



Paper Type: Original Article



A Sustainable and Reliable Model for Iron Closed-Loop Supply Chain Network Design with Considering Risk and Lateral Transmission and Developed Multi-Objective Decision-Making Method

Hamid Saffari¹, Morteza Abbasi^{1,*} , Jafar Gheidar-Kheljani¹

¹ Faculty of Management and Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran; hamidsaffari@mut.ac.ir; mabbasi@mut.ac.ir; kheljani@mut.ac.ir.

Citation:



Saffari, H., Abbasi, M., & Gheidar-Kheljani, J. (2023). A sustainable and reliable model for iron closed-loop supply chain network design with considering risk and lateral transmission and developed multi-objective decision-making method. *Journal of decisions and operations research*, 8(3), 691-713.

Received: 01/03/2022

Reviewed: 02/04/2022

Revised: 09/05/2022

Accepted: 18/06/2022

Abstract

Purpose: This research proposes a multi-objective and robust model considering both cost and risks related to the environment (water consumption and environmental pollution), social responsibility (working conditions and employee health), operations (change in demand and return rates), and disruption (accs and diseases such as COVID-19) in the supply chain, using horizontal collaboration to deal with it.

Methodology: In this research, mixed-integer linear programming and robust optimization technique have been used for closed-loop supply chain network design and a multi-objective method has been developed to solve the problem and create Pareto spaces.

Findings: The results of the calculations show the effect of failure probability on the capacity of the facility, the total cost of the network and the degree of collaboration between members of the supply chain to deal with the risk. Also, the amount of cost required for allocation to reliable and unreliable facilities and also creating a suitable Pareto space for deciding on the optimal choice of facilities, capacity and flow between them and iron and steel production technology, according to sustainability and social responsibility indicators, are other research findings.

Originality/Value: In this study, for the first time, the design of a robust, sustainable, and resilient network of iron and steel under different risks has been studied. Horizontal collaboration has been used as a new approach to deal with risk and solution method for multi-objective problems has been developed. Using the results of this study, the decision-maker can make informed decisions about the supply chain under risk conditions by considering suitability for each of the objectives.

Keywords: Robust optimization, Iron and steel supply chain, Sustainable supply chain network design, Risk management, Collaboration.



Corresponding Author: mabbasi@mut.ac.ir



Licensee. **Journal of Decisions and Operations Research**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



نوع مقاله: پژوهشی



یک مدل پایدار و قابل اطمینان طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته آهن با در نظرگیری ریسک و ارسال ترکیبی و حل باروش برنامه ریزی چندهدفه توسعه یافته

حمید صفاری^۱، مرتضی عباسی^{۱*}، جعفر قیدر خلجانی^۱^۱دانشکده مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

چکیده

هدف: این تحقیق یک مدل ریاضی چندهدفه استوار، با در نظر گرفتن هم زمان هزینه و ریسک‌های مربوط به محیط زیست (مصرف آب و آلودگی محیط زیست)، اجتماع (شرایط کاری و سلامت کارکنان)، ریسک‌های عملیاتی (تغییر نرخ تقاضا و نرخ برگشت محصولات) و نیز ریسک اختلال (حوادث و بیماری‌ها مانند کرونا) در زنجیره‌تامین و استفاده از همکاری افقی برای مقابله با آن ارائه می‌کند.

روش‌شناسی پژوهش: در این تحقیق از مدل‌سازی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته و تکنیک‌های بهینه‌سازی استوار برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته استفاده شده و یک روش چندهدفه برای حل مساله و ایجاد فضاهای پارتویی توسعه داده شده است.

یافته‌ها: نتایج محاسبات نشان‌دهنده میزان اثرگذاری احتمال خرابی بر میزان ظرفیت تسهیلات و نیز هزینه کل شبکه و میزان همکاری بین اعضای زنجیره‌تامین برای مقابله با ریسک، می‌باشد. همچنین میزان هزینه موردنیاز برای تخصیص به تسهیلات قابل اطمینان و نامطمئن و نیز ایجاد فضای پارتویی مناسب برای تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب بهینه تسهیلات، ظرفیت و جریان بین آن‌ها و تکنولوژی تولید آهن و فولاد، با توجه به شاخص‌های پایداری و مسئولیت‌پذیری اجتماعی، از دیگر یافته‌های تحقیق می‌باشد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: در این مطالعه برای نخستین بار طراحی شبکه استوار، پایدار و تاب‌آور آهن و فولاد تحت ریسک‌های مختلف و به صورت هم‌زمان مورد مطالعه قرار گرفته است. از همکاری افقی به عنوان رویکردی جدید برای مقابله با ریسک بهره گرفته شده است و روش حلی برای مسایل چندهدفه توسعه یافته که با استفاده از نتایج این مطالعه تصمیم‌گیرنده با در نظرگیری میزان مطلوبیت برای هر یک از اهداف، می‌تواند تصمیمات آگاهانه‌ای در خصوص زنجیره‌تامین تحت شرایط ریسک داشته باشد.

کلیدواژه‌ها: برنامه‌ریزی استوار، زنجیره‌تامین آهن و فولاد، طراحی شبکه زنجیره‌تامین پایدار، مدیریت ریسک، همکاری.

۱- مقدمه

طی دهه‌های اخیر مدیریت ریسک به یکی از موضوعات اساسی در مدیریت زنجیره‌تامین تبدیل شده است؛ زیرا زنجیره‌تامین در سرتاسر دنیا همه‌روزه پیچیده‌تر شده و با ریسک‌های جدید روبه‌رو می‌گردد. طبق مطالعات انجام‌شده توسط کلیندورفر و سعد [1]، شناختن و همکاران [2] و شالچیان و همکاران [3] ریسک‌های مرتبط با زنجیره‌تامین به سه دسته تقسیم می‌شوند. ریسک‌های عملیاتی که معمولاً به ریسک‌های مرتبط با تغییرات تقاضا، تامین مواد اولیه، هزینه‌ها و ... مربوط می‌شوند؛ ریسک‌های اختلال که به وسیله بلایای طبیعی (سیل، زلزله، سونامی بیماری‌های واگیردار مانند کرونا و ...) یا تهدیدهای انسانی (حمله‌های تروریستی و اعتصابات و ...) ایجاد می‌شوند و ریسک‌های



تکنولوژیکی که مربوط به از کار افتادن تجهیزات می‌شوند. علاوه بر این ریسک‌ها، ریسک‌های دیگری در زنجیره‌تأمین وجود دارند که شامل ریسک‌های مسئولیت اجتماعی، زیست‌محیطی و مالی می‌باشند که به ریسک‌های پایداری در زنجیره‌تأمین شهرت دارند [4].



پایداری زنجیره‌تأمین نیز به‌صورت فزاینده‌ای برای مقابله با تعدادی از این ریسک‌ها موردتوجه قرار گرفته است؛ زیرا توجه به پایداری زنجیره‌تأمین باعث افزایش رقابت‌پذیری، بهبود عملکرد اقتصادی و افزایش بهره‌وری نیروی کار می‌شود [5][5]. در مساله طراحی شبکه پایدار زنجیره‌تأمین تلاش می‌شود که شبکه زنجیره‌تأمین با ساختاری پیکره‌بندی شود که جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی تا حد امکان دارای بیش‌ترین مطلوبیت باشند [6]. از آنجایی که طراحی شبکه زیرمجموعه تصمیمات استراتژیک در زنجیره‌تأمین می‌باشد و اتخاذ تصمیم‌های درست در عملکرد و سودآوری زنجیره در یک بازه نسبتاً طولانی تأثیرگذار است، در نظر گرفتن ریسک‌ها در طراحی شبکه زنجیره موضوعی حایز اهمیت می‌باشد. از طرف دیگر توجه به موضوعات پایداری و ریسک‌های مربوطه، کاهش منابع موردنیاز جهت تولید محصولات جدید و تصویب قوانین دولتی مربوط به حفظ محیط‌زیست و مسئولیت اجتماعی، باعث شده است که محققین در مساله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین به جریان روبه جلو و عقب به‌صورت هم‌زمان توجه داشته باشند [7]. ترکیب جریان روبه جلو و عقب به‌صورت یکپارچه شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته را به‌وجود آورده است [8]. طراحی مناسب این شبکه حلقه بسته زنجیره‌تأمین منجر به افزایش اثربخشی، انتخاب بهینه تسهیلات، تخصیص مناسب جریان محصولات و ... خواهد شد [9].

برای مقابله با ریسک‌ها در زنجیره‌تأمین روش‌های مختلفی ارایه شده است [10]. یکی از راه‌های مقابله با ریسک‌های زنجیره‌تأمین برقراری همکاری با اعضای زنجیره می‌باشد [11]. همکاری افقی زمانی اتفاق می‌افتد که در یک سطح از زنجیره دو شرکت رقیب، اطلاعات و منابع خود را به اشتراک می‌گذارند [12]؛ بنابراین با انجام همکاری و اشتراک منابع با سایر اعضای زنجیره می‌توان تا حدود زیادی ریسک‌های زنجیره‌تأمین را کاهش داد. به‌طوری که سازمان‌ها می‌توانند، برای غلبه بر بسیاری از مشکلات و محدودیت‌ها از همکاری استفاده نمایند [13]. به همین خاطر محققین در سال‌های اخیر چارچوب‌های مختلفی را برای کاهش ریسک با استفاده از همکاری ارایه کرده‌اند [11]، [14]، [15].

با توجه به توضیحات ارایه‌شده در این مطالعه یک مدل ریاضی استوار برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین پایدار و تاب‌آور ارایه می‌گردد که در آن سعی می‌شود ریسک‌های مختلف به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شوند. از طرفی، با توجه به چندهدفه بودن مدل ارایه‌شده یک روش حل چندهدفه توسعه داده شده است؛ بنابراین، نوآوری‌های این مقاله را به این صورت می‌توان خلاصه کرد که اول، یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین با در نظر گرفتن جریان روبه جلو و عقب ارایه شده که در آن به ریسک‌های اقتصادی، محیطی و اجتماعی هم‌چنین ریسک احتمال اختلال در زنجیره‌تأمین به دلیل شیوع بیماری (برای مثال کوید ۱۹)، حوادث طبیعی و حوادث درون زنجیره مانند آتش‌سوزی به‌صورت هم‌زمان توجه شده است. دوم، با توجه به در نظر گرفتن ریسک‌های عملیاتی مانند غیرقطعی بودن تقاضا و برگشت محصولات از مدل استوار برای مدل‌سازی این ریسک‌ها بهره‌برداری شده است. سوم، برای اولین بار در شبکه زنجیره روبه جلو و عقب، مدل‌سازی همکاری افقی برای مقابله با ریسک‌های اختلال به‌صورت کمی انجام پذیرفته است. چهارم، یک الگوریتم چندهدفه برای حل مدل چندهدفه توسعه داده شده است و در نهایت با تجزیه و تحلیل نتایج، تأثیر هر یک از این ریسک‌ها با استفاده از داده‌های صنعت آهن و فولاد در زنجیره‌تأمین، مورد بررسی قرار گرفته است. ادامه مقاله به این صورت است که در بخش بعد پیشینه پژوهش ارایه شده است. در بخش ۳ به توصیف روش پژوهش پرداخته شده است. در بخش ۴ تجزیه و تحلیل نتایج ارایه می‌گردد و در نهایت در بخش آخر جمع‌بندی و جهت‌گیری‌های آتی آورده می‌شود.

۲- پیشینه پژوهش

به‌منظور بررسی دقیق‌تر ادبیات مرتبط با موضوع ارایه‌شده در این مطالعه، در سه بخش ریسک در زنجیره‌تأمین، همکاری افقی در زنجیره‌تأمین و مدل‌های ریاضی ارایه‌شده در خصوص ریسک‌ها به ادبیات موضوع پرداخته می‌شود.

۲-۱- ریسک در زنجیره‌تأمین

مطالعات زیادی در خصوص ریسک‌های زنجیره‌تأمین انجام شده است. برای مثال، چوپرا و سودهی [16][16] بیان می‌دارند که ریسک‌های مرسوم در زنجیره‌تأمین شامل ریسک‌های مرتبط با اختلال و تاخیرهای مرتبط با ریسک‌های عرضه، محدودیت در ظرفیت تأمین، مسایل مرتبط با کیفیت، وابستگی به تأمین‌کننده، تغییرات طراحی محصولات، تاخیر در تحویل محصولات، مسایل مالی تأمین‌کننده و ...



می‌باشند. هم‌چنین اندرسون [17] در مطالعه خود بیان می‌دارد که ریسک‌های مختلفی در خصوص پایداری در زنجیره‌تأمین وجود دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به انتشار گازهای گلخانه‌ای، بلایای طبیعی، حوادث، مصرف انرژی، ضایعات بسته‌بندی، خسارت‌های زیست‌محیطی در حین تدارکات و حمل‌ونقل، تحریم علیه محصولات یک شرکت، دادخواهی در مقابل شرکت‌ها برای جبران خسارت مالی ناشی از محیط‌زیست، حوادث، عدم رعایت قوانین یا رفتارهای غیراخلاقی، عدالت اجتماعی، خطرات ناشی از اشتغال ناعادلانه و شیوه‌های کار و افزایش قیمت کالاها و قیمت انرژی در نتیجه کمبود سوخت اشاره نمود. هم‌چنین گیانکیس و پاپاپلوس [10] دسته‌بندی‌های مختلفی را برای ریسک‌های پایداری در زنجیره‌تأمین ارائه نموده‌اند. این ریسک‌ها بسیار مهم می‌باشند، زیرا می‌توانند روی سازمان تاثیر گذاشته و موجب کاهش درآمد و رقابت‌پذیری سازمان شوند. برای مقابله با این ریسک‌ها، انتخاب استراتژیک سپس تخصیص منابع و توسعه قابلیت‌ها، به ترتیب انجام خواهند گرفت [18]. علاوه بر محققین مختلف، با توجه به افزایش تاثیرات محیطی فعالیت‌های صنعتی بشر مانند افزایش گازهای گلخانه‌ای و اثرات آن بر محیط‌زیست مانند گرم شدن کره زمین و هم‌چنین توجه جامعه جهانی به مسئولیت اجتماعی، سازمان‌ها نیز مجبورند در کنار هزینه به مواردی مانند تاثیرات محیطی ناشی از فعالیت‌های بشر و تاثیرات اجتماعی این فعالیت‌ها، مانند ایجاد شغل و توسعه اجتماع توجه داشته باشند و برای این منظور استانداردهای مختلف مانند ایزو ۲۶۰۰۰ [19] را به‌وجود آورده‌اند. جدول ۱ خلاصه‌ای از موضوعات ارائه‌شده در ایزو ۲۶۰۰۰ را نمایش می‌دهد. هم‌چنین رازدار و همکاران [20] و نیز آگزامس و همکاران [21] در مقاله خود به شناسایی و رتبه‌بندی ریسک‌ها در زنجیره‌تأمین پرداخته‌اند.

