



**Research in Production and Operations Management**

**University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329**

Vol. 17, Issue 1, No. 44, 2026



**DOI: [10.22108/pom.2026.147153.1641](https://doi.org/10.22108/pom.2026.147153.1641)**

**(Research paper)**

## **Simulation-Based Digital Twin for Resilience Analysis of the Protein Supply chain**

**Seyed Vahid Daei Niaki**

Department of Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran,  
vahidsh789@yahoo.com

**Abotaleb Shafaghat\***

Department of Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran,  
shafaghat@mut.ac.ir

**Morteza Abbasi**

Department of Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran,  
morabbasi@mut.ac.ir

**Mir Saman Pishvae**

School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran,  
pishvae@iust.ac.ir

**Purpose:** Resilience has become a strategic imperative in food supply chains, particularly for protein products where perishability, tight delivery windows, and demand volatility intensify the impacts of disruptions. In such environments, even short-lived shocks can cascade through upstream sourcing, cross-docking throughput, and last-mile distribution, resulting in significant service deterioration and extended recovery periods. This study develops and applies a simulation-based supply chain Digital Twin to evaluate resilience performance in a protein product distribution network under both normal operations and multiple disruption scenarios. The research addresses four objectives: (i) replicating a real-world network structure with multiple suppliers, a cross-docking facility, and multiple customers; (ii) quantifying resilience using operational and recovery-focused indicators; (iii) comparing the differential effects of demand, supply, cross-dock capacity, and transportation disruptions; and (iv) identifying structural bottlenecks that hinder full post-disruption restoration to derive actionable resilience levers.

\* Corresponding author, [0009-0007-0779-0323](https://orcid.org/0009-0007-0779-0323)



**Design/methodology/approach:** A scenario-driven, simulation-based Digital Twin prototype was implemented in anyLogistix using empirical inputs from the focal firm. Four disruption scenarios were designed to reflect salient risks in protein logistics. Performance was evaluated before, during, and after disruptions using ELT service-level trajectories and recovery indicators. A sensitivity analysis was also conducted on demand-shock intensity to assess system stability thresholds.

**Findings:** The experiments reveal substantial heterogeneity in disruption consequences and recovery dynamics. Under baseline conditions, the network maintains high service performance; however, all disruptions cause measurable degradation. The demand-surge scenario leads to rapid service erosion and backlog accumulation, and the system fails to restore pre-shock service levels even after external demand normalizes. This “non-recovery” behavior indicates that resilience is constrained not only by the disruption trigger but also by endogenous capacity limits in processing and distribution. The cross-dock disruption produces similarly persistent performance losses: reduced throughput generates congestion, disrupts flow continuity, and results in incomplete recovery. These findings identify the cross-docking node as a dominant structural bottleneck in the studied protein supply chain. By contrast, the supply disruption lowers service levels and lengthens recovery time, yet the network ultimately converges to a stable state once upstream capacity is restored, suggesting conditional resilience when sufficient time is available for replenishment.

**Research limitations/implications:** The study is limited by its focus on a single case network and by the Digital Twin’s current implementation as an offline simulation model rather than a real-time, synchronized system. The anyLogistix PLE environment also restricts model scalability and limits access to advanced optimization features. Future research should integrate simulation–optimization for automated policy selection, examine compound and correlated disruptions, expand performance metrics to include cost, spoilage, and emissions, and develop real-time data integration to operationalize the Digital Twin for continuous decision support.

**Practical implications:** The proposed Digital Twin enables managers to stress-test resilience policies before committing to costly implementation. The observed non-recovery phenomenon suggests that eliminating a disruption source is insufficient without establishing structural capacity buffers. Recommended interventions include increasing cross-dock throughput flexibility, strengthening fleet redundancy, adopting multi-sourcing for critical items, calibrating safety stock for high-variability demand, and implementing dynamic rerouting and resource reallocation. AI-enabled demand forecasting can further provide early warnings and trigger proactive responses, reducing emergency logistics costs and service failures.

**Social implications:** Protein supply continuity is closely tied to food security and public welfare. Enhanced resilience reduces the likelihood of shortages and delivery delays during crises or demand surges, while timely distribution also minimizes spoilage and waste, supporting sustainability goals and strengthening public trust.

**Originality/value:** This paper contributes a structured, scenario-based Digital Twin methodology for resilience assessment in a real protein supply chain, integrating recovery-focused indicators (ELT service level, recovery time, TTR) and demonstrating how cross-docking and transportation constraints can induce non-recovery. The framework offers a replicable research design and practical decision-support tool for perishable food supply networks.

**Keywords:** Digital twin Supply chain simulation, Analytical optimization, Resilience, Disruption management



پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۷، شماره ۱، پیاپی ۴۴، ۱۴۰۵

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲ ص ۹۳-۱۲۴



DOI: [10.22108/pom.2026.147153.1641](https://doi.org/10.22108/pom.2026.147153.1641)

(مقاله پژوهشی)

## تحلیل تاب‌آوری زنجیره تأمین محصولات پروتئینی با استفاده از همزاد دیجیتال مبتنی بر شبیه‌سازی

سیدوحید داعی‌نیاکی<sup>۱</sup>؛ ابوطالب شفق<sup>۲\*</sup>؛ مرتضی عباسی<sup>۳</sup>؛ میرسامان پیشوایی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، vahidsh789@yahoo.com

۲- دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، shafaghat@mut.ac.ir

۳- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، morabbasi@mut.ac.ir

۴- استاد گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، pishvae@iust.ac.ir

**چکیده:** تاب‌آوری زنجیره‌های تأمین مواد غذایی به‌ویژه در محصولات پروتئینی، از طریق اختلالاتی مانند نوسانات ناگهانی تقاضا، اهمیت روزافزونی یافته است. در این پژوهش، یک همزاد دیجیتال مبتنی بر شبیه‌سازی، برای شبکه توزیع محصولات پروتئینی طراحی شده است که در آن با استفاده از داده‌های واقعی و پلتفرم anyLogistix، رفتار شبکه در شرایط عادی و سناریوهای مختلف اختلال ارزیابی می‌شود. مدل پیشنهادی شامل ساختار شبکه‌ای متشکل از چند تأمین‌کننده، یک انبار متقاطع و مجموعه‌ای از مشتریان است و عملکرد آن با شاخص‌هایی همچون سطح خدمت و زمان بازیابی، سنجیده می‌شود. علاوه بر سناریوی افزایش سه برابری تقاضا برای یکی از مشتریان، چند سناریوی دیگر شامل اختلال تأمین، محدودیت ظرفیت انبار و خرابی ناوگان حمل‌ونقل نیز، طراحی و تحلیل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد شدت و نوع اختلال، اثر چشمگیری بر رفتار شبکه و امکان بازیابی آن دارد و برخی گلوگاه‌های ظرفیت، مانع بازگشت کامل شبکه به شرایط پیشین می‌شوند. این مدل یک نمونه اولیه همزاد دیجیتال است و بستری را برای ارزیابی و مقایسه سیاست‌های مدیریتی تاب‌آورسازی زنجیره تأمین ارائه می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** همزاد دیجیتال، شبیه‌سازی زنجیره تأمین، بهینه‌سازی تحلیلی، تاب‌آوری، مدیریت اختلالات،

anyLogistix



## ۱- مقدمه

## ۱-۱ بهینه‌سازی و شبیه‌سازی: ابزارهای بهبود تاب‌آوری

مدل‌سازی شبیه‌سازی پویا و بهینه‌سازی تحلیلی، دو فناوری غالب در مدیریت ریسک زنجیره تأمین‌اند. با کمک رویکردهای بهینه‌سازی و شبیه‌سازی، شرکت‌ها دانش جدیدی را درباره تأثیر انتشار اختلال بر عملکرد خروجی شبکه با در نظر گرفتن مکان، مدت‌زمان و سیاست‌های بازیابی اختلال ایجاد می‌کنند.

مدل‌های بهینه‌سازی، شبکه را برحسب جریان کالا بین تسهیلات توصیف می‌کنند. این مدل‌ها از روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی خطی یا غیرخطی و همچنین برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط استفاده می‌کنند. این مدل‌ها، با تغییر پارامترهایی مانند باز و بسته شدن سایت، تحلیل تأثیر اختلالات بر عملکرد زنجیره تأمین را امکان‌پذیر می‌کنند. مدل‌های بهینه‌سازی برای چندین محصول و دوره‌های متعدد، به ارزیابی افزونگی، مانند تأمین‌کنندگان پشتیبان، ظرفیت رزرو شده و موجودی کاهش ریسک کمک می‌کنند. هنگامی که تسهیلات مختل در حال کار نیست، تقاضا را با قیمت‌های بالاتر برآورده می‌کنند.

از بهینه‌سازی برای توسعه وضعیت جغرافیایی شبکه تاب‌آور استفاده می‌شود که واکنش سریع و بازیابی را در صورت مواجهه با اختلال، امکان‌پذیر می‌کند. این نوع تحلیل در سطح تصمیم‌گیری استراتژیک مؤثر است.

مدل‌های شبیه‌سازی برای مطالعه انتشار اختلال و اثر موجی در چندین سطح استفاده می‌شوند. یکی از مزیت‌های اصلی آن، این است که مدل‌های شبیه‌سازی، عملیات بلادرنگ و در نتیجه طول اختلال را هنگام ارزیابی سیاست‌های بازیابی در نظر می‌گیرند. با افزودن پویایی‌ها به مدل، مانند تغییرات رفتار موقعیتی، مدل‌های شبیه‌سازی اجازه می‌دهند دید عمیق‌تری از عملیات شبکه، نسبت به بهینه‌سازی داشته باشند.

مطالعات شبیه‌سازی به‌طور گسترده، برای مدل‌سازی و اندازه‌گیری پدیده‌هایی انجام شده است که با استفاده از بهینه‌سازی یا مدل‌سازی مبتنی بر صفحه‌ی گسترده ثبت نمی‌شود؛ برای مثال:

- اختلال حمل‌ونقل در زنجیره‌های تأمین چندسطحی برای آشکارکردن تأثیر اثر موجی بر نرخ تحقق و نوسانات موجودی؛

- اختلال در ظرفیت تأمین‌کننده با یا بدون سیاست‌های بازیابی و تأثیر آنها بر سطح خدمات زنجیره تأمین؛

- اختلال در ظرفیت تولید، با برآورد کمی ریسک‌های مخرب، محاسبه هزینه‌ها و هفته‌های بازیابی.

معمولاً مدل‌های بهینه‌سازی اختلالات فقط یک عنصر معین شبکه (مثلاً سایت) را در نظر می‌گیرند و فرض می‌کنند که دیگر عناصر تحت تأثیر اختلال قرار نمی‌گیرند و طبق برنامه‌ریزی، به کار خود ادامه می‌دهند؛ این یعنی پیچیدگی دنیای واقعی به‌طور درخور توجهی کاهش می‌یابد تا راه‌حل‌های ریاضی عملی در یک زمان معقول به دست آید. ازلحاظ ذاتی، نمایش تصادفی بودن و جنبه‌های مربوط به زمان اختلالات و اقدامات بازیابی در اشکال بسته معادلات ریاضی دشوار است و فقط با استفاده از مدل‌سازی شبیه‌سازی پویا نشان داده می‌شود. ترکیبی از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی، دامنه هریک از آنها را گسترش می‌دهد. ترکیب روش‌ها باعث دو گزینه زیر می‌شود:

- بهینه‌سازی شبکه برای به حداقل رساندن هزینه کل زنجیره تأمین؛

- تحلیل پویای سیاست‌های کنترل سفارش، تولید، موجودی و منبع‌یابی با استفاده از شبیه‌سازی.

شبیه‌سازی ابزار جدیدتری است و به‌ویژه هنگامی قدرتمند است که با بهینه‌سازی ترکیب می‌شود. تعداد بیشتری از مدیران زنجیره تأمین، اکنون در حال استفاده از این تکنیک‌ها باهم هستند.

## ۲-۱ همزادهای دیجیتال: شبیه‌سازی + بهینه‌سازی + تحلیل داده‌ها

همزاد دیجیتال، یک نمایش مجازی پویا از یک شیء یا سیستم فیزیکی، با استفاده از داده‌های بلادرنگ برای درک، یادگیری و استدلال تعریف می‌شود (Bolton et al., 2018). ترکیبی از شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و تحلیل داده‌ها، مجموعه کاملی از فناوری‌های مورد نیاز برای ایجاد مدلی برای همزاد دیجیتال زنجیره تأمین را تشکیل می‌دهد. ادغام این مدل با یک جریان داده زنده، وضعیت شبکه را به شکل کنونی آن نشان می‌دهد (شکل ۱).

تعدادی از تحقیقات علمی (Ivanov et al., 2019; Ivanov & Dolgui, 2019; Popkov & Zherebtsov, 2019; Ivanov, 2024)، نشان می‌دهند که شبیه‌سازی استراتژیک زنجیره تأمین، که شامل مدل‌های بهینه‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌هاست، همزاد دیجیتال زنجیره تأمین است. این دیدگاه، بازتابی از شیوه رایج برنامه‌ریزی و مدل‌سازی زنجیره‌های تأمین است؛ اما نتیجه درک علمی از مفهوم همزادهای دیجیتال زنجیره تأمین نیست (Klochkov et al., 2021).

همزاد دیجیتال، وضعیت جاری یک زنجیره تأمین را با داده‌های حمل و نقل، موجودی، تقاضا و ظرفیت واقعی نشان می‌دهد؛ برای مثال، اگر حمله‌ای به یک مرکز لجستیک بین‌المللی رخ دهد، این اختلال با ابزار نظارت بر داده‌های ریسک شناسایی و به‌عنوان یک رویداد مخرب، به مدل شبیه‌سازی منتقل می‌شود؛ سپس شبیه‌سازی در همزاد دیجیتال، به نشان‌دادن انتشار اختلال و مقدار تأثیر آن کمک می‌کند.



شکل ۱- شیوه کار همزاد دیجیتال زنجیره تأمین

Fig. 1- How the Digital Twin of the Supply Chain Works

همزاد دیجیتال در تعامل با دیگر ابزارهای مدیریت زنجیره تأمین، یک برج کنترل برای نظارت سراسری بر زنجیره تأمین فراهم می‌کند. با استفاده از همزادهای دیجیتال، مدیران زنجیره‌های تأمین خود را از نظر ریسک‌ها و تاب‌آوری، به‌طور کلی ارزیابی می‌کنند و چابکی خود را بهبود می‌بخشند.

