Archive of SID.ir

E-ISSN: 2676-6159 | P-ISSN: 2538-5079

Journal of Decisions and Operations Research

www.journal-dmor.ir

J. Decis. Oper. Res. Vol. 8, No. 3 (2023) 691–713.



Paper Type: Original Article

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

Hamid Saffari[1], Morteza Abbasi[1,*], Jafar Gheidar-Kheljani[1]

[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 transmision 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).

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

Journal of Decisions and Operations Research

تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات

دوره ۸، شماره (۳)، (۱۴۰۲)، ۷۱۳-۶۹۱

www.journal-dmor.ir



نوع مقاله: پژوهشی

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

حمید صفاری[۱]، مرتضی عباسی[۱*]، جعفر قیدر خلجانی[۱]

[۱] دانشکده مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

چکیده

هدف: این تحقیق یک مدل ریاضی چندهدفه استوار، با در نظرگرفتن هم زمان هزینه و ریسک‌های مربوط به محیط‌زیست (مصرف آب و آلودگی محیط‌زیست)، 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 ارایه 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 قابل‌اطمینان 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 به‌صورت هم‌زمان موردمطالعه قرار گرفته است. از همکاری افقی به‌عنوان 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.

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

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]، اشنایدر و همکاران [2] و شالچیان و همکاران [3] ریسک‌های مرتبط با زنجیره‌تامین به سه دسته تقسیم می‌شوند. ریسک‌های عملیاتی که معمولا به ریسک‌های مرتبط با تغییرات تقاضا، تامین مواد اولیه، هزینه‌ها و ... مربوط می‌شوند؛ ریسک‌های اختلال که به‌وسیله بلایای طبیعی (سیل، زلزله، سونامی بیماری‌های واگیردار مانند کرونا و ...) یا تهدیدهای انسانی (حمله‌های تروریستی و اعتصابات و ...) ایجاد می‌شوند و ریسک‌های

* نویسنده مسئول

mabbasi@mut.ac.ir

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

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

پایداری زنجیره‌تامین نیز به‌صورت فزاینده‌ای برای مقابله با تعدادی از این ریسک‌ها موردتوجه قرار گرفته است؛ زیرا توجه به پایداری زنجیره‌تامین باعث افزایش رقابت‌پذیری، بهبود عملکرد اقتصادی و افزایش بهره‌وری نیروی کار می‌شود [5][5]. در مساله طراحی شبکه پایدار زنجیره‌تامین تلاش می‌شود که شبکه زنجیره‌تامین با ساختاری پیکره‌بندی شود که جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی تا حد امکان دارای بیش‌ترین مطلوبیت باشند [6]. از آن‌جایی‌که طراحی شبکه زیرمجموعه تصمیمات استراتژیک در زنجیره‌تامین می‌باشد و اتخاذ تصمیم‌های درست در عملکرد و سودآوری زنجیره در یک بازه نسبتا طولانی تاثیرگذار 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 زنجیره‌تامین به جریان روبه جلو و عقب به‌صورت هم‌زمان توجه داشته باشند [7]. ترکیب جریان روبه جلو و عقب به‌صورت یکپارچه شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته را به‌وجود آورده است [8]. طراحی مناسب این شبکه حلقه بسته زنجیره‌تامین منجر به افزایش اثربخشی، انتخاب بهینه تسهیلات، تخصیص مناسب جریان محصولات و ... خواهد شد [9].

برای مقابله با ریسک‌ها در زنجیره‌تامین روش‌های مختلفی ارایه شده است [10]. یکی از راه‌های مقابله با ریسک‌های زنجیره‌تامین 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 زنجیره‌تامین 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 زنجیره‌تامین 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 زنجیره‌تامین 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 زنجیره‌تامین 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 درنهایت با تجزیه و تحلیل نتایج، تاثیر هر یک از این ریسک‌ها با استفاده از داده‌های صنعت آهن و فولاد در زنجیره‌تامین، 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 ٤ تجزیه‌وتحلیل نتایج ارایه می‌گردد و درنهایت در بخش آخر جمع‌بندی و جهت‌گیری‌های آتی آورده می‌شود.

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

۲- پیشینه پژوهش

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

۲-۱- ریسک در زنجیره‌تامین

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

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

می‌باشند. هم‌چنین اندرسون [17] در مطالعه خود بیان می‌دارد که ریسک‌های مختلفی در خصوص پایداری در زنجیره‌تامین وجود دارند که ازجمله 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 خسارات 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 زنجیره‌تامین ارایه 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 ارایه‌شده در ایزو ۲۶۰۰۰ را نمایش می‌دهد. هم‌چنین رازدار و همکاران [20] و نیز اگزامس و همکاران [21] در مقاله خود به شناسایی و رتبه‌بندی ریسک‌ها در زنجیره‌تامین پرداخته‌اند.

۲-۲- همکاری افقی در شبکه زنجیره‌تامین

گروسد [22] یک روش ابتکاری برای محاسبه هزینه‌های موجودی و انتقال محصولات برای کمینه کردن هزینه‌های کل شبکه ارایه 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 زنجیره‌تامین چندکالاله برای انبارهای محلی با ظرفیت محدود ارایه دادند که هدف آن برقراری رابطه تعادل بین تاثیرات اجرای زنجیره‌تامین تلفیقی و هزینه‌ها در زنجیره‌تامین دوسطحی می‌باشد. پن و همکاران [24] مدلی را برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین تحت شرایط همکاری ارایه دادند که در این مقاله میزان بار و تعداد سفر با توجه به شرایط همکاری در زنجیره‌تامین 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.

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

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۱- ادامه.

Table 1- Continued.

موارد در نظر گرفته شده در این مطالعه	زیرمجموعه موضوعات	موضوعات اصلی مطرح‌شده در ایزو ۲۶۰۰۰
	مسئولیت توسعه سیاسی	فعالیت‌های عادلانه
	عدم رشوه و فساد مالی	
	رقابت پویا	
	پاسخ‌گویی و شفافیت	
	پاسخ‌دهی سریع به مشتری	مسایل مربوط به مشتری
	ایمنی مصرف‌کنندگان	
	حفاظت از سلامت مشتری	
	ارایه اطلاعات مناسب به مشتری	
	آموزش به مشتری	
	دسترسی به خدمات سریع	
*	جمع‌آوری بسته‌بندی‌های محصولات	
*	توسعه اجتماع و تعداد مشاغل ایجادشده	مشارکت و توسعه اجتماع
	توسعه مهارت‌های فردی	
	توسعه سطح دسترسی به فنّاوری	
	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 ارایه 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 پیش‌بینی‌نشده تامین توسط اشتراک ظرفیت و تقاضا مدیریت شود. اوحادر و الکیال [26] مقاله‌ای ارایه دادند که در آن مقاله تاثیرات بالقوه اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیست، ترکیب انبارها و تصمیمات مسیریابی وسایل حمل‌ونقل شهری تحت شرایط همکاری افقی مورد بررسی قرار گرفته است. حبیبی و همکاران [27] در تحقیق خود ادعا کرده‌اند که همکاری اعضای زنجیره‌تامین 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 زنجیره‌تامین دوسطحی سبز تحت شرایط همکاری و عدم‌همکاری مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲- مدل‌های ارایه‌شده با در نظرگیری ریسک محیط‌زیست، مسئولیت‌های اجتماعی و اختلال در زنجیره‌تامین

یکی از مطالعات اولیه درخصوص ریسک‌های اجتماعی زنجیره‌تامین مربوط به کارتر و جنینگز [29] می‌باشد. هرچند در مطالعه آن‌ها مدل ریاضی ارایه نشده است، اما آن‌ها در مقاله خود به بررسی تاثیرات اجتماعی خرید بر عملکرد زنجیره‌تامین پرداختند. در ادامه کروز و اکلبینگر [30] و کروز [31] پیشنهادهایی را برای مدل‌سازی شبکه زنجیره‌تامین با در نظرگیری معیارهای اجتماعی و زیست‌محیطی ارایه دادند. دهقانیان و منصور [32] به توسعه مدلی برای زنجیره‌تامین 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 زنجیره‌تامین با جریان روبه جلو و عقب ارایه کردند. نصیری و همکاران [34] در مقاله خود به بررسی فاکتورهای تاثیرگذار در طراحی شبکه زنجیره‌تامین 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 $CO2$ 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 زنجیره‌تامین روبه جلو ارایه 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 نوبری [38] مدلی قابل‌اطمینان را برای

