



Ripple Effect Modeling of Supplier Disruption on the Distributor in the Three-stage Supply Chain

Bakhtiar Golchoub Firozjaei

Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management, Faculty of Management, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: b.golchoub@iau-tnb.ac.ir

Maryam Shoar *

*Corresponding Author, Assistant Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: m_shoar@iau-tnb.ac.ir

Ali Rajabzadeh Ghatari

Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management and Economic, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: alirajabzadeh@modares.ac.ir

Abstract

Objective: The disruption caused by natural, economic and political crises, piracy, and disturbance in information systems and human agents (low probability factors with high impact intensity) travel like a wave from the upstream of the supply chain, i.e. from the suppliers to its downstream. The ripple effect is the phenomenon of disruption in the supply chain with serious impacts on the performance of the supply chain. It can influence sales, on-time delivery, and profits. It has more serious consequences in reducing short-term performance, which leads to market share reduction. This disruption affects the entire supply chain. It destroys the capacity or inventory of the chain, disrupts its facilities, and causes material loss and production reduction in the next stages of the supply chain. Since disruptions are inevitable in supply chains, it is necessary to address this issue and evaluate the impact of disruption risk and its distribution on the supply chain. The purpose of the present study is to provide a simulation model for the behavior of disruption propagation in a three-stage supply chain. It tries to take into account both the vulnerability and recovery capabilities of the disrupted supplier and to determine a criterion for quantitatively predicting the ripple effect of the supplier disruption on the distributor. As the disruption in suppliers prolongs deliveries to customers, and any increase in lead time will decrease sales, the current study seeks to present the quantitative estimation of the ripple effect of supplier disruption on the distributor in terms of lead time and lost sales.

Methods: First, using a discrete-time Markov chain, a recovery and vulnerability model was proposed for long-term disrupted suppliers with three states of operational, semi-operational, and fully disrupted. The model was integrated with a Bayesian network to show the way the supplier disruption spreads to the manufacturer and distributor by

dynamic Bayesian modeling. Then, in order to quantitatively show the ripple effect of the supplier disruption on the distributor, a criterion was established in terms of the lead time for the delivery of goods and lost sales based on the decision tree and the data of the dynamic Bayesian simulation model.

Results: The model was presented through figures, definitions, and mathematical relations. Its capability was shown by an example based on the status of suppliers, manufacturers, and distributors in the production of a voltage-increasing electronic component. The obtained results showed that when a disturbance occurs in upstream of a supply chain, it spreads as a ripple to its downstream and affects its performance.

Conclusion: The proposed model by this study can quantitatively show the spread and impact of disruption along the supply chain. It can reveal the hidden risk paths and the role of each entity in the chain at the time of disruption. By quantitatively estimating the vulnerability caused by any disruption in the supply chain, the proposed model can help managers identify deviations or the risk of deviations in the chain in time. It can also help them with analyzing and performing control measures to restore the operation and process of the chain and prioritize possible policies and recovery. It is also useful for the selection of suppliers and inventory plans and making the right decisions to reduce the vulnerability of the supply chain sectors quickly with minimal cost.

Keywords: Bayesian network, Covid-19, Markov chain modeling, Ripple effect, Supply chain disruption.

Citation: Golchoub Firozjaei, Bakhtiar, Shoar, Maryam & Rajabzadeh Ghatari, Ali (2022). Ripple Effect Modeling of Supplier Disruption on the Distributor in the Three-stage Supply Chain. *Industrial Management Journal*, 14(4), 638-668. (*in Persian*)

Industrial Management Journal, 2022, Vol. 14, No 4, pp. 638-668

Published by University of Tehran, Faculty of Management

<https://doi.org/10.22059/IMJ.2023.345033.1007957>

Article Type: Research Paper

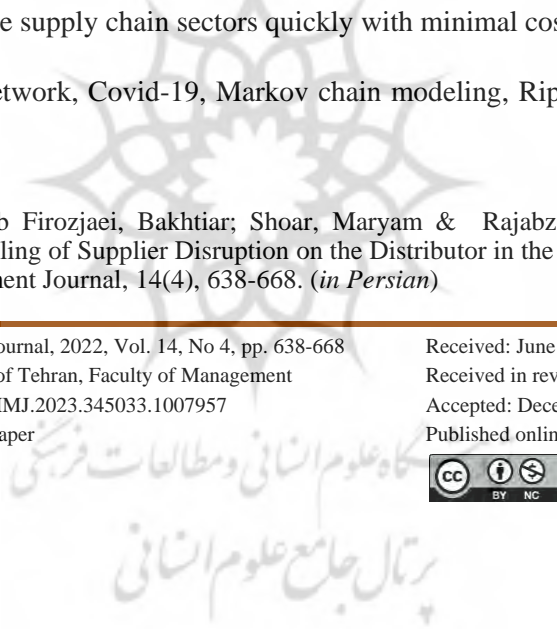
© Authors

Received: June 29, 2022

Received in revised form: October 28, 2022

Accepted: December 08, 2022

Published online: January 20, 2023



مدل سازی اثر موجی اختلال تأمین کننده بر توزیع کننده در زنجیره تأمین سه سطحی

بختیار گلچوب فیروزجائی

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: b.golchoub@iau-tnb.ac.ir

مریم شعار *

* نویسنده مسئول، استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: m_shoar@iau-tnb.ac.ir

علی رجبزاده قطری

استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: alirajabzadeh@modares.ac.ir

چکیده

هدف: اختلال ناشی از بحران‌های طبیعی، اقتصادی و سیاسی و سرقت‌های دریایی و تخریب سیستم‌های اطلاعاتی و عوامل انسانی (عوامل کم احتمال - شدت اثر بالا) در بالادست زنجیره تأمین، یعنی تأمین کنندگان به صورت موج تا پایین دست زنجیره منتشر می‌شود. هدف این پژوهش ارائه مدل شبیه‌سازی رفتار انتشار اختلال و ارائه معیاری برای پیش‌بینی کمی اثر موجی اختلال تأمین کننده بر توزیع کننده است.

روش: از زنجیره مارکوف گسسته - زمان برای مدل سازی بازیابی و آسیب‌پذیری تأمین کنندگان استفاده شده و این مدل با شبکه بیزین جهت شبیه‌سازی رفتار انتشار اختلال تأمین کننده در زنجیره تأمین ادغام می‌شود؛ سپس معیاری برای تخمین اثر موجی اختلال تأمین کننده بر توزیع کننده، برحسب زمان انتظار تحویل کالا و فروش از دست‌رفته ارائه می‌شود.

یافته‌ها: مدل در قالب شکل، تعاریف و روابط ریاضی ارائه شده و قابلیت آن با به‌کارگیری یک مثال و بر پایه داده‌های وضعیت تأمین کنندگان، تولیدکننده و توزیع کننده در تولید یک قطعه الکترونیکی افزایش یافته و نتایج نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری: مدل پیشنهادی می‌تواند اثر و نتیجه اختلال و مسیرهای پرخطر و پنهان در زنجیره تأمین را نشان دهد تا بتوانیم آسیب‌پذیری ناشی از اختلال را برآورد کنیم. این مدل قادر است در انتخاب استراتژی‌های مناسب برای کاهش سرعت انتشار اختلال و بازیابی زنجیره و کاهش هزینه‌های ناشی از آن به مدیران کمک کند.

کلیدواژه‌ها: اثر موجی، اختلال زنجیره تأمین، شبکه بیزین، کووید ۱۹، مدل سازی زنجیره مارکوف.

استناد: گلچوب فیروزجائی، بختیار؛ شعار، مریم و رجبزاده قطری، علی (۱۴۰۱). مدل سازی اثر موجی اختلال تأمین کننده بر توزیع کننده در زنجیره تأمین سه سطحی. مدیریت صنعتی، ۱۴(۴)، ۶۳۸-۶۶۸.

مقدمه

امروزه محیط کسب و کار موجب بروز سطح بالایی از عدم اطمینان و رفتارهای آشفته در زنجیره تأمین شده است. در این بین، بحران‌های جدیدی مانند شیوع کووید ۱۹^۱ تأثیر شدیدی بر زنجیره تأمین گذاشته است. با توجه به اهمیت مدیریت زنجیره تأمین برای سازمان‌ها در این شرایط، پیش‌بینی و تحقق تاب‌آوری لازم برای مقابله یا جلوگیری از بروز اختلال امری بسیار ضروری و حائز اهمیت است. مطالعات اخیر در زمینه تاب‌آوری زنجیره تأمین، بر شناسایی و رتبه‌بندی استراتژی‌های پاسخ به اختلال‌های زنجیره تأمین تأکید کرده‌اند (ترک‌زاده و بویرحسنی، ۱۳۹۹). ریسک اختلال چالش جدیدی برای مدیران زنجیره تأمین ایجاد کرده است که آن‌ها را با اثر موجی^۲ مواجه می‌کند که برخلاف انحراف عملیاتی (مانند اثر شلاقی)، موضوع اختلال‌های ساختاری در زنجیره تأمین است (دلگی، ایوانف و سوکولوف، ۲۰۱۸). اثر موجی، پدیده انتشار اختلال در زنجیره تأمین و تأثیر آن بر عملکرد زنجیره تأمین است (برای مثال، فروش، تحویل به‌موقع و سود) و احتمالاً پیامدهای جدی‌تری در کاهش عملکرد کوتاه‌مدت دارد و به افت سهم بازار منجر می‌شود. این اختلال، بر کل زنجیره تأمین تأثیر می‌گذارد؛ برای مثال، ظرفیت یا موجودی از بین می‌رود، تأسیسات مختل می‌شود، مواد از دست می‌رود و تولید در مراحل بعدی زنجیره تأمین کاهش می‌یابد (دلگی و همکاران، ۲۰۱۸). به‌هرحال، ایجاد اختلال در زنجیره تأمین اجتناب‌ناپذیر است؛ از این رو پرداختن به این موضوع و شناسایی و ارزیابی اثر ریسک اختلال و انتشار آن در زنجیره تأمین به مدیران کمک می‌کند تا انحراف‌ها یا خطر انحراف در زنجیره را به‌موقع شناسایی و تحلیل کنند و به‌منظور بازیابی عملیات در فرایند زنجیره، اقدام‌های کنترلی انجام دهند تا آسیب‌پذیری بخش‌های زنجیره تأمین را به‌سرعت و با حداقل هزینه کاهش دهند.

اعضای سیستم‌های زنجیره تأمین در سه حوزه کلی تأمین، تولید و توزیع فعالیت می‌کنند. حوزه تأمین و تدارک در سیستم زنجیره تأمین، در واقع انتخاب بهترین منابع و تأمین‌کنندگان در جهت افزایش کارایی زنجیره، کاهش هزینه‌ها، تحویل به‌موقع محصول با بالاترین کیفیت و افزایش سطح رضایتمندی مشتریان است که این امر موجب شده تا هماهنگی با تأمین‌کنندگان و نقش آن‌ها در زنجیره تأمین، در کانون توجه تصمیم‌گیران قرار گیرد (اختیاری، زندیه، عالم‌تبریز و ربیعه، ۱۳۹۸). در دهه‌های اخیر، تقویت ارتباط با تأمین‌کنندگان در زنجیره تأمین، رکن اصلی زنجیره و امری مهم شناخته شده است و در بازار متلاطم کنونی، تلاش شرکت‌ها برای پاسخ‌گویی سریع به مشتریان، واکنش سریع به محرک‌های محیطی و دستیابی به مزیت‌های رقابتی، نیاز به حفظ و گسترش روابط با تأمین‌کنندگان را برجسته کرده است (آقازاده و مالکی، ۱۳۹۹). در محیط آشفته و عدم اطمینان، هر لحظه ممکن است تأمین‌کنندگان دچار اختلال شوند که این اختلال‌ها پیامدهای گسترده‌ای خواهد داشت (حسینی، ایوانف و دلگی، ۲۰۲۰). احتمال ایجاد اثر موجی یا وقفه در زنجیره، پس از ایجاد اختلال در تأمین‌کنندگان زیاد است و این اختلال بر فرایند زنجیره اثر می‌گذارد و روند عرضه و تقاضا را دستخوش تغییر می‌کند. اثر موجی در دو زمینه، فرایند و ساختار زنجیره تأمین را به‌مانند دومینو دچار مشکل

1. Covid-19
2. Ripple effect
3. Dolgui, Ivanov & Sokolov
4. Hosseini, Ivanov & Dolgui

می‌کند (ایوانف^۱، ۲۰۱۸). اگر مدیران در زنجیره تأمین، به موضوع ریسک اختلال و اثر موجی ناشی از آن و ریسک‌های وارد شده از طریق تأمین‌کنندگان بر زنجیره نپردازند، احتمال آن‌ها را ارزیابی نکنند، معیارهای پیشگیرانه را لحاظ نکنند یا واکنش‌های درست و به‌موقع نداشته باشند، زنجیره را از اهدافش که کارایی، پاسخ‌گویی و کسب سود بیشتر است، دور خواهند کرد. بنابراین آنچه به‌عنوان مسئله مطرح می‌شود، انتشار اثر اختلال تأمین‌کننده در سرتاسر زنجیره تأمین است. با توجه به عوامل اختلال فراوانی که امروزه در جهان مشاهده می‌شود، از جمله شیوع ویروس کرونا که دنیا با آن دست‌وپنجه نرم کرده است، تولیدکنندگان و مراکز توزیع نگران هستند که تأمین‌کنندگانشان دچار اختلال شوند و این اختلال به‌صورت موج در کل زنجیره منتشر شود و آن‌ها را از رسیدن به اهداف، از جمله سطح عملکرد، خدمت‌رسانی و تحویل به‌موقع کالا به مشتری دور کند یا زنجیره را تا حد وقفه کامل پیش ببرد.

با توجه به آنچه بیان شد، در این تحقیق با ادغام مدل زنجیره مارکوف گسسته - زمان^۲ و شبکه بیزین و به‌کمک درخت تصمیم، معیاری برای ارزیابی اثر موجی ایجاد شده است تا بتوان آسیب‌پذیری ناشی از اختلال را تخمین زد و به مدیران، در انتخاب استراتژی‌های مناسب برای کاهش سرعت انتشار اختلال، بازیابی زنجیره و کاهش هزینه‌های ناشی از آن کمک کرد. تاکنون مقالاتی با عنوان مدل‌سازی اثر موجی (برای مثال، حسینی و همکاران، ۲۰۲۰) برحسب سطح خدمت و سودمندی در یک زنجیره تأمین دوسطحی ارائه شده است؛ اما نوآوری پژوهش حاضر، تخمین کمی ریسک اثر موجی اختلال با ادغام زنجیره مارکوف و شبکه بیزین و برحسب زمان انتظار^۳ و فروش از دست‌رفته^۴ برای یک زنجیره تأمین سه‌سطحی است. با توجه به اینکه اختلال کرونا، بیشترین آسیب را در زمان تحویل و انتظار مشتری در دستیابی به کالا و کاهش فروش در زنجیره‌های تأمین وارد کرده است، در پژوهش حاضر، زمان انتظار و فروش از دست‌رفته به‌عنوان شاخصی برای مدل‌سازی اثر موجی انتخاب شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که مدل ارائه شده می‌تواند در پیش‌بینی و تحلیل تأثیر اختلال بر عملکرد زنجیره تأمین و آشکار کردن مسیر ریسک اختلال، به مدیران کمک کند تا در زنجیره تأمین به‌شکل شایسته‌تری تصمیم‌گیری کنند.

مقاله حاضر بدین ترتیب سازمان‌دهی شده است. در ادامه، ادبیات مربوط به اختلال زنجیره تأمین و تحقیقات پیشین مرور شده است. در بخش بعدی، ضمن بیان روش پژوهش، مدل پیشنهادی معرفی می‌شود. در ادامه تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی اثر موجی ناشی از اختلال انجام می‌گیرد و در نهایت، مقاله با بیان نتایج و ارائه پیشنهادها به پایان می‌رسد.

پیشینه نظری پژوهش

تصمیم‌درباره پیکربندی زنجیره تأمین مسئله‌ای استراتژیک برای هر شرکتی محسوب می‌شود. موضوع جایابی تجهیزات و تخصیص مشتریان و اختلال در زنجیره تأمین، هسته اصلی یک سیستم تولیدی است. در سال‌های اخیر، زنجیره‌های تأمین در نتیجه رشد ساختار پیچیده و به‌هم‌پیوسته شبکه‌های عرضه و اتخاذ شیوه‌های گسترده تولید تقاضامحور، به‌طور فزاینده‌ای در معرض اختلال قرار گرفته‌اند.

