نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

IERPS نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

ISSN: 2345-2269

سال دوازدهم، شماره بیست و چهارم، بهار و تابستان ۱۴۰۳، صفحه ۹۳-۱۱۳
www.ier.basu.ac.ir

DOI: https://doi.org/10.22084/ier.2024.29511.2171

مدل‌سازی تصادفی انتخاب تأمین‌کننده تاب‌آور و تخصیص سفارش در شرایط جنگ، تحریم و پاندمی: تحلیل آن در شبکه بیزی

محمد خسروآبادی[۱]، جعفر قیدر خلجانی[۲*]، محمد حسین کریمی‌گوارشکی[۳]

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، مجتمع دانشگاهی مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
۲. دانشیار گروه مهندسی صنایع، مجتمع دانشگاهی مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
۳. دانشیار گروه مهندسی صنایع، مجتمع دانشگاهی مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت ۱۴۰۳/۳/۳۱
پذیرش ۱۴۰۳/۵/۱۳
(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:
انتخاب تأمین‌کننده تاب‌آور
اندازه سفارش اقتصادی
کاهش سناریو، شبکه بیزی
سطح تاب‌آوری
مدیریت ریسک زنجیره‌تأمین

خلاصه

اختلالاتی مانند جنگ، تحریم و پاندمی‌ها علاوه‌بر تأثیر روی تأمین‌کنندگان و تولیدکننده؛ می‌توانند برروی یکدیگر در ابتدای زنجیره یا بر تقاضای مشتری در انتهای زنجیره تأثیرگذار باشند. مدل‌سازی این روابط پیچیده با استفاده از شبکه بیزی انجام شده و میزان اثرگذاری اختلالات در هر نقطه از زنجیره را نشان می‌دهد. از نرخ تورم برای پیش‌بینی و کاهش عدم قطعیت‌های تقاضا استفاده می‌شود. قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان که در زنجیره‌تأمین بسیار اهمیت دارد در یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی عدد صحیح مختلط دوهدفه با دو تابع هدف افزایش پراکندگی جغرافیایی و کاهش هزینه کل (حمل‌ونقل، خرید و سفارش‌دهی و...) لحاظ می‌شود. در این مدل تأمین‌کنندگان و تولیدکننده برای افزایش تاب‌آوری زنجیره‌تأمین مشارکت می‌کنند. برای اولین‌بار مفهوم سطح تاب‌آوری تأمین‌کننده پیشنهاد می‌شود. مدل ارائه شده برای تخصیص سفارش علاوه‌بر قیمت و سایر هزینه‌های سفارش‌دهی، هزینه بهبود سطح تاب‌آوری تأمین‌کنندگان را نیز درنظر می‌گیرد. همچنین سطح رضایت مشتری به‌صورت ضمنی با کاهش هزینه عدم ارضای تقاضا محاسبه می‌شود. به‌همین منظور یک مطالعه موردی در یکی از شرکت‌های خودروسازی ایران انجام گرفت. برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی یک مثال عددی حل و تحلیل حساسیت آن انجام شد. برای کاهش سناریو از روش خوشه‌بندی c-میانگین فازی و تحلیل متوازن اثر متقابل[1] استفاده شد. مدل ارائه شده می‌تواند تولیدکنندگان را برای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی بهتر در مواجه با ریسک‌ها و عدم قطعیت‌های آینده آماده کند.

۱. مقدمه

زنجیره‌تأمین در ایران به‌طور محسوسی در برابر انواع مخاطرات داخلی و خارجی آسیب‌پذیر است. عوامل خارجی مانند جنگ‌ها، تحریم‌ها، تورم، بیماری‌های همه‌گیر، و اختلالات طبیعی مانند سیل و زلزله، ثبات و کارایی زنجیره‌های تأمین را تهدید می‌کنند. در داخل، مسائلی مانند اعتصابات، اختلالات تأمین‌کنندگان و سایر چالش‌های عملیاتی این آسیب پذیری‌ها را تشدید می‌کند. درک و کاهش این خطرات برای حفظ انعطاف‌پذیری و تداوم زنجیره‌های تأمین در ایران بسیار مهم

1. Cross Impact Balance Analysis

* نویسنده مسئول: جعفر قیدر خلجانی
تلفن: ۰۲۱-۱۲۲۹۴۵۱۴۱؛ پست الکترونیکی: kheljani@mut.ac.ir

است. اختلالات خارجی ازلحاظ تاریخی تأثیرات عمیقی بر زنجیره‌تأمین در ایران داشته است. به‌عنوان مثال، تنش‌های ژئوپلتیکی و تحریم‌های اقتصادی منجربه اختلالات قابل‌توجهی در زنجیره‌تأمین شده است که بر همه‌چیز از خرید مواد خام گرفته تا توزیع کالاهای نهایی تأثیر گذاشته است. این اختلالات اغلب منجربه افزایش هزینه‌ها، تأخیرها و کاهش قابلیت اطمینان می‌شود که می‌تواند اثرات آبشاری در سراسر زنجیره‌تأمین داشته باشد. بلایای طبیعی مانند سیل و زلزله با آسیب رساندن به زیرساخت‌ها و ایجاد مانع در شبکه‌های حمل‌ونقل این چالش‌ها را تشدید می‌کند که منجربه تشدید گلوگاه‌های عملیاتی می‌شود. اختلالات داخلی، ازجمله اعتصابات کارگری و مسائل مربوط به قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان، نیز نقش مهمی در بی‌ثبات کردن زنجیره‌تأمین ایفا می‌کنند. این عوامل داخلی می‌تواند منجربه توقف تولید، کمبود موجودی و افزایش هزینه‌های عملیاتی شود. شکاف تحقیقاتی موجود در زمینه تأثیر متقابل بین ریسک‌های خارجی و داخلی، چشم‌انداز ریسک پیچیده‌ای را ایجاد می‌کند که به استراتژی‌های مدیریت ریسک جامع نیاز دارد. وقوع ریسک اختلال می‌تواند اثرات اقتصادی، اجتماعی و سیاسی را به‌وجود بیاورد. برای نمونه تحریم می‌تواند باعث ایجاد مشکلات اقتصادی و تنش‌های سیاسی و نارضایتی‌های اجتماعی شود. طبق آمار بانک مرکزی ایران در ابتدای سال ۹۷ [۱] و هم‌زمان با خروج آمریکا از برجام و تشدید تحریم‌ها، ایران با یک جهش تورمی روبه‌رو شد به‌طوری‌که بسیاری از کالاهای اساسی به‌ویژه خودرو و مسکن با رشد قیمت بیش از ۲ برابری تا پایان سال و بیش از ۱۰ برابری تا آبان ماه سال ۱۴۰۲، روبه‌رو شدند. شرکت‌های خودروسازی که تا قبل از آن برای فروش محصولات خود طرح‌های تشویقی و اقساطی ارائه می‌کردند و مازاد تولید داشتند، با هجوم تقاضای مشتریان روبه‌رو شدند به‌طوری‌که محصولات خود را تا دو سال بعد پیش‌فروش نمودند. علاوه‌بر آن بعد از شیوع کرونا به‌طور عجیبی تقاضا برای ماسک افزایش یافت به‌طوری‌که مردم به‌شدت با کمبود ماسک مواجه شدند. با شیوع بیماری کرونا به‌دلیل تعطیلی عمومی شرکت‌های ماسک‌سازی با مشکل تأمین مواد اولیه و کارگر مواجه شدند. بنابراین از یک طرف تقاضا به‌شدت افزایش پیدا کرد ازطرفی تأمین‌کنندگان دچار اختلال شدند. یکی از شکاف‌های تحقیقاتی موجود این است که اختلالات علاوه‌بر این‌که ابتدای زنجیره‌تأمین را دچار اختلال می‌کنند و موجب اختلال تولیدکننده می‌شوند، در انتهای زنجیره نیز با افزایش تقاضا اختلال دیگری را به تولیدکننده وارد می‌کنند. استفاده از ابزارهای ارزیابی ریسک پویا مانند شبکه‌های بیزی می‌تواند بینش‌های جدید و کاربردی را در مورد سناریوهای ریسک درحال تحول فراهم کند و شیوه‌های مدیریت ریسک سازگارتر و پاسخ‌گوتر را امکان‌پذیر سازد. با استفاده از ابزارها و روش‌شناسی پیشرفته ارزیابی ریسک، کسب‌وکارها می‌توانند تاب‌آوری زنجیره‌تأمین خود را افزایش دهند و از تداوم و ثبات خود در مواجهه با چالش‌های متنوع و غیرقابل پیش‌بینی اطمینان حاصل کنند. یکی از رویکردهای امیدوارکننده برای کاهش این خطرات، استفاده از شبکه‌های بیزی است. شبکه‌های بیزی با درنظر گرفتن اثرات و وابستگی‌های متقابل بین عوامل خطر مختلف، رویکرد جامع‌تری نسبت به مدیریت ریسک ارائه می‌کنند. این امر برای درک اثرات آبشاری که یک اختلال در یک بخش از زنجیره‌تأمین می‌تواند در کل شبکه ایجاد کند، بسیار مهم است. با به‌دست آوردن این روابط پیچیده، شبکه‌های بیزی ارزیابی دقیق‌تری از ریسک‌های زنجیره‌تأمین ارائه می‌کنند و کسب‌وکارها را قادر می‌سازد تا منابع را به‌طور مؤثرتری تخصیص دهند و تلاش‌های کاهش ریسک خود را اولویت‌بندی کنند. درنتیجه، استفاده از شبکه‌های بیزی می‌تواند پیشرفت قابل‌توجهی در زمینه مدیریت ریسک زنجیره‌تأمین به‌همراه داشته باشد. این شبکه‌ها با ارائه یک چارچوب ساختاریافته و پویا برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها و وابستگی‌های متقابل، بینش‌های ارزشمندی را ارائه می‌کنند. باتوجه‌به مطالبی که بیان شد نوآوری این مقاله هم در ساختار مفهومی و هم در مدل برنامه‌ریزی تصادفی مختلط عدد صحیح دوهدفه پیشنهادی است، که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود: ۱- مدل‌سازی مفهومی اثر برهم کنش اختلالات ابتدای زنجیره برروی هم و همچنین اثر آن در انتهای زنجیره بر روی تقاضا (عدم استقلال ریسک‌ها) و مدل‌سازی آن با شبکه بیزی برای محاسبه تقاضای برآورده نشده درصورت وقوع اختلالات. ۲- درنظرگرفتن رابطه تقاضا و نرخ تورم برای پیش‌بینی تقاضا. ۳- تعریف مفهوم جدید سطح تاب‌آوری برای مشارکت تولیدکننده و تأمین‌کننده برای افزایش تاب‌آوری و سفارش‌دهی برمبنای قیمت سطح تاب‌آوری ۴- درنظرگرفتن قابلیت اطمینان برای تأمین‌کنندگان. ۵- حداکثر کردن رضایت مشتری به‌صورت ضمنی. در ادامه در بخش ۲ کارهای صورت گرفته در ادبیات موضوع مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۳ به بیان مسأله، شرح نوآوری‌های این تحقیق و موضوعات موردنیاز برای دستیابی به راه‌حل پرداخته می‌شود و مدل ریاضی مسأله ارائه می‌شود. در بخش ۴ مطالعه موردی و تحلیل حساسیت مورد بحث قرار می‌گیرد. نهایتاً، در بخش ۵ به نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای کارهای آینده پرداخته می‌شود.

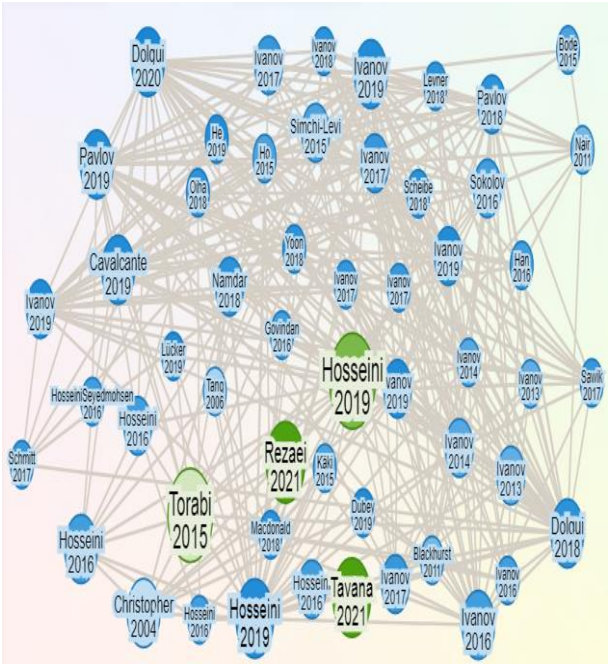
۲. مرور ادبیات

تاب‌آوری یک مفهوم چندرشته‌ای است که در رشته‌های مختلف مانند جامعه‌شناسی، بوم‌شناسی، مهندسی، و اقتصاد با کاربردهایی که شامل مدیریت بلایا، توسعه پایدار، بازسازی زیرساخت‌ها، واکنش اضطراری و مدیریت ریسک زنجیره‌تأمین می‌شود، مورد مطالعه قرار گرفته است [۲]. بسیاری از کارهای موجود در زمینه تاب‌آوری زنجیره‌تأمین کیفی هستند و تعداد محدودی مدل‌های کمّی عملکرد تاب‌آوری زنجیره‌تأمین یا اثرات سیاست‌های کاهش ریسک مختلف برای دستیابی به تاب‌آوری در زنجیره‌تأمین را بررسی می‌کنند [۲]. کائور و سینگ [۳] یک برنامه عدد صحیح مختلط (MIP) را برای بهینه‌سازی تخصیص سفارش‌های چنددوره‌ای و چندموردی به تأمین‌کنندگان به‌گونه‌ای پیشنهاد می‌کند که هزینه کلی و خطر اختلال به‌طور هم‌زمان به حداقل برسد. بدون هرگونه اختلال ازطرف عرضه یا تقاضا،

