در نظر گرفتن احتمال خرابی برای تسهیلات، مسیرهای حمل و نقل، و همچنین وسایل نقلیه می‌پردازد. برخی از آن‌ها بالقوه هستند و باید تصمیم گرفت که کدام گره‌ها، پیوندها و وسایل نقلیه‌ی بالقوه به کار گرفته شوند. جدول (۱) با درج ویژگی‌های مطالعات مرتبط، ضمن ارائه طبقه‌بندی دقیق‌تری از موضوع، خلأ موجود در ادبیات را نمایان می‌سازد.

پاک‌تر در صنعت کارتن‌سازی پرداختند. دو نمایه‌ی کنترل فرآیند و کنترل محصول در تحقیق آن‌ها از اولویت بالاتری برخوردار بود. اخیراً نیز مه‌ری چروده و همکاران [۵۶] یک مدل ریاضی چندهدفه، چند سطحی، چند دوره‌ای و چند کالایی برای زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار محصولات مبتنی بر سلولزی (کاغذ و کارتن) در نظر گرفتند. با این حال، در زمینه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت برای صنعت کارتن‌سازی در ادبیات کمبود وجود دارد. با توجه به اینکه فعالیت‌های صنایع چاپ و بسته‌بندی با مشکلات زیست‌محیطی و اجتماعی عدیده‌ای مانند کمبود چوب و قطع درختان جنگل‌ها مواجه است. علاوه بر این، هر زنجیره تأمین برای دستیابی به پایداری در تولید، باید مواد اولیه را از منابع قابل اطمینان تأمین کند.

به طور کلی، مدل‌های ارائه شده برای طراحی شبکه زنجیره تأمین در مطالعات پیشین، معمولاً به صورت مسائل چند هدفه (۸۶ درصد)، با مد نظر قرار دادن چند محصول (۶۳ درصد)، برای

جدول (۱). خلاصه پیشینه تحقیق

مورد مطالعه	رویکردهای ارزیابی					مدل‌سازی		بیکربندی چندگانه				ساختار شبکه	مرجع
	قابلیت اطمینان	اجتماعی	زیست محیطی	اقتصادی	عدم قطعیت	قطعیت/عدم قطعیت	خطی/غیر خطی	حمل و نقل	دوره	محصول	هدف		
لباس ورزشی	N	Max	Max	C	O, F	U	L	M	S	M	M	OL	[۴]
دارو در فرانسه	N	JC	C&T	C	O, F	U	L	M	M	M	M	OL	[۲۹]
برق در ایران	N	AT, JC, SA	Cap	C	O, F	U	L	M	M	S	S	OL	[۳۰]
لوله پلاستیکی در ایران	N	Max	Max	C	O, F	U	L	S	S	S	M	OL	[۳۱]
خودروسازی در ایران	N	JC	Min	C	R	U	L	S	M	M	M	CL	[۳۵]
هیدروژن در ایران	N	JC, SD	Min	C	F, R	U	L	M	M	M	M	OL	[۳۲]
برق منطقه‌ای زنجان	T	EG, JC	Min	C	F, R	U	L	S	M	S	M	OL	[۳۹]
لبنیات در ایران	N	Max	Max	C	F	U	L	S	M	M	M	OL	[۳۳]
برق در ویتنام	A	Min	C&T	C	F, R	U	L	S	M	S	M	OL	[۴۰]

مورد مطالعه	رویکردهای ارزیابی					مدل سازی		پیکربندی چندگانه				ساختار شبکه	مرجع
	قابلیت اطمینان	اجتماعی	زیست محیطی	اقتصادی	عدم قطعیت	قطعیت/عدم قطعیت	خطی/غیر خطی	حمل و نقل	دوره	محصول	هدف		
تایر	N	JC, SD	Min	C	F	U	L	S	S	S	M	OL	[۴۱]
خودروسازی	N	JC	Min	C	R	U	L	S	M	M	M	CL	[۴۶]
تایر	N	JC	Min	C	F	U	L	S	S	M	M	CL	[۳۶]
-	N	Max	Max	C	R	U	L	S	S	M	M	OL	[۴۷]
خودرو فرسوده در ایران	N	JC, SD	Min	C	R	U	L	S	M	M	S	OL	[۴۲]
واکسن آنفلوانزا	N	JC, SA	Min	C	F, R	U	L	M	M	S	M	OL	[۴۳]
مس	N	SA	Min	P	-	D	L	S	S	M	M	CL	[۴۸]
-	T	JC, SD	C&T	P	-	D	NL	M	M	M	M	CL	[۲۴]
ساتبا ^۱ در ایران	N	JC, SD	Min	P	F, R	U	L	S	M	M	S	OL	[۴۴]
کارتریج پرینتر	N	SA	Tax	P	-	D	L	S	S	S	M	CL	[۳۸]
مراقبت بهداشتی در آمریکا	N	EG, SA	Min	C	O, F	U	L	M	M	M	M	OL	[۴۵]
شبکه بهداشت و درمان	N	JC, SD	C&T	C	F	U	L	S	M	M	M	CL	[۴۶]
خون در ایران	N	RD	Min	C	-	D	L	S	M	S	M	OL	[۴۷]
شرکت غرب کارتن کرمانشاه	T	JC, SD	C&T	P	F, R	U	L	M	M	M	M	CL	مطالعه حاضر

*راهنمای جدول

ساختار شبکه (OL: حلقه باز، CL: حلقه بسته) / پیکربندی (S: منفرد، M: چندگانه) / مدل سازی مسئله (L: برنامه ریزی مختلط خطی عدد صحیح، NL: برنامه ریزی مختلط غیر خطی عدد صحیح، D: قطعی، ND: غیرقطعی) / رویکردهای ارزیابی: عدم قطعیت (O: تصادفی، F: فازی، R: استوار)، پایداری اقتصادی (C: کاهش هزینه، P: افزایش سود)، پایداری زیست محیطی (Max: حداکثرسازی حفاظت های زیست محیطی، Min: حداقل سازی پیامدهای زیست محیطی، Cap: اعتبار کربن، Tax: مالیات بر انتشار کربن، C&T: سقف و مبادله کربن)، پایداری اجتماعی (AT: گردش مالی سالانه، RD: پاسخگویی به تقاضا، EG: رشد اقتصادی، JC: ایجاد شغل، SA: رفاه اجتماعی، SD: آسیب شغلی) و قابلیت اطمینان (N: گره، A: کمان، T: کل شبکه)

^۱سازمان بهره وری انرژی های تجدیدپذیر و برق (ساتبا)

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- روش‌شناسی پژوهش

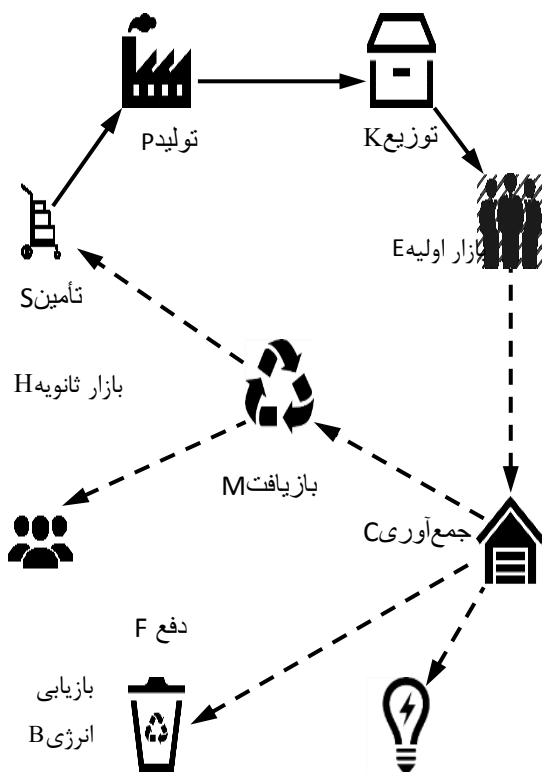
این پژوهش بر پایه مطالعات منتشر شده در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین سعی در تکمیل مدل‌های گذشته دارد. بنابراین، جزء تحقیقات توسعه‌ای محسوب می‌گردد. همچنین، از آنجا که یکی از شرکت‌های صنعت چاپ و بسته‌بندی را مورد مطالعه قرار می‌دهد، یک تحقیق کاربردی است. برای جمع‌آوری داده‌ها، علاوه بر مطالعه کتابخانه‌ای منابع مرتبط و معتبر ادبیات تحقیق، از داده‌های واقعی و نظرات کارشناسان شرکت مورد مطالعه -که نتایج محاسبات را به واقعیت نزدیک‌تر می‌کند- استفاده می‌شود. نخستین گام در انجام هر پژوهش، تعریف دقیق مسئله و تعیین قلمرو آن است. سپس به منظور شناسایی شکاف‌های موجود در ادبیات، مبانی نظری و پیشینه تحقیق در دو حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار و طراحی شبکه زنجیره تأمین قابل اطمینان مورد بررسی قرار گرفت. برای پوشش خلأ تحقیقاتی موجود، مدل ریاضی طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار و قابل اطمینان بر اساس رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار با مقیاس Me توسعه داده می‌شود. به منظور ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، مسئله پژوهش در یک مطالعه موردی از صنعت چاپ و بسته‌بندی با استفاده از روش محدودیت افسیلون تکامل یافته (AEC) حل می‌شود. در ادامه، ضمن ارائه نتایج، استواری و حساسیت مدل پیشنهادی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. نهایتاً، توصیه‌های مدیریتی و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی بیان می‌گردد. شکل (۱) فرآیند پژوهش را به نمایش گذاشته است.

مرحله اول: بررسی ادبیات و پیشینه پژوهش بررسی مطالعات گذشته و تعیین شکاف‌های تحقیقاتی
مرحله دوم: مدل‌سازی ریاضی مسئله فرمول‌بندی ریاضی و خطی‌سازی مدل
مرحله سوم: بازسازی مدل تحت عدم قطعیت توسعه برنامه‌ریزی امکانی استوار با مقیاس Me
مرحله چهارم: بهینه‌سازی مدل پیشنهادی استفاده از AEC برای حل مسئله چند هدفه
مرحله پنجم: پیاده‌سازی و نتیجه‌گیری توسعه مطالعه موردی، تحلیل نتایج و نتیجه‌گیری

شکل (۱). فرآیند اجرایی پژوهش

۳-۲- تعریف و مدل‌سازی مسئله

به منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار و قابل اطمینان در شرایط عدم قطعیت، مدلی چند هدفه، چند محصولی و چند دوره‌ای توسعه داده می‌شود. مدل پیشنهادی دو جریان مستقیم و معکوس زنجیره تأمین را با هم در نظر می‌گیرد. به نحوی که در زنجیره تأمین مستقیم، مواد اولیه مورد نیاز تولید از تأمین‌کنندگان یا مراکز بازیافت تهیه می‌شود. محصولات ساخته شده در کارخانه‌ها با هدف ذخیره‌سازی و انتقال به بازار تقاضا برای سطح بعدی زنجیره یعنی مراکز توزیع ارسال می‌شود. در زنجیره تأمین معکوس، محصولات بازگشتی از سوی مشتریان به مراکز جمع‌آوری انتقال می‌یابند. محصولات بازگشتی در مراکز جمع‌آوری -با توجه به وضعیت کیفیتی که دارند- به سه دسته جداسازی می‌شوند. دسته‌ی اول به منظور بازیافت به مراکز بازیافت منتقل می‌شوند، دسته‌ی دوم به مراکز بازیابی انرژی فروخته می‌شوند و دسته‌ی سوم به مراکز دفع جهت دفن ایمن انتقال می‌یابند. مواد اولیه حاصل از بازیافت محصولات برگشتی با توجه به کیفیت مواد مورد استفاده در فرآیند بازیافت به دو بخش مواد اولیه مناسب برای تولید و مواد اولیه مناسب برای فروش در بازار مواد اولیه بازیافتی تقسیم می‌شوند. شکل (۲) نمایی از زنجیره تأمین توصیف شده را به نمایش گذاشته است.



شکل (۲). ساختار شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهادی

OC

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{t \in T} \left[\sum_{(x,y) \in \Psi_1} \sum_{a \in A} BC_{sa}^t \cdot Q_{xya}^t \right. \\
 &- \sum_{(x,y) \in \Psi_2} \sum_{a \in A} RC_a^t \cdot Q_{xya}^t \\
 &+ \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{g \in G} PC_{pr}^{gt} \cdot Q_{pr}^{gt} \\
 &+ \sum_{(x,y) \in \Psi_5} \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} KC_{kr}^t \cdot Q_{xyr}^t \\
 &+ \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} HC_{kr}^t \cdot I_{kr}^t \\
 &+ \sum_{e \in E} \sum_{r \in R} (EC_{er}^t \cdot S_{er}^t + OEC_{er}^t \cdot QN_{er}^t) \\
 &+ \sum_{(x,y) \in \Psi_6} \sum_{r \in R} (CC_{cr}^t + OCC_{cr}^t) \cdot Q_{xyr}^t \\
 &+ \sum_{(x,y) \in \Psi_7} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} MC_{mr}^{lt} \cdot Q_{xyr}^t \\
 &\left. + \sum_{(x,y) \in \Psi_9} \sum_{r \in R} FC_{fr}^t \cdot Q_{xyr}^t \right]
 \end{aligned}$$

SC

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \left[\sum_{(x,y) \in \Psi'} \sum_{a \in A} D_{xy} \pi_{xy}^{vt} \cdot \left((U_v^t (FU1_v \right. \right. \\
 &\left. \left. + (FU2_v \cdot W_a \cdot Q_{xya}^t)) + (V_v^t / V^v) \right) \right] \\
 &+ \left[\sum_{(x,y) \in \Psi''} \sum_{r \in R} D_{xy} \pi_{xy}^{vt} \cdot \left((U_v^t (FU1_v \right. \right. \\
 &\left. \left. + (FU2_v \cdot W_r \cdot Q_{xyr}^t)) + (V_v^t / V^v) \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$EC = \Theta(CO_2^{CUR} - CO_2^{GOV})$$

CO₂^{CUR}

$$\begin{aligned}
 &= \text{Fixed Emission } CO_2(\text{FEC}) \\
 &+ \text{Variable Emission } CO_2(\text{VEC})
 \end{aligned}$$

مفروضات مسئله در قالب موارد زیر خلاصه می‌شود.

۱. میان تسهیلات در یک سطح از زنجیره ارتباطی وجود ندارد.
۲. کمبود تقاضا (به صورت از دست رفته) مجاز است و تقاضای ارضا نشده مشمول جریمه می‌شود.
۳. محصولات برگشتی جمع‌آوری نشده مشمول جریمه می‌شوند.
۴. در حمل و نقل جاده‌ای از وسایل نقلیه ناهمگن استفاده می‌شود.

