Designing a Resilient Supply Chain Against Crisis-Induced Disruptions (Such as War) in the Oil and Gas Industry

Mozhde Rabbani[1] - Sina.peyravi[2]

Abstract

Given the critical and strategic nature of the oil and gas industry, designing resilient supply chains against disruptions such as war, sanctions, and geopolitical crises is an essential task. This study develops a multi-objective optimization model aimed at designing a resilient supply chain that simultaneously minimizes total cost and maximizes resilience across multiple disruption scenarios. The model was implemented using the NSGA-II algorithm and tested under three disruption scenarios with varying severity levels. Results indicate that the selected optimal solution achieved a total cost of 318,420 units and an overall resilience score of 14.12. Moreover, all four distribution facilities were selected with activation levels exceeding 85%, and over 95% of supplier-to-facility links were utilized in the final configuration. These findings confirm the model's effectiveness in providing robust and balanced solutions for crisis-oriented supply chain design in high-risk industries.

Keywords
Resilient supply chain, geopolitical disruption, oil and gas industry, NSGA-II algorithm, multi-objective optimization, scenario-based analysis, war.

1. Department of Industrial Management, Ya. C., Islamic Azad University, Yazd, Iran. moz.rabbani@iau.ac.ir moz.rabbani@iau.ac.ir
2. PhD Student, Industrial Management - Production and Operations, Faculty of Humanities, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran. Sina.peyravi@iau.ac.ir

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]

مقاله علمی ـ پژوهشی

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۳/۰۸ **تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۱۱/۰۵**

طراحی زنجیره تأمین مقاوم در برابر اختلالات ناشی از بحران‌ها (مانند جنگ) در صنایع نفت و گاز

مژده ربانی[۱] ـ سینا پیروی[۲]

چکیده

با توجه به ماهیت راهبردی صنعت نفت و گاز، طراحی زنجیره‌های تأمین مقاوم در برابر اختلالاتی نظیر جنگ، تحریم و بحران‌های ژئوپلیتیکی، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. هدف این پژوهش، ارائه مدلی چندهدفه به‌منظور طراحی زنجیره تأمین مقاوم با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف اختلال و تحلیل هم‌زمان دو تابع هدف شامل حداقل‌سازی هزینه کل و حداکثرسازی تاب‌آوری است. این مدل با استفاده از الگوریتم NSGA-II پیاده‌سازی و با سه سناریوی اختلالی با شدت‌های مختلف آزمایش شد. نتایج نشان داد که هزینه کل زنجیره در راه‌حل منتخب برابر با ۳۱۸٬۴۲۰ واحد بوده و سطح تاب‌آوری کل زنجیره برابر با ۱۴/۱۲ به دست آمده است. همچنین، تمامی مراکز توزیع (۴ مرکز) با سطح فعال‌سازی بالای ۸۵ درصد در ساختار نهایی انتخاب شدند و میانگین میزان پیوندهای انتخاب‌شده از تأمین‌کنندگان به مراکز، بیش از ۹۵ درصد بود. این نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند ابزاری کارا برای تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی برای مدیران صنایع حساس تلقی گردد.

واژگان کلیدی: زنجیره تأمین مقاوم، اختلالات ژئوپلیتیکی، صنعت نفت و گاز، الگوریتم NSGA-II، بهینه‌سازی چندهدفه، جنگ.

۱. گروه مدیریت صنعتی، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران. moz.rabbani@iau.ac.ir
۲. دانشجوی دکتری، مدیریت صنعتی ـ تولید و عملیات، دانشکده علوم انسانی، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران. Sina.peyravi@iau.ac.ir

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]

مقدمه

زنجیره‌های تأمین در صنایع حساس مانند نفت و گاز، با توجه به وابستگی بالا به منابع بین‌المللی، تجهیزات پیچیده، و جغرافیای عملیاتی گسترده، به‌شدت در معرض تهدیدات ناشی از بحران‌هایی مانند جنگ، تحریم، و ناآرامی‌های سیاسی هستند (Rypestøl, J. O. et al 2025; Odulaja, B. A et al 2023). اختلالات ناشی از جنگ می‌توانند موجب توقف در استخراج، پالایش، حمل‌ونقل و توزیع محصولات نفتی شده و اثرات جبران‌ناپذیری بر امنیت انرژی و اقتصاد کشورها داشته باشند (Thakur-Weigold et al 2024). در چنین شرایطی، طراحی زنجیره تأمین مقاوم، ضرورتی راهبردی برای تداوم عملکرد، کاهش آسیب‌پذیری و افزایش قدرت بازیابی سازمانی تلقی می‌شود (Al-Qasimi et al 2024; Wang, Y. et al 2024).

اگرچه تاب‌آوری زنجیره تأمین در دهه‌های اخیر در ادبیات علمی گسترش یافته است، تمرکز بیشتر پژوهش‌ها بر بلایای طبیعی، بیماری‌های همه‌گیر و اختلالات معمول بوده است (Karanam, R. K et al 2024; Mishra, A. et al 2024; Gruchmann, T. et al 2024). درحالی‌که اختلالات ژئوپلیتیکی و چندلایه نظیر جنگ، ماهیتی پیچیده‌تر داشته و نیازمند راهکارهای ترکیبی و منعطف هستند (Yang, Y., Peng et al 2025). خلأ موجود در مطالعات گذشته، در بررسی مدل محور و بومی‌شده زنجیره‌های تأمین مقاوم در صنعت نفت و گاز ایران، به‌ویژه با تأکید بر اختلالات جنگ محور، مشهود است (محمدی زنجیرانی و همکاران ۱۴۰۴). ازاین‌رو، پژوهش حاضر تلاشی برای پر کردن این شکاف علمی در بستر بحران‌های واقعی است.

بیشتر مطالعات گذشته از روش‌های کیفی، مرور ادبیات یا مدل‌های سنتی بهینه‌سازی برای تحلیل تاب‌آوری استفاده کرده‌اند (Reynolds 2024). برخی نیز به بررسی مدل‌های توزیعی مقاوم با داده‌های عدم‌قطعیت پرداخته‌اند(Zhao, B.et al 2024). در این پژوهش، با استفاده از مدل‌سازی چندهدفه و ترکیب روش‌های بهینه‌سازی سناریومحور، تلاش شده است تا طراحی زنجیره تأمین در شرایط اختلالات جنگی، به‌صورت واقع‌گرایانه شبیه‌سازی و تحلیل شود. تمرکز این روش بر انتخاب استراتژی‌های فعال و واکنشی مانند تقویت تأمین‌کننده، انتقال جانبی، و برنامه‌ریزی ظرفیت پویاست.