مدل ترکیبی چندمرحله‌ای با تخصیص سفارشات اضطراری، تأثیر اقتصادی خود را کاهش می‌دهد، بنابراین، تداوم عملیات تجاری را تضمین می‌کند. پرکوهی و همکاران [۴] با شناسایی معیارهای تاب‌آوری و طبقه‌بندی آن‌ها به‌عنوان تقویت‌کننده یا کاهش‌دهنده، چارچوب انتخاب تأمین‌کننده و تقسیم بندی آن‌ها را پیشنهاد کرده‌اند. آن‌ها از روش DEMATEL خاکستری و وزن افزودنی ساده خاکستری استفاده کردند. رضایی و همکاران [۵] یک چارچوب برای انتخاب تأمین‌کنندگان قابل اعتماد و تخصیص سفارش ارائه کردند که با درنظر گرفتن استراتژی‌های کاهش ریسک و هماهنگی بین خریدار و تأمین‌کننده، مزایای زنجیره‌تأمین را افزایش می‌دهد. آن‌ها مسأله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش را در یک زنجیره‌تأمین متمرکز با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلط بهینه کردند. این استراتژی‌های محافظتی عبارتند از: تأمین‌کنندگان پشتیبان، ذخیره ظرفیت اضافی، انبارهای اضطراری و پراکندگی جغرافیایی. همچنین با درنظر گرفتن روش تجزیه و تحلیل حالت شکست و اثرات و محدودیت عددی اولویت ریسک، قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان را بررسی کردند. محمد و همکاران [۶] مسأله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش را با درنظر گرفتن معیارهای پایداری و رویکرد بهینه‌سازی مورد مطالعه قرار دادند. کلنر و اوتز [۷]، با درنظر گرفتن توابع هدف هزینه، پایداری و ریسک، مسأله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش را مورد بررسی قرار دادند. ماری و همکاران [۸] معیارهای کیفی را برای انتخاب تأمین‌کنندگان تاب‌آور در یک محیط فازی توسعه دادند و با ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه به سفارشات پاسخ دادند. رضایی و همکاران [۹] و [۱۰] با ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری و مدل‌سازی ریاضی، مسأله انتخاب تأمین‌کننده ناب و تخصیص سفارش را توسعه دادند. خوش‌فطرت و همکاران [۱۱] انتخاب پایدار و تخصیص سفارشات را با تورم و ویژگی‌های ریسک در یک محیط فازی یکپارچه کردند. موضوع انتخاب تأمین‌کنندگان سبز و تعیین سفارش بهینه توسط فنگ و گونگ [۱۲] با ترکیب روش وزن آنتروپی زبانی و برنامه‌ریزی چندهدفه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به‌طور مشابه، رویکردهای ذکر شده نیز در مقاله بیکی و همکاران [۱۳] برای انتخاب تأمین‌کنندگان پایدار و تخصیص تقاضا به آن‌ها باهدف حداقل کردن هزینه کل و انتشار کربن و حداکثر کردن ارزش خرید مطالعه شده است. محمد و همکاران [۱۴] چارچوبی ترکیبی از تصمیم‌گیری و روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی را برای انتخاب تأمین‌کنندگان تاب‌آور سبز و تعیین تقاضا به آن‌ها ارائه کردند. بختیاری توانا و همکاران [۱۵] در مطالعه خود به انتخاب مجموعه‌ای از تأمین‌کنندگان تاب‌آور و تخصیص بهینه تقاضا در یک زنجیره‌تأمین خودرو تحت ریسک پرداختند. برای این منظور، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای دوهدفه ارائه می‌دهند. مدل پیشنهادی شامل یک تابع هدف برای درنظر گرفتن عملکرد تحویل تأمین‌کننده به‌عنوان یکی از معیارهای انتخاب تأمین‌کننده تاب‌آور است. همچنین از روش خوشه‌بندی k-means برای خوشه‌بندی و کاهش تعداد سناریوهای اختلال استفاده می‌کنند. به‌دلیل عدم قطعیت تقاضا، از رویکرد برنامه‌نویسی با محدودیت شانس استفاده شده است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی اضطراری می‌تواند اثر مخاطرات اختلال را کاهش دهد و استراتژی پراکندگی جغرافیایی (افزایش فاصله) زنجیره‌تأمین در کاهش اثرات اختلالات زیست‌محیطی مهم است. کائور و سینگ [۱۶] یک مدل ترکیبی چن مرحله‌ای را برای تقسیم‌بندی تأمین‌کننده یکپارچه، انتخاب و تخصیص سفارش با درنظرگرفتن ریسک‌ها و اختلالات پیشنهاد می‌کنند. همچنین یک برنامه عدد صحیح مختلط (MIP) را برای بهینه‌سازی تخصیص سفارش‌های چنددوره‌ای و چندموردی به تأمین‌کنندگان پیشنهاد می‌کند که هزینه کلی و خطر اختلال به‌طور هم‌زمان به حداقل برسد. لیو و همکاران [۱۷] در مقاله خود اشاره می‌کنند انتخاب تأمین‌کننده و ارزیابی خطر اختلال، توجه روزافزونی را به‌خود جلب کرده است. بااین‌حال، بیشتر کارهای موجود به‌طور جداگانه بر انتخاب تأمین‌کننده و ارزیابی ریسک اختلال تمرکز دارند. آن‌ها به بررسی یک مسأله انتخاب تأمین‌کننده و ارزیابی ریسک اختلال تحت اثر امواج به‌صورت یکپارچه می‌پردازند. هدف به حداقل رساندن مجموع وزنی احتمال مختل شده و هزینه کل برای سازنده است. برای این مسأله، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی تصادفی جدید ترکیب شده با شبکه بیزی (BN) فرموله شده است. محمد و همکاران [۶] یک رویکرد جدید برای ارزیابی تأمین‌کننده ارائه کردند که مقدار سفارش بهینه را از هر تأمین‌کننده باتوجه‌به ویژگی‌های سبز بودن و تاب‌آوری تخصیص می‌دهد. یک چارچوب یکپارچه که معیارها و زیرمعیارهای کسب‌وکار سنتی، سبز بودن و تاب‌آوری را درنظر می‌گیرد. آن‌ها از وزن‌دهی و رتبه بندی معیارها و تأمین‌کنندگان با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و شباهت به راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS) برای به‌کارگیری در یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه توسعه‌یافته برای تخصیص سفارش استفاده کردند. شائو و همکاران [۱۸] در مقاله خود مدلی را پیشنهاد می‌کنند که هدف آن حل مسأله انتخاب تأمین‌کننده پایدار و تخصیص سفارش با درنظر گرفتن اختلال عرضه در دوران COVID-19 است. این کار را با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی چندمرحله‌ای چندهدفه غیرخطی در مراحل مختلف توسعه و گسترش همه‌گیری انجام می‌دهند. ژائو و همکاران [۱۹] به ارائه یک رویکرد دومرحله‌ای برای طراحی یک مدل جدید انتخاب تأمین‌کننده پایدار-تاب‌آور و تخصیص سفارش پرداختند. در مرحله اول، یک سیستم ارزیابی تأمین‌کننده با ترکیب نظریه تصمیم‌گیری راف و روش توسعه‌یافته VIKOR ایجاد می‌شود. سپس، یک مدل ریاضی چندهدفه غیرخطی برای انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش در مرحله دوم با استفاده از نتایج ارزیابی تأمین‌کننده به‌دست آمده در مرحله قبل توسعه می‌یابد. تقوی و همکاران [۲۰] به انتخاب تأمین‌کننده تاب‌آور سبز و مسیریابی وسایل نقلیه (VRP) در شرایط وقوع اختلال در شبکه حمل‌ونقل برای سرویس‌دهی به تقاضای مشتریان و استفاده از ارزش شرطی در معرض خطر (CVaR) به‌عنوان یک معیار ریسک پرداختند. نظری-شیرکوهی

و همکاران [۲۱] یک رویکرد جدید مبتنی‌بر معیارهای تحویل، کیفیت، قیمت، سطح فناوری و معیارهای تاب‌آوری برای انتخاب تأمین‌کننده با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌های عدد (Z-DEA) Z و شبکه عصبی مصنوعی پیشنهاد کردند. چن و همکاران [۲۲] یک مدل زنجیره‌تأمین ساخت‌وساز چندمحصولی و چنددوره‌ای که ظرفیت تأمین‌کننده و عدم قطعیت‌های تقاضای مواد را محاسبه می‌کند و تاب‌آوری زنجیره را افزایش می‌دهد ارائه کردند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند اگرچه نگهداری موجودی پرهزینه است، ولی عدم قطعیت‌های مالی ناشی از تقاضای متفاوت پروژه را کاهش می‌دهد. عمر و ویلسون [۲۳] در زنجیره‌های تأمین مواد غذایی در جنوب آسیا به بررسی عملکرد عملیات لجستیکی منابع تاب‌آور در هنگام بلایای طبیعی و سایر اختلالات پرداختند و بیان می‌کنند عملیات لجستیک نقش کلیدی در دستیابی به تاب‌آوری زنجیره‌تأمین دارد. لو و همکاران[۲۴] تأثیر حاکمیت زنجیره‌تأمین[1] (SCG)، بر تاب‌آوری زنجیره‌تأمین (SCR) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد SCG بر SCR تأثیرگذار است و قابلیت پردازش اطلاعات نقش میانجی را دراین‌بین بازی می‌کند. مدرس و همکاران [۲۵] تأمین‌کنندگان را براساس کیفیت، قابلیت اطمینان تحویل و کاهش درصد بازگشت مواد اولیه، از دیدگاه فروشنده انتخاب می‌کنند. از بهترین بدترین رویکرد بیزی (BWM)[2] برای رتبه‌بندی معیارها و تکنیک فازی برای ترتیب اولویت براساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل (FTOPSIS) استفاده می‌کنند. اجها و همکاران [۲۶] انتشار ریسک در زنجیره‌تأمین اندازه‌گیری با استفاده از نظریه شبکه بیزی برای تحلیل شبکه چندسطحی در مواجه با اختلالات هم‌زمان را بررسی کردند. اثر موجی اختلال گره با استفاده از معیارهایی مانند شکنندگی، سطح سرویس‌دهی، هزینه موجودی و فروش ازدست‌رفته ارزیابی می‌شود. آن‌ها یک رویکرد اندازه‌گیری جامع برای پیش‌بینی رفتار پیچیده‌ی انتشار ریسک جهت بهبود مدیریت ریسک زنجیره‌تأمین ارائه می‌دهند. نیک نژاد و زگردی [۲۷] به محاسبه احتمال ریسک‌ها و تعیین اهمیت آن‌ها در زنجیره‌تأمین نفت و گاز پرداختند. آن‌ها از یک رویکرد پویا با استفاده از شبکه بیزی برای ارزیابی احتمال ریسک‌های زنجیره‌تأمین نفت ایران استفاده کردند. یافته‌های مقاله آن‌ها نشان می‌دهد ریسک‌های تأثیرگذار اصلی شامل بحران اقتصادی، هزینه‌های مقررات یا سیاست‌ها، رهبری سازمانی و مسائل فناوری اطلاعات است.

لیو [۲۸] به بررسی استفاده از شبکه‌های بیز دینامیک برای ارزیابی قابل اعتماد ریسک در شبکه‌های زنجیره‌تأمین می‌پردازد. او بیان می‌کند افزایش پیچیدگی زنجیره‌های تأمین، نقش شبکه‌های بیز دینامیک در ایجاد درک قوی و جامع از عوامل ریسک به‌طور فزاینده‌ای افزایش داده است و شبکه‌های بیز دینامیک به‌عنوان یک رویکرد تحول‌آفرین در حمایت از ارزیابی ریسک مؤثر است. بوگرت و لاچس [۲۹] اثرات هم‌افزایی ترکیبی از مدل‌سازی مبتنی بر عامل و شبکه‌های بیزی که بنابه گفته آن‌ها قبلاً در ادبیات مورد توجه قرار نگرفته است، بررسی کردند و یک روش‌شناسی تحلیل ریسک که روابط پیچیده سناریوهای ریسک مختلف در شبکه‌های تأمین مختل شده را ثبت می‌کند ارائه کردند. این روش هم انتشار ریسک روبه‌جلو و هم روبه‌عقب و پیامدهای مستقیم و غیرمستقیم ریسک را به روشی که برای مدیریت به‌راحتی قابل درک است، ارائه می‌دهد. باتوجه‌به مرور ادبیات انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که اختلالاتی مانند جنگ، تحریم، تورم و پاندمی و تأثیر آن‌ها در تشدید اختلالات زنجیره با اثر متقابل در ابتدای زنجیره بر تأمین‌کنندگان و تولیدکننده و همچنین بر تقاضا در انتهای زنجیره یا به‌طور کلی اثر موجی آن‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است. ازطرفی مدل‌های ریاضی کمی برای انتخاب تأمین‌کننده تاب‌آور و تخصیص سفارش بهینه، بسیار محدود است و غالباً از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده است. همچنین در مدل‌های ریاضی نرخ تورم در مدل وجود ندارد. براساس دانش ما در ادبیات موضوع، مفهوم تعریف سطح تاب‌آوری تأمین‌کنندگان و مشارکت و اتحاد تأمین‌کننده و تولیدکننده براساس قیمت سطح تاب‌اوری برای افزایش آن وجود ندارد و برای اولین‌بار در این مقاله مطابق بخش ۳-۱ تعریف شده است. شکل (۱) شبکه ارتباطی کارهای انجام شده توسط نویسندگان مطرح در زمینه انتخاب تأمین‌کننده تاب‌آور را نشان می‌دهد. همچنین در جدول (۱) کارهای صورت گرفته در مرور ادبیات با مقاله حاضر مقایسه شده است.



شکل (۱). نویسندگان مطرح در حوزه تأمین‌کننده تاب‌آور

1. Supply Chain Governance

2. Bayesian Best Worst Approach

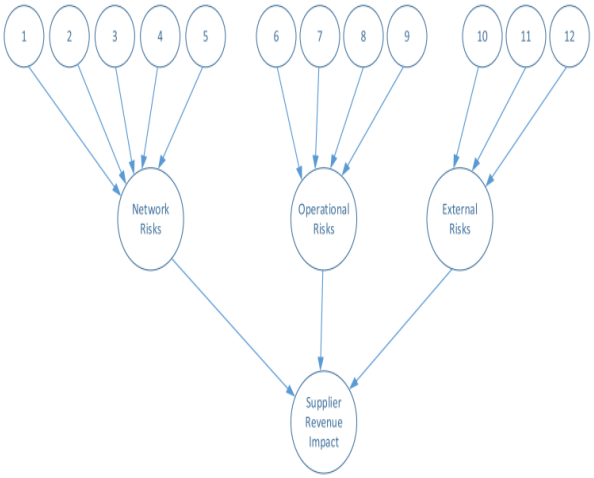
جدول (۱). مقایسه کارهای صورت گرفته در مرور ادبیات با این پژوهش

نویسندگان	زنجیره‌تأمین	انتخاب تأمین‌کننده	کمی: خطی	کمی: غیرخطی	کیفی	تعیین اندازه سفارش	معیارهای تاب‌آوری	ریسک‌های اختلال	سطح تاب‌آوری	حداقل‌سازی هزینه	نرخ تورم	سطح سرویس‌دهی	شبکه بیزی	افزایش فاصله جغرافیایی	قابلیت اطمینان تأمین‌کننده	اختلال جنگ، تحریم، تورم و پاندمی	سناریوسازی	تأثیر اختلالات زنجیره بر تقاضا
کائور و سینگ [۳]	✓	✓	✓			✓												
پرکوهی و همکاران [۴]	✓	✓			✓		✓											
رضایی و همکاران [۵]	✓	✓		✓		✓									✓			
محمد و همکاران [۶]	✓	✓	✓			✓												
کلنر و اوتز [۷]	✓	✓	✓			✓												
ماری و همکاران [۸]		✓	✓		✓	✓												
رضایی و همکاران [۹]	✓	✓	✓			✓												
خوش‌فطرت [۱۱]	✓	✓		✓		✓					✓							
فنگ و گونگ [۱۲]	✓	✓		✓		✓												
بیکی و همکاران [۱۳]	✓	✓		✓		✓												
محمد و همکاران [۱۴]	✓	✓	✓			✓	✓											
بختیاری توانا [۱۵]	✓	✓		✓		✓	✓	✓						✓			✓	
کائور و سینگ [۱۶]	✓	✓	✓			✓		✓										
لیو و همکاران [۱۷]	✓	✓		✓		✓		✓					✓					
شائو و همکاران [۱۸]	✓	✓		✓		✓		✓										
ژائو و همکاران [۱۹]	✓	✓		✓		✓	✓											
تقوی و همکاران [۲۰]	✓	✓		✓		✓	✓	✓										
نظری-شیرکوهی [۲۱]	✓	✓			✓		✓	✓										
چن و همکاران [۲۲]	✓	✓		✓			✓	✓										
عمر و ویلسون [۲۳]	✓	✓		✓			✓	✓										
لو و همکاران [۲۴]	✓	✓			✓		✓	✓										
مدرس و همکاران [۲۵]	✓	✓					✓	✓					✓		✓			
اجها و همکاران [۲۶]	✓							✓					✓					
نیک نژاد و زگردی [۲۷]	✓							✓					✓					
لیو [۲۸]	✓							✓					✓					
بوگرت و لاچس [۲۹]	✓							✓					✓				✓	
این پژوهش	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

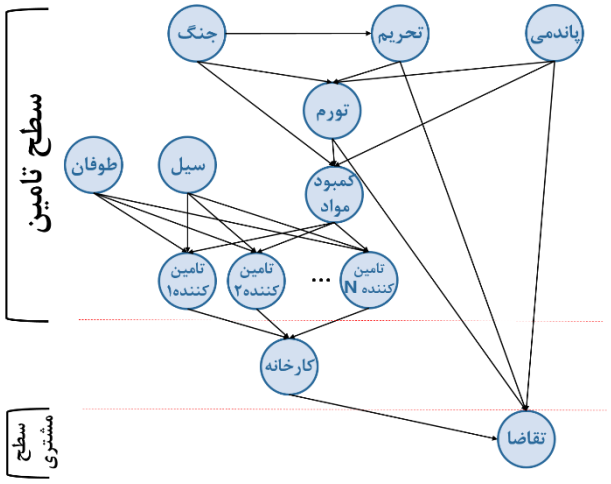
۳. بیان مسأله و مدل‌سازی

حسینی و همکاران [۳۰] در مقاله مروری بیان می‌کنند یک شکاف تحقیقاتی عمده در زمینه مدیریت ریسک SC، تأثیر وابستگی متقابل ریسک‌های مختلف بر عملکرد SC است. بنابراین به‌منظور بررسی انتشار ریسک و اختلال علاوه‌بر بررسی نوع و ماهیت ریسک‌ها و اختلالات، نحوه اثر آن‌ها بر روی اجزای زنجیره نیز با مدل‌های مفهومی