مدل ریاضی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار و قابل اطمینان بر اساس مفروضات، اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای بیان شده در فوق، به صورت روابط ذیل است:

$$\begin{aligned}
 \text{Maximize } Z1 &= \text{Economic Profit (EP)} \\
 &= \text{Total Revenue (TR)} \\
 &- \text{Total Cost (TC)} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 TR &= \sum_{t \in T} \left[\sum_{(x,y) \in \Psi_5} \sum_{r \in R} \bar{P}R_{er}^t \cdot Q_{xyr}^t \right. \\
 &+ \sum_{(x,y) \in \Psi_8} \sum_{r \in R} \bar{P}R_{br}^t \cdot Q_{xyr}^t \\
 &\left. + \sum_{(x,y) \in \Psi_3} \sum_{a \in A} \bar{P}R_{ha}^t \cdot Q_{xya}^t \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 TC &= \text{Fixed Cost (FC)} \\
 &+ \text{Operation Cost (OC)} \\
 &+ \text{Shipping Cost (SC)} \\
 &+ \text{Emission Cost (EC)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 FC &= \sum_{u \in U} \left[\sum_{n \in P} \sum_{g \in G} F_n^{gu} \cdot \theta_n^{gu} \right. \\
 &+ \sum_{n \in K} F_n^u \cdot \theta_n^u + \sum_{n \in C} F_n^u \cdot \theta_n^u \\
 &\left. + \sum_{n \in M} \sum_{l \in L} F_n^{lu} \cdot \theta_n^{lu} \right] \\
 &+ \sum_{n \in S} \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} F_{na}^t \cdot \theta_{na}^t \\
 &+ \sum_{(x,y) \in \Psi} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} F_{xy}^{vt} \cdot \pi_{xy}^{vt}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & JC \\
 & = \sum_{u \in U} \left(\sum_{p \in P} \sum_{g \in G} \eta_p \cdot job_p^{gu} \cdot \theta_p^{gu} \right. \\
 & + \sum_{k \in K} \eta_k \cdot job_k^u \cdot \theta_k^u \\
 & \left. + \sum_{c \in C} \eta_c \cdot job_c^u \cdot \theta_c^u + \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} \eta_m \cdot job_m^{lu} \cdot \theta_m^{lu} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + jt \\
 & * \sum_{r \in R} \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} \left(\sum_{p \in P} \sum_{g \in G} \frac{TP_r^g \cdot Q_{pr}^{gt}}{cap_p^{gu}} \right. \\
 & + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \frac{TK_r \cdot Q_{pkr}^t}{Cap_k^u} + \sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \frac{TC_r \cdot Q_{ecr}^t}{Cap_c^u} \\
 & \left. + \sum_{c \in C} \sum_{m \in M} \sum_{a \in A} \sum_{l \in L} \frac{TM_a^l \cdot \rho_{ar} \cdot Q_{cmr}^t}{cap_m^{lu}} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & LD \\
 & = \sum_{u \in U} \left(\sum_{p \in P} \sum_{g \in G} ltc_p^{gu} \cdot \theta_p^{gu} + \sum_{k \in K} ltc_k^u \cdot \theta_k^u \right. \\
 & + \sum_{c \in C} ltc_c^u \cdot \theta_c^u \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} ltc_m^{lu} \cdot \theta_m^{lu} \left. \right) + lt \\
 & * \sum_{r \in R} \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} \left(\sum_{p \in P} \sum_{g \in G} \frac{TP_r^g \cdot Q_{pr}^{gt}}{cap_p^{gu}} \right. \\
 & + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \frac{TK_r \cdot Q_{pkr}^t}{Cap_k^u} + \sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \frac{TC_r \cdot Q_{ecr}^t}{Cap_c^u} \\
 & \left. + \sum_{c \in C} \sum_{m \in M} \sum_{a \in A} \sum_{l \in L} \frac{TM_a^l \cdot \rho_{ar} \cdot Q_{cmr}^t}{cap_m^{lu}} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize } Z3 = \text{Reliability} \\
 & = \lambda_1 \times [\text{Contract Reliability (CR)}] \\
 & + \lambda_2 \times [\text{Facility Reliability (FR)}] \\
 & + \lambda_3 \times [\text{Operation Reliability (OR)}] \\
 & + \lambda_4 \times [\text{Shipping Reliability (SR)}]
 \end{aligned} \tag{۳}$$

$$\begin{aligned}
 & FEC = \sum_{u \in U} \left[\sum_{p \in P} \sum_{g \in G} E_p^{gu} \cdot \theta_p^{gu} + \sum_{k \in K} E_k^u \cdot \theta_k^u \right. \\
 & + \sum_{c \in C} E_c^u \cdot \theta_c^u \\
 & \left. + \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} E_m^{lu} \cdot \theta_m^{lu} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & VEC \\
 & = \epsilon^j \cdot [\text{Consumption Energy Operation (CEO)}] \\
 & + \epsilon^l \cdot [\text{Consumption Energy Shipping (CES)}]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & CEO \\
 & = \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \left[\sum_{p \in P} \sum_{g \in G} EP_r^g \cdot Q_{pr}^{gt} \right. \\
 & + \sum_{(x,y) \in \Psi_5} EK_r \cdot Q_{xyr}^t + \sum_{(x,y) \in \Psi_6} EC_r \cdot Q_{xyr}^t \\
 & + \sum_{(x,y) \in \Psi_7} \sum_{a \in A} \sum_{l \in L} EM_a^l \cdot \rho_{ar} \cdot Q_{xyr}^t \\
 & \left. + \sum_{(x,y) \in \Psi_8} EB_r \cdot Q_{xyr}^t + \sum_{(x,y) \in \Psi_9} EF_r \cdot Q_{xyr}^t \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & CES \\
 & = \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \left[\sum_{(x,y) \in \Psi'} \sum_{a \in A} D_{xy} \cdot \pi_{xy}^{vt} (FU1_v \right. \\
 & + (FU2_v W_a Q_{xya}^t)) \left. \right] \\
 & + \left[\sum_{(x,y) \in \Psi''} \sum_{r \in R} D_{xy} \cdot \pi_{xy}^{vt} (FU1_v \right. \\
 & + (FU2_v W_r Q_{xyr}^t)) \left. \right]
 \end{aligned}$$

(۴)

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize } Z2 \\
 & = \text{Corporate Social Responsibility (CSR)} \\
 & = \theta_{job} \times [\text{Jobs Created (JC)}] \\
 & - \theta_{ltc} \times [\text{Lost Days (LD)}]
 \end{aligned}$$

در انبار مراکز توزیع)، هزینه‌های جریمه (جریمه عدم برآورد تقاضای مشتریان و جریمه عدم جمع‌آوری محصولات برگشتی) نیز در قالب هزینه‌های عملیاتی گنجانده شده‌اند. در ضمن هزینه ناشی از صرفه‌جویی ارائه مواد اولیه بازیافتی به مراکز تولید با علامت منفی از هزینه‌های عملیاتی کم شده است. مقدار عبارت TC، هزینه‌های حمل و نقل (هزینه سوخت مصرفی و دستمزد راننده) شبکه زنجیره تأمین را نشان می‌دهد. هزینه‌ی سوخت مصرفی با توجه به نوع وسیله نقلیه و میزان بار حمل شده و مسافت طی شده متفاوت خواهد بود. هزینه دستمزد راننده نیز وابسته به مدت زمان رانندگی متغیر است. مدت زمان رانندگی تابعی از میانگین سرعت وسیله نقلیه و مسافت طی شده توسط آن می‌باشد. هزینه انتشار بیش از حد مجاز دی اکسید کربن (EC)، حاصل ضرب فاکتور هزینه انتشار دی اکسید کربن در اختلاف میان میزان انتشار دی اکسید کربن جاری از مقدار مجاز انتشار دی اکسید کربن زنجیره تأمین که دولت تعیین کرده است، به دست می‌آید. مقدار انتشار دی اکسید کربن در زنجیره تأمین، حاصل جمع مقدار ثابت انتشار ناشی از استقرار تسهیلات بالقوه و میزان متغیر انتشار ناشی از انرژی مصرف شده در فرآیندهای عملیاتی و حمل و نقل میان سطوح زنجیره؛ می‌باشد. رابطه ۲ تابع هدف دوم مسئله یعنی حداکثرسازی مسئولیت‌پذیری اجتماعی زنجیره تأمین را دنبال می‌کند. به همین منظور از دو معیار فرصت‌های شغلی ایجاد شده و متوسط تعداد روزهای کاری از دست رفته ناشی از آسیب‌دیدگی پرسنل مطابق میزان اهمیت‌شان استفاده می‌شود. هر دو معیار مشخص شده از دو جنبه ثابت و متغیر مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. مدل سعی در استقرار تسهیلات بالقوه در مناطق با درصد بیکاری بیشتر دارد، که این امر موجب ایجاد اشتغال در مناطق محروم‌تر می‌شود.

رابطه ۳ تابع هدف سوم مسئله یعنی بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان زنجیره تأمین است. عبارت CR، نشان دهنده قابلیت اعتماد تأمین‌کننده در برآورده ساختن نیازهای تولیدکننده است، عبارت FR، قابلیت اطمینان تسهیلات بالقوه را در صورت تأسیس مشخص می‌کند، عبارت OR، قابلیت اطمینان فرآیندهای عملیاتی را در نظر گرفته است، و نهایتاً در عبارت SR، قابلیت اطمینان حمل و نقل شبکه بیان شده است.

$$CR = \sum_{n \in S} \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} SR_{sa} \cdot \theta_{sa}^t$$

$$FR = \sum_{u \in U} \left[\sum_{n \in P} \sum_{g \in G} RP_n^{gu} \cdot \theta_n^{gu} + \sum_{n \in K} RK_n^u \cdot \theta_n^u + \sum_{n \in C} RC_n^u \cdot \theta_n^u + \sum_{n \in M} \sum_{l \in L} RM_n^{lu} \cdot \theta_n^{lu} \right]$$

$$OR = \sum_{x \in P} \sum_{r \in R} \sum_{g \in G} \sum_{t \in T} e^{-\lambda_p^{gut} \cdot t} \cdot TP_r^g \cdot Q_{pr}^{gt} + \sum_{x \in P} \sum_{y \in K} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} e^{-\lambda_k^{ut} \cdot t} \cdot TK_r \cdot Q_{pk}^t + \sum_{x \in E} \sum_{y \in C} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} e^{-\lambda_c^{ut} \cdot t} \cdot TC_r \cdot Q_{ecr}^t + \sum_{x \in C} \sum_{y \in M} \sum_{a \in A} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} e^{-\lambda_m^{lut} \cdot t} \cdot TM_a^l \cdot \rho_{ar} \cdot Q_{cl}^t$$

$$SR = \sum_{(x,y) \in \Psi' \cup \Psi''} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} e^{-(\lambda_v + \lambda_{xy}) \cdot D_{xy}} \cdot \pi_{xy}^{vt}$$

رابطه ۱ مربوط به تابع هدف اول مسئله یعنی بیشینه‌سازی سود زنجیره تأمین - حاصل اختلاف جمع کل درآمدها از جمع کل هزینه‌های زنجیره تأمین - می‌باشد. قسمت اول تابع هدف جمع کل درآمدهای زنجیره تأمین را نشان می‌دهد که برابر است با درآمد حاصل از فروش محصولات نهایی به مشتریان، محصولات برگشتی به مراکز بازیابی انرژی و مواد بازیافتی به سایر زنجیره‌های تأمین. قسمت دوم هزینه‌های زنجیره تأمین را نشان می‌دهد که شامل هزینه‌های ثابت، هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌های حمل و نقل و هزینه‌های ناشی از انتشار بیش از حد مجاز دی اکسید کربن، می‌باشد. هزینه‌های ثابت (OFC) شامل: هزینه استقرار تسهیلات بالقوه، هزینه قرارداد با تأمین‌کنندگان و هزینه بکارگیری وسایل نقلیه؛ می‌شود. هزینه خرید مواد اولیه، هزینه تولید، هزینه توزیع، هزینه بازرسی و جداسازی، هزینه بازیافت و هزینه دفن؛ جزء هزینه‌های اصلی در اجرای فعالیت‌های عملیاتی زنجیره تأمین (OC) محسوب می‌شوند، البته هزینه‌های انگیزشی (هزینه خرید و جمع‌آوری محصولات برگشتی در پایان عمر از مشتریان)، هزینه‌های موجودی (هزینه نگهداری محصولات نهایی

$$\sum_{u \in U} \theta_c^u \leq 1, \quad \forall c \quad (۹)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{u \in U} \theta_m^{lu} \leq 1, \quad \forall m \quad (۱۰)$$

$$\sum_{p \in P} Q_{spa}^t \geq b_{sa} \cdot \theta_{sa}^t, \quad \forall s, a, t \quad (۱۱)$$

$$\sum_{p \in P} Q_{spa}^t \leq Cap_{sa} \cdot \theta_{sa}^t, \quad \forall s, a, t \quad (۱۲)$$

$$\sum_{r \in R} TP_r^g \cdot Q_{pr}^{gt} \leq \sum_{u \in U} Cap_p^{gu} \cdot \theta_p^{gu}, \quad \forall p, g, t \quad (۱۳)$$

$$\sum_{e \in E} \sum_{r \in R} TK_r \cdot Q_{ker}^t \leq \sum_{u \in U} Cap_k^u \cdot \theta_k^u, \quad \forall k, t \quad (۱۴)$$

$$\sum_{r \in R} v_r \cdot I_{kr}^t \leq \sum_{u \in U} VCap_k^u \cdot \theta_k^u, \quad \forall k, t \quad (۱۵)$$

$$\sum_{e \in E} \sum_{r \in R} TC_r \cdot Q_{ecr}^t \leq \sum_{u \in U} Cap_c^u \cdot \theta_c^u, \quad \forall c, t \quad (۱۶)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{a \in A} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} TM_a^l \cdot \rho_{ar} \cdot Q_{cmr}^t \leq \sum_{l \in L} \sum_{u \in U} Cap_m^u \cdot \theta_m^{lu}, \quad \forall m, t \quad (۱۷)$$

$$\sum_{c \in C} Q_{cbr}^t \leq Cap_{br}, \quad \forall b, r, t \quad (۱۸)$$

$$\sum_{c \in C} Q_{cfr}^t \leq Cap_{fr}, \quad \forall f, r, t \quad (۱۹)$$

$$\sum_{g \in G} Q_{pr}^{gt} = \sum_{k \in K} Q_{pkr}^t, \quad \forall p, r, t \quad (۲۰)$$

$$\sum_{s \in S} Q_{spa}^t + \sum_{m \in M} Q_{mpa}^t = \sum_{r \in R} \sum_{g \in G} q_{ar} \cdot Q_{pr}^{gt}, \quad \forall p, a, t \quad (۲۱)$$

$$I_{kr}^t = I_{kr}^{t-1} + \sum_{p \in P} Q_{pkr}^t - \sum_{e \in E} Q_{ker}^t, \quad \forall k, r, t \quad (۲۲)$$

$$I_{kr}^t = 0, \quad \forall k, r, t, t = 1 \quad (۲۳)$$

$$\sum_{e \in E} \sum_{t \in T} Q_{ker}^t - \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} Q_{pkr}^t \geq 0, \quad \forall k, r, t, t \neq T \quad (۲۴)$$

$$\sum_{p \in P} Q_{mpa}^t = \sum_{c \in C} \sum_{r \in R} \sigma_a \cdot \rho_{ar} \cdot Q_{cmr}^t, \quad \forall m, a, t \quad (۲۵)$$