1. Ivanov
2. Discrete-Time Markov Chain (DTMC)
3. Lead time
4. Lost sales

به وضعیت غیرمعمول در شبکه زنجیره تأمین، اختلال می‌گویند که با احتمال کم و تأثیر شدید روی می‌دهد. بازار مدرن محیطی با سطوح تغییرپذیری زیاد و تلاطم بسیار شناخته می‌شود. اختلال‌های طبیعی و انسانی، بر عملکرد زنجیره تأمین تأثیر زیادی دارند و در مواقع بسیاری، هزینه سنگینی را به زنجیره تحمیل می‌کنند. تولید ناب و افزایش استفاده از تولید به‌موقع^۱ و عدم اطمینان در سیستم‌های پویا که آسیب‌پذیری سیستم را افزایش می‌دهد، سبب شده است تا موضوع اختلال در کانون توجه پژوهشگران قرار گیرد. تقاضا در هر صنعتی نسبت به گذشته، دچار نوسان و تغییر بسیاری شده است و از سوی دیگر، رقابتی شدن بازارها کوتاهی عمر محصولات را در پی داشته است. در این زمان، آسیب‌پذیری زنجیره تأمین نسبت به اختلال‌ها نیز افزایش یافته است. از همین رو، زمینه اختلال در مدیریت زنجیره تأمین توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده و در این راستا مقالات بسیاری منتشر شده است (مرادی مسجدبری و ماکویی، ۱۳۹۷).

پیش‌بینی‌ناپذیر بودن اختلال‌ها و بزرگی عواقب انتشار اختلال در زنجیره تأمین، به جریان جدیدی از تحقیقات در زمینه اثر موجی اختلال انجامیده است (ایوانف، ۲۰۱۷؛ سوکولوف و همکاران، ۲۰۱۶). اثرموجی در محتوای زنجیره تأمین به پویایی‌های ساختاری اشاره دارد و انتشار رو به پایین عواقب اختلال را توصیف می‌کند. موج تأثیر اختلال در پایین‌دست، می‌تواند به‌شدت محتوای استراتژی و عملکرد را تحت تأثیر قرار دهد؛ برای مثال ایوانف، دلگی و سوکولوف^۲ (۲۰۱۹) انتشار رو به پایین کاهش تکمیل تقاضا در نتیجه اثر موجی را گزارش دادند. وابستگی‌ها در زمینه مدیریت زنجیره تأمین، می‌تواند در اشکال مختلف مدل شود؛ به‌طور مثال، در جریان کالاها بین تولیدکننده و مراکز توزیع، جریان‌های مواد می‌توانند در برابر اختلال‌ها و خطرهای متعدد آسیب‌پذیر باشند (ایوانف، دلگی، سولوف و ایوانف^۳، ۲۰۱۷؛ هی، علوی فرد، ایوانف و جهانی^۴، ۲۰۱۸؛ یون، تالوری، ایلدیز و جهانی^۵، ۲۰۱۸؛ پورنادر، کچ و تالوری^۶، ۲۰۲۰). انواع مختلف اختلال در عرضه، تولید و تدارکات (ساویک^۷، ۲۰۲۰) در مدیریت ریسک زنجیره تأمین و الگوی تاب‌آوری نقش مهمی دارد. انعطاف‌پذیری معمولاً به‌عنوان توانایی زنجیره تأمین برای مقاومت در برابر اختلال‌ها و بهبودی پس از اختلال شناخته می‌شود (حسینی و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین یک زنجیره تأمین انعطاف‌پذیر با افزونگی (به‌طور مثال، تأمین‌کنندگان پشتیبان) و قابلیت بازیابی مشخص می‌شود (بهزادی، اسلاوان، اسلن، اسکریمجر و ژانگ^۸، ۲۰۱۷). بیشتر تحقیقاتی که به موضوع اختلال در زنجیره تأمین پرداخته‌اند، افزایش تاب‌آوری و طراحی یک زنجیره تأمین انعطاف‌پذیر را راه پیشگیری و کاهش صدمات اختلال پیشنهاد داده‌اند. خلیلی، پویا، کاظمی و فکور ثقیه (۱۴۰۱) در مرحله پیش از اختلال، استحکام‌بخشی تسهیلات و پیش‌بینی ظرفیت‌های پشتیبان و در مرحله پس از اختلال، برنامه‌ریزی بازیابی ظرفیت‌های از دست‌رفته و تطبیق با شرایط اختلال را راه‌کارهای مقابله با اختلال در زنجیره تأمین پیشنهاد دادند. جهت

1. Just in time

2. Ivanov, Dolgui & Sokolov

3. Ivanov, Dolgui, Sokolov & Ivanova

4. He, Alavifard, Ivanov & Jahani

5. Yoon, Talluri, Yildiz, & Ho

6. Kach & Talluri

7. Sawik

8. Behzadi, O'Sullivan, Olsen, Scrimgeour & Zhang

تاب‌آور ساختن زنجیره تأمین، راهبردهای مختلف از جمله افزونگی (ذخیره احتیاطی، ظرفیت تولید اضافه)، انعطاف‌پذیری (حمل‌ونقل متنوع، بهره‌گیری از تأمین‌کنندگان مختلف) و گسترش مسئولیت اجتماعی را می‌توان مدنظر قرار داد (سیویوه، آذر و زندیه، ۱۴۰۰).

یکی از چالش‌های غالب در مدیریت انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین، کنترل اثر موجی، یعنی مدیریت انتشار اختلال در سراسر لایه‌های زنجیره تأمین است (میشرا، دویدی، رانا و حسنی، ۲۰۲۱).

اثر موجی

اغلب تحقیقات مربوط به اختلال در زنجیره تأمین، به نحوه موجی تغییرات در متغیرها در باقی قسمت‌های زنجیره تأمین و تأثیر آن بر عملکرد می‌پردازند. تحقیقات ایوانوف، تسپولانی‌دیس و شونبرگر^۲ (۲۰۱۹) و دلگی و همکاران (۲۰۱۸) نشان می‌دهد که اثر موجی در زنجیره تأمین، مشابه علوم کامپیوتری است و اثر موجی مبتنی بر اختلال، محدوده تغییرات در سیستم را تعیین می‌کند. با توجه به ایجاد اختلال و عکس اثر شلاقی با فرکانس پایین / تأثیر زیاد، اخیراً اثر موجی در ادبیات دانشگاهی وارد حوزه مدیریت زنجیره تأمین شده است. در زنجیره تأمین اثر موجی، از انتشار اختلال از نقطه اولیه به شبکه‌های تأمین، تولید و توزیع نشئت می‌گیرد (ایوانوف، ۲۰۱۷). اثر موجی در زنجیره تأمین به پویایی ساختاری اشاره می‌کند و یک پیشران پایین‌دست کاهش تکمیل تقاضا را در نتیجه اختلالی شدید توصیف می‌کند. اثر موجی در زنجیره تأمین، زمانی روی می‌دهد که نتوان اختلال را در محل ایجاد محدود کرد و این کار بر عملکرد زنجیره تأمین همچون فروش، بازگشت سهام، سطح خدمات و هزینه‌ها تأثیر می‌گذارد (دلگی و همکاران، ۲۰۱۸). اثر موجی را اثر دومینو یا اثر گلوله برفی نیز می‌نامند؛ زیرا با شروع اختلال در یک نقطه از زنجیره تأمین، باقی واحدها نیز اختلال را درک می‌کنند. با افزایش پیچیدگی زنجیره تأمین و فشار حاصل بر سرعت و کارایی و تمرکز صنایع در مناطق صنعتی، زنجیره تأمین جهانی وابستگی زیادی به قابلیت دسترسی زیرساخت حمل‌ونقل دائمی پیدا کرده که این امر موجب شده است تعداد روزافزونی از صنایع به‌صورت دومینو اختلال را درک کنند. اثر موجی به توصیف انتشار دینامیک اختلال در زنجیره تأمین، تأثیر اختلال بر عملکرد زنجیره تأمین و محدوده تغییرات ناشی از اختلال در ساختار و پارامترهای زنجیره تأمین می‌پردازد (ایوانوف، سوکولوف و دلگی،^۳ ۲۰۱۴؛ دلگی و همکاران، ۲۰۱۸).

اختلال در کل زنجیره تأمین تأثیر می‌گذارد، ظرفیت یا موجودی را از بین می‌برد، تأسیسات را مختل می‌کند و باعث از دست‌رفتن مواد و کاهش تولید در مراحل بعدی زنجیره تأمین می‌شود. پس از سونامی و زلزله ژاپن در سال ۲۰۱۱، بسیاری از کارخانه‌های تولید خودرو در انگلستان و ایالات متحده آمریکا، مجبور شدند که تولید خود را متوقف کنند؛ زیرا تأمین‌کنندگان قطعات آن‌ها در مناطق سونامی و زلزله قرار داشتند. سونی، یکی از شرکت‌های بزرگ الکترونیکی، تولید سنسور تصویر خود را متوقف کرد. این سنسور در دوربین‌های هوشمند، از جمله در گوشی آیفون ساخت شرکت اپل استفاده می‌شد. رن‌ساس، یکی از بزرگ‌ترین میکروکنترلرهای الکترونیکی و خودرو در جهان، در پی سونامی،

1. Mishra, Dwivedi, Rana & Hassini
2. Ivanov, Tsipoulaniadis & Schönberger
3. Ivanov, Sokolov & Dolgui

متحمل خسارت در کارخانه‌های نیمه‌رسانا شد که به ماه‌ها تأخیر در تولید جهانی خودرو انجامید (ایوانف و همکاران، ۲۰۱۷).

یکی از اختلالات‌هایی که اخیراً زنجیره‌های تأمین جهانی با آن دست‌وپنجه نرم کرده‌اند و اثر موجی بزرگی را در زنجیره ایجاد کرده و موجب کاهش فروش یا وقفه در زنجیره تأمین شده است، شیوع ویروس کروناست. شیوع ویروس کرونا، هم به بخش عرضه و هم تقاضا شوک منفی وارد کرد و با تأثیرگذاری در زنجیره تأمین، این شوک به تمام بخش‌های اقتصادی سرایت کرد. شوک اولیه کرونا، توقف فعالیت‌های اقتصادی، بسته‌شدن کارخانه‌ها و رکود در بسیاری از فعالیت‌های بخش خدمات بود و با توجه به اثر مرگومیر و کاهش نیروی انسانی و کاهش فعالیت و بهره‌وری نیروی کار، عرضه را نیز دچار مشکل کرد. در سوی دیگر، در نتیجه شیوع ویروس کرونا، کاهش زیادی در بخش تقاضا به‌وجود آمد که این کاهش، از تغییر در ترجیحات مصرف‌کننده به دلیل ترس از بیماری و تغییر الگوی مصرف نشئت گرفت. به این مشکلات، کاهش و گاهی توقف صادرات و واردات را باید افزود که به دلیل بسته‌شدن مرزهای زمینی توسط کشورها به‌وجود آمد که به کاهش تولید و فروش منجر شد و اثر شوک‌های هر دو سمت عرضه و تقاضا را مضاعف کرد. اثرهای موجی در ابتدای همه‌گیری کووید ۱۹ مشاهده شد؛ به طوری که به تأمین‌کنندگان کشورهای آسیایی آسیب زد و زنجیره تأمین را مختل کرد و باعث کمبود مواد و حتی بسته‌شدن تأسیسات در قاره‌های دیگر شد (ایوانف، ۲۰۲۰ الف).

پیشینه تجربی پژوهش

مطالعات بسیاری در خصوص ریسک، اختلال و مدیریت اختلال در زنجیره تأمین صورت گرفته است که هدف آن‌ها پُر کردن شکاف بین تئوری و عمل در رابطه با ماهیت غیرقطعی محیط‌های واقعی، برای اجرای زنجیره تأمین بوده است. از آنجایی که مدیریت اختلال در زنجیره تأمین موضوعی چندوجهی است، تاکنون روش‌های مختلفی در این زمینه پیشنهاد شده است؛ اما اصطلاح «اثر موجی» چندان در کانون توجه جامعه علمی قرار نگرفته است؛ هرچند بسیاری از عناصر آن، به‌صورت ضمنی در مطالعات کمی و تجربی متعددی در نظر گرفته شده است. در این بخش، به تعدادی از تحقیقات اخیر که در خصوص اصطلاح اثر موجی صورت گرفته است، اشاره خواهد شد.

گاج، ار، ایوانف و چادوری^۱ (۲۰۲۲) تأثیرهای جانبی اختلال‌های بلندمدت و هم‌زمان ناشی از کووید ۱۹ را با رویکرد شبیه‌سازی سیستم‌های پویا بررسی کردند. هدف اصلی این مطالعه کشف ارزش رویکرد سیستم‌های پویا برای شناسایی و تجسم اثر موجی، همراه با تجزیه و تحلیل رفتارهای پویای تولید و عرضه در سطوح مختلف زنجیره تأمین بود. آن‌ها چهار سناریو اختلال ناشی از ریسک تقاضا، تدارکات، عرضه و ترکیبی (هم‌زمان) را بررسی کردند. نتایج نشان داد که انتشار اختلال و تأثیر آن بر اساس نوع ریسک و ترکیب‌ها متفاوت است و توزیع‌کنندگان و تولیدکنندگان در برابر اختلال‌های متعدد و طولانی، به دلیل نقاط خطر گسترده‌تر، شکننده‌ترند.

مزروعی نصرآبادی، حبیبی راد و شول (۱۴۰۱) تحقیقی با عنوان ارائه مدل عوامل کلیدی موفقیت برای مقابله با اثر موجی در زنجیره تأمین فرش ماشینی ایران با نگاهی بر همه‌گیری کرونا انجام دادند. در این تحقیق، بر اساس روش

تحلیل تم و مصاحبه‌های عمیق، عوامل کلیدی موفقیت شناسایی شد؛ سپس با رویکرد نقشه‌شناختی فازی، مدل عوامل کلیدی موفقیت شکل گرفت. نتایج نشان داد که ۲۳ عامل کلیدی موفقیت برای مقابله با اثر موجی وجود دارد که در میان آن‌ها «دیجیتال‌سازی زنجیره تأمین»، «مدیران توانمند و کارآمد» و «هماهنگی در زنجیره تأمین» عوامل اثرگذار مهم‌تر و «هماهنگی در زنجیره تأمین»، «برنامه‌ریزی مناسب» و «انعطاف‌پذیری در تولید» به‌عنوان عوامل مرکزی مهم باید مورد توجه ویژه قرار بگیرند.

بروست، داوری، کینرا و لاتوره^۱ (۲۰۲۲) در پی اختلال‌های همه‌گیری کرونا، به مدل‌سازی انتشار اثر موجی و اثر بهره‌وری نیروی کار زنجیره تأمین جهانی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که چگونه گسترش بیماری همه‌گیر، از نظر جغرافیایی اثر موجی را با کاهش مشارکت کارگران در تولید گسترش می‌دهد و توانایی شرکت‌ها و کل شبکه زنجیره تأمین فرامرزی را برای برآوردن خواسته‌های مشتریان تضعیف می‌کند. این مدل با استفاده از پویایی مکانی - زمانی انتشار کووید ۱۹ در شبکه‌های تأمین با ترکیب جریان کالاها و مواد در یک زنجیره تأمین جهانی معمولی، با یک مدل اپیدمیولوژیک به تجسم و کمی‌سازی اثر موجی کمک می‌کند. این مدل تجزیه و تحلیل‌های آینده‌نگر را در سناریوهای what-if انجام می‌دهد تا تأثیر بر نیروی کار در هر گره را شبیه‌سازی کند. نتایج این تحقیق به کاهش اثر و گسترش بیماری‌های همه‌گیر در منطقه‌ای خاص و توانایی شبکه تأمین برای غلبه بر اثر موجی کمک می‌کند.

ژینگز، هنگفن و رای^۲ (۲۰۲۲) یک استراتژی بازیابی اختلال در زنجیره تأمین تحت بیماری کووید ۱۹ با توجه به تغییر محصول ارائه کردند. در این مقاله استراتژی بازیابی اختلال در زنجیره تأمین با انگیزه تغییر نوع محصول اصلی ارائه شده است. به‌منظور به حداکثر رساندن سود کل از تغییرات محصول، یک مدل MILP با ترکیب خرید اضطراری در سمت عرضه و تغییرات محصول توسط تولیدکننده و همچنین جبران قیمت پس از سفارش در سمت تقاضا ایجاد شده است. این مدل از الگوریتم ابتکاری مبتنی بر ILOG CPLEX استفاده می‌کند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که استراتژی بازیابی اختلال پیشنهاد شده می‌تواند به‌طور مؤثر از کاهش سود تولیدکننده جلوگیری کند.