ایجاد زنجیره تأمین تاب‌آور، به معنای یافتن تعادلی از استحکام و چابکی است. هر دوی این‌ها به‌عنوان زیرساختی در برابر عدم قطعیت عمل می‌کنند و باید هنگام برنامه‌ریزی به آنها توجه شود.

استحکام از طریق هزینه‌های اولیه، که افزونگی را افزایش می‌دهد، به دست می‌آید؛ مانند افزایش موجودی، ظرفیت تولید اضافی، تأمین حمل و نقل جایگزین و موارد دیگر. در مقابل، این افزونگی‌ها فروش بی‌وقفه و سطوح خدمات پایدار را تضمین می‌کنند و هزینه اختلال را کاهش می‌دهند. علاوه بر این، عناصر استحکام، اجرای برنامه را تسهیل می‌کنند و به این ترتیب، خطر اختلال را کاهش می‌دهند؛ در نتیجه، دستیابی به اهدافی مانند تحویل به‌موقع، آسان‌تر انجام می‌شود که بر سطح فروش و خدمات نیز، تأثیر مثبتی دارد. همچنین ممکن است افزونگی در زنجیره تأمین، چابکی را بهبود بخشد و تأثیر مثبتی بر سطح خدمات و هزینه‌ها بگذارد.

شبیه‌سازی و بهینه‌سازی دو روشی‌اند که زنجیره‌های تأمین را از نظر توانایی آنها در کاهش تأثیر عدم قطعیت و حفظ استحکام، تقویت می‌کنند. آنها امکان آزمون استراتژی‌های مدیریت را تحت ریسک‌های مخرب و اثر موجی فراهم می‌کنند.

بهینه‌سازی در طول مراحل طراحی و برنامه‌ریزی شبکه، به بهترین وجه به کار می‌رود. این طراحی استراتژیک و برنامه‌های تاکتیکی از طریق مدل‌های شبیه‌سازی بهبود داده می‌شود که از پویایی عملیات، از جمله اجرا و بازیابی تقلید می‌کنند. علاوه بر این مدل‌های شبیه‌سازی، امکان مشاهده پویای شاخص‌های کلیدی عملکرد مرتبط با ریسک، مانند قابلیت اطمینان تأمین‌کننده، زمان بازیابی، تأثیر عملکرد اثر موجی، نرخ پرکردن و تاب‌آوری کلی سیستم را فراهم می‌کنند.

روش‌های مدل‌سازی شبیه‌سازی به ما اجازه می‌دهد تا جزئیات و ویژگی‌های خاص عناصر زنجیره تأمین را در نظر بگیریم؛ این نه تنها امکان تصویرسازی عملیات شبکه را فراهم می‌کند، برای ردیابی هر فرآیند در داخل نیز امکانی ایجاد می‌کند. علاوه بر این، استفاده از شبیه‌سازی ما را قادر می‌کند تا تأثیر اختلالات مختلف و سیاست‌های بازیابی را در طی زمان مشاهده کنیم و کاهش و بازیابی تدریجی ظرفیت را در نظر بگیریم. با ایجاد تغییرات در یک زنجیره تأمین شبیه‌سازی‌شده، درک پویایی شبکه فیزیکی ممکن می‌شود.

در سطح تصمیم‌گیری تاکتیکی، تحلیل مبتنی بر مدل‌های شبیه‌سازی برای برنامه‌ریزان عملیات زنجیره تأمین و توزیع‌کنندگان، اهمیت زیادی دارد. در عین حال، روش‌های بهینه‌سازی، پشتیبانی از تصمیم‌گیری را برای مدیران زنجیره تأمین در سطح راهبردی، فراهم می‌کنند.

همزاد دیجیتال نه تنها یک مفهوم فناورانه، یک چارچوب تحلیلی برای بازنمایی رفتار پویای زنجیره تأمین نیز در نظر گرفته می‌شود. در این چارچوب، تمرکز اصلی بر توان مدل در بازتولید تعاملات بین اجزای شبکه، جریان کالا و واکنش سیستم به اختلالات مختلف است. برخلاف تعاریف کلی که بر اتصال بلادرنگ تأکید دارند، در این مطالعه همزاد دیجیتال به‌صورت یک مدل شبیه‌سازی‌محور توسعه یافته است که امکان تحلیل سناریوها و آزمون سیاست‌های مدیریتی را فراهم می‌کند.

تحلیل اختلالات در زنجیره تأمین، نیازمند رویکردی است که آثار تجمعی و وابستگی‌های زمانی را منعکس کند. شبیه‌سازی این امکان را فراهم می‌آورد که پیامدهای یک اختلال محدود، در طول شبکه و در بازه‌های زمانی مختلف، دنبال شود. در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی ابزار اصلی برای بررسی واکنش شبکه به شوک‌های تقاضا، تأمین و حمل‌ونقل به کار رفته و نتایج آن، مبنای تحلیل تاب‌آوری قرار گرفته است.

تاب‌آوری زنجیره تأمین در این پژوهش، به صورت توان شبکه برای حفظ سطح خدمت و بازیابی عملکرد پس از اختلال تفسیر می‌شود. همزاد دیجیتال شبیه‌سازی‌محور، بستر لازم را برای مشاهده این رفتار در طول زمان فراهم می‌کند. با استفاده از این رویکرد، اثر اختلالات نه به صورت ایستا، در قالب تغییرات تدریجی موجودی، جریان کالا و تأخیر تحویل تحلیل می‌شود. این ویژگی، همزاد دیجیتال را به ابزار مناسبی برای مطالعه تاب‌آوری عملیاتی تبدیل می‌کند.

در سال‌های اخیر، زنجیره تأمین محصولات پروتئینی در ایران، با چالش‌هایی همچون نوسان تقاضا، محدودیت ظرفیت‌های سردخانه‌ای، ناپایداری عرضه و حساسیت شدید به اختلالات حمل‌ونقل مواجه بوده است. این شرایط، نیاز به ابزارهایی برای ارزیابی رفتار شبکه در وضعیت‌های غیرعادی و طراحی سیاست‌های تاب‌آور را بیش از پیش برجسته می‌کند. یکی از رویکردهای نوین برای تحلیل رفتار سیستم‌های پیچیده، بهره‌گیری از همزادهای دیجیتال مبتنی بر شبیه‌سازی است که امکان مشاهده، ارزیابی و آزمایش سناریوهای مختلف را پیش از وقوع واقعی، فراهم می‌آورد.

در این پژوهش با تکیه بر داده‌های واقعی، یک زنجیره تأمین محصولات پروتئینی و استفاده از پلتفرم anyLogistix، یک مدل شبیه‌سازی‌محور طراحی شده است تا رفتار شبکه در شرایط عادی و تحت اختلال، به صورت دقیق و مقایسه‌پذیر بررسی شود. شایان ذکر است که همزاد دیجیتال ارائه‌شده در این مطالعه، نمونه اولیه مبتنی بر شبیه‌سازی است و پیاده‌سازی قابلیت‌های بلادرنگ<sup>۱</sup>، مسیر توسعه آتی در نظر گرفته شده است.

مسئله اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی اثر اختلالات مختلف بر تاب‌آوری زنجیره تأمین محصولات پروتئینی و شناسایی گلوگاه‌های شبکه با استفاده از یک همزاد دیجیتال شبیه‌سازی‌محور است. در این چارچوب، چند سناریوی اختلال شامل افزایش تقاضا، کاهش ظرفیت تأمین، اختلال در عملیات انبار متقاطع و خرابی ناوگان حمل‌ونقل تحلیل شده و شاخص‌های کلیدی عملکرد، همچون سطح خدمت و زمان بازیابی ارزیابی شده‌اند. این رویکرد امکان ارائه بینش‌های عملی را برای تصمیم‌گیرندگان صنعت مواد غذایی و طراحی سیاست‌های بهبود تاب‌آوری شبکه فراهم می‌کند.

اختلالات بررسی‌شده در این پژوهش براساس ویژگی‌های عملیاتی زنجیره تأمین محصولات پروتئینی انتخاب شده‌اند. افزایش ناگهانی تقاضا، کاهش ظرفیت تأمین، محدودیت پردازش در انبار متقاطع و اختلال در ناوگان حمل‌ونقل از جمله عواملی‌اند که در عمل بیشترین تأثیر را بر عملکرد این نوع زنجیره‌ها دارند. انتخاب این سناریوها با هدف بازنمایی شرایط واقعی و شناسایی گلوگاه‌های شبکه انجام شده است.

## ۲- مبانی نظری

## ۲-۱ مرور پیشینه پژوهش

یک همزاد دیجیتال، وضعیت شبکه را برای هر لحظه معین از زمان نشان می‌دهد و برای بهبود تاب‌آوری و آزمایش طرح‌های اضطراری، امکان دستیابی کامل به یک دید سراسری از زنجیره تأمین را فراهم می‌کند. پذیرش همزادهای دیجیتال قرار است در آینده نزدیک بسیار افزایش یابد و کارایی مدیریت زنجیره تأمین را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد.

به‌طور کلی بیشترین مزایا، از طراحی و تحلیل زنجیره تأمین حاصل می‌شود که هم روش‌های بهینه‌سازی تحلیلی و هم روش‌های مدل‌سازی شبیه‌سازی پویا را دارند و هم امکان ادغام آسان با دیگر سیستم‌ها را فراهم می‌کنند. تحقیقات اخیر نقش همزاد دیجیتال را در بهبود مدیریت زنجیره‌های تأمین پیچیده، برجسته کرده‌اند. این فناوری با شبیه‌سازی لحظه‌ای فرایندها، امکان تصمیم‌گیری دقیق‌تر را فراهم می‌کند و تاب‌آوری سیستم‌ها را افزایش می‌دهد (Schuster et al., 2024).

مطالعه مارمولخو-سوسدو و اوسورنیو<sup>۲</sup> (۲۰۲۱)، پیشنهادی را به‌جهت طراحی یک زنجیره تأمین تاب‌آور برای شرکتی در بخش سوخت در مکزیک ارائه می‌دهد. آنها یک تکنیک شبیه‌سازی-بهینه‌سازی پویا را با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی، برای آزمایش پیشنهادیهای مختلف پیکربندی شبکه پیشنهاد داده‌اند. مکان یک مرکز توزیع جدید و پیشنهاد مسیریابی وسایل نقلیه برای بهینه‌سازی توزیع سوخت در مطالعه آنها تجزیه و تحلیل شده است. مطالعه الشهرانی و الغمدی<sup>۳</sup> (۲۰۲۴)، یک چارچوب مبتنی بر گراف را برای پیاده‌سازی همزاد دیجیتال در زنجیره تأمین ارائه کرده است که به بهینه‌سازی تصمیمات استراتژیک و عملیاتی کمک می‌کند. لیو و نیشی<sup>۴</sup> (۲۰۲۴) با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مبتنی بر داده، بهینه‌سازی موجودی در زنجیره‌های تأمین چندسطحی را بررسی کردند که نتایج آن نشان‌دهنده افزایش کارایی و کاهش هزینه‌ها بود. ژانگ و لیو<sup>۵</sup> (۲۰۲۳) در یک مطالعه جدید، رویکرد ترکیبی از یادگیری عمیق و شبیه‌سازی را برای شناسایی اختلالات در همزاد دیجیتال زنجیره تأمین ارائه دادند که دقت پیش‌بینی اختلالات را به شکل چشمگیری افزایش داد.

مطالعه مولر و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۲۳)، همزاد دیجیتال را برای زنجیره تأمین مواد غذایی، با هدف تمرینات سایبری طراحی و بر اهمیت امنیت اطلاعات در سیستم‌های دیجیتالی شده تأکید کرد. ایوانف و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۲۳) با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی ترکیبی، تأثیر تقاضای متغیر را در دوران بحران کووید-۱۹ بر تاب‌آوری زنجیره تأمین بررسی و به نیاز به سازوکارهای تطبیقی اشاره کردند. یک پژوهش از چن<sup>۸</sup> (۲۰۲۴) در حوزه صنایع دارویی است که کاربرد همزاد دیجیتال را برای مقابله با اثر موجی بررسی و آن را ابزار مؤثری برای افزایش چابکی عملیاتی معرفی کرده است. در یک گزارش صنعتی، سیمول<sup>۹</sup> (۲۰۲۴) به نقش همزاد دیجیتال در بازطراحی شبکه‌های زنجیره تأمین و ارزیابی سناریوهای بهینه‌سازی اشاره کرده است که نشان‌دهنده کاربرد عملی این فناوری است.

لیو و وانگ<sup>۱۰</sup> (۲۰۲۳) در مروری سیستماتیک، کاربردهای فعلی همزاد دیجیتال را در زنجیره‌های تأمین پایدار، بررسی کرده و عواملی چون شفافیت داده، تعامل بلادرنگ و مدل‌سازی چندبُعدی را کلید موفقیت آن دانسته‌اند. در مطالعه‌ای که بر محصولات فاسدشدنی انجام شد، وانگ و ژائو<sup>۱۱</sup> (۲۰۲۳) از یک مدل همزاد دیجیتال برای بهینه‌سازی مقاوم بلادرنگ استفاده کرده‌اند که به کاهش تلفات و بهبود پاسخ‌گویی به نوسانات تقاضا منجر شد. مطالعه چیدوزی و همکاران<sup>۱۲</sup> (۲۰۲۴) نشان می‌دهد که استفاده از رویکردهای شبیه‌سازی ترکیبی و داده‌های مکانی، نقش مهمی در بهینه‌سازی زنجیره تأمین زیست‌توده دارند.

هم‌زمان با همه‌گیری کووید-۱۹، پژوهشگران تاب‌آوری زنجیره تأمین را در صنایع مختلف، از جمله خرده‌فروشی مواد غذایی بررسی کردند. یافته‌ها نشان می‌دهد که شدت بحران، رفتارهای مشتریان و سیاست‌های قرنطینه، از عوامل کلیدی اختلال عملکرد این زنجیره‌ها بوده‌اند. در این میان، استفاده از مدل‌سازی شبیه‌سازی گسسته و همزادهای دیجیتال، بینش دقیقی را از پویایی عملیات و هزینه‌ها ارائه داده است (Burgos & Ivanov, 2021). این مطالعات، بر اهمیت مدیریت انعطاف‌پذیر تقاضا، موجودی و ظرفیت در شرایط بحرانی تأکید دارند.