$$CO_2^{CUR} = \sum_{u \in U} \left[\sum_{p \in P} \sum_{g \in G} E_p^{gu} \cdot \theta_p^{gu} + \sum_{k \in K} E_k^u \cdot \theta_k^u + \sum_{c \in C} E_c^u \cdot \theta_c^u + \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} E_m^{lu} \cdot \theta_m^{lu} \right] + \epsilon^j \cdot \left[\sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \left(\sum_{p \in P} \sum_{g \in G} EP_r^g \cdot Q_{pr}^{gt} + \sum_{(x,y) \in \Psi_5} EK_r \cdot Q_{xyr}^t + \sum_{(x,y) \in \Psi_6} EC_r \cdot Q_{xyr}^t + \sum_{(x,y) \in \Psi_7} \sum_{a \in A} \sum_{l \in L} EM_a^l \cdot \rho_{ar} \cdot Q_{xyr}^t + \sum_{(x,y) \in \Psi_8} EB_r \cdot Q_{xyr}^t + \sum_{(x,y) \in \Psi_9} EF_r \cdot Q_{xyr}^t \right) \right] + \epsilon^l \cdot \left[\sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \left(\sum_{(x,y) \in \Psi'} \sum_{a \in A} D_{xy} \pi_{xy}^{vt} (FU1_v + (FU2_v W_a Q_{xya}^t)) \right) + \left(\sum_{(x,y) \in \Psi''} \sum_{r \in R} D_{xy} \pi_{xy}^{vt} (FU1_v + (FU2_v W_r Q_{xyr}^t)) \right) \right] + \sum_{u \in U} \left[\sum_{p \in P} \sum_{g \in G} F_p^{gu} \cdot \theta_p^{gu} + \sum_{k \in K} F_k^u \cdot \theta_k^u + \sum_{c \in C} F_c^u \cdot \theta_c^u + \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} F_m^{lu} \cdot \theta_m^{lu} \right] \leq Budget$$

$$S_{er}^t = \widetilde{Dem}_{er}^t - \sum_{k \in K} Q_{ker}^t, \quad \forall e, r, t \quad (۶)$$

$$\sum_{g \in G} \sum_{u \in U} \theta_p^{gu} \leq 1, \quad \forall p \quad (۷)$$

$$\sum_{u \in U} \theta_k^u \leq 1, \quad \forall k \quad (۸)$$

تضمین می کنند که مرکز تولید حداکثر با یک سطح ظرفیت و یک نوع فن آوری تولیدی، مراکز توزیع و جمع آوری حداکثر با یک سطح ظرفیت و مرکز بازیافت حداکثر با یک سطح ظرفیت و استفاده از یک نوع مواد؛ احداث شوند. محدودیت های (۱۱) الی (۱۹) مربوط به ظرفیت تسهیلات هستند. حداقل مقدار تأمین مواد اولیه در صورت انتخاب و اخذ قرارداد با تأمین کننده طبق محدودیت (۱۱) و حداکثر ظرفیت تأمین کننده توسط محدودیت (۱۲) تعیین می شود. محدودیت (۱۳) با تأثیرگذاری فن آوری تولیدی مورد استفاده در مراکز تولید، حداکثر ظرفیت تولید آن ها را بیان می کند. حداکثر ظرفیت عملیاتی و انبارش مراکز توزیع به ترتیب در محدودیت های (۱۴) و (۱۵) به نمایش گذاشته شده است. حداکثر ظرفیت عملیاتی مراکز جمع آوری نیز در محدودیت (۱۶) آمده است. در محدودیت (۱۷) حداکثر ظرفیت بازیافت مواد اولیه در مراکز بازیافت با توجه به نقش مواد استفاده شده در عملیات بازیافت، مشخص است. محدودیت های (۱۸) و (۱۹) به ترتیب ظرفیت مراکز بازیابی انرژی و مراکز دفن را مشخص می کنند. طبق محدودیت (۲۰) همه ی محصولات تولیدی به مراکز توزیع منتقل می شوند و امکان ذخیره سازی محصول برای مراکز تولید در نظر گرفته نشده است. محدودیت (۲۱) بیان می کند که مواد اولیه مورد نیاز برای تولید محصولات از طریق تأمین کنندگان و یا مواد اولیه بازیافتی در مراکز بازیافت تأمین می گردد. محدودیت (۲۲) موجودی محصولات نهایی در انبار مراکز توزیع را نشان می دهد و محدودیت (۲۳) مقدار این موجودی در دوره اول برنامه ریزی را صفر در نظر گرفته است. محدودیت (۲۴) بیان می کند که محصولات منتقل شده به مرکز توزیع باید تا حداکثر یک دوره قبل از رسیدن به انتهای دوره عمر خود به دست مشتری برسند، تا امکان استفاده از آن ها در زمان مناسب (قبل از انقضاء) وجود داشته باشد. به بیان دیگر، حداکثر مدت زمان نگهداری موجودی در انبار مرکز توزیع یک دوره کمتر از انتهای عمرش می باشد. محدودیت های (۲۵) و (۲۶) نشان می دهند که مواد اولیه حاصل از بازیافت محصولات برگشتی، به ترتیب با چه نرخی به مراکز تولید و بازار مواد اولیه بازیافتی انتقال می یابند. محدودیت (۲۷) نشان می دهد که محصولات پایان عمر یافته با نرخ های متفاوتی بر حسب مدت کارکرد (روند صعودی) برگشت داده می شوند. نکته مهم این است که حداکثر مجموع نرخ برگشت در سال های استفاده برابر یک می باشد. بر اساس محدودیت (۲۸) محصولات قبل از پایان عمر برگشت داده نمی شوند. مطابق محدودیت (۲۹) ممکن است زنجیره معکوس قادر به جمع آوری همه ی محصولات برگشت داده شده از مشتریان نباشد. مقدار محصولات برگشتی جمع آوری نشده، در

$$\sum_{h \in H} Q_{mha}^t = \sum_{c \in C} \sum_{r \in R} (1 - \sigma_a) \cdot \rho_{ar} \cdot Q_{cmr}^t, \quad \forall m, a, t \quad (26)$$

$$QR_{er}^t = \sum_{t \in T} Dem_{er}^t - S_{er}^t, \quad \forall e, r, t \quad (27)$$

$$QR_{er}^t = 0, \quad \forall e, r, t \quad (28)$$

$$\sum_{c \in C} Q_{ecr}^t \leq QR_{er}^t, \quad \forall e, r, t \quad (29)$$

$$QN_{er}^t = QR_{er}^t - \sum_{c \in C} Q_{ecr}^t, \quad \forall e, r, t \quad (30)$$

$$\sum_{e \in E} \beta_r \cdot Q_{ecr}^t = \sum_{b \in B} Q_{cbr}^t, \quad \forall c, r, t \quad (31)$$

$$\sum_{e \in E} \gamma_r \cdot Q_{ecr}^t = \sum_{m \in M} Q_{cmr}^t, \quad \forall c, r, t \quad (32)$$

$$\sum_{e \in E} Q_{ecr}^t = \sum_{m \in M} Q_{cmr}^t + \sum_{b \in B} Q_{cbr}^t + \sum_{f \in F} Q_{cfr}^t, \quad \forall c, r, t \quad (33)$$

$$\sum_{a \in A} v_a \cdot Q_{xya}^t \leq vcap^v \cdot \pi_{xy}^{vt}, \quad \forall (x, y) \in \Psi', v, t \quad (34)$$

$$\sum_{r \in R} v_r \cdot Q_{xyr}^t \leq vcap^v \cdot \pi_{xy}^{vt}, \quad \forall (x, y) \in \Psi'', v, t \quad (35)$$

$$\sum_{a \in A} w_a \cdot Q_{xya}^t \leq wcap^v \cdot \pi_{xy}^{vt}, \quad \forall (x, y) \in \Psi', v, t \quad (36)$$

$$\sum_{r \in R} w_r \cdot Q_{xyr}^t \leq wcap^v \cdot \pi_{xy}^{vt}, \quad \forall (x, y) \in \Psi'', v, t \quad (37)$$

$$\theta_{sa}^t, \theta_p^{gu}, \theta_k^u, \theta_c^u, \theta_m^{lu}, \pi_{xy}^{vt} \in \{0, 1\} \quad (38)$$

$$Q_{xya}^{vt}, Q_{xyr}^{vt}, Q_{pr}^{gt}, I_{kr}^t, QR_{xr}^t, QN_{er}^t, S_{er}^t, CO_2^{CUR} \geq 0 \quad (39)$$

محدودیت (۴) میزان انتشار دی اکسید کربن در کل افق برنامه ریزی را تعیین می کند. قابل ذکر است که احداث تسهیلات بالقوه، فعالیت های عملیاتی و حمل و نقل سبب انتشار دی اکسید کربن می شوند. محدودیت (۵) نشان می دهد که بودجه در دسترس می تواند در تأسیس تسهیلات بالقوه جدید سرمایه گذاری شود. میزان تقاضای برآورد نشده (کمبود) از یک محصول برابر با اندازه ی تفاوت میان مقدار واقعی تقاضا با مقدار تحویل شده به مشتریان (تقاضای پاسخ داده) در آن دوره است، که با محدودیت (۶) نمایش داده می شود. محدودیت های (۷) الی (۱۰) به ترتیب

$$SC = \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \left[\sum_{(x,y) \in \Psi'} \sum_{a \in A} FU1_v \cdot U_v^t \cdot D_{xy} \cdot \pi_{xy}^{vt} + FU2_v \cdot U_v^t \cdot W_a \cdot D_{xy} \cdot SS_{xya}^{vt} + V_v^t \cdot D_{xy} \cdot \pi_{xy}^{vt} / V^v \right] \quad (40)$$

$$+ \left[\sum_{(x,y) \in \Psi''} \sum_{r \in R} FU1_v \cdot U_v^t \cdot D_{xy} \cdot \pi_{xy}^{vt} + FU2_v \cdot U_v^t \cdot W_r \cdot D_{xy} \cdot SS_{xyr}^{vt} + V_v^t \cdot D_{xy} \cdot \pi_{xy}^{vt} / V^v \right]$$

$$CES = \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \left[\sum_{(x,y) \in \Psi'} \sum_{a \in A} FU1_v \cdot D_{xy} \cdot \pi_{xy}^{vt} + FU2_v \cdot W_a \cdot D_{xy} \cdot SS_{xya}^{vt} \right] \quad (41)$$

$$+ \left[\sum_{(x,y) \in \Psi''} \sum_{r \in R} FU1_v \cdot D_{xy} \cdot \pi_{xy}^{vt} + FU2_v \cdot W_r \cdot D_{xy} \cdot SS_{xyr}^{vt} \right]$$

$$SS_{xya}^{vt} \leq Q_{xya}^t, \quad \forall (x,y) \in \Psi', a, v, t \quad (42)$$

$$SS_{xya}^{vt} \leq BM \cdot \pi_{xy}^{vt}, \quad \forall (x,y) \in \Psi', a, v, t \quad (43)$$

$$SS_{xya}^{vt} \geq Q_{xya}^t - BM \cdot (1 - \pi_{xy}^{vt}), \quad \forall (x,y) \in \Psi', a, v, t \quad (44)$$

$$SS_{xyr}^{vt} \leq Q_{xyr}^t, \quad \forall (x,y) \in \Psi'', r, v, t \quad (45)$$

$$SS_{xyr}^{vt} \leq BM \cdot \pi_{xy}^{vt}, \quad \forall (x,y) \in \Psi'', r, v, t \quad (46)$$

$$SS_{xyr}^{vt} \geq Q_{xyr}^t - BM \cdot (1 - \pi_{xy}^{vt}), \quad \forall (x,y) \in \Psi'', r, v, t \quad (47)$$

$$SS_{xya}^{vt}, SS_{xyr}^{vt} \geq 0 \quad (48)$$

۴-۳- توسعه مدل در حالت عدم قطعیت

از آنجا که تقاضای مشتریان، عرضه مواد اولیه، قیمت بازاری محصولات و فرصت‌های شغلی در صنایع به طور دقیق قابل پیش‌بینی نیست. از این رو، پارامترهای تقاضا، قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان، قیمت محصولات و تعداد مشاغل ایجاد شده به

محدودیت (۳۰) نشان داده شده است. محدودیت‌های (۳۱)، (۳۲) و (۳۳) به ترتیب مقداری از محصولات برگشتی جمع‌آوری شده که دارای ارزش بازیابی انرژی، قابل بازیافت و ضایعات هستند را مشخص می‌کند. محدودیت‌های ظرفیت حمل و نقل اطمینان می‌دهند که در صورت استفاده از وسیله نقلیه خاص، مقدار انتقال مواد و محصولات باید کمتر از حداکثر ظرفیت حجمی (۳۴ و ۳۵) و حداکثر ظرفیت وزنی (۳۶ و ۳۷) وسیله نقلیه باشد. روابط (۳۸) و (۳۹)، به ترتیب گویای محدودیت‌های ضروری منطقی روی متغیرهای تصمیم‌گسسته و پیوسته هستند.

۳-۳- خطی‌سازی مدل

مدل توسعه داده شده غیرخطی می‌باشد. این غیرخطی بودن ناشی از وجود روابط ضرب میان متغیرهای باینری و پیوسته، در تابع هدف اول (عبارت‌های SC و CES) و همچنین در محدودیت میزان انتشار دی‌اکسید کربن (رابطه ۴) است. حل مدل‌های غیرخطی در مقایسه با مدل‌های خطی با پیچیدگی همراه است [۵۷ و ۵۸]. از این رو، دو متغیر تصمیم جدید مطابق جدول (۲) تعریف می‌شود که با جایگزینی عبارت‌های غیرخطی با آن‌ها و همچنین اضافه نمودن محدودیت‌های (۴۲) لغایت (۴۷) به خطی‌سازی مدل پرداخته می‌شود.

جدول (۲). متغیرهای تصمیم‌گیری اضافه شده به مدل برای خطی‌سازی

نماد	شرح
SS_{xya}^{vt}	مقدار مواد اولیه نوع a که توسط وسیله نقلیه v بین تسهیلات $(x, y) \in \Psi'$ در دوره زمانی t انتقال می‌یابد
SS_{xyr}^{vt}	مقدار محصول Γ که توسط وسیله نقلیه v بین تسهیلات $(x, y) \in \Psi''$ در دوره زمانی t انتقال می‌یابد

متغیرهای تصمیم‌گیری مندرج در جدول (۲) به نمادهای تعریف شده در بخش ضمیمه مقاله اضافه می‌شود. به منظور خطی‌سازی مدل، عبارت SC مربوط به هزینه‌ی سوخت مصرفی در تابع هدف اقتصادی با رابطه‌ی (۴۰) و عبارت CES در تابع هدف اقتصادی و محدودیت (۴) که به میزان انرژی مصرفی مربوط می‌شود با رابطه‌ی (۴۱) جایگزین می‌شوند. محدودیت (۴۸) نشان دهنده محدودیت اعمال شده بر متغیرهای تصمیم‌گیری جدید است.