لیاگونو، مولا و کامپوزانو^۳ (۲۰۲۲) ۵۰ مقاله اخیر مرتبط با اثر موجی را بررسی کردند. این مقاله از جدیدترین مقاله‌ها در زمینه اثر موجی، یک چارچوب مفهومی ارائه کرده و عوامل اختلال و محرک اثر موجی و روش‌های ارزیابی اثر موجی و تحلیل انتشار اختلال در زنجیره تأمین این مقاله‌ها را جمع‌بندی کرده است. محققان در این مقاله، به بررسی راه‌های مقابله با اثر موجی پرداخته‌اند. انعطاف‌پذیری و چابکی و داشتن ذخایر ایمنی و منابع جایگزین، از جمله راه‌های مقابله با اثر موجی است که در این مقاله به آن پرداخته شده است. رویکرد محققان این پژوهش، تحلیل شبیه‌سازی شده با معیار سطح خدمت و سود در یک زنجیره تأمین چهارسطحی بوده است.

سیندهوانی، جایارم و سدیکوتی^۴ (۲۰۲۲) روی قابلیت‌های کاهش اثر موجی در شبکه توزیع دارویی هند در طول اختلال‌هایی مانند همه‌گیری کووید ۱۹ کار کردند. برای مطالعه قابلیت‌های کاهش، آن‌ها یک تحلیل چندلایه (شبکه، فرایند و سطوح کنترل) با استفاده از شبکه بی‌زی، بهینه‌سازی ریاضی و روش‌های شبیه‌سازی رویداد گسسته انجام دادند.

1. Brusset, Davari, Kinra & La Torre
2. Jingzhe, Hongfen & Ray
3. Liaguno, Mula & Campuzano
4. Sindhwani, Jayaram & Saddikuti

این تحلیل یک رابطه ارتباطی بین قابلیت‌های کاهش اثر موجی و ویژگی‌های طراحی شبکه موجودی بالادست زنجیره تأمین را نشان داد. با استفاده از بهینه‌سازی تصادفی و آرام‌سازی لاگرانژی، گزینه‌های ایدئال را برای مراکز توزیع منطقه‌ای در سطح پایین دست پیدا کردند و سپس، به منظور تجزیه و تحلیل عملکرد کلی سیستم، این مکان‌های پایین دستی را با سایر نهادهای زنجیره تأمین، برای ساختن مدل بهینه‌سازی و شبیه‌سازی شبکه ادغام کردند. کاربرد روش پیشنهادی، در دوران همه‌گیری کووید ۱۹، در یک مطالعه موردی به منظور توزیع ماسک‌های N۹۵ در فروشگاه‌های «جان اوشادی» در هند نشان داده شد. بر اساس نتایج پیکربندی مجدد زنجیره تأمین، سطح خدمات را تا ۹۵/۷ درصد بهبود می‌بخشد و ۱۰/۷ درصد تعداد سفارش‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین مراکز توزیع منطقه‌ای و منابع تأمین پشتیبان، انعطاف‌پذیری کلی را فراهم می‌کنند و سلامت و ایمنی شغلی را بهبود می‌بخشند.

پارک، بلک هارست، پاول و شایب^۱ (۲۰۲۲) تجزیه و تحلیلی از اثر موجی اختلال‌های رخ داده در جریان‌های دایره‌ای، در یک شبکه زنجیره تأمین ارائه کردند. این مقاله به بررسی اثرهای موجی در زنجیره تأمین می‌پردازد که به دلیل جریان‌های دایره‌ای تعبیه شده در طراحی زنجیره تأمین ایجاد شده است. به طور معمول، زنجیره‌های تأمین پیچیده و غیرخطی هستند؛ اما در دنیای واقعی، جریان‌های دایره‌ای در زنجیره‌های تأمین وجود دارند که اغلب برای مدیران زنجیره تأمین پنهان یا ناشناخته‌اند. این جریان‌های دایره‌ای زمانی ایجاد می‌شوند که یک تأمین‌کننده ردیف ۲، تأمین‌کننده سطح ۳ (یا بالاتر) در شبکه زنجیره تأمین باشد. علاوه بر این، یک شبکه دایره‌ای می‌تواند زمانی رخ دهد که یک تأمین‌کننده، در همان شبکه مشتری باشد. در حضور این نوع ساختارها، زنجیره‌های تأمین ممکن است یک اثر موجی (یا انتشار اختلال) را تجربه کنند که در آن اختلال‌ها بر عملکرد زنجیره تأمین تأثیر می‌گذارند. آن‌ها با استفاده از یک ساختار زنجیره تأمین در دنیای واقعی، اثر جریان‌های دایره‌ای را بر اثر موجی بررسی و شناسایی کردند و نشان دادند که چگونه این امر، بر انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین در برابر اختلال‌ها تأثیر می‌گذارد.

اولین مقاله‌ای که یک مدل شبکه بیزین را با سه لایه محرک‌های اختلال، حوادث ریسکی و پیامدها و نتایج آن به عنوان اثر موجی اختلال پیشنهاد کرد، مقاله حسینی و ایوانف^۲ (۲۰۲۱) بود. در این مدل، پیامدها به رویدادهای ریسکی مشروط می‌شوند، در حالی که وقوع رویدادهای ریسکی به وقوع محرک‌های اختلال بستگی دارد. روابط علی بین این سه لایه با استفاده از احتمال شرطی تعریف شده است. این مدل روابط وابستگی متقابل بین رویدادهای ریسک را نشان می‌دهد. مدل پیشنهادی همچنین، کمی کردن تأثیر محرک‌های اختلال زنجیره تأمین را بر عملکرد مالی (یعنی فروش از دست‌رفته) و تداوم عملیات تسهیل می‌کند و در عین حال، بینش‌هایی را درباره میزان احتمال کاهش محرک‌های اختلال به منظور به حداقل رساندن احتمال اختلال در زنجیره تأمین و تأثیر آن‌ها ارائه می‌کند.

سینگ، کومار، پانچال و کومار تیواری و همکاران^۳ (۲۰۲۱) یک مدل شبیه‌سازی بر اساس سطح پاسخ‌گویی زنجیره‌های تأمین در میان کووید ۱۹ ایجاد کردند. نتایج مدل شبیه‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد که ادغام انبارها، به طور چشمگیری توانایی آن‌ها را برای دستیابی به برآورده شدن تقاضا بهبود می‌بخشد.

1. Park, Blackhurst, Paul & Scheibe
2. Hosseini & Ivanov
3. Singh

ایوانف و دلگی (۲۰۲۱) تحقیقی را ارائه کردند که برای مواجه‌شدن با اثر موجی در زنجیره‌های تأمین در دوران همه‌گیری کووید ۱۹، روش تحقیق در عملیات^۱ را به‌کار گرفتند. بیماری کووید ۱۹، از شکنندگی‌های پیش‌بینی‌نشده و بی‌سابقه در زنجیره‌های تأمین رونمایی می‌کند. عامل اصلی تنش‌زایی و شوک‌های بعدی آن در زنجیره تأمین، از انتشار اختلال (مانند اثر موجی) از طریق شبکه‌های مرتبط ناشی می‌شود. در این مقاله، وضعیت فعلی و دستورات عمل‌های تحقیقاتی آینده در خصوص اثر موجی در دوران همه‌گیری تعریف می‌شود.

لی، چن، کولیگنان و ایوانف^۲ (۲۰۲۱) اثر موجی در شبکه زنجیره تأمین را از نظر انتشار اختلال رو به جلو و عقب، سلامت شبکه و آسیب‌پذیری بررسی کردند. یک اختلال محلی می‌تواند از طریق جریان به سراسر شبکه انتشار یابد و در نهایت، بر کل شبکه زنجیره تأمین تأثیر بگذارد. این پدیده اثر موجی است که به‌طور گسترده در عمل وجود دارد و در سال‌های اخیر بسیار در کانون توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، انتشار اختلال رو به جلو و عقب، عامل اصلی استرس‌زایی برای شبکه‌های زنجیره تأمین در دوران طی بیماری کووید ۱۹ است که اختلال‌های هم‌زمان و پی‌درپی عرضه و تقاضا را ایجاد می‌کند.

چوهان، پرا و پرینترپ^۳ (۲۰۲۱) طی تحقیقی، به بررسی رابطه بین الگوهای تودرتو^۴ و اثر موجی در شبکه‌های تأمین پیچیده پرداختند. طبق نظر آن‌ها تحقیقات قبلی پیدایش تودرتو و دلایل احتمالی آن را بررسی کردند؛ در صورتی که رابطه آن با انعطاف‌پذیری شبکه تأمین ناشناخته باقی مانده است. آن‌ها در این پژوهش، یک مدل آشناری با کنار هم قرار دادن ساختار محصول - تأمین‌کننده - خریدار ایجاد کردند و با تجزیه و تحلیل یک ویژگی جغرافیایی که در شبکه‌های تأمین ظاهر می‌شود، دانش جدیدی را ارائه دادند. محققان این پژوهش، اختلال‌های سازمان‌های تودرتو و غیرتودرتوی شبکه تأمین جهانی خودرو را شبیه‌سازی کرده و به این نتیجه رسیدند که سازمان‌های تودرتو، به‌طور چشمگیری در برابر اختلال‌های تصادفی قوی‌ترند؛ اما در شرایط آشناری، در برابر اختلال‌ها آسیب‌پذیرند. با این حال، ساختارهای تودرتو ارتجاعی نیستند؛ زیرا از استراتژی پاسخ‌گویی که در آن خریداران به‌دنبال تأمین‌کنندگان جایگزین هستند، سود نمی‌برند، به این دلیل که تأمین‌کننده جایگزین وجود ندارد.

زنجانی و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل مکان - موجودی قوی برای زنجیره‌های تأمین مواد غذایی ارائه کردند که تحت اختلال‌ها با اثرهای موجی مواجه می‌شوند. در این مقاله، یک مدل ریاضی ترکیبی دو مرحله‌ای عمومی، برای یکپارچه‌سازی ویژگی‌های کلیدی تصمیم‌های مکان‌یابی - تخصیص و موجودی - بازپرسازی توسعه یافته است. سپس، اثرهای موجی اختلال‌های خاص مربوط به غذا، از طریق سناریوهای قابل قبول گنجانده می‌شود. برای چنین تنظیمی، سه استراتژی انعطاف‌پذیری، یعنی آمادگی، انعطاف‌پذیری و پاسخ‌گویی، برای مقابله با عدم قطعیت‌ها استفاده می‌شود. بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده، راه‌حل‌های به‌دست‌آمده، رفتار مدل‌های مختلف طراحی شده را در برابر اثرهای موجی آشکار می‌کند.

1. Operation research
2. Li, Chen, Collignon & Ivanov
3. Chauhan & Perera & Brintrup
4. Nested pattern

ایوانف (۲۰۲۰ ب) اهمیت طراحی زنجیره‌های تأمین کارآمد^۱ را برای مقابله با بحران‌های زنجیره تأمین مرتبط با کووید ۱۹ به بحث گذاشت. او با استفاده از نظریه سیستم پویا، نحوه ساخت زنجیره‌های تأمین کارآمد را با ادغام انعطاف‌پذیری، چابکی و پایداری نشان داد. در این مقاله، سه جزء اصلی مدل زنجیره‌های تأمین کارا (اکوسیستم‌های زنجیره تأمین، طرح‌های چندگانه شبکه زنجیره تأمین، کارایی) ارائه شده است.

ژیگینگ، یانگدا، هوی و لینهوی^۲ (۲۰۲۰) تأثیر اثر موجی روی تعدیل محیط زیست در چین را بررسی کردند. تعدیل محیط زیست و پیشرفت فناوری سبز، از ابزارهای مهم برای حل اثرهای منفی آلودگی محیط زیست است. بر اساس مدل دوربین پانل فضایی، این مقاله با استفاده از داده‌های سطح استانی در چین، اثر موجی تنظیم مقررات محیط زیست را بررسی می‌کند و همچنین بیشتر درباره سازوکار شکل‌گیری اثر موجی در تعدیل زیست‌محیطی تحقیق می‌کند. لوهمر، بوگرت و لاسچ^۳ (۲۰۲۰) استراتژی‌های انعطاف‌پذیری و اثر موجی در زنجیره‌های تأمین هماهنگ با بلاکچین را از طریق شبیه‌سازی مبتنی برعامل تجزیه و تحلیل کردند. انعطاف‌پذیری، زنجیره‌های تأمین را قادر می‌سازد تا اختلال کاهش و سریع‌تر بهبود یابد.

حسینی و همکاران (۲۰۲۰) اثر موجی اختلال تأمین‌کننده مبتنی بر زنجیره مارکوف و رویکرد شبکه بیزین پویا^۴ را مدل‌سازی کردند. برای تعیین اثر موجی، زنجیره مارکوف گسسته - زمان با شبکه بیزین ادغام شده است. از زنجیره مارکوف گسسته - زمان برای مدل‌سازی بازیابی و آسیب‌پذیری تأمین‌کنندگان استفاده شده است. مدل زنجیره مارکوف گسسته - زمان پیشنهادی با مدل شبکه بیزین، به‌منظور شبیه‌سازی رفتار انتشار اختلال در عرضه در زنجیره تأمین استفاده شده است. یافته‌های این بررسی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی، برای برجسته‌کردن مسیرهای پرخطر پنهان در زنجیره تأمین، تحلیل تأثیر عملکرد اختلال و تکثیر آن، اولویت‌بندی سیاست‌های احتیاطی و بازیابی، می‌تواند کارایی چشمگیری داشته باشد.

یلماز، اوزکلیک و ینی^۵ (۲۰۲۰) یک مدل بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای با رویکرد اطمینان از پایداری در زنجیره تأمین معکوس، در صورت وجود اثر موجی را ارائه کردند. تأثیر مخرب اثر موجی، اهمیت اطمینان از طراحی زنجیره تأمین معکوس را برای اطمینان از پایداری در طولانی‌مدت افزایش می‌دهد؛ اما در این مطالعه، یک مدل بهینه‌سازی تصادفی مختلط دو مرحله‌ای، برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین معکوس با در نظر گرفتن ابعاد زیست محیطی و اقتصادی پیشنهاد شده است.

لاکر^۶ (۲۰۱۹) در مقاله‌ای از موجودی برای کاهش اثر موجی بهره برده است. یک اختلال در مکانی واحد در یک زنجیره تأمین، ممکن است بسیاری از مکان‌های دیگر زنجیره تأمین را از طریق اثر موجی تحت تأثیر قرار دهد. در این مقاله، نقش موجودی کالا برای کاهش اثر موجی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که تصمیم‌های عملیاتی (مانند

1. Viable supply chain
2. Jiging
3. Lohmer&Bugert&Lasch
4. Daynamic Bayesian Network (DBN)
5. Yilmaz&Ozcelik&Yeni
6. Lucker

سطح موجودی یا سطح خدمات) با تصمیم‌هایی که اثر موجی را کاهش می‌دهند (مانند انعطاف‌پذیری بالای زنجیره تأمین) ارتباط زیادی دارند. به‌طور خاص نتایج بررسی نشان داد: ۱. افزایش نوسان‌های تقاضا ممکن است شرکت را به سرمایه‌گذاری بیشتر در سهام سوق دهد؛ ۲. سطح بالای خدمات و انعطاف‌پذیری بالای یک زنجیره تأمین می‌تواند اهداف متناقضی باشد.

ایوانف و همکاران (۲۰۱۹) چشم‌اندازهای جدید مدیریت ریسک اختلال در زنجیره‌های تأمین با اثر موجی و انعطاف‌پذیری را ارائه کردند. این مقاله با هدف ترسیم ویژگی‌های اصلی دو دیدگاه جدید در مدیریت ایجاد اختلال در زنجیره تأمین، یعنی اثر موجی و انعطاف‌پذیری انجام شده است.

دلگی، ایوانف و روژکوف^۱ (۲۰۲۰) در مقاله‌ای به بررسی این موضوع پرداختند که آیا اثر موجی می‌تواند محرک اثر شلاقی باشد یا خیر. آن‌ها با مطالعه مبتنی بر شبیه‌سازی، روابط متقابل پویایی ساختاری و عملیاتی در زنجیره تأمین را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که اثر موجی محرک اثر شلاقی است.

دلگی و همکاران (۲۰۱۸) در مقاله‌ای با عنوان «اثر موجی در زنجیره تأمین» به تجزیه و تحلیل اثر موجی و ادبیات موضوع با نگاه به تحقیقات اخیر پرداختند. آن‌ها اثر موجی را تأثیر انتشار اختلال بر عملکرد زنجیره تأمین و تغییرات در پارامترهای طراحی و برنامه‌ریزی ساختاری زنجیره تأمین توصیف کردند.