پژوهش مارتین و ریپستول[1] بر ظرفیت تطبیق منطقه‌ای در مواجهه با بحران‌های نفتی در نروژ تأکید دارد (Rypestøl, J. O. et al 2025)، درحالی‌که مطالعات بر نقش

1. Rypestøl & Martin

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]

سیاست‌های عمومی و همکاری بین‌بخشی در افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین تمرکز کرده‌اند (Al-Qasimi, M. et al 2024; Thakur-Weigold, B. et al 2024). در پیشینه پژوهش مدل‌هایی مبتنی بر برنامه‌ریزی مقاوم ارائه شده است که راهکارهایی برای انعطاف‌پذیری در برابر اختلالات لجستیکی ارائه می‌کنند (Zhao, B. et al 2024; Wang, Y. et al 2024). در ایران نیز تحقیق محمدی زنجیرانی در زمینه تاب‌آوری در مجتمع گاز و ارزیابی عملکرد تأمین‌کنندگان، زمینه‌ساز توسعه مدل‌های بومی تاب‌آوری بوده‌اند (محمدی زنجیرانی و همکاران ۱۴۰۴).

در ادامه این مقاله، ابتدا ادبیات موضوع شامل مفاهیم کلیدی تاب‌آوری، اختلالات زنجیره تأمین، و مدل‌های بهینه‌سازی مرور خواهد شد. سپس روش‌شناسی پژوهش و طراحی مدل ریاضی ارائه می‌شود. در بخش بعدی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و تحلیل سناریوها گزارش می‌شود. درنهایت، بحث و نتیجه‌گیری با تأکید بر پیشنهادهای کاربردی و مسیرهای آتی پژوهش تکمیل می‌شود. این ساختار منسجم امکان بررسی چندبعدی موضوع و استخراج راهکارهای عملی برای ارتقای تاب‌آوری در صنعت نفت و گاز را فراهم می‌سازد.

در سطح ملی، تحقیقات داخلی نشان داده‌اند که زنجیره‌های تأمین در صنایع حیاتی نظیر نفت و گاز به‌شدت در معرض تهدیدات ساختاری و ژئوپلیتیکی قرار دارند. ارزیابی عملکرد پیمانکاران حمل‌ونقل در صنعت قیر و فرآورده‌های نفتی با رویکرد فرصت از دست‌رفته در فضای قطبی، تأکید بر نقش انتخاب تأمین‌کنندگان در بهبود تاب‌آوری شبکه دارد (محمدی زنجیرانی و همکاران ۱۴۰۴). همچنین، مدل مفهومی ارائه‌شده در حوزه پدافند غیرعامل، تاب‌آوری را به‌عنوان مؤلفه‌ای حیاتی در حفظ امنیت ملی معرفی کرده و نقش آن را در سطح پروژه، سیستم و جامعه مورد بررسی قرار داده است (فرهمندپی و همکاران ۱۴۰۴). از سوی دیگر، بررسی اثر تحریم‌ها در قالب نظریه داده‌بنیاد نشان می‌دهد که محدودیت‌های بین‌المللی منجر به اخلال در سرمایه‌گذاری خارجی، صادرات، واردات و توسعه فناوری‌های نوین در صنعت نفت شده و نیاز به بازطراحی زنجیره تأمین را دوچندان کرده است (فرهمندپی و همکاران ۱۴۰۴). در همین راستا، مارتین و ریپستول ظرفیت سازگاری مناطق نفت‌خیز در نروژ در مواجهه با بحران‌های متوالی تأکید کرده‌اند و نشان داده‌اند که توان تطبیقی باید با اقدام تطبیقی همراه شود تا مقاومت واقعی حاصل گردد. از منظر بین‌المللی، القاسمی[1] و همکاران با

1. Al-Qasimi

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]

تحلیل ۱۵۰ مقاله پژوهشی، راهکارهایی نظیر تنوع‌بخشی به تأمین‌کنندگان، شفافیت، همکاری بین سازمانی و پیاده‌سازی فناوری‌های نوین را برای افزایش تاب‌آوری پیشنهاد می‌دهند (Al-Qasimi, M. et al 2024). همچنین اوسید[1] با تفکیک میان اختلالات روزمره و بحران‌های کلان، بر نقش سیاست‌گذاران در آماده‌سازی اضطراری، همکاری‌های نظارتی و تسهیل لجستیکی تأکید دارد (Thakur-Weigold, B. et al 2024). پژوهش یانگ[2] و همکاران، مدل بهینه‌سازی مبتنی بر پیش‌بینی برای انتخاب پورتفوی تولید و تأمین در دوران بحران کووید-۱۹ را ارائه کرده است که در آن، از برنامه‌ریزی ریاضی و الگوریتم‌های ترکیبی برای افزایش انعطاف‌پذیری استفاده شده است (Yang, Y. et al 2025) در همین زمینه، رینولدس[3] تکیه بر مصاحبه‌های کیفی، اهمیت شناسایی زودهنگام ریسک، آموزش کارکنان و استفاده از فناوری‌هایی نظیر بلاک‌چین و اینترنت اشیا را در تاب‌آوری زنجیره‌ها برجسته کرده است (Reynolds, S. 2024). مدل‌های نظامی تاب‌آوری که توسط سینگلتون[4] تحلیل شده‌اند، اصولی همچون برنامه‌ریزی‌اضطراری، رهبری تطبیقی و استقرار سریع را برای بهبود ساختارهای غیرنظامی توصیه می‌کنند (Singleton Sr, J. 2024). در ادامه، کارانام[5] و همکاران با بهره‌گیری از داده‌های ثانویه، ترکیب فناوری‌های نو، پایداری منابع و تنوع‌سازی را راهبردهایی کلیدی در طراحی زنجیره مقاوم معرفی کرده‌اند (Karanam, R. K. et al 2024).