به منظور ارائه هم‌تای استوار فازی ۱ مدل، با در نظر گرفتن $\lambda > 0.5$ به عنوان درجه خوش‌بینی (درجه اهمیت اندازه خوش‌بینانه امکان) از اندازه فازی Me و $\alpha > 0.5$ نیز متغیری است که استواری محدودیت‌ها را طبق روابط شماره (۵۲، ۵۳، ۵۴) به صورت فعالانه تنظیم می‌کند و همچنین از ارزش انتظاری مقادیر موجود در توابع هدف برای اعداد فازی مثبت ($A_1 > 0$) طبق رابطه شماره (۵۵) استفاده می‌شود.

$$Me(\bar{A} \leq x) \geq \alpha_1 \Leftrightarrow \lambda + (1 - \lambda) \left(\frac{x - A_2}{A_3 - A_2} \right) \geq \alpha_1 \quad (52)$$

$$\Leftrightarrow x \geq \frac{(\alpha_1 - \lambda)A_3 + (1 - \alpha_1)A_2}{(1 - \lambda)}$$

$$Me(\bar{A} \geq x) \geq \alpha_2 \Leftrightarrow \lambda + (1 - \lambda) \left(\frac{A_2 - x}{A_2 - A_1} \right) \geq \alpha_2 \quad (53)$$

$$\Leftrightarrow x \leq \frac{(\alpha_2 - \lambda)A_1 + (1 - \alpha_2)A_2}{(1 - \lambda)}$$

$$Me(\bar{A} = x) \geq \alpha_3 \Leftrightarrow Mes\{x \leq \bar{A} \leq x\} \geq \alpha$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} Me\{\bar{A} \leq x\} \geq \alpha \\ Me\{\bar{A} \geq x\} \geq \alpha \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \lambda + (1 - \lambda) \left(\frac{x - A_2}{A_3 - A_2} \right) \geq \alpha_3 \\ \Leftrightarrow x \geq \frac{(\alpha_3 - \lambda)A_3 + (1 - \alpha_3)A_2}{(1 - \lambda)} \\ \lambda + (1 - \lambda) \left(\frac{A_2 - x}{A_2 - A_1} \right) \geq \alpha_3 \\ \Leftrightarrow x \leq \frac{(\alpha_3 - \lambda)A_1 + (1 - \alpha_3)A_2}{(1 - \lambda)} \end{cases} \quad (54)$$

$$E^{Me}[\bar{A}] = \int_0^{+\infty} Me\{\bar{A} \geq x\} dx - \int_{-\infty}^0 Me\{\bar{A} \leq x\} dx \quad (55)$$

$$= \frac{(1 - \lambda)}{2} A_1 + \frac{1}{2} A_2 + \frac{\lambda}{2} A_3$$

در پژوهش حاضر، برای در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها و میزان خوش‌بینی یا بدبینی تصمیم‌گیرنده نسبت به موقعیت‌های تصمیم‌گیری، به ترتیب از مدل برنامه‌ریزی امکانی استوار و مقیاس Me استفاده می‌شود. بایرام‌زاده و همکاران [۵۹] برای نخستین بار مدل برنامه‌ریزی امکانی استوار چند هدفه را معرفی کردند. در مدل چند هدفه بر خلاف مدل‌های امکانی استوار متداول تک هدفه، حداکثرسازی مقدار متوسط عملکرد زنجیره تأمین، به حداکثر رساندن استواری بهینگی (حداقل‌سازی ریسک) و استواری شدنی بودن در سه تابع هدف مدنظر قرار می‌گیرد. شرح مدل چند هدفه در ادامه آمده است:

صورت غیر قطعی در نظر گرفته می‌شود. زمانی که اطلاعات کافی برای پارامترها وجود ندارد، از توزیع امکانی برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. علاوه بر این، به دلیل عدم توسعه‌ی طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن ملاحظات پایداری و قابلیت اطمینان و فقدان اطلاعات در این حوزه، محدودیت تقاضا در مطالعه حاضر انعطاف‌پذیر می‌باشد که لازم است از برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر برای مقابله با محدودیت‌های نرم استفاده شود.

در اینجا رویکرد جدید برنامه‌ریزی امکانی استوار بر مبنای مقیاس Me برای کنترل عدم قطعیت در مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار و قابل اطمینان توسعه داده می‌شود. از جایی که مقیاس Me نگرش‌های میانه‌ی پیوستار خوش‌بینی-بدبینی را در نظر می‌گیرد، برای تصمیم‌گیری در دنیای واقعی مناسب‌تر است. اندازه خوش‌بینی-بدبینی (Me) به صورت رابطه شماره (۴۹) تعریف می‌شود.

$$Me\{A\} = \lambda \cdot Pos\{A\} + (1 - \lambda) \cdot Nec\{A\} \quad (49)$$

$$= Nec\{A\} + \lambda \cdot (Pos\{A\} - Nec\{A\})$$

هنگامی که $\lambda = 1$ باشد یعنی تصمیم‌گیرنده خوش‌بینانه‌ترین نگرش را دارد، در نتیجه $Me = Pos$ می‌شود.

هنگامی که $\lambda = 0$ باشد یعنی تصمیم‌گیرنده بدبینانه‌ترین نگرش را دارد، در نتیجه $Me = Nec$ می‌شود.

هنگامی که $\lambda = 0.5$ باشد یعنی تصمیم‌گیرنده نگرشی میانه دارد، در نتیجه $Me = Cre$ می‌شود.

تابع توزیع اندازه Me به صورت روابط شماره (۵۰) و (۵۱) می‌باشد [۲۳].

$$Me\{\bar{A} \leq b\} \quad (50)$$

$$= \begin{cases} 0 & \text{if } b \leq A_1 \\ \lambda \times \frac{b - A_1}{A_2 - A_1} & \text{if } A_1 \leq b \leq A_2 \\ \lambda + (1 - \lambda) \times \frac{b - A_2}{A_3 - A_2} & \text{if } A_2 \leq b \leq A_3 \\ 1 & \text{if } b \geq A_3 \end{cases}$$

$$Me\{\bar{A} \geq b\} \quad (51)$$

$$= \begin{cases} 1 & \text{if } b \leq A_1 \\ \lambda + (1 - \lambda) \times \frac{A_2 - b}{A_2 - A_1} & \text{if } A_1 \leq b \leq A_2 \\ \lambda \times \frac{A_3 - b}{A_3 - A_2} & \text{if } A_2 \leq b \leq A_3 \\ 0 & \text{if } b \geq A_3 \end{cases}$$

¹ Robust Fuzzy Counterpart (RFC)

استوار چند هدفه نیز مانند مدل‌های تک هدفه، سطح اطمینان رضای محدودیت‌های شانس بین ۰/۵ و ۱ در نظر گرفته می‌شود. بر اساس مقیاس فازی Me، با جایگذاری معادل ارزش انتظاری اعداد فازی در توابع هدف و کنترل پارامترهای غیرقطعی در محدودیت‌های شانس، می‌توان به به همتای قطعی روابط دارای پارامتر غیرقطعی دست یافت (به روابط ۶۲ لغایت ۶۹ نگاه کنید).

$$\begin{aligned}
 TR &= \sum_{t \in T} \left[\sum_{(x,y) \in \Psi_5} \sum_{r \in R} \left(\frac{(1-\lambda)}{2} PR_{er}^t \right) \right. \\
 &+ \left. \frac{1}{2} PR_{er(2)}^t + \frac{\lambda}{2} PR_{er(3)}^t \right] \cdot Q_{xyr}^t \\
 &+ \sum_{(x,y) \in \Psi_8} \sum_{r \in R} \left(\frac{(1-\lambda)}{2} PR_{br(1)}^t + \frac{1}{2} PR_{br(2)}^t \right. \\
 &+ \left. \frac{\lambda}{2} PR_{br(3)}^t \right) \cdot Q_{xyr}^t \\
 &+ \sum_{(x,y) \in \Psi_3} \sum_{a \in A} \left(\frac{(1-\lambda)}{2} PR_{hr(1)}^t + \frac{1}{2} PR_{hr(2)}^t \right. \\
 &+ \left. \frac{\lambda}{2} PR_{hr(3)}^t \right) \cdot Q_{xya}^t \\
 JC &= \sum_{u \in U} \left(\sum_{p \in P} \sum_{g \in G} \eta_p \cdot \left(\frac{(1-\lambda)}{2} job_{p(1)}^{gu} \right) \right. \\
 &+ \left. \frac{1}{2} job_{p(2)}^{gu} + \frac{\lambda}{2} job_{p(3)}^{gu} \right) \cdot \theta_p^{gu} \\
 &+ \sum_{k \in K} \eta_k \cdot \left(\frac{(1-\lambda)}{2} job_{k(1)}^u + \frac{1}{2} job_{k(2)}^u \right. \\
 &+ \left. \frac{\lambda}{2} job_{k(3)}^u \right) \cdot \theta_k^u \\
 &+ \sum_{c \in C} \eta_c \cdot \left(\frac{(1-\lambda)}{2} job_{c(1)}^u + \frac{1}{2} job_{c(2)}^u \right. \\
 &+ \left. \frac{\lambda}{2} job_{c(3)}^u \right) \cdot \theta_c^u \\
 &+ \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} \eta_m \cdot \left(\frac{(1-\lambda)}{2} job_{m(1)}^{lu} + \frac{1}{2} job_{m(2)}^{lu} \right. \\
 &+ \left. \frac{\lambda}{2} job_{m(3)}^{lu} \right) \cdot \theta_m^{lu} + jt \\
 &+ \sum_{r \in R} \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} \left(\sum_{p \in P} \sum_{g \in G} \frac{TP_r^g \cdot Q_{pr}^{gt}}{cap_p^{gu}} \right. \\
 &+ \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \frac{TK_r \cdot Q_{pkr}^t}{Cap_k^u} + \sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \frac{TC_r \cdot Q_{ecr}^t}{Cap_c^u} \\
 &+ \left. \sum_{c \in C} \sum_{m \in M} \sum_{a \in A} \sum_{l \in L} \frac{TM_a^l \cdot \rho_{ar} \cdot Q_{cmr}^t}{cap_m^{lu}} \right)
 \end{aligned} \tag{۶۲}$$

$$Max OF_1 = \sum_{i=1}^3 \Omega_i \cdot \mu_i \tag{۵۶}$$

$$Max OF_2 = \sum_{i=1}^3 \Omega'_i \cdot \mu'_i \tag{۵۷}$$

$$\begin{aligned}
 Min OF_3 &= \sum_{j=1}^J \delta_j \left[a_3 \right. \\
 &- \left. \frac{(\alpha - \lambda)a_3 + (1 - \alpha)a_2}{(1 - \lambda)} \right] \text{ for} \\
 &\geq \text{chance constraints}
 \end{aligned} \tag{۵۸}$$

$$\begin{aligned}
 &+ \sum_{j'=1}^{J'} \delta_{j'} \left[\frac{(\beta - \lambda)a_1 + (1 - \beta)a_2}{(1 - \lambda)} \right. \\
 &- \left. a_1 \right] \text{ for } \leq \text{chance constraints}
 \end{aligned}$$

s. t:

$$x \geq \frac{(\alpha - \lambda)a_3 + (1 - \alpha)a_2}{(1 - \lambda)}, \quad j = 1, \dots, J \tag{۵۹}$$

$$x \leq \frac{(\beta - \lambda)a_1 + (1 - \beta)a_2}{(1 - \lambda)}, \quad j' = 1, \dots, J' \tag{۶۰}$$

$$\begin{aligned}
 0.5 &< \alpha, \beta \\
 &\leq 1 \text{ and other constraints}
 \end{aligned} \tag{۶۱}$$

در مدل بالا، OF1 مجموع وزنی تابع ادغامی فازی است که مقادیر مورد انتظار امکانی توابع هدف اصلی $E[Z_i]$ ، $i = 1, 2, 3$ را تجمیع می‌کند. بنابراین، OF1 در پی افزایش عملکرد سیستم است. Ω_i وزن یا اهمیت هر تابع هدف پایه (Z_i) از دیدگاه تصمیم‌گیرنده است. μ_i درجه رضایتمندی تابع هدف Z_i را به صورت یک تابع عضویت فازی خطی نشان می‌دهد و برای هر سه تابع هدف از نوع حداکثرسازی است.

جنس توابع هدف نامعلوم مدل پیشنهادی از نوع بیشینه‌سازی است، به همین دلیل انحراف پایین‌تر از ارزش مورد انتظار اهداف به عنوان معیار ریسک در نظر گرفته می‌شود. در واقع، OF2 مجموع وزنی تابع ادغامی فازی است که به دنبال تجمیع حداقل‌سازی انحراف $E[Z_i] - Z_i^{Min}$ ، $i = 1, 2, 3$ می‌باشد. Z_2 و Z_3 شامل پارامترهای غیرقطعی هستند. بنابراین، OF2 کنترل‌کننده استواری بهینگی بردار جواب است. Ω'_i وزن یا اهمیت تابع هدف نام را نشان می‌دهد.

تابع هدف سوم (OF3)، با محاسبه تفاوت بین بدترین حالت ممکن پارامتر غیرقطعی و مقدار مورد استفاده در محدودیت‌های شانس، جریمه‌ای به اندازه‌ی $(\delta_{j+j'})$ بر روی محدودیت‌های غیرقطعی مدل ریاضی می‌بندد. در حقیقت، کنترل استواری شدنی بودن بردار جواب با OF3 انجام می‌پذیرد. در مدل امکانی

$$CR = \sum_{n \in S} \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} \left(\frac{(1-\lambda)}{2} SR_{sa(1)}^t + \frac{1}{2} SR_{sa(2)}^t + \frac{(\lambda)}{2} SR_{sa(3)}^t \right) \cdot \theta_{sa}^t \quad (64)$$

$$S_{er}^t + \sum_{k \in K} Q_{ker}^t \geq \frac{(\alpha - \lambda) Dem_{er(3)}^t + (1 - \alpha) Dem_{er(2)}^t}{(1 - \lambda)}, \quad \forall e, r, t \quad (65)$$

$$S_{er}^t + \sum_{k \in K} Q_{ker}^t \leq \frac{(\alpha - \lambda) Dem_{er(1)}^t + (1 - \alpha) Dem_{er(2)}^t}{(1 - \lambda)}, \quad \forall e, r, t \quad (66)$$

$$\sum_{k \in K} Q_{ker}^t \leq \frac{(\beta - \lambda) Dem_{er(1)}^t + (1 - \beta) Dem_{er(2)}^t}{1 - \lambda}, \quad \forall e, r, t \quad (67)$$

$$QR_{er}^t + \sum_{d=0}^{D_r} \omega_r^d \cdot S_{er}^{t-d} \geq \sum_{d=0}^{D_r} \omega_r^d \cdot \frac{(\gamma - \lambda) Dem_{er(3)}^t + (1 - \gamma) Dem_{er(2)}^t}{(1 - \lambda)}, \quad \forall e, r, t \quad (68)$$

$$QR_{er}^t + \sum_{d=0}^{D_r} \omega_r^d \cdot S_{er}^{t-d} \leq \sum_{d=0}^{D_r} \omega_r^d \cdot \frac{(\gamma - \lambda) Dem_{er(1)}^t + (1 - \gamma) Dem_{er(2)}^t}{(1 - \lambda)}, \quad \forall e, r, t \quad (69)$$

توابع هدف، در عبارت دوم تابع هدف گنجانده شده است [۶۱].

به عنوان مثال، با این فرمول حل کننده بهترین حالت را برای F_1 پیدا می کند و سپس سعی دارد به ترتیب سایر اهداف را بهینه کند.