لونر و پتوسکین^۲ (۲۰۱۷) مدلی مبتنی بر آنتروپی برای اثر موجی در مدیریت خطرهای زیست‌محیطی در زنجیره‌های تأمین ارائه کردند. در این مقاله مدل بهینه‌سازی مبتنی بر آنتروپی، برای کاهش اندازه زنجیره تأمین و ارزیابی خسارت اقتصادی ناشی از خطرهای زیست‌محیطی در معرض اثر موجی ارائه شده است.

جمع‌بندی مطالعات پیشین و نوآوری تحقیق حاضر

با توجه به مرور ادبیات و بررسی‌های صورت‌گرفته روی تحقیقات پیشین، مشخص می‌شود که مقاله‌های مرتبط با اثر موجی اختلال را می‌توان به سه دسته طبقه‌بندی کرد: دسته اول، به مرور ادبیات و کشف عوامل اثر موجی و چگونگی انتشار و همچنین، راه‌های مقابله با آن پرداخته‌اند. دسته دوم، مقوله طراحی زنجیره‌های تأمین مقاوم در برابر اختلال را بررسی کرده‌اند، مانند زنجیره‌های انعطاف‌پذیر و ارتجاعی که کاهش اثر موجی اختلال در طول زنجیره را در پی دارند. دسته سوم، به مدل‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌ها روی آورده‌اند و از این طریق، به ارزیابی انتشار اختلال و اثر موجی اختلال در زنجیره تأمین پرداخته و تلاش کرده‌اند تا با استفاده از معیارهای موجودی، هزینه، سطح خدمت و سود و سایر شاخص‌ها، به‌صورت کمی اثر اختلال در طول زنجیره را نشان دهند.

اکثر پژوهش‌های گذشته برای کمی‌سازی اثر موجی، از مدل‌های ریاضی و سیستم شبیه‌سازی پویا استفاده کرده‌اند. در بین این پژوهش‌ها، حسینی و همکارانش (۲۰۲۰) با ادغام زنجیره مارکوف و شبکه بیزین، به مدل‌سازی اثر موجی اختلال تأمین‌کننده پرداخته‌اند و برای کمی‌سازی اثر موجی، از معیارهای سطح خدمت و سودمندی در یک زنجیره تأمین دوسطحی کمک گرفته‌اند. تحقیق حاضر با نوآوری‌های زیر، مقاله حسینی و همکاران (۲۰۲۰) را توسعه داده است:

- در زنجیره مارکوف ارائه شده در تحقیق حسینی و همکاران (۲۰۲۰)، بازیابی ظرفیت تأمین کننده، در یک دوره بعد از دوره وقوع اختلال فرض شده است؛ ولی در تحقیق حاضر با توجه به تجربه همه گیری کرونا، مشاهده شده که اختلال طولانی مدت، گاهی موجب می شود که تأمین کننده نتواند یک تا چند دوره خود را بازیابی کند. به همین علت، کمان های ورودی و خروجی در زنجیره مارکوف پیشنهادی در تحقیق حاضر، بیشتر و مدل پیچیده تر است.
- مدل بیزین پویا در تحقیق حاضر، برای یک زنجیره تأمین سه سطحی ترسیم شده است و اثر موجی اختلال تأمین کننده در مرکز توزیع، به صورت کمی ارزیابی می شود.
- با توجه به اینکه در دوران وقوع اختلال کووید ۱۹، زمان تحویل کالا یا خدمات در زنجیره های تأمین طولانی شده است، برای ارزیابی و کمی سازی اثر موجی، از زمان انتظار و فروش از دست رفته بهره برده شده است.

روش شناسی پژوهش

مدل پیشنهادی مارکوف

در این بخش یک مدل زنجیره مارکوف برای شبیه سازی رفتار یک تأمین کننده در صورت بروز اختلال طولانی مدت ارائه می شود. برای ارائه مدل، ابتدا سه حالت یا وضعیت را برای یک تأمین کننده فرض می کنیم:

۱. وضعیت عملیاتی^۱ که با ظرفیت کامل فعالیت می کند؛

۲. تمام ظرفیت خود را به دلیل شدت و بزرگی اختلال از دست می دهد و مختل^۲ می شود؛

۳. تا حدی ظرفیت خود را از دست می دهد و حالت نیمه مختل یا نیمه عملیاتی^۳ دارد.

در این تحقیق حالت نیمه عملیاتی بدین صورت فرض شده است که یک تأمین کننده، ۵۰ درصد ظرفیت خود را در حضور اختلال از دست می دهد. شایان ذکر است که در عمل، ممکن است این صورت نباشد و در تحقیق های آینده می توان این وضعیت را به صورت پویا در نظر گرفت یا اینکه با وضعیت های مختلف (بیش از سه حالت) مدل مارکوف را ترسیم کرد.

مدل زنجیره مارکوف در شکل ۱ نشان داده شده است. فرض کنیم که یک تأمین کننده، تحت شرایط عادی و قبل از ایجاد اختلال عمل می کند. اگر اختلال رخ دهد، تأمین کنندگان می توانند شوک اختلال را بدون از دست دادن ظرفیت، جذب کنند. این مورد با استفاده از یک حلقه به خود در حالت صفر (حالت جاذب یا عملیاتی) مدل سازی می شود. از سوی دیگر، تأمین کننده ممکن است پس از وقوع اختلال، ۵۰ درصد ظرفیت خود را از دست بدهد. این حالت توسط کمان خروجی، از حالت صفر به حالت ۱ در نظر گرفته شده است. در حالتی دیگر، تمام ظرفیت عملیاتی تأمین کننده در صورت وقوع حادثه، به شدت و درجه مواجهه بالا از دست برود. این سناریو با انتقال رو به جلو، از حالت صفر به حالت ۲ به دست می آید.

1. Operational

2. Disrupted

3. Semi operational or semi disrupted

حالا، فرض کنیم که یک تأمین‌کننده نیمه‌مختل شده و در زمان t در حالت ۱ است. آن تأمین‌کننده می‌تواند ظرفیت از دست رفته خود را با انتقال به عقب، از حالت ۱ در زمان t به حالت صفر در زمان $t + 1$ بازگرداند یا به حالت کاملاً مختل، یعنی ۲ برود یا ممکن است نتواند خودش را بازیابی کند و در همان حالت نیمه‌عملیاتی در زمان $t + 1$ بماند. در نهایت، موردی را در نظر بگیرید که در آن، تأمین‌کننده به‌طور کامل در زمان t متوقف شده است و می‌تواند تمام ظرفیت از دست‌رفته خود را در زمان $t + 1$ که توسط کمان ورودی از حالت ۲ به حالت صفر به دست می‌آید، بازیابی کند یا ۵۰ درصد ظرفیت از دست‌رفته را می‌تواند در زمان $t + 1$ و بقیه را در زمان $t + 2$ بازیابی کند یا اینکه در زمان $t + 1$ نیز در حالت مختل بماند. این مورد توسط سه کمان خروجی از حالت ۲ به حالت ۱ و از حالت ۱ به حالت صفر و از حالت ۲ به ۲ نشان داده می‌شود.

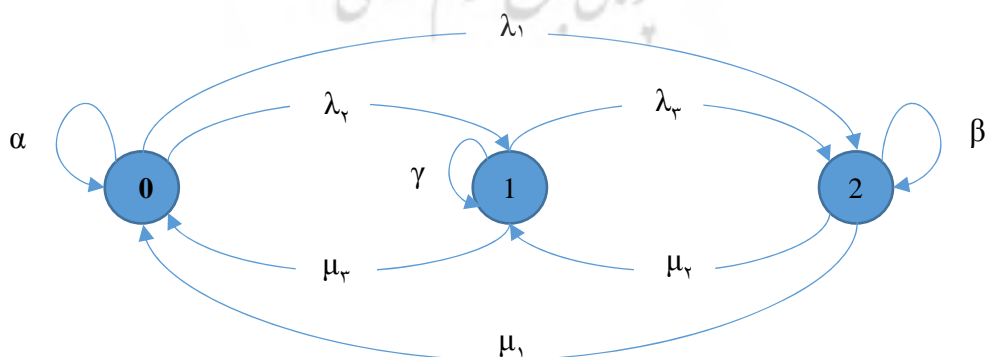
با توجه به تجربه اختلال طولانی‌مدت همه‌گیری کووید ۱۹، مشاهده شده است که امکان اینکه تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان یا خدمات‌دهندگان نتوانند تا چند دوره ظرفیت خود را بازیابی کنند و چه بسا، ظرفیت باقی‌مانده را نیز از دست بدهند، کمان‌های خروجی از حالت ۱ به حالت ۲ و همچنین از حالت ۱ به ۱ و ۲ به ۲ در نظر گرفته شده است. π_0 ، π_1 و π_2 بیانگر احتمال وجود تأمین‌کننده در حالت ۰، ۱ و ۲ است. نرخ انتقال از یک حالت به حالت دیگر با μ_1 ، μ_2 ، μ_3 ، λ_1 ، λ_2 و λ_3 نشان داده می‌شود. رابطه‌های ۱ تا ۴، رابطه‌هایی است که برای این مدل نوشته شده است. با حل رابطه‌های زیر، احتمال قراردادن تأمین‌کننده در حالت‌های ۰، ۱ و ۲ را می‌توان به دست آورد. با دانستن احتمال هر وضعیت، تأمین‌کننده می‌تواند آسیب‌پذیری خود را بهتر درک کند و یک استراتژی کارآمد برای کاهش اختلال تعریف کند.

$$\text{رابطه ۱)} \quad (\alpha_1 + \mu_1 + \mu_3)\pi_0 = \lambda_1\pi_2 + \lambda_2\pi_1$$

$$\text{رابطه ۲)} \quad (\lambda_2 + \mu_2 + \gamma)\pi_1 = \mu_3\pi_0 + \lambda_3\pi_2$$

$$\text{رابطه ۳)} \quad (\lambda_1 + \lambda_3 + \beta)\pi_2 = \mu_1\pi_0 + \mu_2\pi_1$$

$$\text{رابطه ۴)} \quad \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 = 1$$



شکل ۱. مدل زنجیره مارکوف گسسته - زمان برای اختلال ظرفیت تأمین‌کنندگان

مدل شبکه بیزین پویا

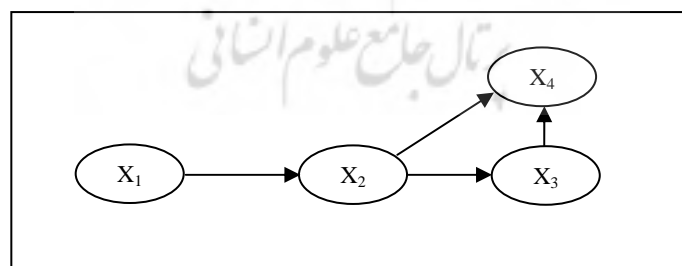
نظریه شبکه بیزین

شبکه بیزین دانش کارشناسی را با داده‌های تاریخی ترکیب می‌کند تا میزان خطر، از طریق ثبت علت‌ها و اثرها با استفاده از نمایش گرافیکی کمی شود. شبکه بیزین به‌طور گسترده‌ای برای مقابله با مشکلات مدیریت ریسک استفاده شده است (حسینی و بارکر^۱، ۲۰۱۶ الف و ب؛ حسینی، الخالد و سردر^۲، ۲۰۱۶؛ قاضی، دیکسون، کویگلی و گاودنزی^۳، ۲۰۱۸؛ سونگ، لی و پارک^۴، ۲۰۱۳؛ حسینی، بارکر و رامیرز^۵، ۲۰۱۶). از نقطه نظر ریاضی، شبکه‌های بیزین می‌توانند به صورت گراف‌های جهت‌دار غیرحلقه‌ای با مجموعه‌ای از گره‌های (متغیرها) ارائه شده توسط $V = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ و مجموعه‌ای از کمان‌ها مدل‌سازی شوند که ساختار آن‌ها رابطه بین گره‌ها را تعیین می‌کند. قوس خروجی از X_i به X_j نشان‌دهنده این است که مقدار متغیر X_j به مقدار X_i بستگی دارد. X_i و X_j به ترتیب گره‌های والد و فرزند خوانده می‌شوند. احتمال مشترک همه متغیرها (گره‌ها) را می‌توان با استفاده از قانون زنجیره به‌عنوان حاصل ضرب احتمال شرطی هر گره نوشت:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | X_1, X_2, \dots, X_{i-1}) \quad (\text{رابطه ۵})$$

برای مثال، یک مدل شبکه بیزین با ۴ متغیر را در نظر بگیرید. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، X_1 گره ریشه، X_2 و X_3 گره میانی و X_4 گره بزرگ است. احتمال شرطی در شبکه‌های بیزین برای به‌دست آوردن رابطه علی بین متغیرها استفاده می‌شود. توزیع احتمال مشترک مدل‌های شبکه بیزین را می‌توان به‌عنوان نمایشی از ساختار شبکه بیزین و وابستگی‌های بین متغیرها در نظر گرفت. در مثال نشان داده شده، باید احتمال قبلی $P(X_1)$ و احتمالات شرطی $P(X_3 | X_2)$ ، $P(X_4 | X_2, X_3)$ و $P(X_2 | X_1)$ تعریف شود. توزیع احتمال مشترک مدل شبکه بیزین در شکل ۲ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$P(X_1, X_2, X_3, X_4) = P(x_1)P(x_2 | x_1)P(x_3 | x_2)P(x_4 | x_2, x_3) \quad (\text{رابطه ۶})$$



شکل ۲. شبکه بیزین ساده با ۴ گره

(حسینی و همکاران، ۲۰۲۰)

1. Barker
2. Alkhaled&sarder
3. Qazi, Dickson, Quigley & Gaudenzi
4. Song, Lee & Park
5. Ramires
6. Joint Probability Distribution (JPD)

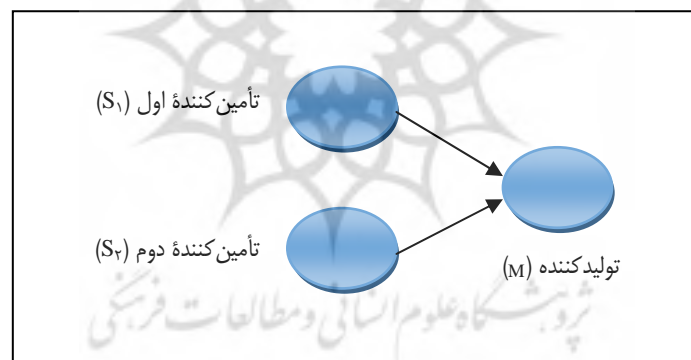
در شبکه بیزین، هر متغیر با یک جدول احتمال شرطی^۱ در ارتباط است که احتمال وقوع تحقق یک متغیر با توجه به مقادیر متغیرهای دیگر را تعیین می‌کند (حسینی و بارکر، ۲۰۱۶ الف). جدول احتمالات شرطی می‌تواند احتمال شرطی بین دو متغیر را بیان کند. JPD می‌تواند برای محاسبه احتمال متغیرهای فردی در یک شبکه بیزین استفاده شود. فرض کنید که ما به دنبال محاسبه X_2 هستیم، پس $P(X_2)$ را می‌توان به صورت زیر نوشت (حسینی و همکاران، ۲۰۲۰):

$$P(x_2) = \sum_{x_1, x_3, x_4} P(x_1)P(x_2|x_1)P(x_3|x_2)P(x_4|x_2, x_3) \quad \text{رابطه ۷}$$

رابطه ۷ را می‌توان همان طور که با استفاده از تکنیک حاشیه‌نشینی که در رابطه ۸ نشان داده شده است، بازنویسی کرد (فنتون و نیل^۲، ۲۰۱۳).

$$P(x_2) = \left(\sum_{x_1} P(x_1) \left(\sum_{x_3} P(x_3|x_2) \left(\sum_{x_4} P(x_4|x_2, x_3) \right) \right) \right) \quad \text{رابطه ۸}$$

برای تشریح رابطه ۸ و درک بهتر شبکه بیزین، در شکل ۳ یک شبکه بیزین ساده با یک تولیدکننده و دو تأمین‌کننده ارائه شده است.



شکل ۳. شبکه بیزین ساده

(حسینی و همکاران، ۲۰۲۰)

نحوه محاسبه وضعیت احتمال مختل بودن تولیدکننده، با توجه به جدول احتمال شرطی تعریف شده بین تولیدکننده و تأمین‌کنندگان در رابطه ۹ نشان داده شده است. جهت اختصار در اینجا در جدول ۱ دو حالت عملیاتی و مختل را فرض گرفته و از ارائه معادلات تعیین وضعیت احتمال عملیاتی و نیمه عملیاتی تولیدکننده صرف نظر می‌شود. شایان ذکر است که رابطه تعیین وضعیت توزیع‌کننده در زنجیره تأمین سه سطحی با توجه به جدول احتمالات شرطی فیما بین توزیع‌کننده و تولیدکنندگان به دست می‌آید.