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

طراحی شبکه زنجیره‌تامین خون با فرض ظرفیت مورد نیاز زنجیره جهت تامین تقاضای بیمارستان‌ها، ارایه کردند که در این مدل، جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده است. در مقاله حمیدیه و جوهری [39] یک مدل آمیخته عدد صحیح غیرخطی تصادفی برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین خون توسعه داده شده و در کنار کاهش هزینه‌های کل شبکه به کاهش زمان حمل‌ونقل و زمان تحویل توجه شده است و با استفاده از مدل استوار سعی شده است پارامترهای عدم قطعیت در مدل ارایه‌شده تحت کنترل قرار گیرند. تاجانی و همکاران [9] یک مدل چندرده‌ای، چندمحصولی و چنددوره‌ای و چندهدفه برای طراحی شبکه حلقه بسته با در نظرگیری مسئولیت‌پذیری اجتماعی ارایه نمودند. مخلص‌آبادی و هاشمی [7] به طراحی شبکه زنجیره‌تامین 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] وحبیبا و همکاران [44] مدل‌های مختلفی را با درنظرگرفتن تاثیرات اجتماعی و زیست‌محیطی زنجیره‌تامین ارایه نموده‌اند.

درخصوص ریسک اختلال در طراحی شبکه زنجیره‌تامین نیز می‌توان به مطالعه گانگ و همکاران [45] اشاره کرد که مدلی را برای زنجیره‌تامین 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 زنجیره‌تامین روبه جلو و با در نظرگیری ریسک اختلال ارایه نمودند. رضاپور و همکاران [47] نقش ریسک اختلال در رقابت‌پذیری زنجیره‌تامین را مورد ارزیابی قرار دادند. جبارزاده و همکاران [48] یک مدل برنامه‌ریزی استوار برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته ارایه کردند و فرض از دست رفتن میزانی از ظرفیت تسهیلات در اثر اختلال در زنجیره‌تامین را در این مدل در نظر گرفتند. هدف از این مقاله تعیین مکان بهینه تسهیلات به‌منظور کاهش هزینه‌های زنجیره‌تامین می‌باشد. حسینی مطلق و همکاران [49] مقاله‌ای را برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین با در نظر گرفتن ریسک اختلال در شبکه زنجیره‌تامین و نیز ریسک عدم قطعیت در این زنجیره ارایه دادند. در مدل ریاضی ارایه‌شده مکان مراکز به همراه میزان ظرفیت آن‌ها تعیین می‌گردد. حسنی و همکاران [50] مدلی برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین ارایه دادند که در آن تاثیرات زیست‌محیطی و پراکندگی تجهیزات به‌منظور کاهش ریسک اختلال در زنجیره با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف وارد مدل‌سازی شده است. سازور و همکاران [51] یک رویکرد برنامه‌ریزی ظرفیت برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین پایدار و تاب‌آور تحت شرایط عدم‌قطعیت 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 زنجیره‌تامین دارو تحت شرایط کوید ۱۹ ارایه نمودند که در این مطالعه به‌منظور افزایش تاب‌آوری زنجیره‌تامین، علاوه بر معیار اقتصادی زنجیره‌تامین معیارهای منفی تاب‌آوری 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 زنجیره‌تامین پرداخته‌اند. در **جدول ۲** خلاصه‌ای از این استراتژی‌ها و موارد در نظر گرفته‌شده در این تحقیق مشخص شده‌اند.

جدول ۲- محدوده و تاثیر استراتژی‌های مقابله با ریسک اختلال در زنجیره‌تامین.

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

استراتژی	محدوده اجرای استراتژی	تاثیر استراتژی در زنجیره‌تامین	پژوهش حاضر
تقویت تسهیلات	تامین‌کننده، تولیدکننده و توزیع‌کننده	بهبود استحکام ظرفیت تسهیلات	
همکاری افقی و تامین از منبع موازی	تامین‌کننده و توزیع‌کننده	کاهش وابستگی به یک منبع	*
تولید محصولات مشابه	تولیدکننده	جبران کمبود محصولات	
پراکنده‌سازی تسهیلات	تامین‌کننده، تولیدکننده و توزیع‌کننده	کاهش ریسک در همه تسهیلات با پراکنده‌سازی تسهیلات در نقاط مختلف	*
نگهداری موجودی	توزیع‌کننده یا انبار	کاهش کمبود محصولات نهایی	
نگهداری آلترناتیوهای محصولات	تولیدکننده	کاهش نیاز به قطعات	

مرور ادبیات تحقیقات انجام‌شده در این زمینه نشان می‌دهد که در نظر گرفتن هزینه در کنار ریسک‌های زیست‌محیطی و تاثیرات اجتماعی و نیز ریسک‌های مرتبط با شرایط عدم‌قطعیت کمتر موردتوجه قرار گرفته است. تعدادی کمی از تحقیقات فرض انتخاب تکنولوژی و نیز میزان ظرفیت دارایی‌ها را با توجه به ریسک‌های زنجیره مورد مطالعه قرار داده‌اند. مفهوم طراحی شبکه زنجیره‌تامین پایدار و تاب‌آور 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 محیط‌زیست و ریسک‌های مرتبط با مسئولیت‌پذیری‌های اجتماعی پرداخته‌اند. برای مقابله

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

با ریسک اختلال در شبکه زنجیره‌تامین 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 زنجیره‌تامین موردی است که نیازمند توجه بیش‌تر محققین در این زمینه می‌باشد؛ بنابراین، در این مطالعه در نظرگیری شکاف‌های تحقیقاتی ارایه‌شده سعی شده است با ارایه مدل ریاضی به غنی‌سازی ادبیات این حوزه کمک شود. **جدول ۳** خلاصه‌ای از خلاهای تحقیقاتی و موارد در نظر گرفته‌شده 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 کارخانه های تولید مواد اولیه به کمک قراضه‌های جمع‌آوری‌شده از نقاط مختلف مصرف، تولید فولاد انجام می‌شود. در ادامه این فولاد به کارخانه های 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 آن‌جایی‌که 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 قابل‌اطمینان که احتمال خرابی در آن ناچیز و در این‌جا صفر در نظر گرفته شده است و توزیع‌کننده نامطمئن که احتمال خرابی برای آن‌ها در نظر گرفته شده است و هنگام خرابی و اختلال به‌منظور جلوگیری از فروش ازدست‌رفته، توسط توزیع‌کننده‌های قابل‌اطمینان محصولات موردنیاز توزیع‌کننده‌های نامطمئن تامین می‌شود. محصولات بعد از توزیع در میان نقاط مصرف جمع‌آوری و تحویل مراکز جمع‌آوری می‌شوند و درنهایت به‌عنوان قراضه به کارخانه‌های فولاد انتقال می‌یابند. **شکل ۱** توضیحات ارایه‌شده را نمایش می‌دهد. این شکل برای زنجیره روبه جلو و عقب فولاد طراحی شده است اما قابل استفاده برای سایر زنجیره‌تامین فلزات مانند تولید سرب در صنایع باطری‌سازی و ... می‌باشد.

جدول ۳- خلاصه مرور ادبیات.