۴- یافته های پژوهش

۴-۱- مطالعه موردی

مطالعه موردی این پژوهش مربوط به یک شرکت فعال در صنعت کارتن سازی است. این شرکت با نام تجاری "غرب کارتن" در استان کرمانشاه فعالیت می کند. محصولات شرکت (نوع ورق و کارتن های دو لایه، سه لایه و پنج لایه) برای مصارف صنعتی و جهت بسته بندی انواع مواد غذایی، دارویی، آرایشی بهداشتی، ساختمانی، تولید می شود. به همین علت، محصولات تولیدی از نظر ابعاد با یکدیگر متفاوت هستند. این شرکت در راستای اجرای برنامه مسئولیت پذیری اجتماعی شرکتی، طبق برخی از مقررات و بخشنامه های دولتی ملزم به رعایت ملاحظات زیست محیطی و اجتماعی (به عنوان مثال، کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و ایجاد فرصت های شغلی) در محیط کسب و کار خود می باشد. این کارخانه قصد دارد زنجیره تأمین فعلی خود را با اضافه کردن لجستیک معکوس، توسعه دهد. بنابراین، برنامه ای احداث بعضی از تسهیلات در مکان های احتمالی را برای تولید و توزیع محصولات خود و بازیابی محصولات برگشتی در پایان دوره عمر، دنبال می کند. از این رو، علاوه بر سودآوری، آثار زیست محیطی و اجتماعی را نیز مدنظر قرار داده و همچنین برای جلب رضایت

۳-۵- روش محدودیت اپسیلون تکامل یافته

در روش AEC، نتایج بهینه سازی انفرادی توابع اهداف برای تکمیل جدول موازنه (بازه مقادیر ε) طبق بهینه سازی لکسیوگرافی محاسبه می شود. همچنین، محدودیت های توابع اهداف با ترکیب متغیرهای کمکی مناسب به برابری تبدیل می شوند. استفاده از این متغیرهای کمکی در تابع هدف به عنوان اصطلاح دوم، (اولویت پایین تر نسبت به روش لکسیوگرافی)، مدل را مجبور می کند که فقط جواب های پارتو تولید کند [۶۰]. در صورت نشدنی بودن مسئله الگوریتم حل متوقف شده و برای تکرارهای بعدی حل نمی شود که این امر سبب افزایش سرعت حل آن نسبت به روش محدودیت اپسیلون معمولی شده است. در روش محدودیت اپسیلون تکامل یافته، مطابق با روش اصلی محدودیت اپسیلون یکی از اهداف مسئله با توجه به اولویت تصمیم گیرنده بهینه می شود و سایر اهداف به کران بالای اپسیلون محدود می شوند. مدل به دست آمده به صورت زیر است:

$$(70) \quad \begin{cases} \text{Max } F_1(x) - \delta \times \left[\frac{S_2}{r_2} + \left(10^{-1} \times \frac{S_3}{r_3} \right) + \dots + \left(10^{-(n-2)} \times \frac{S_n}{r_n} \right) \right] \\ \text{s.t:} \\ F_i(x) + s_i = e_i, \quad i = 2, 3, \dots, n \\ x \in S, s_i \in R^+ \end{cases}$$

جایی که S منطقه جواب مدل است. e_i مقدار سمت راست توابع اهداف و δ یک عدد کوچک است (معمولاً $\delta \in [10^{-6}, 10^{-3}]$). دامنه تابع هدف r_i (طبق محاسبات جدول موازنه) است. در این مدل، نوعی بهینه سازی لکسیوگرافی برای بی مقیاس سازی و اطمینان از وجود گزینه بهینه دیگری در بقیه

کشور و اساتید دانشگاه در حوزه مدیریت زنجیره تأمین و مدل سازی ریاضی، مورد تأیید قرار گرفته است. بنابراین، از نظر اعتبار درونی مورد تأیید می باشد. با این حال، برای تکمیل اعتبارسنجی مدل توسعه یافته، اعتبار بیرونی مدل نیز باید مورد ارزیابی قرار گیرد. اعتبار بیرونی به بررسی میزان انطباق رفتار مدل با واقعیت - پس از ایجاد تغییرات در تعدادی از پارامترهای مدل - می پردازد. اجرای مدل تحت تحلیل حساسیت های مختلف می تواند اعتبار بیرونی مدل را مورد کنکاش قرار دهد. در ادامه به منظور ارزیابی اعتبار بیرونی مدل، وزن اهداف و پارامتر تقاضا مورد تحلیل حساسیت قرار می گیرند.

۳-۴- تأثیر وزن های مختلف توابع هدف بر ساختار

زنجیره تأمین

برای تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی به وزن اهداف اقتصادی، اجتماعی، و قابلیت اطمینان، مدل برای وزن های مختلف حل شده و مقادیر اهداف با یکدیگر مقایسه می شوند. در این راستا، چهار نمونه مختلف بر اساس ضرایب اهمیت توابع هدف برای مسئله پیشنهادی در نظر گرفته شده است. در عمل، مدیریت شرکت می تواند در مورد اهمیت این ضرایب بر اساس شرایط فنی و اقتصادی صنعت مورد فعالیت خود دست به انتخاب بزند. در نمونه اول، اهمیت یکسانی برای اهداف در نظر گرفته شده است (یعنی ۰/۳۳ برای هر هدف). در حالت دوم، مسئولیت پذیری اجتماعی و قابلیت اطمینان اهمیت یکسانی دارند (هر کدام ۰/۲۵) و سودآوری با ضریب ۰/۵ مهمتر شمرده شده است زیرا تمامی کسب و کارها معمولاً به دنبال کسب سود هستند. با همین رویکرد، نمونه سوم برای مسئولیت پذیری اجتماعی و نمونه چهارم برای قابلیت اطمینان اهمیت بیشتری قائل شده است. زیرا مسئولیت پذیری اجتماعی کسب و کارها توسط اکثر ذی نفعان رصد می شود. همچنین، در کاربردهای دنیای واقعی، قابلیت اطمینان یک زنجیره تأمین ممکن است در برابر سودآوری یا مسئولیت پذیری اجتماعی آن آسیب پذیرتر باشد.

حداکثری مشتریان و رقابت در بازار، به گزینه تحویل قابل اطمینان محصولات (که به خرابی تسهیلات و مسیرهای ارتباطی شبکه زنجیره تأمین وابسته است) توجه می کند. در نتیجه، مدیران شرکت در حال تصمیم گیری برای طراحی و بهینه سازی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار و قابل اطمینان به جای شبکه فعلی هستند.

اگرچه مدل پیشنهادی با استفاده از داده های سال ۱۳۹۹ برای شرکت غرب کارتن بهینه سازی شده است. اما مطابق اهداف و مفروضات مسئله پژوهش، قلمروی مکانی تحقیق صناعی را شامل می شود که با توجه به اصول پایداری و قابلیت اطمینان به دنبال راه کارهایی جهت حلقه بسته نمودن جریان تولید خود هستند. بنابراین، مدل ارائه شده در این پژوهش قابل توسعه به سایر زمان ها و مکان ها است. در ادامه، مدل ریاضی پیشنهادی در بسته نرم افزاری GAMS 24.2.1 با استفاده از حل کننده CPLEX پیاده سازی شده است. تمامی محاسبات بر روی مجموعه سخت افزاری یک رایانه Intel Core i7 با پردازنده ۲,۴ گیگاهرتزی و حافظه ۱۶ گیگابایتی انجام شده است.

۲-۴- اعتبارسنجی مدل توسعه یافته

هر مدل ریاضی قبل از بکارگیری در دنیای واقعی بایستی به دو صورت درونی و بیرونی اعتبارسنجی شود. اعتبار درونی، صحت فرمول بندی مدل را مورد ارزیابی قرار می دهد. به عبارت دیگر، آیا فرمول بندی توسعه یافته مبتنی بر مدل های پیشین بوده است یا خیر؟ پاسخ به این پرسش می تواند شیوهی ارزیابی اعتبار درونی مدل را مشخص کند. علاوه بر این، نظرسنجی از خبرگان صنایع و اساتید دانشگاهی در مورد صحت فرمول بندی مدل می تواند کمک کننده باشد.

با توجه به اینکه پژوهش حاضر برای مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین توسعه یافته از (۱) مدل های پیشین در کار محققانی نظیر غایب لو و همکاران [۲۵]، محمد و همکاران [۶۱]، تیرکلایی و همکاران [۳۴]، فضلی خلف و همکاران [۴۲] بهره گرفته است و همچنین (۲) توسط خبرگان صنعت بسته بندی

جدول (۳). نتایج محاسباتی با وزن‌های مختلف توابع هدف اصلی

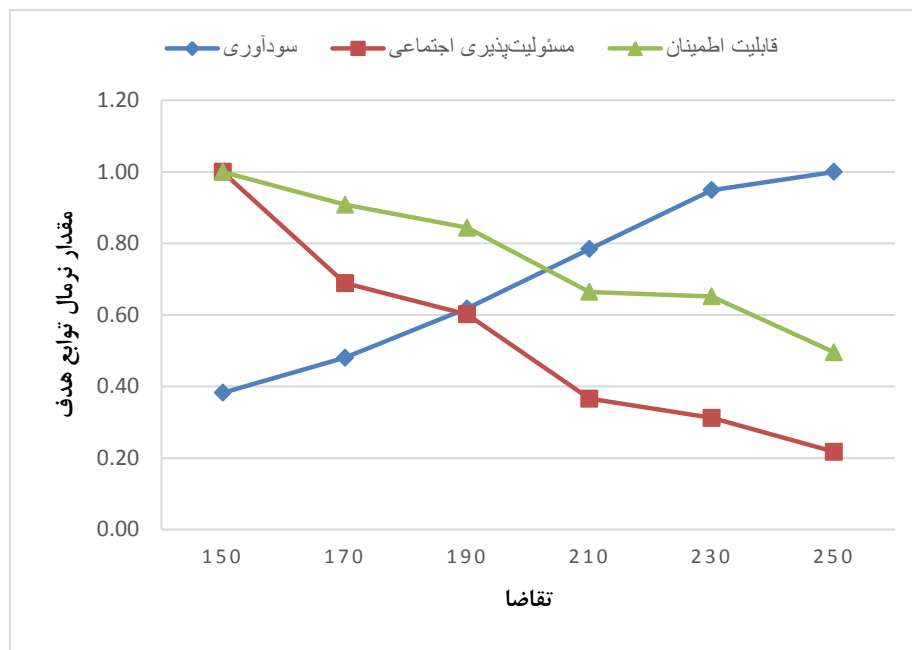
جایابی تسهیلات بالقوه و سطح ظرفیت آن‌ها				دسته‌بندی دوم از اهداف			دسته‌بندی اول از اهداف			وزن اهداف
مراکز باز یافت	مراکز جمع‌آوری	مراکز توزیع	مراکز تولید (سطح ظرفیت)	استواری شدنی	استواری بهینگی	عملکرد سیستم	Z3	Z2	Z1	
همدان (۲)، بندرعباس (۲)	قزوین (۳)، زنجان (۳)	اصفهان (۳)، تهران (۳)	تهران (۳)، همدان (۳)، اراک (۲)	۲۳۱۱۴۰۰۰	۰/۹۶۱	۰/۹۳۶	۳/۷۲	۱۷۰/۱/۶۳	۱۳۸۲۴۶۳۹	(۰/۳۳ و ۰/۳۳ و ۰/۳۳)
همدان (۳)	قزوین (۳)، زنجان (۲)	اصفهان (۳)، تهران (۳)	تهران (۳)، همدان (۳)	۲۳۲۶۰۶۰۰	۰/۹۵۴	۰/۹۴۱	۳/۲۲	۱۶۷۶/۲۲	۱۴۳۰۸۹۴۰	(۰/۱۵ و ۰/۲۵ و ۰/۲۵)
همدان (۳)، بندرعباس (۱)	قزوین (۳)، زنجان (۳)	اصفهان (۳)، تهران (۳)	تهران (۳)، همدان (۲)، کرمانشاه (۱)، اراک (۲)	۲۳۲۱۲۰۰۰	۰/۹۶۶	۰/۹۳۷	۳/۰۶	۱۷۳۱/۹۱	۱۳۶۰۷۱۹۵	(۰/۲۵ و ۰/۱۵ و ۰/۲۵)
همدان (۳)	قزوین (۳)، زنجان (۲)	اصفهان (۳)، تهران (۳)	تهران (۳)، همدان (۲)، اراک (۳)	۲۳۲۵۸۲۰۰	۰/۹۶۳	۰/۹۳۵	۳/۹۸	۱۶۹۸/۰۵	۱۳۷۷۶۱۰۲	(۰/۲۵ و ۰/۲۵ و ۰/۱۵)

دیگر ۰/۲۵ در نظر گرفته شود، تسهیلات کمتری با بیشترین ظرفیت ایجاد می‌شود. در مقابل، تابع هدف اجتماعی تمایل به یک زنجیره تأمین غیرمتمرکز را به منظور ارتقای شاخص‌های اجتماعی زنجیره تأمین نشان می‌دهد.

۴-۴- تحلیل حساسیت مدل

به منظور اعتبارسنجی و بررسی دقیق‌تر رفتار مدل پیشنهادی می‌توان حساسیت پارامترها را نسبت به تغییر مقدارشان مورد مشاهده قرار داد. از این رو، در این بخش سعی می‌شود با تغییر تقاضای بازار اولیه (DEM_{er}^t)، رفتار توابع هدف سه‌گانه‌ی مدل یعنی سودآوری، مسئولیت‌پذیری اجتماعی و قابلیت اطمینان بررسی گردد. تغییر مقدار توابع هدف سودآوری، مسئولیت‌پذیری اجتماعی و قابلیت اطمینان نسبت به تغییر پارامتر تقاضای بازار اولیه (DEM_{er}^t) در شکل (۳) نشان داده شده است.

نتایج حل مدل در وزن‌های مختلف توابع هدف اساسی در جدول (۳) گزارش شده است. که در آن‌ها $Z1$ ، $Z2$ و $Z3$ به ترتیب ضرایب اهمیت توابع $f1$ ، $f2$ و $f3$ را نشان می‌دهند. طبق جدول (۳) سه تابع هدف با یکدیگر در تضاد هستند، زیرا زمانی که یکی مقادیر مطلوب‌تری به دست آورد، بقیه مقادیر نامطلوب بیشتری دریافت می‌کنند. چنین تضادهایی بین توابع هدف به این نتیجه می‌رسد که تصمیم‌گیرندگان باید در مقایسه با وضعیتی که فقط جنبه اقتصادی در نظر گرفته می‌شود، برای حفاظت بیشتر از محیط زیست و بهبود قابلیت اطمینان، سود کمتری مطالبه کنند. علاوه بر این، تعداد، مکان‌ها و ظرفیت تسهیلات تأسیس شده نشان می‌دهد که تخصیص وزن‌های بیشتر به تابع هدف سودآوری، مدل را به سمت زنجیره تأمین متمرکزتر به دلیل هزینه‌های کمتر و اثرات زیست‌محیطی کمتر آن متمایل می‌کند. به عنوان مثال، اگر وزن تابع هدف اقتصادی ۰/۵ و وزن دو تابع



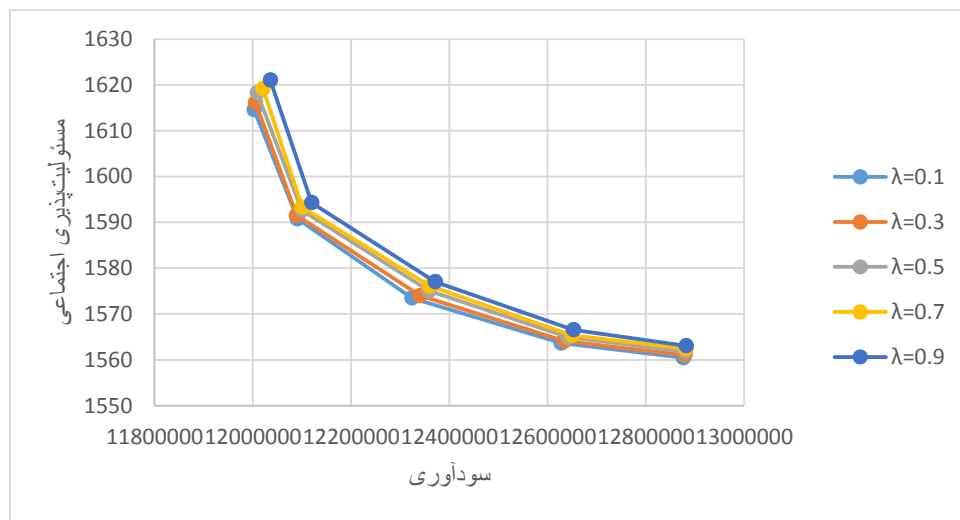
شکل (۳). تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به تغییرات تقاضا

پیشنهادی از این افزایش است. واکنش معکوس مدل از دیدگاه قابلیت اطمینان در پاسخ به تقاضای افزایش یافته مشتریان، به خوبی در شکل (۲) نمایان است. در توضیح این واکنش می‌توان گفت که افزایش میزان تولید در پاسخ به افزایش تقاضا، مواد اولیه بیشتری می‌خواهد. تأمین میزان بیشتری از مواد اولیه، انعقاد قرارداد با تأمین کنندگان با قابلیت اطمینان کمتر را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. زیرا ظرفیت تأمین کنندگان محدود است و هیچ یک به تنهایی قادر به تأمین نیازهای زنجیره تأمین در شرایط عادی نیست. این محدودیت در حالت افزایش تقاضا تشدید می‌شود. در واقع، برای زنجیره تأمین طراحی شده، رضایت مشتری مهمتر از قابلیت اطمینان است.