۲-۲- همکاری افقی در شبکه زنجیره‌تأمین

گروسد [22] یک روش ابتکاری برای محاسبه هزینه‌های موجودی و انتقال محصولات برای کمینه کردن هزینه‌های کل شبکه ارائه کرد. هرچند در مطالعه او از مدل ریاضی استفاده نشده است، اما نتایج نشان‌دهنده کارایی همکاری در کاهش هزینه‌ها و سفرهای کلی در سرتاسر شبکه می‌باشد. لیو و همکاران [23] یک مدل جایابی برای زنجیره‌تأمین چندکاناله برای انبارهای محلی با ظرفیت محدود ارائه دادند که هدف آن برقراری رابطه تعادل بین تاثیرات اجرای زنجیره‌تأمین تلفیقی و هزینه‌ها در زنجیره‌تأمین دوسطحی می‌باشد. پن و همکاران [24] مدلی را برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین تحت شرایط همکاری ارائه دادند که در این مقاله میزان بار و تعداد سفر با توجه به شرایط همکاری در زنجیره‌تأمین سه‌سطحی با هدف کاهش میزان دی‌اکسیدکربن و نیز هزینه‌های حمل‌ونقل بهینه می‌گردد.

جدول ۱- زیرمجموعه موضوعات اجتماعی در نظر گرفته‌شده در ایزو ۲۶۰۰۰.

Table 1- Subset of social issues considered in ISO 26000.

موضوعات اصلی مطرح‌شده در ایزو ۲۶۰۰۰	زیرمجموعه موضوعات	موارد در نظر گرفته شده در این مطالعه
اداره سازمان	-	
حقوق بشر	شرایط حقوق شهروندی مدیریت ریسک در خصوص افراد حقوق اقتصادی و فرهنگی افراد اصول اساسی و حقوق افراد در محیط کاری	*
فعالیت‌های کاری	تعداد و شرایط استخدام شرایط کاری مناسب ایمنی کارگران حوادث ایجادشده برای کارگران توسعه منابع انسانی و آموزش در محیط کاری	*
محیط‌زیست	میزان مصرف آب میزان مصرف انرژی میزان آب بازیافت‌شده در چرخه تولید میزان گازهای آلوده‌کننده بازیافت مواد استفاده از منابع پایدار در تولید محصولات	*

Table 1- Continued.

موضوعات اصلی مطرح شده در ایزو ۲۶۰۰۰	زیرمجموعه موضوعات	موارد در نظر گرفته شده در این مطالعه
فعالیت‌های عادلانه	مسئولیت توسعه سیاسی عدم رشوه و فساد مالی رقابت پویا پاسخ‌گویی و شفافیت	
مسائل مربوط به مشتری	پاسخ‌دهی سریع به مشتری ایمنی مصرف‌کنندگان حفاظت از سلامت مشتری ارایه اطلاعات مناسب به مشتری آموزش به مشتری دسترسی به خدمات سریع جمع‌آوری بسته‌بندی‌های محصولات	*
مشارکت و توسعه اجتماع	توسعه اجتماع و تعداد مشاغل ایجادشده توسعه مهارت‌های فردی توسعه سطح دسترسی به فناوری آموزش و فرهنگ‌سازی سرمایه‌گذاری اجتماعی اولویت به تامین‌کنندگان محلی ایجاد مشاغل و عدالت در ایجاد مشاغل در نقاط مختلف	* *



در مقاله مقدم و نوف [25] مکانیزم جدیدی برای تخصیص منابع با زمان واقعی، مدیریت سفارشات، پایش فرایند در شبکه همکاری شرکت‌ها ارائه شده است. در این مقاله سعی شده است با در نظر گرفتن معیارهایی مانند هزینه کل، تامین تقاضا، استفاده از منابع و پایداری شبکه همکاران، ریسک‌ها و عدم قطعیت‌های سفارشات مشتری، تغییرات پویا در تقاضا و اختلالات پیش‌بینی نشده تامین توسط اشتراک ظرفیت و تقاضا مدیریت شود. او حادر و الکیال [26] مقاله‌ای ارائه دادند که در آن مقاله تاثیرات بالقوه اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیست، ترکیب انبارها و تصمیمات مسیریابی وسایل حمل و نقل شهری تحت شرایط همکاری افقی مورد بررسی قرار گرفته است. حبیبی و همکاران [27] در تحقیق خود ادعا کرده‌اند که همکاری اعضای زنجیره تامین باعث کاهش هزینه‌های آن‌ها می‌شود. در این مقاله تمرکز اصلی آن‌ها روی مساله مکان‌یابی هاب در دو زنجیره توزیع مختلف بوده است. در مقاله آلوی و همکاران [28] مساله برنامه‌ریزی یکپارچه مکان‌یابی، موجودی و مسیریابی در شبکه زنجیره‌تأمین دوسطحی سبز تحت شرایط همکاری و عدم‌همکاری مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲- مدل‌های ارائه شده با در نظرگیری ریسک محیط‌زیست، مسئولیت‌های اجتماعی و اختلال در زنجیره‌تأمین

یکی از مطالعات اولیه درخصوص ریسک‌های اجتماعی زنجیره‌تأمین مربوط به کارتر و جنینگز [29] می‌باشد. هرچند در مطالعه آن‌ها مدل ریاضی ارائه نشده است، اما آن‌ها در مقاله خود به بررسی تاثیرات اجتماعی خرید بر عملکرد زنجیره‌تأمین پرداختند. در ادامه کروز و اکلبینگر [30] و کروز [31] پیشنهادهایی را برای مدل‌سازی شبکه زنجیره‌تأمین با در نظرگیری معیارهای اجتماعی و زیست‌محیطی ارائه دادند. دهقانیان و منصور [32] به توسعه مدلی برای زنجیره‌تأمین روبه عقب پرداختند و در آن سه تابع هدف هزینه، میزان آلودگی محیط‌زیست و معیارهای اجتماعی مانند ایجاد شغل، توسعه محلی و ریسک مربوط به محصولات و شرایط خطرناک کاری را در نظر گرفتند. امین و ژنگ [33] مدلی با در نظرگیری هزینه و استفاده از مواد سازگار با محیط‌زیست برای زنجیره‌تأمین با جریان روبه جلو و عقب ارائه کردند. نصیری و همکاران [34] در مقاله خود به بررسی فاکتورهای تاثیرگذار در طراحی شبکه زنجیره‌تأمین سبز پرداخته‌اند. پیشوایی و رزمی [35] یک مدل برنامه‌ریزی فازی و با در نظر گرفتن تاثیرات محیطی به‌عنوان تابع هدف دوم، توسعه دادند. وانگ و همکاران [36] برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته را برای یک مدل چندهدفه که شامل هزینه، میزان گاز CO_2 خروجی و میزان اتلاف تولید می‌باشد، برای پیدا کردن مکان بهینه تسهیلات مانند کارخانه‌های تولید محصولات جدید و تولید مجدد محصولات، مراکز توزیع و مراکز بازیافت و جریان بین آن‌ها به‌کار گرفتند. پیشوایی و همکاران [37] مدلی را برای زنجیره‌تأمین روبه جلو ارائه کردند که در آن پاره‌ای از معیارهای اجتماعی مانند نرخ استخدام، موقعیت شغلی ایجادشده، مقدار هدررفت مواد و میزان تولید محصولات خطرآفرین برای مشتریان و نیز میزان دی‌اکسیدکربن خروجی در طول عمر محصولات در نظر گرفته شده است. اسلامی پور و نویری [38] مدلی قابل اطمینان را برای



طراحی شبکه زنجیره تامین خون با فرض ظرفیت مورد نیاز زنجیره جهت تامین تقاضای بیمارستان‌ها، ارایه کردند که در این مدل، جنبه‌های اقتصادی و زیست محیطی به صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده است. در مقاله حمیدیه و جوهری [39] یک مدل آمیخته عدد صحیح غیرخطی تصادفی برای طراحی شبکه زنجیره تامین خون توسعه داده شده و در کنار کاهش هزینه‌های کل شبکه به کاهش زمان حمل و نقل و زمان تحویل توجه شده است و با استفاده از مدل استوار سعی شده است پارامترهای عدم قطعیت در مدل ارایه شده تحت کنترل قرار گیرند. تاجانی و همکاران [9] یک مدل چنددره‌ای، چندمحصولی و چنددوره‌ای و چندهدفه برای طراحی شبکه حلقه بسته با در نظرگیری مسئولیت پذیری اجتماعی ارایه نمودند. مخلص آبادی و هاشمی [7] به طراحی شبکه زنجیره تامین صنعت محصولات لبنی با در نظرگیری کاهش آلاینده‌ها و صدمات اجتماعی پرداخته‌اند. نویسندگان دیگری مانند شالچیان و همکاران [40] بابازاده و همکاران [41]، صاحب جامنیا و همکاران [42]، شرافتی و همکاران [43] و حبیبیا و همکاران [44] مدل‌های مختلفی را با در نظر گرفتن تأثیرات اجتماعی و زیست محیطی زنجیره تامین ارایه نموده‌اند.

در خصوص ریسک اختلال در طراحی شبکه زنجیره تامین نیز می‌توان به مطالعه گانگ و همکاران [45] اشاره کرد که مدلی را برای زنجیره تامین ارایه کردند و در این مدل به بررسی ریسک‌های بلایای طبیعی و انسانی که ممکن است تامین تقاضای مشتری را با اختلال روبه‌رو کند پرداختند. حسنی و همکاران [46] یک مدل غیرخطی استوار، برای طراحی شبکه زنجیره تامین روبه جلو و با در نظرگیری ریسک اختلال ارایه نمودند. رضایور و همکاران [47] نقش ریسک اختلال در رقابت پذیری زنجیره تامین را مورد ارزیابی قرار دادند. جبارزاده و همکاران [48] یک مدل برنامه ریزی استوار برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته ارایه کردند و فرض از دست رفتن میزانی از ظرفیت تسهیلات در اثر اختلال در زنجیره تامین را در این مدل در نظر گرفتند. هدف از این مقاله تعیین مکان بهینه تسهیلات به منظور کاهش هزینه‌های زنجیره تامین می‌باشد. حسینی مطلق و همکاران [49] مقاله‌ای را برای طراحی شبکه زنجیره تامین با در نظر گرفتن ریسک اختلال در شبکه زنجیره تامین و نیز ریسک عدم قطعیت در این زنجیره ارایه دادند. در مدل ریاضی ارایه شده مکان مراکز به همراه میزان ظرفیت آن‌ها تعیین می‌گردد. حسنی و همکاران [50] مدلی برای طراحی شبکه زنجیره تامین ارایه دادند که در آن تأثیرات زیست محیطی و پراکندگی تجهیزات به منظور کاهش ریسک اختلال در زنجیره با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف وارد مدل سازی شده است. سازور و همکاران [51] یک رویکرد برنامه ریزی ظرفیت برای طراحی شبکه زنجیره تامین پایدار و تاب آور تحت شرایط عدم قطعیت ارایه کردند. ولی سیار و روغنیان [52] مدلی برای طراحی شبکه روبه جلو و عقب با فرضیات پایداری و ریسک کاهش ظرفیت در اثر اختلال در شبکه ارایه نمودند. روشنی و همکاران [53] مدلی تاب آور برای طراحی شبکه زنجیره تامین دارو تحت شرایط کوید ۱۹ ارایه نمودند که در این مطالعه به منظور افزایش تاب آوری زنجیره تامین، علاوه بر معیار اقتصادی زنجیره تامین معیارهای منفی تاب آوری نیز کمینه می‌شود. مرور تحقیقات انجام شده در این بخش نشان می‌دهد که روش‌های مختلفی برای مقابله با ریسک اختلال ارایه شده است و محققان با استفاده از این استراتژی‌ها به مقابله با ریسک اختلال در زنجیره تامین پرداخته‌اند. در جدول ۲ خلاصه‌ای از این استراتژی‌ها و موارد در نظر گرفته شده در این تحقیق مشخص شده‌اند.

جدول ۲- محدوده و تأثیر استراتژی‌های مقابله با ریسک اختلال در زنجیره تامین.

Table 2- Scope and impact of supply chain disruption risk management.