و ساختاری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بنابراین هم ماهیت و نوع ریسک از درجه اهمیت برخوردار است هم شبکه ارتباطی مسأله و تأثیر وابستگی‌ها برای ایجاد مدل مفهومی و ساختاری بسیار اهمیت دارد. حسینی و همکاران [۳۰]، در یک مقاله مروری به بررسی کارهای صورت گرفته در حوزه تاب‌آوری و اثر امواج با شبکه‌های بیزی پرداخته‌اند. آن‌ها در مقاله خود به این نکته اشاره می‌کنند که «آسیب‌پذیری و قابلیت بازیابی SCها به عوامل زیادی مانند پیچیدگی و ساختار آن‌ها بستگی دارد». این اختلالات می‌تواند از ابتدای زنجیره‌تأمین شروع شود و از تأمین به تولید و از تولید به توزیع و درنهایت به مشتری منتقل گردد و باعث ایجاد نارضایتی در مشتری گردد. ازطرفی همین اختلالات مطرح شده در ابتدای شبکه می‌توانند به‌طور مستقیم و فارغ از تأثیر آن در طول شبکه در انتهای شبکه نیز تأثیر گذاشته و در نیاز و علاقه مشتری نیز تغییر ایجاد کنند و میزان تقاضا را افزایش یا کاهش دهند که همین تغییر تقاضا می‌تواند ریسک دیگری را به شبکه وارد نمایند و درنهایت منجربه نارضایتی بیشتر مشتری گردد. بنابراین درک و تعریف مناسب همین مفهوم و ساختار شبکه بسیار با اهمیت است و نوع مدل‌سازی برای مقابله با ریسک‌ها را بسیار سخت و پیچیده می‌کند که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۲) یک مدل متداول در بین کارهای صورت گرفته تا کنون است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید هریک از عوامل اختلال به‌طور مستقل بر تولیدکننده اثر می‌گذارند. اما همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است فرض می‌شود که اختلالات علاوه‌بر این‌که به‌طور مستقیم بر روی تأمین‌کنندگان تأثیر می‌گذارند، می‌توانند بر سایر عوامل هم تأثیرگذار باشند یا حتی اختلالات ابتدای زنجیره می‌توانند بر تقاضا یا مشتری که در انتهای زنجیره است تأثیرگذار باشند. همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است تحریم می‌تواند باعث ایجاد تورم شود. ازطرفی جنگ هم می‌تواند باعث ایجاد تورم شود. اگر جنگ شروع شود تحریم‌های یک کشور بیشتر هم می‌شود. شیوع بیماری‌ها موجب کمبود مواد اولیه و ایجاد تورم می‌شود و تقاضا برای یک محصول پزشکی یا درمانی را می‌تواند به‌شدت افزایش دهد.



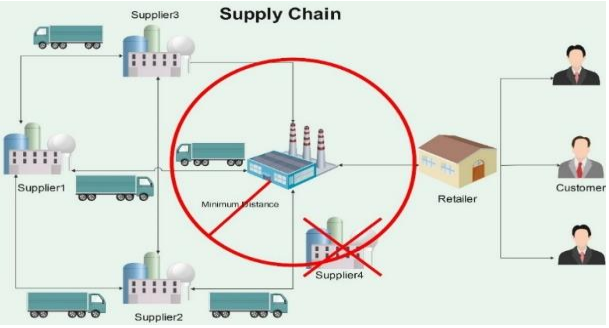
شکل (۲). مدل ساختاری ریسک‌های مقالات گذشته [۲۶]



شکل (۳). مدل ساختاری مورد بررسی در این مقاله

همان‌طور که از مدل ساختاری این مقاله مشخص است و با جهت فلش هم نمایش داده شده است تورم بر روی کمبود مواد اثرگذار است و موجب افزایش احتمال وقوع کمبود مواد اولیه می‌شود. افزایش احتمال کمبود مواد اولیه احتمال اختلال یا شکست تأمین‌کنندگان ۱ تا N را افزایش می‌دهد. از طرفی این تأمین‌کنندگان در معرض اختلالات طبیعی دیگری مانند سیل و طوفان هم قرار دارند که در صورت وقوع می‌تواند موجب از دسترس خارج شدن تأمین‌کنندگان شود و ریسک تأمین کالا را برای کارخانه تولیدکننده افزایش دهد. تقاضای ارضا نشده در انتهای زنجیره از تحریم، پاندمی، تورم و شکست کارخانه تولیدکننده تأثیر می‌پذیرد و وقوع آن‌ها موجب افزایش عدم ارضای تقاضا می‌شود. با افزایش احتمال وقوع تحریم، پاندمی و تورم در جامعه هجوم مردم برای تبدیل ریال به کالا برای در امان ماندن از بی‌ارزش شدن پول در دست افزایش می‌یابد و موجب افزایش تقاضای ارضا نشده می‌شود. از طرفی کارخانه تولیدکننده هم که در معرض همین اختلالاتی است که توضیح داده شد، احتمال اختلال و عدم امکان تأمین کالای مورد نیاز مشتری را افزایش می‌دهد که این امر هم موجب ایجاد تقاضای ارضا نشده می‌شود. این تقاضای ارضا نشده به‌وسیله شبکه بیزی مدل‌سازی و محاسبه می‌شود و به‌عنوان یک پارامتر در مدل ریاضی مسأله بکار گرفته می‌شود و به واقعی‌تر شدن نتایج کمک می‌کند. نحوه تبدیل این مدل مفهومی به شبکه بیزی و پیاده سازی آن در نرم‌افزار در بخش ۳-۲ توضیح داده می‌شود. بنابراین در این مقاله علاوه‌بر اینکه اختلالات مستقل درنظر گرفته می‌شود، وابستگی بین آن‌ها نیز مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای مقابله و کاهش اثر اختلالات می‌توان تاب‌آوری در زنجیره‌تأمین را افزایش داد. برخی از مهم‌ترین استراتژی‌های تاب‌آوری عبارتند از: منبع‌یابی چندگانه، تقویت تسهیلات، توسعه ظرفیت تسهیلات، تغییر مسیرهای حمل‌ونقل، برون‌سپاری، نگهداری موجودی اورژانسی و غیره [۳۱]. یکی دیگر از این راه‌ها تمرکززدایی جغرافیایی است. اگر همه تأمین‌کنندگان و تولیدکننده در یک منطقه جغرافیایی باشند، وقوع بلایای طبیعی در آن منطقه، می‌تواند کل زنجیره را دچار فروپاشی

کند. لذا امروزه برای جلوگیری از وقوع چنین حوادثی سعی بر تمرکززدایی و پراکنده کردن تأمین‌کنندگان دارند. به‌عنوان مثال پس‌از زلزله سونامی ژاپن به‌دلیل این‌که بسیاری از تأمین‌کنندگان قطعات خودروی تویوتا و نیسان همگی در منطقه اختلال قرار داشتند، نتوانستند تقاضا را تأمین کنند. تویوتا از آن زمان به‌جای قرار گرفتن در یک منطقه با فاصله کم سعی کرد با تأمین‌کنندگانی که ازنظر جغرافیایی پراکنده هستند همکاری کند [۳۲]. برای این منظور یک پارامتر به‌نام حداقل فاصله تعیین می‌شود که مشخص می‌کند فاصله تأمین‌کنندگان با یکدیگر و فاصله هریک از تأمین‌کنندگان با تولیدکننده نباید کمتر از حداقل فاصله باشد [۳۲]. باتوجه‌به مطالب گفته شده، همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌کنید تأمین‌کننده ۴ به‌دلیل این‌که در داخل شعاع حداقل فاصله قرار دارد از لیست تأمین‌کنندگان حذف می‌شود. ازطرفی این پراکندگی تأمین‌کنندگان می‌تواند هزینه‌های حمل‌ونقل را به‌شدت افزایش دهد. بنابراین برقراری تعادل بین افزایش فاصله تأمین‌کنندگان و درعین‌حال کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و انتخاب تأمین‌کننده ارزان‌تر بسیار مهم است.



شکل (۴). نمایش حداقل فاصله بین تأمین‌کنندگان

براین اساس مسأله این است که یک زنجیره‌تأمین سه‌سطحی وجود دارد. زنجیره‌تأمین در معرض اختلالات داخلی مانند تورم، کمبود مواد اولیه و پاندمی، اختلالات خارجی مانند جنگ و تحریم، اختلالات طبیعی مانند زلزله و سیل قرار دارد. اختلالات خارجی می‌توانند بر یکدیگر و روی اختلالات داخلی مطابق شکل (۳) اثرگذار باشند. میزان تأثیر آن‌ها با استفاده از شبکه بیزی مدل‌سازی و حل می‌شود. خریدار به‌دنبال سفارش کالا از تأمین‌کننده با تاب‌آوری بالاتر درازای هزینه کمتر است. برای این منظور تأمین‌کننده یک مقدار ثابت برای افزایش تاب‌آوری پیشنهاد نمی‌دهد بلکه سطوح تاب‌آوری که براساس میزان سفارش خریدار افزایش پیدا می‌کند ارائه می‌دهد. به این معنی که اگر خریدار سفارش بیشتری بدهد برای تأمین این میزان در شرایط وقوع اختلال باید اقدامات بیشتری و پرهزینه‌تری انجام شود، پس این هزینه روی قیمت کالا خود را نشان می‌دهد. قیمت کالا در این شرایط با افزایش مقدار سفارش بیشتر می‌شود. براین اساس با زیاد شدن سطح تاب‌آوری تأمین‌کننده هزینه کالای سفارش داده شده در سطح بالاتر هم افزایش می‌یابد. تقاضا به دوصورت درنظر گرفته می‌شود. نوع اول تقاضایی است که در ابتدای دوره برنامه‌ریزی باتوجه‌به نرخ تورم پیش‌بینی می‌شود. نوع دوم به‌وسیله مدل‌سازی در شبکه بیزی پس‌از وقوع اختلالات در سناریوهای مختلف به‌دست می‌آید. تقاضای نوع اول به‌وسیله قیمت پیشنهادی کالا در حالت عادی سفارش‌دهی می‌شود. تقاضای نوع دوم چون با وقوع اختلال ایجاد می‌شود براساس قیمت کالا در سطوح تاب‌آوری که توضیح داده شد سفارش‌دهی می‌گردد. برای کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و افزایش تاب‌آوری می‌توان بیش‌از تقاضای هر دوره سفارش داد و کالای اضافی را در انبار نگهداری کرد. برای افزایش رضایت مشتری سطح سرویس‌دهی تعریف شده است. این سطح سرویس‌دهی برای تقاضای نوع دوم که بر اثر وقوع اختلالات ایجاد می‌شود لحاظ می‌گردد و درصورت عدم ارضاء تقاضا جریمه درنظر گرفته می‌شود. چون این جریمه از جنس هزینه است، مدل سعی در کاهش تقاضای ارضا نشده دارد و درنتیجه به‌صورت ضمنی رضایت مشتری افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش جریمه، رضایت مشتری بیشینه می‌شود. برای افزایش تاب‌آوری باید پراکندگی تأمین‌کنندگان افزایش یابد. ازطرفی این افزایش پراکندگی باعث افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل می‌شود. باید با حفظ پراکندگی، تأمین‌کنندگانی انتخاب شوند که علاوه‌بر این‌که در مناطق جغرافیایی مختلفی قرار دارند باتوجه‌به قیمت و هزینه حمل‌ونقل مناسب کمترین هزینه کل را ایجاد نمایند. به‌طور خلاصه در این مقاله با درنظرگرفتن تأثیر اختلالات ابتدای زنجیره بر روی تقاضا در انتهای زنجیره به‌وسیله تحلیل شبکه بیزی، سعی شده است مدل‌سازی تصادفی انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش اقتصادی به‌منظور افزایش تاب‌آوری با استراتژی‌های افزایش قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان، افزایش سطح تاب‌آوری با مشارکت تولیدکننده در توانمندسازی تأمین‌کنندگان و بهبود سطح رضایت مشتری انجام شود.

۳-۱. سطح تاب‌آوری

ترابی و همکاران [۳۳] برای تقویت تأمین‌کنندگان در برابر اختلالات قطعی برق[1]، سیل[2]، زلزله، آتش‌سوزی[3] و سطح استحکامات[4] درنظر گرفتند. آن‌ها ۴ سطح را معرفی می‌کنند: سطح ۱ نشان‌دهنده خرید مولد برق یدکی[5] کافی است. سطح ۲ بازسازی[6] ساختمان تأمین‌کننده با بودجه A، سطح ۳ خرید ژنراتور برق و بازسازی ساختمان تأمین‌کننده با بودجه A است. سطح ۴ بازسازی ساختمان تأمین‌کننده با بودجه B (A < B) است. هرکدام از این سطوح می‌تواند بخشی از ظرفیت تأمین‌کننده را درصورت وقوع اختلال حفظ کند به‌جز سطح ۱ و ۳ که درصورت قطعی برق طرفیت تأمین‌کننده به‌دلیل خرید ژنراتور برق به‌طور ۱۰۰٪ حفظ می‌شود. به‌نظر می‌رسد این روش در دنیای واقعی کاربردی نداشته باشد یا حداقل کاربرد کمی داشته باشد چراکه ممکن است با تأمین‌کننده برای مدت محدودی همکاری شود

1. Power outage
2. Flood
3. Fire
4. Fortification level
5. Spare power generators
6. Revamping

یا باتوجه‌به قیمت و هزینه حمل‌ونقل، قصد خرید تعداد کمی کالا باشد. لذا برای واقعی‌تر کردن مسأله سطح تاب‌آوری برای تأمین‌کنندگان درنظر گرفته می‌شود. به این معنی که تأمین‌کنندگان برای تاب‌آور کردن خودشان باید هزینه کنند. این هزینه برروی تعداد کالایی که خریداری می‌شود سرشکن می‌شود. هرچه تعداد کالای سفارش داده شده بیشتر باشد تأمین‌کننده برای تاب‌آور کردن خود باید زیرساخت بیشتری را آماده‌سازی کند. این امر مستلزم هزینه بیشتر برای مقاوم‌سازی ساختمان، خرید ماشین‌آلات بیشتر، گسترش فضای کارخانه، خرید دستگاه ژنراتور برق و ... می‌باشد. در این شرایط خریدار یا تولیدکننده باتوجه‌به تقاضای خود و اهمیت تاب‌آوری تأمین‌کنندگانش، در افزایش سطح تاب‌آوری تأمین‌کنندگان مشارکت و همکاری می‌نماید. نتیجه این بازی برد-برد تاب‌آور شدن تأمین‌کنندگان و به‌طور کلی زنجیره‌تأمین و افزایش سطح رضایت مشتری است. برای نمونه تأمین‌کننده‌ای برای خرید [۱۰۰۰, ۱] کالا قیمت محصول خود را ۱۰۰ واحد پولی درنظر می‌گیرد. درصورتی‌که خریدار تعداد کالای بیشتری بخواهد و سفارش او در بازه [۱۰۰۰,۲۰۰۰] قرار داشته باشد قیمت هر واحد کالا به ۱۲۰ واحد پولی افزایش می‌یابد و همین‌طور برای تعداد کالای بیشتر قیمت افزایش پیدا می‌کند. در این مقاله برای اولین‌بار این مفهوم، تحت عنوان سطوح تاب‌آوری درنظر گرفته می‌شود. بنابراین انتخاب سطح بالاتری از تاب‌آوری تأمین‌کننده به‌معنی افزایش تاب‌آوری تأمین‌کننده و درنهایت افزایش تاب‌آوری زنجیره‌تأمین است.