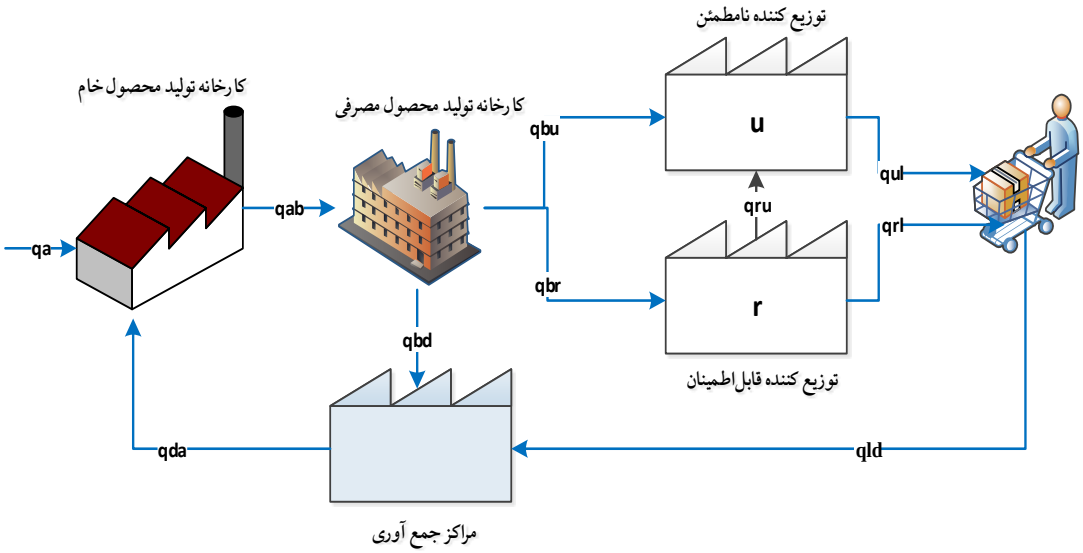
Table 3– The sumery of literature rewieve.

نام نویسندگان	جریان روبه جلو	جریان روبه عقب	ریسک آلودگی محیط	مصرف آب	ریسک اجتماعی	ریسک عملیاتی	ریسک اختلال	همکاری افقی	نحوه مواجهه با ریسک: موجودی	محصولات	تقویت	پراکنده‌سازی	مکان‌یابی	میزان حمل‌ونقل	عدم قطعیت
جبارزاده و همکاران [48]	*	*				*	*		*				*	*	*R
رضاپور و همکاران [47]	*						*		*				*	*	
حسنی و خسروجردی [46]	*					*	*		*	*	*	*	*	*	R
گنگ و همکاران [45]	*					*								*	
پیشوایی و رزمی [35]	*	*	*		*								*	*	
ژاله‌چیان و همکاران [40]	*	*	*		*								*		*F
بابازاده و همکاران [41]	*		*			*							*	*	F
صاحب جمنیا و همکاران [42]	*	*	*		*								*	*	
شرافتی و همکاران [43]	*		*		*								*	*	R
حسینی مطلق و همکاران [49]	*	*				*	*		*				*	*	R
حسنی 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

*مدل‌سازی استوار: R، مدل‌سازی فازی: F

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل ۱- شبکه زنجیره‌تامین روبه جلو و عقب.

Figure 1- Forward and reverse supply chain network.

فرضیات در نظر گرفته‌شده در مدل به‌صورت زیر می‌باشد:

- تولید فولاد از طریق جریان برگشتی و قراضه‌های خریداری‌شده امکان‌پذیر 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 توزیع‌کننده وجود دارد.
- با توجه به این‌که میزان تولید فولاد به‌صورت 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 هم‌چنین درصد ضایعات در کارخانه‌های تولید محصول مصرفی به‌صورت غیرقطعی است.
- احتمال اختلال برای توزیع‌کننده‌ها در نظر گرفته شده است که فرض شده است هنگام اختلال درصدی از ظرفیت تسهیلات از بین می‌رود.

۱-۳- نمادگذاری مدل ریاضی

به‌منظور مدل‌سازی ریاضی نمادهای زیر در مدل‌سازی استفاده شده است:

اندیس‌ها

a: مجموعه نقاط بالقوه کارخانه تولید فولاد.

b: مجموعه نقاط ثابت کارخانه‌های محصولات مصرفی.

c: ظرفیت‌های مختلف برای احداث کارخانه فولاد.

e: تکنولوژی‌های مورداستفاده در کارخانه‌های تولید فولاد.

r: مجموعه نقاط بالقوه توزیع‌کننده‌های قابل‌اطمینان.

u: مجموعه نقاط بالقوه توزیع‌کننده‌های نامطمئن.

l: مجموعه نقاط ثابت بازار مصرف.

d: مجموعه نقاط بالقوه مراکز جمع‌آوری.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

پارامترها

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

Fr_r: هزینه ثابت احداث مرکز توزیع قابل‌اطمینان 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 m.

θ_{ij}: فاصله بین دو تسهیل 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.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

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

rj_r: تعداد فرصت شغلی ایجادشده اگر در مکان r توزیع‌کننده قابل‌اطمینان احداث شود.

uj_u: تعداد فرصت شغلی ایجادشده اگر در مکان u توزیع‌کننده نامطمئن احداث شود.

dj_d: تعداد فرصت شغلی ایجادشده اگر در مکان d مراکز جمع‌آوری احداث شود.

pu_u: احتمال اختلال در توزیع‌کننده u.

lc_u: درصدی از ظرفیت توزیع‌کننده u که در اثر اختلال از بین می‌رود.

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

al_a^{ec}: تعداد روزهای ازدست‌رفته 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.

zr_r: اگر در مکان r توزیع‌کننده قابل‌اطمینان احداث شود ۱ و در غیر این صورت ۰.

zu_u: اگر در مکان u توزیع‌کننده نامطمئن احداث شود ۱ و در غیر این صورت ۰.

x_d: اگر در مکان d مرکز جمع‌آوری 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 توزیع‌کننده r.

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

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

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

tr_{ru}: مقدار محصول ارسالی از توزیع‌کننده r به توزیع‌کننده u در صورت ایجاد اختلال در میزان خدمت‌دهی توزیع‌کننده u.

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

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

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

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



$$Min\ z_1 = \sum_e \sum_a \sum_c Fa_a^{ce} y_a^{ec} + \sum_r Fr_r zr_r + \sum_u Fu_u zu_u + \sum_d x_d Fd_d + \sum_a \sum_e \sum_c \sum_b ap_a^{ec} bq_{ab}^e + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab}\beta\, bq_{ab}^e + \sum_b \sum_r (\theta_{br}\beta + bp_b)\, rq_{br} + \sum_b \sum_u (\theta_{bu}\beta + bp_b)\, uq_{bu} + \sum_r \sum_l (\theta_{rl}\beta + rp_r)\, yr_{rl} + \sum_u \sum_l (\theta_{ul}\beta + up_u) yu_{ul} + \sum_r \sum_u (\theta_{ru}\beta + rp_r)\, tr_{ru} + \sum_l \sum_d \theta_{ld}\beta\, lq_{ld} + \sum_b \sum_d (\theta_{bd}\beta)\, xq_{bd} + \sum_d \sum_a (\theta_{da}\beta + dp_d) dq_{da}. \quad (۱)$$

$$Min\ z_2^1 = \sum_a \sum_b \sum_e bq_{ab}^e ef_e + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab}\mu\, bq_{ab}^e + \sum_b \sum_r \theta_{br}\mu\, rq_{br} + \sum_b \sum_u \theta_{bu}\mu\, uq_{bu} + \sum_r \sum_l \theta_{rl}\mu yr_{rl} + \sum_u \sum_l \theta_{ul}\mu yu_{ul} + \sum_l \sum_d \theta_{ld}\mu\, lq_{ld} + \sum_b \sum_d \theta_{bd}\mu\, xq_{bd} + \sum_d \sum_a \theta_{da}\mu\, dq_{da} + \sum_r \sum_u \theta_{ru}\mu tr_{ru}. \quad (۲)$$

$$Min\ z_2^2 = \sum_a \sum_b \sum_e pw_e bq_{ab}^e. \quad (۳)$$

$$Max\ z_3^1 = \rho. \quad (۴)$$

$$Max\ z_3^2 = \sum_a \sum_e \sum_c aj_a^{ec} y_a^{ec} + \sum_r rj_r zr_r + \sum_u uj_u zu_u + \sum_d dj_d x_d - \sum_u pu_u lc_u uj_u zu_u. \quad (۵)$$

$$Min\ z_3^3 = \sum_a \sum_e \sum_c al_a^{ec} y_a^{ec}. \quad (۶)$$

$$\rho = \sum_e \sum_a \sum_c x_a^{ce}. \quad (۷)$$

$$\sum_r yr_{rl} + \sum_u yu_{ul} = d_l \quad for\ all\ l. \quad (۸)$$

$$\sum_d lq_{ld} = \left(\sum_r yr_{rl} + \sum_u yu_{ul}\right) * r_l \quad for\ all\ l. \quad (۹)$$