۴-۵- حل مدل توسعه یافته بر اساس روش AEC

در اینجا نتایج حل مدل با در نظر گرفتن سه مقدار $0/2$ ، $0/5$ و $0/8$ برای پارامتر λ (اندازه خوش‌بینی-بدبینی) و سطوح عدم اطمینان $0/5$ تا $0/9$ برای پارامترهای α ، β و γ ارائه می‌شود. نتایج به دست آمده از مدل بر مبنای معیار Me با استفاده از روش AEC در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ به نمایش گذاشته شده است. این شکل‌ها تضادهای زوجی مربوط به توابع هدف اصلی را برای سطح اطمینان ($\alpha=0/5$) نشان می‌دهد.

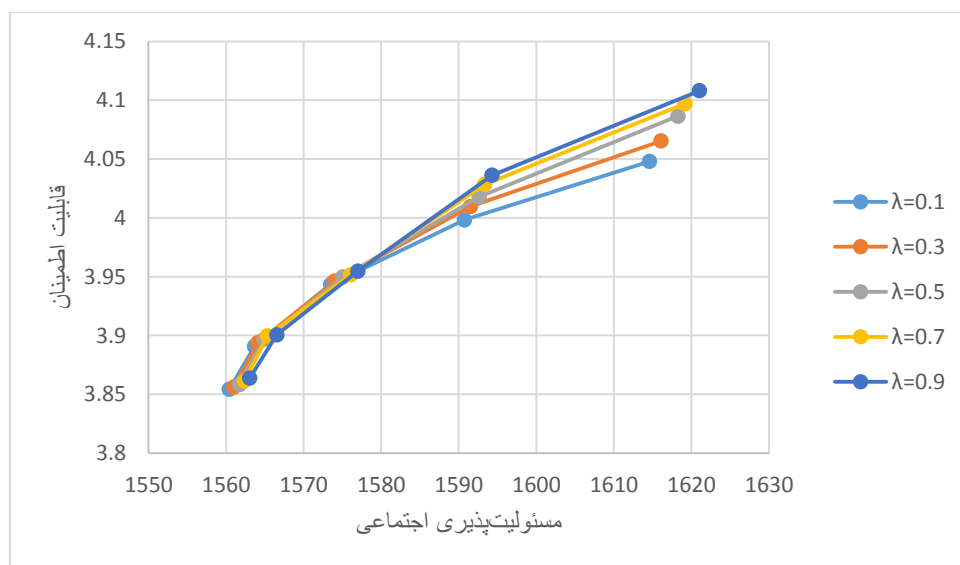
همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود با افزایش تقاضای بازار اولیه در مسئله مقدار تابع هدف سودآوری افزایش، اما مقدار توابع هدف مسئولیت‌پذیری اجتماعی و قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد. با توجه به وجود هزینه جریمه برای مواقع کمبود، مدل سعی در ارضای حداکثری تقاضا دارد. استراتژی عملیاتی مدیریت تولید هنگام مواجهه با افزایش ناگهانی تقاضای مشتریان، افزایش میزان تولید است. این استراتژی در مدل ریاضی به واسطه وجود رابطه ضرب میان قیمت فروش محصولات و هزینه‌های تولید (پارامتر) با مقدار تولید (متغیر تصمیم) در تابع هدف سودآوری قابل بیان است. اگرچه مسئولیت‌پذیری اجتماعی زنجیره تأمین در مدل پیشنهادی به مقدار تولید (متغیر تصمیم) وابسته است، اما میزان این وابستگی در جهت منفی عمل می‌کند. از یک سو، افزایش مقدار تولید به عنوان یک برنامه عملیاتی برای مقابله با افزایش تقاضا به ندرت به استخدام نیروی جدید (که نیازمند برنامه‌ریزی بلندمدت است) می‌انجامد و اغلب با فشردگی‌سازی زمان کاری کارکنان موجود جبران می‌شود. از سوی دیگر، افزایش ساعات کاری کارکنان به منظور استفاده حداکثری از ظرفیت اسمی تولید منجر به افزایش مرخصی‌های استعلاجی استفاده شده توسط پرسنل تولیدی می‌شود. بنابراین، افزایش تقاضا به کاهش مسئولیت‌پذیری اجتماعی منتهی می‌شود. یک روی دیگر سکه افزایش تقاضا، میزان تأثیرپذیری قابلیت اطمینان زنجیره تأمین



شکل (۴). تابع هدف سودآوری در مقابل مسئولیت پذیری اجتماعی



شکل (۵). تابع هدف سودآوری در مقابل قابلیت اطمینان



شکل (۶). تابع هدف مسئولیت پذیری اجتماعی در مقابل قابلیت اطمینان

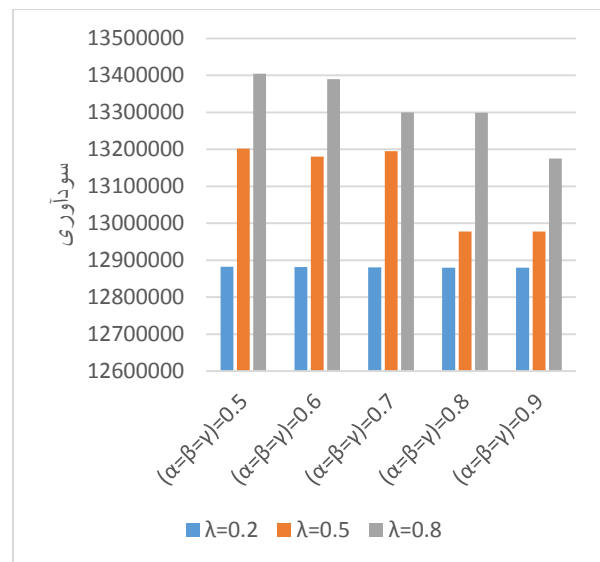
قابلیت اطمینان تحت شرایط عدم قطعیت ارائه شد. مدل ریاضی توسعه یافته از نوع برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی است. از آنجا که مدل ریاضی به صورت مدل بهینه‌سازی چندهدفه می‌باشد برای حل آن، روش محدودیت افسیلون تقویت شده (AEC) در نرم‌افزار گمز اجرا شده است. از مهمترین تصمیم‌های مدل پیشنهادی، انتخاب شرکت‌های تأمین کننده، تعیین مناسب‌ترین مکان‌ها برای تأسیس مراکز بالقوه، تعیین مقادیر حمل بین لایه‌های زنجیره تأمین و نوع شیوه‌های حمل و نقل بین گره‌ها می‌باشد. در حالیکه مطالعات گذشته ابعاد پایداری و قابلیت اطمینان را به طور جامع در مدل‌های طراحی زنجیره تأمین در نظر نگرفته‌اند، مدل ریاضی پیشنهادی در این پژوهش بر سودآوری کل زنجیره تأمین (بعد اقتصادی پایداری)، مکانیزم سقف و مبادله کربن (بعد زیست محیطی پایداری)، تأثیر توسعه شبکه زنجیره تأمین بر ایجاد فرصت‌های شغلی، کاهش آسیب‌دیدگی شغلی و بهبود شرایط اقتصادی مناطق محلی (بعد اجتماعی پایداری) و همچنین با در نظر گرفتن میزان خرابی در تسهیلات، مسیرها و وسایل حمل و نقل (قابلیت اطمینان شبکه) تمرکز می‌کند. به منظور حل مدل ریاضی مسئله از رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار چند هدفه و برای یافتن جواب‌های کارآی مدل چند هدفه از روش محدودیت افسیلون تکامل یافته استفاده شده است.

مدل ریاضی و روش حل پیشنهادی در یک مطالعه موردی در صنعت کارتن‌سازی (شرکت غرب کارتن در استان کرمانشاه) به کار گرفته شد. از جایی که افزایش سطح مسئولیت‌پذیری اجتماعی و قابلیت اطمینان به دلیل صرف هزینه‌های بیشتر، منجر به کاهش سودآوری می‌شود، بنابراین، برای دستیابی به وضعیت مطلوب باید سطحی از قابلیت اطمینان مدنظر قرار گیرد که از جوانب پایداری نیز قابل قبول باشد. مدیران زنجیره تأمین می‌توانند از نتایج این پژوهش در برخورد با شرایط مختلف عدم قطعیت در صنعت کارتن‌سازی بهره بگیرند. از مهمترین بینش‌های مدیریتی که نتایج این مطالعه به دنبال دارد، توسعه برنامه‌ریزی امکانی با مقیاس Me علاوه بر کاهش فرآیند حل مسئله، از طریق ارائه ترکیب محدبی از سطح ریسک نسبت به مقیاس‌های امکان و الزام، جواب‌های واقع‌بینانه‌تری در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهد. از طرفی، با در نظر گرفتن استواری شدنی و استواری بهینگی، انحراف‌های امکانی و عدم پوشش تقاضا و تخطی از محدودیت‌های غیر قطعی، در مدل پیشنهادی کنترل شده است. مدل علاوه بر این، بهبود تصمیم‌گیری در سطوح متفاوت از ریسک و عدم قطعیت برای تصمیم‌گیرندگان از دیگر بینش‌های مدیریتی است که این پژوهش با بکارگیری بهینه‌سازی استوار به آن دست یافته است.

۴-۶- تأثیر تغییرات همزمان سطوح اطمینان و پارامتر

خوش‌بینی-بدبینی

تابع هدف سودآوری زنجیره تأمین برای بررسی تأثیر تغییرات همزمان پارامترهای α ، β و γ (سطوح اطمینان) و پارامتر (طیف خوش‌بینی-بدبینی) در نظر گرفته شده است. این تغییرات در شکل (۷) به نمایش گذاشته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش سطح عدم اطمینان و افزایش پارامتر خوش‌بینی-بدبینی، مقدار سودآوری زنجیره تأمین افزایش می‌یابد. این نتیجه‌گیری به این دلیل است که سطح ریسک‌پذیری مدیر افزایش یافته که موجب افزایش سودآوری زنجیره تأمین می‌شود. در مقابل با افزایش سطح اطمینان و کاهش پارامتر λ ، و با کاهش سطح ریسک‌پذیری مدیر، میزان سودآوری زنجیره تأمین کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش پارامترهای α ، β و γ منطقه موجه جواب کوچک‌تر شده و مقادیر بدتری به عنوان جواب مسئله گزارش می‌شود. این در حالی است که منطقه موجه جواب با افزایش پارامتر λ گسترده‌تر شده و جواب‌های مسئله بهتر می‌شوند. بنابراین، با تغییرات در پارامتر λ می‌توان شاهد کاهش و افزایش منطقه موجه جواب بود و از این طریق استواری بهینگی و استواری شدنی بودن مدل قابل کنترل است.



شکل (۷). تأثیر تغییرات همزمان سطح اطمینان و پارامتر

خوش‌بینی-بدبینی بر سودآوری

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل ریاضی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن همزمان ملاحظات پایداری و

- [13] K. Govindan, M. Fattahi, and E. Keyvanshokoo, "Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 263, no. 1, pp. 108–141, 2017. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.04.009
- [14] D. Ivanov, "An adaptive framework for aligning (re) planning decisions on supply chain strategy, design, tactics, and operations," *International journal of production research*, vol. 48, no. 13, pp. 3999–4017, 2010. DOI: 10.1080/00207540902893417
- [15] Y. Meepetchdee and N. Shah, "Logistical network design with robustness and complexity considerations," *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, vol. 37, no. 3, pp. 201–222, 2007. DOI: 10.1108/09600030710742425
- [16] M. T. Melo, S. Nickel, and F. Saldanha-Da-Gama, "Facility location and supply chain management-A review," *European journal of operational research*, vol. 196, no. 2, pp. 401–412, 2009. DOI: 10.1016/j.ejor.2008.05.007
- [17] T. Davis, "Effective supply chain management," *Sloan management review*, vol. 34, pp. 35–35, 1993.
- [18] A. Hamidieh, B. Naderi, M. Mohammadi, M. Fazli-Khalaf, and A. Yoshise, "A robust possibilistic programming model for a responsive closed loop supply chain network design," *Cogent Math.*, vol. 4, no. 1, p. 1329886, 2017. DOI: 10.1080/23311835.2017.1329886
- [19] B. Zahiri, R. Tavakkoli-Moghaddam, and M. S. Pishvae, "A robust possibilistic programming approach to multi-period location-allocation of organ transplant centers under uncertainty," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 74, pp. 139–148, 2014. DOI: 10.1016/j.cie.2014.05.008
- [20] D. Bertsimas and M. Sim, "The price of robustness," *Oper. Res.*, vol. 52, no. 1, pp. 35–53, 2004. DOI: 10.1287/opre.1030.0065
- [21] M. S. Pishvae, J. Razmi, and S. A. Torabi, "Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach," *Fuzzy Sets And Systems*, vol. 206, pp. 1–20, 2012. DOI: 10.1016/j.fss.2012.04.010
- [22] Z. Qin and X. Ji, "Logistics network design for product recovery in fuzzy environment," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 202, no. 2, pp. 479–490, 2010. DOI: 10.1016/j.ejor.2009.05.036
- [23] J. Xu and X. Zhou, "Approximation based fuzzy multi-objective models with expected objectives and chance constraints: Application to earth-rock work allocation," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 238, pp. 75–95, 2013. DOI: 10.1016/j.ins.2013.02.011
- [24] S. Amirian, M. Amiri, and M. T. Taghavifard, "Sustainable and reliable closed-loop supply chain network design: Normalized Normal Constraint (NNC) method application," *Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 33–68, 2022. DOI: 10.1001.1.17358272.2022.14.3.2.1
- [25] S. J. Hosseini Dehshiri, M. Amiri, L. Olfat, and M. S. Pishvae, "Stone paper closed-loop supply chain network design using robust stochastic, possibilistic and flexible chance-constrained programming," *Journal of Industrial Management Perspective*, vol. 12, no. 1, pp. 45–81, 2022. (In Persian) DOI: 10.52547/jimp.12.1.45
- [26] S. Ghayebloo, M. J. Tarokh, U. Venkatadri, and C. Diallo, "Developing a bi-objective model of the closed-loop supply chain network with green supplier selection and disassembly of products: The impact of parts reliability and product greenness on the recovery network," *J. Manuf. Syst.*, vol. 36, pp. 76–86, 2015. DOI: 10.1016/j.jmsy.2015.02.011
- [27] S. Khalifehzadeh, M. Seifbarghy, and B. Naderi, "A four-echelon supply chain network design with shortage: Mathematical modeling and solution methods," *J. Manuf. Syst.*, vol. 35, pp. 164–175, 2015. DOI: 10.1016/j.jmsy.2014.12.002
- [28] D. Rahmani and V. Mahoodian, "Strategic and operational supply chain network design to reduce carbon emission considering reliability and robustness," *J. Clean. Prod.*, vol. 149, pp. 607–620, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.068
- [29] Y. Li, B. Liu, and T.-C. (T. C.) Huan, "Renewal or not? Consumer response to a renewed corporate social responsibility strategy: Evidence from the coffee shop industry," *Tour. Manag.*, vol. 72, pp. 170–179, 2019. DOI: 10.1016/j.tourman.2018.10.031
- [30] B. Zahiri, J. Zhuang, and M. Mohammadi, "Toward an integrated sustainable-resilient supply chain: A pharmaceutical case study," *Transp. Res. Part E: Logist. Trans. Rev.*, vol. 103, pp. 109–142, 2017. DOI: 10.1016/j.tre.2017.04.009