لی و همکاران<sup>۱۳</sup> (۲۰۲۵)، رابطه بین تاب‌آوری زنجیره تأمین<sup>۱۴</sup> و عملکرد پایدار زنجیره تأمین<sup>۱۵</sup> را در چارچوب صنعت ساخت و ساز چین بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داده است که قابلیت‌های پویا، به‌ویژه توانایی تصرف و پیکربندی مجدد، واسطه‌های حیاتی در رابطه تاب‌آوری-پایداری‌اند؛ در حالی که حسگری اثر واسطه‌ای درخور توجهی ندارد.

در این مقاله، بر اهمیت همزادهای دیجیتال و رؤیت‌پذیری سراسری زنجیره تأمین همراه با مدیریت تاب‌آور تقاضا، موجودی و ظرفیت تأکید می‌کنیم. نتایج این مطالعه برای افزایش تاب‌آوری زنجیره‌های تأمین صنایع غذایی در آماده‌سازی برای اختلالاتی آموزنده است که در آینده امکان رخ‌دادنشان وجود دارد. این مطالعه نشان می‌دهد که همزاد دیجیتال، ابزار مؤثری برای مدیریت ریسک و افزایش تاب‌آوری زنجیره‌های تأمین در برابر چالش‌های آینده به کار گرفته می‌شود.

بخش‌های این مقاله به این صورت سازمان‌دهی شده‌اند: بخش ۳ روش‌شناسی این مطالعه، یعنی نرم‌افزار anyLogistix را ارائه می‌کند که قابلیت شبیه‌سازی، بهینه‌سازی، تحلیل داده‌ها، ایجاد همزاد دیجیتال از زنجیره تأمین، اجرای آزمون تحلیل ریسک و بررسی و تحلیل سناریوهای اختلال در زنجیره تأمین را دارد؛ بخش ۴، مورد مطالعه این پژوهش را معرفی می‌کند. هدف این بخش، مدل‌سازی همزاد دیجیتال زنجیره تأمین محصولات پروتئینی و استفاده از رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای ایجاد یک زنجیره تأمین تاب‌آور است. یافته‌های این بخش، آزمون تحلیل ریسک و بررسی سناریوی اختلال در زنجیره تأمین مطالعه‌شده را به همراه تحلیل شاخص‌های کلیدی سناریوی اختلال بررسی می‌کند. تحلیل نتایج شبیه‌سازی در شرایط اختلال و ارائه راهکارهای افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین، در بخش ۵ ارائه شده است. در نهایت مقاله با نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها برای تحقیقات آتی خاتمه می‌یابد.

## ۲-۲ شکاف تحقیقاتی و نوآوری پژوهش

این بخش جایگاه پژوهش حاضر را در پیشینه موضوع به طور شفاف، مشخص می‌کند و نشان می‌دهد این مطالعه چگونه خلأهای عملیاتی و نظری موجود را پوشش می‌دهد.

مرور پیشینه موضوع در حوزه تاب‌آوری زنجیره تأمین، شبیه‌سازی، همزاد دیجیتال و تحلیل اختلالات نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی پویایی اختلالات، سناریوسازی ریسک و کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی-بهینه‌سازی را بررسی کرده‌اند، همچنان چند خلأ مهم در پیشینه وجود دارد که پژوهش حاضر آنها را بررسی می‌کند.

- بیشتر پژوهش‌های موجود در حوزه همزاد دیجیتال زنجیره تأمین، بر صنایع تولیدی با ساختارهای استاندارد یا شبکه‌های لجستیکی عمومی تمرکز دارند و مطالعات بسیار اندکی، زنجیره‌های غذایی و به‌ویژه محصولات پروتئینی را بررسی کرده‌اند؛ درحالی‌که این زنجیره‌ها به دلیل فسادپذیری بالا، محدودیت ظرفیت سردخانه‌ای و حساسیت شدید به نوسانات تقاضا، رفتار کاملاً متفاوتی نسبت به دیگر شبکه‌ها دارند؛ بنابراین، فقدان مدل‌های همزاد دیجیتال شبیه‌سازی‌شده برای زنجیره‌های پروتئینی، یک شکاف پژوهشی درخور توجه است.
- بخش عمده مطالعات مرتبط با تاب‌آوری زنجیره تأمین، بر سناریوهای تک‌بعدی مانند اختلال تأمین یا اختلال حمل‌ونقل تمرکز دارند؛ اما به بررسی هم‌زمان چند نوع اختلال مانند افزایش ناگهانی تقاضا، کاهش ظرفیت تأمین، محدودیت در انبار متقاطع و خرابی ناوگان حمل‌ونقل، کمتر توجه شده است. پژوهش حاضر این خلأ را با تعریف و تحلیل مجموعه‌ای از سناریوهای چندبعدی و مقایسه رفتار شبکه در مقابل هریک برطرف می‌کند.

- در بسیاری از مطالعات کلاسیک، نظیر پژوهش‌های ایوانف<sup>۱۶</sup> (۲۰۲۰)، ایوانف و دولگی<sup>۱۷</sup> (۲۰۲۱)، لونگو و همکاران<sup>۱۸</sup> (۲۰۱۹)، لیو و همکاران<sup>۱۹</sup> (۲۰۱۸)، مدل‌ها عمدتاً مبتنی بر شبیه‌سازی رویدادگسسته یا چارچوب‌های تئوریک‌اند و کمتر از پلتفرم‌های کاربردی یکپارچه مانند anyLogistix برای ترکیب تحلیل ریسک، سیاست‌های حمل‌ونقل، ساختار شبکه و سنجش هم‌زمان چند شاخص عملکردی استفاده شده است. در این پژوهش، تلفیق قابلیت‌های شبیه‌سازی و تحلیل ریسک در محیط anyLogistix، ابزاری را فراهم کرده است که اثر اختلالات را از زاویه‌های مختلف ارزیابی می‌کند؛ رویکردی که در پیشینه کمتر مشاهده می‌شود.
- اگرچه تعداد زیادی از مطالعات، مفهوم بازیابی<sup>۲۰</sup> و زمان بازیابی<sup>۲۱</sup> را در سطح مفهومی بیان کرده‌اند، شبیه‌سازی سازوکار واقعی بازیابی و محاسبه تجربی زمان بازیابی در شبکه‌های صنایع غذایی، هنوز در پیشینه به‌صورت محدود انجام شده است. پژوهش حاضر با تعریف سازوکارهای بازیابی و سنجش شاخص‌های مرتبط، این خلأ را پوشش می‌دهد.

- درنهایت، پیشینه موجود کمتر یک مدل نمونه اولیه<sup>۲۲</sup> همزاد دیجیتال را بررسی کرده است که در زنجیره تأمین واقعی و بر مبنای داده‌های عملیاتی به کار گرفته می‌شود. در این مطالعه، یک مدل همزاد دیجیتال شبیه‌سازی‌محور توسعه یافته است که ضمن استفاده از داده‌های واقعی، امکان تحلیل وضعیت عادی و تحت اختلال و ارزیابی سناریوهای مختلف سیاستی را فراهم می‌کند.

بر این اساس، نوآوری‌های اصلی پژوهش حاضر، در سه محور زیر خلاصه می‌شود:

۱. **نوآوری روش‌شناختی:** توسعه یک همزاد دیجیتال شبیه‌سازی‌محور برای زنجیره تأمین محصولات پروتئینی با استفاده از پلتفرم یکپارچه AnyLogistix و ترکیب قابلیت‌های تحلیل ریسک، سنجش سطح خدمت و محاسبه زمان بازیابی؛
۲. **نوآوری کاربردی:** تحلیل سناریوهای اختلال (افزایش تقاضا، اختلال تأمین، محدودیت انبار، خرابی ناوگان) و شناسایی گلوگاه‌های ظرفیت‌محور در زنجیره تأمین مواد غذایی؛
۳. **نوآوری علمی:** ارائه یک نمونه اولیه توسعه‌پذیر از همزاد دیجیتال برای زنجیره‌های صنایع غذایی که مبنایی برای طراحی سامانه‌های بلادرنگ و تصمیم‌یار در این حوزه‌اند.

### ۳- روش‌شناسی پژوهش

#### ۳-۱ فرموله‌سازی مسئله

به منظور تحلیل رفتار زنجیره تأمین محصولات پروتئینی تحت سناریوهای مختلف اختلال، یک مدل شبیه‌سازی شبکه‌ای در محیط نرم‌افزار anyLogistix توسعه داده شده است. با توجه به ماهیت شبیه‌سازی‌محور مدل، مسئله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی ریاضی صریح فرموله نمی‌شود، بلکه چارچوب مفهومی برای ارزیابی عملکرد شبکه، تحلیل تاب‌آوری و شناسایی گلوگاه‌های عملیاتی، تحت سناریوهای مختلف اختلال ارائه می‌شود. تصمیمات عملیاتی شبکه از طریق سیاست‌ها و قوانین کنترلی از پیش تعریف‌شده در محیط شبیه‌سازی اعمال می‌شود و خروجی مدل برای مقایسه سناریوها و تحلیل شاخص‌های عملکردی به کار می‌رود.

#### ۳-۱-۱ مجموعه‌ها

- $S$ : مجموعه تأمین‌کنندگان
- $C$ : مجموعه مشتری‌ها
- $D$ : انبار متقاطع
- $P$ : مجموعه محصولات
- $T$ : دوره‌های زمانی شبیه‌سازی
- $DS$ : مجموعه سناریوهای اختلال

#### ۳-۱-۲ پارامترها

- $cap_s$ : ظرفیت تأمین‌کننده  $s \in S$
- $cap_D$ : ظرفیت پردازش انبار متقاطع  $D$
- $dem_{cpt}$ : تقاضای مشتری  $c$  برای محصول  $p$  در زمان  $t$
- $LT_{SD}$ : زمان حمل از تأمین‌کننده  $s$  به انبار متقاطع  $D$
- $LT_{DC}$ : زمان حمل از انبار متقاطع  $D$  به مشتری  $c$

•  $\alpha_\omega$ : شدت اختلال در سناریوی  $\omega \in DS$  (مثلاً ضریب افزایش تقاضا یا درصد کاهش ظرفیت)

•  $SL_{min}$ : حداقل سطح پذیرفتنی خدمت

### ۳-۱-۳ متغیرهای حالت و عملکرد سیستم

در مدل شبیه‌سازی anyLogistix، جریان کالا و عملیات شبکه به صورت رویدادگسسته شبیه‌سازی می‌شود. متغیرهای کلیدی حالت و عملکرد سیستم، عبارت‌اند از:

•  $F_{SDt}$ : میزان ارسال از تأمین‌کننده  $s$  به انبار متقاطع  $D$  در زمان  $t$

•  $F_{Dct}$ : میزان ارسال از انبار متقاطع  $D$  به مشتری  $c$  در زمان  $t$

•  $I_{Dt}$ : سطح موجودی انبار متقاطع  $D$  در زمان  $t$

•  $delay_t$ : میزان تأخیر در تحقق سفارش‌ها، در زمان  $t$

•  $SL_\omega$ : سطح خدمت<sup>۲۳</sup> در سناریوی اختلال  $\omega$

•  $RT_\omega$ : زمان بازیابی شبکه پس از اختلال در سناریوی اختلال  $\omega$

•  $TTR_\omega$ : زمان کل بازیابی<sup>۲۴</sup>، در سناریوی اختلال  $\omega$

### ۳-۱-۴ مدل‌سازی سناریوهای اختلال

در هر سناریوی اختلال  $\omega \in DS$ ، پارامترهای تقاضا یا ظرفیت حمل‌ونقل، به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$dem_{cpt}^\omega = \alpha_\omega \times dem_{cpt} \quad \text{افزایش تقاضا}$$

$$cap_s^\omega = \alpha_\omega \times cap_s \quad \text{کاهش ظرفیت تأمین}$$

$$cap_D^\omega = \alpha_\omega \times cap_D \quad \text{کاهش ظرفیت انبار متقاطع}$$

### ۳-۱-۵ قوانین عملیاتی شبیه‌سازی و محدودیت‌های سیستم

محدودیت‌های زیر به صورت قوانین عملیاتی و فیزیکی شبکه، در مدل شبیه‌سازی اعمال شده‌اند و نقش کنترل‌کننده جریان‌ها، ظرفیت‌ها و سطح خدمت را دارند، نه قیود حل‌کننده یک مسئله بهینه‌سازی ریاضی. ۱. محدودیت ظرفیت تأمین‌کننده:

$$F_{SDt} \leq cap_s^\omega \quad \forall s \in S, \quad \forall t \in T \quad (1)$$

رابطه (۱) تضمین می‌کند که میزان ارسال هر تأمین‌کننده در هر دوره زمانی از ظرفیت در دسترس آن تأمین‌کننده، از سناریوی اختلال مربوطه فراتر نرود.

۲. محدودیت ظرفیت انبار متقاطع

$$\sum_{s \in S} F_{SDt} \leq cap_D^\omega \quad \forall t \in T \quad (2)$$

رابطه (۲) بیان می‌کند که مجموع جریان ورودی به انبار متقاطع، در هر دوره زمانی بیش از ظرفیت پردازش یا تخلیه انبار تحت شرایط اختلال نیست.

۳. قانون توازن جریان (به صورت مفهومی)

جریان ورودی به انبار متقاطع، برابر با مجموع جریان خروجی و تغییرات سطح موجودی در طول زمان است.

$$I_{DT} = I_{D(t-1)} + \sum_{s \in S} F_{SDt} - \sum_{c \in C} F_{Dct} \quad \forall t \in T \quad (3)$$

رابطه (۳)، پویایی تغییرات موجودی انبار متقاطع را در طول زمان نشان می‌دهد و توازن بین جریان‌های ورودی، خروجی و سطح موجودی را برقرار می‌کند.

۴. سطح خدمت: این شاخص، سطح خدمت شبکه را در هر سناریوی اختلال اندازه‌گیری و توانایی سیستم را در پاسخ‌گویی به تقاضاها در زمان مقرر، منعکس می‌کند.

$$SL_{\omega} = \frac{\text{موقع به شده تحویل های سفارش}}{\text{هاسفارش کل}} \quad (4)$$

### ۳-۱-۶ هدف مفهومی مدل

هدف مدل شبیه‌سازی، پیشینه‌سازی سطح خدمت زنجیره تأمین و کمینه‌سازی زمان بازیابی، تحت سناریوهای مختلف اختلال است. این هدف نه از طریق حل یک تابع هدف ریاضی، با مقایسه نتایج شبیه‌سازی سناریوها و تحلیل شاخص‌های عملکردی مانند  $SL_{\omega}$ ،  $RT_{\omega}$  و  $TTR_{\omega}$  محقق می‌شود.