استراتژی	محدوده اجرای استراتژی	تأثیر استراتژی در زنجیره تامین	پژوهش حاضر
تقویت تسهیلات	تامین کننده، تولیدکننده و توزیع کننده	بهبود استحکام ظرفیت تسهیلات	*
همکاری افقی و تامین از منبع موازی	تامین کننده و توزیع کننده	کاهش وابستگی به یک منبع	*
تولید محصولات مشابه	تولیدکننده	جبران کمبود محصولات	*
پراکنده سازی تسهیلات	تامین کننده، تولیدکننده و توزیع کننده	کاهش ریسک در همه تسهیلات با پراکنده سازی تسهیلات در نقاط مختلف	
نگهداری موجودی	توزیع کننده یا انبار	کاهش کمبود محصولات نهایی	
نگهداری آلترناتیوهای محصولات	تولیدکننده	کاهش نیاز به قطعات	

مرور ادبیات تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که در نظر گرفتن هزینه در کنار ریسک‌های زیست محیطی و تأثیرات اجتماعی و نیز ریسک‌های مرتبط با شرایط عدم قطعیت کمتر مورد توجه قرار گرفته است. تعداد کمی از تحقیقات فرض انتخاب تکنولوژی و نیز میزان ظرفیت دارایی‌ها را با توجه به ریسک‌های زنجیره مورد مطالعه قرار داده‌اند. مفهوم طراحی شبکه زنجیره تامین پایدار و تاب آور مفهومی جدید است که نیازمند توجه بیشتر محققین به این زمینه می‌باشد. از طرفی تعداد کمی از محققین به بررسی هم‌زمانی ریسک‌های اختلال، عملیاتی، آلودگی‌های محیط زیست و ریسک‌های مرتبط با مسئولیت پذیری‌های اجتماعی پرداخته‌اند. برای مقابله



با ریسک اختلال در شبکه زنجیره تامین استراتژی‌های مختلفی توسط محققین مانند نگهداری موجودی ارایه شده است؛ اما تحقیقی که همکاری افقی را برای مقابله با ریسک‌ها در نظر بگیرد، در ادبیات مشاهده نمی‌شود. هم‌چنین در نظر گرفتن همکاری افقی در تصمیمات استراتژیک زنجیره‌تأمین موردی است که نیازمند توجه بیشتر محققین در این زمینه می‌باشد؛ بنابراین، در این مطالعه در نظرگیری شکاف‌های تحقیقاتی ارایه شده سعی شده است با ارایه مدل ریاضی به غنی‌سازی ادبیات این حوزه کمک شود. جدول ۳ خلاصه‌ای از خلاهای تحقیقاتی و موارد در نظر گرفته شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

۳- روش پژوهش

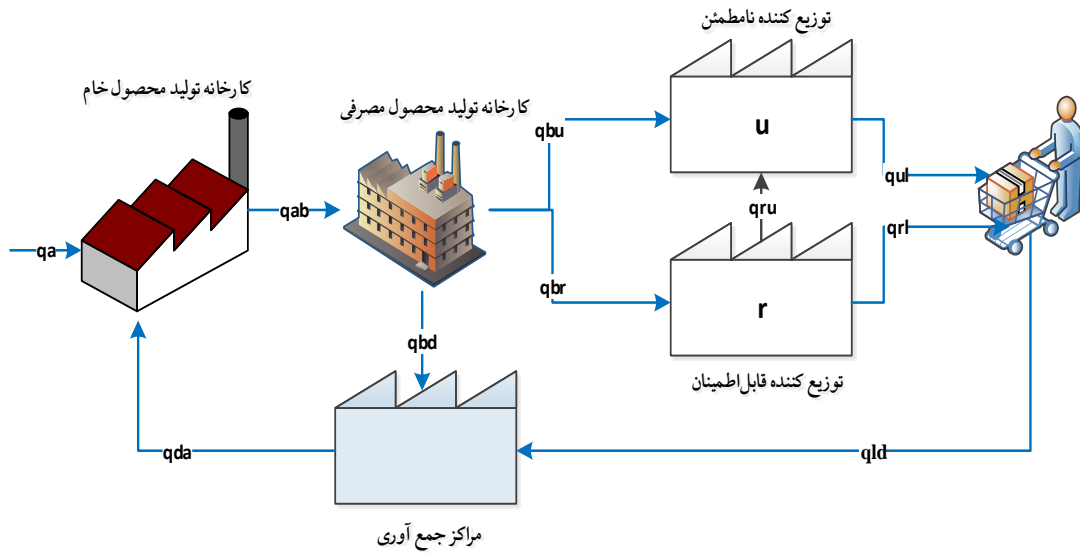
در این مطالعه از یک مدل ریاضی استوار چندهدفه آمیخته عدد صحیح، برای طراحی شبکه زنجیره روبه جلو و عقب آهن و فولاد استفاده شده است. شبکه موردنظر شامل کارخانه‌های تولید فولاد، کارخانه‌های تولید محصولات مصرفی و توزیع‌کننده‌های محصولات در جهت روبه جلو و مراکز جمع‌آوری برای جمع‌آوری قراضه‌های نقاط مصرف در جهت روبه عقب است. در این شبکه ابتدا در کارخانه‌های تولید مواد اولیه به کمک قراضه‌های جمع‌آوری شده از نقاط مختلف مصرف، تولید فولاد انجام می‌شود. در ادامه این فولاد به کارخانه‌های تولید محصولات مصرفی منتقل می‌شود. پس از تولید محصولات جدید این محصولات در میان نقاط مصرف توسط توزیع‌کننده‌ها توزیع می‌شود. لازم به ذکر است، از آنجایی که همواره مقداری ضایعات در تولید محصولات جدید وجود دارد، این ضایعات به مرکز جمع‌آوری منتقل می‌شوند تا از آن‌ها برای تولید محصولات جدید استفاده شود. با توجه به این‌که در تحقیق، احتمال اختلال در توزیع‌کننده‌ها در نظر گرفته شده است، دو نوع توزیع‌کننده در زنجیره وجود دارد توزیع‌کننده قابل اطمینان که احتمال خرابی در آن ناچیز و در این جا صفر در نظر گرفته شده است و توزیع‌کننده نامطمئن که احتمال خرابی برای آن‌ها در نظر گرفته شده است و هنگام خرابی و اختلال به منظور جلوگیری از فروش ازدست‌رفته، توسط توزیع‌کننده‌های قابل اطمینان محصولات موردنیاز توزیع‌کننده‌های نامطمئن تأمین می‌شود. محصولات بعد از توزیع در میان نقاط مصرف جمع‌آوری و تحویل مراکز جمع‌آوری می‌شوند و در نهایت به‌عنوان قراضه به کارخانه‌های فولاد انتقال می‌یابند. شکل ۱ توضیحات ارایه شده را نمایش می‌دهد. این شکل برای زنجیره روبه جلو و عقب فولاد طراحی شده است اما قابل استفاده برای سایر زنجیره‌تأمین فلزات مانند تولید سرب در صنایع باتری‌سازی و ... می‌باشد.

جدول ۳- خلاصه مرور ادبیات.

Table 3- The sumery of literature rewieve.

نام نویسندگان	چوبان روبه جلو	چوبان روبه عقب	ریسک آلودگی محیط	مصرف آب	ریسک اجتماعی	ریسک عملیاتی	ریسک اختلال	همکاری افقی	نحوه مواجهه با ریسک	مکان‌یابی	میزان حمل و نقل	عدم قطعیت
									موجودی	تفویض	مجموعات	پراکنده‌سازی
جبارزاده و همکاران [48]	*	*				*	*	*			*	*R
رضایور و همکاران [47]	*						*	*			*	
حسینی و خسروجردی [46]	*					*	*	*	*	*	*	R
گنگ و همکاران [45]	*					*					*	
پیشوایی و رزمی [35]	*	*	*		*						*	
ژاله‌چیان و همکاران [40]	*	*	*		*						*	*F
بابازاده و همکاران [41]	*		*		*						*	F
صاحب جمینیا و همکاران [42]	*	*	*		*						*	
شرافتی و همکاران [43]	*		*		*						*	R
حسینی مطلق و همکاران [49]	*	*				*	*	*			*	R
حسینی و همکاران [50]	*		*			*	*			*	*	
سزاوار و همکاران [51]	*		*		*		*				*	R
والی سیر و روغنیان [52]	*	*	*		*	*	*	*			*	R
مخلص‌آبادی و هاشمی گوهر [7]	*	*	*			*					*	F
تاجانی کوچکی و همکاران [9]	*	*	*			*	*	*			*	
این تحقیق	*	*	*	*	*	*	*	*			*	F&R

*مدل سازی استوار: R، مدل سازی فازی: F



شکل ۱- شبکه زنجیره تامین روبه جلو و عقب.
Figure 1- Forward and reverse supply chain network.

فرضیات در نظر گرفته شده در مدل به صورت زیر می باشد:

- تولید فولاد از طریق جریان برگشتی و قراضه های خریداری شده امکان پذیر است.
- هر کارخانه تولید فولاد ظرفیت گوناگونی دارد و امکان استفاده از دو نوع تکنولوژی فراهم است.
- امکان همکاری افقی و اشتراک محصولات بین دو توزیع کننده وجود دارد.
- با توجه به این که میزان تولید فولاد به صورت تن در مدل در نظر گرفته شده، فرض شده است که یک محصول در شبکه وجود دارد.
- تقاضا و درصد بازگشت میزان محصولات بازگشتی و هم چنین درصد ضایعات در کارخانه های تولید محصول مصرفی به صورت غیر قطعی است.
- احتمال اختلال برای توزیع کننده ها در نظر گرفته شده است که فرض شده است هنگام اختلال درصدی از ظرفیت تسهیلات از بین می رود.

۱-۳- نمادگذاری مدل ریاضی

به منظور مدل سازی ریاضی نمادهای زیر در مدل سازی استفاده شده است:

اندیس ها

a : مجموعه نقاط بالقوه کارخانه تولید فولاد.

b : مجموعه نقاط ثابت کارخانه های محصولات مصرفی.

c : ظرفیت های مختلف برای احداث کارخانه فولاد.

e : تکنولوژی های مورد استفاده در کارخانه های تولید فولاد.

r : مجموعه نقاط بالقوه توزیع کننده های قابل اطمینان.

u : مجموعه نقاط بالقوه توزیع کننده های نامطمئن.

l : مجموعه نقاط ثابت بازار مصرف.

d : مجموعه نقاط بالقوه مراکز جمع آوری.



Fa_a^{ce} : هزینه ثابت احداث کارخانه تولید فولاد a با تکنولوژی e و ظرفیت c .

Fr_r : هزینه ثابت احداث مرکز توزیع قابل اطمینان r .

Fu_u : هزینه ثابت احداث مرکز توزیع نامطمئن u .

Fd_d : هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری d .

Ca_a^c : حداکثر ظرفیت کارخانه تولید فولاد a با سطح ظرفیت c .

Cb_b : حداکثر ظرفیت کارخانه تولید محصولات مصرفی b .

Cr_r : حداکثر ظرفیت مرکز توزیع r .

Cu_u : حداکثر ظرفیت مرکز توزیع u .

Cd_d : حداکثر ظرفیت مرکز جمع‌آوری d .

θ_{ij} : فاصله بین دو تسهیلات i و j .

ap_a^{ec} : هزینه تولید هر واحد فولاد در کارخانه a ، با استفاده از تکنولوژی e و با ظرفیت c .

bp_b : هزینه تولید هر واحد محصول در کارخانه b .

up_u : هزینه عملیاتی هر واحد محصول در توزیع‌کننده u .

rp_r : هزینه عملیاتی هر واحد محصول در توزیع‌کننده r .

dp_d : هزینه عملیاتی هر واحد محصول در مرکز جمع‌آوری d .

β : هزینه حمل هر واحد به ازای هر کیلومتر.

ef_e : تاثیرات محیطی تولید هر واحد در کارخانه تولید مواد اولیه با استفاده از تکنولوژی e .

pw_e : میزان مصرف آب به ازای تولید هر واحد محصول در کارخانه تولید مواد اولیه با استفاده از تکنولوژی e .

μ : تاثیرات محیطی حمل هر واحد محصول به ازای هر کیلومتر.

ρ : تعداد کارخانه‌های احداث‌شده.

f_b : نرخ ضایعات تولید در کارخانه‌های تولید محصولات مصرفی b .

d_l : مقدار تقاضا در بازار مصرف l .

r_l : نرخ برگشت محصولات در بازار مصرف l .

a_j^{ec} : تعداد فرصت شغلی ایجاد شده اگر کارخانه در مکان a و با تکنولوژی e و با ظرفیت c احداث شود.

r_j^r : تعداد فرصت شغلی ایجاد شده اگر در مکان r توزیع کننده قابل اطمینان احداث شود.

u_j^u : تعداد فرصت شغلی ایجاد شده اگر در مکان u توزیع کننده نامطمئن احداث شود.

d_j^d : تعداد فرصت شغلی ایجاد شده اگر در مکان d مراکز جمع آوری احداث شود.

pu_u : احتمال اختلال در توزیع کننده u .

c_u : درصدی از ظرفیت توزیع کننده u که در اثر اختلال از بین می رود.

tu_u : درصدی از نیروی کار که در اثر اختلال تعدیل می شوند.

a_j^{ec} : تعداد روزهای ازدست رفته به خاطر حوادث در کارخانه در طول سال، اگر کارخانه در مکان a با تکنولوژی e و ظرفیت c احداث شود.