۳-۲. شبکه‌های بیزی در مدل‌سازی ساختاری

شبکه‌های بیزی ابزار قدرتمندی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های ذاتی در عملیات زنجیره‌تأمین ارائه می‌دهند. با ترکیب داده‌های کمی و کیفی، این شبکه‌ها می‌توانند درک جامعی از عوامل مختلفی که موجب افزایش اختلالات زنجیره‌تأمین می‌شود، ارائه دهند. این امکان ارزیابی دقیق‌تر ریسک و تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند و کسب‌وکارها را قادر می‌سازد تا استراتژی‌های کاهش مؤثرتری توسعه دهند. یکی از مزیت‌های اصلی شبکه‌های بیزی توانایی آن‌ها در به‌روزرسانی احتمالات با دردسترس قرار گرفتن اطلاعات جدید است. این ویژگی پویا به‌ویژه در زمینه مدیریت زنجیره‌تأمین، جایی‌که شرایط می‌تواند به‌سرعت تغییر کند، ارزشمند است. شبکه‌های بیزی روشی بسیار قوی برای به تصویر کشیدن ارتباطات و تصمیم‌گیری براساس اطلاعات موجود هستند. BNها برای مدل‌سازی عدم قطعیت با تعیین توزیع احتمال مفید هستند. BN می‌تواند اطلاعات متخصصین از گذشته را ترکیب کند و اجازه استنتاج حتی با اطلاعات محدود را می‌دهد. یک شبکه بیز از تعدادی متغیر تصادفی به‌همراه روابطی که بین این متغیرها وجود دارد تشکیل شده است؛ که البته به‌ازای هر متغیر تصادفی جدولی از احتمالات شرطی نیز نگهداری می‌شود. فهم مجموعه داده‌هایی که حاوی تعداد زیادی متغیر وابسته به‌هم می‌باشند کاری دشوار و یا حتی غیرممکن به‌نظر می‌رسد. بنابراین به‌منظور ساده‌سازی فهم سیستم، مدل‌های گرافیکی مختلفی توسعه یافته است تا بتوانند ارتباطات بین متغیرها را به‌گونه‌ای خلاصه و در قالب یک گراف نمایش دهند. در بین این‌گونه مدل‌ها، شبکه‌های بیز در دهه‌های اخیر به‌صورت گسترده و در زمینه‌های مختلفی به‌کار گرفته شده است. قضیه بیز که به آن قانون بیز هم گفته می‌شود، در آمار و نظریه‌های احتمالی یک فرمول ریاضی است. از این فرمول برای تعیین احتمال شرطی رویدادها استفاده می‌شود. اساساً قضیه بیز، احتمال وقوع یک رویداد را براساس دانش قبلی از شرایطی که ممکن است مربوط به رویداد باشد، توصیف می‌کند. برای نمایش احتمال رخداد پیشامد A به شرط پیشامد B از نماد $P(A|B)$ استفاده می‌شود و به‌صورت «احتمال A به شرط B» خوانده می‌شود و شیوه محاسبه این احتمال به‌صورت زیر است:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)}{P(A)}$$

اگر A به $i=1,\ldots,n$ رویداد وابسته باشد، محاسبه احتمال وقوع A به‌شرط وقوع رویداد B_i به‌صورت زیر است:

$$P(A|B_i) = \frac{P(B_i|A)}{P(A)}$$

که در آن $p(A)$ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$p(A) = \sum_{I=1}^{n} p(A|B_i)p(B_i)$$

حال برای نشان دادن نحوه محاسبه احتمال اختلال یک تأمین‌کننده و نحوه تشکیل جدول احتمال شرطی (CPT)، مثال زیر ارائه می‌شود. تأمین‌کننده‌ای را درنظر بگیرید که می‌تواند به‌دلیل دو رویداد عمده اختلال، همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، مختل شود: رویداد ۱ (طوفان) با e_1 و رویداد ۲ (سیل) با e_2 و عدم وقوع رویداد با e_1 و e_2 نشان داده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، e_1 و e_2 گره‌های ریشه هستند که به‌ترتیب با احتمال ۲٪ و ۰/۵٪ رخ می‌دهند. این احتمالات را می‌توان ازطریق داده‌های تاریخی یا دانش متخصص یا ترکیبی از این دو به‌دست آورد. در این مقاله براساس نظر ۵ نفر از متخصصین این کار را انجام شده است.

جدول احتمال شرطی (CPT) اختلال تأمین‌کننده i در جدول (۲) نشان داده شده است که این جدول براساس نظر متخصصین آماده می‌شود. این جدول برای همه گره‌های مدل ساختاری مطرح شده در شکل (۳) تهیه شده است. طبق جدول (۲)، احتمال خرابی یک تأمین‌کننده به وقوع یا عدم وقوع رویدادهای مختل‌کننده بستگی دارد. به‌عنوان مثال، احتمال عدم تأمین توسط تأمین‌کننده i (وضعیت شکست $p(f_i)$) در صورت وقوع طوفان و عدم وقوع سیل ۲٪ است، درحالی‌که احتمال شکست تأمین‌کننده درصورت وقوع هم‌زمان هردو رویداد اختلال دهنده ۱۴٪ است.

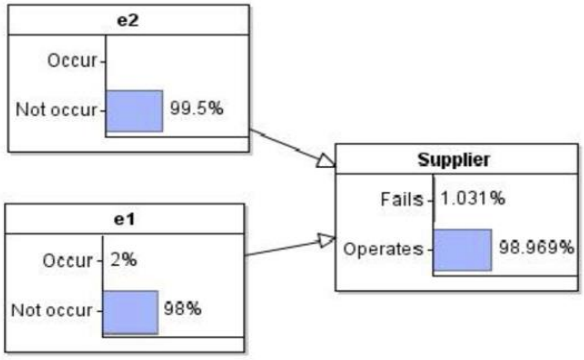
شکل (۵) نشان می‌دهد که احتمال اختلال تأمین‌کننده i برابر با ۱/۰۳۱٪ است، درحالی‌که تأمین‌کننده ممکن است با احتمال ۹۸/۹۶۹٪ به‌طور معمول فعالیت کند. احتمال اختلال تأمین‌کننده براساس قضیه بیز همان‌طور که در معادله زیر نشان داده شده است

محاسبه می‌شود:

$$p(f_i) = \sum_{e_2}\sum_{e_1} p(f_i \mid e_1 e_2) * \mathrm{p}(e_1) * \mathrm{p}(e_2) =$$
$$p(f_i \mid e_1 e_2) * \mathrm{p}(e_1) * \mathrm{p}(e_2) +$$
$$p(f_i \mid \sim e_1 e_2) * \mathrm{p}(\sim e_1) * \mathrm{p}(e_2) +$$
$$p(f_i \mid e_1 \sim e_2) * \mathrm{p}(e_1) * \mathrm{p}(\sim e_2) +$$
$$p(f_i \mid \sim e_1 \sim e_2) * \mathrm{p}(\sim e_1) * \mathrm{p}(\sim e_2)$$

جدول (۲). جدول احتمال شرطی اختلالات تأمین کننده i

طوفان	وقوع		عدم وقوع	
سیل	وقوع	عدم وقوع	وقوع	عدم وقوع
شکست i	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۱
کارکرد i	۰/۸۶	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۹



شکل (۵). مدل گرافیکی احتمالی برای محاسبه احتمال اختلال تأمین کننده تحت دو ریسک اختلال

مثال بالا برای روشن شدن روش تشکیل CPT و محاسبه احتمالات در شبکه بیزی است که برای مدل بیزی این مقاله از نرم‌افزار استفاده شده است که تمام این محاسبات به‌وسیله نرم‌افزار انجام خواهد شد. لذا باتوجه‌به مدل مفهومی ارائه شده در بخش‌های قبل مدل شبکه بیزی ایجاد می‌شود. برای حل مدل شبکه بیزی از نرم‌افزار Netica استفاده شد. خروجی نهایی تبدیل مدل مفهومی ساختاری به شبکه بیزی و انجام محاسبات گفته شده رسیدن به پارامتر تقاضای ارضا نشده و به‌کارگیری آن در مدل ریاضی مسأله است.

۳-۳. قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان

قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان می‌تواند به‌عنوان یک پارامتر بسیار مهم در استراتژی فعال[1] برای انتخاب تأمین‌کننده تاب‌آور مورد استفاده قرار بگیرد. این پارامتر به‌عنوان یک معیار مستقل در انتخاب تأمین‌کننده در مدل ریاضی استفاده می‌شود. بنابراین همکاری با یک تأمین‌کننده‌ای که شانس اختلال را در تولید خود کاهش دهد می‌تواند ترقیب کننده باشد. لذا قابلیت اطمینان را در مدل ریاضی مسأله با مفروضات زیر درنظر گرفته می‌شود.

۱) تأمین‌کنندگان براساس اختلالات خارجی یا داخلی با احتمال مشخص ازکار می‌افتند.

۲) احتمال اختلال از توزیع نمایی با پارامتر معلوم پیروی می‌کند.

۳) هزینه اختلال برای هریک از تأمین‌کنندگان معلوم و مشخص است.

برای محاسبه قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان ϑ_i را تعداد اختلالات در بازه زمانی ψ که برای تأمین‌کننده i اتفاق افتاده درنظر گرفته می‌شود. هزینه اختلال را با ϕ_i نمایش داده می‌شود. بنابراین هزینه اختلال اتفاق افتاده برای تأمین‌کننده i به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$Dist\ \mathrm{Cost} = \sum_i u_i \vartheta_i \phi_i \qquad (۱)$$

باتوجه‌به این‌که فاصله زمانی وقوع اختلالات از توزیع نمایی پیروی می‌کند، بنابراین تعداد وقوع اختلالات از توزیع پواسون با پارامتر λ_i پیروی می‌کند. بنابراین احتمال وقوع N_i اختلال در بازه زمانی ψ برای تأمین‌کننده i به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$p(\vartheta_i = N_i) = \frac{(\lambda_i \psi)\exp(\lambda_i \psi)}{N_i} \qquad (۲)$$

باتوجه‌به این‌که ماهیت اختلالات تأمین‌کننده i ماهیت تصادفی دارد از روش برنامه‌ریزی محدودیت شانس[2] استفاده می‌شود. در این روش محدودیت‌های تصادفی را در حداقل δ نگه می‌دارند که این مقدار توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود. در این روش متغیر تصادفی[3] ϑ_i با متغیر قطعی[4] N_i جایگزین می‌شود. برای اطمینان از این‌که در سطح δ تعداد اختلالات از N_i بیشتر نمی‌شود محدودیت شانس زیر به مدل اضافه می‌شود:

$$p(\vartheta_i \le N_i) \ge \delta \qquad (۳)$$

از معادلات بالا می‌توان نتیجه گرفت:

$$\sum_i \frac{(\lambda_i \psi)\exp(\lambda_i \psi)}{N_i} \ge \delta \qquad (۴)$$

که محدودیت زیر نیز به آن اضافه می‌شود:

$$N_i \ \text{ is integer } \forall\ \mathrm{i} \qquad (۵)$$

حال مشکل باقی‌مانده از روش محدودیت شانس غیرخطی بودن محدودیت (۴) است که با معرفی محدودیت زیر خطی می‌شود:

$$N_i \ge F^{-1}(\lambda_i \psi, \delta) \qquad (۶)$$

که F^{-1} معکوس تابع توزیع تجمعی پواسون[5] است.

همچنین معادله Dist Cost به‌علت ضرب u_i در ϑ_i غیرخطی است. برای خطی‌سازی متغیر کمکی[6] به‌صورت زیر تعریف می‌شود

$$w_i = u_i N_i \qquad (۷)$$

با اضافه کردن محدودیت زیر تابع هدف خطی می‌شود:

$$w_i \ge N_i - (1-u_i)M \qquad (۸)$$

1. Proactive strategy
2. Chance Constraint Programming (CCP) approach
3. Stochastic variable
4. Deterministic variable
5. Nverse of the cumulative poisson distribution
6. Auxiliary variable

بنابراین تابع هدف به‌صورت زیر تغییر می‌کند:

$$Dist\ \mathrm{Cost} = \sum_i w_i \phi_i \quad (۹)$$

۳-۴. ارائه مدل ریاضی مسأله

در این بخش ابتدا به بیان پارامترهای مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مسأله پرداخته می‌شود.

اندیس‌ها

i	اندیس تأمین‌کنندگان
E	اندیس سناریوی اختلال خارجی
t	اندیس دوره برنامه‌ریزی
m	اندیس سطوح تاب‌آوری
S	اندیس سناریوی اختلال داخلی

پارامترها

P_S	احتمال سناریوی S
d_{ij}	فاصله تأمین‌کننده i و j از یکدیگر
tr_{0j}	هزینه حمل‌ونقل از تأمین‌کننده j
Γ	جریمه هر واحد تقاضای برآورده نشده بعداز وقوع اختلال
ϖ	حداقل فاصله مجاز بین تأمین‌کنندگان
h_t	هزینه نگهداری کالا در دوره t
∂_t	تقاضای اولیه
α_0	نرخ تورم اولیه
θ_j	هزینه سفارش‌دهی به تأمین‌کننده j
τ_{it}^s	درصد ظرفیت باقی‌مانده تأمین‌کننده i در دوره t بعد از وقوع سناریوی اختلال s
Υ_i	حداقل اختلال تأمین‌کننده i
ϑ_i	تعداد اختلالاتی که برای تأمین‌کننده i در دوره t اتفاق می‌افتد
ψ	بازه زمانی مشخص
λ_i	نرخ اختلال مورد انتظار تأمین‌کننده i
q_{imt}	قیمت پیشنهادی تأمین‌کننده i در سطح m در دوره t
b_{imt}	حداقل کالای قابل خرید از تأمین‌کننده i در سطح m در دوره t
G_t	ظرفیت انبار در دوره t
φ^s	درصد تقاضای برآورده نشده درصورت وقوع اختلال تحت سناریوی s
cap_{it}	ظرفیت تأمین‌کننده i در دوره t
K	عدد بزرگ
ϕ_i	هزینه وقوع اختلال برای تأمین‌کننده i

متغیرهای تصمیم

u_i	اگر تأمین‌کننده i انتخاب شود ۱، در غیر این صورت صفر
W_i	تعداد اختلالات تأمین‌کننده i
ξ_t^s	تقاضای اضافی ایجاد شده در دوره t بعد از وقوع اختلال تحت سناریوی s
d_T	تقاضای تعدیل شده در دوره t
u_{ijt}	اگر تأمین‌کننده i و j هم‌زمان در دوره t انتخاب شوند
r_{ij}	اگر تأمین‌کننده i و j انتخاب شوند ۱، در غیر این صورت صفر
Ω_{it}^s	تعداد کالایی که برای تقاضای عادی از تأمین‌کننده i در دوره t تحت سناریوی s خریداری شده است
z_{imt}^s	تعداد کالای پشتیبان که از سطح m از تأمین‌کننده i در دوره t تحت سناریوی s خریداری می‌شود
y_{imt}^s	اگر از تأمین‌کننده i در سطح تاب‌آوری m در دوره t تحت سناریوی s خرید انجام گیرد ۱ در غیر این صورت صفر
F_t^s	تعداد کالایی که در دوره t تحت سناریوی s از تقاضای اضافی ایجاد شده ارضا نمی‌شود
$Serv_t^s$	سطح سرویس‌دهی در دوره t تحت سناریوی s
I_t^s	تعداد کالای نگهداری شده در دوره t تحت سناریوی s

۳-۴-۱. مدل بهینه سازی دوهدفه

همان‌طور که بیان شد یکی از اهداف مسأله حداکثر کردن فاصله بین تأمین‌کنندگان برای در امان ماندن از ریسک‌های اختلالات طبیعی است. برای این منظور تابع هدف زیر تعریف می‌شود:

$$GS = Z_1 = \max \sum_{i=1} \sum_{j=i+1} u_i u_j d_{ij} \quad (۱۰)$$

باتوجه‌به این‌که تابع هدف (۱۰) غیرخطی است ابتدا با تغییر متغیر زیر و تعریف محدودیت‌های جدید، تابع هدف خطی می‌شود:

$$r_{ij} = u_i u_j \quad (۱۱)$$

$$Z_1 = \max \sum_{i=1} \sum_{j=i+1} r_{ij} d_{ij} \quad (۱۲)$$

$$r_{ij} \le u_j \qquad \forall\, i,j \in n | i < j \quad (۱۳)$$

$$r_{ij} \le u_i \qquad \forall\, i,j \in n | i < j \quad (۱۴)$$

$$r_{ij} \ge u_i + u_j - 1 \qquad \forall\, i,j \in n | i < j \quad (۱۵)$$

پس‌از خطی‌سازی تابع هدف اول، مدل بهینه‌سازی دوهدفه برای انتخاب تأمین‌کننده تاب‌آور و تخصیص سفارش به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

$$GS = Z_{1E} = \max \sum_{i=1} \sum_{j=i+1} r_{ij} d_{ij} \quad (۱۶)$$

$$\begin{aligned} TC = Z_{2E} = \min \sum_S P_S \Big(& \sum_j \sum_t tr_{0j} u_{0jt} + \\ & \sum_S \sum_t \Gamma F_t^S + \sum_s \sum_i \sum_t p_{it} \Omega_{it}^s + \\ & \sum_s \sum_i \sum_m \sum_t q_{imt} z_{imt}^s + \sum_s \sum_t h_t I_t^s \Big) \\ & + \sum_i \sum_j \sum_t \theta_j u_{0jt} + \sum_i w_i \phi_i \end{aligned} \quad (۱۷)$$

توابع هدف: مسأله شامل دو تابع هدف است. معادله (۱۶) تابع هدف اول که فاصله بین تأمین‌کنندگان و پراکندگی جغرافیایی تأمین‌کنندگان است را حداکثر می‌کند. معادله (۱۷) تابع هدف دوم است که هزینه‌های حمل‌ونقل، خرید، اختلالات و نگهداری را حداقل می‌کند. بخش اول در جهت کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل است. بخش دوم تعداد کالایی که از تقاضای اضافی ارضا نمی‌شود را حداقل می‌کند

به‌عبارتی این بخش به‌صورت ضمنی سطح رضایت مشتری را حداکثر می‌کند که از نوآوری‌های مقاله است. بخش سوم هزینه خرید تقاضای عادی را لحاظ می‌کند. بخش چهارم هزینه خرید برای تقاضای مختل شده را محاسبه می‌کند. بخش پنجم و ششم هزینه‌های سفارش‌دهی و نگهداری را حداقل می‌کنند. بخش هفتم هزینه‌های اختلال است.