### ۳-۲ معرفی نرم‌افزار anyLogistix

نرم‌افزار anyLogistix محصول شرکت anyLogic، محصول تخصصی است که به‌جهت شبیه‌سازی زنجیره تأمین و بهینه‌سازی آن توسعه یافته است. این نرم‌افزار بر هسته اصلی نرم‌افزار anyLogic توسعه داده شده است و امکاناتی برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین دارد.

anyLogistix، یک نرم‌افزار پیشرفته در زمینه شبیه‌سازی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین است که به شرکت‌ها کمک می‌کند تا عملکرد زنجیره تأمین خود را بهبود بخشند. این نرم‌افزار، ترکیبی از ابزارهای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی را ارائه می‌دهد که امکان تحلیل و ارزیابی سناریوهای مختلف زنجیره تأمین را فراهم می‌کند.

تجزیه و تحلیل روندهای تحقیقاتی، نشان می‌دهد که این ابزاری معتبر برای بهبود پایداری و تاب‌آوری زنجیره تأمین است (Longo et al., 2024).

لونگو و همکاران<sup>۲۵</sup> (۲۰۲۴) در مقاله خود، تحلیلی از پیشینه علمی موجود را درباره استفاده از anyLogistix، برای بهبود عملکرد زنجیره تأمین در مطالعات موردی انجام داده‌اند. آنها چالش‌های مهمی مانند بهره‌برداری بهتر از الگوی همزاد زنجیره تأمین دیجیتال، بهبود ادغام anyLogistix با دیگر ابزارها و پیشبرد همکاری بین بازیگران زنجیره تأمین را به‌سمت آینده‌ای پایداری و تاب‌آورتر شناسایی کرده‌اند.

شایان ذکر است که در این پژوهش، از نسخه آموزشی نرم‌افزار، یعنی نسخه یادگیری شخصی<sup>۲۶</sup> استفاده شده است. نسخه یادگیری شخصی با وجود اینکه امکان پیاده‌سازی کامل جریان مواد، سیاست‌های کنترل موجودی، حمل‌ونقل و تحلیل سناریوهای اولیه را فراهم می‌کند، محدودیت‌هایی از جمله سقف تعداد گره‌ها و تسهیلات، محدودیت حجم داده‌های ورودی و دسترسی‌نداشتن به برخی قابلیت‌های پیشرفته بهینه‌سازی شبکه و تحلیل سناریوهای پیچیده را دارد. این محدودیت‌ها، قابلیت توسعه مدل برای شبکه‌های بزرگ‌تر را محدود می‌کند؛ اما با این حال، برای هدف این پژوهش و ساخت همزاد دیجیتال یک زنجیره تأمین اندازه متوسط، امکانات نسخه PLE کفایت داشته است.

### ۳-۳ آزمایش تحلیل ریسک در نرم افزار anyLogistix

آزمایش تحلیل ریسک<sup>۲۷</sup> در نرم افزار anyLogistix، یکی از ابزارهای مهم برای ارزیابی پایداری و تاب آوری زنجیره تأمین در شرایط عدم قطعیت و نوسانات است. این آزمایش به شما امکان می دهد تا تأثیر سناریوهای مختلف ریسک (مانند تأخیر در حمل و نقل، خرابی تأمین کننده، افزایش هزینه ها، تقاضای غیرمنتظره و ...) را بر عملکرد کلی زنجیره تأمین تحلیل کنید. هدف از انجام آزمایش تحلیل ریسک در نرم افزار anyLogistix، عبارت اند از:

- شناسایی نقاط آسیب پذیر زنجیره تأمین؛
- بررسی عملکرد سیستم تحت شرایط نامطمئن؛
- ارزیابی راهکارهای تاب آوری<sup>۲۸</sup>؛
- تحلیل میزان نوسان در شاخص های کلیدی عملکرد<sup>۲۹</sup>؛ مثل هزینه، سرویس دهی، موجودی، زمان تحویل و...

### ۳-۴ تنظیمات مدل شبیه سازی در نرم افزار anyLogistix

در این پژوهش، نرم افزار anyLogistix بستر پیاده سازی مدل شبیه سازی انتخاب شده است. از میان امکانات متعدد نرم افزار، تنها قابلیت هایی استفاده شده اند که در تحلیل رفتار شبکه و سناریوهای اختلال، نقش مستقیم دارند. در بخش حمل و نقل، از سیاست های استاندارد ارسال محموله ها استفاده شده است. مدل حمل و نقل بر مبنای جریان کالا بین تأمین کنندگان، انبار متقاطع و مشتری ها تعریف و پارامترهایی مانند زمان حمل<sup>۳۰</sup> و ظرفیت وسیله نقلیه به صورت داده های ورودی مشخص شده اند.

شاخص های عملکرد شامل سطح خدمت مبتنی بر زمان تحویل مورد انتظار، زمان بازیابی و زمان کل بازیابی، به طور مستقیم با موتور شبیه سازی تولید می شوند. این شاخص ها براساس خروجی های رویدادگسسته مدل و بدون اعمال تنظیمات خاص نرم افزاری محاسبه می شوند.

ابزار تحلیل ریسک برای اجرای سناریوهای اختلال به کار رفته است. با توجه به هدف پژوهش، تمرکز بر نحوه اثرگذاری اختلالات بر رفتار شبکه است و به جزئیات پیاده سازی ابزار توجه نشده است، بخش های نرم افزار محور مرتبط با این ابزار نیز به حداقل رسانده و تنها ساختار سناریوها، مقادیر ورودی و شاخص های خروجی گزارش شده است.

### ۴- مطالعه کاربردی: مدل سازی همزاد دیجیتال در صنعت غذایی

#### ۴-۱ سناریوی شبیه سازی

مسئله ای که شبیه سازی شده است، شبکه تأمین محصولات پروتئینی (مرغ و گوشت) از سوی یک تأمین کننده محصولات غذایی است (شکل ۲) که از طریق دریافت نیازهای مشتریان از طریق یک پلتفرم سفارش دهی، تجمع سفارش های روز، ارسال سفارش ها و دریافت آنها از تأمین کنندگان محصولات پروتئینی، بسته بندی سفارش ها در یک محل توزیع، یعنی انبار متقاطع شرکت تأمین و ارسالشان به محل تقاضا، یعنی محل مشتریان انجام می شود. ابعاد

مسئله‌ای که شبیه‌سازی شده است، شامل تعداد تأمین‌کنندگان، مشتریان، مراکز توزیع و محصولات در جدول ۱ ارائه شده است.

در این مطالعه، از نسخه PLE (نسخه یادگیری شخصی) نرم‌افزار anyLogistix استفاده شده است. این یک نسخه رایگان و محدود از این پلتفرم قدرتمند مدل‌سازی و شبیه‌سازی زنجیره تأمین است که برای یادگیری شخصی، آموزش و اهداف آکادمیک طراحی شده است. نسخه PLE به دانشجویان، پژوهشگران، استادان و علاقه‌مندان اجازه می‌دهد تا بدون نیاز به خرید مجوز کامل، با قابلیت‌های اصلی نرم‌افزار anyLogistix برای تحلیل، طراحی و شبیه‌سازی زنجیره تأمین آشنا شوند. نسخه PLE کاملاً برای یادگیری ابزارهای شبیه‌سازی، بهینه‌سازی، تحلیل شبکه، تحلیل ریسک و سناریوسازی مناسب است و برای انجام تمرینات دانشگاهی تا سطح پیشرفته، کافی است.

جدول ۱- ابعاد مسئله بررسی‌شده (شبکه تأمین محصولات پروتئینی)

Table 1- Dimensions of the Protein Product Supply Network

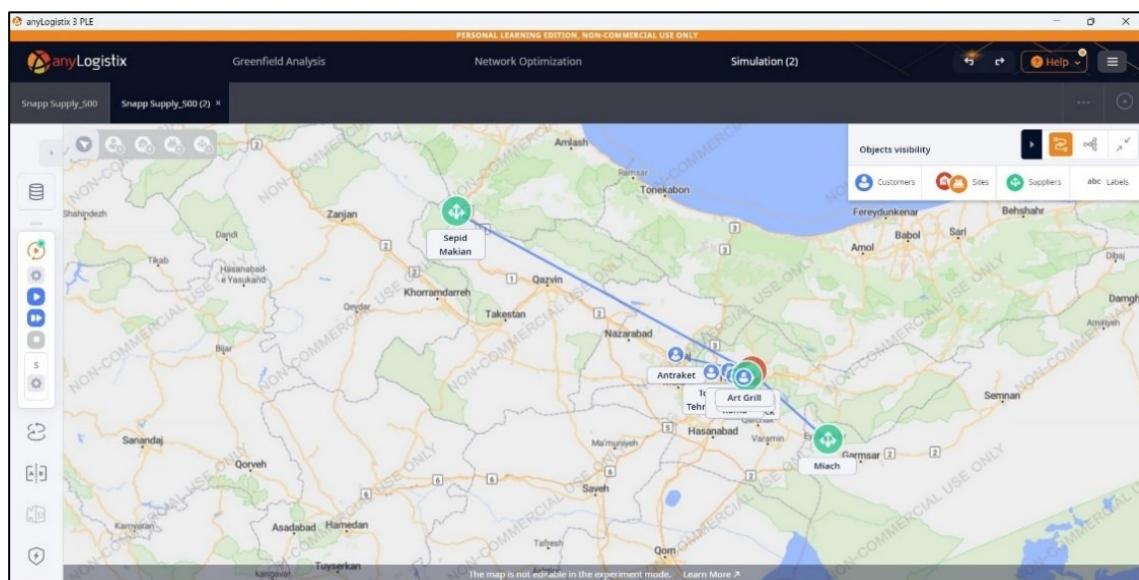
|    |                   |
|----|-------------------|
| ۳  | تعداد تأمین‌کننده |
| ۵  | تعداد مشتری       |
| ۱  | تعداد محل توزیع   |
| ۱۰ | تعداد محصول       |

شکل ۳. محل جغرافیایی تأمین‌کنندگان، مشتریان و انبار متقاطع را در نرم‌افزار anyLogistix نشان می‌دهد.



شکل ۲- شبکه زنجیره تأمین محصولات پروتئینی در نرم‌افزار anyLogistix

Fig. 2- Supply chain network of protein products in AnyLogistix



شکل ۳- محل جغرافیایی تأمین‌کنندگان، مشتریان و انبار متقاطع در نرم‌افزار anyLogistix

Fig. 3- Geographic locations of suppliers, customers, and cross-dock warehouses in the software.

## ۲-۴ فرضیات شبیه‌سازی

- شبیه‌سازی برای همه دوره‌های زمانی و با داده‌های تاریخی تقاضای مشتریان، برای یک بازه زمانی تقریباً دو ماهه (از 3/20/25 00:00:00 تا 5/20/25 00:00:00) انجام شده است؛
- کمبود مجاز نیست؛
- ظرفیت انبار متقاطع ۱۰۰ تن در نظر گرفته شده است.

## ۱-۲-۴ سیاست کنترل موجودی

- سیاست کنترل موجودی، انبار متقاطع<sup>۳۱</sup> انتخاب شده است. این سیاست کنترل موجودی به گونه‌ای طراحی شده است که مراکز توزیع، به عنوان تسهیلات انبار متقاطع عمل می‌کنند. در این حالت، مرکز توزیع، موجودی نگهداری نمی‌کند، بلکه محصولات را به طور مستقیم از یک نوع حمل و نقل به نوع دیگر منتقل می‌کند.
- سیاست کنترل موجودی بر اساس تعداد<sup>۳۲</sup> واحدهای کالا اعمال می‌شود. سطح موجودی، نقاط سفارش و مقادیر پرکردن موجودی<sup>۳۳</sup> بر حسب تعداد واحدها (مثلاً تعداد جعبه‌ها، پالت‌ها یا محصولات) تعریف و معمولاً در سناریوهایی استفاده می‌شود که مدیریت موجودی به تعداد فیزیکی محصولات وابسته است.

## ۲-۲-۴ سیاست حمل و نقل

- حمل و نقل از تأمین‌کننده محصولات پروتئینی به انبار متقاطع از نوع حمل بار، به صورت یک محموله کامل<sup>۳۴</sup> انجام می‌شود. در این سیاست، یک کامیون (یا وسیله نقلیه حمل بار) به طور کامل برای یک سفارش اختصاص داده می‌شود.
- مقدار حداقل نسبت بارگیری وسیله نقلیه حمل و نقل (پارامتر حداقل نرخ بار<sup>۳۵</sup>) ۰.۹ است. در شبیه‌سازی انجام شده، وسیله نقلیه تنها زمانی حرکت خواهد کرد که حداقل ۹۰٪ ظرفیت آن پر شده باشد.
- سیاست حمل و نقل از انبار متقاطع به محل مشتری، از نوع LTL است. در این حالت یک وسیله نقلیه به پر بودن کامل برای ارسال سفارش نیازی ندارد؛ بنابراین هر مقدار سفارشی ارسال می‌شود.
- در این سیاست، گزینه «تحويل جزئی سفارش»<sup>۳۶</sup> انتخاب شده است که به معنای امکان تقسیم یک سفارش به چندین محموله برای تحويل است.
- با انتخاب گزینه «زمان اولیه/نهایی»<sup>۳۷</sup>، اولویت تحويل مشخص شده به زمان‌های مجاز برای تحويل سفارش‌ها اشاره دارد و به ترتیب، زمان‌های اولیه و نهایی مجاز برای تحويل هر سفارش را مشخص می‌کند. بازه زمانی تحويل در نرم‌افزار شامل همه دوره‌ها، ۶ روز در هفته و به صورت ۲۴ ساعت شبانه‌روز انتخاب شده است.
- ناوگان حمل و نقل تأمین‌کننده محصولات پروتئینی شامل ۵۰ کامیون یخچال‌دار با ظرفیت بار ۱۰ تن و با هزینه ۱۰۰ میلیارد ریال است.

