Industrial Management Perspective

Print ISSN: 2251-9874, Online ISSN: 2645-4165
Volume 12, Serial Number 48, Winter 2023, Pages 97-129 (Original Article)
DOI: 10.52547/JIMP.12.4.97

Supply Chain Resilience Analysis Considering Disruption in the Natural Stone Industry Using a Discrete-Event Simulation Approach

Mojtaba Hajian Heidary*, Maede Mirzaaliyan**

Abstract

In order to achieve competitive advantages in uncertain situations, one of the big challenges that organizations are faced is the risk reduction through creating resilient supply chains. Supply Chain resilience refers to the ability of supply chain to respond to disruptions. Disruption is an unpredictable event that has different internal and external sources such as natural disasters and operational risks. In this paper, a simulation model has been presented for analyzing the disruption in the natural stone industry supply chain in one of the stone factories in Iran using Arena simulation software. The simulation model has been run 100 times and the simulation time has been assumed to be one year. The validation of the model has been done by comparing the simulation results with actual information by calculating the mean absolute error. Moreover, some scenarios have been made for disruption management and resilience creation in the system. Then, the performance of each scenario was evaluated based on some criteria include fill rate, backorder cost and total cost. Finally, the redundancy scenario was chosen to be run in the real world. The results showed that a backup production line would be set up in the factory to make the system more resilient.

Keywords: Resiliency; Supply Chain; Disruption; Discrete-Event Simulation; Natural Stone Industry.

Received: Mar. 5, 2022; Accepted: Jul. 31, 2022.
* Assistant Professor, Allameh Tabatabai University (Corresponding Author).
Email: hajianheidary@atu.ac.ir
** Master's Student, Allameh Tabatabai University.

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

شاپای چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپای الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵

سال دوازدهم، شماره ۴۸، زمستان ۱۴۰۱، ص‌ص ۹۷ – ۱۲۹ (**نوع مقاله: پژوهشی**)

DOI: 10.52547/JIMP.12.4.97

تحلیل تاب‌آوری زنجیره تأمین با درنظرگرفتن اختلال در صنعت سنگ طبیعی ساختمان با رویکرد شبیه‌سازی گسسته پیشامد

مجتبی حاجیان حیدری*، مائده میرزاعلیان**

چکیده

برای دستیابی به مزیت رقابتی در شرایط عدم‌اطمینان که در آن تغییر ضروری است، یکی از چالش‌های بزرگ سازمان‌ها کاهش ریسک از طریق ایجاد زنجیره‌های تأمین تاب‌آور است. تاب‌آوری در زنجیره تأمین به توانایی زنجیره تأمین برای مقابله با اختلال اشاره دارد که اختلال یک رویداد غیرقابل‌پیش‌بینی بوده و دارای منابع داخلی و خارجی مختلفی ازجمله بلایای طبیعی و ریسک‌های عملیاتی است. در پژوهش حاضر به شبیه‌سازی اختلال توسط نرم‌افزار ارنا در یک زنجیره تأمین سنگ ساختمانی در «کارخانه سنگبری آسمان» پرداخته شده است. مدت‌زمان اجرای شبیه‌سازی یک سال و تعداد دفعات اجرای مدل شبیه‌سازی ۱۰۰ بار در نظر گرفته شد. پس از اعتبارسنجی مدل از طریق مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با اطلاعات واقعی کارخانه با محاسبه میانگین قدر مطلق خطا و تأیید اعتبار مدل، سناریوهای مختلف برای مدیریت اختلال و نشان‌دادن تاب‌آوری سیستم ایجاد و آزمایش شدند؛ سپس بر اساس معیارهای نرخ پاسخگویی به تقاضای مشتریان، هزینه تقاضای پس‌افت و هزینه کل، عملکرد هر یک از سناریوها ارزیابی و درنهایت سناریو افزونگی برای اجرا در دنیای واقعی انتخاب شد؛ نتایج نشان داد که برای تاب‌آورکردن سیستم، یک خط تولید پشتیبان در کارخانه راه‌اندازی شود.

کلیدواژه‌ها: تاب‌آوری؛ زنجیره تأمین؛ اختلال؛ شبیه‌سازی گسسته پیشامد؛ صنعت‌سنگ طبیعی ساختمان.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹.

* استادیار، دانشگاه علامه طباطبایی (نویسنده مسئول).

Email: hajianheidary@atu.ac.ir

** دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علامه طباطبایی .

۱. مقدمه

با رشد روزافزون جهانی‌شدن و برون‌سپاری، زنجیره‌های تأمین بزرگ‌تر و پیچیده‌تر و درنتیجه آسیب‌پذیرتر در برابر اختلالات[1]، در حال شکل‌گیری هستند. در زنجیره‌های تأمین امروزی باید تصمیمات زیادی در محیط‌های پیچیده گرفته شود و هرچه پیچیدگی بیشتر باشد، امکان وجود اطلاعات نادرست و مبهم افزایش می‌یابد؛ درنتیجه سطح عدم‌اطمینان بیشتر می‌شود [۴۰]. افزایش توجه به مدیریت ریسک زنجیره تأمین نه‌تنها نشان‌دهنده فاجعه‌های طبیعی اخیر است، بلکه تصدیق می‌کند که حتی حوادث کوچک نیز می‌توانند تأثیر شگرفی بر کل زنجیره تأمین داشته باشند [۱۱].

اختلال در زنجیره تأمین را می‌توان به‌عنوان یک رویداد داخلی یا خارجی غیرقابل‌پیش‌بینی تعریف کرد که جریان عادی یا برنامه‌ریزی‌شده کالا و خدمات در زنجیره تأمین را تغییر می‌دهد و می‌تواند در هر مکان از زنجیره تأمین و در هر نقطه از زمان رخ دهد. خطرهای ناشی از اختلال می‌تواند ناشی از فجایع طبیعی یا ساخته دست بشر (زلزله، سیل، طوفان، حملات تروریستی، آتش‌سوزی، بحران‌های سیاسی، اعتصابات یا اختلافات حقوقی، خرابی تجهیزات و سیستم، ورشکستگی تأمین‌کنندگان، نقص محصول و تأخیرهای ترانزیتی یا سفارشی) باشد. اختلالات زنجیره تأمین می‌تواند اشکال مختلفی داشته باشد، ازجمله مشکلات تولید یا خطرهای عملیاتی، قیمت عمده‌فروشی که تحت تأثیر نوسانات هزینه، کمبود عرضه و کاهش ناگهانی تقاضا بر اساس شرایط بازار قرار می‌گیرد [۱۵].

به‌جای انجام سرمایه‌گذاری‌های سنگین برای از بین‌بردن هر نوع خطر بالقوه، استفاده از مفهوم تاب‌آوری[2] در طراحی و عملیات زنجیره تأمین که توانایی کاهش عواقب اختلالات و کاهش زمان بازیابی عملکرد طبیعی را فراهم می‌کند، بسیار بیشتر مورداستقبال قرار می‌گیرد [۲۱]. تاب‌آوری به ظرفیت بقا و میزان سازگاری و رشد یک شرکت در برابر تغییرات آشفته اشاره دارد. تاب‌آوری زنجیره تأمین توانایی یک شرکت برای به‌حداقل‌رساندن تأثیرات منفی هرگونه حوادث غیرمنتظره در محیط زنجیره تأمین خود و همچنین توانایی پاسخگویی سریع به اختلال و دستیابی به شرایط مطلوب است. برای دستیابی به چنین توانایی‌هایی به یک زنجیره تأمین انعطاف‌پذیر نیاز است. یک زنجیره تأمین تاب‌آور باید قابلیت‌هایی را برای واکنش به پیامدهای منفی رویدادهای غیرمنتظره و بازگشت سریع به حالت اولیه خود و یا حرکت به بهترین حالت جدید پس از اختلال و ادامه عملیات تجاری خود به‌صورت کارآمد ایجاد کند [۱۱].

1. Disruptions
2. Resiliency

اهمیت و ضرورت موضوع. با توجه به داده‌های تجربی ارائه‌شده توسط «بیمه بین‌المللی»[1] شرکت‌ها تا ۱۵ درصد از گردش مالی خود را تنها به‌دلیل تهدیدها از دست می‌دهند؛ همچنین مدیران شرکت‌ها ۴۰ تا ۶۰ درصد زمان کاری‌شان را به مدیریت اختلالات به‌وجودآمده می‌پردازند [۱۶]. در حال حاضر، شرکت‌ها برای درک عوامل پیچیده‌ای که به میزان زیادی در توسعه زنجیره‌های تامین مقاوم در برابر اختلالات نقش دارند، به روش‌های بهبودیافته نیاز دارند [۳۴]. شرکت‌ها اغلب به‌سرعت به اختلالات واکنش نشان نمی‌دهند و به عملکرد اولیه پیش از وقوع اختلال بازنمی‌گردند؛ ازاین‌رو تاب‌آوری زنجیره تأمین می‌تواند مزیت رقابتی پایداری را با تطبیق و توسعه مداوم قابلیت‌ها برای شرکت ایجاد کند. تاب‌آوری نقش استراتژیک و مهمی در موفقیت شرکت‌ها دارد؛ زیرا جریان بی‌وقفه مواد و محصولات برای رقابت و موفقیت سازمانی بسیار مهم است [۱۳]. در بسیاری از شرکت‌ها، فعالیت‌های لجستیکی مانند تأمین مواد اولیه، مونتاژ قطعات، تولید و حتی توزیع محصولات برون‌سپاری می‌شوند. این ساختار یک محیط وابسته در زنجیره تأمین ایجاد کرده است که در آن ایجاد هرگونه اختلال در فعالیت اجزای بالادست می‌تواند تأثیر منفی بسیار بیشتری بر فعالیت اجزای پایین‌دست داشته باشد و به‌صورت اثر شلاق چرمی عمل کند [۹].

بیان مسئله. بسیاری از مطالعات صورت‌گرفته، توانایی کنارآمدن با اختلالات و مقاومت در برابر آسیب‌پذیری را از عوامل مهم تاب‌آوری زنجیره تأمین[2] می‌دانند. با توجه به تعداد زیادی رویداد مختل‌کننده و تأثیرات بالقوه آن‌ها بر رقابت و تجارت، تاب‌آوری زنجیره تأمین توجه بسیاری را از سوی پژوهشگران و صاحبان کسب‌وکار به خود جلب کرده است. برای مثال، اختلال در عملیات مسیریابی، شرایط بد آب‌وهوایی، خرابی سیستم‌های اطلاعاتی و مشکلات صنعتی می‌توانند بر ثبات و پایداری زنجیره تأمین اثر بگذارند؛ ازاین‌رو با توجه به اهمیت موضوع اختلال و تاب‌آوری زنجیره تأمین و همچنین با توجه به اینکه ایجاد اختلال در اجزای بالادستی زنجیره تأمین مانند بخش تولید بر عملکرد اجزای پایین‌دست نیز مانند بخش توزیع تأثیرگذار است، در پژوهش حاضر به شبیه‌سازی اختلال در بخش تولید زنجیره تأمین سنگ طبیعی و ایجاد راهکارهایی برای تاب‌آورکردن سیستم پرداخته شده است.

این پژوهش شامل پنج بخش اصلی است که در بخش دوم به مرور مبانی نظری، در بخش سوم به روش‌شناسی پژوهش، تشریح مدل شبیه‌سازی گسسته پیشامد، اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی پایه و تدوین سناریوها، در بخش چهارم به بررسی نتایج شبیه‌سازی، ارائه مدل تعمیم‌یافته و تحلیل حساسیت و در بخش پنجم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها برای انجام مطالعات آتی پرداخته می‌شود.

1. International Insurance
2. Supply Chain Resilience

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

تاب‌آوری زنجیره تأمین به‌عنوان توانایی یک زنجیره تأمین برای بازگشت به عملکرد عملیاتی عادی در یک دوره زمانی قابل‌قبول پس از ایجاد اختلال تعریف شده است [۳]. پژوهش‌های سنتی زنجیره تأمین یادآور می‌شوند که روابط بین شرکت‌ها می‌تواند به تاب‌آوری منجر شود؛ اما این موضوع لزوماً به‌معنای ارتباطات محکم بین شرکت‌ها نیست [۲۶]. ایوانو[1] و همکاران (۲۰۱۹)، خاطرنشان کردند که تاب‌آوری، توانایی حفظ زنجیره تأمین با تکیه بر سیستم‌های تطبیقی است؛ چراکه شرایط با گذشت زمان تغییر می‌کند.

سنار[2] و همکاران (۲۰۱۸)، یک چارچوب پشتیبانی تصمیم مبتنی بر شبیه‌سازی برای ارزیابی تاب‌آوری زنجیره تأمین و ارزیابی موازنه هزینه و تاب‌آوری با استراتژی‌های مختلف کاهش اختلال در شرایط عدم‌قطعیت ارائه دادند. زنجیره‌های تأمین مدرن با اختلالات مختلف داخلی و خارجی با شدت‌های تصادفی روبه‌رو هستند که ممکن است بر فعالیت‌های هر یک از اجزای زنجیره (تأمین‌کنندگان، کارخانه‌ها و توزیع‌کنندگان) تأثیر بگذارد. به‌منظور به‌حداقل‌رساندن اثرات ناشی از اختلالات در هر یک از اجزا، باید شبکه زنجیره تأمین به یک ساختار تاب‌آور برسد که توانایی مقاومت در برابر اختلال را داشته باشد [۳۵]. پیشرفت‌های فناوری از گذشته به اختلالات شدیدی منجر شده است که باعث ایجاد تغییرات پارادایمی در تولید، صنعت و کل اقتصاد می‌شود [۳۱].