۳-۴-۲. محدودیت‌ها

$$r_{ij} \le u_j \qquad \forall\, i,j \in n | i<j \qquad (۱۸)$$

$$r_{ij} \le u_i \qquad \forall\, i,j \in n | i<j \qquad (۱۹)$$

$$r_{ij} \ge u_i + u_j - 1 \qquad \forall\, i,j \in n | i<j \qquad (۲۰)$$

$$\varpi \le d_{ij}(1 + M(1-u_i) + M(1-u_j)) \qquad \forall\, i,j \in n | i<j \qquad (۲۱)$$

$$\sum_i \Omega_{it}^s \ge d_T \qquad \forall\, t,s \qquad (۲۲)$$

$$I_t^s \le G_t \qquad \forall\, t,s \qquad (۲۳)$$

$$d_T = e^{2\alpha_0}\partial_t \qquad \forall\, t \qquad (۲۴)$$

$$d_T * (1+\varphi^s) - \sum_i \sum_m Z_{imt}^s = F_t^s \qquad \forall\, t,s \qquad (۲۵)$$

$$I_t^s = I_{t-1}^s + \sum_i \sum_m z_{imt}^s + \sum_i \Omega_{it}^s - \xi_t^s - d_T \qquad \forall\, t,s \qquad (۲۶)$$

$$b_{imt} y_{imt}^s \le z_{imt}^s \le b_{i,m+1,t} y_{imt}^s \qquad \forall i,m,t,s \qquad (۲۷)$$

$$z_{imt}^s \ge y_{imt}^s \qquad \forall i,m,t,s \qquad (۲۸)$$

$$\Omega_{it}^s \le \tau_i^s cap_{it} \qquad \forall i,t,s \qquad (۲۹)$$

$$\sum_m y_{imt}^s \le 1 \qquad \forall i,t,s \qquad (۳۰)$$

$$\sum_i \sum_m \sum_t y_{imt}^s \ge 1 \qquad \forall s \qquad (۳۱)$$

$$\sum_m y_{imt}^s \le u_{0it} \qquad \forall i,t,s \qquad (۳۲)$$

$$N_i \ge F^{-1}(\lambda_i \psi, \delta) \qquad \forall i \qquad (۳۳)$$

$$w_i \ge N_i - (1-u_i)M \qquad \forall i \qquad (۳۴)$$

$$\Omega_{it}^s \le M u_{0jt} \qquad \forall i,j,t,s \qquad (۳۵)$$

$$r_{ji} \le u_{0jt} \qquad \forall i,j,t \qquad (۳۶)$$

$$\sum_i u_{ijt} \le r_{0j} \qquad \forall j,t \qquad (۳۷)$$

$$\sum_i u_{jit} \le r_{0j} \qquad \forall j,t \qquad (۳۸)$$

$$u_{0jt} \le r_{0j} \qquad \forall i,j,t \qquad (۳۹)$$

$$I_t \ge 0 \qquad \forall t \qquad (۴۰)$$

$$z_{imt}^s, \Omega_{it}^s, \xi_t^s, F_t^s, d_T, I_t^s \in Integer \qquad (۴۱)$$

$$y_{imt}^s, r_{ij}, u_i \in \{0,1\} \qquad (۴۲)$$

محدودیت (۱۸) تا (۲۰) برای خطی‌سازی تابع هدف اول است. محدودیت (۲۱) حداقل فاصله مجاز برای تأمین‌کنندگان را رعایت می‌کند. محدودیت (۲۲) مشخص می‌کند تعداد کالای خریداری شده در هر دوره باید از تقاضای دوره بیشتر باشد. محدودیت (۲۳) حداکثر ظرفیت انبار را درنظر می‌گیرد. محدودیت (۲۴) تقاضای جدید را براساس نرخ تورم در هر دوره محاسبه می‌کند. محدودیت (۲۵) تقاضای اضافی برآورده نشده را در هر دوره مشخص می‌کند. محدودیت (۲۶) موجودی انبار در هر دوره را تعیین می‌کند. محدودیت (۲۷) مدل را به انتخاب یکی از سطوح تاب‌آوری در هر دوره برای تأمین‌کننده محدود می‌کند. محدودیت (۲۸) مشخص می‌کند اگر یک سطح تاب‌آوری فعال شود باید از آن سطح خرید انجام شود. محدودیت (۲۹) بیان می‌کند حداکثر به اندازه ظرفیت تأمین‌کننده بعداز وقوع اختلال در هر دوره می‌توان خرید کرد. محدودیت (۳۰) بیان می‌کند در هر دوره فقط از یک سطح تاب‌آوری تأمین‌کننده می‌توان خرید کرد. محدودیت (۳۱) بیان می‌کند در در دوره‌های مختلف حداقل یک‌بار باید از یکی از سطوح تاب‌آوری تأمین‌کنندگان خرید انجام شود. محدودیت (۳۲) خرید از سطوح مختلف تأمین‌کننده را به انتخاب آن تأمین‌کننده محدود می‌کند. محدودیت (۳۳) و (۳۴) در بخش قبل توضیح داده شد. محدودیت‌های (۳۵) تا (۳۹) مشخص می‌کنند درصورتی از تأمین‌کننده i می‌توان خرید کرد که یا به‌طور مستقیم از دپوی کارخانه به آن مراجعه شود یا بعداز عبور از تأمین‌کننده j به آن مراجعه شود. محدودیت‌های (۴۰) تا (۴۲) نوع متغیرهای مسأله را مشخص می‌کنند. همچنین سطح سرویس‌دهی به‌صورت ضمنی از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$Serv_t^s = \frac{F_t^s}{\xi_t^s} \qquad \forall\, t,s \qquad (۴۳)$$

باتوجه‌به این‌که رابطه (۴۳) غیرخطی است نمی‌توان در مدل از آن استفاده کرد، اما با درنظرگفتن این‌که مخرج کسر یکی از متغیرهای مشخص مسأله است که براساس ورودی اولیه در مدل محاسبه می‌شود و همیشه ثابت است و صورت کسر هم متناسب با تابع هدف تغییر می‌کند، بنابراین سطح سرویس‌دهی را می‌توان به‌صورت ضمنی محاسبه کرد. علاوه‌بر محدودیت (۴۳) که از نوآوری‌های این مقاله می‌باشد می‌توان به محدودیت‌های (۲۴)-(۳۴) نیز به‌عنوان نوآوری مقاله اشاره کرد. پس از مدل‌سازی ساختاری شکل (۳) در شبکه بیزی با استفاده از نرم‌افزار Netica، خروجی این مدل که همان درصد تقاضای برآورد نشده و ظرفیت باقی‌مانده تولیدکننده پس‌از وقوع اختلال است به مدل تصادفی وارد می‌شود. در مواجهه با مدل دو دفه ارائه شده در این مقاله باید مراحل زیر طی شود. (۱) با استفاده از روش اپسیلون محدودیت توسعه‌یافته[1]، تابع هدف دوهدفه تبدیل به تک‌هدفه و حل می‌شود. (۲) کاهش سناریوها: در مسأله مورد بررسی در این مقاله دو نوع سناریو وجود دارد. سناریوی اول مربوط به اختلالات بیرونی است و دیگری مربوط به اختلالات محیطی و ریسک‌های

1. Augmented ε-constraint approach

طبیعی پیرامون تأمین‌کنندگان است که می‌تواند حالت‌های بسیار زیاد و بی‌شماری را ایجاد کند و درنتیجه محاسبات پیچیده و زمان‌بری را نیاز دارد. برای حل این مشکل از دو روش کاهش سناریو استفاده شده است که شامل روش سناریو سازی و استفاده از روش c-میانگین فازی است.

۳-۵. حل مدل دوهدفه

مدل طراحی شده در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح دوهدفه است. باتوجه‌به دوهدفه بودن مدل راه‌حل مناسبی که همه اهداف را به‌طور هم‌زمان در سطح بهینه نگه دارد وجود ندارد. بنابراین در این‌گونه مسائل جواب کارا مدنظر قرار می‌گیرد. براین اساس، در مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه، مفهوم کارایی یا بهینگی پارتو جایگزین مفهوم بهینگی می‌شود. پاسخ بهینه پارتو پاسخی است که برای بهبود یک تابع هدف باید سایر توابع هدف از بهینگی خارج شده یا به‌عبارتی بهینگی سایر توابع هدف کاهش یابد. برای حل این‌گونه مسائل توابع هدف را به یک تابع هدف تبدیل می‌کنند. روش‌های زیادی برای تک‌هدفه کردن مسأله وجود دارد مانند: مجموع وزنی، برنامه‌ریزی آرمانی، لکسیکوگرافی و اپسیلون محدودیت توسعه‌یافته. در میان روش‌های مطرح شده روش اپسیلون محدودیت توسعه‌یافته یکی از بهتـرین روش‌ها برای حل این‌گونه مسائل است. در این روش ابتدا هریک از توابع هدف به‌صورت جداگانه به‌عنوان تابع هدف مسأله درنظر گرفته می‌شوند و سایر توابع به حد بالای اپسیلون محدود شده و جواب بهینه برای آن تابع هدف به‌دست می‌آید:

$$\min f_1(x)$$
$$\begin{cases} f_i(x) \le \varepsilon_i \;\; i = 2,3,\dots,n \\ AX \le B \\ x \in X \end{cases}$$

همین کار برای همه توابع هدف تکرار می‌شود و بهترین و بدترین مقدار محاسبه می‌شود و بازه تغییرات همه توابع هدف محاسبه می‌گردد. سپس تابع هدف اصلی مسأله را به‌عنوان تابع هدف مدل درنظر گرفته و دامنه تغییرات سایر توابع هدف را به تعداد دلخواه k نقطه جواب پارتو تقسیم می‌شود. باتوجه‌به فرمول زیر یک جدول برای مقادیر اپسیلون به‌دست می‌آید:

$$r_i = f_i^{max} - f_i^{min}$$
$$\varepsilon_i = f_i^{max} - \frac{r_i}{k} * l \;\; , l = 1,\dots,k$$

سپس محدودیت‌های مربوط به توابع هدف فرعی با استفاده از متغیرهای کمبود یا مازاد به‌صورت مساوی تبدیل می‌شوند و یک ضریب δ بین 10^{-3} و 10^{-6} برای این متغیرها درنظرگرفته می‌شود:

$$\begin{cases} \min(f_1(x) + \delta(s_2 + s_3 + \cdots s_n) \\ f_i(x) = \varepsilon_i - s_i \;\; i = 2,3,\dots,n \\ AX \le B \\ x \in X \, , s_i \in R^+ \end{cases}$$

هربار با درنظر گرفتن مقادیر ε_i مدل با تابع هدف اصلی مسأله حل می‌شود و جواب‌های پارتو گزارش می‌شود.

۳-۶. گام اول کاهش سناریو با استفاده از سناریوسازی

روش تحلیلی متوازن اثرات متقابل CIB[1]: در برنامه‌ریزی سناریویی روش‌های کمی و کیفی مختلفی ازجمله تحلیل اثرات متقابل، تحلیل اثرات روندها [2]و نقشه شناختی فازی [3] مورد استفاده قرار می‌گیرند. در پژوهش حاضر برای سناریونویسی از روش تحلیل متوازن اثرات متقابل استفاده می‌شود. روش اثرات متقابل در سال ۱۹۶۶ به‌وسیله گوردون و هلمر[4] معرفی شد و پس‌از آن به‌طور گسترده به‌عنوان یکی از روش‌های آینده پژوهی مورد استفاده قرار گرفت. تکنیک‌های روش اثرات متقابل برای شناسایی زنجیرهای مهم از احتمال وقوع رخدادهای محتمل و میزان اثر هریک از رخدادهای احتمالی بر احتمال وقوع سایر رخدادها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تکنیک به تدوین مدلی نیاز دارد که در آن ارتباطات علت و معلولی بین تعداد مهمی از روندها یا رخدادها توصیف شود. در این روش یک ماتریس برای اثرات متقابل رسم شده و در آن اثرات هر عامل یا روند بر سایر عوامل و روندها شناسایی خواهد شد [۳۴]. روش تحلیل متوازن اثرات متقابل در سال ۲۰۰۱ برای غلبه بر برخی مشکلات عملی روش اثرات متقابل به‌وجود آمد. این روش در پروژه‌های سناریوسازی مرتبط با زمینه‌های مختلف مانند سیاست، تکنولوژی، محیط زیست و ... مورد استفاده قرارگرفته است. روش CIB ابزاری ساده را برای انجام یک ارزیابی در سیستم‌های چند رشته‌ای ارائه می‌دهد تا از این طریق سناریوهای سازگار با وضعیت سیستم را تشکیل دهد. کارشناسان و صاحب‌نظران در یک زمینه خاص باید در این مورد نظر بدهند که وقوع وضعیتی خاص برای متغیرهای یک سیستم تا چه‌حد موجب ترقی یا محدودیت برای متغیرهای سیستم دیگر خواهد شد. درواقع این کارشناسان تمامی اثرات متقابل موجود در یک سیستم را که در ماتریس اثرات متقابل گردآوری شده به‌صورت دو به دو مورد قضاوت قرار می‌دهند. ارزیابی روابط بین عوامل معمولاً در یک مقیاس از اعداد صحیح بوده که در آن ارزش‌های مثبت برای اثرات مستقیم ارتقادهنده و ارزش‌های منفی برای اثرات مستقیم محدودکننده درنظر گرفته می‌شوند. ضمن این‌که پردازش این ارزش‌های عددی به‌وسیله یک نرم‌افزار به‌نام سناریو ویزارد انجام خواهد گرفت. برای هریک از اختلالات سه سطح زیاد، متوسط و کم درنظرگرفته شده است. باتوجه‌به این‌که ۴ اختلال جنگ، تحریم، تورم و شیوع بیماری وجود دارد بنابراین 3^4 یعنی ۸۱ سناریو می‌توان تعریف کرد، ولی تعداد سناریوها را با استفاده از نرم‌افزار سناریو ویزارد و براساس امتیازاتی که خبرگان درنظر گرفته‌اند به سه سناریو کاهش می‌یابد. سناریوهای نهایی به‌دست آمده در شکل (۶) نشان داده شده است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود. سناریوی اول: احتمال وقوع تحریم، تورم و شیوع بیماری بالا ولی جنگ پایین است. سناریوی دوم: احتمال وقوع تحریم، تورم بالا و شیوع بیماری متوسط و جنگ پایین است. سناریوی سوم: احتمال وقوع تحریم، تورم بالا و شیوع بیماری

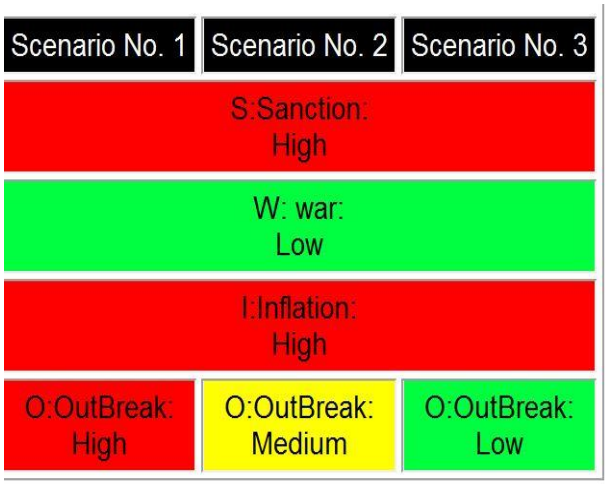
۱. Cross Impact Balance Analysis

2. Trend Impact Analysis (TIA)

۳. Fuzzy Cognitive Maps (FCM)

4. Gordon and Helmer

پایین و جنگ پایین است. این سه سناریو به‌عنوان سناریوهای کلی نام‌گذاری می‌شود که به‌صورت مجزا در ترکیب با سناریوی اختلالات داخلی درنظر گرفته خواهد شد.