$$\sum_b rq_{br} = \sum_l yr_{rl} + \sum_u tr_{ru} \quad for\ all\ r. \quad (۱۰)$$

$$\sum_b uq_{bu} + \sum_r tr_{ru} = \sum_l yu_{ul} \quad for\ all\ u. \quad (۱۱)$$

$$f_b \sum_a \sum_e bq_{ab}^e = \sum_d xq_{bd} \quad for\ all\ b. \quad (۱۲)$$

$$1 - f_b) \sum_a \sum_e bq_{ab}^e = \sum_r rq_{br} + \sum_u uq_{bu}\ for\ all\ b. \quad (۱۳)$$

$$\sum_d dq_{da} + aq_a = \sum_b \sum_e bq_{ab}^e \quad for\ all\ a. \quad (۱۴)$$

$$\sum_a dq_{da} = \sum_b xq_{bd} + \sum_l lq_{ld} \quad for\ all\ d. \quad (۱۵)$$

$$\sum_b bq_{ab}^e \le \sum_c Ca_a^c y_a^{ec} \quad for\ all\ a,e. \quad (۱۶)$$

$$\sum_b rq_{br} \le Cr_r zr_r \quad for\ all\ r. \quad (۱۷)$$

$$\sum_b uq_{bu} \le Cu_u zu_u \quad for\ all\ u. \quad (۱۸)$$

$$\sum_r tr_{ru} \le Cu_u zu_u lc_u \quad for\ all\ u. \quad (۱۹)$$

$$\sum_l yu_{ul} \le Cu_u Zu_u \quad for\ all\ u. \quad (۲۰)$$

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

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$\sum_{a} dq_{da} \le Cd_d x_d \quad for\ all\ d. \tag{۲۱}$$

$$\sum_{a}\sum_{e} bq_{ab}^{e} \le Cb_b \quad for\ all\ b. \tag{۲۲}$$

$$\sum_{e}\sum_{c} y_a^{ec} = 1 \quad for\ all\ \ a. \tag{۲۳}$$

$$\sum_{r} zr_r \ge 1. \tag{۲۴}$$

$$y_a^{ec}, zr_r, zu_u, x_d \epsilon \{0,1\}. \tag{۲۵}$$

$$aq_a, bq_{ab}^{e}, rq_{br}, uq_{bu}, yr_{rl}, yu_{ul}, tr_{ru}, dq_{da}, xq_{bd}, lq_{ld} \ge 0. \tag{۲۶}$$

در تابع هدف اول، هزینه‌های ثابت احداث تسهیلات در سه جمله اول آورده شده است و باقی جملات مربوط به هزینه‌های تولید و حمل‌ونقل در شبکه زنجیره‌تامین 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 حمل‌ونقل کمینه می‌گردد. در تابع هدف سوم کمینه میزان مصرف آب در کارخانه‌های فولاد موردتوجه قرار گرفته است. در تابع هدف چهارم به‌منظور کاهش ریسک شبکه و نیز عدالت در ایجاد مشاغل، تعداد کارخانه‌های فولاد بهینه می‌گردد. در تابع هدف پنجم میزان مشاغل ایجادشده بیشینه و مقدار مشاغل ازدست‌رفته به خاطر ایجاد اختلال در شبکه کمینه می‌شود. درنهایت 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 قابل‌اطمینان و نامطمئن، باید میزان تقاضای مناطق مصرف را ارضا کند. **محدودیت (۹)** نشان‌دهنده این است که مقدار قراضه جمع‌آوری‌شده از نقاط مصرف با حاصل‌ضرب مقدار فولاد واردشده 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 قابل‌اطمینان 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- مدل‌سازی استوار

با توجه به وجود ریسک تغییر میزان تقاضا و میزان نرخ برگشت در شبکه و به‌منظور مقابله با این ریسک از روش مدل‌سازی استوار ارایه‌شده توسط مولوی و همکاران [54] استفاده شده است؛ زیرا این روش میزان انحرافات و هم‌چنین میزان تقاضای مرتفع‌نشده 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.

$$MinC^T x + d^T y. \tag{۲۷}$$

$$Ax = b. \tag{۲۸}$$

$$Bx + Cy = e. \tag{۲۹}$$

$$x, y \ge 0. \tag{۳۰}$$

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 به‌صورت $S = \{1,2,\dots s\}$ می‌باشد. احتمال وقوع هر سناریو با p_s نشان داده می‌شود. مجموعه $\{y_1, y_2, \dots y_s\}$ به‌عنوان متغیرهای کنترلی و مجموعه $\{£_1, £_2, \dots £_s\}$ میزان نشدنی بودن در محدودیت‌هایی که احتمال نشدنی بودن در بعضی سناریوها دارند را نشان می‌دهد. با توجه به موارد ذکرشده مدل به‌صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$min\ \sigma\ y_1, y_2, \dots y_s) + \Omega\ \rho\ £_1, £_2, \dots £_s). \tag{۳۱}$$

$$Ax = b. \tag{۳۲}$$

$$B_S x + C_S y_S + £_S = e_S\ s\ \epsilon S. \tag{۳۳}$$

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$x , y_S, £_S \geq 0 \; s \; \epsilon S. \qquad (۳۴)$$

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

$$\sigma\ 0) = \sum_{s\epsilon S} p_s z_s + \alpha \sum_{s\epsilon S} p_s\ (z_s - \sum_{s\epsilon s} p_s z_s)^2. \qquad (۳۵)$$

α وزن در نظر گرفته‌شده 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 به‌صورت **رابطه (۳۶)** می‌باشد:

$$\sigma\ 0) = \sum_{s\epsilon S} p_s z_s + \alpha \sum_{s\epsilon S} p_s \left| z_s - \sum_{s\epsilon s} p_s z_s \right|. \qquad (۳۶)$$

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

$$\sigma\ 0) = \sum_{s\epsilon S} z_s + \alpha \sum_{s\epsilon S} p_s \left[\left(z_s - \sum_{s\epsilon S} p_s z_s \right) + 2\lambda_s \right]. \qquad (۳۷)$$

$$z_s - \sum_{s\epsilon S} p_s z_s + \lambda_s \geq 0 \quad for\ all\ s\epsilon S. \qquad (۳۸)$$

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

$$z_s - \sum_{s\epsilon S} p_s z_s + \lambda_s \geq 0 \quad for\ all\ s\epsilon S. \qquad (۳۹)$$

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

s: مجموعه محدود سناریوها.

p_s: احتمال رخ دادن سناریوی s.

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

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

λ_{3s}: ضریب مورداستفاده 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$£_S$ 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.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$
\begin{aligned}
Min\ z_1 = {} & \sum_e \sum_a \sum_c Fa_a^{ce} y_a^{ec} + \sum_r Fr_r zr_r + \sum_u Fu_u zu_u + \sum_d x_d Fd_d \\
& + \sum_s p_s \Big(\sum_a \sum_e \sum_c \sum_b ap_a^{ec}\, bq_{ab}^{es} + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab}\beta\, bq_{ab}^{es} \\
& + \sum_b \sum_r (\theta_{br}\beta + bp_b) rq_{br}^s + \sum_b \sum_u \theta_{bu}\beta + bp_b)\, uq_{bu}^s \\
& + \sum_r \sum_l \theta_{rl}\beta + rp_r)\, yr_{rl}^s + \sum_u \sum_l \theta_{ul}\beta + up_u) yu_{ul}^s \\
& + \sum_r \sum_u \theta_{ru}\beta + rp_r)\, tr_{ru}^s + \sum_l \sum_d \theta_{ld}\beta\, lq_{ld}^s + \sum_b \sum_d \theta_{bd}\beta)\ xq_{bd}^s \\
& + \sum_d \sum_a (\theta_{da}\beta + dp_d) dq_{da}^s \Big) \\
& + \alpha_1 \sum_s pb_s \Big[\Big(\sum_a \sum_e \sum_c \sum_b ap_a^{ec}\, bq_{ab}^{es} + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab}\beta\, bq_{ab}^{es} \\
& + \sum_b \sum_r (\theta_{br}\beta + bp_b) rq_{br}^s + \sum_b \sum_u \theta_{bu}\beta + bp_b)\, uq_{bu}^s \\
& + \sum_r \sum_l \theta_{rl}\beta + rp_r)\, yr_{rl}^s + \sum_u \sum_l \theta_{ul}\beta + up_u) yu_{ul}^s \\
& + \sum_r \sum_u \theta_{ru}\beta + rp_r)\, tr_{ru}^s + \sum_l \sum_d \theta_{ld}\beta\, lq_{ld}^s + \sum_b \sum_d \theta_{bd}\beta)\ xq_{bd}^s \\
& + \sum_d \sum_a (\theta_{da}\beta + dp_d) dq_{da}^s \Big) \\
& - \sum_{s'} pb_{s'} \Big(\sum_a \sum_e \sum_c \sum_b ap_a^{ec}\, bq_{ab}^{es} + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab}\beta\, bq_{ab}^{es} \\
& + \sum_b \sum_r (\theta_{br}\beta + bp_b) rq_{br}^s + \sum_b \sum_u \theta_{bu}\beta + bp_b)\, uq_{bu}^s \\
& + \sum_r \sum_l \theta_{rl}\beta + rp_r)\, yr_{rl}^s + \sum_u \sum_l \theta_{ul}\beta + up_u) yu_{ul}^s \\
& + \sum_r \sum_u \theta_{ru}\beta + rp_r)\, tr_{ru}^s + \sum_l \sum_d \theta_{ld}\beta\, lq_{ld}^s + \sum_b \sum_d \theta_{bd}\beta)\ xq_{bd}^s \\
& + \sum_d \sum_a (\theta_{da}\beta + dp_d) dq_{da}^s \Big) + 2\lambda_{1s} \Big] \\
& + \Omega_1 \sum_s \sum_l p_s \pounds_{1sl} + \Omega_2 \sum_s \sum_l p_s \pounds_{2sl.}
\end{aligned}
\tag{۴۰}
$$