جدول ۱. جدول احتمالات شرطی تولیدکننده

| مختل | | عملیاتی | | تأمین کننده ۱ |
|---------|---------|---------|---------|---------------|
| مختل | عملیاتی | مختل | عملیاتی | تأمین کننده ۲ |
| عملیاتی | عملیاتی | عملیاتی | عملیاتی | تولیدکننده |
| مختل | مختل | مختل | مختل | |

$P(M disrupted)$ (رابطه ۹)

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{S_1, S_2} P(M disrupted | S_1, S_2) + P(M disrupted | S_1 \\
 &= operational, S_2 = operational) \times P(S_1 = operational) \times P(S_2 \\
 &= operational) + P(M disrupted | S_1 = operational, S_2 \\
 &= disrupted) \times P(S_1 = operational) \times P(S_2 \\
 &= disrupted) + P(M disrupted | S_1 = disrupted, S_2 \\
 &= operational) \times P(S_1 = disrupted) \times P(S_2 \\
 &= operational) \\
 &+ P(M disrupted | S_1 = disrupted, S_2 = disrupted) \\
 &\times P(S_1 = disrupted) \times P(S_2 = disrupted)
 \end{aligned}$$

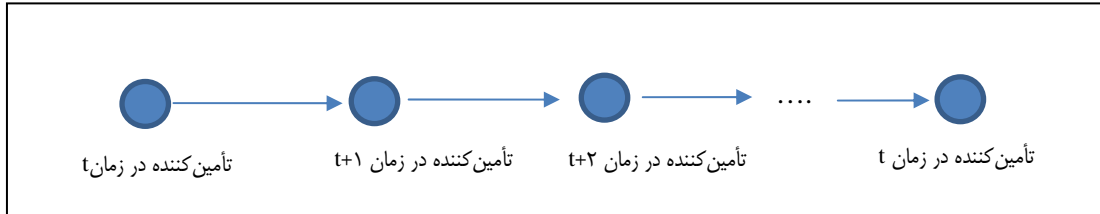
شبکه بیزین پویا

شبکه بیزین پویا شاخه‌ای از یک شبکه بیزین است که در آن بُعد زمانی با گسترده کردن شبکه در تعداد مراحل زمانی مدنظر، یعنی با نسخه برداری از شبکه، برای هر مرحله زمانی در نظر گرفته می‌شود. از یک شبکه بیزین پویا می‌توان برای مدل سازی فرایند تصادفی در محیط پویا استفاده کرد. شبکه بیزین پویا روش مناسبی برای ثبت اثر موجی اختلال تأمین کننده است؛ چون اثر موجی در طبیعت تصادفی و دینامیک است (حسینی و همکاران، ۲۰۲۰). برای ساده سازی فرایند مدل سازی اثر موجی یک اختلال، فروض اصلی زیر را لحاظ می‌کنیم:

- سیستم ثابت زمانی است؛ یعنی جدول احتمال شرطی تولیدکننده‌ها و توزیع کننده در طول دوره‌های زمانی مختلف ثابت باقی می‌ماند.
- این فرایند مارکوف گسسته - زمان است؛ یعنی توزیع احتمال حالت در زمان $t+1$ فقط به حالت در زمان t بستگی دارد، نه توالی وقایعی که بر آن مقدم است.
- ماتریس احتمال انتقال تأمین کنندگان نیز در دوره‌های مختلف ثابت فرض می‌شود.

بر اساس این فرضیه‌ها، شبکه بیزین پویا به عنوان توسعه یک شبکه بیزین با دوره‌های زمانی مختلف تعریف می‌شود. تصویری از یک شبکه بیزین پویای ساده در شکل ۴ نشان داده شده است. این نشان دهنده رابطه بین متغیرها در زمان t و $t+1$ است. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، توزیع احتمال تأمین کننده در زمان $t+1$ به توزیع احتمالی آن در زمان t وابسته است. توزیع احتمال مشترک شبکه بیزین پویا در یک محیط دینامیک را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$P(X_{1,t}, X_{2,t}, \dots, X_{n,t}) = \prod_{t=1}^T \prod_{i=1}^N P(X_{i,t} | X_{1,t}, X_{2,t}, \dots, X_{i-1,t}) \quad \text{رابطه ۱۰}$$



شکل ۴. شبکه بیزین پویای تأمین کننده با دوره های زمانی T

(حسینی و همکاران، ۲۰۲۰)

ماتریس انتقال

چالش اصلی در ساختار شبکه بیزین پویا این است که چگونه می توان احتمال انتقال را به عنوان تغییر وضعیت متغیرها در طول زمان تعریف کرد. مدل احتمال انتقال مارکوف با مجموعه ای از حالت های گسسته شروع می شود. در این مقاله برای به دست آوردن ماتریس انتقال برای زمانی که همه حالت های یک تأمین کننده را می توان در یک افق زمانی مشاهده کرد، بدین شکل به دست می آید: فرض کنید R دسته های گسسته ای وجود دارد که می توان همه مشاهدات را در آن ها مرتب کرد. ما می توانیم یک ماتریس انتقال $P = [p_{ij}]$ را به عنوان ماتریسی از احتمالات تعریف کنیم که احتمال تغییر وضعیت را نشان می دهد. هر عنصر از ماتریس p_{ij} احتمال وضعیت برابر با i در دوره $t-1$ و وضعیت با j در دوره t را نشان می دهد (جونز، ۲۰۰۵):

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1R} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2R} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{R1} & p_{R2} & \dots & p_{RR} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

به طور کلی، اگر n_{ij} تعداد وضعیت یک تأمین کننده در یک افق زمانی (نرخ انتقال) را نشان دهد که در دوره $t-1$ در وضعیت i و در دوره t در وضعیت j بوده اند، با استفاده از رابطه ۱۲ می توانیم احتمال قرار گرفتن یک تأمین کننده در حالت j را در دوره t تخمین بزنیم؛ البته با توجه به اینکه آن ها در دوره $t-1$ در حالت i بوده اند که این احتمال با p_{ij} نشان داده می شود:

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_j n_{ij}} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

مدل سازی اثر موجی

اثر موجی زمانی رخ می دهد که تأثیر اختلال در بالادست در زنجیره تأمین نمی تواند محلی سازی شود و در پایین دست انتشار می یابد که بر عملکرد زنجیره تأمین در قالب هزینه، سطح خدمات و زمان انتظار تأثیر منفی دارد (حسینی و

همکاران، ۲۰۲۰). زمان تحویل کالا یا زمان انتظار، به شدت وابسته است به سه حالت عملیاتی، نیمه عملیاتی و کاملاً مختل بودن اجزای زنجیره تأمین (تأمین کنندگان، تولید کنندگان و مرکز توزیع) که خود متأثر از وضعیت تولید کنندگان و تأمین کنندگان است. زمان انتظار را که در این تحقیق به اختصار با نماد L_t نشان می‌دهیم، بسته به اینکه تأمین کننده عملیاتی، نیمه عملیاتی یا کاملاً مختل شده باشد، متفاوت است. به این ترتیب، متغیر L_t به وضعیت یک تأمین کننده از دیدگاه شبکه بیزین بستگی دارد. فرض بر این است که متغیر L_t شامل سه حالت پایین، متوسط و زیاد است؛ به این معنا که با توجه به وضعیت توزیع کننده، کالا به موقع و در زمانی برابر با نظر و رضایت مشتری یا با تأخیر زیاد تحویل داده می‌شود. برای هر زنجیره تأمین، سطح زمان تحویل یا زمان انتظار را می‌توان مشخص کرد؛ به طور مثال، برای این تحقیق متغیر زمانی زمان انتظار در جدول ۲ مشخص شده است.

جدول ۲. متغیر زمانی زمان انتظار

| زمان انتظار | علامت زمانی سطح زمان انتظار |
|---|-----------------------------|
| زمانی کمتر یا برابر با زمان مورد رضایت یا نظر مشتری | پایین (Low) |
| بیشتر از زمان مدنظر یا رضایت مشتری و کمتر از زمان نامقبول مشتری | متوسط (Medium) |
| در زمان نامقبول مشتری (بیش از حد انتظار مشتری) | زیاد (High) |

با توجه به وضعیت تأمین کننده‌ها و تولید کننده، توزیع کننده زمان انتظار متفاوتی را تجربه خواهد کرد که در هر وضعیت زمان انتظار (پایین، متوسط، زیاد) میزان فروش نیز تغییر می‌یابد. برای هر سطح از زمان انتظار، فروش از دست‌رفته‌ای را تعریف می‌کنیم که در این تحقیق به ترتیب با $low L_s$ (فروش از دست‌رفته پایین)، $medium L_s$ (فروش از دست‌رفته متوسط) و $high L_s$ (فروش از دست‌رفته زیاد) نشان داده می‌شود. وقتی زمان انتظار زیاد باشد، میزان فروش از دست‌رفته نیز زیاد است و برعکس، برای زمان انتظار پایین، فروش از دست‌رفته نیز کم است. حال با توجه به مفروضات فوق، درخت تصمیم مدنظر (شکل ۵) را برای توزیع کننده^۱ ترسیم می‌کنیم. با توجه به شکل ۵، رابطه^{۱۳} را تعریف می‌کنیم. این رابطه برای تخمین فروش از دست‌رفته^۲ توزیع کننده در زمانی است که احتمال زمان انتظار پایین باشد.

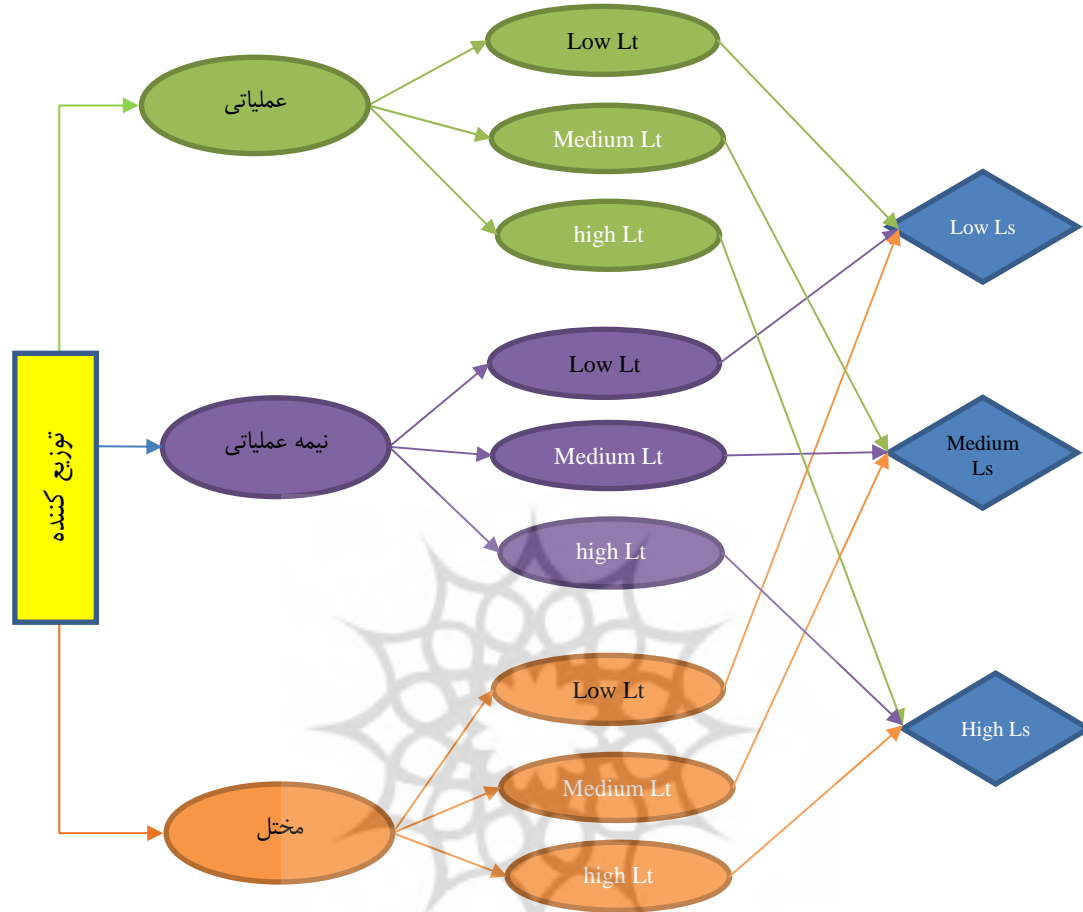
$$ELs^{Low} = [P(Operational) \times P(Low_{L_t}|Operational) \times Low_{L_s}] + [P(Semi - disrupted) \times P(Low_{L_t}|Semi - disrupted) \times Low_{L_s}] + [P(Fully - disrupted) \times P(Low_{L_t}|Fully - disrupted) \times Low_{L_s}] \quad \text{رابطه ۱۳}$$

رابطه^{۱۳} را می‌توان برای تخمین فروش از دست‌رفته در زمان انتظار متوسط و زیاد برای توزیع کننده که به اختصار در شکل‌ها و روابط با حرف D نشان داده می‌شود، تعمیم داد و در نهایت جمع کل فروش از دست‌رفته مورد انتظار^۳ را برای توزیع کننده پیش‌بینی کرد (رابطه^{۱۴}).

1. Distributor
2. EstimateLost sales ((Els)
3. Total Estimate Lost sales (TELS)

رابطه ۱۴

$$TELS_D = ELS_{low} + ELS_{medium} + ELS_{high}$$



شکل ۵. درخت تصمیم شامل وضعیت‌های توزیع‌کننده، حالت‌های زمان انتظار و فروش از دست‌رفته

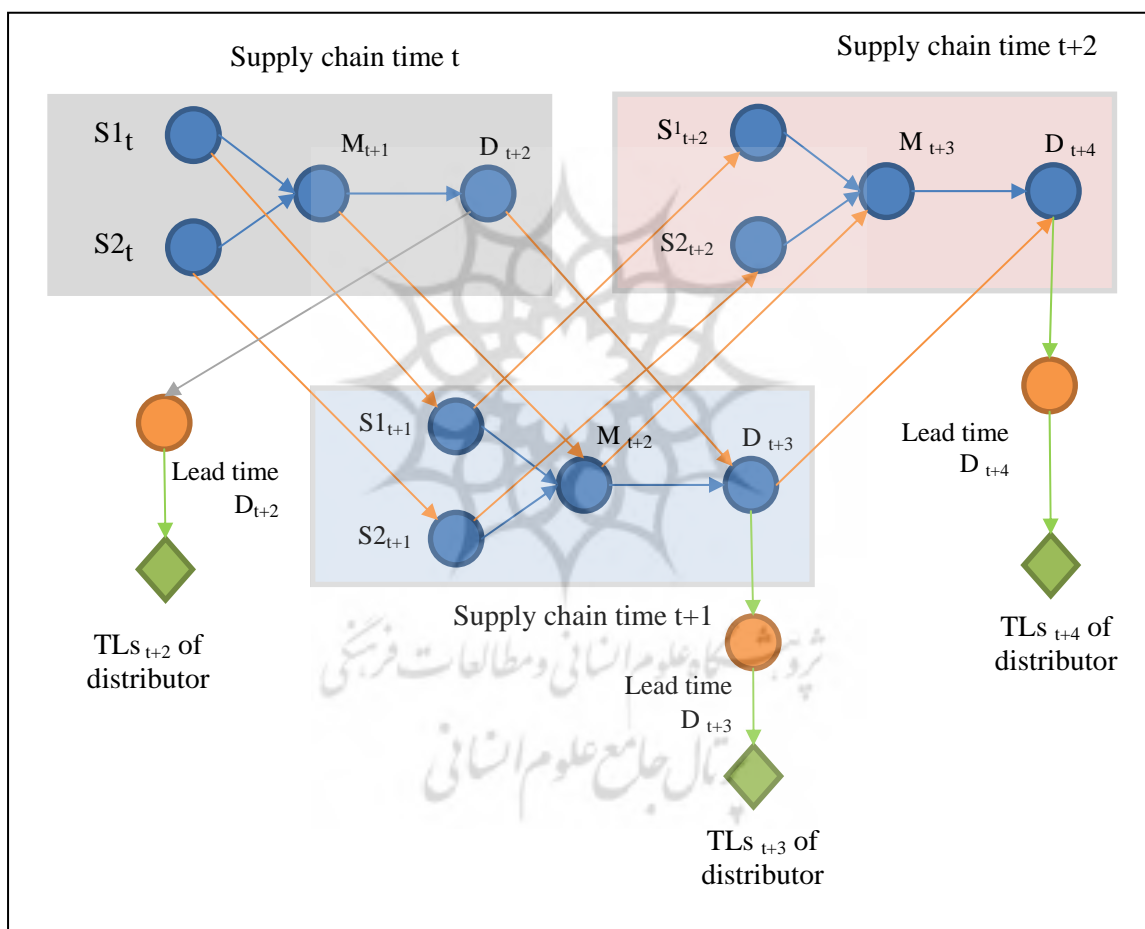
برای توسعه معیار کلی مدل اثر موجی و به‌دست آوردن فروش از دست‌رفته، همه توزیع‌کنندگان زنجیره تأمین، یک زنجیره سه مرحله‌ای با m تأمین‌کننده، n تولیدکننده و f توزیع‌کننده با سه وضعیت عملیاتی و نیمه‌عملیاتی و مختل که با k و سه سطح زمان تحویل یا انتظار که با l نشان داده می‌شود، در طول افق زمانی T در نظر می‌گیریم. با توجه به مفاهیم و مفروضات بیان شده، جمع کل فروش از دست‌رفته تمام توزیع‌کنندگان زنجیره تأمین را می‌توان با استفاده از رابطه ۱۵ محاسبه کرد. این رابطه اثر موجی ناشی از اختلال در توزیع‌کننده‌ها را به‌صورت کمی و برحسب زمان انتظار و فروش از دست‌رفته در زنجیره تأمین نشان می‌دهد.