- هزینه تحویل<sup>۳۸</sup> از انبار متقاطع به محل مشتری، بدون توجه به حجم یا مقدار سفارش داده شده به صورت یک مقدار ثابت برای هر سفارش در نظر گرفته می‌شود. در این حالت، هزینه ارسال یا تحویل کالاها به انبار یا مقصد نهایی، صرف‌نظر از تعداد یا مقدار سفارش، همواره یک مقدار ثابت خواهد بود.
  - هزینه تحویل از تأمین‌کننده محصولات پروتئینی به انبار متقاطع براساس سیاست مبتنی بر مسافت با بررسی هزینه<sup>۳۹</sup> محاسبه می‌شود؛ یعنی هزینه حمل‌ونقل براساس مسافت طی شده مطابق رابطه (۵) محاسبه خواهد شد که شامل یک هزینه ثابت و یک هزینه متغیر وابسته به میزان مسافت طی شده است:
- $$500000 + (100000 * Distance) \quad (5)$$

#### ۳-۲-۴ سیاست منبع‌گزینی<sup>۴۰</sup>

- با انتخاب گزینه نزدیک‌ترین<sup>۴۱</sup> در بخش منبع‌گزینی نرم‌افزار، مشتریان محصولات خود را از نزدیک‌ترین منبع موجود دریافت می‌کنند.
- در جدول ۲، واحد داده‌های استفاده‌شده در مسئله شبیه‌سازی شده و آزمون تحلیل ریسک انجام‌شده در این مطالعه آمده است.

جدول ۲- واحدها در آزمایش‌های شبیه‌سازی و تحلیل ریسک

Table 2- Unit Definitions in Simulation and Risk Analysis

|           |         |
|-----------|---------|
| مسافت     | کیلومتر |
| وزن محصول | کیلوگرم |
| حجم محصول | مترمکعب |
| زمان      | روز     |
| پولی      | ریال    |

#### ۳-۴ داده‌های ورودی مدل شبیه‌سازی

مشتریان در مسئله شبیه‌سازی شده، شامل ۵ رستوران در شهر تهران و حومه آن‌اند که ۱۲ محصول پروتئینی را از یک تأمین‌کننده محصولات غذایی (در اینجا پروتئینی) سفارش می‌دهند. تأمین‌کننده محصولات غذایی، این ۱۲ محصول را از ۳ تأمین‌کننده اصلی خریداری و از طریق ذخیره موقت در انبار متقاطع، این محصولات را براساس سفارش و زمان تحویل میان مشتریان (۵ رستوران) توزیع می‌کند. این داده‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مشتریان، محصولات، تأمین‌کنندگان و زمان تدارک برای مسئله شبیه‌سازی شده

Table 3- Customers, Products, Suppliers, and Expected Lead Times

| مشتری   | محصول                      | تأمین‌کننده   | زمان تدارک مورد انتظار (روز) |
|---------|----------------------------|---------------|------------------------------|
| مشتری ۱ | گوشت قلوه‌گاه گوساله       | تأمین‌کننده ۱ | ۱                            |
|         | سینه استیکی مرغ میاج       | تأمین‌کننده ۲ | ۱                            |
|         | فیله مرغ                   | تأمین‌کننده ۳ | ۱                            |
| مشتری ۲ | شنپسل سینه بدون بازو مرغ   | تأمین‌کننده ۳ | ۲                            |
|         | فیله مرغ میاج              | تأمین‌کننده ۲ | ۲                            |
| مشتری ۳ | شنپسل سینه بدون بازو مرغ   | تأمین‌کننده ۳ | ۲                            |
|         | بال کبابی درشت مرغ (منجمد) | تأمین‌کننده ۳ | ۲                            |

| مشتري   | محصول                      | تأمین کننده   | زمان تدارک مورد انتظار (روز) |
|---------|----------------------------|---------------|------------------------------|
| مشتري ۴ | بچه فيله (منجمد)           | تأمین کننده ۲ | ۱                            |
|         | بال مرغ با نوک مياچ        | تأمین کننده ۲ | ۱                            |
|         | گوشت راسته مغز گوساله گيلک | تأمین کننده ۱ | ۱                            |
|         | شنيسل سينه بدون بازو مرغ   | تأمین کننده ۳ | ۲                            |
|         | گوشت راسته مغز گوسفندی     | تأمین کننده ۱ | ۱                            |
|         | گوشت راسته مغز گوساله گيلک | تأمین کننده ۱ | ۱                            |
| مشتري ۵ |                            |               |                              |

همچنین داده‌های تقاضا، موجودی اولیه، قیمت فروش و درآمد محصولات در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴- داده‌های مربوط به محصولات پروتئینی در مسئله شبیه‌سازی شده

Table 4- Product Data: Demand, Initial Inventory, Selling Price, and Revenue

| محصول                                             | تقاضای روزانه<br>(کیلوگرم) | موجودی اولیه<br>(کیلوگرم) | قیمت فروش<br>(ریال) | درآمد (ریال) |
|---------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------|--------------|
| گوشت قلوه‌گاه گوساله                              | ۴۰                         | ۴۳۱۷                      | ۲۸۳۷۹۲۰             | ۱۰۸۱۰۰۰۰     |
| سينه استيکی مرغ مياچ                              | ۲۰                         | ۱۰۰                       | ۱۴۲۵۱۵۰             | ۳۰۰۰۰۰۰      |
| فيله مرغ                                          | ۳۰                         | ۷۵                        | ۱۹۲۵۰۰۰             | ۴۷۸۲۰۰۰۰     |
| شنيسل سينه بدون بازو مرغ (بسته ۵ کیلوگرمی)        | ۱۲۰                        | ۳۲                        | ۱۶۹۰۰۰۰             | ۱۷۴۲۸۶۰۰۰    |
| فيله مرغ مياچ                                     | ۱۰                         | ۰                         | ۱۷۰۶۷۷۰             | ۱۴۰۰۰۰۰۰     |
| شنيسل سينه بدون بازوی ريز مرغ (بسته ۲,۲ کیلوگرمی) | ۱۵                         | ۳۲                        | ۱۶۹۰۰۰۰             | ۲۰۷۰۰۰۰۰     |
| بال کبابی درشت مرغ (منجمد)                        | ۱۰                         | ۹۹۸۵۰                     | ۸۹۵۰۰۰              | ۸۶۰۰۰۰۰۰     |
| بچه فيله (منجمد)                                  | ۱۰                         | ۰                         | ۵۹۵۰۱۰              | ۵۸۰۰۰۰۰۰     |
| بال مرغ با نوک مياچ                               | ۱۰                         | ۰                         | ۹۳۳۹۵۰              | ۹۴۰۸۰۰۰۰     |
| گوشت راسته مغز گوساله گيلک (درجه یک)              | ۳۵                         | ۱۱۵۷۸۴                    | ۴۲۸۲۹۴۰             | ۱۴۷۳۰۰۰۰۰    |
| شنيسل سينه بدون بازوی ريز مرغ (بسته ۵ کیلوگرمی)   | ۱۵                         | ۳۲                        | ۱۶۹۰۰۰۰             | ۲۲۶۵۰۰۰۰۰    |
| گوشت راسته مغز گوسفندی                            | ۸                          | ۷۷۳۴                      | ۶۵۸۱۷۲۰             | ۵۳۸۴۰۰۰۰۰    |
| گوشت راسته مغز گوساله گيلک                        | ۷۴                         | ۱۱۵۷۸۴                    | ۴۲۸۲۹۴۰             | ۳۱۴۶۱۰۰۰۰۰   |

در جدول ۵، مسافت و زمان حمل و نقل میان تأمین‌کنندگان تا انبار متقاطع و از انبار متقاطع تا محل مشتریان آورده شده است.

جدول ۵- مسافت و زمان حمل و نقل توزیع محصولات

Table 5- Transportation Distance and Time

| مبدأ          | مقصد         | مسافت (کیلومتر) | زمان حمل و نقل (ساعت) |
|---------------|--------------|-----------------|-----------------------|
| تأمین کننده ۱ | انبار متقاطع | ۱۴/۴            | ۱                     |
| تأمین کننده ۲ | انبار متقاطع | ۹۲              | ۳/۵                   |
| تأمین کننده ۳ | انبار متقاطع | ۲۵۰             | ۵                     |
| انبار متقاطع  | مشتري ۱      | ۶۸              | ۳                     |
| انبار متقاطع  | مشتري ۲      | ۲۳              | ۲                     |
| انبار متقاطع  | مشتري ۳      | ۲۴              | ۲                     |
| انبار متقاطع  | مشتري ۴      | ۱۹              | ۱                     |
| انبار متقاطع  | مشتري ۵      | ۱۳              | ۱                     |

## ۴-۴ آزمایش تحلیل ریسک در نرم‌افزار anyLogistix

مقادیر پارامترهای ورودی در آزمایش تحلیل ریسک، در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶- مقادیر پارامترهای ورودی آزمایش تحلیل ریسک در نرم‌افزار anyLogistix

Table 6- Input Parameters for Risk Analysis Experiment

|                  |                      |                  |                     |
|------------------|----------------------|------------------|---------------------|
| SelectedDates    | timeTypeEnd          | ۱۰               | replicationsNumber  |
| SelectedPeriods  | timeTypeStart        | 5/11/25 01:22:52 | startDate           |
| 5/20/25 00:00:00 | stopDate             | Time Period      | startPeriod         |
| ۰/۹۸             | RecoveryServiceLevel | ۰/۹۶             | failureServiceLevel |

مقدار سطح خدمت شکست<sup>۴۲</sup> ۰/۹۶ است. در نرم‌افزار anyLogistix، این شاخص به سطح خدماتی اشاره دارد که در صورت بروز نقص یا شکست در زنجیره تأمین، اندازه‌گیری می‌شود. این شاخص نشان‌دهنده درصد سفارش‌هایی است که به دلیل ناکارآمدی یا مشکلات در فرایندهای زنجیره تأمین، به موقع یا به طور کامل تحویل داده نشده‌اند. اندازه‌گیری این شاخص، به مدیران زنجیره تأمین کمک می‌کند تا ضعف‌ها و گلوگاه‌های موجود در سیستم را شناسایی کنند و با بهبود فرایندها، سطح خدمات را ارتقا دهند. این اقدام شامل بهینه‌سازی موجودی، بهبود فرایندهای حمل و نقل یا افزایش قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان است.

مقدار سطح خدمت بازیابی<sup>۴۳</sup> ۰/۹۸ است. در نرم‌افزار anyLogistix، این شاخص به سطح خدماتی اشاره دارد که پس از وقوع یک اختلال یا وقفه در زنجیره تأمین، اندازه‌گیری می‌شود. این شاخص نشان‌دهنده درصد سفارش‌هایی است که پس از بروز یک رویداد نامطلوب، به موقع و به طور کامل تحویل داده می‌شوند. اندازه‌گیری این شاخص، به مدیران زنجیره تأمین کمک می‌کند تا توانایی سیستم را در بازیابی و بازگشت به سطح خدمات عادی، پس از وقوع اختلالات ارزیابی کنند. این ارزیابی به بهبود برنامه‌های مدیریت ریسک، افزایش انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین و کاهش تأثیرات منفی ناشی از وقفه‌ها منجر می‌شود.

## ۴-۵ بررسی سناریوهای اختلال

یک اختلال در نرم‌افزار anyLogistix، معمولاً شامل تغییر ناگهانی یا توقف عملکرد یک گره، مسیر، یا منبع در زنجیره تأمین است. این اختلال به صورت زمان‌دار (مثلاً از روز ۱۰۰ تا روز ۱۳۰)، تصادفی (با احتمال رخداد مشخص) و مستقیم یا غیرمستقیم (تأثیر بر کل زنجیره) است.

سناریوهای اختلال<sup>۴۴</sup> در نرم‌افزار anyLogistix، یکی از ابزارهای قدرتمند برای بررسی تاب‌آوری زنجیره تأمین در برابر رویدادهای ناگهانی و منفی‌اند. این سناریوها به تحلیل‌گر امکان می‌دهند تا تأثیر رخدادهای غیرمنتظره مانند بلایای طبیعی، خرابی تأمین‌کننده، بسته‌شدن مسیرها، یا قطع ناگهانی تولید را به طور شبیه‌سازی شده بررسی کنند.

هدف از بررسی سناریوهای اختلال در نرم‌افزار anyLogistix، شبیه‌سازی رفتار زنجیره تأمین در برابر رویدادهای بحرانی، بررسی توان بازیابی زنجیره پس از اختلال، ارزیابی استراتژی‌های جایگزین (مانند تأمین‌کننده دوم یا انبارهای پشتیبان)، پشتیبانی از تصمیم‌گیری با سناریوهای چه می‌شود-اگر<sup>۴۵</sup> و غیره است.

جدول ۷، سناریوهای مختلف اختلال در زنجیره تأمین محصولات پروتئینی را نشان می‌دهد که به منظور ارزیابی تاب‌آوری شبکه در برابر انواع شوک‌های عملیاتی، طراحی شده‌اند. این سناریوها طیف متنوعی از اختلالات سمت تقاضا، سمت عرضه، عملیات داخلی و حمل‌ونقل را پوشش می‌دهند. سناریوی اول، نمایانگر شوک ناگهانی تقاضا از سوی مشتری کلیدی است؛ در حالی که سناریوی دوم، اختلال در تأمین را از طریق کاهش ظرفیت و افزایش زمان تأمین مدل‌سازی می‌کند. همچنین سناریوی سوم، محدودیت‌های عملیاتی را در انبار متقاطع و سناریوی چهارم اثر اختلالات حمل‌ونقل ناشی از خرابی ناوگان را بررسی می‌کند. این تنوع سناریویی، امکان مقایسه رفتار شبکه و شاخص‌های تاب‌آوری را در شرایط اختلالی متفاوت فراهم می‌کند.