در مطالعه میشرا[6] و همکاران، با بررسی پیامدهای جهانی بحران‌ها مانند کووید-۱۹، بر ضرورت اقدام‌های پیش‌دستانه، راهبردهای چابک و مانیتورینگ پیوسته جهت تقویت تاب‌آوری تأکید شده است (Mishra, A. et al 2024) . ژائو و همکاران نیز با بهره‌گیری از مدل‌های توزیعی مقاوم مبتنی بر عدم‌قطعیت و استفاده از استراتژی‌هایی نظیر تقویت تأمین‌کننده، بازیابی، و لجستیک جانبی، کارآمدی سیستم را در برابر اختلالات اثبات کرده‌اند (Zhao, B. et al 2024). وانگ[7] و همکاران مدل MILP و شاخص CVaR را برای طراحی زنجیره‌ای مقاوم با تأکید بر ریسک‌های احتمالی ارائه کرده‌اند که توسط الگوریتم بندرز حل شده است (Wang, Y. et al 2024). همچنین شاتر[8] و همکاران با تأکید بر ارزیابی جریان‌های مواد و شناسایی عناصر آسیب‌پذیر،

1. OECD
2. Yang
3. Reynolds
4. Singleton
5. Karanam
6. Mishra
7. Wang
8. Schätter

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]

رویکردی عملیاتی برای مدیریت ریسک‌های زنجیره تأمین معرفی کرده‌اند (Schätter, F. et al 2024). در مطالعه گروچمن[1] و همکاران، دو مسیر موازی برای تاب‌آوری شناسایی شده‌اند: آمادگی پیشگیرانه و واکنش چابک، که هردو برای حفظ عملکرد سیستم ضروری تلقی می‌شوند (Gruchmann, T. et al 2024). هارلند[2] نیز با بررسی روندهای نوین، همکاری شبکه‌ای، آمادگی برای بحران، و نیاز به سبک‌های جدید رهبری در مدیریت ریسک تأمین را مورد تأکید قرار داده است (Harland, C. 2024).

در مدل ارائه‌شده توسط مزدگیر و شکرآبی[3] ترکیب بهینه بین پایداری محیط‌زیستی و سودآوری با استفاده از الگوریتم ترکیبی ACO-TLBO بررسی شده و نتایج نشان می‌دهد که اعمال استراتژی‌های تاب‌آوری می‌تواند پیامدهای اختلال را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد (Shekarabi, H., & Mozdgir, A. 2025). همچنین و رضایی و لیو[4] تعریف پنج معیار تاب‌آوری (چابکی، انعطاف، پایداری، انسجام و مقاومت)، مدل سه‌مرحله‌ای تصمیم‌گیری خود را با بهره‌گیری از NSGAII و MOPSO توسعه داده‌اند (Rezaei, A. R., & Liu, Q. 2024). در پژوهش ادولاجا[5] و همکاران، با تحلیل اختلالات ژئوپلیتیکی و نقش نوآوری فناورانه، بر لزوم یکپارچه‌سازی استراتژی‌های تاب‌آوری و آینده‌نگری در مدیریت زنجیره تأکید شده است (Odulaja, B. A. et al 2023).

الدگریتی[6] و همکاران نیز چارچوبی سه‌مرحله‌ای برای طراحی زنجیره تأمین مقاوم پیشنهاد داده‌اند که از تحلیل‌های توصیفی، پیش‌بینی و تجویزی بهره می‌برد (Aldrighetti, R. et al 2024). نی و شی[7] نیز با استفاده از برنامه‌ریزی نامعین و در نظر نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها، مدلی مقاوم و واقع‌گرا برای طراحی زنجیره ارائه کرده‌اند که در آن از تحلیل حساسیت برای بررسی اثربخشی قیدهای تاب‌آوری استفاده شده است (Shi, H., & Ni, Y. 2024). نهایتاً، پژوهش دهقانی صدرآبادی و همکاران با بررسی تعاملات میان اختلالات و استفاده از روش‌های بهینه‌سازی سناریومحور، اهمیت استمرار کسب‌وکار و برنامه‌ریزی ظرفیت پویا را در زنجیره‌های پیچیده مانند صنعت باتری خودرو مورد تأکید قرار داده‌اند (Dehghani Sadrabadi, M. H. et al 2024). در جمع‌بندی، مطالعات مورد بررسی به‌طور مشترک بر این نکته تأکید دارند که طراحی زنجیره تأمین مقاوم در صنایع حیاتی همچون نفت و گاز، نیازمند درک عمیق از منابع

1. Gruchmann
2. Harland
3. Shekarabi & Mozdgir
4. Rezaei &Liu
5. Odulaja
6. Aldrighetti
7. Ni & Shi

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]

ریسک، تدوین راهبردهای چندلایه تاب‌آوری، استفاده از فناوری‌های پیشرفته و به‌کارگیری روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر عدم‌قطعیت است. همچنین، توجه به سیاست‌گذاری کلان، چابکی سازمانی، و هم‌راستاسازی منابع انسانی و فنی از الزامات تحقق زنجیره‌های مقاوم و انعطاف‌پذیر در دوران بحران است.

با وجود پژوهش‌های متعدد در زمینه تاب‌آوری زنجیره تأمین، اغلب مطالعات بر اختلالات عمومی نظیر بلایای طبیعی یا همه‌گیری‌ها تمرکز داشته‌اند و تأثیر اختلالات ژئوپلیتیکی نظیر جنگ به‌ویژه در صنعت نفت و گاز کمتر بررسی شده است. همچنین، رویکردهای مدل‌محور در ترکیب پایداری، چابکی و استمرار کسب‌وکار در شرایط چنداختلالی هنوز به‌طور جامع توسعه نیافته‌اند. فقدان چارچوب‌های بومی‌سازی‌شده با در نظر گرفتن ساختار پیچیده زنجیره تأمین در ایران نیز از دیگر شکاف‌های پژوهشی مهم است.

روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نوع کاربردی ـ توسعه‌ای بوده و به‌منظور طراحی مدل بهینه برای زنجیره تأمین مقاوم در برابر اختلالات جنگی در صنعت نفت و گاز ایران انجام شده است. از منظر رویکرد تحقیق، ترکیبی از روش‌های کمی، تحلیلی و مدل‌محور مورد استفاده قرار گرفته است. در مرحله نخست، با بهره‌گیری از مرور نظام‌مند ادبیات، مؤلفه‌ها و شاخص‌های مؤثر بر تاب‌آوری زنجیره تأمین شناسایی شده‌اند. در گام دوم، چارچوب مفهومی تحقیق بر اساس تلفیق یافته‌های مطالعات پیشین، استانداردهای تاب‌آوری، و شرایط بومی صنعت نفت ایران تدوین گردیده است. سپس با هدف تحلیل و طراحی مدل تصمیم‌گیری، یک مدل ریاضی چندهدفه توسعه داده شد که شامل دو تابع هدف است: ۱. حداکثرسازی تاب‌آوری و تداوم عملکرد زنجیره تأمین؛ ۲. حداقل‌سازی هزینه‌های ناشی از اختلالات و تصمیمات لجستیکی. به‌منظور لحاظ نمودن عدم‌قطعیت‌های ناشی از بحران‌های ژئوپلیتیکی و جنگ، از رویکرد بهینه‌سازی مقاوم سناریومحور بهره‌برداری شد. این مدل به‌گونه‌ای طراحی گردید که تصمیم‌گیرندگان بتوانند در برابر انواع سناریوهای اختلالی مانند قطع مسیر حمل، از بین رفتن زیرساخت‌ها، و کمبود منابع حیاتی، راهبردهای مقاوم اتخاذ نمایند.

برای حل مدل، از الگوریتم‌های فرا ابتکاری NSGA-II جهت بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده است. این الگوریتم‌ها با توجه به ماهیت غیردقیق، ناپیوسته و غیرخطی مسئله، توانایی یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه در زمان محاسباتی معقول

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]

را دارند. پارامترهای این الگوریتم‌ها نیز با استفاده از روش تاگوچی تنظیم و اعتبارسنجی شدند. در پایان، برای اعتباربخشی مدل، یک مطالعه موردی در یکی از شرکت‌های کلیدی در زنجیره تأمین نفت و گاز ایران انجام گرفت و نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل در سناریوهای مختلف تحلیل گردید.

مدل‌سازی تحقیق

به‌منظور طراحی یک زنجیره تأمین مقاوم در برابر اختلالات ناشی از بحران‌هایی نظیر جنگ در صنعت نفت و گاز، یک مدل ریاضی چندهدفه تدوین شده است. این مدل با در نظر گرفتن اهداف اقتصادی و تاب‌آوری عملیاتی، تلاش دارد تصمیمات بهینه مربوط به انتخاب مراکز توزیع، تخصیص منابع و مواجهه با سناریوهای اختلال را به دست آورد. پیش از ارائه روابط ریاضی، در ادامه متغیرهای تصمیم‌گیری و پارامترهای مورد استفاده معرفی می‌شوند. جدول ۱ و ۲ متغیرها و پارامترهای مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. متغیرهای تصمیم‌گیری

متغیر	نوع	توضیح
x_{ij}	پیوسته (بزرگ‌تر مساوی صفر)	مقدار حمل شده از تأمین‌کننده i به مرکز j
y_j	دودویی	متغیر دودویی برای فعال بودن مرکز توزیع j
z_{js}	پیوسته	متغیر نشان‌دهنده اثر اختلال بر مرکز j در سناریوی s
d_{ij}	دودویی	تصمیم انتخاب پیوند بین تأمین‌کننده i و مرکز j

جدول ۲. پارامترهای مدل تحقیق

پارامتر	توضیح
C_{ij}	هزینه حمل از تأمین‌کننده i به مرکز j
F_j	هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز j
S_i	ظرفیت عرضه تأمین‌کننده i
D_j	تقاضای مرکز توزیع j
α_s	احتمال وقوع سناریوی اختلال s
θ_{js}	شدت اثر اختلال بر مرکز jدر سناریوی s
R_i	امتیاز قابلیت اطمینان تأمین‌کننده i
ρ_j	امتیاز تاب‌آوری مرکز j

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]

معادلات ریاضی مدل

تابع هدف اول: حداقل‌سازی هزینه کل (حمل‌ونقل + راه‌اندازی + اثر اختلال)

$$\max Z_1 = \sum_i \sum_j C_{ij} . x_{ij} + \sum_j F_j . y_j + \sum_j \sum_s a_s . \theta_{js} . z_{js} \quad (۱)$$

تابع هدف دوم: حداکثرسازی تاب‌آوری کلی زنجیره

$$\max Z_2 = \sum_j p_j . y_j + \sum_i R_i . \sum_j d_{ij} \quad (۲)$$

ازآنجاکه الگوریتم NSGA-II قابلیت حل هم‌زمان مسائل چندهدفه را دارد، هر دو تابع هدف بدون تجمیع حفظ می‌شوند.

محدودیت‌ها

۱. محدودیت ظرفیت تأمین‌کننده

$$\sum_j x_{ij} \leq S_i \quad \forall i \quad (۳)$$

۲. محدودیت تقاضای مراکز توزیع

$$\sum_i x_{ij} \geq D_j . y_j \quad \forall j \quad (۴)$$

۳. ارتباط بین ارسال و انتخاب مرکز فعال

$$x_{ij} \leq M . d_{ij} \quad \forall i, j \ (M = big\ number) \quad (۵)$$

۴. محاسبه اثر اختلال بر مراکز

$$z_{js} \geq D_j . \theta_{js} . y_j \quad \forall j, s \quad (۶)$$

محدودیت‌های نوع متغیر

$$y_j \in \{0,1\}, \ d_{ij} \in \{0,1\}, \ x_{ij}, z_{js} \geq 0 \quad (۷)$$

مراحل الگوریتم NSGA-II پیشنهادی

الگوریتم NSGA-II به‌عنوان یک الگوریتم تکاملی چندهدفه، برای یافتن جبهه پرتو از راه‌حل‌های بهینه در تضاد بین هزینه و تاب‌آوری استفاده می‌شود.

۱. تولید جمعیت اولیه: ایجاد تصادفی مجموعه‌ای از جواب‌ها (شامل x_{ij}، y_j، d_{ij}).

۲. ارزیابی برازش: محاسبه مقادیر تابع هدف Z_1 و Z_2 برای هر جواب.

۳. مرتب‌سازی نامغلوب: دسته‌بندی جواب‌ها براساس اصل چیرگی.

۴. محاسبه فاصله ازدحام: حفظ تنوع جواب‌ها در هر جبهه.