ترنکویست و واگرین[3] (۲۰۱۳)، ابزاری برای طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین تاب‌آور پیشنهاد کردند و ساختارهای مختلفی با توجه به عوامل تعیین‌کننده طراحی یک زنجیره تأمین، مانند تراکم و اهمیت زنجیره تأمین، ارائه دادند. در این پژوهش توانایی هر ساختار در مقاومت در برابر اختلالات با ایجاد اختلال تصادفی در ظرفیت‌های تولید کارخانه با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو آزمایش شد. ژو[4] و همکاران (۲۰۲۰)، خاطرنشان کردند که برای مدیریت پایدار و تاب‌آور زنجیره تأمین مواد غذایی فاسدشدنی پس از شیوع ویروس کرونا، شرکای زنجیره تأمین نیازمند استفاده از اطلاعات صحیح و به‌اشتراک‌گذاری آن‌ها برای تسهیل تصمیم‌گیری هستند؛ بنابراین از شبیه‌سازی سیستم دینامیک برای مطالعه یک زنجیره تأمین سه‌سطحی پنیر استفاده کردند و به شبیه‌سازی سه سناریو که باعث کمبود محصول می‌شوند پرداختند. آن‌ها بر اساس نتایج پیشنهاد کردند که به‌منظور کاهش تأثیر منفی تقاضای درون‌زا، به‌اشتراک‌گذاری اطلاعاتی که باعث تقاضای درون‌زا می‌شود، متوقف و از یک استراتژی به‌هم‌پیوسته برای پشتیبانی از

1. Ivanov
2. Sonar
3. Turnquist & Vugrin
4. Zhu

تصمیم‌گیری استفاده شود. پراسون[1] و همکاران (۲۰۱۷)، از شبیه‌سازی گسسته پیشامد برای دستیابی به سیاست‌های بهینه در مواجهه با سطوح مختلف اختلالات زنجیره تأمین و تقاضای تصادفی در یک زنجیره تأمین دوسطحی استفاده کردند و به سناریوسازی برای بررسی مدت‌زمان و تکرار اختلال پرداختند. نتایج نشان داد که برای مقابله با اختلال، سیاست‌های غیرمتمرکز هزینه کمتری نسبت به سیاست‌های متمرکز خواهند داشت. اشمیت[2] و سینگ (۲۰۱۰)، به ارزیابی آسیب‌پذیری شرکت‌های بزرگ در برابر اختلال و کمّی‌سازی تأثیر آن بر خدمات مشتریان با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و گسسته پیشامد پرداختند؛ آن‌ها همچنین استراتژی‌های مختلف برای کنارآمدن با خطرهای ناشی از اختلال به‌منظور حفظ دردسترس‌بودن محصولات برای مشتریان را مدل‌سازی کردند.

سنی[3] و همکاران (۲۰۱۴)، یک مدل بر مبنای نظریه گراف ارائه کردند که به‌صورت همه‌جانبه، تمام توانمندسازهای اصلی تاب‌آوری و روابط متقابل آن‌ها را برای تحلیل با استفاده از رویکرد مدل‌سازی ساختاری ـ تفسیری[4] در نظر می‌گیرد و به سازمان‌ها در اندازه‌گیری و تجزیه‌وتحلیل تاب‌آوری زنجیره تأمین و پیرو آن سهولت در تصمیم‌گیری کمک می‌کند. توانمندسازی‌های به‌کاررفته شامل چابکی، همکاری، تسهیم اطلاعات، پایداری، اعتماد، مشاهده‌پذیری، فرهنگ مدیریت ریسک، سازگاری و ساختار بودند. جین[5] و همکاران (۲۰۱۷)، یک مدل سلسله‌مراتبی برای بررسی تاب‌آوری زنجیره تأمین و توضیح پویایی بین توانمندسازهای مختلف و اعتبارسنجی تجربی مدل ارائه کردند. آن‌ها از مدل‌سازی ساختاری ـ تفسیری برای تجزیه‌وتحلیل سطوح روابط بین توانمندسازها و از مدل‌سازی معادلات ساختاری[6] برای اعتبارسنجی مدل سلسله مراتبی SCRES و آزمون مدل تحلیلی مسیر[7] بهره گرفتند. نتایج نشان داد که با استفاده از مدل پیشنهادی، سازمان‌ها می‌توانند ظرفیت تاب‌آوری خود را با اصلاح دارایی‌های استراتژیکشان افزایش دهند.

پاولو[8] و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل ارزیابی تاب‌آوری زنجیره تأمین با استفاده از رویکرد ترکیبی فازی ـ احتمالی[9] ارائه کردند. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی برای مقایسه طراحی‌های مختلف زنجیره تأمین در رابطه با تاب‌آوری هم در برابر انتشار اختلال و هم با درنظرگرفتن بازیابی قابل‌استفاده است. جهانی و همکاران (۱۳۹۶)، یک مدل جامع برای سنجش

1. Prasoon
2. Schmitt & singh
3. Soni
4. Interpretive structural modelling (ISM)
5. Jain
6. Structural equation modelling (SEM)
7. path analytical model
8. Pavlov
9. Hybrid Fuzzy-Probabilistic Approach

میزان تاب‌آوری زنجیره تأمین با استفاده از رویکرد مدل‌سازی معادلات ساختاری در «شرکت ایران‌خودرو» ارائه کردند. نتایج نشان داد که متغیرهای انعطاف‌پذیری، فرهنگ مدیریت ریسک، همکاری، افزونگی و چابکی به‌ترتیب بیشترین تأثیر را در تبیین تغییرات تاب‌آوری زنجیره تأمین دارند. دیکسیت[1] و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از رویکرد شبیه سازی به ارزیابی تاب‌آوری شبکه زنجیره تأمین ۲۳ شرکت فعال در هند که در معرض ریسک‌های مختلف قرار دارند، پرداختند. نتایج نشان داد شرکتی که کمترین تراکم و تمرکز و بیشترین اتصال و اندازه شبکه را دارد، دارای بالاترین تاب‌آوری است؛ درحالی‌که شرکتی با بیشترین تراکم و تمرکز بالا به‌دلیل تجمع گره‌ها، کمترین تاب‌آوری را دارد.

حسینی و همکاران (۲۰۲۰) تاب‌آوری زنجیره تأمین (SCR) را در یک سیستم باز از طریق اندازه‌گیری و تجزیه‌وتحلیل سطوح تاب‌آوری یک تولیدکننده بررسی کردند و برای درک مفهوم تاب‌آوری زنجیره تأمین با استفاده از نظریه سیستم‌ها[2] و سایبرنتیک[3] این‌چنین استدلال کردند که یک لنز نظری سیستمی می‌تواند به گسترش پژوهش‌های پیشرفته برای توصیف تاب‌آوری زنجیره تأمین بر اساس مفهوم متعادل‌کردن آسیب‌پذیری و قابلیت بازیابی در طول زمان کمک کند. به این منظور، آن‌ها یک مقیاس جدید تاب‌آوری را برای اندازه‌گیری تاب‌آوری زنجیره تأمین با استفاده از رویکرد شبکه بیزی با تابع ترکیبی آسیب‌پذیری و بازیابی، تعریف و آزمایش کردند. ایوانو (۲۰۲۱)، چارچوبی که زوایای مختلف تاب‌آوری را ادغام می‌کند و بهره‌برداری از توانمندی‌های تاب‌آوری را برای خلق ارزش ممکن می‌سازد، ارئه کرد. او طراحی چارچوب AURA[4] (استفاده فعال از دارایی‌های تاب‌آوری) را برای مدیریت زنجیره تأمین پس از اتمام کووید ۱۹ از طریق گردآوری مبانی نظری موجود در مورد تاب‌آوری مبتنی بر ارزش‌آفرینی و مثال‌های عملی و تکمیل تحلیل خود با بحث در مورد اجرای عملی، مفهوم‌سازی کرد. وی همچنین برای درنظرگرفتن تاب‌آوری به‌عنوان یک مؤلفه ذاتی، فعال و ارزش‌آفرین برای تصمیمات مدیریت عملیات، به‌جای اینکه به‌عنوان یک سپر منفعل برای محافظت در برابر حوادث نادر و شدید باشد، به ادغام چارچوب‌های موجود شامل VSC[5] (زنجیره تأمین پایدار)، RSC[6] (زنجیره تأمین قابل پیکربندی مجدد) و LCNSC[7] (زنجیره تأمین نیازمند به قطعیت کم) پرداخت و ایده جدیدی را در رویکرد AURA توضیح داد. شائو و جین[8] (۲۰۲۰)، از روش مدل‌سازی پویایی سیستم‌ها برای ارزیابی تاب‌آوری زنجیره تأمین استفاده کردند و سیستم‌های

1. Dixit
2. Systems Theory
3. Cybernetics
4. Active Usage of Resilience Assets
5. Viable Supply Chain
6. Reconfigurable Supply Chain
7. Low-Certainty-Need Supply Chain
8. Shao & Jin

قیمت، عرضه و تقاضا را به‌عنوان سازوکارهای تاب‌آوری زنجیره تأمین لیتیوم در نظرگرفتند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان دادند که زنجیره تأمین لیتیوم تحت تأثیر حاملان جدید انرژی تاب‌آوری کمتری دارد؛ علاوه بر این، تاب‌آوری زنجیره تأمین لیتیوم در معرض خطر قطع عرضه کوتاه‌مدت خوب است؛ اما در صورت قطع عرضه به‌صورت طولانی‌مدت بدتر است.

بلهادی و همکاران (۲۰۲۱)، بر اساس نظریه تاب‌آوری زنجیره تأمین، بینش‌هایی را در مورد تأثیر شیوع ویروس کرونا بر زنجیره تأمین خودرو و خطوط هوایی ارائه دادند و دو نوع استراتژی پاسخ به اختلال (کوتاه‌مدت و بلندمدت) را با استفاده از ترکیبی از تکنیک‌های کمّی و کیفی در سه مرحله مجزا ارزیابی کردند. در فاز نخست از یک روش ترکیبی متوالی با ادغام شاخص‌های زمان بازیابی (TTR[1]) و تأثیر مالی (FI[2]) برای ارزیابی تاب‌آوری استفاده شد. در فاز دوم، یک نظرسنجی تجربی از ۱۴۵ شرکت برای ارزیابی استراتژی‌های کوتاه‌مدت پاسخ به اختلال صورت گرفت و در مرحله سوم، یکسری مصاحبه‌های نیمه‌ساخت‌یافته‌ای با مدیران زنجیره تأمین صنایع خودروسازی و خطوط هوایی انجام شد تا استراتژی‌های پاسخ بلندمدت به اختلال را درک کنند. نتایج نشان داد که ۱. بهترین استراتژی برای کاهش خطرات مرتبط با کووید-۱۹ در صنعت خودرو، توسعه منابع عرضه محلی و استفاده از فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴/۰ است؛ ۲. صنعت خطوط هوایی برای تداوم کسب‌وکار در دوران پاندمی ویروس کرونا باید با تعریف عملیات خود در فرودگاه‌ها و پروازها آماده باشد؛ ۳. نکته مهم این است که هر دو صنعت دریافتند که تجزیه‌وتحلیل داده‌های بزرگ (BDA[3]) با ارائه اطلاعات در زمان واقعی در مورد فعالیت‌های مختلف زنجیره تأمین، نقش مهمی را برای غلبه بر چالش‌های ناشی از کووید ۱۹ ایفا می‌کند؛ ۴. همکاری بین ذی‌نفعان زنجیره تأمین برای غلبه بر چالش‌های ناشی از ویروس کرونا در استفاده از فناوری‌های دیجیتال موردنیاز است.

جعفرنژاد و همکاران (۱۳۹۵)، شاخص‌های ارزیابی تاب‌آوری تأمین‌کنندگان در «گروه صنعتی اورند» را شناسایی کرده و به با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بهترین ـ بدترین آن‌ها را اولویت‌بندی کردند. نتایج نشان داد که شاخص‌های چابکی، افزونگی و مشاهده‌پذیری به‌ترتیب به‌عنوان مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی تاب‌آوری تأمین‌کنندگان «گروه صنعتی اورند» شناخته شدند. روانستان و همکاران (۱۳۹۶)، استراتژی‌های تاب‌آوری زنجیره تأمین در «شرکت ایران‌خودرو» را با استفاده از روش FMEA و FAAO فازی تعیین کردند و به وزن‌دهی استراتژی‌ها با استفاده از روش DANP فازی پرداختند.