با توجه به محدودیت‌های این پژوهش به خصوص موارد مطرح شده در مفروضات مسئله، می‌توان پیشنهادهای در جهت بهبود آن ارائه داد. یکی از مهمترین موارد، در نظر گرفتن عدم قطعیت برای سایر پارامترهای مدل ریاضی می‌باشد. توسعه مدل با در نظر گرفتن سایر مکانیزم‌های انتشار کربن (از جمله سقف کربن و مالیات کربن) و مقایسه نتایج مکانیزم‌ها با یکدیگر، یکی دیگر از مسیرهای مناسب برای توسعه این پژوهش می‌باشد. همچنین توسعه الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل مدل در ابعاد بزرگ‌تر، می‌تواند توسط علاقه‌مندان دنبال شود. علاوه بر این، کاربرد مدل پیشنهادی در سایر صنایع به عنوان یک حوزه مطالعاتی جدید مانند صنایع غذایی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

۶- مراجع

- [1] S. Luthra and S. K. Mangla, "Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 117, pp. 168–179, 2018. DOI: 10.1016/j.psep.2018.04.018
- [2] A. A. Nand, R. Menon, A. Bhattacharya, and R. Bhamra, "A review of sustainability trade-offs affecting suppliers in developed and less developed countries," *J. Bus. Ind. Mark.*, vol. 38, no. 3, pp. 463–483, 2023. DOI: 10.1108/JBIM-04-2021-0213
- [3] S. A. R. Khan, K. Zkik, A. Belhadi, and S. S. Kamble, "Evaluating barriers and solutions for social sustainability adoption in multi-tier supply chains," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 59, no. 11, pp. 3378–3397, 2021. DOI: 10.1080/00207543.2021.1876271
- [4] B. Fahimnia and A. Jabbarzadeh, "Marrying supply chain sustainability and resilience: A match made in heaven," *Transp. Res. Part E: Logist. Trans. Rev.*, vol. 91, pp. 306–324, 2016. DOI: 10.1016/j.tre.2016.02.007
- [5] D. Ivanov and A. Das, "Coronavirus (COVID-19/SARS-CoV-2) and supply chain resilience: a research note," *Int. J. Integr. Supply Manag.*, vol. 13, no. 1, p. 90, 2020. DOI: 10.1504/IJISM.2020.107780
- [6] S. Singh, R. Kumar, R. Panchal, and M. K. Tiwari, "Impact of COVID-19 on logistics systems and disruptions in food supply chain," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 59, no. 7, pp. 1993–2008, 2021. DOI: 10.1080/00207543.2020.1792000
- [7] Y. Sheffi, *The resilient enterprise: overcoming vulnerability for competitive advantage*. Pearson Education India, 2007.
- [8] K. Govindan, H. Mina, and B. Alavi, "A decision support system for demand management in healthcare supply chains considering the epidemic outbreaks: A case study of coronavirus disease 2019 (COVID-19)," *Transp. Res. Part E: Logist. Trans. Rev.*, vol. 138, no. 101967, p. 101967, 2020. DOI: 10.1016/j.tre.2020.101967
- [9] J. Moosavi and S. Hosseini, "Simulation-based assessment of supply chain resilience with consideration of recovery strategies in the COVID-19 pandemic context," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 160, no. 107593, p. 107593, 2021. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107593
- [10] A. Chatterjee and A. Layton, "Mimicking nature for resilient resource and infrastructure network design," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 204, no. 107142, p. 107142, 2020. DOI: 10.1016/j.res.2020.107142
- [11] D. Ivanov, "Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains: A simulation-based analysis on the coronavirus outbreak (COVID-19/SARS-CoV-2) case," *Transp. Res. Part E: Logist. Trans. Rev.*, vol. 136, no. 101922, p. 101922, 2020. DOI: 10.1016/j.tre.2020.101922
- [12] Y. Esmizadeh and M. Mellat Parast, "Logistics and supply chain network designs: incorporating competitive priorities and disruption risk management perspectives," *Int. J. Logist.*, vol. 24, no. 2, pp. 174–197, 2021. DOI: 10.1080/13675567.2020.1744546

- vol. 25, no. 79, pp. 123–151, 2023. (In Persian) DOR: 20.1001.1.20089198.1402.25.79.8.2
- [47] R. Lotfi, Y. Z. Mehrjerdi, M. S. Pishvae, A. Sadeghieh, and G.-W. Weber, "A robust optimization model for sustainable and resilient closed-loop supply chain network design considering conditional value at risk," *Numer. Algebra Control Optim.*, vol. 11, no. 2, p. 221, 2021. DOI: 10.3934/naco.2020023
- [48] Z. Sadeghi, O. Boyer, S. Sharifzadeh, and N. Saedi, "A robust mathematical model for sustainable and resilient supply chain network design: Preparing a supply chain to deal with disruptions," *Complexity*, vol. 2021, pp. 1–17, 2021. DOI: 10.1155/2021/9975071
- [49] S. Salehi, Y. Zare Mehrjerdi, A. Sadeghieh, and H. Hosseini-Nasab, "Designing a resilient and sustainable biomass supply chain network through the optimization approach under uncertainty and the disruption," *J. Clean. Prod.*, vol. 359, no. 131741, p. 131741, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131741
- [50] F. Goodarzian, P. Ghasemi, A. Gunasekaran, A. A. Taleizadeh, and A. Abraham, "A sustainable-resilience healthcare network for handling COVID-19 pandemic," *Ann. Oper. Res.*, vol. 312, no. 2, pp. 761–825, 2022. DOI: 10.1007/s10479-021-04238-2
- [51] M. Mohammadi and A. Nikzad, "Sustainable and reliable closed-loop supply chain network design during pandemic outbreaks and disruptions," *Oper. Manag. Res.*, 2022. DOI: 10.1007/s12063-022-00312-5
- [52] R. Eslamipour and A. Nobari, "A reliable and sustainable design of supply chain in healthcare under uncertainty regarding environmental impacts," *J. Appl. Res. Ind. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 256–272, 2023. DOI: 10.22105/jarie.2022.335389.1461
- [53] M. Akbari-Kasgari, H. Khademi-Zare, M. B. Fakhrazad, M. Hajiaghahi-Keshmeli, and M. Honarvar, "Designing a resilient and sustainable closed-loop supply chain network in copper industry," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 24, no. 5, pp. 1553–1580, 2022. DOI: 10.1007/s10098-021-02266-x
- [54] S. Mohamadi Nematabad, S. Pourmousa, A. Tajdini, A. Jahan Latibari, and A. Lashgari, "Identifying and prioritizing the components of sustainable production in the corrugated box making industry," *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, vol. 38, no. 1, pp. 21–36, 2023. (In Persian) DOI: 10.22092/ijwpr.2021.356457.1699
- [55] G. Estegi, S. Pourmousa, and A. Tajdini, "Identification of in Cleaner Production Indicators in the Corrugated Box Making Industries by Multiple Criteria Decision-Making Methods," vol. 12, pp. 34–41, 2021. (In Persian) DOR: 20.1001.1.22286675.1400.12.45.3.7
- [56] M. Mehri Charvadeh, S. Pourmousa, A. Tajdini, A. Tamjidi, and V. Safdari, "Presenting a management model for a multiobjective sustainable supply chain in the cellulosic industry and its implementation by the NSGA-II meta-heuristic algorithm. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2022. DOI: 10.1155/2022/8794472
- [57] T. Bektaş and G. Laporte, "The pollution-routing problem," *Trans. Res. Part B: Methodol.*, vol. 45, no. 8, pp. 1232–1250, 2011. DOI: 10.1016/j.trb.2011.02.004
- [58] J.-F. Cordeau and G. Laporte, "The dial-a-ride problem: models and algorithms," *Ann. Oper. Res.*, vol. 153, no. 1, pp. 29–46, 2007. DOI: 10.1007/s10479-007-0170-8
- [59] S. Bairamzadeh, M. S. Pishvae, and M. Saidi-Mehrabad, "Multiobjective robust possibilistic programming approach to sustainable bioethanol supply chain design under multiple uncertainties," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 55, no. 1, pp. 237–256, 2016. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b02875
- [60] G. Mavrotas and K. Florios, "An improved version of the augmented ϵ -constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems," *Appl. Math. Comput.*, vol. 219, no. 18, pp. 9652–9669, 2013. DOI: 10.1016/j.amc.2013.03.002
- [61] F. Mohammed, S. Z. Selim, A. Hassan, and M. N. Syed, "Multi-period planning of closed-loop supply chain with carbon policies under uncertainty," *Transp. Res. D Transp. Environ.*, vol. 51, pp. 146–172, 2017. DOI: 10.1016/j.trd.2016.10.033
- [31] M. Fattahi and K. Govindan, "A multi-stage stochastic program for the sustainable design of biofuel supply chain networks under biomass supply uncertainty and disruption risk: A real-life case study," *Transp. Res. Part E: Logist. Trans. Rev.*, vol. 118, pp. 534–567, 2018. DOI: 10.1016/j.tre.2018.08.008
- [32] A. Jabbarzadeh, B. Fahimnia, and F. Sabouhi, "Resilient and sustainable supply chain design: sustainability analysis under disruption risks," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 56, no. 17, pp. 5945–5968, 2018. DOI: 10.1080/00207543.2018.1461950
- [33] M. Fazli-Khalaf, B. Naderi, M. Mohammadi, and M. S. Pishvae, "Design of a sustainable and reliable hydrogen supply chain network under mixed uncertainties: A case study," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 59, pp. 34503–34531, 2020. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.276
- [34] E. B. Tirkolae, A. Goli, A. Faridnia, M. Soltani, and G.-W. Weber, "Multi-objective optimization for the reliable pollution-routing problem with cross-dock selection using Pareto-based algorithms," *J. Clean. Prod.*, vol. 276, no. 122927, p. 122927, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122927
- [35] S. A. Yawar and S. Seuring, "Management of social issues in supply chains: A literature review exploring social issues, actions and performance outcomes," *J. Bus. Ethics*, vol. 141, no. 3, pp. 621–643, 2017. DOI: 10.1007/s10551-015-2719-9
- [36] Z. Mehrjerdi and Y. Lotfi, "Development of a mathematical model for sustainable closed-loop supply chain with efficiency and resilience systematic framework," *International Journal of Supply and Operations Management*, vol. 6, no. 4, pp. 360–388, 2019. DOI: 10.22034/2019.4.6
- [37] Y. Z. Mehrjerdi and M. Shafiee, "A resilient and sustainable closed-loop supply chain using multiple sourcing and information sharing strategies," *J. Clean. Prod.*, vol. 289, no. 125141, p. 125141, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125141
- [38] M. Zhou, Y. Duan, W. Yang, Y. Pan, and M. Zhou, "Capacitated multi-modal network flow models for minimizing total operational cost and CO₂e emission," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 126, pp. 361–377, 2018. DOI: 10.1016/j.cie.2018.09.049
- [39] A. A. Taleizadeh, K. Ahmadzadeh, B. R. Sarker, and A. Ghavamifar, "Designing an optimal sustainable supply chain system considering pricing decisions and resilience factors," *J. Clean. Prod.*, vol. 332, no. 129895, p. 129895, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129895
- [40] S.-M. Hosseini-Motlagh, M. R. G. Samani, and V. Shahbazbegian, "Innovative strategy to design a mixed resilient-sustainable electricity supply chain network under uncertainty," *Appl. Energy*, vol. 280, no. 115921, p. 115921, 2020. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115921
- [41] Y.-C. Tsao and V.-V. Thanh, "A multi-objective fuzzy robust optimization approach for designing sustainable and reliable power systems under uncertainty," *Appl. Soft Comput.*, vol. 92, no. 106317, p. 106317, 2020. DOI: 10.1016/j.asoc.2020.106317
- [42] M. Fazli-Khalaf, B. Naderi, M. Mohammadi, and M. S. Pishvae, "The design of a resilient and sustainable maximal covering closed-loop supply chain network under hybrid uncertainties: a case study in tire industry," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 23, no. 7, pp. 9949–9973, 2021. DOI: 10.1007/s10668-020-01041-0
- [43] Govindan, K., & Gholizadeh, H. (2021). Robust network design for sustainable-resilient reverse logistics network using big data: A case study of end-of-life vehicles. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 149, 102279.
- [44] Z. Sazvar, K. Tafakkori, N. Oladfad, and S. Nayeri, "A capacity planning approach for sustainable-resilient supply chain network design under uncertainty: A case study of vaccine supply chain," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 159, no. 107406, p. 107406, 2021. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107406
- [45] S. Amirian, M. Amiri, and M. T. Taghavifard, "The emergence of a sustainable and reliable supply chain paradigm in supply chain network design," *Complexity*, vol. 2022, pp. 1–29, 2022. DOI: 10.1155/2022/9415465
- [46] S. Amirian, M. Amiri, and M. T. Taghavifard, "Integrating Sustainability and Reliability in the Supply Chain: a Systematic Literature Review," *Iranian Journal of Supply Chain Management*,

ضمیمه

زنجیره تأمین حلقه بسته مورد بررسی به عنوان یک شبکه، از گره‌ها و کمان‌های زنجیره‌ی مستقیم $NF = (N_1, \psi', \psi'')$ و گره‌ها و کمان‌های زنجیره‌ی معکوس $NR = (N_2, \psi''', \psi'''')$ تشکیل شده است، که در آن N گره‌های گراف و ψ کمان‌های گراف می‌باشند. به طور کلی، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴). نشانه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم در مسئله ریاضی