$$
\begin{aligned}
Min\ z_2^1 = {} & \textstyle\sum_s pb_s (\sum_a \sum_b \sum_e bq_{ab}^{es} ef_e + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab}\mu\, bq_{ab}^{es} + \sum_b \sum_r \theta_{br}\mu\, rq_{br}^s + \sum_b \sum_u \theta_{bu}\mu\, uq_{bu}^s + \\
& \textstyle\sum_r \sum_l \theta_{rl}\mu yr_{rl}^s + \sum_u \sum_l \theta_{ul}\mu yu_{ul}^s + \sum_l \sum_d \theta_{ld}\mu\, lq_{ld}^s + \sum_b \sum_d \theta_{bd}\mu\, xq_{bd}^s + \sum_d \sum_a \theta_{da}\mu\, dq_{da}^s + \\
& \textstyle\sum_r \sum_u \theta_{ru}\mu tr_{ru}^s) + \alpha_2 \sum_s pb_s \big[\sum_a \sum_b \sum_e bq_{ab}^{es} ef_e + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab}\mu\, bq_{ab}^{es} + \sum_b \sum_r \theta_{br}\mu\, rq_{br}^s + \\
& \textstyle\sum_b \sum_u \theta_{bu}\mu\, uq_{bu}^s + \sum_r \sum_l \theta_{rl}\mu yr_{rl}^s + \sum_u \sum_l \theta_{ul}\mu yu_{ul}^s + \sum_l \sum_d \theta_{ld}\mu\, lq_{ld}^s + \sum_b \sum_d \theta_{bd}\mu\, xq_{bd}^s + \\
& \textstyle\sum_d \sum_a \theta_{da}\mu\, dq_{da}^s + \sum_r \sum_u \theta_{ru}\mu tr_{ru}^s) - \sum_{s'} pb_{s'} \sum_a \sum_b \sum_e bq_{ab}^{es} ef_e + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab}\mu\, bq_{ab}^{es} + \\
& \textstyle\sum_b \sum_r \theta_{br}\mu\, rq_{br}^s + \sum_b \sum_u \theta_{bu}\mu\, uq_{bu}^s + \sum_r \sum_l \theta_{rl}\mu yr_{rl}^s + \sum_u \sum_l \theta_{ul}\mu yu_{ul}^s + \sum_l \sum_d \theta_{ld}\mu\, lq_{ld}^s + \\
& \textstyle\sum_b \sum_d \theta_{bd}\mu\, xq_{bd}^s + \sum_d \sum_a \theta_{da}\mu\, dq_{da}^s + \sum_r \sum_u \theta_{ru}\mu tr_{ru}^s) + 2\lambda_{2s} \big].
\end{aligned}
\tag{۴۱}
$$

$$
\begin{aligned}
Min\ z_2^2 = {} & \sum_s pb_s \Big(\sum_a \sum_b \sum_e pw_e bq_{ab}^{es} + \alpha_3 \sum_s pb_s \Big[\Big(\sum_a \sum_b \sum_e pw_e bq_{ab}^{es} - \\
& \sum_s pb_s \Big(\sum_a \sum_b \sum_e pw_e bq_{ab}^{es} \Big) + 2\lambda_{3s} \Big].
\end{aligned}
\tag{۴۲}
$$

$$
Max\ z_3^1 = \rho. \tag{۴۳}
$$

$$
Max\ z_3^2 = \sum_a \sum_e \sum_c aj_a^{ec} y_a^{ec} + \sum_r rj_r zr_r + \sum_u uj_u zu_u + \sum_d dj_d x_d - \sum_u pu_u lc_u uj_u zu_u. \tag{۴۴}
$$

$$
Min\ z_3^3 = \sum_a \sum_e \sum_c al_a^{ec} y_a^{ec}. \tag{۴۵}
$$

$$
\rho = \sum_e \sum_a \sum_c x_a^{ce}. \tag{۴۶}
$$

$$
\sum_r yr_{rl}^s + \sum_u yu_{uls} + \pounds_{1sl} = d_{ls} \quad for\ all\ s, l. \tag{۴۷}
$$

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$\sum_{d} lq_{ld}^{s} + £_{2sl} = \left(\sum_{r} yr_{rl}^{s} + \sum_{u} yu_{ul}^{s}\right) * r_{ls} \quad for\ all\ l,s. \tag{۴۸}$$

$$\sum_{b} rq_{br}^{s} = \sum_{l} yr_{rl}^{s} + \sum_{u} tr_{ru}^{s} \quad for\ all\ r,s. \tag{۴۹}$$

$$\sum_{b} uq_{bu}^{s} + \sum_{r} tr_{ru}^{s} = \sum_{l} yu_{ul}^{s} \quad for\ all\ u,s. \tag{۵۰}$$

$$1 - f_b) \sum_{a}\sum_{e} bq_{ab}^{es} = \sum_{r} rq_{br}^{s} + \sum_{u} uq_{bu}^{s} \quad for\ all\ b,s. \tag{۵۱}$$

$$f_b \sum_{a}\sum_{e} bq_{ab}^{es} = \sum_{d} xq_{bd}^{s} \quad for\ all\ b,s. \tag{۵۲}$$

$$\sum_{d} dq_{da}^{s} + aq_{a}^{s} = \sum_{b}\sum_{e} bq_{ab}^{es} \quad for\ all\ a,s. \tag{۵۳}$$

$$\sum_{a} dq_{da}^{s} = \sum_{b} xq_{bd}^{s} + \sum_{l} lq_{ld}^{s} \quad for\ all\ d,s. \tag{۵۴}$$

$$\sum_{b} bq_{ab}^{es} \le \sum_{c} Ca_{a}^{c} y_{a}^{ec} \quad for\ all\ a,e,s. \tag{۵۵}$$

$$\sum_{b} rq_{br}^{s} \le Cr_{r} zr_{r} \quad for\ all\ r,s. \tag{۵۶}$$

$$\sum_{b} uq_{bu}^{s} \le Cu_{u} Zu_{u} \quad for\ all\ u,s. \tag{۵۷}$$

$$\sum_{r} tr_{ru}^{s} \le Cu_{u} Zu_{u} lc_{u} \quad for\ all\ u,s. \tag{۵۸}$$

$$\sum_{l} yu_{ul}^{s} \le Cu_{u} Zu_{u} \quad for\ all\ u,s. \tag{۵۹}$$

$$\sum_{a} dq_{da}^{s} \le Cd_{d} x_{d} \quad for\ all\ d,s. \tag{۶۰}$$

$$\sum_{a}\sum_{e} bq_{ab}^{es} \le Cb_{b} \quad for\ all\ b,s. \tag{۶۱}$$

$$\sum_{e}\sum_{c} x_{a}^{ce} = 1 \quad for\ all\ a. \tag{۶۲}$$

$$\sum_{r} zr_{r} \ge 1. \tag{۶۳}$$

$$y_{a}^{ec}, zr_{r}, zu_{u}, x_{d} \epsilon \{0,1\}. \tag{۶۴}$$

$$bq_{ab}^{es}, rq_{br}^{s}, lq_{ld}^{s}, uq_{bu}^{s}, yr_{rl}^{s}, uq_{bu}^{s}, tr_{ru}^{s}, yu_{ul}^{s}, dq_{da}^{s}, xq_{bd}^{s},\ \lambda_{1s}, \lambda_{2s}, \lambda_{3s} \ge 0. \tag{۶۵}$$