شکل (۶). سه سناریوی نهایی در نرم‌افزار سناریو ویزارد

۳-۷. گام دوم کاهش سناریو

سناریوهای اختلال در مدل ارائه شده با افزایش تعداد تأمین‌کنندگان به‌صورت نمایی افزایش پیدا می‌کنند. برای نمونه اگر ۱۰ تأمین‌کننده وجود داشته باشد و هریک دو حالت کارکرد و شکست داشته باشند، در این صورت 2^{10} سناریوی اختلال وجود دارد. اگر ۴۰ تأمین‌کننده باشد 2^{40} سناریوی اختلال وجود دارد. بنابراین این حجم از محاسبات بسیار دست‌وپاگیر[1] و دشوار است. برای این منظور از روش‌های کاهش سناریو مانند خوشه‌بندی استفاده می‌شود. در این مقاله از روش خوشه‌بندی c-میانگین فازی [2] استفاده شده است.

۳-۷-۱. کاهش سناریو با الگوریتم

این الگوریتم برای اولین‌بار توسط Bezdek (۱۹۸۱) معرفی شد. این روش به‌دلیل سادگی کاربرد و سرراست بودن [3] و کارایی بالا بسیار محبوب است. FCM مجموعه‌ای از E شی [4] $X = \{x_1, x_2, \dots, x_E\}$ را در فضای R^p به C خوشه تقسیم می‌کند $(1 < C < E)$. در مدل این مقاله E تعداد سناریوهای اختلال ممکن است و C تعداد سناریوهای کاهش‌یافته می‌باشد. درصد ظرفیت دردسترس تأمین‌کننده پس‌از وقوع سناریوی اختلال E به‌صورت τ_i^E درنظر گرفته می‌شود. در این الگوریتم هریک از نقاط داده‌ای با یک درجه عضویت به یک خوشه تعلق می‌گیرد. بنابراین هر نقطه می‌تواند با درجه عضویت به همه خوشه‌ها تعلق داشته باشد به‌طوری‌که مجموع این درجات عضویت برای یک نقطه یک می‌شود. هرچه این درجه عضویت بیشتر باشد یعنی این نقطه به خوشه مدنظر تعلق بیشتری دارد و می‌توان آن نقطه را در خوشه قرارداد. در ادامه مراحل این الگوریتم ارائه می‌شود.

قدم اول: یک ماتریس عضویت تصادفی طبق معادله زیر تولید کنید:

$$U = \begin{bmatrix} U_{11} & \dots & U_{1E} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ U_{C1} & \dots & U_{CE} \end{bmatrix} \quad 0 \le U_{CE} \le 1$$

که U_{CE} درجه تابع عضویت سناریوی اختلال E در مرکز خوشه C است. E تعداد کلی سناریوهای اختلال و C تعداد مراکز خوشه‌ها است.

قدم دوم: هر خوشه می‌تواند به‌عنوان سناریوی اختلال مجازی با ویژگی اصلی درصد ظرفیت باقی‌مانده تأمین‌کننده بعد از اختلال (τ_i^E) درنظر گرفته شود که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Ce = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{e=1}^{E} u_{1e}^m \tau_i^e}{\sum_{e=1}^{E} u_{1e}^m} & \frac{\sum_{e=1}^{E} u_{1e}^m \tau_i^e}{\sum_{e=1}^{E} u_{1e}^m} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\sum_{e=1}^{E} u_{ce}^m \tau_i^e}{\sum_{e=1}^{E} u_{ce}^m} & \frac{\sum_{e=1}^{E} u_{ce}^m \tau_i^e}{\sum_{e=1}^{E} u_{ce}^m} \end{bmatrix} \qquad 1 \le m < \infty$$

قدم سوم: تابع هدف الگوریتم FCM را مطابق معادله زیر حساب کنید که m یک توان وزنی ثابت است و معمولات ۲ درنظر گرفته می‌شود. $D(X_{ie}, Ce_c)$ فاصله اقلیدسی بین سناریوی اختلال e و c امین مرکز خوشه است.

$$J_{FCM} = (U, C) = \sum_{e=1}^{E} \sum_{c=1}^{C} u_{cs}^m \, D(X_{ie}, Ce_c) \quad 1 < m$$

قدم چهارم: ماتریس تابع عضویت را براساس معادله زیر به‌روز کنید.

$$U_{new} = \begin{bmatrix} \frac{D^{\frac{-2}{m-1}}(X_{i1}, Ce_1)}{\sum_{c=1}^{C} D^{\frac{-2}{m-1}}(X_{i1}, Ce_C)} & \dots & \frac{D^{\frac{-2}{m-1}}(X_{iE}, Ce_1)}{\sum_{c=1}^{C} D^{\frac{-2}{m-1}}(X_{iE}, Ce_C)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{D^{\frac{-2}{m-1}}(X_{i1}, Ce_C)}{\sum_{c=1}^{C} D^{\frac{-2}{m-1}}(X_{i1}, Ce_C)} & \dots & \frac{D^{\frac{-2}{m-1}}(X_{iE}, Ce_C)}{\sum_{c=1}^{C} D^{\frac{-2}{m-1}}(X_{iE}, Ce_C)} \end{bmatrix}$$

گام پنجم: تا زمان برقراری شرط زیر قدم‌های ۲ تا ۴ را تکرار کنید.

$$\left| (J_{FCM})_J - (J_{FCM})_{J-1} \right| < \varepsilon$$

ε سطح خطا می‌باشد. لازم به ذکر است مراکز خوشه به‌دست آمده اختلالات مجازی جدید هستند. این پنج قدم می‌تواند برای کاهش تعداد سناریوهای اختلال به‌کار گرفته شود. گام‌های بالا در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی و اجرا شده است.

۴. مطالعه موردی

مدل ارائه شده در این مقاله در صنعت خودروسازی کاربرد فراوانی دارد لذا برای مطالعه موردی یکی از شرکت‌های تولیدکننده خودرو در ایران را درنظر گرفته می‌شود. شرکت خودروسازی سایپا بیش‌از ۴۰٪ تولیدات خودرویی در ایران را به‌خود اختصاص داده است. شرکت سازه‌گستر سایپا یکی از زیرمجموعه‌های شرکت سایپا است که وظیفه تأمین قطعات موردنیاز را برعهده دارد. این شرکت پس از شناسایی و ارزیابی بیش‌از ۱۰۰۰ قطعه‌ساز، در حال حاضر با بیش‌از ۵۰۰ قطعه‌ساز در شبکه تأمین خود همکاری می‌کند. برای بررسی عملکرد مدل ارائه شده در این مقاله، یکی از قطعات پرکاربرد و مهم مورد استفاده در خودروهای تولیدی این شرکت انتخاب شد که به‌دلیل حفظ محرمانگی اطلاعات به‌نام آن اشاره نمی‌شود. این قطعه از ۵

1. Cumbersome
۲. Fuzzy C Means Clustering
3. Straightforward
4. Object

تأمین‌کننده در شهرهای تهران، قزوین، اصفهان، کاشان و رشت خریداری می‌شود. دپوی شرکت سازه‌گستر سایپا در تهران قرار دارد. فاصله تأمین‌کنندگان در شهرهای مختلف در جدول (۳) آورده شده است که تأمین‌کنندگان به‌ترتیب از ۱ تا ۵ شماره‌گذاری می‌شوند. هزینه حمل‌ونقل در جدول (۴) آورده شده است. باتوجه‌به این‌که نرخ تورم می‌تواند بر مقدار تقاضا اثرگذار باشد لذا برای تعیین تقاضا از تأثیر نرخ تورم در مدل ریاضی ارائه شده استفاده شده است که یکی از جنبه‌های مدل پیشنهادی است. برای این منظور داده‌های ۳۸ سال گذشته نرخ تورم ایران مورد استفاده قرار گرفته است. این داده‌ها از بانک مرکزی ایران دریافت شده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌کنید تست نرمال بودن داده‌ها نشان می‌دهد داده‌های نرخ تورم ۳۸ سال گذشته از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. شکل شکل (۸) موقعیت مکانی تقریبی تأمین‌کنندگان در نقشه را نشان می‌دهد. تقاضا برای شش دوره برنامه‌ریزی به‌صورت [۶۰۰,۴۰۰,۵۰۰,۶۰۰,۳۰۰,۴۰۰] است. جدول (۵) سایر پارامترهای انتخاب شده برای مدل را نشان می‌دهد. مدل ریاضی مسأله در نرم‌افزار گمز کدنویسی و حل شده است. جواب پارتوی سه سناریوی کلی مسأله که در بخش ۳-۷ به آن‌ها اشاره شد در جدول (۶) آورده شده است. شکل (۹)-(۱۱) جواب‌های پارتوی سه سناریو را نشان می‌دهد. سطح سرویس‌دهی در سناریوهای مختلف در دوره‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با بدتر شدن سناریو سطح سرویس‌دهی کمتر می‌شود. این مطلب بیانگر این مفهوم است که اگر تدبیری اندیشیده نشود با بدتر شدن شرایط علاوه‌بر این‌که هزینه‌ها افزایش می‌یابد، تاب‌آوری تأمین‌کنندگان نیز کاهش یافته است.

جدول (۳). فاصله بین تأمین‌کنندگان (متر)

شماره تأمین‌کننده		کارخانه	رشت	قزوین	اصفهان	کاشان	تهران
۰	کارخانه	۰	۲۹۸۰۰۰	۱۳۰۰۰۰	۴۳۵۰۰۰	۲۴۰۰۰۰	۵۰۰۰۰
۱	رشت	۲۹۸۰۰۰	۰	۱۶۸۰۰۰	۷۳۳۰۰۰	۵۳۸۰۰۰	۲۷۸۰۰۰
۲	قزوین	۱۳۰۰۰۰	۱۶۸۰۰۰	۰	۵۶۵۰۰۰	۳۷۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰
۳	اصفهان	۴۳۵۰۰۰	۷۳۳۰۰۰	۵۶۵۰۰۰	۰	۱۹۵۰۰۰	۴۴۵۰۰۰
۴	کاشان	۲۴۰۰۰۰	۵۳۸۰۰۰	۳۷۰۰۰۰	۱۹۵۰۰۰ ۴۴۵۰۰۰	۰	۲۵۰۰۰۰
۵	تهران	۵۰۰۰۰	۲۷۸۰۰۰	۱۱۰۰۰۰		۲۵۰۰۰۰	۰

جدول (۴). هزینه حمل‌ونقل (تومان)

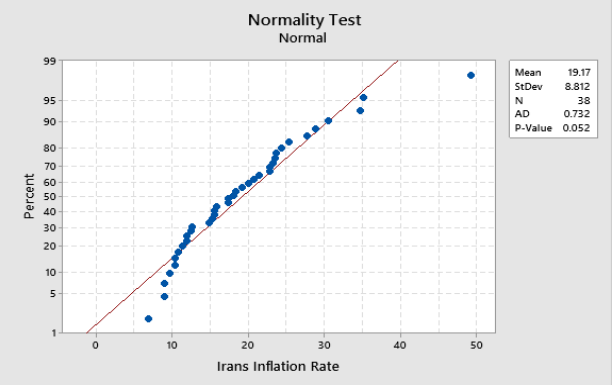
	رشت	قزوین	اصفهان	کاشان	تهران
کارخانه	۲۰۰۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰۰۰	۱۸۰۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰۰

جدول (۵). سایر مقادیر پارامترها.

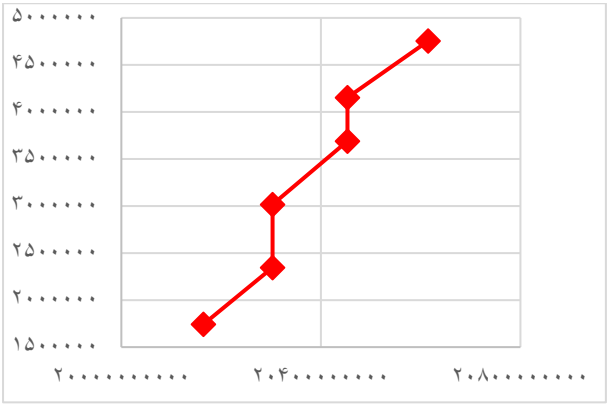
ϖ	۱۰۰۰۰۰	∇_v	۳۰۰۰۰۰۰	ϕ_i	$۱۰^۷$
Γ	۹۱۰۰۰۰	θ_j	۹۰۰۰۰۰	W_t	۱۰۰
h_t	۳۵۰۰۰	δ	Uniform[.۱,.۹]	cap_{it}	۶۲۰
ν_0	N(۲۱/۴۴,۱/۷۲۶)	λ_i	Uniform[.۱,.۹]		

جدول (۶). مقادیر جواب‌های بهینه پارتو برای سناریوهای مختلف

S	low		medium		high	
	TC	GS	TC	GS	TC	GS
۱	۱/۹۶۴۷*۱۰^۱۰	۴۷۵۵۰۰۰	۲/۰۲۶۷*۱۰^۱۰	۴۷۵۵۰۰۰	۲/۰۶۱۵*۱۰^۱۰	۴۷۵۵۰۰۰
۲	۱/۹۴۸۵*۱۰^۱۰	۴۱۵۵۰۰۰	۲/۰۱۰۵*۱۰^۱۰	۴۱۵۵۰۰۰	۲/۰۴۵۳*۱۰^۱۰	۴۱۵۵۰۰۰
۳	۱/۹۴۸۵*۱۰^۱۰	۳۵۷۷۰۰۰	۲/۰۱۰۵*۱۰^۱۰	۳۵۸۷۰۰۰	۲/۰۴۵۳*۱۰^۱۰	۳۶۹۰۰۰۰
۴	۱/۹۳۳۵*۱۰^۱۰	۳۰۱۵۰۰۰	۱/۹۹۵۵*۱۰^۱۰	۳۰۱۵۰۰۰	۲/۰۳۰۳*۱۰^۱۰	۳۰۱۵۰۰۰
۵	۱/۹۳۳۵*۱۰^۱۰	۲۳۴۷۰۰۰	۱/۹۹۵۵*۱۰^۱۰	۲۴۴۹۰۰۰	۲/۰۳۰۳*۱۰^۱۰	۲۳۴۶۰۰۰
۶	۱/۹۱۹۶*۱۰^۱۰	۱۷۴۳۰۰۰	۱/۹۸۱۶*۱۰^۱۰	۱۷۴۳۰۰۰	۲/۰۱۶۴*۱۰^۱۰	۱۷۴۳۰۰۰