1. Time To Recover
2. Financial Impact
3. Big Data Analysis

براست و تلر[1] (۲۰۱۷)، تاب‌آوری را با استفاده از رویکرد توانمندی‌های پویا، بر اساس دیدگاه مبتنی بر منابع شرکت‌ها، بررسی کرده و از نظرسنجی از ۱۷۱ مدیر برای آزمایش یک مدل مفهومی استفاده کردند که رابطه بین توانمندی‌های زنجیره تأمین و تاب‌آوری و همچنین نقش تعدیل‌کننده ریسک‌های زنجیره تأمین را پیشنهاد می‌کند. مدل‌سازی معادلات ساختاری مبتنی بر واریانس نشان می‌دهد که تنها یکپارچگی محکم‌تر بین سطوح زنجیره و افزایش انعطاف‌پذیری منجر به تاب‌آوری بیشتر می‌شود؛ همچنین درک ریسک تأمین‌کننده به افزایش انگیزه مدیران زنجیره تأمین برای افزایش توانمندی‌های یکپارچه‌سازی و درنتیجه دستیابی به تاب‌آوری بالاتر کمک می‌کند. جبارزاده و همکاران (۲۰۱۷)، یک روش ترکیبی برای طراحی یک شبکه تأمین پایدار که در مواجهه با اختلالات تصادفی به‌صورت تاب‌آور عمل می‌کند، ارائه کردند. آن‌ها برای کمّی‌سازی و ارزیابی عملکرد پایداری تأمین‌کنندگان، یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه تصادفی که از روش خوشه‌بندی C-Means فازی استفاده می‌کند، ارائه دادند. مدل پیشنهادی آن‌ها تصمیمات مربوط به برون‌سپاری و استراتژی‌های تاب‌آوری را تعیین می‌کند که هزینه کل موردانتظار را به حداقل رسانده و عملکرد کلی پایداری را در اختلالات به حداکثر می‌رساند. لی[2] و همکاران (۲۰۱۸)، ارزش تسهیم اطلاعات در یک زنجیره تأمین سه‌لایه تعمیم‌یافته را بررسی کردند. مدل زنجیره تأمین در یک نرم‌افزار سیستم دینامیک ساخته شده و سه قانون تصمیم‌گیری بر اساس سطوح مختلف اشتراک اطلاعات توسعه داده شده است و عملکرد سه خط‌مشی سفارش با شوک اعمال‌شده مقایسه می‌شود و نتایج آزمایش‌ها ارزش به‌اشتراک‌گذاری اطلاعات در زنجیره تأمین را در زمانی که شوک وجود دارد، اثبات می‌کند.

1. Brusset & Teller
2. Liu

جدول ۱. پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینه تاب‌آوری زنجیره تأمین

پژوهشگر/ سال	رویکرد مدل‌سازی	نوع مدل	فرایند موردبررسی (بر اساس مدل SCOR)	محرک کلیدی تاب‌آوری
سنی و همکاران، (۲۰۱۴)	مدل‌سازی ساختاری ـ تفسیری	قطعی	منبع	چابکی، همکاری، تسهیم اطلاعات، پایداری، اعتماد، مشاهده‌پذیری، فرهنگ مدیریت ریسک،
لی و همکاران، (۲۰۱۸)	مدل‌سازی ساختاری ـ تفسیری	قطعی	منبع	چابکی و یکپارچگی
براست و تلر، (۲۰۱۷)	مدل‌سازی ساختاری ـ تفسیری	قطعی	منبع	انعطاف‌پذیری و یکپارچگی
جبارزاده و همکاران، (۲۰۱۷)	بهینه‌سازی دوهدفه تصادفی	احتمالی	منبع و ساخت	تأمین‌کننده پشتیبان ظرفیت تولید مازاد
حسینی و همکاران، (۲۰۲۰)	رویکرد شبکه بیزی	احتمالی	منبع و ساخت	آسیب‌پذیری و قابلیت بازیابی
ایوانو (۲۰۲۱)	رویکرد AURA	احتمالی	ساخت	پایداری و بازسازی
ترنکویست و واگرین، (۲۰۱۳)	برنامه‌ریزی تصادفی	احتمالی	تحویل	ظرفیت مازاد
ایوانو، (۲۰۱۷)	شبیه‌سازی	احتمالی	منبع	افزونگی
کمال احمدی و ملت‌پرست، (۲۰۱۶)	برنامه‌ریزی تصادفی	احتمالی	منبع	انعطاف‌پذیری و ظرفیت مازاد
خلیلی و همکاران، (۲۰۱۶)	برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای دو هدفه	احتمالی	ساخت	ذخیره احتیاطی
پژوهش حاضر	شبیه‌سازی گسسته پیشامد	احتمالی	منبع، ساخت، تحویل	افزونگی

با توجه به جدول ۱، در پژوهش‌های مرتبط پیشین، پژوهشی که به تحلیل تاب‌آوری زنجیره تأمین با استفاده از روش شبیه‌سازی گسسته پیشامد و مدل‌سازی فرایندهای منبع، ساخت و تحویل پرداخته باشد، صورت نگرفته است؛ بنابراین در پژوهش حاضر به این موضوع پرداخته می‌شود. پژوهشگران برای بررسی تاب‌آوری زنجیره تأمین از روش‌های متعددی استفاده کرده‌اند و بیشتر پژوهش‌های صورت‌گرفته در این زمینه به بررسی هر کدام از فرایندهای مدل مرجع عملیاتی به‌طور جداگانه یا دوبه‌دو پرداخته‌اند و در تعداد اندکی از پژوهش‌ها به بررسی چندین فرایند مدل مرجع عملیاتی به‌طور هم‌زمان پرداخته شده که در پژوهش حاضر به بررسی فرایندهای منبع، ساخت و تحویل به‌طور هم‌زمان پرداخته شده است. علاوه بر این در پژوهش

حاضر از رویکرد شبیه‌سازی استفاده شده است که این رویکرد به پژوهشگران این امکان را می‌دهد که عملکرد سیستم‌ها را تحت شرایط مختلف مقایسه کنند و به پیش‌بینی و تصمیم‌گیری و انتخاب بهترین راه‌حل بپردازند. این رویکرد همچنین باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌شود و در شرایط عدم‌قطعیت و پیچیدگی بالا مفید است. با مرور پژوهش‌های پیشین، پژوهشی که به تحلیل چندین نوع مختلف از اختلالات زنجیره تأمین به‌طور هم‌زمان و بررسی استراتژی افزونگی برای پاسخ به اختلالات با استفاده از شبیه‌سازی گسسته پیشامد پرداخته باشد، یافت نشد؛ ازاین‌رو در پژوهش حاضر به این موارد پرداخته شده است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر نتایج کاربردی، از منظر هدف تحلیلی و از نظر فرایند، کمّی است. ابزار مورداستفاده در این پژوهش، شبیه‌سازی است و به ایجاد مدل شبیه‌سازی گسسته پیشامد[1] پرداخته شده است. برای انجام شبیه‌سازی از داده‌های واقعی «کارخانه سنگبری آسمان سنگ» استفاده شده است.

اجزای اصلی یک زنجیره تأمین[2] شامل تأمین‌کننده[3]، تولیدکننده[4]، توزیع‌کننده[5]، انبار[6] و خرده‌فروش[7] است. در این پژوهش، اختلال در یک کارخانه سنگبری (سطح تولیدکننده) با استفاده از نسخه ۱۴ نرم‌افزار ارنا شبیه‌سازی شده و از مدل مرجع عملیاتی[8] برای توصیف فرایندها استفاده شده است. مدت‌زمان اجرای شبیه‌سازی یک سال و تعداد دفعات اجرا ۱۰۰ بار است.

شبیه‌سازی. شبیه‌سازی، مجموعه وسیعی از روش‌ها و برنامه‌ها برای تقلید رفتار سیستم‌های واقعی در رایانه با استفاده از نرم‌افزار مناسب است. شبیه‌سازی رایانه‌ای به روش‌هایی برای مطالعه گسترده مدل‌های متنوعی از سیستم‌های واقعی، با استفاده از ارزیابی‌های عددی که توسط نرم‌افزار برای کپی‌برداری از عملیات و خصوصیات سیستم در طی زمان صورت می‌گیرد، اشاره دارد [۲۷].

مدل مرجع عملیاتی. مدل مرجع عملیاتی، یک ابزار مدیریتی و چارچوبی برای توصیف فرایندهای زنجیره تأمین و برقراری ارتباط میان اجزای آن است که برای ارزیابی عملکرد زنجیره

1. Discrete Event Simulation (DES)
2. supply chain
3. supplier
4. Manufacturer
5. Distributer
6. Warehouse
7. Retailer
8. SCOR (Supply Chain Operation Reference)

تأمین نیز مورداستفاده قرار می‌گیرد و مبنایی برای چگونگی بهبود این فرایندها فراهم می‌کند و توسط انجمن زنجیره تأمین توسعه داده شده است. این مدل دارای پنج فرایند (برنامه[1]، منبع[2]، ساخت[3]، تحویل[4] و بازگشت[5]) است که از تأمین‌کننده تا مشتری را دربرمی‌گیرد:

برنامه: فرایند برنامه شامل برنامه‌ریزی و ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضا، تعیین قوانین تجاری برای بهبود و اندازه‌گیری کارایی زنجیره تأمین از طریق متعادل‌کردن منابع با الزامات و ایجاد ارتباط در طول زنجیره است که برنامه زنجیره تأمین را با برنامه مالی شرکت هماهنگ می‌کند.

منبع: فرایند منبع به توصیف منابع زیرساختی و اکتساب مواد اولیه می‌پردازد و نحوه مدیریت موجودی، شبکه تأمین‌کننده، قراردادهای تأمین‌کننده و عملکرد تأمین‌کننده را شرح می‌دهد و نحوه رسیدگی به پرداخت‌های تأمین‌کننده و زمان دریافت، تأیید و انتقال محصول را موردبحث قرار می‌دهد.

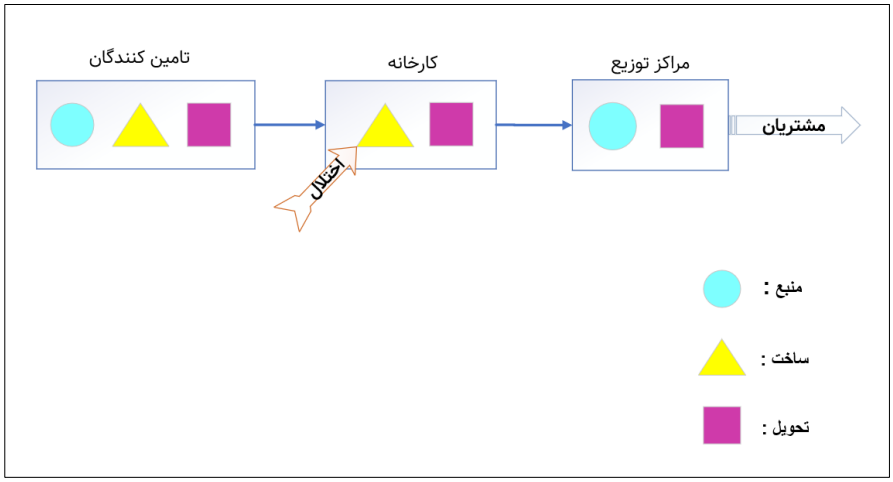
ساخت: فرایند ساخت به توصیف نحوه تولید محصول شامل ساخت بر اساس سفارش، ساخت برای انبارش و مهندسی بر اساس سفارش می‌پردازد و یک محصول را به‌منظور پاسخگویی به تقاضای واقعی یا برنامه‌ریزی‌شده به‌صورت تکمیل‌شده درمی‌آورد.

تحویل: فرایند تحویل شامل مدیریت سفارش‌ها، انبارداری، حمل‌ونقل، دریافت سفارش‌ها از مشتریان و صدور فاکتور، مدیریت موجودی‌های نهایی، دارایی‌ها، چرخه عمر محصول و الزامات واردات و صادرات است.

بازگشت: فرآیند بازگشت به دریافت کالاهای بازگشتی می‌پردازد. بازگشت شامل مدیریت قوانین تجاری، موجودی کالاهای بازگشتی، دارایی‌ها، حمل‌ونقل و الزامات نظارتی است.

در مدل حاضر از سه جز منبع، ساخت و تحویل استفاده شده است که اختلال در فرایند ساخت (تولید) رخ می‌دهد (شکل ۱). در مدل شبیه‌سازی وضع موجود، فرایند اول مدل که مربوط به تولید روزانه سنگ‌ها است، نشان‌دهنده فرایند ساخت مدل مرجع عملیاتی و فرایند دوم که مربوط به صدور، مدیریت و پاسخگویی به سفارش‌ها است، فرایندهای منبع و تحویل مدل مرجع عملیاتی را نشان می‌دهد (شکل‌های ۳ و ۷).

1. Plan
2. Source
3. Make
4. Deliver
5. Return



شکل ۱. مدل مفهومی زنجیره تأمین بر اساس مدل SCOR

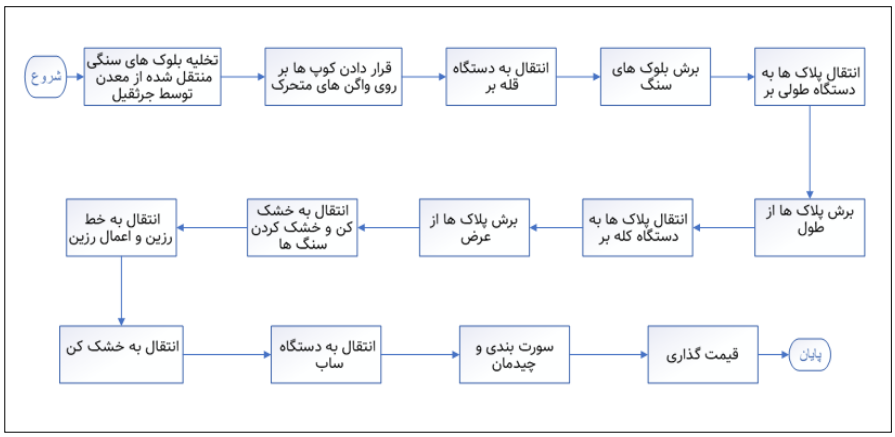
جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات. داده‌های موردنیاز برای انجام شبیه‌سازی کارخانه، داده‌های واقعی مربوط به میزان و تعداد سفارش‌های روزانه، میزان تولید روزانه، اطلاعات هزینه‌ای، مدت‌زمان اختلال، فواصل زمانی بین اختلالات مربوط به «کارخانه سنگبری آسمان» هستند. برای به‌دست‌آوردن توابع توزیع از ابزار Input Analyzer استفاده شده است.