جدول ۷- تعریف سناریوهای اختلال بررسی شده در زنجیره تأمین محصولات پروتئینی

Table 7- Definition of disruption scenarios considered in the protein supply chain

| سناریو                                   | جزئیات سناریوی اختلال                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| سناریو ۱: افزایش تقاضای مشتری            | <ul style="list-style-type: none"> <li>سه‌برابری ناگهانی تقاضای مشتری ۱</li> </ul>                                                                                                            |
| سناریو ۲: اختلال تأمین‌کننده             | <ul style="list-style-type: none"> <li>کاهش ۵۰٪ ظرفیت تأمین‌کننده اصلی (S1)</li> <li>افزایش Lead Time تأمین از ۲ روز به ۵ روز</li> <li>احتمال وقوع: ۳۰٪</li> <li>مدت اختلال: ۷ روز</li> </ul> |
| سناریو ۳: اختلال در انبار متقاطع         | <ul style="list-style-type: none"> <li>کاهش ظرفیت پردازش Cross-dock به میزان ۴۰٪</li> <li>کاهش ظرفیت بارگیری خروجی</li> <li>افزایش زمان پردازش از ۴ ساعت به ۱۰ ساعت</li> </ul>                |
| سناریو ۴: اختلال حمل‌ونقل (خرابی ناوگان) | <ul style="list-style-type: none"> <li>خروج ناگهانی ۳۰٪ ناوگان حمل‌ونقل</li> <li>افزایش زمان سفر<sup>۴۶</sup> از ۱ روز به ۲ روز</li> <li>افزایش نرخ عدم قطعیت تحویل</li> </ul>                |

## ۵- یافته‌ها

### ۵-۱ سناریوی اول اختلال: تغییرات تقاضا

سناریوی اول اختلالی که تعریف شده است، به این صورت است که با احتمال ۱۰۰ درصد در تاریخ 4/20/25، تقاضای یکی از مشتریان (مشتری ۱) با ضریب ۳ افزایش می‌یابد.

ضریب سه‌برابری افزایش تقاضا برای مشتری ۱، براساس رویکرد آزمون فشار<sup>۴۷</sup> انتخاب شده است. در این نوع سناریو، شدت اختلال بیش از مقادیر معمول و حتی بیش از مقادیر مشاهده‌شده در داده‌های تاریخی در نظر گرفته می‌شود تا رفتار شبکه زنجیره تأمین در شرایط بحرانی بررسی شود. هدف از انتخاب این ضریب، ارزیابی ظرفیت بالقوه شبکه برای پاسخ‌گویی به افزایش ناگهانی و شدید تقاضا و تحلیل حدود تحمل<sup>۴۸</sup> زنجیره است. با اینکه این مقدار مبتنی بر داده تاریخی خاصی نیست، اما در مطالعات تاب‌آوری، سناریوهای جهشی<sup>۴۹</sup> متداول‌اند و دید مناسبی نسبت به توان واقعی شبکه ارائه می‌دهند.

جدول ۸، رویداد سناریوی اول اختلال تعریف‌شده در نرم‌افزار anyLogistix، یعنی تغییر تقاضا را نشان می‌دهد که شامل تاریخ، روز و شماره تکرار شبیه‌سازی است.

جدول ۸- رویداد تغییر تقاضا در نرم‌افزار anyLogistix

Table 8- Demand change event in anyLogistix

| EVENTS TABLE <span style="float: right;">x</span> |                                     |                                     |                                     |                                     |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| #                                                 | Replication                         | Event                               | Date                                | Day #                               |
|                                                   | <input type="text" value="filter"/> | <input type="text" value="filter"/> | <input type="text" value="filter"/> | <input type="text" value="filter"/> |
| 1                                                 | Replication 2                       | Demand Changes                      | 2023-04-20T19:00                    | 32                                  |
| 2                                                 | Replication 7                       | Demand Changes                      | 2023-04-20T19:00                    | 32                                  |
| 3                                                 | Replication 6                       | Demand Changes                      | 2023-04-20T19:00                    | 32                                  |
| 4                                                 | Replication 10                      | Demand Changes                      | 2023-04-20T19:00                    | 32                                  |
| 5                                                 | Replication 5                       | Demand Changes                      | 2023-04-20T19:00                    | 32                                  |
| 6                                                 | Replication 8                       | Demand Changes                      | 2023-04-20T19:00                    | 32                                  |
| 7                                                 | Replication 3                       | Demand Changes                      | 2023-04-20T19:00                    | 32                                  |
| 8                                                 | Replication 1                       | Demand Changes                      | 2023-04-20T19:00                    | 32                                  |
| 9                                                 | Replication 9                       | Demand Changes                      | 2023-04-20T19:00                    | 32                                  |

## ۲-۵ بررسی و تجزیه و تحلیل شاخص‌های کلیدی در سناریوی اختلال اول

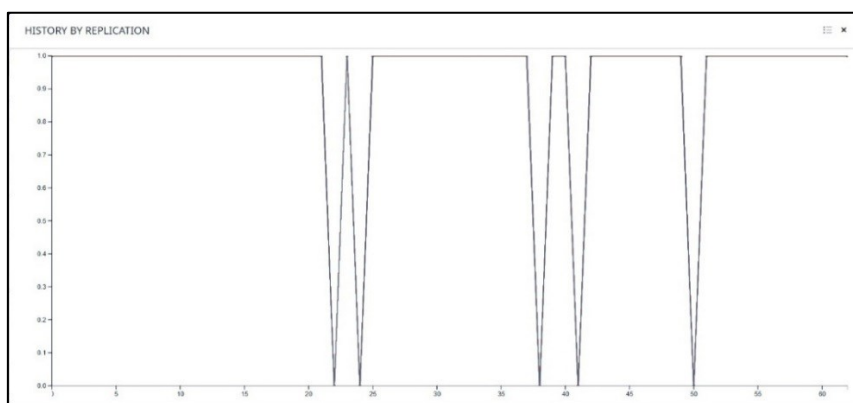
در ادامه، سه شاخص کلیدی مطرح در بررسی اولین سناریوی اختلال شبیه‌سازی شده، یعنی افزایش ناگهانی تقاضا معرفی و تحلیل می‌شوند.

### ۱-۲-۵ شاخص سطح خدمت زمان تحویل مورد انتظار به تفکیک محصول<sup>۴۰</sup>

در نرم‌افزار anyLogistix، نمودار سطح خدمت زمان تحویل مورد انتظار به تفکیک محصول، سطح خدمات ارائه شده به مشتریان را براساس محصولات مختلف ارزیابی می‌کند. این نمودار یکی از شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPI) در تحلیل سطح خدمات زنجیره تأمین است و نشان می‌دهد که چه درصدی از سفارش‌ها برای هر محصول، در زمان مورد انتظار تحویل داده شده‌اند.

اگر سطح خدمات برخی محصولات پایین باشد، ممکن است نیاز به افزایش ظرفیت انبارها، بهینه‌سازی مسیرهای حمل و نقل، کاهش زمان پردازش سفارش‌ها و بهبود مدیریت موجودی باشد. این نمودار، ابزار قدرتمندی برای تحلیلگران و مدیران زنجیره تأمین است تا تصمیمات آگاهانه‌ای را برای بهبود سطح خدمات و تحویل به موقع محصولات بگیرند.

شکل ۴، تغییرات مقدار شاخص سطح خدمت زمان تحویل مورد انتظار را به تفکیک محصول، پس از اجرای سناریوی اختلال افزایش ناگهانی تقاضا در تکرارهای مختلف شبیه‌سازی در نرم‌افزار anyLogistix نشان می‌دهد.



شکل ۴- مقدار شاخص ELT Service Level By Products در هر تکرار شبیه‌سازی

Fig. 4- ELT Service Level by Products under sudden demand increase scenario

## ۲-۲-۵ شاخص Recovery Time

جدول زمان بازیابی در نرم‌افزار anyLogistix، مدت زمان بازیابی زنجیره تأمین را پس از وقوع یک اختلال یا رویداد غیرمنتظره نشان می‌دهد. این جدول، یکی از شاخص‌های مهم برای ارزیابی تاب‌آوری زنجیره تأمین است بررسی می‌کند که پس از وقوع یک مشکل، چقدر طول می‌کشد تا سیستم به سطح عملکرد عادی خود بازگردد. اگر زمان بازیابی در زنجیره تأمین بیش از حد طولانی باشد، این مسئله به کاهش سطح خدمات، افزایش هزینه‌ها، نارضایتی مشتریان و تأثیرات منفی بر عملکرد کلی کسب‌وکار منجر می‌شود. با استفاده از جدول زمان بازیابی، شرکت‌ها برنامه‌های بهتری برای واکنش به بحران‌ها طراحی می‌کنند و تاب‌آوری زنجیره تأمین خود را افزایش می‌دهند.

در جدول ۹، مدت زمان بازیابی بعد از اختلال، پس از افزایش ناگهانی تقاضای یکی از مشتریان زنجیره تأمین محصولات پروتئینی ارائه شده است.

جدول ۹- مدت زمان بازیابی زنجیره تأمین محصولات پروتئینی پس از وقوع اختلال (افزایش سه برابری تقاضای یکی از مشتریان)

Table 9- Recovery time of the protein supply chain after a disruption (tripling of demand by one customer)

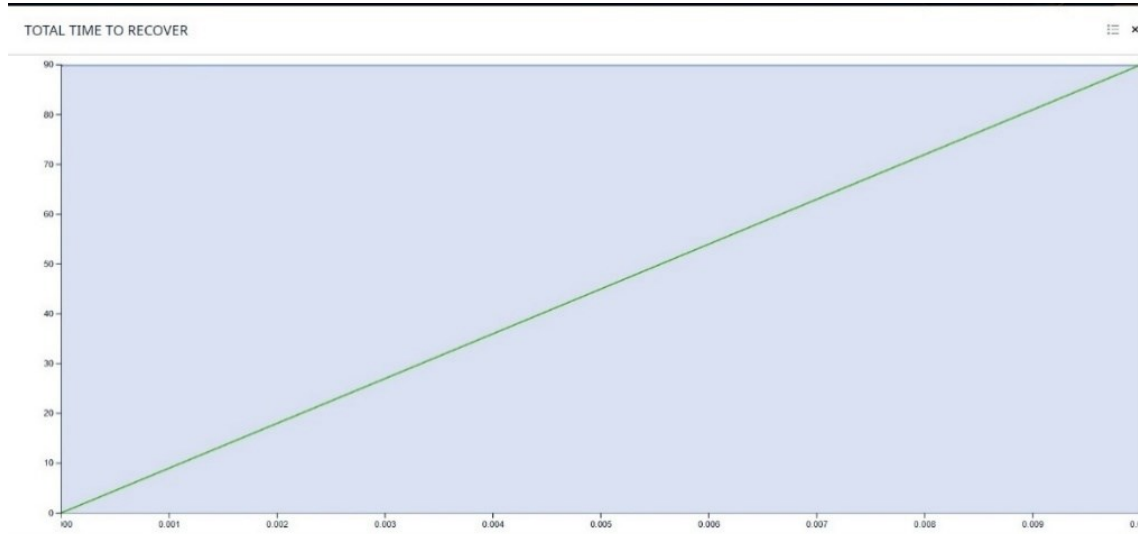
| تکرار                      | محصول                 | روز شروع | روز پایان    | زمان (روز) |
|----------------------------|-----------------------|----------|--------------|------------|
| ۱، ۲، ۳، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰ | گوشت راسته مغز گوساله | ۲۲       | بدون بازیابی | ۴۰         |

## ۳-۲-۵ شاخص Total Time to Recover (TTR)

نمودار زمان کل بازیابی (TTR) در نرم‌افزار anyLogistix، مدت زمان لازم برای بازیابی کامل زنجیره تأمین را پس از وقوع یک اختلال نمایش و نشان می‌دهد که پس از وقوع یک رویداد غیرمنتظره (مانند تأخیر حمل‌ونقل، خرابی تجهیزات، کمبود موجودی، یا بلایای طبیعی)، چه مدت طول می‌کشد تا سیستم به عملکرد عادی خود بازگردد.

زمان بازیابی طولانی افزایش هزینه‌ها، کاهش بهره‌وری و نارضایتی مشتریان و کاهش آن، افزایش تاب‌آوری، کاهش ریسک و بهبود سطح خدمات را به دنبال دارد. با استفاده از این نمودار، کسب‌وکارها زنجیره تأمین مقاوم‌تر و کارآمدتری را ایجاد می‌کنند و در برابر اختلالات، واکنش سریع‌تری دارند.

در شکل ۵، نمودار مدت‌زمان لازم برای بازیابی کامل زنجیره تأمین محصولات پروتئینی، پس از وقوع اختلال شبیه‌سازی شده، یعنی افزایش ناگهانی تقاضای یکی از مشتریان این زنجیره، ترسیم شده است. نکته حائز اهمیت آن است که مکانیزم‌های بازیابی در مدل حاضر براساس سیاست‌های تعریف‌شده از سوی تحلیل‌گر پیاده‌سازی شده‌اند و نرم‌افزار به‌صورت خودکار، اقدام به افزایش ظرفیت، تغییر مسیر یا تخصیص منبع جایگزین نمی‌کند. در این مدل، بازیابی زمانی محقق می‌شود که جریان تأمین و ارسال سفارش‌ها مطابق سیاست انبار متقاطع و سیاست‌های حمل‌ونقل تعریف‌شده، به حالت پایدار اولیه بازگردد؛ بنابراین مقادیر ثبت‌شده برای شاخص‌های زمان بازیابی و زمان کل بازیابی منعکس‌کننده رفتار شبکه، تحت سیاست‌های فعلی و بدون اعمال سازوکارهای بازیابی خودکار یا تخصیص سریع منابع جدید است. این نکته نشان می‌دهد که در صورت وجودداشتن مکانیزم‌های بازیابی فعال، زمان بازگشت شبکه به سطح سرویس اولیه طولانی‌تر است.



شکل ۵- نمودار زمان بازیابی زنجیره تأمین محصولات پروتئینی پس از وقوع اختلال

Fig. 5- Total Time to Recover (TTR) after a demand surge disruption in the protein supply chain network.

### ۳-۵ تحلیل حساسیت تأثیر شدت اختلال تقاضا

به‌منظور بررسی تأثیر شدت اختلال تقاضا بر شاخص‌های تاب‌آوری زنجیره تأمین، تحلیل حساسیت نسبت به ضرایب مختلف افزایش تقاضا برای مشتری ۱ انجام شد. در این تحلیل، چهار سناریوی مجزا با ضرایب ۱، ۲، ۳ و ۴ برابر تقاضای پایه ارزیابی شدند. برای هر سناریو، ۱۰ تکرار شبیه‌سازی مونت‌کارلو اجرا و شاخص‌های کلیدی شامل سطح خدمت مبتنی بر زمان تحویل مورد انتظار، زمان بازیابی و زمان بازیابی کامل شبکه محاسبه شد. نتایج جدول ۱۰ نشان می‌دهد که افزایش شدت اختلال، موجب کاهش درخور توجه سطح سرویس و افزایش مدت‌زمان بازیابی می‌شود؛ به‌ویژه از ضریب ۳ به بالا، شبکه وارد ناحیه ناپایداری می‌شود و برخی محصولات در بیشتر تکرارها به سطح سرویس مطلوب بازمی‌گردند. این موضوع، نمایانگر محدودیت ظرفیت تأمین‌کنندگان و محدودیت سیاست انبار متقاطع در پاسخ‌گویی به شوک‌های تقاضای شدید است.