$$TELS_D = \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^f \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 p_{rkt} \times p_{rkl} \times LS_{rkt} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

تجزیه و تحلیل مدل و یافته‌های پژوهش

برای تجزیه و تحلیل مدل ارائه‌شده، شبکه بیزین پویا را برای سهولت در محاسبات، به‌طور مثال در مطالعه موردی

(شکل ۶)، در زنجیره تأمین سه سطحی ساده تولید دستگاه افزایشده ولتاژ برای سه دوره زمانی، شبیه‌سازی کرده و ضمن تشریح انتشار اختلال در زنجیره، اثر موجی ناشی از اختلال را با تخمین میزان فروش از دست‌رفته در توزیع‌کننده بررسی می‌کنیم. بر اساس آنچه که در بخش روش‌شناسی گفته شد، بعد از به‌دست آوردن ماتریس انتقال با استفاده از مدل مارکوف ارائه‌شده و ترکیب آن با شبکه بیزین، ویژگی‌های پویای اختلال یک تأمین‌کننده، در دوره‌های زمانی پیش‌بینی می‌شود. برای به‌دست آوردن ماتریس انتقال، وضعیت ۹۰ دوره زمانی تأمین‌کننده‌های اول و دوم بررسی شد. با توجه به نزدیکی زیاد نرخ انتقال آن دو، در مدل مارکوف ارائه شده در این ۹۰ دوره زمانی، ماتریس انتقال هر دو تأمین‌کننده مشابه هم در نظر گرفته شده است (البته در همه زنجیره‌ها این طور نیست و با توجه به موقعیت مکانی و خیلی از عوامل دیگر، ماتریس انتقال هر تأمین‌کننده متفاوت است).



شکل ۶. شبکه بیزین پویای زنجیره تأمین سه‌سطحی ساده با زمان انتظار و فروش از دست‌رفته (مدل ارزیابی اثر موجی اختلال)

در ۹۰ دوره‌ای که داده‌ها جمع‌آوری شد، تأمین‌کننده‌ها ۷۳ دوره در وضعیت عملیاتی، ۱۳ دوره در وضعیت نیمه‌عملیاتی و ۴ دوره در وضعیت کاملاً مختل بودند و نرخ انتقال وضعیت آن‌ها بدین صورت بود: $\beta = 1, \mu_2 = 2, \lambda_3 = 0, \lambda_2 = 6, \alpha = 64$ و $\lambda_1 = 3, \mu_3 = 8, \gamma = 5, \lambda_3 = 0$. آن در جدول ۳ درج شده است.

جدول ۳. جدول احتمال شرطی گذار سه حالت (ماتریس انتقال) تأمین‌کننده‌ها

| $t+\Delta t$ | | | T |
|--------------|--------------|---------|--------------|
| مختل | نیمه‌عملیاتی | عملیاتی | |
| ۰/۰۴ | ۰/۰۸ | ۰/۸۸ | عملیاتی |
| ۰ | ۰/۳۸ | ۰/۶۲ | نیمه‌عملیاتی |
| ۰/۲۵ | ۰/۵ | ۰/۲۵ | مختل |

برای بررسی اثر موجی و مسیر پُرخطر زنجیره و تأثیر اختلال هر یک از تأمین‌کنندگان، ابتدا وضعیت توزیع‌کننده در زمانی را بررسی خواهیم کرد که خط تولید فعال و هر دو تأمین‌کننده عملیاتی هستند. سپس سه سناریو فرضی را شبیه‌سازی می‌کنیم. در سناریو اول فرض بر اختلال کامل تأمین‌کننده دوم و در سناریو دوم فرض بر اختلال کامل تأمین‌کننده اول و در سناریو سوم فرض بر کاملاً مختل بودن هر دو تأمین‌کننده را اختیار می‌کنیم و تأثیر و انتشار اختلال تأمین‌کننده در تولیدکننده و توزیع‌کننده را بررسی می‌کنیم. در این تحلیل، جدول احتمالات شرطی تولیدکننده و توزیع‌کننده و ارتباط زمان انتظار تحویل کالای توزیع‌کننده با وضعیت توزیع‌کننده، در این مطالعه موردی که به کمک خبرگان به‌دست‌آمده است، در جدول‌های ۴ تا ۶ مشاهده می‌شود. با توجه به بررسی داده‌های مربوط به میزان فروش توزیع‌کننده در ۹۰ دوره زمانی، میانگین میزان فروش اذست‌رفته در این زنجیره، در زمان انتظار پایین ۵۰۰۰ و در زمان انتظار متوسط ۲۰۰۰۰ و در زمان انتظار زیاد ۵۰۰۰۰ دستگاه است.

جدول ۴. وضعیت احتمالات شرطی تولیدکننده

| تأمین‌کنندگان | تأمین‌کننده ۱ | عملیاتی | | | نیمه‌عملیاتی | | | مختل | | |
|---------------|---------------|---------|------|------|--------------|------|------|------|------|------|
| | | ع | ن | م | ع | ن | م | ع | ن | م |
| تولیدکننده | عملیاتی | ۰/۹۳ | ۰/۳۰ | ۰/۳۵ | ۰/۲۳ | ۰/۱۲ | ۰/۰۵ | ۰/۲۰ | ۰/۱۰ | ۰/۰۱ |
| | نیمه‌عملیاتی | ۰/۰۶ | ۰/۶۵ | ۰/۳۵ | ۰/۷۰ | ۰/۸۰ | ۰/۱۵ | ۰/۴۰ | ۰/۲۰ | ۰/۰۹ |
| | مختل | ۰/۰۱ | ۰/۰۵ | ۰/۳۰ | ۰/۰۷ | ۰/۰۸ | ۰/۸۰ | ۰/۴۰ | ۰/۷۰ | ۰/۹۰ |

جدول ۵. وضعیت احتمالات شرطی توزیع‌کننده

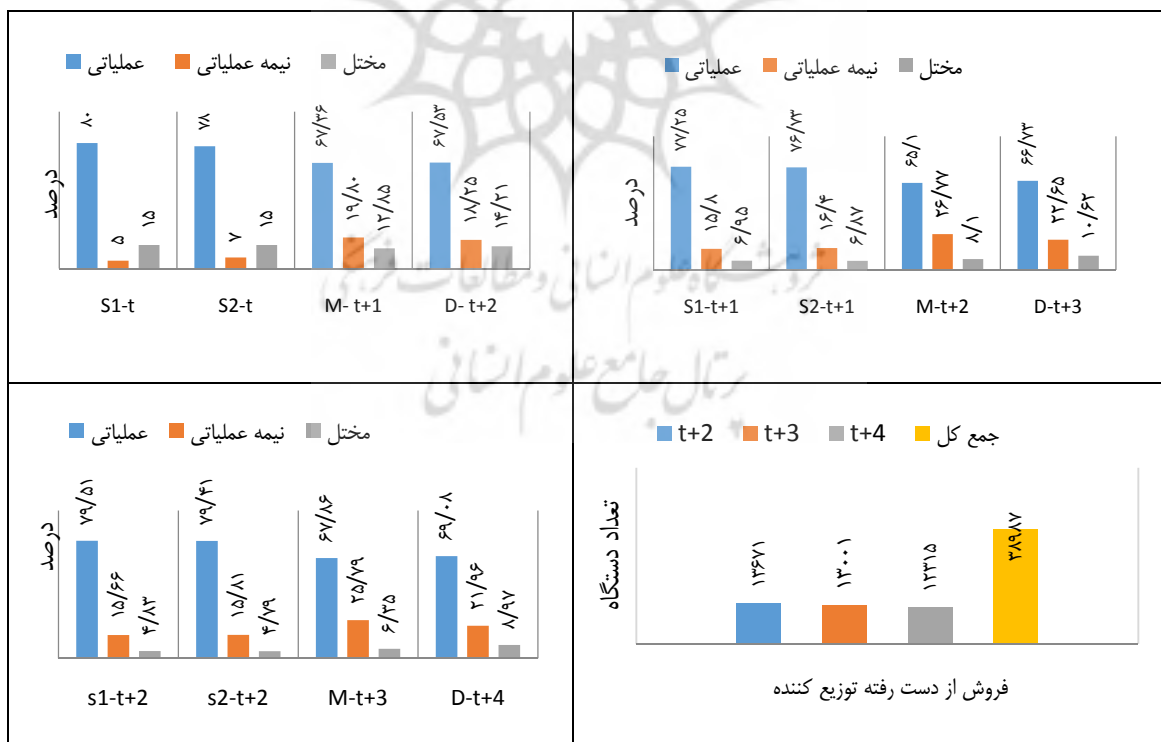
| تولیدکننده | وضعیت | عملیاتی | نیمه‌عملیاتی | مختل |
|-------------|--------------|---------|--------------|------|
| توزیع‌کننده | عملیاتی | ۰/۹۴ | ۰/۲ | ۰/۰۲ |
| | نیمه‌عملیاتی | ۰/۰۵ | ۰/۷ | ۰/۰۸ |
| | مختل | ۰/۰۱ | ۰/۱ | ۰/۹ |

جدول ۶. جدول احتمال زمان انتظار تحویل کالا با توجه به وضعیت عملیاتی، نیمه‌عملیاتی و مختل توزیع‌کننده

| مختل | | | نیمه‌عملیاتی | | | عملیاتی | | |
|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| زمان انتظار زیاد | زمان انتظار متوسط | زمان انتظار پایین | زمان انتظار زیاد | زمان انتظار متوسط | زمان انتظار پایین | زمان انتظار زیاد | زمان انتظار متوسط | زمان انتظار پایین |
| ۰/۷۵ | ۰/۲ | ۰/۰۵ | ۰/۱ | ۰/۷ | ۰/۲ | ۰/۰۱ | ۰/۰۴ | ۰/۹۵ |

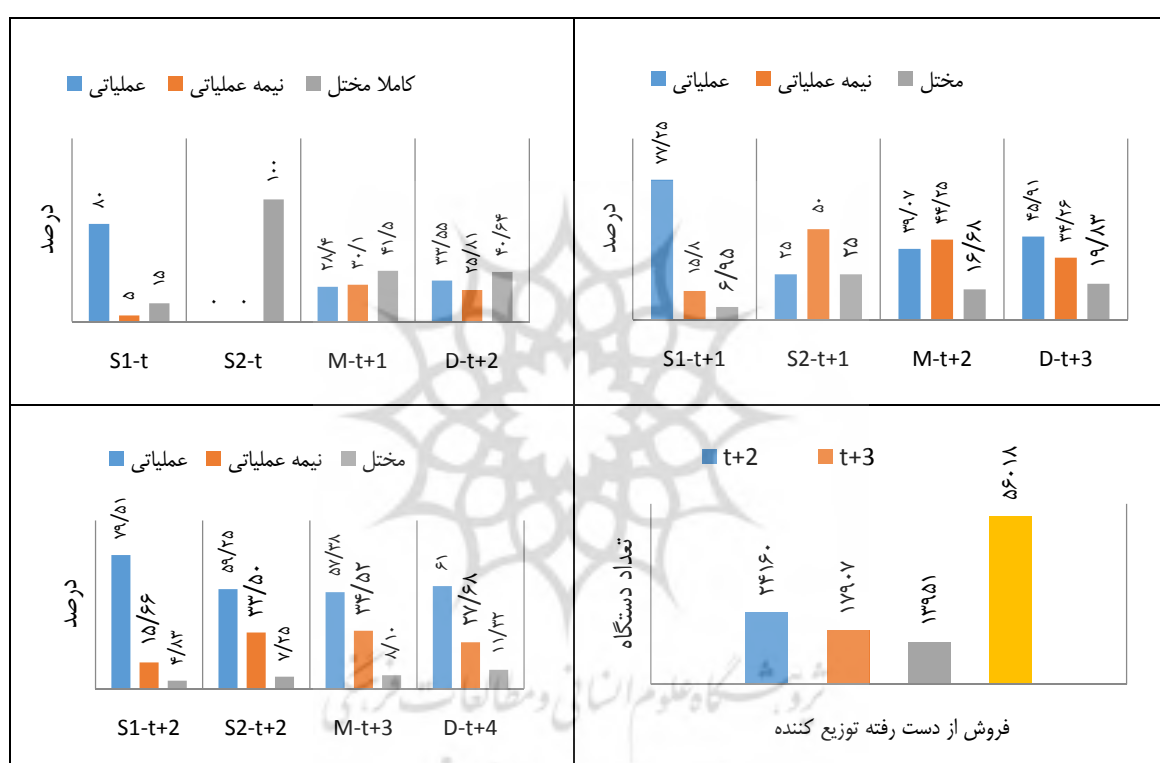
با توجه به مدل شبیه‌سازی و جانمایی داده‌ها در درخت تصمیم مربوط به توزیع‌کننده، محاسبات هر سناریو طبق روابط ۹، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ انجام و نتایج آن در شکل‌های ۷ تا ۱۰ ترسیم شده است. در شکل ۷ که سناریو پایه را نشان می‌دهد؛ یعنی وقتی که خط تولید به‌طور طبیعی فعال و دو تأمین‌کننده در زمان t احتمال عملیاتی بودنشان ۸۰ درصد و ۷۸ درصد است، اثر موجی شبیه‌سازی و میزان فروش از دست‌رفته توزیع‌کننده نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با توجه به ماتریس انتقال به‌دست آمده، دو تأمین‌کننده در زمان $t+2$ احتمال عملیاتی بودنشان به ترتیب ۷۷/۲۵ درصد و ۷۶/۷۳ درصد کاهش می‌یابد و به‌خاطر همین کاهش، وضعیت عملیاتی توزیع‌کننده از ۶۷/۵۳ درصد در زمان $t+2$ به ۶۶/۷۳ درصد در زمان $t+3$ تغییر می‌کند؛ اما وضعیت نیمه‌عملیاتی و مختل آن، نسبت به دوره $t+2$ بهبود می‌یابد و به‌خاطر این بهبود، فروش از دست‌رفته برای توزیع‌کننده نیز، از میزان ۱۳۶۷۱ دستگاه به ۱۳۰۰۱ دستگاه کاهش (بهبود ۴/۹ درصد) می‌یابد. در این افق زمانی جمع کل فروش از دست‌رفته برای توزیع‌کننده ۳۸۹۸۷ دستگاه است. مابقی تغییرات در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

با توجه به اینکه وضعیت احتمالی در حالت فعال در زمان t ، در تشریح فوق بر اساس نظر خبرگان، واقعی در نظر گرفته شده است، در عمل نیز توزیع‌کننده زنجیره مثال، در سه دوره بررسی شده ($t+2$ ، $t+3$ ، $t+4$)، جمع فروش از دست‌رفته (فروش - تقاضا) برابر با ۳۹۵۰۰ دستگاه را تجربه کرده که نزدیک به عدد پیش‌بینی شده مدل است. این نتیجه، بر کارایی مدل دلالت دارد.