زنجیره تأمین سنگ ساختمانی. زنجیره تأمین سنگ‌های ساختمانی شامل تعدادی تأمین‌کننده (معادن سنگ)، تولیدکننده (کارخانه‌های سنگبری)، مراکز توزیع (عمده‌فروشان و خرده‌فروشان) و مشتریان نهایی است. در این زنجیره، ابتدا بلوک‌های بزرگ سنگی در ابعاد مختلف از معادن استخراج و توسط کامیون‌های حمل سنگ به کارخانه سنگبری انتقال داده می‌شود. پس از اتمام فرایند تولید در کارخانه، سنگ‌ها در ابعاد مختلف توسط عمده‌فروشان و خرده‌فروشان (مراکز توزیع) خریداری می‌شوند و از طریق آن‌ها به دست مصرف‌کنندگان نهایی می‌رسند.

فرایند تولید سنگ در کارخانه. بلوک‌های سنگ خریداری‌شده از معادن به‌عنوان مواد اولیه، توسط جرثقیل‌های ثابت در محل کارخانه تخلیه شده و روی واگن‌های متحرک قرار داده می‌شوند تا به دستگاه قله‌بر انتقال یابند؛ سپس توسط دستگاه قله‌بر، بلوک‌ها به پلاک‌های بزرگ با ضخامت‌های مختلف برش داده می‌شوند و بعد از آن پلاک‌ها به دستگاه طولی‌بر منتقل می‌شوند و دستگاه طولی‌بر دقیقاً بر اساس اندازه‌ی موردنیاز که توسط اپراتورها تنظیم شده است، پلاک را از طول برش می‌زند. پس از آن پلاک برش‌داده‌شده به دستگاه کله‌بر منتقل می‌شود که آن را از عرض برش می‌زند و سایزبندی می‌کند. سنگ‌های برش‌داده‌شده به‌وسیله نوار نقاله به

دستگاه خشک‌کن منتقل می‌شوند تا رطوبت آن‌ها گرفته شود. پس از آن به خط رزین برای پرشدن حفره‌ها منتقل می‌شوند و حفره‌ها توسط رزین پر می‌شوند. مجدداً توسط نوار نقاله به خشک‌کن منتقل می‌شوند تا رزین اعمال‌شده خشک شود و پس از آن سنگ‌های رزین‌شده به دستگاه ساب انتقال می‌یابند؛ سپس به‌وسیله دستگاه ساب، سنگ‌ها ساییده شده و پولیش زده می‌شوند تا سطح سنگ‌ها صیقلی و براق شوند. سنگ‌ها با ابعاد مختلف سورت‌بندی و چیده می‌شوند و در آخر سنگ‌ها قیمت‌گذاری شده و آماده فروش می‌شوند. یادآوری این نکته لازم است که مراحل مربوط به رزین‌زدن سنگ‌ها فقط برای سنگ‌های تراورتن اجرا می‌شود و برای تولید سایر سنگ‌ها نیاز به انجام این مراحل نیست (شکل ۲).

اختلالات می‌توانند به اشکال مختلفی در هر یک از اجزای زنجیره تأمین ظاهر شوند. در پژوهش حاضر، اختلالات شامل خرابی تجهیزات و دستگاه‌ها و بی‌کیفیت‌بودن مواد اولیه که تأثیر منفی بسزایی بر عملکرد کل سیستم دارد، بررسی می‌شود.



شکل ۲. نمودار جریان کار تولید سنگ در کارخانه سنگبری

مدل شبیه‌سازی. مدل‌های شبیه‌سازی موجود در این پژوهش (پایه و تعمیم‌یافته) دارای سه فرایند هستند که هر یک از فرایندها دارای نقاط شروع و پایان بوده و اولین، دومین و سومین فرایند به‌ترتیب فرایندهای «تولید»، «سفارش» و «اختلال» نام دارند که در ادامه پژوهش به تفسیر هر یک از فرایندها و مدل‌های شبیه‌سازی به‌طور مفصل پرداخته شده است.

نشانه‌ها و فرمول‌ها

پارامترها

bc (Backorder Cost): هزینه پس‌افت به ازای یک مترمربع سنگ

OC (Order Cost): هزینه سفارش‌دهی به ازای هر مترمربع سن

RC (Repair Cost): هزینه تعمیرات به ازای هر ساعت اختلال

C_h: هزینه نگهداری موجودی هر مترمربع سنگ

Pe (Penalty): هزینه ناشی از خالی‌ماندن ظرفیت تولید

متغیرها

P (Production): میزان تولید

D (Demand): میزان تقاضا

IL (Inventory Level): سطح موجودی

B (Backorders): میزان تقاضاهای پس‌افت‌شده

Q: متراژ سفارش به کارخانه همکار

t: مدت‌زمان اختلال

UC (Unused Capacity): ظرفیت استفاده‌نشده تولید

TBC (Total Backorder Cost): هزینه تقاضای پس‌افت شده کل

TOC (Total Order Cost): هزینه سفارش‌دهی کل

TIC (Total Inventory Cost): هزینه موجودی کل

TRC (Total Repair Cost): هزینه تعمیرات کل

Total Cost: هزینه کل

فرمول‌ها و روابط

فرمول‌ها و روابط

رابطه (۱)

$$\text{نرخ پاسخگویی} = \frac{\text{تعداد تقاضاهای پاسخ داده شده در یک روز}}{\text{تعداد کل تقاضاهای دریافتی در روز}}$$

رابطه (۲)

$$IL = (IL - D)^{+}$$

رابطه (۳)

$$B = (IL - D)^{-}$$

$$TBC = bc * B$$ رابطه (۴)

$$TOC = OC * Q$$ رابطه (۵)

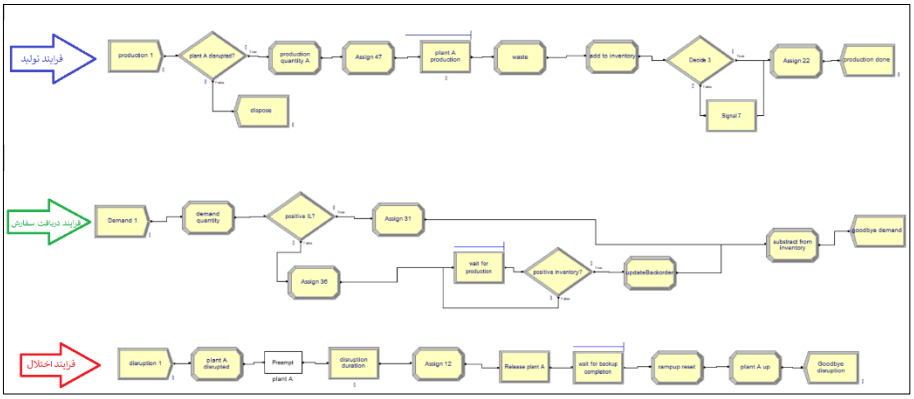
$$TRC = RC * t$$ رابطه (۶)

$$TIC = IL * C_h$$ رابطه (۷)

$$TUC = Pe * UC$$ رابطه (۸)

$$TC = TIC + TBC + TOC + TRC + TUC$$ رابطه (۹)

مدل پایه. زمانی که اختلال در کارخانه رخ نداده باشد، در فرایند تولید مدل، موجودیت تولید در هر روز وارد سیستم می‌شود و به تولید سنگ‌ها می‌پردازد؛ سپس مقدار تولیدشده به موجودی اضافه شده (IL + P) و موجودیت تولید خارج می‌شود. در فرایند سفارش، به‌طور مشابه در هر روز موجودیت تقاضا ایجادشده و اگر به میزان سفارش دریافت‌شده، موجودی دردسترس باشد ($D \leq IL$) و همچنین تقاضایی در صف وجود نداشته باشد، به میزان سفارش از موجودی کسر می‌شود (IL − D) و موجودیت تقاضا خارج می‌شود؛ در غیر این صورت به تقاضای پس‌افت‌شده اضافه می‌شود (B + D) و موجودیت تقاضا برای تولید و تکمیل‌شدن موجودی منتظر می‌ماند و پس از برآورده‌شدن تقاضا از سیستم خارج می‌شود. میزان موجودی دردسترس و میزان تقاضای پس‌افت‌شده از روابط ۲ و ۳، به‌دست می‌آیند. در فرایند اختلال، زمانی که اختلال رخ می‌دهد، یکسری تغییرات در سیستم به‌وجود می‌آورد و برای نشان‌دادن وجود اختلال در کارخانه، به تعریف یک متغیر و همچنین یک بلوک که نمایانگر توقف فرایند تولید کارخانه می‌باشد، نیاز است؛ به‌عبارت‌دیگر با خرابی دستگاه قله‌بر، فرایند تولید متوقف شده و سفارش‌هایی که دریافت می‌شوند، بی‌پاسخ می‌مانند و به تقاضای پس‌افت‌شده اضافه می‌شوند. زمانی که دستگاه تعمیر شد، فرایند تولید مجدداً راه‌اندازی شده و تقاضاها پاسخ داده می‌شوند.



شکل ۳. مدل شبیه‌سازی وضع موجود (مدل پایه) در نرم‌افزار ارنا

جدول ۲. توابع توزیع استفاده‌شده در مدل شبیه‌سازی پایه

مؤلفه	نوع توزیع	تابع توزیع	واحد
تعداد سفارش‌های دریافتی در هر روز	گسسته	DISC (0.2, 1, 0.4, 2, 0.8, 3, 1, 4)	عدد
میزان هر سفارش	نرمال	NORM (227,60)	مترمربع
میزان تولید روزانه	نرمال	NORM (690,159)	مترمربع
مدت‌زمان اختلال	یکنواخت	UNIF (2,10)	روز
مدت‌زمان تولید	پیوسته	CONSTANT (10)	ساعت

اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی پایه. برای تأیید اعتبار مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار ارنا، نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با اطلاعات واقعی موجود در کارخانه موردمطالعه مقایسه شد. از شاخص میانگین قدر مطلق خطا که یکی از معیارهای اندازه‌گیری خطای پیش‌بینی است، استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج دنیای واقعی دارای درصد خطای پایین بودند و درنتیجه اعتبار مدل تأیید شد.

جدول ۳. نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی

شاخص موردبررسی	میانگین قدر مطلق خطا (درصد)
نرخ پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان	۹٪
مجموع هزینه تقاضای پس‌افت‌شده ماهانه	۸٪
مجموع هزینه نگهداری موجودی ماهانه	۹٪
مجموع هزینه تعمیرات ماهانه	۹٪
مجموع هزینه کل ماهانه	۹٪

تدوین سناریوها: پس از اجرای مدل شبیه‌سازی پایه و اعتبارسنجی آن و به‌منظور مدیریت اختلال و ایجاد تاب‌آوری در سیستم، سناریوهای زیر تعریف شده‌اند که به‌ازای هر یک از سناریوها یکسری تغییرات در مدل شبیه‌سازی پایه ایجاد شده است. پس از اجرای هر یک از سناریوها، نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل پایه و مدل‌های شبیه‌سازی هر یک از سناریوها تحلیل و مقایسه خواهد شد. توابع توزیع مورداستفاده در تدوین سناریوها در جدول‌های ۴ و ،۵ ارائه شده است.

جدول ۴. توابع توزیع مورداستفاده در تدوین هر یک از سناریوها

شماره سناریو	مؤلفه	نوع توزیع	تابع توزیع	واحد
۱	میزان تولید روزانه	نرمال	NORM (160,20)	مترمربع
	مدت‌زمان انتظار	یکنواخت	UNIF (3,12)	ساعت
۲	میزان تولید روزانه	نرمال	NORM (350,40)	مترمربع
	مدت‌زمان انتظار	یکنواخت	UNIF (3,12)	ساعت
۳	میزان تولید روزانه خط پشتیبان	نرمال	NORM (350,40)	مترمربع
	میزان تولید روزانه خط اصلی	نرمال	NORM (690,159)	مترمربع

جدول ۵. توابع توزیع استفاده‌شده در تدوین سناریوها که بین تمام سناریوها مشترک هستند.

مؤلفه	نوع توزیع	تابع توزیع	واحد
تعداد سفارش‌های دریافتی در هر روز	گسسته	DISC (0.2, 1, 0.4, 2, 0.8, 3, 1, 4)	عدد
میزان هر سفارش	نرمال	NORM (227,60)	مترمربع
مدت‌زمان اختلال	یکنواخت	UNIF (2,10)	روز
مدت‌زمان تولید	پیوسته	CONSTANT (10)	ساعت

سناریوی ۱. استفاده از نصف ظرفیت تولید کارخانه همکار. به‌منظور حفظ رضایتمندی مشتری، با یکی از کارخانه‌های همکاران قرارداد بسته می‌شود تا در دوران اختلال بتوان از نصف ظرفیت تولیدشان برای پاسخگویی به تقاضای مشتریان استفاده کرد که این امر باعث ایجاد یکسری تغییرات در فرایند تولید می‌شود. میزان تولید با نصف ظرفیت از تابع توزیع نرمال پیروی می‌کند؛ همچنین باید مدت‌زمانی را منتظر ماند تا اگر قله‌بر مشغول به‌کار است، آزاد شود و بتوان بلوک‌های سنگی را برش زد که مدت‌زمان انتظار از تابع توزیع یکنواخت پیروی می‌کند. در این

حالت باید هزینه انتقال بلوک‌ها به کارخانه همکار و هزینه برش سنگ‌ها و فرایند تولید اعمال شود و با عنوان «هزینه سفارش »(رابطه ۵) به هزینه کل اضافه شود که در این صورت هزینه سفارش هر مترمربع سنگ ۴۰.۰۰۰ تومان خواهد بود.