با توجه به توضیحات ارایه‌شده در خصوص روش مدل‌سازی استوار به‌کاررفته و نیز با توجه به قضیه پیشنهادی یو و لی [55] که با **رابطه‌های (۳۷)** و **(۳۸)** در روش استوار توضیح داده شد، **محدودیت خطی‌سازی (۶۶)** تا **محدودیت خطی‌سازی (۶۸)** نیز باید به مدل ریاضی اضافه شوند.

$$\begin{aligned}
&\Big(\sum_{a}\sum_{e}\sum_{c}\sum_{b} ap_{a}^{ec}\, bq_{ab}^{es} + \sum_{a}\sum_{b}\sum_{e} \theta_{ab}\beta\, bq_{ab}^{es} + \sum_{b}\sum_{r}(\theta_{br}\beta + bp_{b}) rq_{br}^{s} \\
&+ \sum_{b}\sum_{u} \theta_{bu}\beta + bp_{b})\, uq_{bu}^{s} + \sum_{r}\sum_{l} \theta_{rl}\beta + rp_{r})\, yr_{rl}^{s} \\
&+ \sum_{u}\sum_{l} \theta_{ul}\beta + up_{u}) yu_{ul}^{s} + \sum_{r}\sum_{u} \theta_{ru}\beta + rp_{r})\, tr_{ru}^{s} + \sum_{l}\sum_{d} \theta_{ld}\beta\, lq_{ld}^{s} \\
&+ \sum_{b}\sum_{d} \theta_{bd}\beta)\ xq_{bd}^{s} + \sum_{d}\sum_{a}(\theta_{da}\beta + dp_{d}) dq_{da}^{s}) \\
&- \sum_{s} pb_{s}\Big(\sum_{a}\sum_{e}\sum_{c}\sum_{b} ap_{a}^{ec}\, bq_{ab}^{es} + \sum_{a}\sum_{b}\sum_{e} \theta_{ab}\beta\, bq_{ab}^{es} \\
&+ \sum_{b}\sum_{r}(\theta_{br}\beta + bp_{b}) rq_{br}^{s} + \sum_{b}\sum_{u} \theta_{bu}\beta + bp_{b})\, uq_{bu}^{s} \\
&+ \sum_{r}\sum_{l} \theta_{rl}\beta + rp_{r})\, yr_{rl}^{s} + \sum_{u}\sum_{l} \theta_{ul}\beta + up_{u}) yu_{ul}^{s} \\
&+ \sum_{r}\sum_{u} \theta_{ru}\beta + rp_{r})\, tr_{ru}^{s} + \sum_{l}\sum_{d} \theta_{ld}\beta\, lq_{ld}^{s} + \sum_{b}\sum_{d} \theta_{bd}\beta)\ xq_{bd}^{s} \\
&+ \sum_{d}\sum_{a}(\theta_{da}\beta + dp_{d}) dq_{da}^{s}) + \lambda_{1s} \ge 0 \quad for\ all\ s.
\end{aligned} \tag{۶۶}$$

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$\sum_a \sum_b \sum_e bq_{ab}^{es} ef_e + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab}\mu\, bq_{ab}^{es} + \sum_b \sum_r \theta_{br}\mu\, rq_{br}^{s} + \sum_b \sum_u \theta_{bu}\mu\, uq_{bu}^{s}$$
$$+ \sum_r \sum_l \theta_{rl}\mu yr_{rl}^{s} + \sum_u \sum_l \theta_{ul}\mu yu_{ul}^{s} + \sum_l \sum_d \theta_{ld}\mu\, lq_{ld}^{s}$$
$$+ \sum_b \sum_d \theta_{bd}\mu\, xq_{bd}^{s} + \sum_d \sum_a \theta_{da}\mu\, dq_{da}^{s} + \sum_r \sum_u \theta_{ru}\mu tr_{ru}^{s})$$
$$- \sum_s pb_s \Big(\sum_a \sum_b \sum_e bq_{ab}^{es} ef_e + \sum_a \sum_b \sum_e \theta_{ab}\mu\, bq_{ab}^{es}$$
$$+ \sum_b \sum_r \theta_{br}\mu\, rq_{br}^{s} + \sum_b \sum_u \theta_{bu}\mu\, uq_{bu}^{s}$$
$$+ \sum_r \sum_l \theta_{rl}\mu yr_{rl}^{s} + \sum_u \sum_l \theta_{ul}\mu yu_{ul}^{s} + \sum_l \sum_d \theta_{ld}\mu\, lq_{ld}^{s}$$
$$+ \sum_b \sum_d \theta_{bd}\mu\, xq_{bd}^{s} + \sum_d \sum_a \theta_{da}\mu\, dq_{da}^{s} + \sum_r \sum_u \theta_{ru}\mu tr_{ru}^{s}) + \lambda_{2s} \geq 0 \quad (۶۷)$$
$$for\ all\ s.$$

$$\Big(\sum_a \sum_b \sum_e pw_e bq_{ab}^{es}\Big) - \sum_s pb_s \Big(\sum_a \sum_b \sum_e pw_e bq_{ab}^{es}\Big) + \lambda_{3s} \geq 0 \quad for\ all\ s. \quad (۶۸)$$

۴-۳- روش حل

این روش سلسله‌مراتبی به‌عنوان یک روش تعاملی توسط نویسندگان مختلف مانند پیشوایی و ترابی [56] به‌کار گرفته شده است که تلفیقی از روش‌های جیمنز و همکاران [57]، پارا و همکاران [58] و روش *TH* ترابی و حسینی [59] بوده و دارای این مزیت است که علاوه بر حفظ کردن حالت خطی مساله تعداد توابع هدف و نیز محدودیت‌های مساله را افزایش نمی‌دهد. ما در این‌جا به‌منظور کاهش محدودیت‌های روش ارایه‌شده، تغییراتی را در آن روش در نظر گرفتیم و با تغییر در تابع هدف ادغامی و در نظر گرفتن فرضیات دیگر برای مساله ارایه‌شده، آن را بومی‌سازی نمودیم. در ادامه مراحل این روش ارایه می‌گردد:

گام ۱- با توجه به زیاد بودن تعداد توابع هدف و دشوار بودن تصمیم‌گیری در مورد اهداف و نیز با توجه به سه ناحیه ریسک اقتصادی، اجتماعی و محیطی، با استفاده از روش پیشوایی و همکاران [37] نرمال‌سازی و با در نظر گرفتن وزن‌هایی اهداف موردنظر باهم ترکیب می‌شود.

$$Min\ z_1, \quad (۶۹)$$

$$Min\ z_2 = w_2^1 \frac{maxz_2^1 - z_2^1}{maxz_2^1 - minz_2^1} + w_2^2 \frac{maxz_2^2 - z_2^2}{maxz_2^2 - minz_2^2}, \quad (۷۰)$$

$$Max\ z_3 = w_3^1 \frac{z_3^1 - maxz_3^1}{maxz_3^1 - minz_3^1} + w_3^2 \frac{z_3^2 - maxz_3^1}{maxz_3^1 - minz_3^1} + w_3^3 \frac{maxz_3^3 - z_3^3}{maxz_3^3 - minz_3^3}. \quad (۷۱)$$