متغیرهای تصمیم

y_a^{ec} : اگر در مکان a کارخانه فولاد با تکنولوژی e و ظرفیت c احداث شود ۱ و در غیر این صورت ۰.

z_r^r : اگر در مکان r توزیع کننده قابل اطمینان احداث شود ۱ و در غیر این صورت ۰.

z_u^u : اگر در مکان u توزیع کننده نامطمئن احداث شود ۱ و در غیر این صورت ۰.

x_d : اگر در مکان d مرکز جمع آوری تاسیس شود ۱ و در غیر این صورت ۰.

aq_a : مقدار قراضه ورودی به کارخانه تولید فولاد a .

bq_{ab}^e : مقدار فولاد ارسالی از کارخانه a با سطح تکنولوژی e به کارخانه تولید فلزات b .

rq_{br} : مقدار محصول ارسالی از کارخانه تولید b به توزیع کننده r .

uq_{bu} : مقدار محصول ارسالی از کارخانه b به توزیع کننده u .

yr_{rl} : مقدار محصول ارسالی از توزیع کننده r به نقاط مصرف l .

yu_{ul} : مقدار محصول ارسالی از توزیع کننده u به نقاط مصرف l .

tr_{ru} : مقدار محصول ارسالی از توزیع کننده r به توزیع کننده u در صورت ایجاد اختلال در میزان خدمت دهی توزیع کننده u .

lq_{ld} : مقدار محصول ارسالی از منطقه مصرف l به مرکز جمع آوری d .

dq_{da} : مقدار محصول ارسالی از مرکز جمع آوری d به کارخانه فولاد a .

xq_{bd} : مقدار محصول ارسالی از کارخانه b به مرکز جمع آوری d .





$$\begin{aligned}
 \text{Min } z_1 = & \sum_e \sum_a \sum_c F a_a^{ce} y_a^{ec} + \sum_r F r_r z r_r + \sum_u F u_u z u_u + \sum_d x_d F d_d \\
 & + \sum_a \sum_e \sum_c \sum_b a p_a^{ec} b q_{ab}^e + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab} \beta b q_{ab}^e \\
 & + \sum_b \sum_r (\theta_{br} \beta + b p_b) r q_{br} + \sum_a \sum_b (\theta_{bu} \beta + b p_b) u q_{bu} \\
 & + \sum_b \sum_r (\theta_{rl} \beta + r p_r) y r_{rl} + \sum_b \sum_u (\theta_{ul} \beta + u p_u) y u_{ul} \\
 & + \sum_r \sum_u (\theta_{ru} \beta + r p_r) t r_{ru} + \sum_l \sum_d \theta_{ld} \beta l q_{ld} + \sum_b \sum_d (\theta_{bd} \beta) x q_{bd} \\
 & + \sum_a \sum_d (\theta_{da} \beta + d p_d) d q_{da}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Min } z_2^1 = & \sum_a \sum_b \sum_e b q_{ab}^e f_e + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab} \beta b q_{ab}^e + \sum_b \sum_r \theta_{br} \beta r q_{br} \\
 & + \sum_b \sum_u \theta_{bu} \beta u q_{bu} \\
 & + \sum_b \sum_r \theta_{rl} \beta y r_{rl} + \sum_b \sum_u \theta_{ul} \beta y u_{ul} + \sum_l \sum_d \theta_{ld} \beta l q_{ld} \\
 & + \sum_b \sum_d \theta_{bd} \beta x q_{bd} + \sum_r \sum_u \theta_{ru} \beta t r_{ru} + \sum_a \sum_d \theta_{da} \beta d q_{da} + \sum_r \sum_u \theta_{ru} \beta t r_{ru}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\text{Min } z_2^2 = \sum_a \sum_b \sum_e p w_e b q_{ab}^e. \tag{3}$$

$$\text{Max } z_3^1 = \rho. \tag{4}$$

$$\text{Max } z_3^2 = \sum_a \sum_e \sum_c a j_a^{ec} y_a^{ec} + \sum_r r j_r z r_r + \sum_u u j_u z u_u + \sum_d d j_d x_d - \sum_u p u_u l c_u u j_u z u_u. \tag{5}$$

$$\text{Min } z_3^3 = \sum_a \sum_e \sum_c a l_a^{ec} y_a^{ec}. \tag{6}$$

$$\rho = \sum_a \sum_e \sum_c x_a^{ce}. \tag{7}$$

$$\sum_r y r_{rl} + \sum_u y u_{ul} = d_l \text{ for all } l. \tag{8}$$

$$\sum_d l q_{ld} = \left(\sum_r y r_{rl} + \sum_u y u_{ul} \right) * r_l \text{ for all } l. \tag{9}$$

$$\sum_b r q_{br} = \sum_r y r_{rl} + \sum_u t r_{ru} \text{ for all } r. \tag{10}$$

$$\sum_b u q_{bu} + \sum_r t r_{ru} = \sum_u y u_{ul} \text{ for all } u. \tag{11}$$

$$f_b \sum_a \sum_e b q_{ab}^e = \sum_d x q_{bd} \text{ for all } b. \tag{12}$$

$$1 - f_b) \sum_a \sum_e b q_{ab}^e = \sum_r r q_{br} + \sum_u u q_{bu} \text{ for all } b. \tag{13}$$

$$\sum_d d q_{da} + a q_a = \sum_b \sum_e b q_{ab}^e \text{ for all } a. \tag{14}$$

$$\sum_a d q_{da} = \sum_b \sum_e x q_{bd} + \sum_l l q_{ld} \text{ for all } d. \tag{15}$$

$$\sum_b b q_{ab}^e \leq \sum_c C a_a^{ce} y_a^{ec} \text{ for all } a, e. \tag{16}$$

$$\sum_b r q_{br} \leq C r_r z r_r \text{ for all } r. \tag{17}$$

$$\sum_b u q_{bu} \leq C u_u z u_u \text{ for all } u. \tag{18}$$

$$\sum_r t r_{ru} \leq C u_u z u_u l c_u \text{ for all } u. \tag{19}$$

$$\sum_l y u_{ul} \leq C u_u z u_u \text{ for all } u. \tag{20}$$

صفاری و همکاران / تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه: ۶۹۱-۷۱۳



$$\sum_a dq_{da} \leq Cd_d x_d \quad \text{for all } d. \quad (21)$$

$$\sum_a \sum_b bq_{ab}^e \leq Cb_b \quad \text{for all } b. \quad (22)$$

$$\sum_e \sum_c y_a^{ec} = 1 \quad \text{for all } a. \quad (23)$$

$$\sum_r zr_r \geq 1. \quad (24)$$

$$y_a^{ec}, zr_r, zu_{ul}, x_d \in \{0,1\}. \quad (25)$$

$$aq_{ar}, bq_{ab}^e, rq_{br}, uq_{bu}, yr_{rl}, yu_{ul}, tr_{ru}, dq_{da}, xq_{bd}, lq_{ld} \geq 0. \quad (26)$$

در تابع هدف اول، هزینه‌های ثابت احداث تسهیلات در سه جمله اول آورده شده است و باقی جملات مربوط به هزینه‌های تولید و حمل و نقل در شبکه زنجیره تامین آهن و فولاد می‌باشند. در تابع هدف دوم در قسمت اول میزان دی‌اکسیدکربن خروجی ناشی از تولید در کارخانه‌های تولید فولاد کمینه می‌شود و در سایر عبارات دی‌اکسیدکربن ناشی از حمل و نقل کمینه می‌گردد. در تابع هدف سوم کمینه میزان مصرف آب در کارخانه‌های فولاد مورد توجه قرار گرفته است. در تابع هدف چهارم به منظور کاهش ریسک شبکه و نیز عدالت در ایجاد مشاغل، تعداد کارخانه‌های فولاد بهینه می‌گردد. در تابع هدف پنجم میزان مشاغل ایجاد شده بیشینه و مقدار مشاغل ازدست‌رفته به خاطر ایجاد اختلال در شبکه کمینه می‌شود. در نهایت در تابع هدف ششم میزان روزهای کاری ازدست‌رفته به خاطر ایجاد حوادث کمینه می‌گردد.

محدودیت (۷) نشان‌دهنده تعداد کل کارخانه‌های فولاد در زنجیره می‌باشد. **محدودیت (۸)** نشان می‌دهد که میزان کالای حمل شده از توزیع‌کننده‌های قابل اطمینان و نامطمئن، باید میزان تقاضای مناطق مصرف را ارضا کند. **محدودیت (۹)** نشان‌دهنده این است که مقدار قراضه جمع‌آوری شده از نقاط مصرف با حاصل ضرب مقدار فولاد وارد شده به بازار مصرف در میزان نرخ برگشت محصولات باید برابر باشد. **محدودیت (۱۵)** تا **محدودیت (۱۰)** نشان‌دهنده تعادل میزان ورود و خروج فولاد به هر یک از تسهیلات موردنظر می‌باشد. **محدودیت (۲۲)** تا **محدودیت (۱۶)** محدودیت میزان ظرفیت برای تسهیلات مختلف می‌باشند. **محدودیت (۲۳)** نشان‌دهنده این است که در هر مکان بالقوه، تنها یک کارخانه فولاد با سطح ظرفیت و تکنولوژی مشخص، می‌تواند احداث شود. **محدودیت (۲۴)** نشان‌دهنده این است که حداقل یک مرکز توزیع قابل اطمینان برای مواجهه با ریسک اختلال در زنجیره باید وجود داشته باشد. **محدودیت‌های (۲۵)** و **(۲۶)** متغیرهای صفر و یک و پیوسته را نشان می‌دهند.

۳-۳- مدل سازی استوار

با توجه به وجود ریسک تغییر میزان تقاضا و میزان نرخ برگشت در شبکه و به منظور مقابله با این ریسک از روش مدل‌سازی استوار ارایه شده توسط مولوی و همکاران [54] استفاده شده است؛ زیرا این روش میزان انحرافات و هم‌چنین میزان تقاضای مرتفع نشده را نیز در نظر می‌گیرد و می‌تواند میزان ریسک تغییر تقاضا و نرخ برگشت را در آینده کاهش دهد. برای تشریح این روش مدل ساده زیر را در نظر بگیرید.

$$\text{Min } C^T x + d^T y. \quad (27)$$

$$Ax = b. \quad (28)$$

$$Bx + Cy = e. \quad (29)$$

$$x, y \geq 0. \quad (30)$$

رابطه (۲۷) نشان‌دهنده پارامترهای قطعی می‌باشد. x بردار متغیرهای تصمیم‌گیری، B و C نشان‌دهنده ماتریس ضرایب فنی تصادفی و e بردار سمت راست را نشان می‌دهد. S نشان‌دهنده مجموعه محدود سناریوهای موردنظر بوده و به صورت $S = \{1, 2, \dots, s\}$ می‌باشد. احتمال وقوع هر سناریو با p_s نشان داده می‌شود. مجموعه $\{y_1, y_2, \dots, y_s\}$ به عنوان متغیرهای کنترلی و مجموعه $\{E_1, E_2, \dots, E_s\}$ میزان نشدنی بودن در محدودیت‌هایی که احتمال نشدنی بودن در بعضی سناریوها دارند را نشان می‌دهد. با توجه به موارد ذکر شده مدل به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\text{min } \sigma y_1, y_2, \dots, y_s + \Omega \rho E_1, E_2, \dots, E_s. \quad (31)$$

$$Ax = b. \quad (32)$$

$$B_S x + C_S y_S + E_S = e_S \quad s \in S. \quad (33)$$



$$x, y_s, \lambda_s \geq 0 \quad s \in S. \quad (34)$$

اگر فرض کنیم z تابع سود یا هزینه بوده و با (x, y) نشان داده شود، آن‌گاه با توجه به مجموعه سناریوها، به صورت $z_s = f(x, y_s)$ نشان داده می‌شود. مولوی و همکاران [35] هم چنین بیان می‌دارند که هرچقدر میزان واریانس $z_s = f(x, y_s)$ بیشتر باشد، مقدار ریسک بیش‌تر می‌شود. آن‌ها این مقدار را به صورت رابطه (۳۵) نشان دادند.

$$\sigma(0) = \sum_{s \in S} p_s z_s + \alpha \sum_{s \in S} p_s (z_s - \sum_{s \in S} p_s z_s)^2. \quad (35)$$

α وزن در نظر گرفته شده برای قسمت تغییرپذیری مدل می‌باشد. با توجه به وجود عبارت توان ۲ و پیچیدگی مدل مربوطه، یو و لی [55] روشی دیگر را برای در نظر گرفتن انحراف از میانگین جواب‌ها ارایه کردند که به صورت رابطه (۳۶) می‌باشد:

$$\sigma(0) = \sum_{s \in S} p_s z_s + \alpha \sum_{s \in S} p_s \left| z_s - \sum_{s \in S} p_s z_s \right|. \quad (36)$$

از طرف دیگر به علت غیرخطی بودن تابع هدف، به کمک قضیه ارایه شده در مقاله یو و لی [55]، با رابطه‌های (۳۷) و (۳۸) به صورت خطی تبدیل می‌گردد:

$$\sigma(0) = \sum_{s \in S} z_s + \alpha \sum_{s \in S} p_s \left[\left(z_s - \sum_{s \in S} p_s z_s \right) + 2\lambda_s \right]. \quad (37)$$

$$z_s - \sum_{s \in S} p_s z_s + \lambda_s \geq 0 \quad \text{for all } s \in S. \quad (38)$$

در نهایت تابع هدف به صورت رابطه (۳۹) تبدیل می‌گردد. در این مدل مقدار $\Omega \sum_{s \in S} p_s \lambda_s$ میزان جریمه است و به محدودیت‌هایی که ممکن است به ازای تعدادی از سناریوها نشدنی شوند تعلق می‌گیرد:

$$z_s - \sum_{s \in S} p_s z_s + \lambda_s \geq 0 \quad \text{for all } s \in S. \quad (39)$$

به‌طور خلاصه نمادهای زیر برای مدل‌سازی استوار مساله ارایه شده مورد استفاده قرار می‌گیرد:

S : مجموعه محدود سناریوها.

p_s : احتمال رخ دادن سناریوی s .

λ_{1s} : ضریب مورد استفاده برای خطی‌سازی تابع هدف اول.

λ_{2s} : ضریب مورد استفاده برای خطی‌سازی تابع هدف دوم.

λ_{3s} : ضریب مورد استفاده برای خطی‌سازی تابع هدف سوم.

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: وزن قسمت مربوط به انحرافات در تابع هدف.

Ω : هزینه جریمه عدم تامین تقاضا و نرخ بازگشت و نشدنی بودن مدل ریاضی.

بنابراین توابع هدفی که دارای پارامترهای غیرقطعی می‌باشند، شامل توابع هدف اول، دوم و سوم با توجه به تابع هدف (۳۷) تبدیل به توابع هدف مدل استوار می‌شوند. در این توابع هدف عبارت داخل کروشه به میزان تغییرپذیری پارامترها ارتباط دارد و عبارت‌های قبل‌تر مربوط به میانگین هزینه‌ها با توجه به سناریوهای مختلف می‌باشد. مقدار f_s به محدودیت‌های (۸) و (۹) اضافه می‌گردد؛ زیرا با توجه به غیرقطعی بودن میزان تقاضا و نیز نرخ برگشت، احتمال نشدنی بودن در تعدادی از سناریوها وجود دارد.