سناریوی ۲. استفاده از تمام ظرفیت تولید کارخانه همکار. در این سناریو با یکی از کارخانه‌های همکاران قرارداد بسته می‌شود تا در دوران اختلال از تمام ظرفیت تولیدی آن کارخانه برای پاسخگویی به سفارش‌های مشتریان استفاده شود. میزان تولید از تابع توزیع نرمال تبعیت می‌کند. مدت‌زمانی را باید منتظر ماند تا کارخانه همکار به تقاضاهای مشتریان خود پاسخ دهد و پس از آن به تولید سنگ‌های موردنظر بپردازد که مدت‌زمان انتظار از تابع توزیع یکنواخت پیروی می‌کند. در این حالت نیز باید هزینه انتقال بلوک‌ها به کارخانه همکار و هزینه برش سنگ‌ها و فرایند تولید اعمال شده و با عنوان «هزینه سفارش» به هزینه کل اضافه شود که در این صورت هزینه سفارش به‌ازای هر مترمربع سنگ تولیدشده، ۶۰.۰۰۰ تومان خواهد بود.

سناریوی ۳. ایجاد یک خط تولید جدید به‌عنوان خط تولید پشتیبان در کارخانه (افزونگی)

افزونگی. افزونگی که به‌عنوان ظرفیت اضافی و سیستم‌های پشتیبان برای حفظ عملکرد اصلی سیستم در صورت بروز اختلالات بیان می‌شود، تضمین می‌کند که یک شرکت به دنبال اتفاقات پیش‌بینی‌نشده، کمتر دچار فروپاشی شود. یکی از استراتژی‌های مدیریت اختلال در زنجیره تأمین ایجاد افزونگی در ساختار شبکه زنجیره تأمین است؛ برای مثال، داشتن چندین خط تولید در یک کارخانه یا داشتن چندین کارخانه که باعث می‌شود بتوان در هنگام اختلال از خط تولید یا کارخانه پشتیبان برای تولید و پاسخگویی به تقاضای مشتریان پاسخ داد. این افزونگی‌ها به‌منظور کمک به زنجیره تأمین برای جلوگیری از اتلاف وقت، تلاش و پول به‌دلیل وجود اختلال با ارائه قابلیت‌هایی برای پاسخگویی به تغییرات ناگهانی طراحی شده‌اند [۴۰]. طبق نظر تان و همکاران (۲۰۲۰)، استراتژی افزونگی، پاسخ مناسبی به اختلالاتی مانند خرابی تجهیزات و کیفیت پایین مواد اولیه است که ممکن است در فرایند تولید وقفه ایجاد کنند؛ ازاین‌رو در پژوهش حاضر از استراتژی افزونگی در قالب سناریوی ۳ برای پاسخ به اختلالات استفاده شده است و به‌منظور پاسخگویی سریع‌تر به تقاضاهای مشتریان و جلب رضایت آن‌ها و با توجه به مذاکرات انجام‌شده با مدیریت کارخانه، امکان تأسیس یک خط تولید جدید به‌عنوان خط تولید پشتیبان در کارخانه وجود دارد تا در مواقع اختلال، فرایند تولید کارخانه متوقف نشود و سفارش‌های مشتریان پاسخ داده شوند. در این حالت مدت‌زمان انتظار برای شروع فرایند تولید حذف می‌شود، زیرا خط تولید

پشتیبان همیشه آماده است و دستگاه‌ها و تجهیزات این خط همواره به دور از هرگونه خرابی، آماده تولید هستند؛ زیرا از این خط تولید فقط در مواقعی که خط تولید اصلی دچار اختلال شده باشد، استفاده می‌شود و در مواقعی که خط تولید اصلی مشغول به کار باشد، به‌طور مداوم تجهیزات خط پشتیبان بررسی می‌شوند تا در صورت لزوم عملیات تعمیرات و نگهداری بر روی آن‌ها اعمال شود. در صورت اجرای این سناریو، نیاز به پرداخت هزینه حمل بلوک‌های سنگی به کارخانه همکار و همچنین پرداخت هزینه سفارش برای برش بلوک‌ها و انجام ادامه فرایند تولید توسط کارخانه همکار نیست؛ از طرفی هزینه ایجاد خط تولید پشتیبان به هزینه‌ها اضافه می‌شود.

سناریوی ۴. ۵۰ درصد برون‌سپاری و ۵۰ درصد استفاده از ظرفیت اضافه‌شده داخلی کارخانه. در این سناریو، در هنگام وقوع اختلالات در سیستم در ۵۰ درصد مواقع از ظرفیت تولید کارخانه همکاران برای پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان استفاده شده و در ۵۰ درصد مواقع از خط تولید پشتیبان داخل کارخانه برای پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان استفاده می‌شود.

سناریوی ۵. ۹۰ درصد برون‌سپاری و ۱۰ درصد استفاده از ظرفیت اضافه‌شده داخلی کارخانه. در این سناریو، در هنگام وقوع اختلالات در سیستم در ۹۰ درصد مواقع از ظرفیت تولید کارخانه همکاران برای پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان استفاده شده و در ۱۰ درصد مواقع از خط تولید پشتیبان داخل کارخانه برای پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان استفاده می‌شود.

سناریوی ۶. ۱۰ درصد برون‌سپاری و ۹۰ درصد استفاده از ظرفیت اضافه‌شده داخلی کارخانه. در این سناریو، در هنگام وقوع اختلالات در سیستم در ۱۰ درصد مواقع از ظرفیت تولید کارخانه همکاران برای پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان استفاده شده و در ۹۰ درصد مواقع از خط تولید پشتیبان داخل کارخانه برای پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان استفاده می‌شود.

سناریوی ۷. ۸۰ درصد برون‌سپاری و ۲۰ درصد استفاده از ظرفیت اضافه‌شده داخلی کارخانه. در این سناریو، در هنگام وقوع اختلالات در سیستم در ۸۰ درصد مواقع از ظرفیت تولید کارخانه همکاران برای پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان استفاده شده و در ۲۰ درصد مواقع از خط تولید پشتیبان داخل کارخانه برای پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان استفاده می‌شود.

سناریوی ۸. ۲۰ درصد برون‌سپاری و ۸۰ درصد استفاده از ظرفیت اضافه‌شده داخلی کارخانه. در این سناریو، در هنگام وقوع اختلالات در سیستم در ۲۰ درصد مواقع از ظرفیت تولید

کارخانه همکاران برای پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان استفاده شده و در ۸۰ درصد مواقع از خط تولید پشتیبان داخل کارخانه برای پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان استفاده می‌شود.

سناریوی ۹. ۶۰ درصد برون‌سپاری و ۴۰ درصد استفاده از ظرفیت اضافه‌شده داخلی کارخانه. در این سناریو، در هنگام وقوع اختلالات در سیستم در ۶۰ درصد مواقع از ظرفیت تولید کارخانه همکاران بری پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان استفاده شده و در ۴۰ درصد مواقع از خط تولید پشتیبان داخل کارخانه برای پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان استفاده می‌شود.

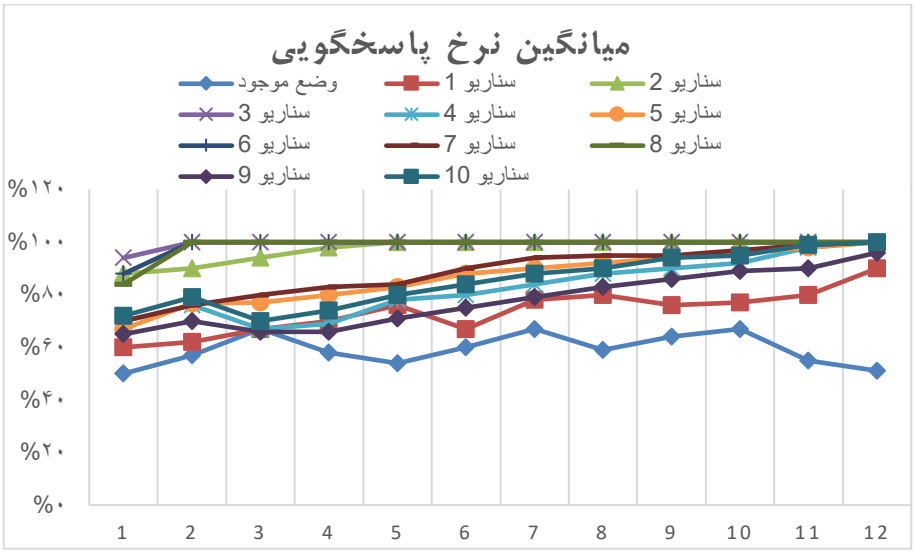
سناریوی ۱۰. ۴۰ درصد برون‌سپاری و ۶۰ درصد استفاده از ظرفیت اضافه‌شده داخلی کارخانه. در این سناریو، در هنگام وقوع اختلالات در سیستم در ۴۰ درصد مواقع از ظرفیت تولید کارخانه همکاران برای پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان استفاده شده و در ۶۰ درصد مواقع از خط تولید پشتیبان داخل کارخانه برای پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان استفاده می‌شود.

۴. تحلیل داده و یافته‌های پژوهش

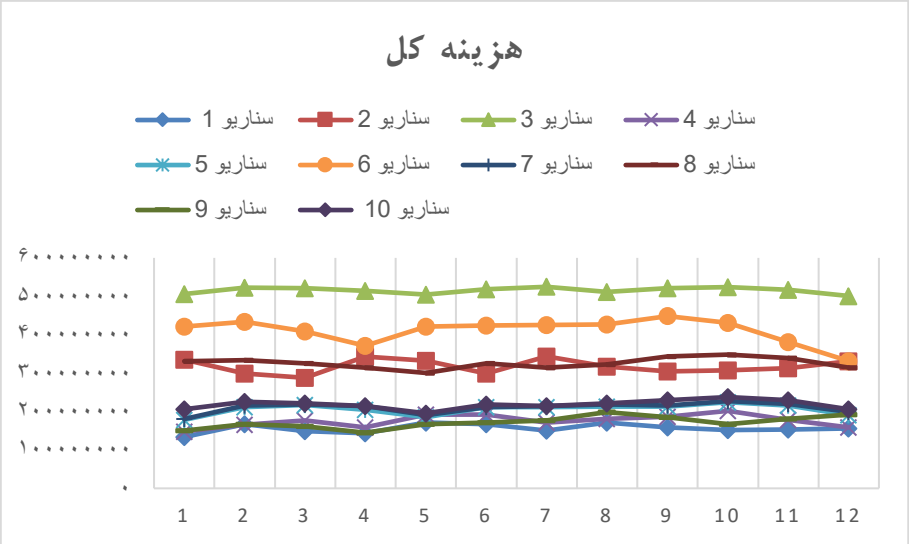
بررسی نتایج شبیه‌سازی. در پژوهش حاضر برای ارزیابی تاب‌آوری سیستم از معیارهای نرخ پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان، هزینه تقاضای پس‌افت، هزینه ناشی از خالی‌ماندن ظرفیت تولید و هزینه کل استفاده شده است؛ بدین منظور نرخ پاسخگویی[1] به سفارش‌ها، هزینه پس‌افت[2]، هزینه ناشی از خالی‌ماندن ظرفیت تولید و هزینه کل[3] در هر ماه محاسبه شده‌اند. نرخ پاسخگویی به تقاضاها به عوامل مختلفی از جمله مدت‌زمان اختلال[4]، میزان سفارش[5]، تعداد سفارش در آن دوره، میزان تولید[6] و موجودی[7] و تعداد تقاضاهای پس‌افت‌شده[8] بستگی دارد که برای محاسبه نرخ پاسخگویی از رابطه ۱، استفاده می‌شود. در وضع موجود، با توجه به اینکه معمولاً کارخانه در هر ماه دچار اختلال می‌شود و بنا بر میزان و شدت اختلال، چند روزی خط تولید متوقف می‌شود و تعداد تقاضاهای پس‌افت‌شده افزایش می‌یابند، بیشترین درصد نرخ پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان در وضع موجود نزدیک به ۶۷ درصد است و این نرخ دارای نوسان است. در سناریوی نخست، با وجود استفاده از نیمی از ظرفیت کارخانه همکار، این نرخ افزایش چندان زیادی نداشته و حداکثر نرخ پاسخگویی نزدیک به ۸۸ درصد است. در سناریوی

1. Fill Rate
2. Backorder Cost
3. Total Cost
4. Disruption Duration
5. Order Quantity
6. Production Quantity
7. Inventory
8. Backorders

دوم نرخ پاسخگویی به تقاضاها به‌طور صعودی افزایش داشته و پس از چهار ماه به ۱۰۰ درصد رسیده است و درواقع با کمک‌گرفتن از کارخانه همکار، به تمام تقاضاهای مشتریان پاسخ داده شده و تعداد تقاضاهای پس‌افت شده به صفر رسیده است. در سناریوی سوم نرخ پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان به میزان زیادی افزایش داشته است و در ماه اول حدوداً ۹۳ درصد و از ماه دوم به بعد نرخ پاسخگویی ۱۰۰ درصد شده است. درواقع در سناریوی سوم به‌دلیل آمادگی کامل خط تولید پشتیبان، مدت‌زمان انتظار برای شروع تولید وجود ندارد و به‌محض وقوع اختلال، خط پشتیبان، فرایند تولید را شروع می‌کند، نرخ پاسخگویی در این سناریو زودتر از نرخ پاسخگویی در سناریو دوم به ۱۰۰ درصد رسیده است. درواقع از طریق اضافه‌کردن یک خط تولید پشتیبان، کارخانه به تاب‌آوری دست خواهد یافت (شکل ۴).