گام ۲- تعیین جواب‌های ایده‌آل (z_h^p) و ضدایده‌آل (z_h^n) برای هر یک از توابع هدف در سطح تعیین‌شده که برای به‌دست آوردن هر یک از جواب‌های ایده‌آل ($z_{i\sigma}^p, x_{i\sigma}^p$) به ازای هر یک از توابع هدف مدل موردنظر بایستی حل شود. به این معنی که ابتدا هریک از اهداف به‌صورت جداگانه حل می‌شود و جواب‌های ایده‌آل به‌دست می‌آید و بدترین مقدار تابع هدف‌های دیگر، به‌عنوان مقدار ضدایده‌آل برای آن تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. برای مثال در تابع هدف اول مقدار ضدایده‌آل به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$x_{1\sigma}^n = max\Big(Z_1(\ x_{2\sigma}^p), Z_1(\ x_{3\sigma}^p)\Big). \quad (۷۲)$$

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

در توابع هدف بیشینه‌سازی:

$$\mu_h(X) = \begin{cases} 1 & if\ \ z_h > z_h^p \\ \dfrac{(z_h - z_h^n)}{(z_h^p - z_h^n)} & if\ \ z_h^p \leq z_h \leq z_h^n \\ 0 & if\ \ z_h < z_h^n \end{cases}. \quad (۷۳)$$

در توابع هدف کمینه‌سازی:

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$\mu_h(X)=\begin{cases}1 & if\ \ z_h>z_h^p\\ \dfrac{(z_h^n-z_h)}{(z_h^n-z_h^p)} & if\ \ z_h^p\le z_h\le z_h^n\\ 0 & if\ \ z_h<z_h^n\end{cases}\Bigg\}. \qquad (۷۴)$$

گام ٤ – تبدیل مدل قطعی چندهدفه به مدل تک‌هدفه که ترابی و هسینی [59] **مدل (۷۵)** را برای تبدیل مدل چندهدفه به تک‌هدفه پیشنهاد داده‌اند:

$$\begin{aligned} &Max\ v\sigma_0+\ 1-v)\sum_h w_h\mu_h\ x),\\ &s.t.\\ &\quad \mu_h\ x)\ge\sigma_0\quad for\ all\ h, \qquad (۷۵)\\ &x\in F_x\ ,\ \sigma_0\in\{0,1\}. \end{aligned}$$

σ_0 بیانگر حداقل سطح ارضای تابع هدف و v نیز به‌عنوان ضریب سازش بین اهداف در نظر گرفته می‌شود. در مدل ارایه‌شده در **گام ٤** 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 موردنظر به شرایط واقعی، مقدار v به‌صورت عدد فازی مثلثی در نظر گرفته شده است که در نهایت پس از تبدیل اعداد فازی به قطعی، مدل ادغامی توسعه داده‌شده، در **رابطه (۷۶)** آورده شده است.

$$\begin{aligned} &Max\ \left(\frac{v_k^p+4v_k^m+v_k^o}{6}\right)\sum_k w_k\sigma_{0k}+\left(1-\frac{v_k^p+4v_k^m+v_k^o}{6}\right)\sum_k w_k\mu_k\ x),\\ &s.t.\\ &\quad \mu_k\ x)\ge\sigma_{0k}\quad for\ all\ k, \qquad (۷۶)\\ &x\in F_x\ ,\sigma_{0k}\in\{0,1\}. \end{aligned}$$

گام ۵– تعیین ضریب سازشی و ضرایب اهداف اولیه توسط تصمیم‌گیرنده و حل مدل تک‌هدفه (در صورت عدم رضایت تصمیم‌گیرنده تغیر مقادیر σ و v و حل مجدد مدل تک‌هدفه.)

۵-۳- مطالعه موردی

آهن پرمصرف‌ترین فلزی است که بشر در اعصار مختلف به‌کار برده است. امروزه تخمین زده شده است که صنعت تولید فولاد حدود ۴% تا ۵% کل گازهای گلخانه‌ای ایجادشده توسط بشر را تولید می‌کند. تقریبا میانگین تولید گاز $CO2$ برای هر تن فولاد حدود ۱/۹ تن می‌باشد که با توجه به تولید بیش از ۱/۳ ×۱۰^{۹} تن فولاد، به میزان بیش از ۲ ×۱۰^{۹} تن گاز $CO2$ تولید می‌شود که بیش‌تر این میزان تولید گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از تولید فولاد خام می‌باشد [60].

امروزه فولاد خام معمولا 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 حمل‌ونقل با استفاده از داده‌های گزارش مکینون و پیچیک [63] در مدل‌سازی وارد شده است (**جدول ۵**).

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

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

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 دی‌اکسیدکربن (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 دی‌اکسیدکربن به ازای روش‌های مختلف حمل [63].

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

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

جدول ۶- محدوده سایر داده‌های تولیدشده [64].

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

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

۴- یافته‌ها و تجزیه‌وتحلیل نتایج

همان‌طور که در **گام ۱** روش حل اشاره شد، ابتدا با در نظر گرفتن وزن ۰/۶ برای میزان دی‌اکسیدکربن 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.

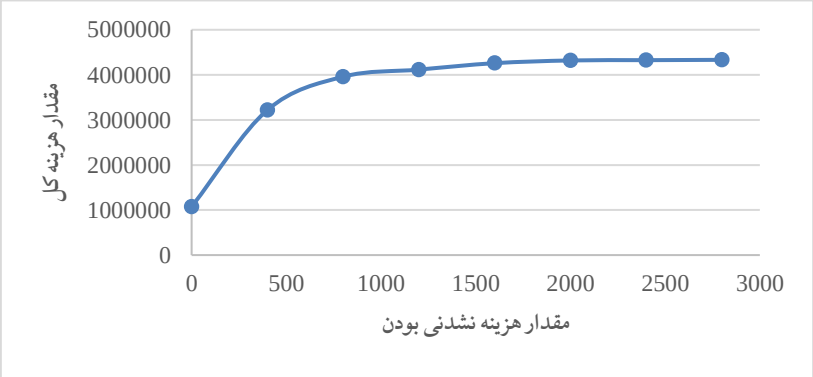
Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

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

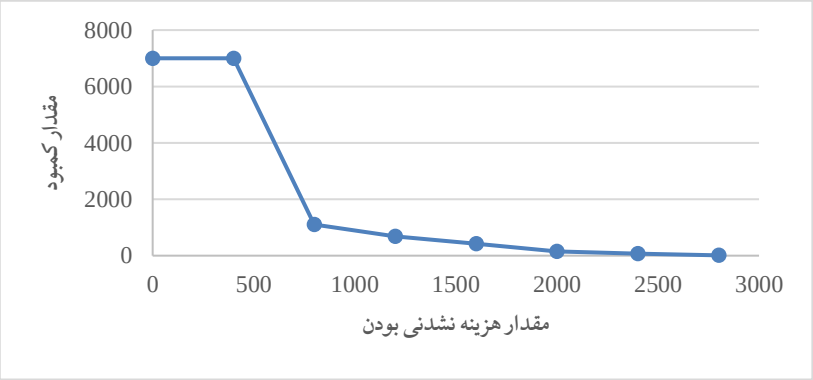
Table 7- The mathematical model proposed solutions for different values of membership functions.

				میزان مطلوبیت هزینه	میزان مطلوبیت ریسک‌های آلودگی محیطی	میزان مطلوبیت ریسک‌های مسئولیت اجتماعی	هزینه زنجیره
			b0				
(.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
	0.7	0.2	0.7	0.75	0.27	0.7	4575756.148
(0,.1,.2)	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 infeseable cost.



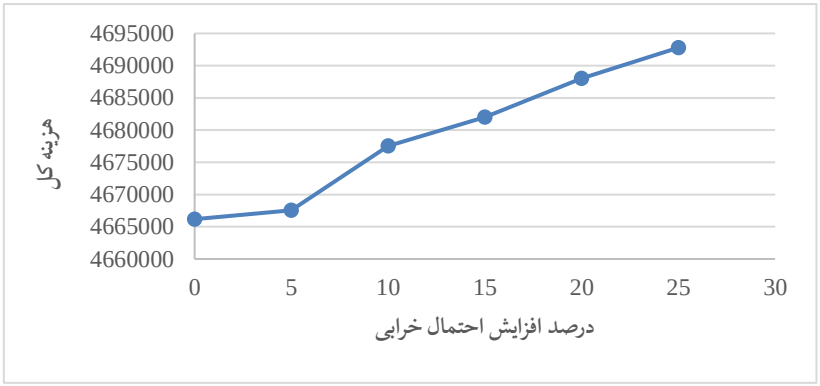
شکل۳- رابطه بین مقدار نشدنی بودن و هزینه نشدنی بودن.