Min $z_1 =$

$$\begin{aligned}
 & \sum_e \sum_a \sum_c F a_a^{ec} y_a^{ec} + \sum_r F r_r z r_r + \sum_u F u_u z u_u + \sum_d x_d F d_d \\
 & + \sum_s p_s \left(\sum_a \sum_e \sum_c \sum_b a p_a^{ec} b q_{ab}^{es} + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab} \beta b q_{ab}^{es} \right. \\
 & + \sum_b \sum_r (\theta_{br} \beta + b p_b) r q_{br}^s + \sum_b \sum_u \theta_{bu} \beta + b p_b) u q_{bu}^s \\
 & + \sum_r \sum_l (\theta_{rl} \beta + r p_r) y r_{rl}^s + \sum_r \sum_l \theta_{ul} \beta + u p_u) y u_{ul}^s \\
 & + \sum_r \sum_u (\theta_{ru} \beta + r p_r) t r_{ru}^s + \sum_l \sum_d \theta_{ld} \beta l q_{ld}^s + \sum_b \sum_d \theta_{bd} \beta) x q_{bd}^s \\
 & + \left. \sum_d \sum_a (\theta_{da} \beta + d p_d) d q_{da}^s \right) \\
 & + \alpha_1 \sum_s p b_s \left[\left(\sum_a \sum_e \sum_c \sum_b a p_a^{ec} b q_{ab}^{es} + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab} \beta b q_{ab}^{es} \right. \right. \\
 & + \sum_b \sum_r (\theta_{br} \beta + b p_b) r q_{br}^s + \sum_b \sum_u \theta_{bu} \beta + b p_b) u q_{bu}^s \\
 & + \sum_r \sum_l (\theta_{rl} \beta + r p_r) y r_{rl}^s + \sum_r \sum_l \theta_{ul} \beta + u p_u) y u_{ul}^s \\
 & + \sum_r \sum_u (\theta_{ru} \beta + r p_r) t r_{ru}^s + \sum_l \sum_d \theta_{ld} \beta l q_{ld}^s + \sum_b \sum_d \theta_{bd} \beta) x q_{bd}^s \\
 & + \left. \sum_d \sum_a (\theta_{da} \beta + d p_d) d q_{da}^s \right) \\
 & - \sum_{s'} p b_{s'} \left(\sum_a \sum_e \sum_c \sum_b a p_a^{ec} b q_{ab}^{es} + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab} \beta b q_{ab}^{es} \right. \\
 & + \sum_b \sum_r (\theta_{br} \beta + b p_b) r q_{br}^s + \sum_b \sum_u \theta_{bu} \beta + b p_b) u q_{bu}^s \\
 & + \sum_r \sum_l (\theta_{rl} \beta + r p_r) y r_{rl}^s + \sum_r \sum_l \theta_{ul} \beta + u p_u) y u_{ul}^s \\
 & + \sum_r \sum_u (\theta_{ru} \beta + r p_r) t r_{ru}^s + \sum_l \sum_d \theta_{ld} \beta l q_{ld}^s + \sum_b \sum_d \theta_{bd} \beta) x q_{bd}^s \\
 & + \left. \sum_d \sum_a (\theta_{da} \beta + d p_d) d q_{da}^s \right) + 2 \lambda_{1s} \Big] \\
 & + \Omega_1 \sum_s \sum_l p_s \epsilon_{1sl} + \Omega_2 \sum_s \sum_l p_s \epsilon_{2sl}.
 \end{aligned} \tag{40}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Min } z_2^1 = & \sum_s p b_s (\sum_a \sum_b \sum_e b q_{ab}^{es} e f_e + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab} \mu b q_{ab}^{es} + \sum_b \sum_r \theta_{br} \mu r q_{br}^s + \sum_b \sum_u \theta_{bu} \mu u q_{bu}^s + \\
 & \sum_r \sum_l \theta_{rl} \mu y r_{rl}^s + \sum_u \sum_l \theta_{ul} \mu y u_{ul}^s + \sum_l \sum_d \theta_{ld} \mu l q_{ld}^s + \sum_b \sum_d \theta_{bd} \mu x q_{bd}^s + \sum_d \sum_a \theta_{da} \mu d q_{da}^s + \\
 & \sum_r \sum_u \theta_{ru} \mu t r_{ru}^s) + \alpha_2 \sum_s p b_s \left[\sum_a \sum_b \sum_e b q_{ab}^{es} e f_e + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab} \mu b q_{ab}^{es} + \sum_b \sum_r \theta_{br} \mu r q_{br}^s + \right. \\
 & \sum_b \sum_u \theta_{bu} \mu u q_{bu}^s + \sum_r \sum_l \theta_{rl} \mu y r_{rl}^s + \sum_u \sum_l \theta_{ul} \mu y u_{ul}^s + \sum_l \sum_d \theta_{ld} \mu l q_{ld}^s + \sum_b \sum_d \theta_{bd} \mu x q_{bd}^s + \\
 & \sum_d \sum_a \theta_{da} \mu d q_{da}^s + \sum_r \sum_u \theta_{ru} \mu t r_{ru}^s) - \sum_{s'} p b_{s'} (\sum_a \sum_b \sum_e b q_{ab}^{es} e f_e + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab} \mu b q_{ab}^{es} + \\
 & \sum_b \sum_r \theta_{br} \mu r q_{br}^s + \sum_b \sum_u \theta_{bu} \mu u q_{bu}^s + \sum_r \sum_l \theta_{rl} \mu y r_{rl}^s + \sum_u \sum_l \theta_{ul} \mu y u_{ul}^s + \sum_l \sum_d \theta_{ld} \mu l q_{ld}^s + \\
 & \left. \sum_b \sum_d \theta_{bd} \mu x q_{bd}^s + \sum_d \sum_a \theta_{da} \mu d q_{da}^s + \sum_r \sum_u \theta_{ru} \mu t r_{ru}^s) + 2 \lambda_{2s} \right].
 \end{aligned} \tag{41}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Min } z_2^2 = & \sum_s p b_s \left(\sum_a \sum_b \sum_e p w_e b q_{ab}^{es} + \alpha_3 \sum_s p b_s \left[\left(\sum_a \sum_b \sum_e p w_e b q_{ab}^{es} - \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \sum_s p b_s \left(\sum_a \sum_b \sum_e p w_e b q_{ab}^{es} \right) + 2 \lambda_{3s} \right] \right).
 \end{aligned} \tag{42}$$

$$\text{Max } z_3^1 = \rho. \tag{43}$$

$$\text{Max } z_3^2 = \sum_a \sum_e \sum_c a_j^{ec} y_a^{ec} + \sum_r r_j z r_r + \sum_u u_j z u_u + \sum_d d_j x_d - \sum_u p u_u l c_u u_j z u_u. \tag{44}$$

$$\text{Min } z_3^3 = \sum_a \sum_e \sum_c a l^{ec} y_a^{ec}. \tag{45}$$

$$\rho = \sum_e \sum_a \sum_c x_a^{ec}. \tag{46}$$

$$\sum_r y r_{rl}^s + \sum_u y u_{ul}^s + \epsilon_{1sl} = d_{ls} \text{ for all } s, l. \tag{47}$$



۷۰۴

یک مدل پایدار و قابل اطمینان طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته آهن با در نظرگیری ریسک و ارسال ترکیبی و حل با روش برنامه ریزی چندهدفه توسعه یافته



$$\sum_d lq_{ld}^s + \epsilon_{2sl} = \left(\sum_r yr_{rl}^s + \sum_u yu_{ul}^s \right) * r_{ls} \quad \text{for all } l, s. \quad (48)$$

$$\sum_b rq_{br}^s = \sum_r yr_{rl}^s + \sum_u tr_{ru}^s \quad \text{for all } r, s. \quad (49)$$

$$\sum_b uq_{bu}^s + \sum_r tr_{ru}^s = \sum_l yu_{ul}^s \quad \text{for all } u, s. \quad (50)$$

$$1 - f_b \sum_a \sum_e bq_{ab}^{es} = \sum_r rq_{br}^s + \sum_u uq_{bu}^s \quad \text{for all } b, s. \quad (51)$$

$$f_b \sum_a \sum_e bq_{ab}^{es} = \sum_d xq_{bd}^s \quad \text{for all } b, s. \quad (52)$$

$$\sum_d dq_{da}^s + aq_a^s = \sum_b \sum_e bq_{ab}^{es} \quad \text{for all } a, s. \quad (53)$$

$$\sum_a dq_{da}^s = \sum_b xq_{bd}^s + \sum_l lq_{ld}^s \quad \text{for all } d, s. \quad (54)$$

$$\sum_b bq_{ab}^{es} \leq \sum_c Ca_a^c y_a^{ec} \quad \text{for all } a, e, s. \quad (55)$$

$$\sum_b rq_{br}^s \leq Cr_r z_r \quad \text{for all } r, s. \quad (56)$$

$$\sum_b uq_{bu}^s \leq Cu_u Zu_u \quad \text{for all } u, s. \quad (57)$$

$$\sum_b tr_{ru}^s \leq Cu_u Zu_u lc_u \quad \text{for all } u, s. \quad (58)$$

$$\sum_l yu_{ul}^s \leq Cu_u Zu_u \quad \text{for all } u, s. \quad (59)$$

$$\sum_d dq_{da}^s \leq Cd_d x_d \quad \text{for all } d, s. \quad (60)$$

$$\sum_a \sum_e bq_{ab}^{es} \leq Cb_b \quad \text{for all } b, s. \quad (61)$$

$$\sum_e \sum_c x_a^{ce} = 1 \quad \text{for all } a. \quad (62)$$

$$\sum_r z_r \geq 1. \quad (63)$$

$$y_a^{ec}, z_r, z_u, x_d \in \{0,1\}. \quad (64)$$

$$bq_{ab}^{es}, rq_{br}^s, lq_{ld}^s, uq_{bu}^s, yr_{rl}^s, uq_{bu}^s, tr_{ru}^s, yu_{ul}^s, dq_{da}^s, xq_{bd}^s, \lambda_{1s}, \lambda_{2s}, \lambda_{3s} \geq 0. \quad (65)$$

با توجه به توضیحات ارائه شده در خصوص روش مدل‌سازی استوار به کاررفته و نیز با توجه به قضیه پیشنهادی یو ولی [55] که با رابطه‌های (۳۷) و (۳۸) در روش استوار توضیح داده شد، محدودیت خطی سازی (۶۶) تا محدودیت خطی سازی (۶۸) نیز باید به مدل ریاضی اضافه شوند.

$$\begin{aligned} & \left(\sum_a \sum_e \sum_c \sum_b ap_a^{ec} bq_{ab}^{es} + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab} \beta bq_{ab}^{es} + \sum_b \sum_r (\theta_{br} \beta + bp_b) rq_{br}^s \right. \\ & + \sum_b \sum_u (\theta_{bu} \beta + bp_b) uq_{bu}^s + \sum_r \sum_l (\theta_{rl} \beta + rp_r) yr_{rl}^s \\ & + \sum_u \sum_l (\theta_{ul} \beta + up_u) yu_{ul}^s + \sum_r \sum_u (\theta_{ru} \beta + rp_r) tr_{ru}^s + \sum_l \sum_d \theta_{ld} \beta lq_{ld}^s \\ & + \sum_b \sum_d (\theta_{bd} \beta) xq_{bd}^s + \sum_a \sum_d (\theta_{da} \beta + dp_d) dq_{da}^s \\ & - \sum_s pb_s \left(\sum_a \sum_e \sum_c \sum_b ap_a^{ec} bq_{ab}^{es} + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab} \beta bq_{ab}^{es} \right. \\ & + \sum_b \sum_r (\theta_{br} \beta + bp_b) rq_{br}^s + \sum_b \sum_u (\theta_{bu} \beta + bp_b) uq_{bu}^s \\ & + \sum_r \sum_l (\theta_{rl} \beta + rp_r) yr_{rl}^s + \sum_b \sum_u (\theta_{ul} \beta + up_u) yu_{ul}^s \\ & + \sum_r \sum_l (\theta_{ru} \beta + rp_r) tr_{ru}^s + \sum_l \sum_d \theta_{ld} \beta lq_{ld}^s + \sum_b \sum_d (\theta_{bd} \beta) xq_{bd}^s \\ & \left. + \sum_d \sum_a (\theta_{da} \beta + dp_d) dq_{da}^s \right) + \lambda_{1s} \geq 0 \quad \text{for all } s. \quad (66) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} & \sum_a \sum_b \sum_e b q_{ab}^{es} e f_e + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab} \mu b q_{ab}^{es} + \sum_b \sum_r \theta_{br} \mu r q_{br}^s + \sum_b \sum_u \theta_{bu} \mu u q_{bu}^s \\ & + \sum_r \sum_l \theta_{rl} \mu y r_l^s + \sum_u \sum_l \theta_{ul} \mu y u_l^s + \sum_l \sum_d \theta_{ld} \mu l q_{ld}^s \\ & + \sum_b \sum_d \theta_{bd} \mu x q_{bd}^s + \sum_d \sum_a \theta_{da} \mu d q_{da}^s + \sum_r \sum_u \theta_{ru} \mu t r_{ru}^s \\ & - \sum_s p b_s \left(\sum_a \sum_b \sum_e b q_{ab}^{es} e f_e + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab} \mu b q_{ab}^{es} \right) \quad (67) \\ & + \sum_b \sum_r \theta_{br} \mu r q_{br}^s + \sum_b \sum_u \theta_{bu} \mu u q_{bu}^s \\ & + \sum_r \sum_l \theta_{rl} \mu y r_l^s + \sum_u \sum_l \theta_{ul} \mu y u_l^s + \sum_l \sum_d \theta_{ld} \mu l q_{ld}^s \\ & + \sum_b \sum_d \theta_{bd} \mu x q_{bd}^s + \sum_d \sum_a \theta_{da} \mu d q_{da}^s + \sum_r \sum_u \theta_{ru} \mu t r_{ru}^s + \lambda_{2s} \geq 0 \\ & \text{for all } s. \end{aligned}$$

$$\left(\sum_a \sum_b \sum_e p w_e b q_{ab}^{es} \right) - \sum_s p b_s \left(\sum_a \sum_b \sum_e p w_e b q_{ab}^{es} \right) + \lambda_{3s} \geq 0 \text{ for all } s. \quad (68)$$

۴-۳- روش حل

این روش سلسله مراتبی به عنوان یک روش تعاملی توسط نویسندگان مختلف مانند پیشوایی و ترابی [56] به کار گرفته شده است که تلفیقی از روش های جیمنز و همکاران [57]، پارا و همکاران [58] و روش TH ترابی و هسینی [59] بوده و دارای این مزیت است که علاوه بر حفظ کردن حالت خطی مساله تعداد توابع هدف و نیز محدودیت های مساله را افزایش نمی دهد. ما در این جا به منظور کاهش محدودیت های روش ارایه شده، تغییراتی را در آن روش در نظر گرفتیم و با تغییر در تابع هدف ادغامی و در نظر گرفتن فرضیات دیگر برای مساله ارایه شده، آن را بومی سازی نمودیم. در ادامه مراحل این روش ارایه می گردد:

گام ۱- با توجه به زیاد بودن تعداد توابع هدف و دشوار بودن تصمیم گیری در مورد اهداف و نیز با توجه به سه ناحیه ریسک اقتصادی، اجتماعی و محیطی، با استفاده از روش پیشوایی و همکاران [37] نرمال سازی و با در نظر گرفتن وزن هایی اهداف مورد نظر با هم ترکیب می شود.

$$\text{Min } z_1, \quad (69)$$

$$\text{Min } z_2 = w_1 \frac{\max z_2^1 - z_2^1}{\max z_2^1 - \min z_2^1} + w_2 \frac{\max z_2^2 - z_2^2}{\max z_2^2 - \min z_2^2} \quad (70)$$

$$\text{Max } z_3 = w_3 \frac{z_3^1 - \max z_3^1}{\max z_3^1 - \min z_3^1} + w_3 \frac{z_3^2 - \max z_3^2}{\max z_3^2 - \min z_3^2} + w_3 \frac{\max z_3^3 - z_3^3}{\max z_3^3 - \min z_3^3} \quad (71)$$

گام ۲- تعیین جواب های ایده آل (z_h^p) و ضد ایده آل (z_h^n) برای هر یک از توابع هدف در سطح تعیین شده که برای به دست آوردن هر یک از جواب های ایده آل $(z_{1\sigma}^p, x_{1\sigma}^p)$ به ازای هر یک از توابع هدف مدل مورد نظر بایستی حل شود. به این معنی که ابتدا هر یک از اهداف به صورت جداگانه حل می شود و جواب های ایده آل به دست می آید و بدترین مقدار تابع هدف های دیگر، به عنوان مقدار ضد ایده آل برای آن تابع هدف در نظر گرفته می شود. برای مثال در تابع هدف اول مقدار ضد ایده آل به صورت زیر محاسبه می شود:

$$x_{1\sigma}^n = \max \left(Z_1(x_{2\sigma}^p), Z_1(x_{3\sigma}^p) \right). \quad (72)$$

گام ۳- تعیین تابع مطلوبیت برای هر یک از توابع هدف.