شکل ۴. نمودار نرخ پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان در وضع موجود و سناریوها



شکل ۵. مقایسه هزینه کل در یک سال به‌ازای سناریوهای مختلف

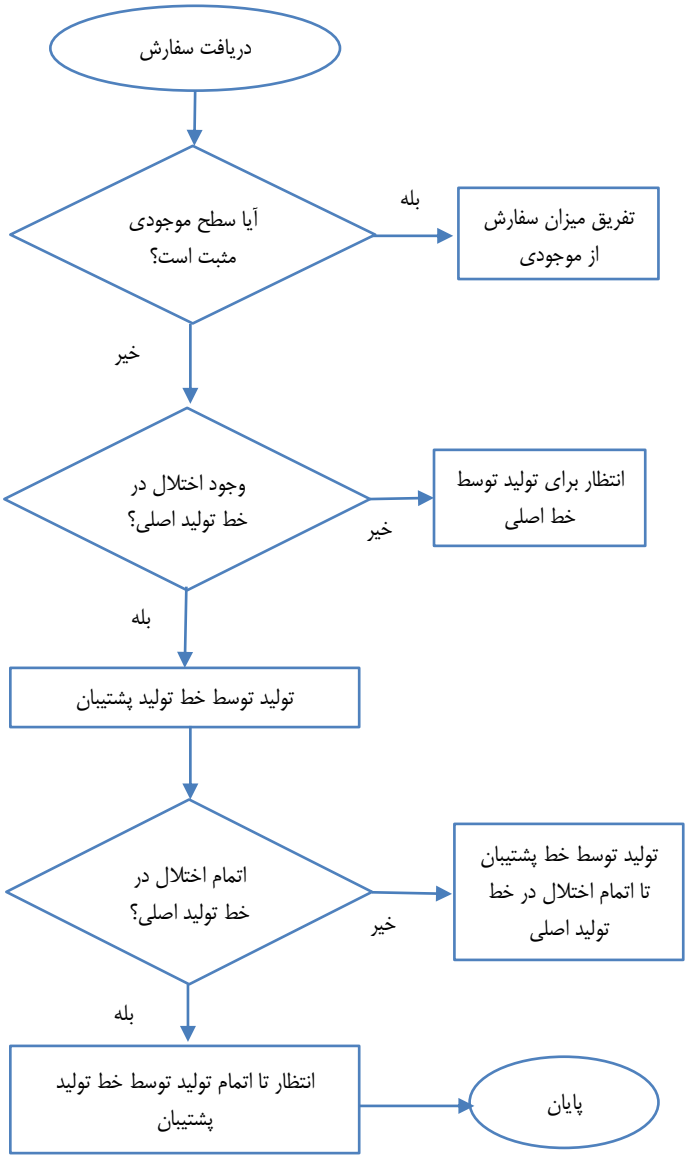
در این موردکاوی، هزینه کل از مجموع هزینه تقاضای پس‌افت‌شده، هزینه سفارش[1] به کارخانه همکار، هزینه نگهداری موجودی[2]، هزینه ناشی از خالی‌ماندن ظرفیت تولید و هزینه ناشی از اختلالات حاصل می‌شود که این هزینه‌ها با استفاده از روابط ۴ تا ۹، محاسبه می‌شوند.

با توجه به نمودار نرخ پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان (شکل ۴)، سناریوهای شماره ۳، ۲، ۶ و ۸ دارای بیشترین نرخ پاسخگویی هستند و به‌عنوان سناریوهای برتر انتخاب می‌شوند. از طرف دیگر با توجه به نمودار هزینه کل (شکل ۵) سناریوهای ۱، ۹ و ۴ دارای کمترین هزینه کل هستند و درنتیجه به‌عنوان سناریوهای برتر انتخاب می‌شوند. با افزایش نرخ پاسخگویی، رضایتمندی مشتریان افزایش یافته و درنتیجه سازمان به مزیت رقابتی دست می‌یابد. انتخاب سناریوی بهینه و اجرای آن به عوامل مختلفی مانند اهداف سازمان‌ها و منابع دردسترس آن‌ها بستگی دارد؛ برای مثال، اگر هدف سازمانی دستیابی به رضایت بالای مشتریان باشد، سناریوهای ۳، ۲، ۶ و ۸ برای اجرا پیشنهاد می‌شود، اما اگر هدف سازمان کاهش هزینه‌ها باشد، سناریوهای ۱، ۴ و ۹ برای اجرا پیشنهاد می‌شود. با توجه به اینکه نرخ پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان در سناریوی سوم از سایر سناریوها بیشتر است و با توجه به شکل ۴، در صورت اجرای سناریوی سوم نرخ پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان تنها پس از یک دوره به ۱۰۰ درصد می‌رسد و درنتیجه همین مورد باعث افزایش رضایتمندی مشتریان می‌شود و نوعی مزیت رقابتی برای سازمان به‌حساب می‌آید. طبق تحلیل هزینه ـ منفعت انجام‌شده و صحبت‌های صورت‌گرفته با

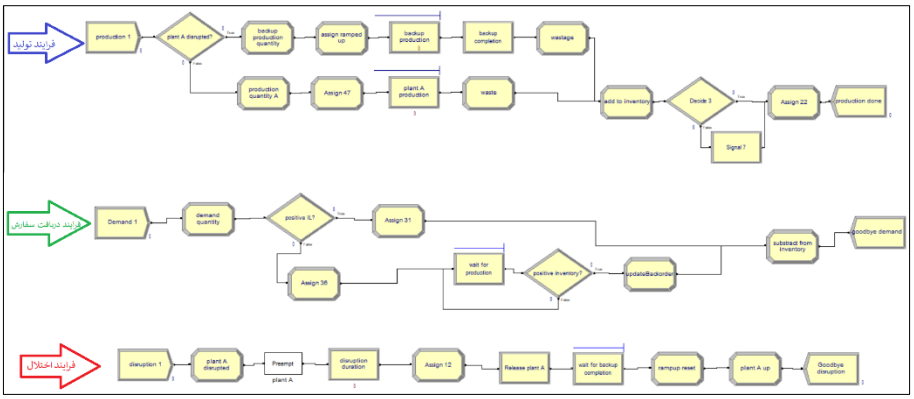
1. Order Cost
2. Holding Cost

هیئت‌مدیره کارخانه موردمطالعه، هرچند هزینه کل در سناریوی سوم از هزینه کل سایر سناریوها بیشتر است، اما به‌دلیل اینکه سناریو سوم دارای بالاترین نرخ پاسخگویی است به‌عنوان سناریوی برتر انتخاب می‌شود. در صورت اجرای سناریوی ۳، کارخانه با هزینه راه‌اندازی خط تولید جدید روبه‌رو می‌شود که محاسبه هزینه کل برای سناریوی سوم با درنظرگرفتن هزینه راه‌اندازی خط تولید پشتیبان انجام شده است. در صورت اجرای سناریوی سوم مدت‌زمان انتظار تا آزادشدن خط تولید همکار از بین‌می‌رود و در صورت بروز اختلال در خط تولید اصلی، بدون هیچ‌گونه انتظاری تولید توسط خط تولید پشتیبان انجام می‌شود. با اجرای سناریوی سوم کارخانه به تاب‌آوری می‌رسد و حتی در دوران اختلال هم کارخانه به‌راحتی پاسخگوی تمام تقاضاهای مشتریان خواهد بود و دستیابی به سطح بالای رضایت مشتریان که یکی از اهداف مهم هر کسب‌وکاری است، میسر می‌شود.

مدل تعمیم‌یافته. در مدل شبیه‌سازی تعمیم‌یافته که حاصل تأییدشدن سناریوی سوم است، هر سه فرایند تولید، سفارش و اختلال همانند مدل شبیه‌سازی پایه است؛ با این تفاوت که در مدل تعمیم‌یافته، فرایند تولید علاوه بر خط تولید اصلی دارای یک خط تولید پشتیبان نیز است که در هنگام وقوع اختلال و متوقف‌شدن فرایند تولید خط اصلی، عملیات تولید سنگ‌ها توسط خط تولید پشتیبان انجام می‌شود و تقاضاهای مشتریان پاسخ داده می‌شوند. نمودار جریان مدل تعمیم‌یافته در شکل ۶ و مدل شبیه‌سازی گسسته پیشامد تعمیم‌یافته در شکل ۷، ارائه شده‌اند.



شکل ۶. نمودار جریان سناریوی سوم (سناریوی تأییدشده)



شکل ۷. مدل شبیه‌سازی تعمیم‌یافته (سناریوی سوم) در نرم‌افزار ارنا

تحلیل حساسیت. از تحلیل حساسیت برای بررسی تأثیر تغییر متغیرهای مدل شبیه‌سازی شامل فاصله زمانی بین وقوع دو اختلال، مدت‌زمان اختلال، میزان تولید روزانه و متراژ سفارش روزانه بر خروجی‌های مدل‌های شبیه‌سازی (معیارهای عملکرد) شامل میانگین نرخ پاسخگویی، مجموع هزینه تقاضای پس‌افت و هزینه کل استفاده شده است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت هر یک از متغیرها در وضع موجود و وضع بهینه به تفکیک در جدول‌های ۶ تا ۱۴، ارائه شده‌اند.

جدول ۶. نتایج حاصل از تغییرات فاصله زمانی بین دو اختلال بر معیارهای عملکرد در مدل پایه (وضع موجود)

فاصله زمانی بین دو اختلال (روز)	میانگین نرخ پاسخگویی	مجموع هزینه تقاضای پس‌افت (تومان)	هزینه کل (تومان)
۱۰	۱۰٪	۱۸,۲۸۸,۴۷۳,۸۳۱	۲۰,۸۸۹,۴۹۰,۵۵۹
۴۰	۷۵٪	۱,۰۸۵,۱۲۶,۹۴۵	۲,۲۱۸,۰۷۹,۴۰۶
۶۰	۹۴٪	۳۰۵,۳۰۱,۰۸۰	۱,۲۷۱,۴۶۱,۱۴۶
۹۰	۹۴٪	۳۰۵,۳۰۱,۰۸۰	۱,۲۵۸,۰۸۲,۷۷۴
۱۲۰	۹۴٪	۳۰۵,۳۰۱,۰۸۰	۱,۱۱۱,۸۸۲,۵۹۳

جدول ۷. نتایج حاصل از تغییرات مدت‌زمان اختلال بر معیارهای عملکرد در مدل پایه (وضع موجود)

مدت‌زمان اختلال (روز)	میانگین نرخ پاسخگویی	مجموع هزینه تقاضای پس‌افت (تومان)	هزینه کل (تومان)
(۲,۵)	۹۴٪	۵۵۰,۵۶۱,۷۹۳	۱,۴۶۳,۱۱۵,۹۱۲
(۲,۶)	۸۴٪	۷۸۱,۱۶۸,۹۹۵	۱,۵۶۹,۳۶۶,۹۶۳
(۲,۷)	۸۳٪	۳۵۳,۷۸۵,۷۱۹	۱,۲۸۸,۹۶۳,۶۴۷
(۲,۸)	۷۵٪	۴۱۸,۷۲۱,۷۴۷	۱,۲۹۲,۶۹۷,۲۸۵
(۲,۹)	۶۴٪	۱,۰۲۱,۵۴۳,۵۶۸	۱,۷۳۹,۳۵۸,۳۶۸
(۱,۹)	۷۸٪	۴۴۹,۰۱۴,۵۷۸	۱,۳۳۷,۳۵۰,۴۳۴

مدت‌زمان اختلال (روز)	میانگین نرخ پاسخگویی	مجموع هزینه تقاضای پس‌افت (تومان)	هزینه کل (تومان)
(۲،۱۰)	۶۱٪	۱۱,۰۰۹,۴۳۳,۷۸۸	۱۱,۴۶۹,۷۸۷,۴۶۵
(۲،۱۱)	۵۷٪	۱۲,۵۳۹,۹۵۱,۹۸۲	۱۳,۲۵۷,۴۹۳,۳۶۵
(۲،۱۲)	۴۸٪	۱۴,۳۲۹,۲۰۶,۸۸۴	۱۵,۰۴۶,۸۰۳,۸۳۳
(۲،۱۳)	۴۴٪	۱۵,۱۹۸,۶۲۲,۸۴۲	۱۵,۹۱۰,۵۰۹,۰۰۴
(۲،۱۴)	۳۹٪	۱۶,۳۲۸,۷۶۹,۴۴۲	۱۶,۷۶۷,۸۳۴,۲۲۰
(۲،۲۰)	۹٪	۷۶,۶۷۸,۸۴۹,۵۸۸	۷۸,۸۸۴,۸۵۴,۶۲۲