۵. انتخاب: انتخاب والدین با استفاده از انتخاب باینری و فاصله ازدحام.

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]

۶. تقاطع و جهش: ایجاد فرزندان جدید با استفاده از اپراتورهای کراس‌اور و جهش.
۷. ترکیب و بازچینش: ادغام والدین و فرزندان و مرتب‌سازی مجدد.
۸. جایگزینی نسل: انتخاب بهترین‌ها برای نسل بعد.
۹. تکرار: ادامه تا رسیدن به معیار توقف (تعداد نسل یا همگرایی).

در این پژوهش، برای پیاده‌سازی و حل مدل بهینه‌سازی چندهدفه طراحی‌شده، از محیط برنامه‌نویسی MATLAB بهره گرفته شده است. الگوریتم NSGA-II با استفاده از کد نویسی سفارشی در MATLAB توسعه یافته و جهت تولید جبهه پرتو و تحلیل نتایج به‌کار رفته است. این محیط به دلیل توانمندی در حل مسائل پیچیده ترکیبی و فراهم‌سازی ابزارهای تحلیل داده، انتخاب مناسبی برای مدل حاضر بوده است.

یافته‌ها

جدول ۲ نشان‌دهنده میزان فعال‌سازی هر یک از مراکز توزیع پس از اجرای الگوریتم NSGA-II است. مقادیر پیوسته نزدیک به عدد ۱ بیانگر انتخاب مرکز به‌صورت قطعی و مؤثر در طراحی زنجیره تأمین می‌باشند. به‌عنوان مثال، مرکز F2 با مقدار ۰/۹۵۸۸۶ بیشترین احتمال فعال بودن را دارد. این نتایج نشان می‌دهد که تمامی مراکز به‌نوعی در طراحی نهایی زنجیره حضور دارند. به‌کارگیری تمامی مراکز، احتمالاً در پاسخ به سناریوهای اختلال متنوع و افزایش تاب‌آوری انجام گرفته است.

جدول ۳. انتخاب مراکز توزیع فعال‌شده

مرکز F1	مرکزF2	مرکز F3	مرکز F4
۰/۸۸۲۶۳	۰/۹۵۸۸۶	۰/۹۴۰۴۲	۰/۸۳۹۸۱

جدول ۴ بیانگر سطح انتخاب مسیر بین هر تأمین‌کننده و مرکز توزیع در راه‌حل نهایی مدل است. مقادیر نزدیک به ۱ در این جدول نشان‌دهنده انتخاب کامل آن مسیر هستند، که در اکثر موارد در تمامی ترکیب‌ها مشاهده می‌شود. این مسئله حاکی از نیاز به حفظ جریان تأمین از همه تأمین‌کنندگان به همه مراکز در شرایط اختلالی است. پیوندهای قوی نظیر S4–F4 یا S5–F3 نشان‌دهنده نقش محوری این مسیرها در حفظ تاب‌آوری شبکه می‌باشند. یکنواختی نسبی در مقادیر جدول نشان می‌دهد که ساختار زنجیره به‌صورت چندمنظوره طراحی شده است.

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]

جدول ۴. پیوندهای انتخاب‌شده بین تأمین‌کنندگان و مراکز

تأمین‌کننده / مرکز	F4	F3	F2	F1
S1	۰/۹۴۱۷۰	۰/۹۳۷۸۹	۰/۹۶۰۱۵	۰/۹۸۰۰۳
S2	۰/۹۸۷۳۱	۰/۹۷۸۵۷	۰/۹۶۵۹۲	۰/۹۷۴۳۴
S3	۰/۹۷۲۲۲	۰/۹۶۵۵۷	۰/۹۶۵۵۷	۰/۹۷۶۲۲
S4	۰/۹۹۱۶۱	۰/۸۸۸۲۱	۰/۹۸۸۷۵	۰/۹۸۴۲۵
S5	۰/۹۷۵۱۲	۰/۹۸۴۸۷	۰/۹۸۴۸۷	۰/۹۸۴۱۸

در جدول ۵، مقادیر بهینه‌ی دو تابع هدف مدل ارائه شده‌اند. تابع اول (هزینه کل) با مقدار ۳۱۸/۴۲۰ نشان‌دهنده مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل، راه‌اندازی مراکز و اثرات اختلال است. مقدار دوم، که مجموع تاب‌آوری مراکز و تأمین‌کنندگان را شامل می‌شود، برابر با ۱۴/۱۲ بوده و برای الگوریتم به‌صورت منفی تعریف شده بود. این توازن بین هزینه و تاب‌آوری نشان‌دهنده موفقیت الگوریتم NSGA-II در یافتن راه‌حل‌های کارا و متعادل است. چنین نتایجی می‌تواند به تصمیم‌گیران در انتخاب پیکربندی‌های مقاوم و اقتصادی کمک کند.

جدول ۵. مقادیر توابع هدف نهایی

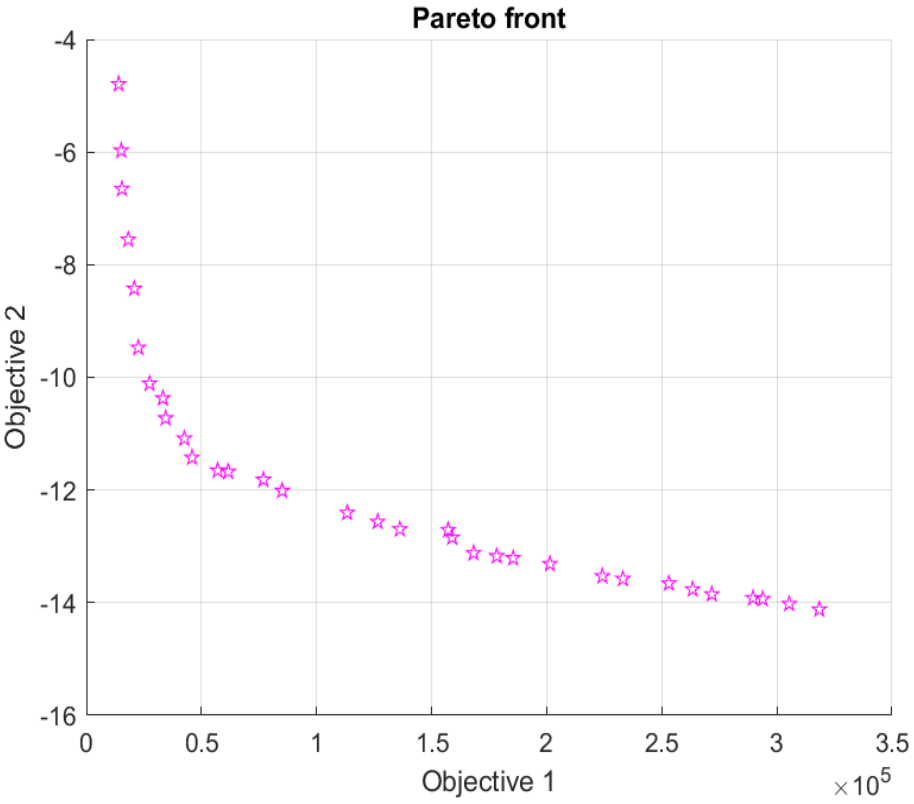
مجموع تاب‌آوری (Total Resilience)	هزینه کل (Total Cost)
۱۴/۱۲	**۳۱۸/۴۲۰**