جدول ۱۰ - نتایج تحلیل حساسیت افزایش تقاضای مشتری ۱

Table 10- Results of sensitivity analysis for demand increase of Customer 1

| ضریب افزایش تقاضا | میانگین سطح سرویس (%) | حداقل سطح سرویس (%) | میانگین زمان بازیابی (روز) | TTR روز      |
|-------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|--------------|
| ۱/۵ برابر         | ٪۹۶                   | ٪۹۲                 | ۴                          | ۶            |
| ۲ برابر           | ٪۸۹                   | ٪۸۱                 | ۹                          | ۱۲           |
| ۳ برابر           | ٪۶۳                   | ٪۰                  | ۲۲                         | بازیابی نشده |
| ۴ برابر           | ٪۴۱                   | ٪۰                  | بدون بازیابی               | بدون بازیابی |

همان‌طور که جدول ۱۰ نشان می‌دهد، شبکه تا ضریب ۲، توانایی بازیابی دارد؛ اما از ضریب ۳ به بالا، ظرفیت زنجیره برای پاسخ‌گویی کافی نیست و موجودی ورودی تأمین‌کنندگان، با سرعت کافی جبران نمی‌شود. به همین دلیل، پیشنهاد می‌شود در طراحی شبکه، ظرفیت‌های پشتیبان، انعطاف‌پذیری تأمین و سیاست‌های موجودی ایمنی برای محصولات پرمصرف بازنگری شوند.

#### ۴-۵ تحلیل نتایج مقایسه سناریوهای اختلال

علاوه بر سناریوی افزایش سه برابری تقاضای یکی از مشتریان، سه سناریوی دیگر اختلال شامل اختلال تأمین، اختلال انبار متقاطع و اختلال حمل‌ونقل طراحی و در مدل شبیه‌سازی، پیاده‌سازی شد. نتایج مقایسه‌ای این سناریوها در جدول‌های ۱۱ تا ۱۳ گزارش شده است. هدف از این سناریوها، ارزیابی چندبعدی رفتار شبکه و شناسایی گلوگاه‌های عملیاتی در مواجهه با انواع مختلف اختلال است.

جدول ۱۱، سطح خدمت زنجیره تأمین را در سه وضعیت «پیش از اختلال»، «حین وقوع اختلال» و «پس از مرحله بازیابی» برای سناریوهای مختلف اختلال نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سطح خدمت در شرایط عادی شبکه در همه سناریوها در سطح بالایی قرار دارد؛ با این حال، وقوع اختلال به کاهش محسوس سطح خدمت منجر می‌شود. بیشترین افت سطح خدمت پس از بازیابی، مربوط به سناریوی اختلال حمل‌ونقل است که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بیشتر شبکه در برابر اختلالات لجستیکی است. در مقابل، سناریوی افزایش ناگهانی تقاضا با وجود ایجاد فشار بر شبکه، کاهش کمتری در سطح خدمت نسبت به دیگر سناریوها نشان می‌دهد که بیانگر انعطاف‌پذیری نسبی شبکه در مواجهه با شوک‌های سمت تقاضاست.

جدول ۱۱- مقایسه سطح خدمت مبتنی بر زمان تحویل مورد انتظار در سناریوهای مختلف اختلال

Table 11- Comparison of ELT service level across different disruption scenarios

| سناریو                             | سطح خدمت قبل از اختلال (%) | سطح خدمت پس از بازیابی (%) | سطح خدمت در زمان اختلال (%) |
|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| سناریوی ۱: افزایش سه برابری تقاضا  | ۹۷/۸                       | ۶۲/۴                       | ۸۸/۷                        |
| سناریوی ۲: اختلال تأمین            | ۹۷/۸                       | ۵۵/۱                       | ۷۹/۳                        |
| سناریوی ۳: کاهش ظرفیت انبار متقاطع | ۹۷/۸                       | ۵۸/۹                       | ۸۳/۵                        |
| سناریوی ۴: اختلال حمل‌ونقل         | ۹۷/۸                       | ۴۹/۶                       | ۸۱/۸                        |

جدول ۱۲، مقایسه شاخص‌های زمان بازیابی و زمان کل بازیابی (TTR) زنجیره تأمین را در سناریوهای مختلف اختلال نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که شدت و نوع اختلال، تأثیر درخور توجهی بر سرعت و کیفیت بازیابی شبکه دارد. سناریوهای اختلال تأمین و حمل‌ونقل، با وجود زمان بازیابی طولانی‌تر، در نهایت به بازیابی کامل شبکه منجر شده‌اند؛ در حالی که در سناریوهای افزایش ناگهانی تقاضا و کاهش ظرفیت انبار متقاطع، بازیابی شبکه به صورت ناقص انجام شده است. این نتایج نشان می‌دهد که محدودیت‌های ساختاری ظرفیت در برخی بخش‌های شبکه، مانع از بازگشت کامل عملکرد سیستم به سطح پیش از اختلال می‌شود.

جدول ۱۲- مقایسه شاخص زمان بازیابی و TTR در سناریوهای اختلال

Table 12- Comparison of recovery time and time-to-recovery (TTR) across disruption scenarios

| سناریو                             | زمان بازیابی (ساعت) | TTR (ساعت) | وضعیت بازیابی |
|------------------------------------|---------------------|------------|---------------|
| سناریوی ۱: افزایش سه برابری تقاضا  | ۴۸                  | ۱۲۰        | ناقص          |
| سناریوی ۲: اختلال تأمین            | ۷۲                  | ۱۶۸        | کامل          |
| سناریوی ۳: کاهش ظرفیت انبار متقاطع | ۶۰                  | ۱۴۴        | ناقص          |
| سناریوی ۴: اختلال حمل‌ونقل         | ۹۶                  | ۱۹۲        | کامل          |

جدول ۱۳، وضعیت تحویل، تقاضا و میزان کمبود زنجیره تأمین را در سناریوهای مختلف اختلال نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی سناریوها، اختلاف معناداری بین کل تقاضا و مقدار تحویل شده وجود دارد که به بروز کمبود در شبکه منجر شده است. بیشترین میزان کمبود و درصد کمبود، مربوط به سناریوی اختلال حمل‌ونقل است که بیانگر تأثیر شدید اختلالات لجستیکی بر توان پاسخ‌گویی شبکه، به تقاضای مشتریان است. در مقابل، سناریوهای افزایش تقاضا و کاهش ظرفیت انبار متقاطع، با وجود ایجاد فشار بر شبکه، کمبود نسبتاً کمتری را تجربه کرده‌اند. این نتایج اهمیت مدیریت ظرفیت حمل‌ونقل و انعطاف‌پذیری لجستیکی را عوامل کلیدی در کاهش کمبودها می‌داند و آنها را برجسته می‌کند.

جدول ۱۳- وضعیت تحویل و کمبود در سناریوهای اختلال

Table 13- Delivery performance and shortage levels under different disruption scenarios

| سناریو    | کل تحویل (تن) | کل تقاضا (تن) | کمبود (تن) | درصد کمبود |
|-----------|---------------|---------------|------------|------------|
| سناریوی ۱ | ۱۸۸           | ۲۱۴           | ۲۶         | ۱۲/۱٪      |
| سناریوی ۲ | ۱۷۲           | ۱۹۸           | ۲۶         | ۱۳/۱٪      |
| سناریوی ۳ | ۱۸۱           | ۲۰۷           | ۲۶         | ۱۲/۶٪      |
| سناریوی ۴ | ۱۶۵           | ۱۹۸           | ۳۳         | ۱۶/۹٪      |

براساس نتایج به دست آمده:

- در سناریوی اختلال تأمین: کاهش ۵۰ درصدی ظرفیت تأمین‌کننده اصلی به افت درخور توجه سطح خدمت (تا حدود ۵۵ درصد) منجر شد. افزایش زمان تدارک تأمین نیز بر موجودی عملیاتی انبار متقاطع اثرگذار بوده و زمان بازیابی شبکه را به بیش از ۷۲ ساعت، افزایش داده است؛ با این حال، پس از پایان دوره اختلال، شبکه قادر به بازیابی کامل بوده است.
- در سناریوی اختلال محدودیت ظرفیت انبار متقاطع: کاهش ۴۰ درصدی ظرفیت پردازش، باعث ایجاد تراکم سفارش‌ها و انباشت در صف پردازش شد. سطح خدمت در دوره اختلال، به ۵۹ درصد کاهش یافت و با

وجود افزایش ظرفیت پس از دوره اختلال، شبکه تنها به حدود ۸۳ درصد سطح خدمت اولیه بازگشت که نشان‌دهنده بازیابی ناقص است.

• در سناریوی اختلال حمل‌ونقل: اختلال در ناوگان حمل‌ونقل بیشترین اثر منفی را بر سطح خدمت داشته و آن را تا ۵۰ درصد کاهش داده است. افزایش زمان سفر و کاهش قابلیت اطمینان تحویل، سبب شد زمان بازیابی به ۹۶ ساعت و زمان کل بازیابی به ۱۹۲ ساعت برسد. این سناریو از نظر شدت اثرگذاری، بحرانی‌ترین حالت برای شبکه محسوب می‌شود.

## ۵-۵ مقایسه کلی سناریوها

نتایج نشان می‌دهد نوع اختلال، تعیین‌کننده شدت اثر آن بر تاب‌آوری شبکه است. در سناریوهای مرتبط با ظرفیت (اختلال تأمین و حمل‌ونقل)، بازیابی کامل با زمان طولانی اتفاق می‌افتد؛ در حالی که در سناریوی افزایش تقاضا و محدودیت انبار مقاطع، شبکه حتی پس از اتمام اختلال نیز، به سطح خدمت پایه بازمی‌گردد. این موضوع نشان می‌دهد گلوگاه اصلی شبکه در بخش پردازش انبار، مقاطع و تأمین ظرفیت حمل است.

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که زنجیره تأمین مطالعه‌شده تنها تا افزایش دوبرابری تقاضا قادر به حفظ سطح سرویس پذیرفتنی است و از ضریب سه‌برابری به بالا، شبکه در بیشتر تکرارها به سطح سرویس اولیه بازمی‌گردد. این یافته‌ها با نتایج سناریوی پایه (افزایش سه‌برابری تقاضا) سازگار است و نشان می‌دهد که ظرفیت تأمین‌کنندگان و محدودیت انبار مقاطع، اصلی‌ترین گلوگاه‌های زنجیره‌اند.

در تحلیل نتایج شبیه‌سازی، در برخی تکرارها و سناریوها پدیده «عدم بازیابی» مشاهده شده است؛ به این معنا که شاخص‌های کلیدی عملکرد، به‌ویژه سطح خدمت مبتنی بر زمان تحویل مورد انتظار، تا پایان افق شبیه‌سازی به آستانه تعریف‌شده بازنگشته‌اند. در این پژوهش، زمانی بازیابی محقق‌شده تلقی می‌شود که سطح خدمت شبکه حداقل به ۹۵ درصد مقدار پایه قبل از اختلال برسد.

نتایج نشان می‌دهد عدم بازیابی عمدتاً در سناریوهای مرتبط، با افزایش شدید تقاضا و محدودیت ظرفیت انبار مقاطع رخ داده است. در این سناریوها، اگرچه پارامترهای خارجی پس از پایان دوره اختلال، به وضعیت اولیه بازمی‌گردند، انباشت سفارش‌های معوق ایجادشده در طول اختلال، به‌گونه‌ای است که ظرفیت عملیاتی شبکه در افق زمانی شبیه‌سازی قادر به جبران آن نیست. این پدیده به باقی ماندن سطح خدمت در مقداری کمتر از سطح پایه منجر می‌شود.

به عبارت دیگر، عدم بازیابی مشاهده‌شده، ناشی از وجود گلوگاه‌های ساختاری در شبکه است و به نقص در مدل شبیه‌سازی مربوط نیست؛ به‌ویژه ظرفیت محدود پردازش در انبار مقاطع و ظرفیت حمل‌ونقل خروجی که باعث می‌شود حتی با بازگشت شرایط محیطی به حالت عادی، شبکه عملکرد پیشین خود را به‌سرعت بازیابی نکند.

این یافته نشان می‌دهد که تاب‌آوری زنجیره تأمین تنها به بازگشت پارامترهای اختلال وابسته نیست، به توان ذاتی شبکه در تخلیه انباشت‌های ایجادشده و مدیریت شوک‌های تجمعی نیز بستگی دارد؛ بنابراین، مشاهده «عدم

بازیابی» در برخی سناریوها یک نتیجه معنادار پژوهشی است که وجود آسیب‌پذیری‌های ساختاری را در زنجیره تأمین محصولات پروتئینی آشکار می‌کند.

از نظر مدیریتی، نتایج عدم بازیابی نشان می‌دهد که افزایش موقت تقاضا یا کاهش کوتاه‌مدت ظرفیت، آثار بلندمدتی بر عملکرد شبکه دارد، مگر آنکه سیاست‌های جبرانی نظیر افزایش موقت ظرفیت پردازش، انعطاف‌پذیری حمل‌ونقل یا ذخیره‌سازی ایمن پیش‌بینی شود. این موضوع، اهمیت استفاده از همزاد دیجیتال شبیه‌سازی‌محور را در شناسایی پیش‌دستانه گلوگاه‌ها و آزمون سیاست‌های تاب‌آورسازی، پیش از وقوع واقعی اختلال برجسته می‌کند.

## ۶- بحث

### ۶-۱ تحلیل نتایج شبیه‌سازی در شرایط اختلال

در راستای ارزیابی تاب‌آوری زنجیره تأمین بررسی‌شده، چهار سناریوی اختلال تعریف شد که طی یکی از آنها، یکی از مشتریان اصلی محصولات پروتئینی با افزایش ناگهانی و غیرمنتظره تقاضا مواجه شد. این اختلال با استفاده از توزیع تصادفی نرمال و انحراف معیار بالا، در نرم‌افزار anyLogistix و در بازه زمانی مشخصی شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از این سناریو، حاکی از آن است که زنجیره تأمین در وضعیت فعلی خود دچار کاهش سطح سرویس، افزایش تأخیر در تحویل و افزایش نرخ سفارش‌های ناتمام شده است.