شکل (۷). تست نرمال بودن داده‌های نرخ تورم ایران



شکل (۱۱). جدول جواب بهینه کارا برای سناریوی high

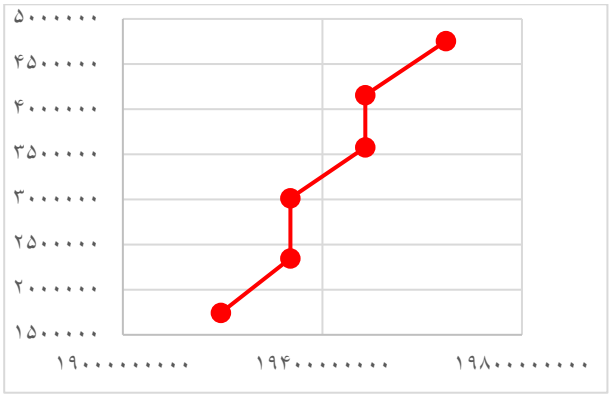
جدول (۷). سطح سرویس‌دهی در سناریوهای مختلف

High		Medium		Low	
۲۵٪	۲۵٪	۲۵٪	۲۶٪	۲۶٪	۲۷٪
۳۷٪	۳۸٪	۳۸٪	۳۹٪	۴۰٪	۴۱٪
۳۰٪	۳۰٪	۳۰٪	۳۱٪	۳۲٪	۳۳٪
۲۵٪	۲۵٪	۲۵٪	۲۶٪	۲۶٪	۲۷٪
۴۹٪	۵۱٪	۵۰٪	۵۲٪	۵۳٪	۵۵٪
۳۷٪	۳۸٪	۳۸٪	۳۹٪	۴۰٪	۴۱٪

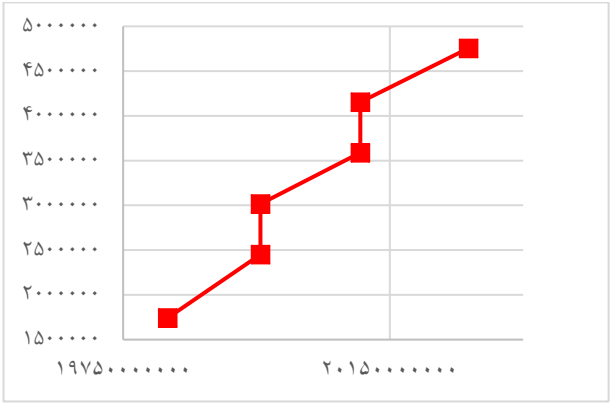
۴-۱. تحلیل حساسیت

در این بخش به تحلیل حساسیت پارامترهای مدل در سناریوی Medium در بخش قبل پرداخته می‌شود. برای این کار ابتدا Γ را با مقادیر مختلف بررسی کرده و تأثیر آن را بر سطح سرویس‌دهی در جدول (۸) نشان داده می‌شود. شکل (۱۲) تغییرات سطح سرویس‌دهی در ۶ دوره برای سناریوی اول را نشان می‌دهد. همچنان که مشاهده می‌شود مدل به تغییرات Γ حساس است و با افزایش Γ سطح سرویس‌دهی افزایش می‌یابد. بنابراین مدل می‌تواند براساس قیمت کالا، هزینه حمل‌ونقل و هزینه سفارش‌دهی به تصمیم‌گیری برای رسیدن به سطح سرویس‌دهی بالاتر بپردازد. همان‌طور که مشخص است مدل در $t۳$ باتوجه‌به مقدار تقاضا و هزینه خرید محصول و همچنین جریمه عدم ارضای تقاضا در مسأله دوم، خرید از سطح تاب‌آوری بالاتر را پیشنهاد می‌دهد و هزینه جریمه عدم ارضای تقاضا را به‌صرفه نمی‌داند درنتیجه سطح سرویس‌دهی در این دوره به یکباره به ۹۴٪ در سناریوی اول می‌رسد. ارضا نشدن ۶٪ از تقاضای باقی‌مانده تا جریمه ۱۰۸۹۰۰۰ تومان به‌صرفه است ولی بعد از آن توجیح اقتصادی ندارد و مدل سطح سرویس دهی را ۱۰۰٪ می‌کند. جدول (۹) مجموع متغیر y_{imt} که نشان‌دهنده انتخاب سطح تاب‌آوری است را نشان می‌دهد. در مسائل ۲ تا ۵ افزایش جریمه عدم ارضاء تقاضا باعث شده است تولیدکننده به تاب‌آوری بالاتر برای رسیدن به سطح سرویس‌دهی بالاتر فکر کند زیرا می‌داند عدم تأمین تقاضا می‌تواند هزینه بیشتری در مقایسه با هزینه کردن برای رسیدن به تاب‌آوری بیشتر به‌همراه داشته باشد. در ادامه به بررسی تأثیر تغییرات تقاضا بر نتایج مدل پرداخته می‌شود. برای این کار فقط تقاضای سناریوی

شکل (۸). موقعیت تقریبی تأمین‌کنندگان روی نقشه ایران



شکل (۹). جدول جواب بهینه کارا برای سناریوی low



شکل(۱۰). جدول جواب بهینه کارا برای سناریوی

medium تغییر داده می‌شود و برای این منظور سه مسأله جدید تعریف می‌شود. در مسأله اول تقاضا را ۵۰۰ واحد کالا برای ۶ دوره به‌صورت ثابت درنظر گرفته می‌شود. در مسأله دوم نوسان تقاضا را مورد بررسی قرار می‌گیرد و تقاضا را به‌صورت [۶۰۰,۴۰۰,۶۰۰,۴۰۰,۶۰۰,۴۰۰] می‌باشد. در مسأله سوم تقاضا را کاهشی با مقدار [۲۵۰, ۳۵۰ ,۴۵۰,۵۵۰,۶۵۰,۷۵۰] تعریف می‌شود.

لازم به ذکر است در هر سه مسأله مجموع تقاضا برای ۶ دوره برنامه‌ریزی ۳۰۰۰ واحد است. نتایج در جدول (۱۰) سطح سرویس‌دهی برای سه مسأله آورده شده است. همان‌طور که شکل (۱۳) نشان می‌دهند سطح سرویس‌دهی در حالت تقاضا ثابت هیچ تغییری نمی‌کند و ثابت است. سطح سرویس‌دهی در حالت تقاضای ثابت و نوسانی فقط دو دوره بهتر از تقاضای کاهشی هستند.

جدول (۸). تغییر سطح سرویس‌دهی باتوجه‌به تغییرات

	Prob.۱		Prob.۲		Prob.۳		Prob.۴		Prob.۵	
Γ	۹۱۰۰۰۰		۹۵۰۰۰۰		۹۷۰۰۰۰		۹۹۰۰۰۰		۱۰۹۰۰۰۰	
سناریو	s۱	s۲	s۱	s۲	s۱	s۲	s۱	s۲	s۱	s۲
t۱	۲۶٪	۲۵٪	۷۸٪	۷۶٪	۷۸٪	۷۶٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪
t۲	۳۹٪	۳۸٪	۷۸٪	۷۵٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪
t۳	۳۱٪	۳۰٪	۹۴٪	۹۱٪	۹۱٪	۹۴٪	۹۴٪	۹۱٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪
t۴	۲۶٪	۲۵٪	۷۸٪	۷۶٪	۷۸٪	۷۶٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪
t۵	۵۲٪	۵۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪
t۶	۳۹٪	۳۸٪	۷۸٪	۷۵٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪

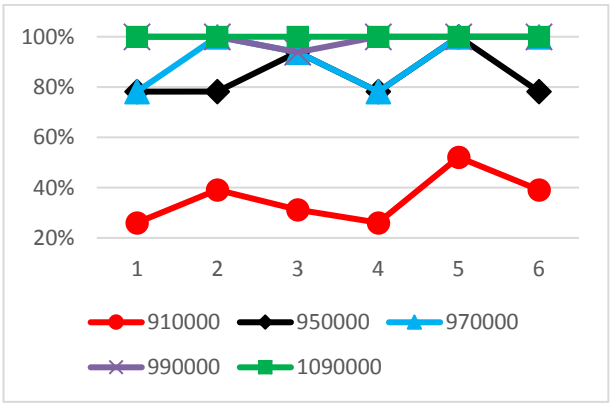
جدول (۹). تغییر سطح تاب‌آوری با تغییر Γ

	Prob.۱	Prob.۲	Prob.۳	Prob.۴	Prob.۵
سطح تاب‌آوری (m)	۶	۱۵	۱۷	۱۹	۲۰

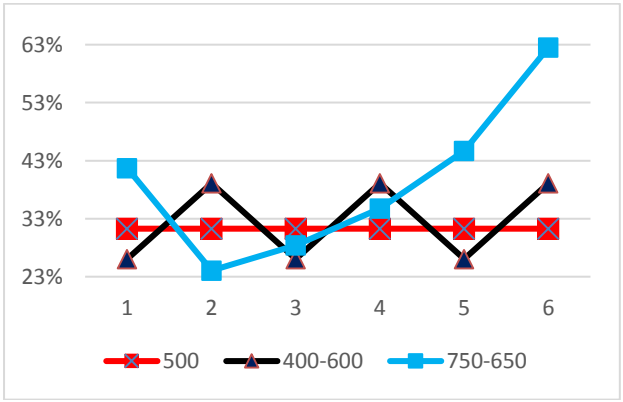
جدول (۱۰). تغییرات سطح سرویس‌دهی با تغییر تقاضا

	۵۰۰		۴۰۰-۶۰۰		۷۵۰-۶۵۰	
	s۱	s۲	s۱	s۲	s۱	s۲
t۱	۳۱٪	۳۰٪	۲۶٪	۲۵٪	۴۲٪	۴۰٪
t۲	۳۱٪	۳۰٪	۳۹٪	۳۸٪	۲۴٪	۲۳٪
t۳	۳۱٪	۳۰٪	۲۶٪	۲۵٪	۲۸٪	۲۷٪
t۴	۳۱٪	۳۰٪	۳۹٪	۳۸٪	۳۵٪	۳۴٪
t۵	۳۱٪	۳۰٪	۲۶٪	۲۵٪	۴۵٪	۴۳٪
t۶	۳۱٪	۳۰٪	۳۹٪	۳۸٪	۶۳٪	۶۰٪

همچنین برای بررسی تقاضای ارضا نشده هزینه ناشی از جریمه تقاضای ارضا نشده را محاسبه و در جدول (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۴) مشخص است هزینه کل عدم ارضای تقاضا برای حالت تقاضا کاهشی از بقیه کمتر است و در حالت تقاضا ثابت و نوسانی باهم برابر است. همچنین مطابق شکل (۱۵) در تقاضای کاهشی شاید به‌نظر برسد هزینه عدم ارضای تقاضا باید بیشترین مقدار باشد ولی باتوجه‌به بازه سطوح تاب‌آوری برای کاهش هزینه مدل تصمیم به ارضای بیشتر تقاضا می‌گیرد. باتوجه‌به این‌که در سال‌های اخیر نرخ تورم به‌دلیل عواملی که در مقدمه مطرح شد و شبکه ساختاری مسأله که بررسی شد به‌شدت افزایش داشته و نرخ تورم از سال ۱۳۹۸ به بالای ۴۱٪ رسیده است به بررسی مسأله با نرخ تورم ۴۱٪ پرداخته می‌شود. همان‌طور که در جداول (۱۲) و (۱۳) مشخص است علاوه‌بر کاهش سطح سرویس‌دهی در همه مسائل، حداقل و حداکثر هزینه‌ها نیز بین ۴۸٪ تا ۵۰٪ افزایش یافته است.



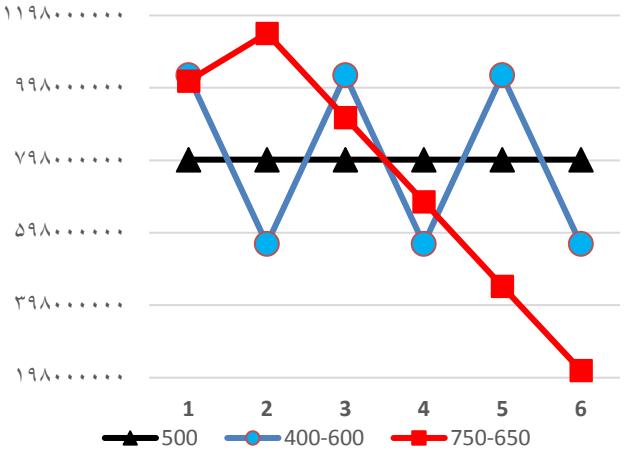
شکل (۱۲). نمودار تغییرات سطح سرویس‌دهی سناریوی ۱ براساس Γ



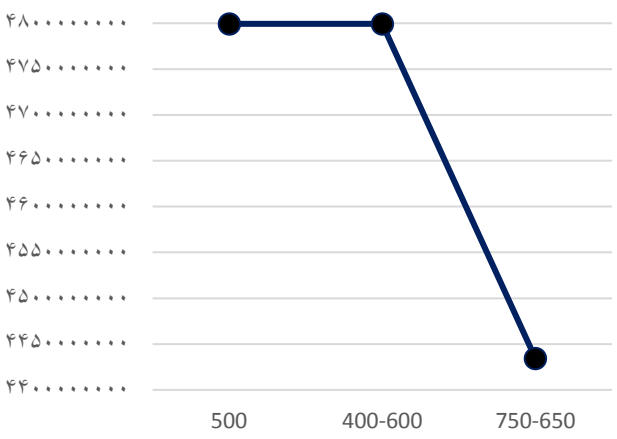
شکل (۱۳). نمودار سطح سرویس‌دهی با تغییرات تقاضا برای سناریوی ۱

جدول (۱۱). هزینه جریمه عدم ارضای تقاضا

	۵۰۰	۴۰۰-۶۰۰	۷۵۰-۶۵۰
t۱	۷/۹۹۸ *۱۰^۸	۱/۰۳۲ *۱۰^۹	۱/۰۱۷ *۱۰^۹
t۲	۷/۹۹۸ *۱۰^۸	۵/۶۶۹ *۱۰^۸	۱/۱۴۸ *۱۰^۹
t۳	۷/۹۹۸ *۱۰^۸	۱/۰۳۲ *۱۰^۹	۹/۱۶۳ *۱۰^۸
t۴	۷/۹۹۸ *۱۰^۸	۵/۶۶۹ *۱۰^۸	۶/۸۳۴ *۱۰^۸
t۵	۷/۹۹۸ *۱۰^۸	۱/۰۳۲ *۱۰^۹	۱/۵۰۴ *۱۰^۸
t۶	۷/۹۹۸ *۱۰^۸	۵/۶۶۹ *۱۰^۸	۲/۱۸۴ *۱۰^۸
مجموع	۴/۷۹۹ *۱۰^۹	۴/۷۹۹ *۱۰^۹	۴/۴۳۴ *۱۰^۹



شکل (۱۴). تغییرات هزینه در هر دوره با تغییر تقاضا



شکل (۱۵). تغییرات هزینه کل با تغییر تقاضا

جدول (۱۲). سطح سرویس‌دهی تورم ۴۱٪ در سناریوهای مختلف

High		Medium		Low	
۱۶٪	۱۷٪	۳۴٪	۳۵٪	۱۸٪	۱۸٪
۲۵٪	۲۵٪	۲۵٪	۲۶٪	۲۷٪	۲۸٪
۲۰٪	۲۰٪	۴۰٪	۴۲٪	۲۱٪	۲۲٪
۱۶٪	۱۷٪	۳۴٪	۳۵٪	۱۸٪	۱۸٪
۳۳٪	۳۴٪	۳۴٪	۳۵٪	۳۵٪	۳۷٪
۲۵٪	۲۵٪	۲۵٪	۲۶٪	۲۷٪	۲۸٪