جدول ۸. نتایج حاصل از تغییرات میزان تولید روزانه بر معیارهای عملکرد در مدل پایه (وضع موجود)

میزان تولید روزانه (مترمربع)	میانگین نرخ پاسخگویی	مجموع هزینه تقاضای پس‌افت	هزینه کل (تومان)
(۱۵۹ ,۵۵۰)	۲۵٪	۳۷۷,۵۱۸,۲۳۹	۱,۱۸۵,۲۶۳,۸۷۷
(۱۵۹ ,۶۰۰)	۲۶٪	۵۰۰,۵۳۵,۴۵۴	۱,۲۵۵,۹۸۳,۸۳۸
(۱۵۹ ,۶۵۰)	۳۱٪	۱,۰۲۱,۵۴۳,۵۶۸	۱,۷۳۹,۳۵۸,۳۶۸
(۱۵۹ ,۶۷۰)	۴۱٪	۱,۸۱۱,۳۶۹,۰۰۹	۲,۵۲۰,۱۲۶,۵۱۳
(۱۵۹ ,۶۸۰)	۴۹٪	۲,۷۷۸,۸۱۸,۱۶۶	۳,۴۸۱,۶۹۵,۸۰۰
(۱۵۹ ,۶۸۵)	۵۵٪	۵,۰۷۹,۰۰۵,۷۰۷	۵,۷۷۴,۸۳۹,۱۲۱
(۱۵۹ ,۶۹۰)	۶۴٪	۱۰,۳۹۱,۳۵۹,۳۶۲	۱۱,۰۸۵,۳۰۴,۴۶۶
(۱۵۹ ,۷۰۰)	۸۷٪	۲۴,۲۴۹,۷۶۱,۶۰۳	۲۴,۹۴۳,۵۳۶,۰۲۶
(۱۵۹ ,۷۱۰)	۹۱٪	۳۸,۱۰۶,۶۴۰,۵۵۷	۳۸,۸۰۰,۱۵۸,۵۲۲

جدول ۹. نتایج حاصل از تغییرات متراژ سفارش بر معیارهای عملکرد در مدل پایه (وضع موجود)

متراژ سفارش (مترمربع)	میانگین نرخ پاسخگویی	مجموع هزینه تقاضای پس‌افت	هزینه کل (تومان)
(۲۰۰ ،۶۰)	۷۹٪	۱۷۹,۳۲۴,۳۰۷	۱,۱۵۹,۶۹۳,۸۵۱
(۲۱۰ ،۶۰)	۷۹٪	۲۱۷,۵۹۸,۰۲۹	۱,۲۰۷,۱۳۳,۴۹۸
(۲۲۰ ،۶۰)	۷۷٪	۳۴۱,۶۵۹,۴۷۶	۱,۳۴۳,۷۷۴,۹۳۵
(۲۲۶ ،۶۰)	۶۹٪	۷۲۸,۶۷۶,۲۷۱	۱,۴۵۴,۴۹۰,۱۵۴
(۲۲۷ ،۶۰)	۶۶٪	۱,۰۲۱,۵۴۳,۵۶۸	۱,۷۳۹,۳۵۸,۳۶۸
(۲۲۸ ،۶۰)	۶۳٪	۱,۵۰۶,۲۶۹,۰۲۴	۲,۲۱۸,۰۲۲,۵۵۸
(۲۳۰ ،۶۰)	۶۱٪	۲,۶۶۴,۵۹۶,۵۲۵	۳,۳۶۸,۱۱۵,۳۱۴
(۲۳۵ ،۶۰)	۳۳٪	۶,۳۳۱,۰۴۹,۹۸۹	۷,۰۲۵,۷۸۹,۳۱۶
(۲۵۰ ،۶۰)	۳۱٪	۱۹,۲۵۵,۹۱۶,۴۱۱	۱۹,۹۵۰,۲۱۶,۳۹۵
(۲۷۰ ،۶۰)	۴٪	۳۶,۵۹۷,۷۸۳,۳۸۸	۳۷,۲۹۱,۹۹۰,۱۴۴

جدول ۱۰. نتایج حاصل از تغییرات فاصله زمانی بین دو اختلال بر معیارهای عملکرد در مدل تعمیم‌یافته (وضع بهینه)

فاصله زمانی بین دو اختلال (روز)	میانگین نرخ پاسخگویی	مجموع هزینه تقاضای پس‌افت (تومان)	هزینه کل (تومان)
۱۰	۶٪	۲۸,۸۴۶,۳۴۳,۱۹۰	۳۱,۳۲۷,۶۸۱,۳۶۴
۴۰	۹۶٪	۹۶,۹۵۴,۲۴۰	۳,۱۷۰,۳۲۷,۳۶۳
۶۰	۹۶٪	۹۶,۹۵۴,۲۴۰	۳,۲۰۱,۵۳۱,۴۶۹
۹۰	۹۶٪	۹۶,۹۵۴,۲۴۰	۳,۴۲۳,۷۰۱,۶۴۳
۱۲۰	۹۶٪	۹۶,۹۵۴,۲۴۰	۳,۴۷۶,۷۵۴,۶۴۲

جدول ۱۱. نتایج حاصل از تغییرات مدت‌زمان اختلال بر معیارهای عملکرد در مدل تعمیم‌یافته (وضع بهینه)

مدت‌زمان اختلال (روز)	میانگین نرخ پاسخگویی	مجموع هزینه تقاضای پس‌افت (تومان)	هزینه کل (تومان)
(۲،۵)	۹۷٪	۵۵,۲۶۷,۸۴۰	۱,۴۱۴,۸۱۳,۸۱۳
(۲،۶)	۹۷٪	۵۵,۲۶۷,۸۴۰	۱,۳۳۳,۹۱۶,۱۵۸
(۲،۷)	۹۶٪	۹۶,۹۵۴,۲۴۰	۱,۲۷۹,۰۸۱,۱۹۸
(۲،۸)	۹۶٪	۹۶,۹۵۴,۲۴۰	۱,۲۵۹,۵۳۳,۳۴۶
(۲،۹)	۹۶٪	۱۰۰,۲۲۰,۵۱۰	۱,۲۳۴,۵۲۷,۰۱۵
(۱،۹)	۹۶٪	۱۰۰,۲۲۰,۵۱۰	۱,۴۰۶,۶۴۰,۱۸۲
(۲،۱۰)	۹۵٪	۱۳۰,۴۳۰,۵۸۱	۱,۳۳۴,۴۹۷,۳۶۹
(۲،۱۱)	۹۵٪	۱۳۰,۴۳۰,۵۸۱	۱,۱۷۷,۲۳۸,۱۳۶
(۲،۱۲)	۹۴٪	۱۴۱,۴۳۱,۱۵۴	۱,۱۴۶,۱۲۷,۶۳۶
(۲،۱۳)	۹۴٪	۱۵۳,۱۴۵,۲۵۵	۱,۱۱۶,۸۳۶,۴۸۰
(۲،۱۴)	۹۳٪	۲۱۲,۲۴۹,۵۹۱	۱,۱۴۲,۷۷۸,۵۶۷
(۲،۲۰)	۶۷٪	۱,۵۶۳,۶۷۷,۸۹۴	۲,۳۳۸,۴۹۲,۸۵۸

جدول ۱۲. نتایج حاصل از تغییرات میزان تولید روزانه خط اصلی بر معیارهای عملکرد در مدل تعمیم‌یافته (وضع بهینه)

میزان تولید روزانه خط اصلی (مترمربع)	میانگین نرخ پاسخگویی	مجموع هزینه تقاضای پس‌افت	هزینه کل (تومان)
(۱۵۹ ,۵۵۰)	۷٪	۱۹,۸۳۴,۴۹۳,۹۴۵	۲۰,۵۶۰,۶۴۳,۱۷۶
(۱۵۹ ,۶۰۰)	۲۱٪	۶,۳۶۹,۷۲۵,۹۵۲	۷,۰۹۶,۲۸۱,۶۱۷
(۱۵۹ ,۶۵۰)	۹۲٪	۲۳۸,۵۰۵,۱۶۳	۱,۱۱۹,۷۱۰,۶۵۸
(۱۵۹ ,۶۷۰)	۹۴٪	۱۵۱,۸۸۰,۶۸۶	۱,۲۸۵,۹۸۴,۴۲۹
(۱۵۹ ,۶۸۰)	۹۵٪	۱۲۷,۵۴۰,۸۰۷	۱,۲۳۴,۵۲۷,۰۱۵
(۱۵۹ ,۶۸۵)	۹۶٪	۱۰۷,۶۳۷,۹۹۵	۱,۲۱۰,۱۳۰,۹۶۱
(۱۵۹ ,۶۹۰)	۹۶٪	۱۰۰,۲۲۰,۵۱۰	۱,۱۹۸,۳۹۴,۶۰۳
(۱۵۹ ,۷۰۰)	۹۷٪	۸۷,۸۰۸,۴۸۵	۱,۱۵۹,۲۲۸,۰۵۴
(۱۵۹ ,۷۱۰)	۹۷٪	۷۷,۶۴۰,۵۴۶	۱,۳۳۹,۶۳۱,۲۰۳

جدول ۱۳. نتایج حاصل از تغییرات میزان تولید روزانه خط پشتیبان بر معیارهای عملکرد در مدل تعمیم‌یافته (وضع بهینه)

میزان تولید روزانه خط پشتیبان (مترمربع)	میانگین نرخ پاسخگویی	مجموع هزینه تقاضای پس‌افت	هزینه کل (تومان)
(۱۵۰,۴۰)	۸۹٪	۴۰۳,۲۰۲,۵۴۸	۱,۲۸۱,۴۶۱,۹۹۱
(۲۰۰,۴۰)	۹۱٪	۱۵۴,۷۳۹,۸۳۴	۱,۲۵۳,۶۰۹,۲۹۱
(۳۰۰,۴۰)	۹۴٪	۱۰۲,۱۲۸,۱۷۳	۱,۲۶۷,۶۰۹,۲۹۱
(۳۵۰,۳۰)	۹۶٪	۱۰۰,۲۲۰,۵۱۰	۱,۲۴۱,۰۵۲,۹۰۷
(۳۵۰,۴۰)	۹۶٪	۸۹,۲۰۹,۸۲۶	۱,۲۳۷,۸۵۰,۹۵۴
(۳۷۰,۴۰)	۹۶٪	۸۹,۲۰۹,۸۲۶	۱,۲۳۴,۵۲۷,۰۱۵
(۴۰۰ ,۴۰)	۹۷٪	۷۲,۰۱۰,۴۸۸	۱,۲۱۴,۳۹۹,۴۹۸

جدول ۱۴. نتایج حاصل از تغییرات متراژ سفارش بر معیارهای عملکرد در مدل تعمیم‌یافته (وضع بهینه)

متراژ سفارش (مترمربع)	میانگین نرخ پاسخگویی	مجموع هزینه تقاضای پس‌افت	هزینه کل (تومان)
(۶۰ ,۲۰۰)	۹۸٪	۳۰,۱۱۴,۶۴۱	۱,۱۵۴,۳۰۱,۶۳۹
(۶۰ ,۲۱۰)	۹۸٪	۴۴,۰۴۲,۰۲۴	۱,۲۰۲,۷۶۰,۷۲۶
(۶۰ ,۲۲۰)	۹۷٪	۷۰,۲۶۷,۸۴۸	۱,۲۱۹,۶۰۶,۵۷۱
(۶۰ ,۲۲۶)	۹۷٪	۹۳,۷۸۶,۵۵۰	۱,۲۳۴,۵۲۷,۰۱۵
(۶۰ ,۲۲۷)	۹۶٪	۱۰۰,۲۲۰,۵۱۰	۱,۲۴۸,۰۳۹,۱۱۴
(۶۰ ,۲۲۸)	۹۶٪	۱۰۵,۲۳۶,۵۱۷	۱,۳۴۴,۵۲۳,۶۲۱
(۶۰ ,۲۳۰)	۹۵٪	۱۲۸,۰۳۴,۶۷۷	۱,۵۱۹,۳۸۱,۵۸۳
(۶۰ ,۲۳۵)	۹۳٪	۱۷۸,۸۷۵,۷۵۲	۱,۷۰۶,۸۵۹,۰۴۵
(۶۰ ,۲۵۰)	۵۱٪	۲,۲۳۵,۷۳۹,۴۱۲	۲,۹۷۵,۸۸۰,۳۷۴
(۶۰ ,۲۷۰)	۹٪	۱۸,۲۶۵,۳۲۳,۵۲۰	۱۸,۹۹۲,۲۶۴,۰۱۱

با توجه به تحلیل حساسیت صورت‌گرفته (جدول‌های ۶ تا ۱۴)، افزایش فاصله زمانی بین وقوع دو اختلال به افزایش نرخ پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان و کاهش هزینه‌ها منجر می‌شود که در مدل شبیه‌سازی پایه، اگر فاصله زمانی بین وقوع دو اختلال ۶۰ روز و بیشتر از آن باشد، کارخانه به‌راحتی پاسخگوی ۹۴ درصد از تقاضاهای مشتریان خواهد بود و در مدل تعمیم‌یافته اگر فاصله زمانی میان وقوع دو اختلال بیشتر از ۴۰ روز باشد، ۹۶ درصد از تقاضاهای مشتریان به‌راحتی پاسخ داده خواهد شد؛ به‌عبارت‌دیگر اگر فاصله زمانی بین وقوع دو اختلال در مدل پایه ۶۰ روز و در مدل تعمیم‌یافته ۴۰ روز باشد، کارخانه از تاب‌آوری قابل‌ملاحظه‌ای برخوردار خواهد بود؛ درنتیجه می‌توان با بررسی مداوم دستگاه‌ها و اعمال عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه تا حد امکان از خرابی دستگاه‌ها جلوگیری کرد؛ همچنین با کاهش مدت‌زمان اختلال، نرخ پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان افزایش و هزینه‌های تقاضای پس‌افت‌شده و پیرو