در توابع هدف پیشینه سازی:

$$\mu_h(X) = \begin{cases} 1 & \text{if } z_h > z_h^p \\ \frac{(z_h - z_h^n)}{(z_h^p - z_h^n)} & \text{if } z_h^p \leq z_h \leq z_h^n \\ 0 & \text{if } z_h < z_h^n \end{cases} \quad (73)$$

در توابع هدف کمینه سازی:



$$\mu_h(X) = \begin{cases} 1 & \text{if } z_h > z_h^p \\ \frac{(z_h^n - z_h)}{(z_h^n - z_h^p)} & \text{if } z_h^p \leq z_h \leq z_h^n \\ 0 & \text{if } z_h < z_h^p \end{cases} \quad (74)$$

گام ۴- تبدیل مدل قطعی چندهدفه به مدل تک هدفه که ترابی و هسینی [59] مدل (۷۵) را برای تبدیل مدل چندهدفه به تک هدفه پیشنهاد داده‌اند:

$$\begin{aligned} & \text{Max } v\sigma_0 + (1-v) \sum_h w_h \mu_h(x), \\ & \text{s.t.} \\ & \mu_h(x) \geq \sigma_0 \quad \text{for all } h, \end{aligned} \quad (75)$$

$$x \in F_x, \sigma_0 \in \{0,1\}.$$

σ_0 بیانگر حداقل سطح ارضای تابع هدف و v نیز به عنوان ضریب سازش بین اهداف در نظر گرفته می‌شود. در مدل ارائه شده در گام ۴ تفاوت بین حداقل ارضا بین اهداف مختلف در نظر گرفته نشده است. برای رفع این موضوع ما وزن‌هایی را برای هر یک از مقادیر حداقل سطح ارضا در نظر می‌گیریم. در این صورت می‌توان به رفع این مشکل کمک کرد. هم‌چنین برای نزدیک شدن مدل مورد نظر به شرایط واقعی، مقدار v به صورت عدد فازی مثلثی در نظر گرفته شده است که در نهایت پس از تبدیل اعداد فازی به قطعی، مدل ادغامی توسعه داده شده، در رابطه (۷۶) آورده شده است.

$$\begin{aligned} & \text{Max } \left(\frac{v_k^p + 4v_k^m + v_k^o}{6} \right) \sum_k w_k \sigma_{0k} + \left(1 - \frac{v_k^p + 4v_k^m + v_k^o}{6} \right) \sum_k w_k \mu_k(x), \\ & \text{s.t.} \\ & \mu_k(x) \geq \sigma_{0k} \quad \text{for all } k, \end{aligned} \quad (76)$$

$$x \in F_x, \sigma_{0k} \in \{0,1\}.$$

گام ۵- تعیین ضریب سازشی و ضرایب اهداف اولیه توسط تصمیم‌گیرنده و حل مدل تک هدفه (در صورت عدم رضایت تصمیم‌گیرنده تغییر مقادیر σ و v و حل مجدد مدل تک هدفه).

۵-۳- مطالعه موردی

آهن پرمصرف‌ترین فلزی است که بشر در اعصار مختلف به کار برده است. امروزه تخمین زده شده است که صنعت تولید فولاد حدود ۴٪ تا ۵٪ کل گازهای گلخانه‌ای ایجاد شده توسط بشر را تولید می‌کند. تقریباً میانگین تولید گاز CO_2 برای هر تن فولاد حدود ۱/۹ تن می‌باشد که با توجه به تولید بیش از 1.3×10^9 تن فولاد، به میزان بیش از 2×10^9 تن گاز CO_2 تولید می‌شود که بیش‌تر این میزان تولید گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از تولید فولاد خام می‌باشد [60].

امروزه فولاد خام معمولاً با استفاده از دو تکنولوژی عمده کوره بلند و احیای مستقیم تولید می‌شود [61]. استرژو و همکاران [62] در مقاله خود به تعیین فاکتورها و شاخص‌هایی که در توسعه پایدار صنعت آهن و فولاد نقش دارند پرداخته‌اند. این شاخص‌های پایداری شامل پارامترهای اقتصادی، گازهای گلخانه‌ای، مقدار مصرف آب، مقدار استفاده از زمین و مقدار آلودگی هوا می‌باشد که در جدول ۴ این موارد آورده شده است. میزان دی‌اکسیدکربن خروجی به ازای روش‌های مختلف حمل و نقل با استفاده از داده‌های گزارش مکینون و پیچیک [63] در مدل‌سازی وارد شده است (جدول ۵).

برای سایر داده‌ها از داده‌های ارائه شده در حوزه آهن و فولاد مانند مقاله وحدانی و همکاران [64] و نیز داده‌های ارائه شده توسط خبره‌های صنعت فولاد بهره گرفته شده است (جدول ۶).

جدول ۴- مقایسه بعضی از پارامترهای پایداری در دو روش تولید فولاد [62].

Table 4- Comparison of some stability parameters in two methods of steel production [62].

پارامتر پایداری	احیای مستقیم / کوره قوس الکتریکی	کوره بلند / کنورتور اکسیژنی
مصرف انرژی (Gj/t)	15.8	22
میزان دی اکسیدکربن (t CO2/t)	1.1	2.1
میزان مصرف آب (m ³ /t)	1.4	2.6
میزان استفاده از زمین (m ² /t)	0.9	1.7

جدول ۵- مقایسه میزان دی اکسیدکربن به ازای روش‌های مختلف حمل [63].

Table 5- Comparing the amount of carbon dioxide for different methods of transportation [63].

نوع حمل و نقل	g CO2/tonne-km
حمل و نقل جاده‌ای	62
حمل و نقل ریلی	22
حمل و نقل دریایی	31
ترکیب ریل و جاده‌ای	26
حمل و نقل هوایی	602
خط لوله	5

جدول ۶- محدوده سایر داده‌های تولیدشده [64].

Table 6- Range of other generated data [64].

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
f_1	Uniform (.2-.35)	ap_a^{2c}	Uniform (90-120)
r_j	Uniform (.85-.97)	bp_b	Uniform (25-35)
Fa_a^{11}	Uniform (330000-960000)	dp_d	Uniform (2-5)
Fa_a^{12}	Uniform (300000-900000)	up_u	Uniform (2-5)
Fa_a^{21}	$\tau * Fa_a^{11}$	rp_r	Uniform (2.5-6)
Fa_a^{22}	$\tau * Fa_a^{12}$	Ca_a^1	Uniform (1500-3000)
τ	Uniform (.5-.7)	Ca_a^2	$\eta * Ca_a^1$
Fr_r	Uniform (5000-10000)	η	Uniform (.4-.6)
Fu_u	Uniform (1000-5000)	Cb_j	Uniform (1500-3000)
Fd_d	Uniform (1000-5000)	Cr_r	Uniform (800-1800)
ap_a^{1c}	Uniform (60-90)	Cu_u	Uniform (800-1800)
		Cd_d	Uniform (800-1800)

۴- یافته‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج

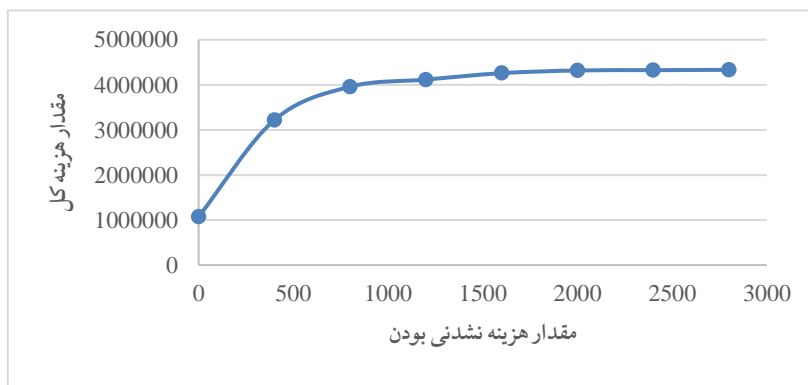
همان‌طور که در گام ۱ روش حل اشاره شد، ابتدا با در نظر گرفتن وزن ۰/۶ برای میزان دی اکسیدکربن خروجی و وزن ۰/۴ برای میزان مصرف آب، این دو تابع هدف را به یک هدف تبدیل می‌نماییم. هم‌چنین در تابع هدف سوم نیز برای پراکندگی تجهیزات وزن ۰/۲ برای میزان آسیب به افراد وزن ۰/۲ و برای ایجاد شغل در کل زنجیره و از بین رفتن مشاغل در اثر اختلال میزان وزن ۰/۶ را در نظر می‌گیریم. لازم به ذکر است این وزن‌ها با توجه به نظر خبرگان صنایع فولاد در نظر گرفته شده است. در ادامه مطابق گام ۲ ارایه‌شده، مقادیر ایده‌آل و ضدایده‌آل را برای هر یک از توابع هدف محاسبه می‌نماییم و پس از تعیین تابع مطلوبیت برای هر یک از توابع هدف و تبدیل مدل قطعی چندهدفه به مدل تک‌هدفه، با استفاده از تابع ادغامی ارایه‌شده، مقادیر موردنیاز مطلوبیت‌ها برای تصمیم‌گیرنده توسط مدل موردنظر ارایه می‌شود و تصمیم‌گیرنده می‌تواند به انتخاب جواب مناسب بپردازد. لازم به ذکر است در این مرحله نیز برای توابع هدف هزینه مقدار وزن ۰/۵، برای محیط‌زیست مقدار وزن ۰/۳ و برای مسئولیت‌پذیری اجتماعی مقدار وزن ۰/۲ در نظر گرفته شده است. برای پیاده‌سازی مدل ریاضی ارایه‌شده از نرم‌افزار GAMS استفاده شده است که نمونه‌ای از محاسبات انجام‌شده در کامپیوتر با پردازنده Core-i5 و حافظه Ram-4G در جدول ۷ آورده شده است. به‌منظور انجام تحلیل حساسیت در مدل ارایه‌شده رابطه هزینه نشدنی بودن را با هزینه کل و مقدار تقاضا ارضا نشده، مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. همان‌طور که در شکل ۲ و شکل ۳ نمایش داده شده است، با افزایش هزینه نشدنی بودن، مقدار هزینه کل به‌صورت نمایی افزایش و مقدار کمبود به‌صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند که با نتایج ارایه‌شده از مقاله مولوی و همکاران [54] تطابق دارد.



جدول ۷- جواب‌های مدل ریاضی ارایه شده به ازای مقادیر مختلف توابع عضویت.

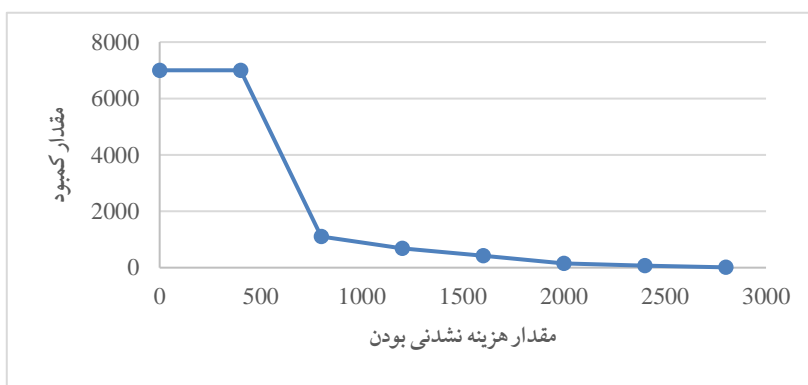
Table 7- The mathematical model proposed solutions for different values of membership functions.

	b0	میزان مطلوبیت		میزان مطلوبیت	میزان مطلوبیت	هزینه زنجیره	
		میزان مطلوبیت هزینه	ریسک‌های آلودگی محیطی	ریسک‌های مسئولیت اجتماعی	ریسک‌های مسئولیت اجتماعی		
(2,3,4)	0.6	0.6	0.6	0.65	0.6	0.6	4665255.694
	0.5	0.5	0.5	0.71	0.6	0.52	4623998.952
	0.8	0.3	0.3	0.85	0.74	0.36	4475295.581
	0.5	0.7	0.5	0.6	0.72	0.52	4722843.879
	0.2	0.8	0.2	0.82	0.8	0.34	4506344.902
	0.7	0.3	0.5	0.76	0.59	0.52	4559399.96
	0.3	0.3	0.8	0.35	0.3	0.8	4955840.125
	0.9	0.2	0.2	0.93	0.57	0.4	4402531.978
	0.2	0.7	0.7	0.22	0.7	0.7	5079961.527
	0.7	0.7	0.2	0.78	0.74	0.38	4540296.438
(0,1,2)	0.7	0.2	0.7	0.75	0.27	0.7	4575756.148
	0.6	0.6	0.6	0.66	0.6	0.6	4664079.395
	0.5	0.5	0.5	0.67	0.61	0.52	4653083.558
	0.8	0.3	0.3	0.84	0.74	0.38	4487722.045
	0.5	0.7	0.5	0.63	0.8	0.51	4689119.897
	0.2	0.8	0.2	0.82	0.8	0.34	4502479.171
	0.7	0.3	0.5	0.77	0.58	0.52	4558102.95
	0.3	0.3	0.8	0.39	0.3	0.8	4925457.813
	0.9	0.2	0.2	0.93	0.57	0.4	4403120.659
	0.2	0.7	0.7	0.26	0.7	0.7	5048201.573
0.7	0.7	0.2	0.85	0.73	0.36	4479656.752	
0.7	0.2	0.7	0.75	0.28	0.7	4575577.774	



شکل ۲- رابطه بین هزینه نشدنی بودن و هزینه کل.