جدول (۱۳). تابع هدف سه سناریو با نرخ تورم ۴۱٪

high		medium		low		S
GS	TC	GS	TC	GS	TC	
۴۷۵۵۰۰۰	۳/۰۴۸۹ *۱۰^۱۰	۴۷۵۵۰۰۰	۳/۰۰۱۸ *۱۰^۱۰	۴۷۵۵۰۰۰	۲/۹۰۴۴ *۱۰^۱۰	۱
۴۱۵۵۰۰۰	۳/۰۳۲۷ *۱۰^۱۰	۴۱۵۵۰۰۰	۲/۹۸۵۸ *۱۰^۱۰	۴۱۵۵۰۰۰	۲/۸۸۸۲ *۱۰^۱۰	۲
۳۷۷۲۰۰۰	۳/۰۳۲۷ *۱۰^۱۰	۳۵۸۷۰۰۰	۲/۹۸۵۸ *۱۰^۱۰	۳۷۷۲۰۰۰	۲/۸۸۸۲ *۱۰^۱۰	۳
۳۰۱۵۰۰۰	۳/۰۱۷۷ *۱۰^۱۰	۳۰۹۷۰۰۰	۲/۹۷۰۸ *۱۰^۱۰	۳۰۱۵۰۰۰	۲/۸۷۳۲ *۱۰^۱۰	۴
۲۴۷۷۰۰۰	۳/۰۱۷۷ *۱۰^۱۰	۲۳۶۴۰۰۰	۲/۹۷۰۸ *۱۰^۱۰	۲۴۷۷۰۰۰	۲/۸۷۳۲ *۱۰^۱۰	۵
۱۷۴۳۰۰۰	۳/۰۰۳۹ *۱۰^۱۰	۱۷۴۳۰۰۰	۲/۹۶۳۵ *۱۰^۱۰	۱۷۴۳۰۰۰	۲/۸۵۹۴ *۱۰^۱۰	۶

۵. نتیجه‌گیری

این مطالعه به‌منظور ارائه یک راه‌حل کارآمد برای مسأله انتخاب تأمین‌کننده تاب‌آور و تخصیص بهینه سفارش انجام شده است. ابتدا مدلی برای پشتیبانی از محاسبه احتمال سناریوی اختلال با استفاده از یک مدل گرافیکی احتمالاتی ارائه شد. سپس مدلی را برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری درخصوص چگونگی و زمان استفاده از استراتژی‌های انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش پیشنهاد شد. این مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته دوهدفه تصادفی پیشنهادی چندین استراتژی تاب‌آوری ازجمله جداسازی تأمین‌کنندگان، قابلیت اطمینان تأمین‌کننده، و قابلیت تاب‌آورسازی تأمین‌کننده با تعریف مفهوم جدید سطح تاب‌آوری را درنظر می‌گیرد. در این مدل با تعریف هزینه عدم ارضای تقاضا و تقاضای ارضا نشده، به‌صورت ضمنی به تعیین سطح سرویس‌دهی پرداخته می‌شود. مدل پیشنهادی با استفاده از روش محدودیت ε توسعه‌یافته برای برقراری تعادل بین اهداف فاصله جغرافیایی و هزینه‌های کل حل شد. برای درک بهتر استراتژی‌های بازیابی تاب‌آوری، ظرفیت بازسازی شبکه تأمین مختل شده تحت سناریوهای مختلف اختلال بررسی شده است. باتوجه‌به پیچیدگی مدل مفهومی و همچنین حالات زیاد اختلال تأمین‌کنندگان نیاز به سناریوسازی و کاهش سناریو وجود داشت که با استفاده از روش تحلیلی متوازن اثرات متقابل در نرم‌افزار سناریو ویزارد و روش خوشه‌بندی c-میانگین فازی در نرم‌افزار متلب کدنویسی و سناریوها کاهش یافت. در این تحقیق پارامترهای مدل تحلیل حساسیت شده است و نتایج نشان دادند که چگونه عدم قطعیت پارامترهای کلیدی مانند تقاضا و سطح سرویس‌دهی می‌تواند رفتار مدل و به‌تبع آن سیاست‌های تصمیم‌گیری را تغییر دهد. علاوه‌بر این، احتمال اختلال تأمین‌کننده متأثر از چندین رویداد مخرب با استفاده از شبکه‌های

بیزی مدل‌سازی گردید. مزیت اصلی روش پیشنهادی در به‌تصویر کشیدن وابستگی میان اختلالات با تعریف احتمالات شرطی نهفته است. ممکن است در شرایط واقعی، تأمین‌کنندگان به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر چندین خطر قرار گیرند. بررسی اختلالاتی مانند جنگ و تحریم و پاندمی و تأثیر متقابل آن‌ها برروی یکدیگر و همچنین ذائقه و نیاز مشتری یا مردم در کشور ما که به‌شدت در معرض این‌گونه اختلالات است اهمیت این تحقیق را بیشتر می‌کند. نتایج این پژوهش می‌تواند به مدیریت زنجیره‌تأمین کمک کند تا شبکه‌های تأمینی طراحی کنند که نه‌تنها هزینه‌های تأمین سنتی بلکه خسارات احتمالی ناشی از ریسک‌های مخرب را نیز به حداقل برسانند و در عین حال تاب‌آوری زنجیره‌تأمین را افزایش دهند. علاوه‌بر این، مدیران تأمین می‌توانند تصمیمات بهینه‌ای در مورد استراتژی‌های کاهش و برنامه‌های اضطراری مانند افزایش قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان، فاصله جغرافیایی بین تأمین‌کنندگان و سطح تاب‌آوری برای تعادل بین کارایی هزینه و تاب‌آوری پیدا کنند. این تحقیق دارای محدودیت‌هایی است که باید در تحقیقات آینده به آن‌ها پرداخته شود. لذا ارزشمند است که ریسک‌های مرتبط با حمل‌ونقل و هزینه‌های ناشی از آن را به‌طور هم‌زمان با ریسک‌های مخرب درنظر گرفته شود. تحقیقات آینده می‌تواند نقش تاب‌آوری در حمل‌ونقل و همچنین محصولات مخاطره‌آمیز را بررسی کند. در این تحقیق اهداف زیست‌محیطی و پایداری مدنظر قرار نگرفته است که می‌توان برای کارهای آتی این اهداف را به مسأله اضافه نمود.

مراجع

[1] https://www.cbi.ir/category/16994.aspx.

[2] Hosseini, S., Ivanov, D. (2019). A new resilience measure for supply networks with the ripple effect considerations: A Bayesian network approach. Annals of Operations Research, 319, 581–607. https://doi.org/10.1007/s10479-019-03350-8

[3] Kaur, H., Singh, S.P. (2021). Multi-stage hybrid model for supplier selection and order allocation considering disruption risks and disruptive technologies. International of journal Production Economics, 231, 107830. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107830

[4] Parkouhi, S.V., Safaei Ghadikolaei, A., and Fallah Lajim., H. (2019). Resilient supplier selection and segmentation in grey environment. Journal of Cleaner Production, 207, 1123-1137. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.007.

[5] Rezaei, A., Aghsami, A., and Rabbani, M. (2021). Supplier selection and order allocation model with disruption and environmental risks in centralized supply chain. Int J Syst Assur Eng Manag, 12(6), 1036–1072. https://doi.org/10.1007/s13198-021-01164-1.

[6] Mohammed, A., Harris, I., and Govindan, K. (2019). A hybrid MCDM-FMOO approach for sustainable supplier selection and order allocation. Int J Prod Econ, 217, 171–184. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.02.003

[7] Kellner, F., Utz, S. (2019). Sustainability in supplier selection and order allocation: combining integer variables with Markowitz portfolio theory. J Clean Prod, 214, 462–474. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.315.

[8] Mari, S.I., Memon, MS., Ramzan, M.B., Qureshi, S.M., and Iqbal, M.W. (2019).Interactive fuzzy multi criteria decision making approach for supplier selection and order allocation in a resilient supply chain.Mathematics, 7(2), 137. https://doi.org/10.3390/math7020137.

[9] Rezaei, A., Rahiminezhad Galankashi, M., Mansoorzadeh, S., and Mokhatab Rafiei, F. (2020a) Supplier selection and order allocation with lean manufacturing criteria: an integrated MCDM and Bi-objective modelling approach. Engineering Management Journal, 32(4), 253–271. https://doi.org/10.1080/10429247.2020.1753490

[10] Rezaei, S., Ghalehkhondabi, I., Rafiee, M., and Namdar Zanganeh, S. (2020b) Supplier selection and order allocation in CLSC configuration with various supply strategies under disruption risk. Operational Research Society of India, 57, 908–934. https://doi.org/10.1080/10429247.2020.1753490.

[11] Khoshfetrat, S., Rahiminezhad, Galankashi, M., and Almasi, M. (2020). Sustainable supplier selection and order allocation: a fuzzy approach. Eng Optim, 52(9), 1494–1507. https: //doi.org/10.1080/0305215x.2019.1663185.

[12] Feng, J., Gong, Z. (2020). Integrated linguistic entropy weight method and multi-objective programming model for supplier selection and order allocation in a circular economy: a case study. J Clean Prod, 277, 122597. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020. 122597.

[13] Beiki, H., Seyedhosseini, S.V., Ponkratov, V., Olegovna Zekiy, A., and Ivanov, S. A. (2021) Addressing a sustainable supplier selection and order allocation problem by an integrated approach: a case of automobile manufacturing. J Indus Prod Eng, 38(4), 239-253. https://doi.org/10.1080/21681015.2021.1877202.

[14] Mohammed, A,. Harris, I,. Soroka, A,. Naim, M,. Ramjaun, T,. Yazdani, M. (2021). Gresilient supplier assessment and order allocation planning. Ann Oper Res, 296(1), 335–362. https://doi.org/10.1007/s10479-020-03611-x

[15] Bakhtiari Tavana, B., Rabieh, M., Pishvaee, M. S., and Esmaeili, M. (2021). A Stochastic Mathematical Programming Approach to Resilient Supplier Selection and Order Allocation Problem: A Case Study in Iran Khodro Supply Chain. International journal of science & technology, 30, 1796-1821. https://doi.org/10.24200/sci.2021.56020.4515

[16] Kaur, H., Singh, S.P. (2021). Multi-stage hybrid model for supplier selection and order allocation considering disruption risks and disruptive technologies. International of journal Production Economics, 231, 107830. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107830

[17] Liu, D., L, Z., He, C., and Wang, C. (2021). Risk-Averse Co-Decision for Lower-Carbon Product Family Configuration and Resilient Supplier Selection. Journal of Sustainability, 14, 384. https://doi.org/10.1108/imds-01-2023-0007

[18] Shao, Y., Barnes, D., Wu, C. (2022). Sustainable supplier selection and order allocation for multinational enterprises considering supply disruption in COVID-19 era. Australian Journal of Management, 1–39. https://doi.org/10.1177/03128962211066953.

[19] Zhao, P., Ji, S., and Xue, Y. (2021). An integrated approach based on the decision-theoretic rough set for resilient-sustainable supplier selection and order allocation. International journal of cybernetics, systems and management sciences, 52(3), 774-808. https://doi.org/10.1108/K-11-2020-0821

[20] Taghavi, S.M., Ghezavati, V., Mohammadi Bidhandi, H., and Mirzapour Al-e-Hashem, S.M.J. (2023). Green-Resilient Supplier Selection and Order Allocation UnderDisruption by Utilizing Conditional Value at Risk: Mixed Response Strategies. Process Integration and

Network. Computers & Chemical Engineering, 108771. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108771

[28] Liu, X. (2023). Viewpoints on Robust Supply Chain Network Risk Assessment Using Dynamic Bayesian Networks. Deleted Journal, 1–8. https://doi.org/10.58195/iaet.v2i1.135

[29] Bugert, N., & Lasch, R. (2023). Analyzing upstream and downstream risk propagation in supply networks by combining Agent-based Modeling and Bayesian networks. Journal of Business Economics, 93(5), 859–889. https://doi.org/10.1007/s11573-022-01128-2

[30] Hosseini, S., Ivanov, D. (2020). Bayesian networks for supply chain risk, resilience and ripple effect analysis: A literature review. Expert Systems with Applications, 161, 113649. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113649.

[31] Sabouhi, F., Pishvaee, M.S., Jabalameli, M.S. (2018). Resilient supply chain design under operational and disruption risks considering quantity discount: A case study of pharmaceutical supply chain. Computers & Industrial Engineering, 126, 657-672. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.001.

[32] Hosseini, S., Morshedlou, N., Ivanov, D., Sarder, M.D., Barker, K., and Khaledf, A. A. (2019b). Resilient supplier selection and optimal order allocation under disruption risks. International Journal of Production Economics, 213, 124–137. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.03.018.

[33] Torabi, S.A., Baghersad, M.m., and Mansouri, S.A. (2015). Resilient supplier selection and order allocation under operational and disruption risks. Transportation Research Part E, 79, 22–48. https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.03.005.

[34] Amer, M., Daim, T. U., and Jetter, A. (2013). A review of scenario planning. Futures, 46, 23-40. https://doi.org/10.1016/j.futures.2012.10.003

Optimization for Sustainability, 7, 359–380. https://doi.org/10.1007/s41660-022-00298-4.

[21] Nazari-Shirkouhi, S., Tavakoli, M., Govindan, K., and Mousakhani, S. (2023). A hybrid approach using Z-number DEA model and Artificial Neural Network for Resilient supplier selection. Expert Systems with Applications, 222, 119746. . https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119746.

[22] Chen, Z., Hammad, A.W.A., and Alyami, M. (2024). Building construction supply chain resilience under supply and demand uncertaintie. Automation in Construction, 158. 105190. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105190.

[23] Umar, M., Wilson, M. M. J., (2024). Inherent and adaptive resilience of logistics operations in food supply chains. Journal of Business Logistics, 45(1), e12362. https://doi.org/10.1111/jbl.12362.

[24] Lu, Q., Jiang, Y., and Wang, Y. (2024). The effects of supply chain governance on supply chain resilience based on information processing theory, Industrial Management & Data Systems, 124 (1), 291-318. https://doi.org/10.1108/imds-01-2023-0007

[25] Modares, A., Motahari Farimani, N., Dehghanian, F. (2024). A new vendor-managed inventory four-tier model based on reducing environmental impacts and optimal supplier selection under uncertainty. Journal of Industrial and Management Optimization, 20(1), 188-220. https://doi.org/10.3934/jimo.2023074

[26] Ojha, R., Ghadge, A., Tiwari, M. K., & Bititci, U. S. (2018). Bayesian network modelling for supply chain risk propagation. International Journal of Production Research, 56(17), 5795–5819. https://doi.org/10.1080/00207543.2018 .1467059

[27] Nicknezhad, J., & Zegordi, S. H. (2024). Petroleum Supply Chain Dynamic Risk Assessment using Bayesian

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Spring and Summer 2024, Volume 12., No. 24., pp. 93-113
www.ier.basu.ac.ir

DOI: https://doi.org/10.22084/ier.2024.29511.2171

Stochastic Modeling of Resilient Supplier Selection and Order Allocation Under Conditions of War, Sanctions, and Pandemic: An Analysis Using Bayesian Networks

Mohammad Khosroabadi[1], Jafar Gheidar-Kheljani[2*], Mohammad Hosein Karimi-Gavareshki[3]

[1] PhD Candidate, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering and Management, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
[2,3.] Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering and Management, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received 20 June 2024
Accepted 3 August 2024

***Keywords*:**

Resilient Supplier Selection
Economic Lot Sizing
Scenario Reduction
Bayesian Network
Resilience Level
Supply Chain Risk Management

ABSTRACT

Disruptions such as war, sanctions, and pandemics not only impact suppliers and manufacturers but also influence each other at the beginning of the supply chain or affect customer demand at the end of the chain. This study employs Bayesian networks to model these complex relationships and demonstrate the extent of disruptions at each point in the supply chain. Inflation rates are utilized to predict and mitigate demand uncertainties. The reliability of suppliers, a critical aspect in supply chains, is incorporated into a bi-objective stochastic mixed-integer programming model with objectives of increasing geographical dispersion and reducing total costs (including transportation, purchasing, and ordering costs). In this model, suppliers and manufacturers collaborate to enhance supply chain resilience. For the first time, the concept of supplier resilience level is introduced. The proposed model for order allocation considers not only prices and other ordering costs but also the costs of improving suppliers' resilience levels. Additionally, customer satisfaction is implicitly calculated by reducing the cost of unmet demand. To validate the model, a case study was conducted at an automotive company in Iran, followed by a numerical example and sensitivity analysis. Scenario reduction was achieved using the fuzzy c-means clustering method and balanced impact analysis. The proposed model equips manufacturers with better decision-making and planning capabilities in the face of future risks and uncertainties.

[*] Corresponding author. J. Gheidar-Kheljani
Tel.:021-122945141; E-mail address: kheljani@mut.ac.ir