آن هزینه کل کاهش می‌یابد و اگر مدت‌زمان اختلال در بازه زمانی ۲ تا ۵ روز باشد، نرخ پاسخگویی در مدل پایه به ۹۴ درصد و در مدل تعمیم‌یافته این نرخ به ۹۷ درصد خواهد رسید؛ درنتیجه اگر مدت‌زمان اختلال در بازه زمانی ۲ تا ۵ روز باشد، سیستم از تاب‌آوری برخوردار است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مربوط به میزان تولید نشان می‌دهد که اگر میزان تولید روزانه کارخانه در وضع موجود به‌طور متوسط به ۷۱۰ مترمربع برسد، ۹۰ درصد از تقاضاهای مشتریان پاسخ داده خواهد شد؛ اما در این حالت میزان هزینه‌ها افزایش شدیدی خواهد داشت و بر این اساس می‌توان ادعا کرد که کارخانه فاقد تاب‌آوری است. در مدل تعمیم‌یافته در صورتی‌که میزان تولید روزانه خط اصلی کارخانه به‌طور متوسط ۶۸۵ مترمربع و میانگین تولید روزانه خط پشتیبان ۳۵۰ مترمربع باشد، نرخ پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان و هزینه‌ها در سطح مطلوبی قرار دارد و سیستم دارای ثبات خواهد بود. درصورتی‌که متراژ هر یک از سفارش‌های دریافتی کارخانه که روزانه وارد سیستم می‌شوند به‌طور متوسط در مدل پایه و تعمیم‌یافته ۲۱۰ مترمربع باشد، سیستم دارای تاب‌آوری و ثبات خواهد بود.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش وقوع اختلال در کارخانه سنگبری که یکی از اجزای مهم زنجیره تأمین صنعت سنگ‌های طبیعی ساختمان به‌حساب می‌آید، توسط نرم‌افزار ارنا شبیه‌سازی شده است. برای انجام شبیه‌سازی از داده‌های واقعی «کارخانه سنگبری آسمان» استفاده شد. پس از انجام اعتبارسنجی و تأیید اعتبار مدل، ده سناریو برای مدیریت و کاهش اثرات اختلال و ایجاد تاب‌آوری تشکیل و مدل‌های شبیه‌سازی مربوط به سناریوها ساخته شدند که سناریو سوم بر اساس استراتژی افزونگی ساخته شد؛ سپس تاب‌آوری هر یک از سناریوهای ایجادشده از طریق معیارهای نرخ پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان، هزینه تقاضای پس‌افت و هزینه کل بررسی شد و درنهایت سناریوی سوم با توجه به اینکه دارای بالاترین نرخ پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان و کمترین مقدار هزینه پس‌افت و هزینه کل بود، برای اجرا انتخاب شد؛ درنتیجه به مدیران «کارخانه سنگبری آسمان» پیشنهاد شد که برای تاب‌آورکردن واحد تولیدی خود به ایجاد یک خط تولید پشتیبان بپردازند؛ در این صورت میانگین نرخ پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان که در وضع موجود حدود ۸۰ درصد است به ۱۰۰ درصد رسیده و حتی در هنگام بروز اختلال نیز به علت متوقف‌نشدن فرایند تولید، تمام تقاضاهای مشتریان به‌راحتی پاسخ داده خواهد شد و هزینه تقاضای پس‌افت و پیرو آن هزینه کل کاهش خواهد یافت.

پژوهش حاضر در سطح کشور ایران و یک کارخانه با ظرفیت تولید متوسط انجام شده است که کارخانه موردبررسی پاسخگوی تقاضاهای داخل کشور است و صادرات ندارد. پیشنهاد می‌شود که مطالعات آتی در سطح کارخانه‌هایی با ظرفیت تولید بیشتر که به فعالیت‌های صادراتی هم

مشغول هستند، انجام شوند. همچنین در این پژوهش از استراتژی افزونگی برای پاسخ به اختلال استفاده شد، پیشنهاد می‌شود که استراتژی‌های متعدد دیگر هم بررسی شوند. در این پژوهش از سه معیار نرخ پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان، هزینه تقاضای پس‌افت و هزینه کل برای ارزیابی تاب‌آوری استفاده شد که پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی از سایر معیارهای ارزیابی نیز برای بررسی تاب‌آوری استفاده شود.

منابع

1. Ali, I., & Gölgeci, I. (2019). Where is supply chain resilience research heading? A systematic and co-occurrence analysis. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 49(8),* 793-815.
2. Azadeh, A., Abdollahi, M., Farahani, M. H., & Soufi, H. R. (2014). Green-resilient supplier selection: an integrated approach. *International IEEE Conference, Istanbul.* july 26,
3. Bak, O., Shaw, S., Colicchia, C., & Kumar, V. (2020). A Systematic Literature Review of Supply Chain Resilience in Small–Medium Enterprises (SMEs): A Call for Further Research. *IEEE Transactions on Engineering Management, 70(1),* 328-341.
4. Belhadi, A., Kamble, S., Jabbour, C. J. C., Gunasekaran, A., Ndubisi, N. O., & Venkatesh, M. (2021). Manufacturing and service supply chain resilience to the COVID-19 outbreak: Lessons learned from the automobile and airline industries. *Technological Forecasting and Social Change*, *163*, 120447.
5. Bouzon, M., Govindan, K., Rodriguez, C. M. T., & Campos, L. M. (2016). Identification and analysis of reverse logistics barriers using fuzzy Delphi method and AHP. *Resources, Conservation and Recycling*, *108*, 182-197.
6. Brusset, X., & Teller, C. (2017). Supply chain capabilities, risks, and resilience. *International Journal of Production Economics*, *184*, 59-68.
7. Centobelli, P., Cerchione, R., & Ertz, M. (2020). Managing supply chain resilience to pursue business and environmental strategies. *Business Strategy and the Environment, 29(3),* 1215-1246.
8. Christopher, M., & Peck, H. (2004). Building the resilient supply chain.
9. Dixit, V., Verma, P., & Tiwari, M. K. (2020). Assessment of pre and post-disaster supply chain resilience based on network structural parameters with CVaR as a risk measure. *International Journal of Production Economics*, *227*, 107655.
10. Finke, G. R., Schmitt, A. J., & Singh, M. (2010, December). Modeling and simulating supply chain schedule risk. *In Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference* (pp. 3472-3481). IEEE.
11. Ganguly, A., Chatterjee, D., & Rao, H. (2018). The role of resiliency in managing supply chains disruptions. *In Supply chain risk management* (pp. 237-251). Springer, Singapore.
12. Han, Y., Chong, W. K., & Li, D. (2020). A systematic literature review of the capabilities and performance metrics of supply chain resilience. *International Journal of Production Research, 58(15),* 4541-4566.
13. Hohenstein, N.-O., Feisel, E., Hartmann, E. and Giunipero, L. (2015), "Research on the phenomenon of supply chain resilience: A systematic review and paths for further investigation", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 45(1/2), 90-117.*
14. Hosseini, S., Ivanov, D., & Blackhurst, J. (2020). Conceptualization and measurement of supply chain resilience in an open-system context. *IEEE Transactions on Engineering Management, 69(6), 3111-3126*
15. Hosseini, S., Ivanov, D., & Dolgui, A. (2019). Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 125,* 285-307.

16. Ivanov, D. (2018). Revealing interfaces of supply chain resilience and sustainability: a simulation study. *International Journal of Production Research, 56(10),* 3507-3523.
17. Ivanov, D. (2019). Disruption tails and revival policies: A simulation analysis of supply chain design and production-ordering systems in the recovery and post-disruption periods. *Computers & Industrial Engineering, 127,* 558-570.
18. Ivanov, D. (2021). Lean resilience: AURA (Active Usage of Resilience Assets) framework for post-COVID-19 supply chain management. *The International Journal of Logistics Management, 33(4), 1196-1217.*
19. Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by COVID-19 outbreak. *International Journal of Production Research, 58(10),* 2904-2915.
20. Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., & Sabouhi, F. (2018). Resilient and sustainable supply chain design: sustainability analysis under disruption risks. *International Journal of Production Research, 56(17),* 5945-5968.
21. Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., Sheu, J. B., & Moghadam, H. S. (2016). Designing a supply chain resilient to major disruptions and supply/demand interruptions. *Transportation Research Part B: Methodological, 94,* 121-149.
22. Jafarnezhad Chaghooshi, A., Kazemi, A., & Arab, A. (2016). Identification and Prioritization of Supplier's Resiliency Evaluation Criteria Based on BWM. *The Journal of Industrial Management Perspective, 6(3),* 159-186. (In Persian)
23. Jahani, M., Moghbel Baarz, A., & Azar, A. (2017). Designing a Model for the Measurement of Supply Chain Resilience through SEM Approach. *The Journal of Industrial Management Perspective, 7(1),* 91-114. (In Persian)
24. Jain, V., Kumar, S., Soni, U., & Chandra, C. (2017). Supply chain resilience: model development and empirical analysis. *International Journal of Production Research, 55(22),* 6779-6800.
25. Kamalahmadi, M., Mellat-Parast, M., (2016). Developing a resilient supply chain through supplier flexibility and reliability assessment. *International Journal of Production Research, 54(1), 302-321.*
26. Khalili, S. M., Jolai, F., & Torabi, S. A. (2017). Integrated production–distribution planning in two-echelon systems: a resilience view. *International Journal of Production Research, 55(4),* 1040-1064.
27. Kogler, C., & Rauch, P. (2018). Discrete event simulation of multimodal and unimodal transportation in the wood supply chain: a literature review. *Silva Fenn, 52(4),* 29.
28. Liu, C.-L., Shang, K.-C., Lirn, T.-C., Lai, K.-H., Venus Lun, Y.H., 2018. Supply chain resilience, firm performance, and management policies in the liner shipping industry. *Transport. Res. Part A: Policy Practice ,110,* 202–219.
29. Özfirat, M. K., Özkan, E., Kahraman, B., Şengün, B., & Yetkin, M. E. (2017). Integration of risk matrix and event tree analysis: a natural stone plant case. *Sādhanā, 42(10),* 1741-1749.
30. Ponomarov, S. Y. and M. C. Holcomb (2009). Understanding the concept of supply chain resilience. *The International Journal of Logistics Management, 20(1),* 124-143.
31. Pourhejazy, P., Kwon, O. K., Chang, Y. T., & Park, H. K. (2017). Evaluating resiliency of supply chain network: A data envelopment analysis approach. *Sustainability, 9(2),* 255.

32. Prasoon, R., Agarwal, M., & Kumar, A. (2017). Replenishment policy in a two-echelon supply chain: An analysis using discrete-event simulation. *International Journal of Business Analytics and Intelligence, 5(2),* 37.
33. Ravanestan, K., Aghajani, H., Safaei Ghdikolaei, A., Yahyazadefar, M. (2017). Determining and Weighting Resilience Strategies in the Iran Khodro Supply Chain. *The Journal of Industrial Management Perspective, 7(1),* 145-172. (In Persian)
34. Saglam, Y. C., Çankaya, S. Y., & Sezen, B. (2020). Proactive risk mitigation strategies and supply chain risk management performance: an empirical analysis for manufacturing firms in Turkey. *Journal of Manufacturing Technology Management, 32(6),* 1224-1244.
35. Sahebjamnia, N. (2020). Resilient supplier selection and order allocation under uncertainty. *Scientia Iranica, 27(1),* 411-426.
36. Shao, L., & Jin, S. (2020). Resilience assessment of the lithium supply chain in China under impact of new energy vehicles and supply interruption. *Journal of cleaner production, 252,* 119624.
37. Schmitt, A., & Singh, M. (2010). Quantifying supply chain disruption risk using Monte Carlo and discrete-event simulation. Proceedings - *Winter Simulation Conference. 1237 - 1248. 10.1109/WSC.2009.5429561.*
38. Sonar, A., & Mackenzie, C. A. (2018). Supply Chain Disruptions Preparedness Measures Using a DynamicModel. *In Supply Chain Risk Management* (pp. 123-137). Springer.
39. Soni, U., Jain, V., & Kumar, S. (2014). Measuring supply chain resilience using a deterministic modeling approach. *Computers & Industrial Engineering, 74,* 11–25.
40. Tan, W. J., Cai, W., & Zhang, A. N. (2020). Structural-aware simulation analysis of supply chain resilience. *International Journal of Production Research, 58(17),* 5175-5195.
41. Tordecilla, R. D., Juan, A. A., Montoya-Torres, J. R., Quintero-Araujo, C. L., & Panadero, J. (2021). Simulation-optimization methods for designing and assessing resilient supply chain networks under uncertainty scenarios: A review. *Simulation Modelling Practice and Theory, 106,* 102166.
42. Turnquist, M., Vugrin, E., 2013. Design for resilience in infrastructure distribution networks. *Environ. Syst. Decisions 33(1),* 104–120.
43. Zhu, Q., & Krikke, H. (2020). Managing a sustainable and resilient perishable food supply chain (PFSC) after an outbreak. *Sustainability, 12(12),* 5004.