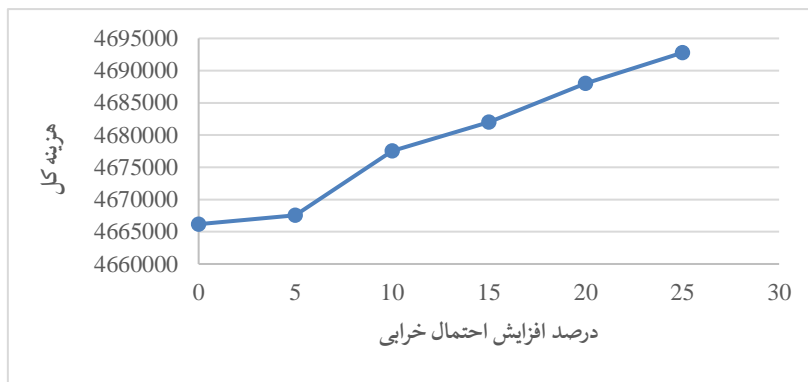
Figure 2- The relationship between total cost and infesable cost.



شکل ۳- رابطه بین مقدار نشدنی بودن و هزینه نشدنی بودن.

Figure 3- The relationship between infesable quantities and infesable cost.

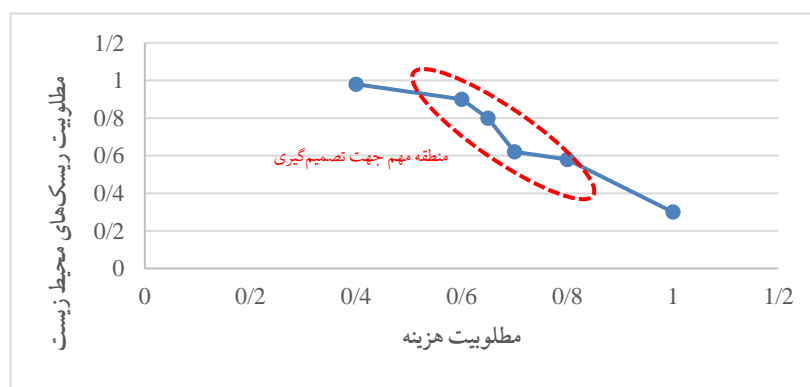
هم‌چنین با در نظر گرفتن میزان حداقل سطح مطلوبیت ۰/۶ برای دو تابع ریسک‌های محیطی و اجتماعی، رابطه افزایش احتمال خرابی با هزینه کل شبکه زنجیره‌تامین مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۴ این موضوع را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل پیداست مدل موردنظر با شرایط واقعی کاملاً تطابق دارد، یعنی همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش احتمال اختلال در زنجیره، میزان هزینه‌های شبکه نیز اضافه خواهد شد.



شکل ۴- رابطه هزینه کل با احتمال خرابی.

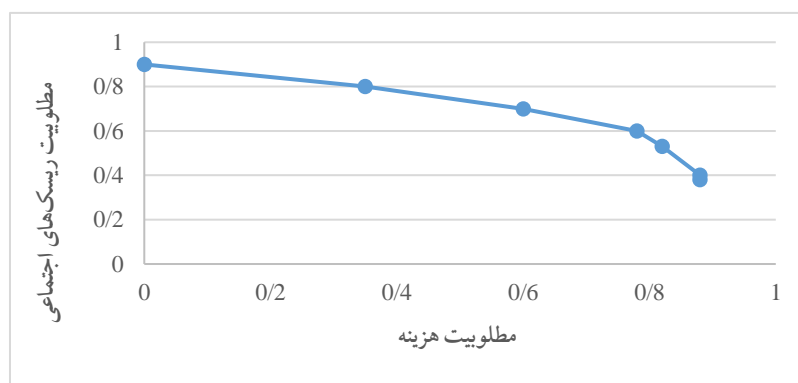
Figure 4- The relationship between total cost and probability of disruption.

به‌منظور مقایسه بین هر دو تابع هدف، تابع هدف سوم را مقدار ثابت ۰/۵ در نظر می‌گیریم. شکل ۵ مقایسه بین مطلوبیت هزینه و مطلوبیت تابع هدف مرتبط با محیط‌زیست (مصرف آب و میزان خروجی دی‌اکسیدکربن) را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست با افزایش میزان مطلوبیت محیط‌زیست میزان مطلوبیت هزینه کاهش می‌یابد؛ یعنی برای کاهش میزان دی‌اکسیدکربن و میزان مصرف آب باید از تکنولوژی‌های کارآتر استفاده نمود که این باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود و تصمیم‌گیرنده با توجه به میزان مطلوبیت خود در این خصوص می‌تواند تصمیم‌گیری نماید. این موضوع در خصوص مطلوبیت هزینه و مطلوبیت تابع هدف مسئولیت‌پذیری اجتماعی نیز صادق می‌باشد؛ یعنی با پراکندگی تجهیزات و استفاده از تکنولوژی‌های کارآتر می‌توان مطلوبیت تابع هدف مسئولیت‌پذیری اجتماعی را نیز افزایش داد؛ البته این موضوع مستلزم هزینه و کاهش میزان مطلوبیت هزینه خواهد شد (شکل ۶). درنهایت رابطه بین تابع هدف محیط‌زیست و مسئولیت‌پذیری اجتماعی نیز در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۵- رابطه بین مطلوبیت هزینه و محیط‌زیست.

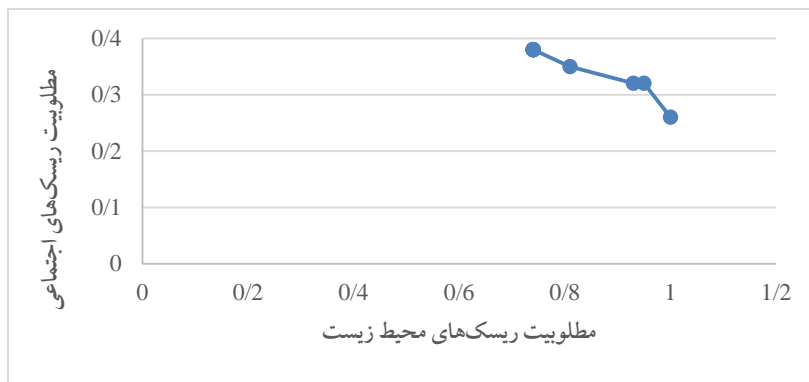
Figure 5- The relationship between cost and environmental utility.



شکل ۶- رابطه بین مطلوبیت هزینه و مطلوبیت ریسک‌های اجتماعی.

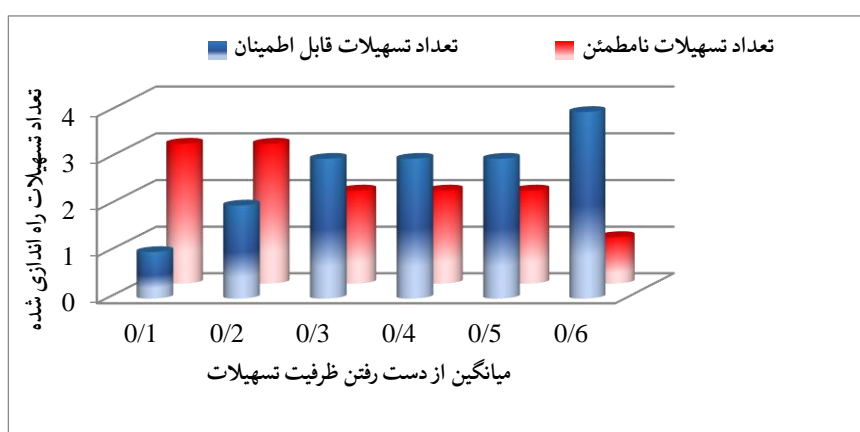
Figure 6- The relationship between the costs and social risks utility.



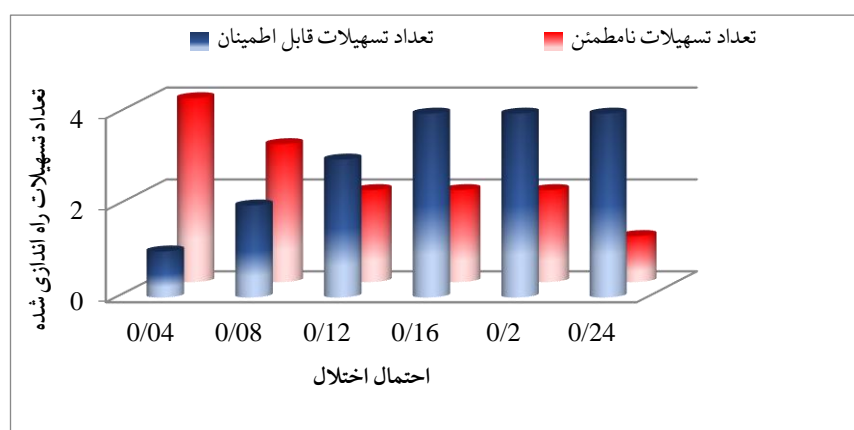


شکل ۷- رابطه بین مطلوبیت ریسک‌های مرتبط با محیط‌زیست و اجتماع.
Figure 7- The relationship between environmental and social risks utility.

به‌منظور بررسی تاثیر میزان اختلال و نیز میزان ظرفیت ازدست‌رفته تسهیلات هنگام اختلال بر شبکه مورد مطالعه، با در نظر گرفتن احتمال اختلال به‌صورت میانگین ۱۰٪، رابطه تعداد تسهیلات قابل اطمینان و نامطمئن با میانگین ظرفیت ازدست‌رفته نشان داد که با افزایش میزان ظرفیت ازدست‌رفته، شبکه میل به انتخاب تسهیلات قابل اطمینان خواهد داشت (شکل ۸). هم‌چنین با در نظر گرفتن میزان ظرفیت ازدست‌رفته برای تجهیزات به‌طور متوسط ۳۰٪، با افزایش میزان احتمال خرابی، شبکه دوباره میل به راه‌اندازی تسهیلات قابل اطمینان خواهد داشت (شکل ۹).



شکل ۸- ارتباط بین تعداد تسهیلات راه‌اندازی شده و میانگین ظرفیت ازدست‌رفته تسهیلات هنگام اختلال.
Figure 8- The relationship between the number of the facilities and the average of the capacity lost in disruption.



شکل ۹- ارتباط بین تعداد تسهیلات راه‌اندازی شده و میانگین احتمال اختلال.
Figure 9- The relationship between the number of the facilities and the average probability of disruption.



در این مطالعه با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته مدلی چندهدفه استوار برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین روبه جلو و عقب‌ارایه گردید؛ در آن اهداف مختلف مانند میزان مصرف آب و آلودگی محیط‌زیست، ایجاد مشاغل، حوادث ایجادشده برای کارکنان، پراکندگی تسهیلات به‌منظور ایجاد عدالت در مشاغل و کاهش ریسک اختلال در شبکه در نظر گرفته شده و برای مقابله با این اختلال و ایجاد شبکه‌ای تاب‌آور، از همکاری افقی و تصمیمات مربوطه، به‌عنوان مفهومی جدید در طراحی شبکه استفاده شده است. از طرفی با توجه به غیرقطعی بودن تقاضا و میزان بازگشت محصولات، برنامه‌ریزی استوار برای ایجاد شبکه‌ای تاب‌آور نسبت به تغییرات تصادفی در آینده به‌کار گرفته شده است. با توجه به چندهدفه بودن مدل ریاضی یک روش حل برای پیدا کردن جواب‌های مناسب توسعه داده شده است و برای تجزیه و تحلیل کارایی مدل و روش حل آرایه‌شده از داده‌های صنعت آهن و فولاد به‌عنوان مطالعه موردی استفاده شده است. علت استفاده از این صنعت به‌عنوان مطالعه موردی این است که این صنعت یکی از صنایعی است که بیش‌ترین سهم را در ایجاد آلاینده‌های ساخت بشر دارد و از مهم‌ترین صنایع که موجب ایجاد اشتغال در کشورهایی که دارای این صنعت هستند می‌باشد.

هم‌چنین نتایج نشان‌دهنده کارایی مدل موردنظر برای ایجاد فضای پارتویی مناسب جهت تصمیم‌گیری‌های استراتژیک شبکه می‌باشد؛ بنابراین، مدیران و تصمیم‌گیران حوزه آهن و فولاد با استفاده از این تحقیق می‌توانند در خصوص طراحی پیکره زنجیره‌تامین تحت شرایط عدم قطعیت، جریان برگشت محصولات و قراضه‌ها برای تولید محصولات جدید، انتخاب تکنولوژی و ظرفیت کارخانه‌های تولید فولاد خام احداث‌شده با توجه به فاکتورهای هزینه و پایداری، تصمیمات برقراری همکاری تحت شرایط ریسک و نیز نحوه سرمایه‌گذاری برای مقابله با ریسک‌های زنجیره‌تامین و افزایش تاب‌آوری زنجیره، تصمیمات کارتری را اتخاذ نمایند. درنهایت به‌عنوان پیشنهادها آتی می‌توان از سایر فاکتورهای زیست‌محیطی و اجتماعی با توجه به استاندارد ایزو ۲۶۰۰۰ برای طراحی شبکه استفاده نمود. هم‌چنین با توجه به در نظرگیری همکاری، این مفهوم و مدل‌های مربوطه را در طراحی شبکه توسعه داد و از طرفی با توجه نیازمندی این حوزه به روش‌های حل، به توسعه روش‌های حل چندهدفه و یا روش‌های حل برای مساله با مقیاس بزرگ پرداخت.