نام‌گذاری	نماد	شرح
مجموعه‌ها		
اصلی	S	مجموعه مراکز تأمین کننده مواد اولیه $s \in S$
	P	مجموعه مراکز بالقوه تولید $p \in P$
	K	مجموعه مراکز بالقوه توزیع $k \in K$
	E	مجموعه نقاط ثابت مشتری $e \in E$
	C	مجموعه مراکز بالقوه جمع‌آوری $c \in C$
	M	مجموعه مراکز بالقوه بازیافت $m \in M$
	H	مجموعه نقاط ثابت بازار مواد اولیه بازیافتی $h \in H$
	F	مجموعه مراکز انهدام $f \in F$
	B	مجموعه مراکز بازیابی انرژی $b \in B$
	A	مجموعه مواد اولیه $a \in A$
	R	مجموعه محصولات $r \in R$
	L	مجموعه مواد مورد استفاده برای بازیافت محصولات $l \in L$
	G	مجموعه فن‌آوری‌ها در مراکز تولید $g \in G$
	U	مجموعه سطوح ظرفیت برای تسهیلات $u \in U$
	V	مجموعه وسایل نقلیه $v \in V$
	T	مجموعه دوره زمانی $t \in T$
ترکیبی	N	مجموعه گره‌های شبکه $N \in \{s, p, k, e, c, m, b, f, h\}$
	Ψ	مجموعه کمان‌های شبکه $\Psi(x, y)$ $\in \{\Psi_1: (s, p), \Psi_2: (m, s), \Psi_3: (m, h), \Psi_4: (p, k), \Psi_5: (k, e), \Psi_6: (e, c), \Psi_7: (c, m), \Psi_8: (c, b)$
	Ψ'	مجموعه کمان‌های حمل مواد اولیه $\Psi' \subset \Psi; \Psi' \in \{\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3\}$
	Ψ''	مجموعه کمان‌های حمل محصولات $\Psi'' \subset \Psi; \Psi'' \in \{\Psi_4, \Psi_5, \Psi_6, \Psi_7, \Psi_8, \Psi_9\}$
پارامترها		
قیمت‌های فروش	PR_{er}^t	قیمت فروش یک واحد محصول r برای مشتری دست اول e در دوره زمانی t
	PR_{br}^t	قیمت فروش یک واحد محصول r برگشتی برای مرکز بازیابی انرژی b در دوره زمانی t
	PR_{ha}^t	قیمت فروش یک واحد ماده اولیه a در بازار مواد اولیه بازیافتی h در دوره زمانی t
هزینه‌های ثابت	F_p^{gu}	هزینه ثابت احداث مرکز تولید p با فن‌آوری g و سطح ظرفیت u
	F_k^u	هزینه ثابت احداث مرکز توزیع k با سطح ظرفیت u
	F_c^u	هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری c با سطح ظرفیت u
	F_m^{lu}	هزینه ثابت احداث مرکز بازیافت m با استفاده از مواد l و سطح ظرفیت u
	F_{sa}^t	هزینه ثابت اخذ قرارداد با تأمین کننده s برای تدارک ماده اولیه a در دوره زمانی t

هزینه ثابت بازگشایی مسیر X به Y با وسیله نقلیه V در دوره t	F_{xy}^{vt}	
هزینه ثابت انتشار بیش از حد مجاز گاز دی اکسید کربن	Θ	
هزینه خرید یک واحد ماده اولیه جدید a از تأمین کننده S در دوره زمانی t	BC_{sa}^t	هزینه‌های واحد
هزینه صرفه‌جویی به ازای یک واحد ماده اولیه بازیافت شده a در دوره زمانی t	RC_a^t	
هزینه تولید یک واحد محصول I در مرکز تولید p با فن‌آوری g در دوره زمانی t	PC_{pr}^{gt}	
هزینه توزیع محصول I در مرکز توزیع k در دوره زمانی t	KC_{kr}^t	
هزینه نگهداری محصول I در مرکز توزیع k در دوره زمانی t	HC_{kr}^t	
جریمه عدم برآورد تقاضای مشتری e از محصول I در دوره زمانی t	EC_{er}^t	
جریمه جمع‌آوری نشدن محصول I برگشتی از مشتری e در دوره زمانی t	OEC_{er}^t	
هزینه تفکیک و بسته‌بندی محصول I برگشتی در مرکز جمع‌آوری C در دوره زمانی t	CC_{cr}^t	
هزینه انگیزشی برای خرید و جمع‌آوری محصول I برگشتی در مرکز جمع‌آوری C در دوره زمانی t	OCC_{cr}^t	
هزینه بازیافت هر واحد محصول I برگشتی در مرکز بازیافت m با مواد l در دوره زمانی t	MC_{mr}^{lt}	
هزینه انهدام محصول I برگشتی در مرکز انهدام f در دوره زمانی t	FC_{fr}^t	
هزینه هر لیتر سوخت مصرفی برای خودرو V در دوره t	U_v^t	
هزینه هر ساعت بکارگیری وسیله نقلیه نوع V در دوره t (شامل: کرایه وسیله نقلیه، دستمزد راننده، عوارض تردد، بیمه و غیره)	V_v^t	
ظرفیت تأمین کننده S از ماده اولیه a	Cap_{sa}	
ظرفیت مرکز تولید p با فن‌آوری g و سطح ظرفیت u	Cap_p^{gu}	
ظرفیت مرکز توزیع k با سطح ظرفیت u	Cap_k^u	
ظرفیت ذخیره‌سازی مرکز توزیع k با سطح ظرفیت u	$VCap_k^u$	
ظرفیت مرکز جمع‌آوری C با سطح ظرفیت u	Cap_c^u	
ظرفیت مرکز بازیافت m با استفاده از مواد l و سطح ظرفیت u	Cap_m^{lu}	
ظرفیت وزنی وسیله نقلیه نوع V	$wcap^v$	
ظرفیت حجمی وسیله نقلیه نوع V	$vcap^v$	
مقدار مجاز انتشار دی اکسید کربن در شبکه زنجیره تأمین که دولت تعیین می‌کند	CO_2^{GOV}	دی اکسید کربن
مقدار ثابت انتشار دی اکسید کربن ناشی از احداث مرکز تولید p با فن‌آوری g و سطح ظرفیت u	E_p^{gu}	
مقدار ثابت انتشار دی اکسید کربن ناشی از احداث مرکز توزیع k با سطح ظرفیت u	E_k^u	
مقدار ثابت انتشار دی اکسید کربن ناشی از احداث مرکز جمع‌آوری C با سطح ظرفیت u	E_c^u	
مقدار ثابت انتشار دی اکسید کربن ناشی از احداث مرکز بازیافت m با استفاده از مواد l و سطح ظرفیت u	E_m^{lu}	
میزان انتشار گاز دی اکسید کربن به ازای یک واحد انرژی مصرفی (g/kwh)	ϵ^j	
میزان انتشار گاز دی اکسید کربن به ازای مصرف هر لیتر سوخت (g/L)	ϵ^l	
انرژی مصرفی برای تولید یک واحد محصول I با فن‌آوری g (kwh)	EP_r^g	انرژی و سوخت
انرژی مصرفی برای توزیع یک واحد محصول I (kwh)	EK_r	
انرژی مصرفی برای جمع‌آوری یک واحد محصول I برگشتی (kwh)	EC_r	
انرژی مصرفی برای تهیه‌ی یک واحد ماده اولیه بازیافت شده a با مواد l (kwh)	EM_a^l	
انرژی مصرفی برای بازیابی انرژی از یک واحد محصول I برگشتی (kwh)	EB_r	
انرژی مصرفی برای دفن یک واحد محصول I برگشتی (kwh)	EF_r	
میزان سوخت مصرفی در واحد مسافت برای خودروی V در حالت بدون بار	$FU1_v$	

میزان سوخت اضافی مصرفی در واحد مسافت برای خودروی v برای واحد بار	$FU2_v$	
ضریب اهمیت فرصت‌های شغلی ایجاد شده	θ_{job}	اشتغال
تعداد فرصت شغلی ثابت ایجاد شده در اثر احداث مرکز تولید p با فن‌آوری g و سطح ظرفیت u	job_p^{gu}	
تعداد فرصت شغلی ثابت ایجاد شده در اثر احداث مرکز توزیع k با سطح ظرفیت u	job_k^u	
تعداد فرصت شغلی ثابت ایجاد شده در اثر احداث مرکز جمع‌آوری c با سطح ظرفیت u	job_c^u	
تعداد فرصت شغلی ثابت ایجاد شده در اثر احداث مرکز بازیافت m با استفاده از مواد l و سطح ظرفیت u	job_m^{lu}	
نسبت بیکاری در مرکز تولید p	η_p	
نسبت بیکاری در مرکز توزیع k	η_k	
نسبت بیکاری در مرکز جمع‌آوری c	η_c	
نسبت بیکاری در مرکز بازیافت m	η_m	
نرخ متغیر ایجاد فرصت شغلی به ازای هر ساعت فعالیت عملیاتی	jt	
ضریب اهمیت مرخصی‌های استعلاجی	θ_{ltc}	مرخصی استعلاجی
تعداد مرخصی‌های استعلاجی ناشی از آسیب دیدگی شغلی در اثر احداث مرکز تولید p با فن‌آوری g و سطح ظرفیت u (روز)	ltc_p^{gu}	
تعداد مرخصی‌های استعلاجی ناشی از آسیب دیدگی شغلی در اثر احداث مرکز توزیع k با سطح ظرفیت u (روز)	ltc_k^u	
تعداد مرخصی‌های استعلاجی ناشی از آسیب دیدگی شغلی در اثر احداث مرکز جمع‌آوری c با سطح ظرفیت u (روز)	ltc_c^u	
تعداد مرخصی‌های استعلاجی ناشی از آسیب دیدگی شغلی در اثر احداث مرکز بازیافت m با استفاده از مواد l و سطح ظرفیت u (روز)	ltc_m^{lu}	
نرخ متغیر مرخصی‌های استعلاجی ناشی از آسیب دیدگی شغلی به ازای هر ساعت فعالیت عملیاتی	lt	
ضریب اهمیت قابلیت اطمینان تأمین‌کننده	λ_1	قابلیت اطمینان
ضریب اهمیت قابلیت اطمینان استقرار تسهیلات بالقوه	λ_2	
ضریب اهمیت قابلیت اطمینان عملیاتی	λ_3	
ضریب اهمیت قابلیت اطمینان حمل و نقل	λ_4	
قابلیت اطمینان تأمین‌کننده s در تأمین ماده اولیه a	SR_{sa}	
قابلیت اطمینان مرکز تولید p با فن‌آوری g و سطح ظرفیت u	RP_p^{gu}	
قابلیت اطمینان مرکز توزیع k با سطح ظرفیت u	RK_k^u	
قابلیت اطمینان مرکز جمع‌آوری c با سطح ظرفیت u	RC_c^u	
قابلیت اطمینان مرکز بازیافت m با استفاده از مواد l و سطح ظرفیت u	RM_m^{lu}	
نرخ خرابی وسیله نقلیه v در هر یک کیلومتر مسافت طی شده	λ_v	نرخ خرابی
نرخ خرابی مسیر بین x و y به ازای هر یک کیلومتر مسافت	λ_{xy}	
نرخ خرابی مرکز تولید p با فن‌آوری g و سطح ظرفیت u در دوره زمانی t	λ_p^{gut}	
نرخ خرابی مرکز توزیع k با سطح ظرفیت u در دوره زمانی t	λ_k^{ut}	
نرخ خرابی مرکز جمع‌آوری c با سطح ظرفیت u در دوره زمانی t	λ_c^{ut}	
نرخ خرابی مرکز بازیافت m با استفاده از مواد l و سطح ظرفیت u در دوره زمانی t	λ_m^{lut}	
فاصله بین هر جفت گره در زنجیره تأمین	D_{xy}	ضرایب مسافت، زمان، وزن و
زمان مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول I با استفاده از تکنولوژی g	TP_r^g	
زمان مورد نیاز برای توزیع یک واحد محصول I	TK_r	
زمان مورد نیاز برای جمع‌آوری یک واحد محصول I	TC_r	

حجم	TM_a^t	زمان مورد نیاز برای بازیافت یک واحد ماده اولیه a با استفاده از مواد I	
	w_a	وزن یک واحد ماده اولیه a	
	w_r	وزن یک واحد محصول r	
	v_a	حجم یک واحد ماده اولیه a	
	v_r	حجم یک واحد محصول r	
سایر ضرایب	b_{sa}	حداقل مقدار تأمین ماده اولیه a توسط تأمین کننده s	
	Dem_{er}^t	تقاضای بازار اولیه e برای محصول r در دوره زمانی t	
	q_{ar}	نسبت ماده اولیه a در محصول r $\forall r \in R$, $\sum_{a \in A} q_{ar} = 1$	
	ρ_{ar}	نسبت ماده اولیه بازیافتی a در محصول برگشتی r $\forall r \in R$, $\sum_{a \in A} \rho_{ar} = 1$	
	β_r	درصدی از محصول r برگشتی جمع آوری شده دارای ارزش بازیابی انرژی	
	γ_r	درصدی از محصول r برگشتی جمع آوری شده دارای ارزش بازیافت $\beta_r + \gamma_r < 1$, $\forall r$	
	σ_a	درصدی از ماده اولیه بازیافتی a با قابلیت استفاده مجدد در تولید محصولات	
	ω_r^d	نرخ برگشت محصول r	
	$Budge$	کل بودجه در دسترس برای استقرار تسهیلات بالقوه	
	BM	عدد بسیار بزرگ	
	متغیرهای تصمیم		
	متغیرهای صفر و یک	θ_{sa}^t	متغیر صفر و یک؛ اگر برای تهیه ماده اولیه a با تأمین کننده s در دوره زمانی t قرارداد بسته شود
θ_p^{gu}		متغیر صفر و یک؛ اگر مرکز تولید p با فن آوری g و سطح ظرفیت u احداث شود	
θ_k^u		متغیر صفر و یک؛ اگر مرکز توزیع k با سطح ظرفیت u احداث شود	
θ_c^u		متغیر صفر و یک؛ اگر مرکز جمع آوری c با سطح ظرفیت u احداث شود	
θ_m^{lu}		متغیر صفر و یک؛ اگر مرکز بازیافت m با استفاده از مواد I و سطح ظرفیت u احداث شود	
π_{xy}^{vt}		متغیر صفر و یک؛ اگر وسیله نقلیه نوع v برای طی مسیر x به y در دوره زمانی t انتخاب شود	
متغیرهای پیوسته	Q_{xya}^t	مقدار ماده اولیه نوع a که بین تسهیلات $(x, y) \in \Psi'$ در دوره زمانی t انتقال می یابد	
	Q_{xyr}^t	مقدار محصول نوع r که بین تسهیلات $(x, y) \in \Psi''$ در دوره زمانی t انتقال می یابد	
	Q_{pr}^{gt}	مقدار محصول تولید شده نوع r در مرکز تولید p با فن آوری g در دوره زمانی t	
	I_{kr}^t	مقدار موجودی نگهداری شده از محصول r در مرکز توزیع k در دوره زمانی t	
	QR_{xr}^t	مقدار محصول r برگشتی از مشتری e در دوره زمانی t	
	QN_{er}^t	مقدار محصول r برگشتی جمع آوری نشده از مشتری e در دوره زمانی t	
	S_{er}^t	مقدار کمبود محصول r برای مشتری e در دوره زمانی t	
	CO_2^{CUR}	مقدار دی اکسید کربن جاری در زنجیره تأمین (تن)	