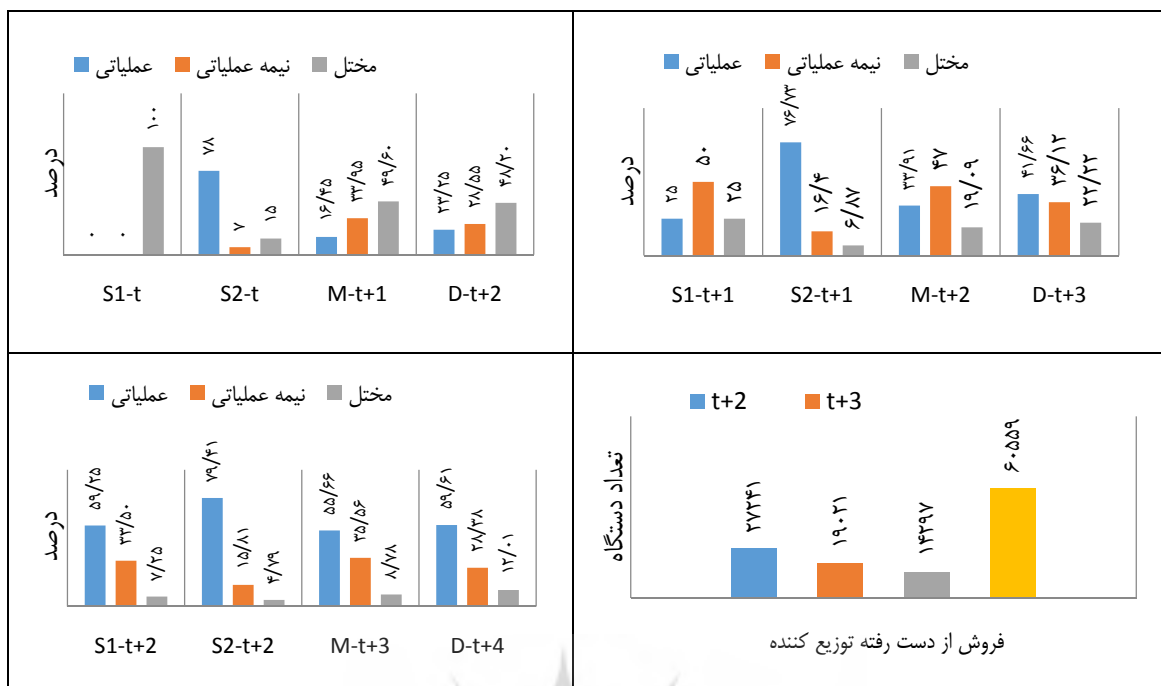
شکل ۷. توزیع احتمال اختلال در سه دوره زنجیره تأمین و فروش از دست‌رفته توزیع‌کننده (هر دو تأمین‌کننده عملیاتی)

در سناریو اول که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، تأمین‌کننده اول را در همان وضعیت سناریو پایه (احتمال ۸۰ درصد عملیاتی) فرض می‌کنیم و تأمین‌کننده دوم را دچار اختلال و کاملاً مختل در نظر می‌گیریم. در این سناریو مشاهده می‌شود که با توجه به بهبود حدود ۸۱ درصد وضعیت توزیع‌کننده در زمان $t+4$ نسبت به $t+2$ (بهبود از احتمال عملیاتی بودن از ۳۳/۵۵ درصد به احتمال عملیاتی ۶۱ درصد)، میزان فروش از دست‌رفته توزیع‌کننده نیز در زمان $t+4$ حدود ۱۰۲۰۹ دستگاه بهبود یافته است. در این سناریو، در افق زمانی سه دوره، جمع کل فروش از دست‌رفته ۵۶۰۱۸ دستگاه است که نسبت به سناریو پایه ۱۷۰۳۱ واحد افزایش یافته است. بدین ترتیب مشخص می‌شود که در صورت بروز اختلال در تأمین‌کننده دوم، اثر موجی آن تا توزیع‌کننده منتشر شده و فروش از دست‌رفته آن حدود ۴۴ درصد افزایش می‌یابد.



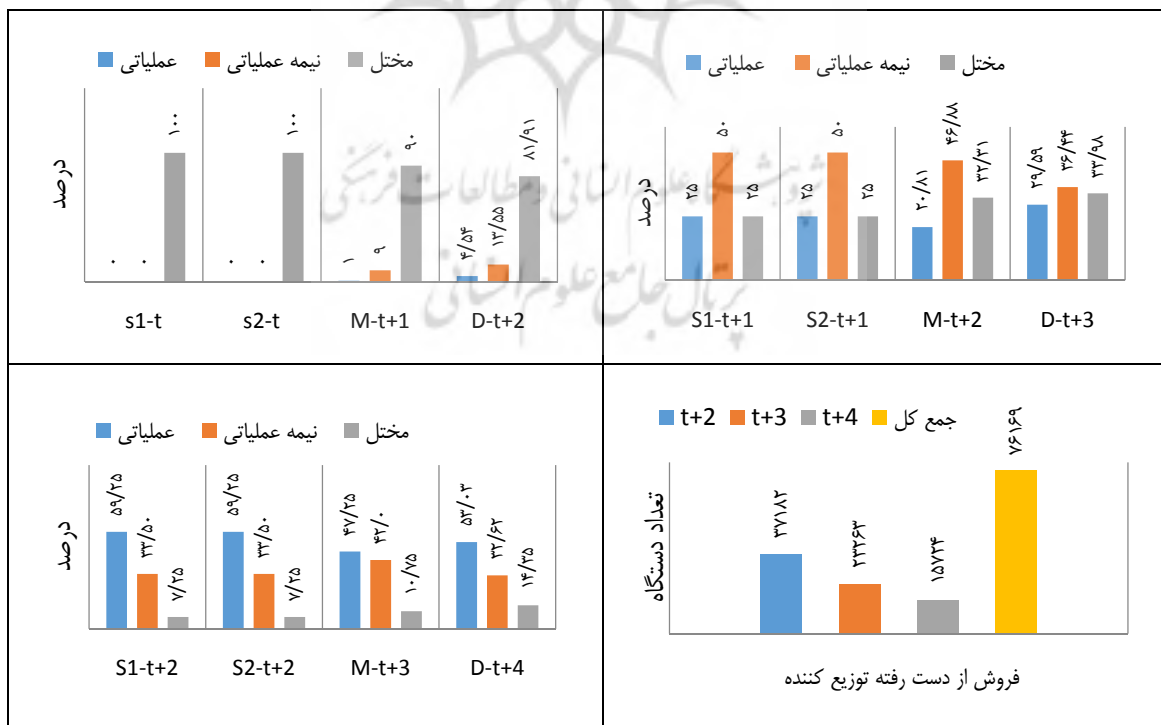
شکل ۸. مدل‌سازی اثر موجی اختلال کامل تأمین‌کننده دوم در زمان t (سناریو ۱)

در سناریو دوم که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، تأمین‌کننده دوم را در همان وضعیت سناریو پایه (احتمال ۷۸ درصد عملیاتی) و تأمین‌کننده اول را کاملاً مختل در نظر می‌گیریم. در این سناریو نیز با توجه به بهبود حدود ۲/۵۶ برابری وضعیت توزیع‌کننده در زمان $t+4$ نسبت به $t+2$ (بهبود احتمال عملیاتی از ۲۳/۲۵ درصد به احتمال ۵۹/۶۱ درصد)، میزان فروش از دست‌رفته توزیع‌کننده نیز در زمان $t+4$ حدود ۱۲۹۴۴ دستگاه کمتر شده است (حدود ۴۷ درصد بهبود). علاوه بر مشاهده اثر موجی اختلال در زنجیره تأمین با مقایسه میزان فروش از دست‌رفته توزیع‌کننده از دوره زمانی $t+4$ نسبت به $t+2$ ، می‌توان اثر موجی اختلال را در مقایسه جمع کل فروش از دست‌رفته توزیع‌کننده در هر افق زمانی با افق بعدی نیز مشاهده کرد. در این سناریو جمع کل فروش از دست‌رفته ۶۰۵۵۹ دستگاه است که نسبت به سناریو پایه ۲۱۵۷۲ واحد (افزایش ۵۵ درصد) و نسبت به سناریو اول ۴۵۴۱ واحد افزایش یافته است.



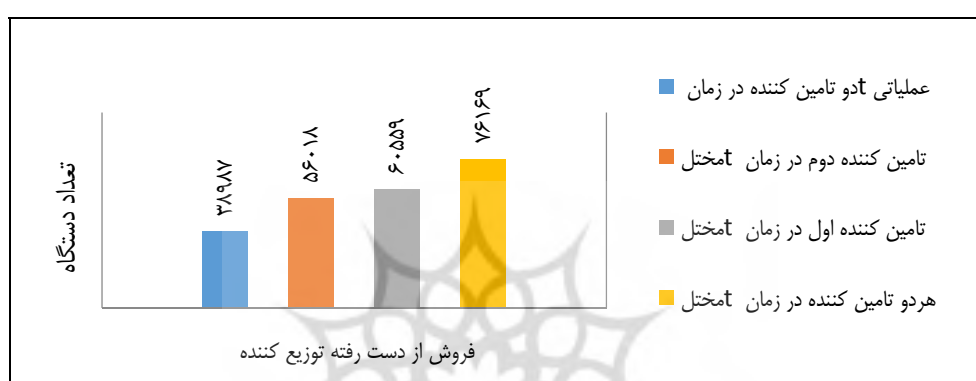
شکل ۹. مدل سازی اثر موجی اختلال کامل تأمین کننده اول در زمان t (سناریو ۲)

در سناریو سوم که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، هر دو تأمین کننده را کاملاً مختل در نظر می گیریم. در این سناریو جمع کل فروش از دست رفته ۷۶۱۶۹ دستگاه است که نسبت به سناریو پایه ۳۷۱۸۲ واحد و نسبت به سناریو اول ۲۰۱۵۱ واحد و نسبت به سناریو دوم ۱۵۶۱۰ واحد افزایش یافته است.



شکل ۱۰. مدل سازی اثر موجی اختلال کامل هر دو تأمین کننده در زمان t (سناریو ۳)

شکل ۱۱ به‌صورت خلاصه، اثر موجی ناشی از اختلال تأمین‌کنندگان در سناریوهای تعریف شده را به‌صورت کمی و برحسب فروش از دست‌رفته جهت مقایسه نشان می‌دهد. این بررسی نشان می‌دهد که چگونه یک اختلال ایجاد شده در زمان t در بالادست زنجیره تأمین که همان تأمین‌کننده است، در پایین دست زنجیره اثر می‌گذارد و می‌توان مسیر زنجیره را بررسی و واحد با اثرگذاری بیشتر را در زنجیره شناسایی کرد. در زنجیره تأمین بررسی شده، اختلال تأمین‌کننده اول تأثیر بیشتری بر زنجیره تأمین گذاشته است و در صورت بروز اختلال در تأمین‌کننده اول، اثر موجی آن از اختلال تأمین‌کننده دوم بیشتر است؛ از این رو، مدیران با چنین بررسی‌هایی می‌توانند در استراتژی‌های خود، از جمله در انتخاب تأمین‌کنندگان تجدیدنظر کنند یا استراتژی‌های جایگزین یا تغییر سیاست‌های موجودی را در پیش بگیرند.



شکل ۱۱. مقایسه اثر موجی اختلال تأمین‌کنندگان بر توزیع‌کننده برحسب فروش از دست‌رفته

تحلیل نقش واحدهای زنجیره تأمین در فروش از دست‌رفته

برای اینکه درک کنیم که در زنجیره تأمین مورد مثال، بیشترین تأثیر در میزان فروش از دست‌رفته از سوی کدام یک از واحدهای زنجیره (تأمین‌کنندگان، تولیدکننده و توزیع‌کننده) است، به تغییر پارامترها پرداختیم. ابتدا هر دو تأمین‌کننده را در زمان t ۱۰۰ درصد عملیاتی فرض کرده که فروش از دست‌رفته برابر ۳۰۵۶۶ واحد شده است. با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده واقعی، میانگین حداقل فروش از دست‌رفته در سه دوره زمانی ۱۵۰۰۰ واحد است که با عدد ۳۰۵۶۶ فاصله چشمگیری دارد. این امر بیانگر این است که تولیدکننده و توزیع‌کننده هم باید برای بهبود وضعیت خود اقدام کنند.

بار دیگر با فرض ۱۰۰ درصد عملیاتی بودن تأمین‌کنندگان، احتمال عملیاتی بودن تولیدکننده را در جدول احتمالات شرطی (جدول ۴) زمانی که تأمین‌کنندگان عملیاتی هستند، از ۹۳ درصد به ۱۰۰ درصد رساندیم که فروش از دست‌رفته به ۲۷۹۵۱ واحد رسید؛ سپس با فرض ثابت بودن دو تغییر فوق، احتمال عملیاتی بودن توزیع‌کننده را در جدول احتمالات شرطی (جدول ۵) از ۹۴ درصد به ۱۰۰ درصد تغییر دادیم که فروش از دست‌رفته به ۲۵۲۰۴ واحد رسید.

با بررسی فوق مشخص شده است که هنوز به عدد ۱۵۰۰۰ واحد نزدیک نشده‌ایم، به همین دلیل، این بار ماتریس انتقال تأمین‌کنندگان (جدول ۳) را تغییر دادیم و احتمال عملیاتی بودن تأمین‌کنندگان در زمان $t+1$ را وقتی که در زمان t عملیاتی هستند، از ۸۸ درصد به ۱۰۰ درصد رساندیم که فروش از دست‌رفته کاهش خوبی داشت و به عدد ۱۸۱۵۰ واحد و نزدیک به ۱۵۰۰۰ واحد رسید.

بررسی فوق نشان می‌دهد که در این زنجیره، قدرت جذب اختلال و بازیابی تأمین‌کنندگان، در کاهش فروش از دست‌رفته نقش بیشتری دارد و باید سیاستی اتخاذ شود که در صورت بروز اختلال، ظرفیت تأمین‌کنندگان بالا نگه داشته شود یا اینکه هرچه زودتر خود را بازیابی کرده و به ظرفیت بالا برسند. تولیدکنندگان هم می‌توانند تأمین‌کنندگان جایگزین در نظر داشته باشند یا سیاست موجودی بهتری در زنجیره در پیش بگیرند.

با بررسی‌هایی که در بخش قبلی و در این بخش انجام شد، می‌توان با مدل ارائه شده، مسیر زنجیره تأمین را از نظر ریسک انتشار اختلال بررسی و عملکرد زنجیره تأمین را تحلیل کرد و برای اتخاذ سیاست‌های درست، تصمیم‌های مناسبی گرفت.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

اختلال‌ها در دنیای امروز گریبان‌گیر زنجیره‌های تأمین است و طی دو سال اخیر، اختلال همه‌گیری کووید ۱۹ در متوقف‌ساختن زنجیره و تأخیر در پاسخ‌گویی به مشتریان نقش زیادی ایفا کرده است. وقتی اختلالی در یک نقطه از زنجیره تأمین شروع شود، این احتمال وجود دارد که به صورت موجی اثر خود را بر دیگر واحدهای زنجیره تأمین و در نهایت، بر عملکرد زنجیره بگذارد. در این مطالعه، ابتدا مدلی از زنجیره مارکوف گسسته - زمان برای تأمین‌کنندگان دچار اختلال طولانی‌مدت با سه حالت، عملیاتی، نیمه‌عملیاتی و کاملاً مختل پیشنهاد دادیم؛ سپس برای شبیه‌سازی و تحلیل اثر موجی اختلال در سراسر زنجیره تأمین، آن را در شبکه بیزین ادغام کردیم. با استفاده از شبکه بیزین پویا، انتشار اختلال را شبیه‌سازی کردیم و نشان دادیم که وقتی اختلال ایجاد می‌شود، تأمین‌کننده، تولیدکننده و توزیع‌کننده چه تأثیری می‌پذیرند. هدف ما از ارائه مدل اشاره شده، ارزیابی کمی اثر موجی اختلال در زنجیره تأمین‌های سه‌سطحی با در نظر گرفتن هر دو قابلیت آسیب‌پذیری و بازیابی در تأمین‌کننده است. با توجه به اینکه اختلال در تأمین‌کنندگان، زمان رساندن کالا یا خدمت را به مشتری افزایش می‌دهد و این افزایش زمان انتظار، کاهش فروش را در پی خواهد داشت، ما معیاری را پیشنهاد کردیم که اثر موجی اختلال تأمین‌کننده بر توزیع‌کننده را بر حسب زمان انتظار و فروش از دست‌رفته، کمی می‌کند. معیار اثر موجی پیشنهادی با داده‌های یک مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که وقتی اختلالی در بالادست زنجیره تأمین رخ می‌دهد تا پایین دست زنجیره منتشر می‌شود و بر عملکرد زنجیره تأثیر می‌گذارد. مدل این پژوهش می‌تواند چگونگی انتشار و تأثیر عملکرد اختلال در طول زنجیره تأمین را نشان دهد و مسیرهای ریسک پنهان و نقش هر یک از نهادهای زنجیره را در زمان وقوع اختلال آشکار کند. در زنجیره تأمین، تحلیل تأثیر عملکرد اختلال و انتشار آن، به مدیران کمک خواهد کرد تا در اولویت‌بندی سیاست‌های احتمالی و بازیابی، انتخاب تأمین‌کنندگان و برنامه‌های موجودی تصمیم‌های درستی اتخاذ کنند.