تشکر و قدردانی

از کلیه اساتید محترم مربوطه، مشاوران حوزه زنجیره‌تامین آهن و فولاد که در مراحل مختلف این تحقیق کمک نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مالی

هیچ‌گونه بودجه یا کمک‌هزینه تحقیق در طی مطالعه مذکور دریافت نشده است.

تعارض با منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضادی در منافع در مورد انتشار این نسخه وجود ندارد.

منابع

- [1] Kleindorfer, P. R., & Saad, G. H. (2005). Managing disruption risks in supply chains. *Production and operations management*, 14(1), 53-68. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1937-5956.2005.tb00009.x>
- [2] Snyder, L. V., Atan, Z., Peng, P., Rong, Y., Schmitt, A. J., & Sinsoysal, B. (2016). OR/MS models for supply chain disruptions: a review. *Iie transactions*, 48(2), 89-109.
- [3] Zhalechian, M., Torabi, S. A., & Mohammadi, M. (2018). Hub-and-spoke network design under operational and disruption risks. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 109, 20-43. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.11.001>
- [4] Pullman, M. E., Maloni, M. J., & Carter, C. R. (2009). Food for thought: social versus environmental sustainability practices and performance outcomes. *Journal of supply chain management*, 45(4), 38-54.
- [5] Farbod, E., & Hamidieh, A. (2022). Investigating the impact of green supply chain on economic performance: neural network models and structural equations approach. *Journal of decisions and operations research. (In Persian)*. <https://doi.org/10.22105/dmor.2022.283479.1393>



- [6] Govindan, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (2015). Bi-objective integrating sustainable order allocation and sustainable supply chain network strategic design with stochastic demand using a novel robust hybrid multi-objective metaheuristic. *Computers and operations research*, 62, 112-130.
- [7] Mokhlesabadi, S., & Hashemi Gohar, M. (2022). Designing a fuzzy goal programming (FGP) model in green supply network closed loop (GSNCL). *Journal of decisions and operations research*, 6(Spec. Issue), 1-30. (In Persian). <https://doi.org/10.22105/dmor.2021.296381.1451>
- [8] Ghahremani-Nahr, J., Nozari, H., & Najafi, S. E. (2020). Design a green closed loop supply chain network by considering discount under uncertainty. *Journal of applied research on industrial engineering*, 7(3), 238-266. <https://doi.org/10.22105/jarie.2020.251240.1198>
- [9] Tajani, E. K., Kanafi, A. G., Daneshmand-Mehr, M., & Hosseinzadeh, A. A. (2022). Robust design of an agile sustainable closed-loop supply chain network with different sales channels. *Channels*, 7(1), 160-210. (In Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.25385097.1401.7.1.10.5>
- [10] Giannakis, M., & Papadopoulos, T. (2016). Supply chain sustainability: a risk management approach. *International journal of production economics*, 171, 455-470. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.06.032>
- [11] Duhamel, F., Carbone, V., & Moatti, V. (2016). The impact of internal and external collaboration on the performance of supply chain risk management. *International journal of logistics systems and management*, 23(4), 534-557. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2016.075212>
- [12] Simatupang, T. M., & Sridharan, R. (2005). The collaboration index: a measure for supply chain collaboration. *International journal of physical distribution & logistics management*, 35(1), 44-62. <http://dx.doi.org/10.1108/09600030510577421>
- [13] Tang, A., Fakourfar, O., Neustaedter, C., & Bateman, S. (2017). *Collaboration in 360 videochat: challenges and opportunities*. <https://prism.ucalgary.ca/handle/1880/51950>
- [14] Difrancesco, R. M., Meena, P., & Tibrewala, R. (2021). Buyback and risk-sharing contracts to mitigate the supply and demand disruption risks. *European journal of industrial engineering*, 15(4), 550-581. <https://ideas.repec.org/a/ids/eujine/v15y2021i4p550-581.html>
- [15] Oh, S. C., Min, H., & Ahn, Y. H. (2021). Inventory risk pooling strategy for the food distribution network in Korea. *European journal of industrial engineering*, 15(4), 439-462. <https://doi.org/10.1504/EJIE.2021.116131>
- [16] Chopra, S., & Sodhi, M. S. (2004). Managing risk to avoid supply-chain breakdown. *MIT Sloan management review*, 46(1), 53-61. https://d1wqxts1zle7.cloudfront.net/34808711/Supply_chain_Break_down-libre.pdf?
- [17] Anderson, D. R. (2006). The critical importance of sustainability risk management. *Risk Management*, 53(4), 66-72.
- [18] Hofmann, H., Busse, C., Bode, C., & Henke, M. (2014). Sustainability-related supply chain risks: conceptualization and management. *Business strategy and the environment*, 23(3), 160-172.
- [19] International Organization Standardization. (2006). *Guidance on social responsibility*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:26000:ed-1:v1:en>
- [20] Razdan, M. R., Aghasi, S., & Davoodi, S. M. R. (2023). Ranking factors affecting supply chain risk with a combined approach of neutrosophic analytical hierarchy process and TOPSIS. *Journal of applied research on industrial engineering*, 10(1), 1-13.
- [21] Xames, D., Tasnim, F., Mim, T. I., & Kiron, A. (2022). COVID-19 and food supply chain disruptions in Bangladesh: impacts and strategies. *International journal of research in industrial engineering*, 11(2), 155-164.
- [22] Groothedde, B. (2005). *Collaborative logistics and transportation networks: a modeling approach to hub network design* (PHD Thesis, Delf University of Technology). <http://resolver.tudelft.nl/uuid:53de6d9c-4047-4d3e-bc96-4eb75a8f4528>
- [23] Liu, K., Zhou, Y., & Zhang, Z. (2010). Capacitated location model with online demand pooling in a multi-channel supply chain. *European journal of operational research*, 207(1), 218-231.
- [24] Pan, S., Ballot, E., & Fontane, F. (2013). The reduction of greenhouse gas emissions from freight transport by pooling supply chains. *International journal of production economics*, 143(1), 86-94.
- [25] Moghaddam, M., & Nof, S. Y. (2016). Real-time optimization and control mechanisms for collaborative demand and capacity sharing. *International journal of production economics*, 171, 495-506.
- [26] Ouhader, H., & El Kyal, M. (2017). Combining facility location and routing decisions in sustainable urban freight distribution under horizontal collaboration: how can shippers be benefited? *Mathematical problems in engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/8687515>
- [27] Habibi, M. K., Allaoui, H., & Goncalves, G. (2018). Collaborative hub location problem under cost uncertainty. *Computers & industrial engineering*, 124, 393-410.
- [28] Aloui, A., Hamani, N., Derrouiche, R., & Delahoche, L. (2022). Assessing the benefits of horizontal collaboration using an integrated planning model for two-echelon energy efficiency-oriented logistics networks design. *International journal of systems science: operations & logistics*, 9(3), 302-323.
- [29] Carter, C. R., & Jennings, M. M. (2002). Social responsibility and supply chain relationships. *Transportation research part e: logistics and transportation review*, 38(1), 37-52.
- [30] Cruz, J. M., & Wakolbinger, T. (2008). Multiperiod effects of corporate social responsibility on supply chain networks, transaction costs, emissions, and risk. *International journal of production economics*, 116(1), 61-74.
- [31] Cruz, J. M. (2009). The impact of corporate social responsibility in supply chain management: multicriteria decision-making approach. *Decision support systems*, 48(1), 224-236.
- [32] Dehghanian, F., & Mansour, S. (2009). Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. *Resources, conservation and recycling*, 53(10), 559-570.
- [33] Amin, S. H., & Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied mathematical modelling*, 37(6), 4165-4176.
- [34] Nasiri, A., Mansory, A., & Mohammadi, N. (2022). Evaluating of effective factors on green supply chain management using statistical methods and SWARA approach. *International journal of research in industrial engineering*, 11(2), 165-187.
- [35] Pishvae, M. S., & Razmi, J. (2012). Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied mathematical modelling*, 36(8), 3433-3446.



- [36] Wang, Y., Zhu, X., Lu, T., & Jeeva, A. (2013). Eco-efficient based logistics network design in hybrid manufacturing/remanufacturing system in low-carbon economy. *Journal of industrial engineering and management*, 2013, 200-214.
- [37] Pishvae, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2014). An accelerated Benders decomposition algorithm for sustainable supply chain network design under uncertainty: a case study of medical needle and syringe supply chain. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 67, 14-38.
- [38] Eslamipoor, R., & Nobari, A. (2023). A reliable and sustainable design of supply chain in healthcare under uncertainty regarding environmental impacts. *Journal of applied research on industrial engineering*, 10(2), 256-272.
- [39] Hamidieh, A., & Johari, A. (2022). Blood supply chain network design considering responsiveness and reliability in conditions of uncertainty using the lagrangian relaxation algorithm. *International journal of research in industrial engineering*, 11(2), 188-204.
- [40] Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Mohammadi, M. (2016). Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 89, 182-214.
- [41] Babazadeh, R., Razmi, J., Pishvae, M. S., & Rabbani, M. (2017). A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk. *Omega*, 66, 258-277.
- [42] Sahebjamnia, N., Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghahi-Keshteli, M. (2018). Sustainable tire closed-loop supply chain network design: hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks. *Journal of cleaner production*, 196, 273-296.
- [43] Sherafati, M., Bashiri, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Pishvae, M. S. (2019). Supply chain network design considering sustainable development paradigm: a case study in cable industry. *Journal of cleaner production*, 234, 366-380. <https://pure.coventry.ac.uk/ws/portalfiles/portal/24567716/Binder6.pdf>
- [44] Habiba, U., Ripon, B. M., & Islam, M. D. (2021). Optimization of a green supply chain network: a case study in a pharmaceutical industry. *International journal of research in industrial engineering*, 10(3), 174-186.
- [45] Gong, J., Mitchell, J. E., Krishnamurthy, A., & Wallace, W. A. (2014). An interdependent layered network model for a resilient supply chain. *Omega*, 46, 104-116.
- [46] Hasani, A., & Khosrojerdi, A. (2016). Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: a parallel memetic algorithm for a real-life case study. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 87, 20-52. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.12.009>
- [47] Rezapour, S., Farahani, R. Z., & Pourakbar, M. (2017). Resilient supply chain network design under competition: a case study. *European journal of operational research*, 259(3), 1017-1035.
- [48] Jabbarzadeh, A., Houghton, M., & Khosrojerdi, A. (2018). Closed-loop supply chain network design under disruption risks: a robust approach with real world application. *Computers & industrial engineering*, 116, 178-191.
- [49] Hosseini-Motlagh, S. M., Samani, M. R. G., & Cheraghi, S. (2020). Robust and stable flexible blood supply chain network design under motivational initiatives. *Socio-economic planning sciences*, 70, 100725.
- [50] Hasani, A., Mokhtari, H., & Fattahi, M. (2021). A multi-objective optimization approach for green and resilient supply chain network design: a real-life case study. *Journal of cleaner production*, 278, 123199.
- [51] Sazvar, Z., Tafakkori, K., Oladzad, N., & Nayeri, S. (2021). A capacity planning approach for sustainable-resilient supply chain network design under uncertainty: a case study of vaccine supply chain. *Computers & industrial engineering*, 159, 107406.
- [52] Vali-Siar, M. M., & Roghanian, E. (2022). Sustainable, resilient and responsive mixed supply chain network design under hybrid uncertainty with considering COVID-19 pandemic disruption. *Sustainable production and consumption*, 30, 278-300.
- [53] Roshani, A., Gholamian, M. R., & Arabi, M. (2022). A two-stage stochastic programming approach to design a resilient pharmaceutical supply chain network: a case study of COVID-19. *Journal of decisions and operations research*. (In Persian). https://www.journal-dmor.ir/article_146557_9792c8ed75a5f9543a41105c8894e6fb.pdf?lang=en
- [54] Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations research*, 43(2), 264-281.
- [55] Yu, C. S., & Li, H. L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International journal of production economics*, 64(1-3), 385-397.
- [56] Pishvae, M. S., & Torabi, S. A. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 161(20), 2668-2683.
- [57] Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., & Rodri, M. V. (2007). Linear programming with fuzzy parameters: an interactive method resolution. *European journal of operational research*, 177(3), 1599-1609.
- [58] Parra, M. A., Terol, A. B., Gladish, B. P., & Urna, M. R. (2005). Solving a multiobjective possibilistic problem through compromise programming. *European journal of operational research*, 164(3), 748-759.
- [59] Torabi, S. A., & Hassini, E. (2008). An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. *Fuzzy sets and systems*, 159(2), 193-214.
- [60] Smale, R., Hartley, M., Hepburn, C., Ward, J., & Grubb, M. (2006). The impact of CO2 emissions trading on firm profits and market prices. *Climate policy*, 6(1), 31-48.
- [61] Grobler, F. & Minnitt, R. (1999). The increasing role of direct reduced iron in global steelmaking. *Journal of the southern African institute of mining and metallurgy*, 99(2), 111-116.
- [62] Strezov, V., Evans, A., & Evans, T. (2013). Defining sustainability indicators of iron and steel production. *Journal of cleaner production*, 51, 66-70.
- [63] McKinnon, A. C., & Piecyk, M. (2010). *Measuring and managing CO2 emissions in European chemical transport*. Heriot-Watt University. <https://researchportal.hw.ac.uk/en/publications/3ce441ef-63ab-4277-86ea-4ad075a123da>
- [64] Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Modarres, M., & Baboli, A. (2012). Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: a robust-M/M/c queuing model. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 48(6), 1152-1168.