Figure 3- The relationship between infesiable quantities and infeseable cost.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

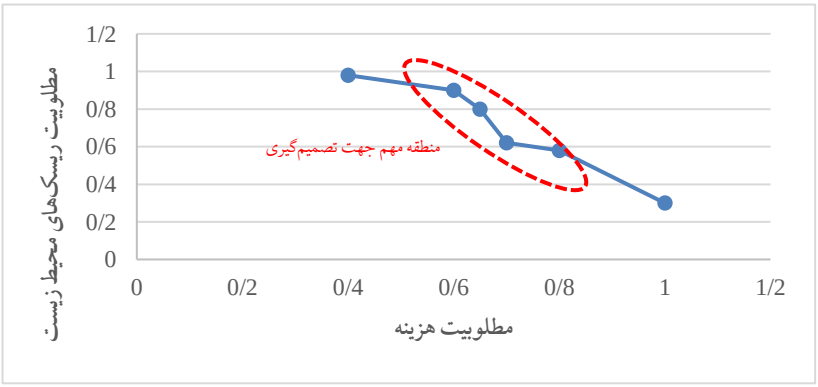
هم‌چنین با در نظر گرفتن میزان حداقل سطح مطلوبیت ۰/۶ برای دو تابع ریسک‌های محیطی و اجتماعی، رابطه افزایش احتمال خرابی با هزینه کل شبکه زنجیره‌تامین مورد بررسی قرار گرفته است. **شکل ۴** این موضوع را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل پیداست مدل موردنظر با شرایط واقعی کاملا تطابق دارد، یعنی همان‌طور که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



شکل ۴- رابطه هزینه کل با احتمال خرابی.

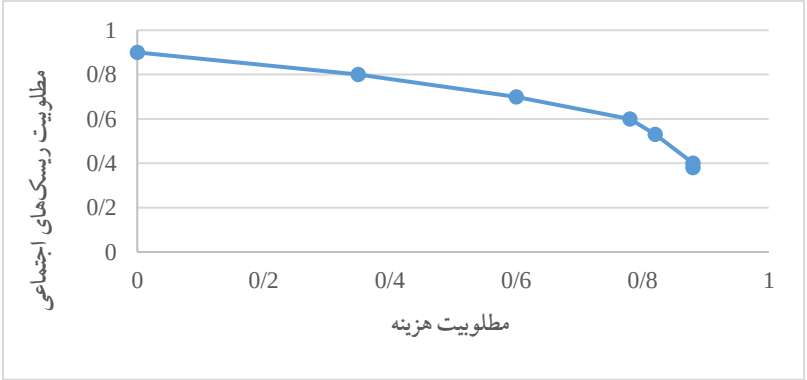
Figure 4- The relationship between total cost and probability of disruption.

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 کاراتر 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 کاراتر 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.

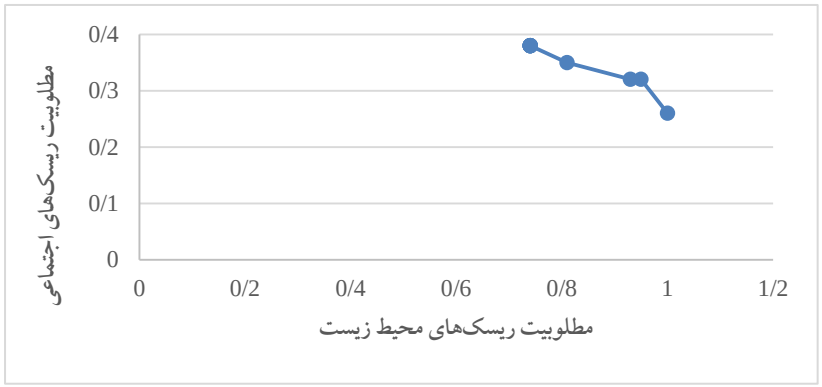


شکل ۶- رابطه بین مطلوبیت هزینه و مطلوبیت ریسک‌های اجتماعی.

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

Archive of SID.ir

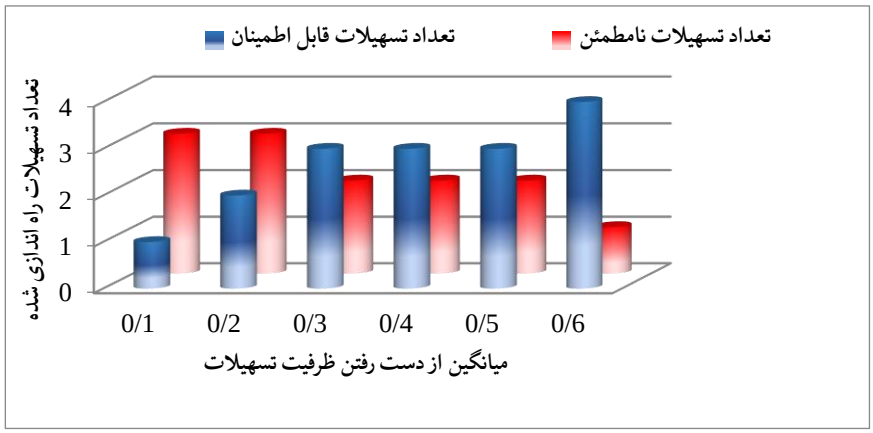
Archive of SID.ir



شکل ۷- رابطه بین مطلوبیت ریسک‌های مرتبط با محیط‌زیست و اجتماع.

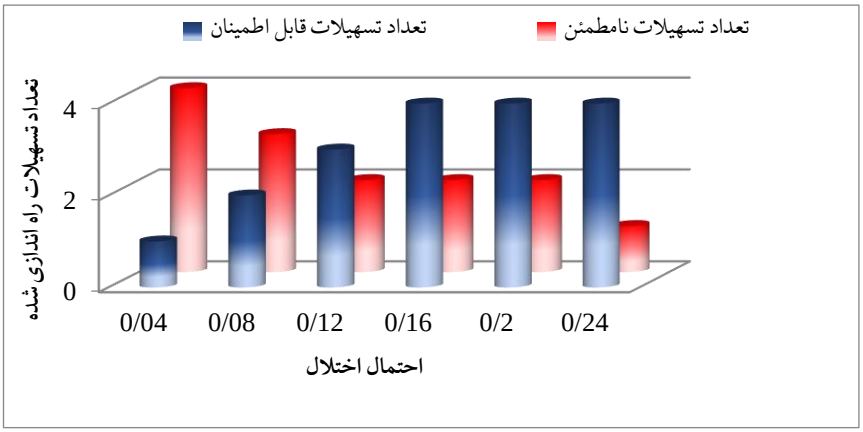
Figure 7- The relationship between environmental and social risks utility.

به‌منظور بررسی تاثیر میزان اختلال و نیز میزان ظرفیت ازدست‌رفته تسهیلات هنگام اختلال بر شبکه موردمطالعه، با در نظر گرفتن احتمال اختلال به‌صورت میانگین ۱۰%، رابطه تعداد تسهیلات قابل‌اطمینان و نامطمئن با میزان ظرفیت ازدست‌رفته نشان داد که با افزایش میزان ظرفیت ازدست‌رفته، شبکه میل به انتخاب تسهیلات قابل‌اطمینان 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 قابل‌اطمینان 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.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۵- جمع‌بندی و جهت‌گیری آتی

در این مطالعه با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته مدلی چندهدفه استوار برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین روبه جلو و عقب ارایه 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 تجزیه‌وتحلیل کارایی مدل و روش حل ارایه‌شده 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 کاراتری 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

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

[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://d1wqtxts1xzle7.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] Pishvaee, M. S., & Razmi, J. (2012). Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied mathematical modelling*, *36*(8), 3433-3446.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

[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] Pishvaee, 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., Pishvaee, 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., & Hajiaghaei-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., & Pishvaee, 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., Haughton, 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] Pishvaee, 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., & Rodrı, 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., & Urıa, 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 reducted 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.

Archive of SID.ir