در این بخش تلاش شده است تا با استفاده از تحلیل یافته‌های تحقیق و نتایج حاصل از مدل ارائه‌شده، پیشنهادهایی برای انجام تحقیقات آتی در حوزه اثر موجی اختلال ارائه شود. در تحقیق حاضر، در ارائه مدل زنجیره مارکوف، سه حالت برای تأمین‌کنندگان فرض شده است که می‌توان در تحقیق‌های آینده حالت‌های بیشتری در نظر گرفت. ما معیاری را برای اندازه‌گیری اثر موجی اختلال تأمین‌کننده بر توزیع‌کننده، بر حسب زمان انتظار و فروش از

دست‌رفته ارائه دادیم. اثر موجی را می‌توان از نظر سایر شاخص‌های عملکرد زنجیره تأمین، از جمله هزینه فرصت از دست‌رفته نیز اندازه‌گیری کرد. علاوه بر این، آسیب‌پذیری زنجیره‌های تأمین با جداول احتمالات شرطی و نرخ انتقال ثابت، در یک افق زمانی بررسی شدند، در صورتی که می‌توان با موقعیت‌های جغرافیایی و شرایط زمانی مختلف، جداول احتمالات شرطی و نرخ انتقال را برای هر دوره زمانی و هر یک از تأمین‌کنندگان متغیر در نظر گرفت و اثر موجی را بررسی کرد. در این مطالعه، یک زنجیره تأمین سه‌سطحی در نظر گرفته شده است، با این حال، مطالعات آینده باید به بررسی تأثیر انتشار اختلال در یک زنجیره چهارسطحی و با در نظر گرفتن خرده‌فروشان بپردازد. در مدل ارائه شده حاضر، سیاست‌های موجودی متغیر مدنظر قرار نگرفته است که این امر می‌تواند تأثیر چشمگیری بر اثر موجی اختلال داشته باشد. در شبکه بیزین پویا ارائه شده وضعیت تأمین‌کننده از طریق دریافت اطلاعات از خبرگان و داده‌ها مشخص شده است، در صورتی که می‌توان وضعیت تأمین‌کننده را با توجه به تأثیر محرک‌های اختلال بر آن و با استفاده از شبکه بیزین به‌دست آورد. از آنجایی که اختلال ممکن است ابتدا از تولیدکننده یا توزیع‌کننده یا هم‌زمان بر همه واحدهای زنجیره وارد شود، در آینده می‌توان این مطالعه را توسعه داد و به بررسی اثر موجی این نوع اختلال‌ها پرداخت.

منابع

- آقازاده، هاشم و مالکی، حسین (۱۳۹۹). طراحی چارچوب مفهومی کیفیت رابطه خریداران و تأمین‌کنندگان در زنجیره تأمین و اولویت‌بندی مؤلفه‌ها کلیدی آن: رهیافت فراترکیب. *مدیریت صنعتی*، ۱۲(۴)، ۵۷۸-۶۰۸
- اختیاری، مصطفی؛ زندیه، مصطفی؛ عالم تبریز، اکبر؛ ربیع، مسعود (۱۳۹۸). ارائه یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی برای زنجیره تأمین چند مرحله‌ای با تأکید بر قابلیت اطمینان در شرایط عدم قطعیت. *مدیریت صنعتی*، ۱۱(۲)، ۱۷۷-۲۰۶
- ترک زاده، نازنین و بویرحسنی، امید (۱۳۹۹). شناسایی و رتبه‌بندی استراتژی‌های تاب‌آوری در پاسخ به اختلالات زنجیره تأمین شرکت آرد اطلس اصفهان در مواجهه با شرایط کرونا با استفاده از رویکرد خانه کیفیت. *اولین همایش ملی تولید دانش سلامتی در مواجهه با کرونا و حکمرانی در جهان پسا کرونا*. ۲۱ آبان، ۱۳۹۹. دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد.
- خلیلی، سید محمد؛ پویا، علیرضا؛ کاظمی، مصطفی و فکور ثقیه، امیرمحمد (۱۴۰۱). طراحی یک شبکه زنجیره تأمین بنزین پایدار و تاب‌آور تحت شرایط عدم قطعیت اختلال (مطالعه موردی: شبکه زنجیره تأمین بنزین استان خراسان رضوی). *مدیریت صنعتی*، ۱۴(۱)، ۲۷-۷۹.
- سیبویه، علی؛ آذر، عادل و زندیه، مصطفی (۱۴۰۰). ارائه مدل دومرحله‌ای احتمالی استوار برای طراحی زنجیره تأمین خون تاب‌آور با در نظر گرفتن اختلال زلزله و بیماری واگیردار. *مدیریت صنعتی*، ۱۳(۴)، ۶۶۴-۷۰۳.
- مرادی مسجدبری، علی و ماکویی، احمد (۱۳۹۷). بررسی اصول و استراتژی‌های تاب‌آوری زنجیره تأمین تحت اختلالات. *کنفرانس ملی مدیریت و مهندسی صنایع ایران*. ۲۱ آذر ۱۳۹۷. اصفهان.
- مزروعی نصرآبادی، اسماعیل؛ حبیبی راد، امین و شول، عباس (۱۴۰۱). ارائه مدل عوامل کلیدی موفقیت برای مقابله با اثر موجی در زنجیره تأمین فرش ماشینی ایران: نگاهی بر همه‌گیری کرونا. *چشم‌انداز مدیریت صنعتی*،

References

- Aghazadeh, H. & Maleki, H. (2020). Developing a Conceptual Framework of Buyer-Supplier Relationship Quality in the Supply Chain and Prioritizing its key Components: A Meta-Synthesis Method. *Industrial Management Journal*, 12(4), 578-608. (in Persian)
- Behzadi, G., O'Sullivan, M.J., Olsen, T.L., Scrimgeour, F. & Zhang, A. (2017). Robust and resilient strategies for managing supply disruptions in an agribusiness supply chain. *International Journal of Production Economics*.doi: 10.1016/j.ijpe.2017.06.018.
- Brusset, X., Davari, M., Kinra, A., & La Torre, D. (2022). Modelling ripple effect propagation and global supply chain workforce productivity impacts in pandemic disruptions. *International Journal of Production Research*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2126021>
- Chauhan, V. K., Perera, S., & Brintrup, A. (2021). The relationship between nested patterns and the ripple effect in complex supply networks. *International Journal of Production Research*, 59(1), 325-341. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1831096>
- Dolgui A., Ivanov D. & Sokolov B. (2018). Ripple effect in the supply chain: An analysis and recent literature. *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 414-430.
- Dolgui, A., Ivanov, D. & Rozhkov, M. (2020). Does the ripple effect influence the bullwhip effect? An integrated analysis of structural and operational dynamics in the supply chain. *International Journal of Production Research*, 58(5): 1285-1301.
- Ekhtiari, M., Zandieh, M., Alem Tabriz, A., & Rabieh, M. (2019). Proposing a Bi-level Programming Model for Multi-echelon Supply Chain with an Emphasis on Reliability in Uncertainty. *Industrial Management Journal*, 11(2), 177-206. (in Persian)
- Fenton, N. & Neil, M. (2013). *Risk assessment and decision analysis with Bayesian networks*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL.
- Ghadge, A., Er, M., Ivanov, D. & Chaudhuri, A. (2022). Visualisation of ripple effect in supply chains under long-term, simultaneous disruptions: a system dynamics approach, *International Journal of Production Research*, 60:20, 6173-6186, DOI: 10.1080/00207543.2021.1987547
- Gholami-Zanjani, S. M., Jabalameli, M. S., Klibi, W., & Pishvae, M. S. (2021). A robust location-inventory model for food supply chains operating under disruptions with ripple effects. *International Journal of Production Research*, 59(1), 301-324. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1834159>
- He, J., Alavifard, F., Ivanov, D. & Jahani, H. (2018). A Real-option Approach to Mitigate Disruption Risk in the Supply Chain. *Omega*. doi:10.1016/j.omega.2018.08.008.
- Hosseini, S. & Barker, K. (2016a). A Bayesian network model for resilience-based supplier selection. *International Journal of Production Economics*, 180: 68-87.
- Hosseini, S. & Barker, K. (2016b). Modeling Infrastructure Resilience Using Bayesian Networks: A Case Study of Inland Waterway Ports. *Computers & Industrial Engineering*, 93: 252-266.

- Hosseini, S. & Ivanov, D. (2021). A multi-layer Bayesian network method for supply chain disruption modelling in the wake of the COVID-19 pandemic, *International Journal of Production Research*. doi:10.1080/00207543.2021.1953180
- Hosseini, S., Al Khaled, A. & Sarder, M.D. (2016). A general framework for assessing system resilience using Bayesian networks: A case study of sulfuric acid manufacturer. *Journal of Manufacturing Systems*, 41: 211-227.
- Hosseini, S., Barker, K. & Ramirez-Marquez, J.E. (2016). A Review of Definitions and Measures of System Resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, 145: 47-61.
- Hosseini, S., Ivanov, D. & Dolgui, A. (2020). Ripple effect modeling of supplier disruption: integrated Markov chain and dynamic Bayesian network approach. *International Journal of Production Research*, 58(11), 3284-3303.
- Ivanov, D. & Dolgui, A. (2021). OR-Methods for coping with the ripple effect in supply chains during COVID-19 pandemic: Managerial insights and research implications. *International Journal of Production Economics*, 232, 107921.
- Ivanov, D. (2017). Simulation-based the ripple effect modeling in the supply chain. *International Journal of Production Research*, 55(7), 2083-2101.
- Ivanov, D. (2018). OR/MS Methods for Structural Dynamics in Supply Chain Risk Management. In D. Ivanov (Ed.), *Structural Dynamics and Resilience in Supply Chain Risk Management* (pp. 115-159). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69305-7_5
- Ivanov, D. (2020a). Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains: A simulationbased analysis on the coronavirus outbreak (COVID-19/SARS-CoV-2) case. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, doi:10.1016/j.tre.2020.101922.
- Ivanov, D. (2020b). Viable Supply Chain Model: Integrating agility, resilience and sustainability perspectives. Lessons from and thinking beyond the COVID-19 pandemic. *Annals of Operations Research*, doi:10.1007/s10479-020-03640-6.
- Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2019). Ripple effect in the supply chain: Definitions, frameworks and future research perspectives. In *Handbook of ripple effects in the supply chain* (pp. 1-33). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14302-2_1.
- Ivanov, D., Dolgui, A., Sokolov, B., Ivanova, M. (2017). Literature review on disruption recovery in the supply chain. *International Journal of Production Research*, 55(20), 6158-6174.
- Ivanov, D., Sokolov, B. & Dolgui, A. (2014). The ripple effect in supply chains: Trade-off 'efficiency flexibility-resilience' in disruption management. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2154-2172.
- Ivanov, D., Tsipoulanidis, A. & Schönberger, J. (2019). *Global Supply Chain and Operations Management: A Decision-oriented Introduction Into the Creation of Value*. 2nd ed. Cham: Switzerland: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94313-8>.

- Jingzhe, C., Hongfen, W. & Ray, Y.Z. (2022). A supply chain disruption recovery strategy considering product change under COVID-19. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 920-927.
- Jones, M.T. (2005). Estimating Markov Transition Matrices Using Proportions Data: An Application to Credit Risk. *International Monetary Fund: WP/05/219*.
- Khalili, S.M., Pooya, A., Kazemi, M. & Fakoor Saghieh, A.M. (2022). Designing a sustainable and resilient gasoline supply chain network under uncertainty (Case study: gasoline supply chain network of Khorasan Razavi province). *Industrial Management Journal*, 14(1), 27- 79. (in Persian)
- Levner, E. & Ptuskin, A. (2017). Entropy-based model for the ripple effect: managing environmental risks in supply chains. *International Journal of Production Research*. doi:10.1080/00207543.2017.1374575.
- Li, Y., Chen, K., Collignon, S. & Ivanov, D. (2021). Ripple Effect in the Supply Chain Network: Forward and Backward Disruption Propagation, Network Health and Firm Vulnerability. *European Journal of Operational Research*. doi:10.1016/j.ejor.2020.09.053
- Llaguno, A., Mula, J., Campuzano-B, F. (2022). State of the art, conceptual framework and simulation analysis of the ripple effect on supply chains. *International Journal of Production Research*. DOI: 10.1080/00207543.2021.1877842.
- Lohmer, J., Bugert, N. & Lasch, R. (2020). Analysis of resilience strategies and ripple effect in blockchain-coordinated supply chains: An agent-based simulation study. *International Journal of Production Economics*. doi:10.1016/j.ijpe.2020.107882.
- Lucker, F. (2019). Using inventory to mitigate the ripple effect, *International Federation of Automatic Control. IFAC Papers OnLine*, 52-13: 1272–1276.
- Mazroui nasrabadi, E., Habibi, A. & Shoul, A. (2022). Presenting a model of critical success factors to cope with the ripple effect in Iran's machine-made carpet supply chain: Corona pandemic effects. *Industrial Management Perspective Journal*. DOI: 10.52547/jimp.2022.228105.1383. (in Persian)
- Mishra, D., Dwivedi, Y.K., Rana, N.P. & Hassini, E. (2021). Evolution of supply chain ripple effect: A bibliometric and metaanalytic view of the constructs. *International Journal of Production Research*, 119.
- Moradi Masjedbari, A. & Makoei, A. (2017). Investigating the principles and strategies of supply chain resilience under disturbances. *National Conference on Industrial Management and Engineering of Iran*. 21 December 2018. Isfahan. (in Persian)
- Park, Y. W., Blackhurst, J., Paul, C., & Scheibe, K. P. (2022). An analysis of the ripple effect for disruptions occurring in circular flows of a supply chain network. *International Journal of Production Research*, 60(15), 4693-4711.
- Pournader, M., Kach, A. & Talluri, S. (2020). A Review of the Existing and Emerging Topics in Supply Chain Risk Management Literature. *Decision Sciences*. doi:10.1111/deci.12470.
- Qazi, A., Dickson, A., Quigley, J. & Gaudenzi, B. (2018). Supply chain risk network management: A Bayesian belief network and expected utility based approach for

- managing supply chain risks. *International Journal of Production Economics*, 196: 24-42.
- Sawik, T. (2020). Selection of Supply and Demand Portfolios and Production and Inventory Scheduling. In: Supply Chain Disruption Management. *International Series in Operations Research & Management Science*, vol 291. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44814-1_12
- Sibevei, A., Azar, A. & Zandieh, M. (2021). Developing a Two-stage Robust Stochastic Model for Designing a Resilient Blood Supply Chain Considering Earthquake Disturbances and Infectious Diseases. *Industrial Management Journal*, 13(4), 664-703. (in Persian)
- Sindhvani, R., Jayaram, J., & Saddikuti, V. (2022). Ripple effect mitigation capabilities of a hub and spoke distribution network: an empirical analysis of pharmaceutical supply chains in India. *International Journal of Production Research*, 1-33. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2098073>
- Singh, S., Kumar, R., Panchal, R., Kumar Tiwari, M. (2021). Impact of COVID-19 on logistics systems and disruptions in food supply chain. *International Journal of Production Research*, 59(7), 1993-2008.
- Sokolov, B., Ivanov, D., Dolgui, A. & Pavlov, A. 2016. Structural Quantification of the Ripple Effect in the Supply Chain. *International Journal of Production Research*, 54 (1): 152–169.
- Song, B., Lee, C. & Park Y. (2013). Assessing the Risks of Service Failures Based on Ripple Effects: A Bayesian Network Approach. *International Journal of Production Economics* 141 (2), 493–504.
- Turkzadeh, N. & Boyer Hassani, A. (2020). Identifying and ranking resilience strategies in response to supply chain disruptions of Isfahan Atlas Flour Company in the face of corona conditions using the quality house approach, *the first national conference on producing health knowledge in the face of corona and governance in the post-corona world*, Najafabad. (in Persian)
- Yılmaz, Ö.F., Özçelik, G. & Yeni, F.B. (2020). Ensuring sustainability in the reverse supply chain in case of the ripple effect: A two-stage stochastic optimization model. *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124548.
- Yoon, J., Talluri, S., Yildiz, H. & Ho, W. (2018). Models for Supplier Selection and Risk Mitigation: A Holistic Approach. *International Journal of Production Research*, 56(10), 3636-3661.
- Zhiqing, D., Yongda, H., Hui, W. & Linhui, W. (2020). Is there a ripple effect in environmental regulation in China? Evidence from the local-neighborhood green technology innovation perspective. *Ecological Indicators*, 118(1), 106773.