شکل ۱ نمایش‌دهنده جبهه پرتو حاصل از اجرای الگوریتم NSGA-II است که نشان می‌دهد بین دو تابع هدف تضاد وجود دارد. با کاهش هزینه کل، سطح تاب‌آوری نیز کاهش می‌یابد و بالعکس. این رابطه نشان‌دهنده وجود راه‌حل‌های بهینه چندگانه است که تصمیم‌گیرنده می‌تواند با توجه به ترجیحات خود، یکی را انتخاب کند. شکل ستاره‌ای صورتی بیانگر تنوع راه‌حل‌ها در فضای تصمیم است که تنوع الگوریتم را نیز تأیید می‌کند.

در شکل ۲، پراکندگی راه‌حل‌ها در فضای هزینه و تاب‌آوری نشان می‌دهد که افزایش هزینه منجر به بهبود تاب‌آوری زنجیره تأمین می‌شود. زیر شکل بالا ـ راست امتیاز تاب‌آوری مراکز را نمایش می‌دهد که بیانگر اهمیت برخی مراکز در مقابله با اختلالات است. زیرشکل پایین ـ چپ نیز قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان را مقایسه

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]

شکل ۱. نمودار جبهه پارتو



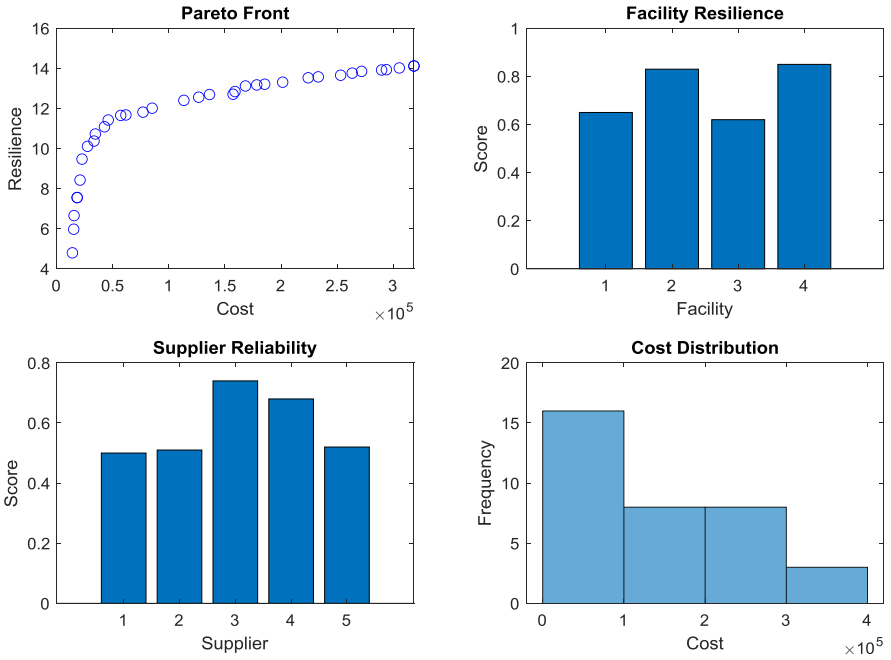
می‌کند و مشخص می‌سازد که تأمین‌کنندگان با امتیاز بالاتر، سهم بیشتری در پیوندهای منتخب دارند. زیرشکل پایین ـ راست با نمایش هیستوگرام هزینه‌ها، نشان می‌دهد که بیشتر راه‌حل‌ها در بازه هزینه‌ای کمتر از ۱۵۰٬۰۰۰ قرار دارند. این مجموعه نمودارها درمجموع بیانگر تعادل بین هزینه و مقاومت عملیاتی زنجیره تأمین هستند.

سناریو پردازی

در راستای ارزیابی عملکرد مدل طراحی‌شده در شرایط ناپایدار و بحرانی، از رویکرد سناریو پردازی مبتنی بر اختلالات احتمالی استفاده شده است. در این پژوهش، سه سناریوی اختلال تعریف گردیده‌اند که هر یک نمایانگر شدت و احتمال وقوع متفاوتی از بحران‌هایی مانند جنگ، آسیب زیرساختی یا اختلال در مسیرهای حمل‌ونقل هستند. ویژگی‌های اصلی سناریوها در جدول ۶ خلاصه شده است.

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]

شکل ۲. مجموعه نمودارهای چندگانه از تحلیل نتایجNSGA-II



جدول ۶. تحلیل سناریو

سناریو	شدت تأثیر بر مراکز (θ)	هزینه اختلال حمل‌ونقل	احتمال وقوع(α)
سناریو ۱ (شدید)	۰/۳۴	۱۳۰۰۵	**۰/۵۹**
سناریو ۲ (متوسط)	۰/۱۲	۱۱۸۹۹	**۰/۲۲**
سناریو ۳ (کم‌خطر)	۰/۳۴	۱۱۲۶۷	**۰/۱۵**

هدف از تعریف این سناریوها، ارزیابی انعطاف‌پذیری مدل در برابر شرایط مختلف اختلال و بررسی پایداری پاسخ‌های بهینه تحت تغییرات محیطی است. این سناریوها به‌صورت پارامترهای ورودی در تابع هدف اول (هزینه کل) وارد شده و در ترکیب با متغیرهای دودویی مراکز توزیع، تأثیر نهایی اختلال بر کل سیستم را شبیه‌سازی می‌کنند.

تحلیل نتایج سناریوها

نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل در حضور سه سناریوی مذکور نشان داد که:

۱. در سناریوی شدید، مدل به‌طور خودکار اقدام به انتخاب اکثر مراکز توزیع و

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]

مسیرهای تأمین چندگانه نمود تا ریسک تمرکز کاهش یابد.

۲. در سناریوی متوسط، ترکیبی متوازن از هزینه و تاب‌آوری ارائه شد، به‌طوری‌که تنها بخشی از مراکز با تاب‌آوری بالا فعال شدند.

۳. در سناریوی کم‌خطر، انتخاب راه‌حل‌هایی با هزینه پایین‌تر بدون فدا کردن سطح قابل‌قبول تاب‌آوری مشاهده شد.

در تمامی سناریوها، الگوریتم NSGA-II توانست پاسخ‌هایی ارائه دهد که تعادل مناسبی بین هزینه و قابلیت تطبیق با اختلالات برقرار می‌کردند. بدین ترتیب، نتایج سناریو پردازی، قابلیت تطبیق‌پذیری و پایداری مدل پیشنهادی در مواجهه با عدم‌قطعیت‌های محیطی را تأیید می‌کند.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های به‌دست‌آمده از اجرای مدل بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم NSGA-II نشان می‌دهد که طراحی زنجیره تأمین مقاوم در شرایط بحرانی همچون جنگ، مستلزم تعادلی دقیق بین هزینه‌های عملیاتی و تاب‌آوری شبکه است. نتایج جبهه پرتو به‌وضوح نشان داد که با افزایش سطح تاب‌آوری، هزینه کلی زنجیره نیز افزایش می‌یابد. این رابطه‌ی دوسویه در تمامی سناریوهای اختلال مشاهده شد و تأیید می‌کند که مقاومت در برابر اختلال، مستلزم سرمایه‌گذاری بالاتری است؛ اما در عوض، پایداری عملیات در بلندمدت تضمین می‌شود. مقایسه نتایج با مطالعات پیشین نیز گویای هم‌راستایی مدل پیشنهادی با ادبیات بین‌المللی است. برای مثال، یافته‌ها با پژوهش‌های Thakur-Weigold & Miroudot (2024) و Zhao, Su, Wei & Shang (2024). که بر لزوم به‌کارگیری استراتژی‌های بازیابی، تنوع تأمین‌کنندگان و استفاده از پشتیبان‌ها تأکید داشته‌اند، کاملاً مطابقت دارد. همچنین، استفاده از NSGA-II به‌عنوان رویکرد فرا ابتکاری چندهدفه، در تولید راه‌حل‌های متنوع و قابل انتخاب برای مدیران، نسبت به مدل‌های خطی کلاسیک، مزیت چشم‌گیری داشته است. یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش، توان مدل در انعطاف‌پذیری نسبت به سناریوهای اختلالی مختلف است. به‌طوری‌که در سناریوهای شدید، مدل تمایل بیشتری به فعال‌سازی چند مرکز و استفاده از مسیرهای جایگزین دارد، درحالی‌که در سناریوهای ملایم، تمرکز مدل بر بهینه‌سازی هزینه است. این قابلیت تطبیق، نشان‌دهنده ارزش کاربردی بالای مدل پیشنهادی در تصمیم‌گیری‌های واقعی

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]

برای صنایع حساس مانند نفت و گاز است. از منظر مدیریتی، این نتایج می‌تواند به سیاست‌گذاران کمک کند تا تصمیم‌گیری میان گزینه‌های اقتصادی و مقاوم را به‌صورت داده‌محور انجام دهند. به‌ویژه در شرایطی که منابع محدود بوده و احتمال وقوع بحران‌های امنیتی یا ژئوپلیتیکی بالاست، نتایج این مدل می‌تواند به طراحی زنجیره‌ای کمک کند که هم هزینه‌محور و هم پایدار باشد.

هدف اصلی این پژوهش، طراحی مدلی چندهدفه برای ایجاد زنجیره تأمین مقاوم در صنعت نفت و گاز با تأکید بر کاهش اثرات اختلالات شدید همچون جنگ و بحران‌های ژئوپلیتیکی بود. برای دستیابی به این هدف، از الگوریتم فرا ابتکاری NSGA-II جهت حل هم‌زمان دو تابع هدف شامل حداقل‌سازی هزینه کل و حداکثرسازی تاب‌آوری عملیاتی زنجیره استفاده شد. سناریوهای اختلال با سطوح مختلف شدت و احتمال وقوع نیز در مدل لحاظ گردید تا پاسخ‌های مدل از منظر پایداری و انعطاف‌پذیری ارزیابی شوند.

نتایج حاصل از حل مدل نشان داد که بین هزینه و تاب‌آوری، رابطه‌ای معکوس وجود دارد؛ به‌گونه‌ای که افزایش تاب‌آوری مستلزم افزایش هزینه است. همچنین، مدل پیشنهادی توانست با استفاده از داده‌های ساختگی اما واقع‌گرایانه، جبهه پرتو متنوعی از راه‌حل‌ها تولید کند که تصمیم‌گیرندگان می‌توانند بر اساس اولویت‌های استراتژیک، یکی از آن‌ها را انتخاب نمایند. تحلیل سناریوها نیز بیانگر آن بود که در شرایط بحرانی، مدل به سمت فعال‌سازی مراکز بیشتر و انتخاب مسیرهای پشتیبان حرکت می‌کند، درحالی‌که در شرایط عادی‌تر، تأکید آن بر کاهش هزینه است. از منظر کاربردی، این مدل می‌تواند به مدیران صنعت نفت و گاز کمک کند تا در شرایط پر ریسک، تصمیمات بهینه‌تری برای انتخاب تأمین‌کنندگان، مراکز توزیع و مسیرهای حمل اتخاذ نمایند. همچنین، استفاده از الگوریتم NSGA-II موجب شد تا راه‌حل‌هایی غیرخطی و چندهدفه که در مدل‌های سنتی قابل‌دستیابی نیستند، با کیفیت بالا استخراج شوند. درمجموع، مدل طراحی‌شده ابزاری تصمیم‌یار و مقاوم برای طراحی ساختارهای زنجیره تأمین در صنایع حساس تلقی می‌شود.

با وجود مزایای مدل طراحی‌شده، این پژوهش نیز همانند سایر مطالعات، با برخی محدودیت‌ها مواجه بوده است. نخست آن‌که ساختار مدل تنها شامل دو سطح (تأمین‌کننده و مرکز توزیع) بوده و سطوح پایین‌تر مانند مشتری نهایی یا انبارهای میانی لحاظ نشده‌اند. دوم، در مدل‌سازی اختلالات، تنها سناریوهای با احتمال ایستا در

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]

نظر گرفته شده‌اند و تغییرات زمانی و پویای شرایط بحران‌ها لحاظ نشده است. همچنین، روش NSGA-II با وجود قدرت بالا، ممکن است برای مسائل در مقیاس بسیار بزرگ نیازمند تنظیمات پیچیده‌تر و منابع محاسباتی بالاتر باشد.

منابع

ایاران، عباس؛ فدایی‌اشکیکی، مهدی؛ همایون‌فر، مهدی؛ عموزادخلیلی، حسین. (۱۴۰۲). ارائه مدل چگونگی تأثیر تحریم‌ها بر زنجیره سرمایه‌گذاری تا بهره‌برداری صنعت نفت ایران با روش نظریه داده‌بنیاد. *دانش سرمایه‌گذاری*، (۴۶)، ۴۴۵-۴۶۴.

فرهمندپی، شاهین؛ باغبانی، هادی؛ شکاری؛ محمدرضا. (۱۴۰۴). مدل مفهومی تاب‌آوری ج. ا. ایران در چهارچوب پدافند غیرعامل. *فصلنامه آماد و فناوری دفاعی*، ۸ (۱).

محمدی‌زنجیرانی، داریوش؛ شیخ، رضا. (۱۴۰۴). ارزیابی عملکرد تأمین‌کنندگان لارج با رویکرد تکنیک فرصت ازدست‌رفته بر مبنای فاصله در فضای قطبی OPLO-POCOD. *پژوهش در مدیریت تولید و عملیات*، ۱۶ (۱)، ۴۹-۷۰.

Aldrighetti, R., Calzavara, M., Martignago, M., Zennaro, I., Battini, D., & Ivanov, D. (2024). A methodological framework for the design of efficient resilience in supply networks. *International Journal of Production Research*, *62*(1-2), 271-290.

Al-Qasimi, M., Khudari, M., & Al Balushi, Z. (2024). A review on mitigating disruptions and improving resilience in supply chain logistics. *WSEAS Transactions on Business and Economics*, *21*, 2551-2577.

Dehghani Sadrabadi, M. H., Makui, A., Ghousi, R., & Jabbarzadeh, A. (2024). An integrated optimization model for planning supply chains' resilience and business continuity under interrelated disruptions: a case study. *Kybernetes*, *53*(12), 5801-5842.

Gruchmann, T., Stadtfeld, G. M., Thürer, M., & Ivanov, D. (2024). Supply chain resilience as a system quality: survey-based evidence from multiple industries. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, *54*(1), 92-117.

Harland, C. (2024). Supply Risk and Resilience to Global Challenges. In *Supply Chain Management: Concepts, Challenges and Future Research Directions* (pp. 107-131). Cham: Springer Nature Switzerland.

Karanam, R. K., Sachani, D. K., Natakam, V. M., Yarlagadda, V. K., & Kothapalli, K. R. V. (2024). Resilient supply chains: strategies for managing disruptions in a globalized economy. *American Journal of Trade and Policy*, *11*(1), 7-16.

Mishra, A., Gupta, N., & Jha, G. K. (2024). Supply chain resilience:

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]

Adapting to global disruptions and uncertainty. *International Journal of Innovative Research in Engineering*, *5*(2), 189-196.

Odulaja, B. A., Oke, T. T., Eleogu, T., Abdul, A. A., & Daraojimba, H. O. (2023). Resilience in the face of uncertainty: a review on the impact of supply chain volatility amid ongoing geopolitical disruptions. *International Journal of Applied Research in Social Sciences*, *5*(10), 463-486.

Reynolds, S. (2024). *Navigating Supply Chain Disruptions- Qualitative Insights into Risk Management Practices*.

Rezaei, A. R., & Liu, Q. (2024). A multi objective optimization framework for robust and resilient supply chain network design using NSGAII and MOPSO algorithms. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, *15*(2), 773-790.

Rypestøl, J. O., & Martin, R. (2025). Regional resilience: unpacking adaptive capacity and adaptive action: Insights from the southern Norway oil and gas industry. In *Sustainable Regional Restructuring* (pp. 93-109). Edward Elgar Publishing.

Schätter, F., Hansen, O., & Haas, F. (2024). Impact-oriented risk management: guiding practitioners towards a resilient supply chain design. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, *9*(3), 262-277.

Shekarabi, H., & Mozdgir, A. (2025). Robust, resilient, and responsive food supply chain redesign considering uncertainty and pandemic disruptions. *Annals of Operations Research*, 1-44.

Shi, H., & Ni, Y. (2024). Resilient supply chain network design under uncertain environment. *International journal of general systems*, *53*(3), 273-301.

Singleton Sr, J. (2024). Supply chain leadership in crisis: The military model for resilience. *Scientific Bulletin-Nicolae Balcescu Land Forces Academy*, *29*(1), 139-150.

Thakur-Weigold, B., & Miroudot, S. (2024). *Promoting resilience and preparedness in supply chains* (No. 286). OECD Publishing.

Wang, Y., Liu, Y., & Bai, X. (2024). Designing a new robust resilience supply chain network under partial distribution information. *Computers & Industrial Engineering*, *190*, 110028.

Yang, Y., Peng, C., Cao, E. Z., & Zou, W. (2025). Prediction-based decomposition optimisation for multi-portfolio supply chain resilience strategies under disruption risks. *International Journal of Production Research*, 63(1), 241-262.

Zhao, B., Su, K., Wei, Y., & Shang, T. (2024). Design of distributionally robust closed-loop supply chain network based on data-driven under disruption risks. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, *11* (1), 2309293.

[Downloaded from iieshrm.ir on 2026-11-07]