تحلیل سناریوی افزایش ناگهانی تقاضا نشان داد که حتی اختلالات موقتی در سمت تقاضا، به کاهش شدید سطح خدمت و ایجاد انباشت سفارش‌های معوق منجر می‌شوند. در این سناریو، با وجود بازگشت شرایط محیطی به وضعیت اولیه، شبکه قادر به بازیابی کامل سطح خدمت نبود که این امر نشان‌دهنده وجود محدودیت‌های ساختاری در ظرفیت پردازش و حمل‌ونقل است. این یافته با نتایج مطالعات پیشین در زمینه آثار تجمعی اختلالات هم‌راستاست؛ اما به‌طور خاص، اهمیت گلوگاه‌های انبار متقاطع را در زنجیره‌های تأمین محصولات پروتئینی برجسته می‌کند.

در سناریوی اختلال تأمین، کاهش ظرفیت تأمین‌کننده اصلی به افت محسوس سطح خدمت و افزایش زمان بازیابی منجر شد؛ با این حال پس از رفع اختلال، شبکه به سطح خدمت اولیه بازگشت. این نتیجه نشان می‌دهد که زنجیره تأمین مطالعه‌شده در برابر اختلالات سمت تأمین، از تاب‌آوری نسبی برخوردار است، مشروط بر آنکه افق زمانی کافی برای جبران کمبودها وجود داشته باشد.

سناریوی محدودیت ظرفیت انبار متقاطع نیز، آثار درخور توجهی بر عملکرد شبکه داشت. کاهش ظرفیت پردازش باعث ایجاد تراکم در جریان کالا و کاهش پایدار سطح خدمت شد. عدم بازیابی کامل در این سناریو، نشان می‌دهد که انبار متقاطع یکی از عناصر کلیدی شبکه است و نقشی تعیین‌کننده در تاب‌آوری کل زنجیره دارد.

در مقابل، اختلال حمل‌ونقل بحرانی‌ترین سناریو از نظر زمان بازیابی و TTR بود و بیشترین افت سطح خدمت را به همراه داشت، هرچند شبکه در نهایت به وضعیت پایدار بازگشت.

مهم‌ترین شاخص‌های تأثیرگذار در سناریوهای اختلال عبارت‌اند از:

- کاهش سطح سرویس از ۱۰۰٪ به صفر، در برخی از تکرارهای شبیه‌سازی؛
- افزایش مدت‌زمان لازم برای بازیابی زنجیره تأمین؛

- افزایش میانگین زمان تحویل تا ۲/۵ برابر مقدار پایه؛
- افزایش هزینه‌های فوری حمل و نقل و تأمین اضطراری؛
- افزایش نرخ کمبود کالا در نقاط پایانی زنجیره.

## ۶-۲ راهکارهای افزایش تاب‌آوری

یکی از یافته‌های مهم این پژوهش، مشاهده پدیده «عدم بازیابی» در برخی سناریوها بود. این پدیده نشان می‌دهد که تاب‌آوری زنجیره تأمین تنها به حذف عامل اختلال وابسته نیست، به ظرفیت‌های درونی شبکه برای مدیریت آثار انباشته‌شده اختلال نیز بستگی دارد. چنین رفتاری اهمیت تحلیل پویای سیستم و استفاده از همزاد دیجیتال شبیه‌سازی محور را برای شناسایی آسیب‌پذیری‌های پنهان شبکه آشکار می‌کند.

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوهای اختلال، چندین راهکار به‌منظور افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین پیشنهاد می‌شود که به‌عنوان تصمیمات راهبردی در مرحله طراحی دیجیتال و پیاده‌سازی همزاد دیجیتال به کار می‌روند:

۱. استفاده از ظرفیت انعطاف‌پذیر تولید: تخصیص ظرفیت مازاد در مراکز تولیدی، برای پاسخگویی به تقاضای ناگهانی، از طریق ایجاد برنامه تولید پویا و قابلیت تغییر خطوط تولید در شرایط بحرانی؛
۲. افزایش سطح ذخایر ایمنی<sup>۵۱</sup>: تعیین سطوح بهینه‌ای از ذخایر ایمنی در مراکز توزیع برای محصولات با نوسان بالای تقاضا، با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی مبتنی بر ریسک؛
۳. استفاده از چند تأمین‌کننده<sup>۵۲</sup>: به‌کارگیری تأمین‌کننده‌های جایگزین یا موازی برای تأمین مواد اولیه، به‌ویژه برای اقلامی که در شرایط اوج تقاضا بحرانی می‌شوند؛
۴. مسیریابی پویا و توزیع مجدد منابع<sup>۵۳</sup>: پیاده‌سازی سیاست‌های انعطاف‌پذیر در انتخاب مسیرهای توزیع، استفاده از امکانات لجستیکی نزدیک‌تر و کاهش وابستگی به یک مسیر یا مرکز توزیع خاص؛
۵. پیش‌بینی تقاضا با مدل‌های هوش مصنوعی: استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی رفتار تقاضای مشتریان و فعال‌سازی هشدارهای پیشگیرانه در همزاد دیجیتال؛
۶. ادغام زنجیره تأمین دیجیتال با زیرساخت‌های آبی<sup>۵۴</sup>: تقویت سیستم‌های رهگیری سفارش، تحلیل بلادرنگ موجودی و به‌روزرسانی هم‌زمان سیاست‌های حمل و تولید از طریق همزاد دیجیتال.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک همزاد دیجیتال مبتنی بر شبیه‌سازی برای تحلیل تاب‌آوری زنجیره تأمین محصولات پروتئینی طراحی و پیاده‌سازی شد. هدف اصلی، بررسی رفتار شبکه در شرایط عادی و مواجهه با انواع مختلف اختلال و شناسایی گلوگاه‌های عملکردی بود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نشان داد که شدت و نوع اختلال، نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان افت عملکرد و قابلیت بازیابی شبکه دارند.

از نظر نوآوری، این پژوهش با تمرکز بر زنجیره تأمین محصولات پروتئینی، خلأ موجود در پیشینه همزاد دیجیتال زنجیره تأمین را پوشش می‌دهد. توسعه یک مدل نمونه اولیه همزاد دیجیتال مبتنی بر شبیه‌سازی، تحلیل چندسناریویی

اختلالات و استفاده هم‌زمان از شاخص‌های سطح خدمت، زمان بازیابی TTR از جمله دستاوردهای علمی و کاربردی این مطالعه است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که به چارچوب‌های مفهومی یا مدل‌های ساده بسنده کرده‌اند، در این پژوهش، از داده‌های واقعی و یک پلتفرم یکپارچه برای تحلیل رفتار شبکه استفاده شده است.

از نظر مدیریتی، نتایج نشان می‌دهد که افزایش انعطاف‌پذیری ظرفیت پردازش در انبار متقاطع، تقویت ناوگان حمل‌ونقل و پیش‌بینی سیاست‌های واکنشی برای شوک‌های تقاضا، نقش مهمی در بهبود تاب‌آوری زنجیره تأمین محصولات پروتئینی دارد. استفاده از همزاد دیجیتال شبیه‌سازی‌محور، این امکان را فراهم می‌آورد که تصمیم‌گیرندگان پیش از اجرای واقعی سیاست‌ها، اثر آنها را در محیطی امن و کم‌هزینه ارزیابی کنند.

باید توجه داشت که مدل ارائه‌شده، یک نمونه اولیه همزاد دیجیتال در سطح شبیه‌سازی است و اتصال آن به داده‌های بلادرنگ و سامانه‌های اطلاعاتی سازمانی، مسیر توسعه آتی در نظر گرفته می‌شود. همچنین، توسعه مدل‌های ترکیبی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، افزایش تنوع سناریوهای اختلال و مقایسه نتایج با روش‌های تحلیلی دیگر، به تعمیق یافته‌های این پژوهش در مطالعات آینده کمک می‌کند.

هرچند همزادهای دیجیتال در پیشینه با قابلیت‌های بلادرنگ شناخته می‌شوند، مدل حاضر در سطح شبیه‌سازی و تحلیل سناریو توسعه یافته است و تبدیل آن به یک سیستم بلادرنگ، در گام‌های آتی انجام‌شدنی است.

درنهایت، پیشنهاد می‌شود که سازمان‌ها برای افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین خود، از مدل‌سازی همزاد دیجیتال بهره بگیرند و با استفاده از تحلیل بلادرنگ داده‌ها و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف، بهترین راهکارهای مدیریتی را اتخاذ کنند. افزایش دقت در پیش‌بینی ریسک‌ها، بهینه‌سازی منابع و بهبود زمان واکنش به بحران‌ها، از جمله مزایای کلیدی استفاده از این رویکرد است که رقابت‌پذیری کسب‌وکارها را در محیط‌های پرچالش امروزی افزایش می‌دهد. همچنین تحقیقات آینده در این زمینه، به بهبود قابلیت پیش‌بینی، کاهش ریسک‌های زنجیره تأمین و افزایش انعطاف‌پذیری در مواجهه با بحران‌ها کمک می‌کند و موجب ارتقای بهره‌وری و تاب‌آوری سازمان‌ها در دنیای رقابتی امروز می‌شود.

## References

- Alshahrani, A., & Alghamdi, A. (2024). A theoretical framework for graph-based digital twins for supply chain management and optimization. arXiv preprint arXiv:2504.03692. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.03692>.
- Bolton, R.N., McColl-Kennedy, J.R., Cheung, L., Gallan, A., Orsingher, C., Witell, L., and Zaki, M. (2018). Customer experience challenges: bringing together digital, physical, and social realms. *Journal of Service Management*, 29(5), 776–808. [Doi: 10.1108/JOSM-04-2018-0113](https://doi.org/10.1108/JOSM-04-2018-0113).
- Burgos, D., & Ivanov, D. (2021). Food retail supply chain resilience and the COVID-19 pandemic: A digital twin-based impact analysis and improvement directions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 152, 102412.
- Chen, X. (2024). Optimizing agility in the pharmaceutical supply chain using digital twins to cope with the ripple effect. *Frontiers in Business, Economics and Management*, 17(1), 338–352.
- Chidozie, B., Ramos, A., Vasconcelos, J., & Ferreira, L. P. (2024). Development of a residual biomass supply chain simulation model using AnyLogistix: A methodical approach. *Logistics*, 8(4), 107. <https://doi.org/10.3390/logistics8040107>.
- Ivanov, D. (2024). Transformation of supply chain resilience research through the COVID-19 pandemic. *International Journal of Production Research*, 62(23), 8217-8238.

- Ivanov, D. (2020). Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains: A simulation-based analysis on the coronavirus outbreak (COVID-19/SARS-CoV-2). *Transportation Research Part E*, 136, 101922.
- Ivanov, D., Dolgui, A., & Das, A. (2023). A hybrid simulation–optimization approach for managing supply chain resilience under COVID-19 demand disruptions. *International Journal of Production Research*, 61(5), 1583–1601. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2137597>.
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2021). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 59(12), 374–394.
- Ivanov, D., A., Dolgui, and Sokolov, B. (2019). The Impact of Digital Technology and Industry 4.0 on the Ripple Effect and Supply Chain Risk Analytics. *International Journal of Production Research*, 57 (3), 829–846. [doi:10.1080/00207543.2018.1488086](https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1488086).
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2019). New disruption risk management perspectives in supply chains: Digital twins, the ripple effect, and resilience. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 337–342.
- Klochkov, V., Selezneva, I., & Kovalchuk, J. (2021). *Digital twins application in managing the scientific and technological development of high-tech industries*. In \*Technology and Business Strategy: Digital Uncertainty and Digital Solutions\* (pp. 91–112). Palgrave Macmillan, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-63974-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-63974-7_6).
- Li, K., Bashiri, M., Lim, M. K., & Akpobi, T. (2025). How to improve supply chain sustainable performance by resilience practices through dynamic capability view: Evidence from Chinese construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 212, 107965.
- Liu, C., Shang, Y., & Zhong, R. (2018). A digital twin-based simulation approach for supply chain risk analysis. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(7), 627–640.
- Liu, Z., & Nishi, T. (2024). Data-driven evolutionary computation for service constrained inventory optimization in multi-echelon supply chains. *Complex & Intelligent Systems*, 10(1), 825–846.
- Liu, Y., & Wang, X. (2023). Digital twins in sustainable supply chains: A comprehensive review of current applications and key enablers. *Proceedings*, 79(1), 64. <https://doi.org/10.3390/proceedings2023079064>.
- Longo, F., Manfredi, K. A., Solina, V., Conte, R., & Cosma, A. (2024). Improving supply chain sustainability and resilience via anyLogistix: research trends and future challenges. *Procedia Computer Science*, 232, 1721–1728.
- Longo, F., Nicoletti, L., & Padovano, A. (2019). Smart operators in industry 4.0: a human-centered approach to enhance operators' capabilities and performance within the new smart factory context. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105–123.
- Marmolejo-Saucedo, J. A., & Osornio, A. C. (2021). *An approximate solution proposal to the vehicle routing problem through simulation-optimization approach*. In \*International Conference on Intelligent Computing & Optimization\* (pp. 634–646). Springer International Publishing, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68154-8\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68154-8_52).
- Müller, J., Bittner, S., & Voigt, K.-I. (2023). Cyber resilience through digital twins: A concept for supply chain security exercises in the food sector. *Computers & Industrial Engineering*, 178, 109061. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109061>.
- Popkov, T., & Zharebtscov, A. (2019). *Design your supply chain run with digital twin*. Presented at \*AnyLogic Conference 2019\*. Retrieved from <https://www.anylogic.ru/upload/conference/2019/presentations/anyLogistix-create-your-supply-chain-digital-twin.pdf>.
- Schuster, R., Mitjavila, L., & Penazzo, C. (2024). *Using digital twins to manage complex supply chains*. Boston Consulting Group (BCG). Retrieved from <https://www.bcg.com/publications/2024/using-digital-twins-to-manage-complex-supply-chains>

- SimWell. (2024). *Reimagining supply chain network optimization*. \*SimWell Blog\*. Retrieved from <https://www.simwell.io/en/blog/supply-chain-optimization-digital-twin>.
- Wang, J., & Zhao, L. (2023). Research on real-time robust optimization of perishable supply chain system based on digital twin. *Sensors*, 23(4), 1850. <https://doi.org/10.3390/s23041850>
- Zhang, Y., & Li, H. (2023). Disruption detection for a cognitive digital supply chain twin using hybrid deep learning. *Annals of Operations Research*, 308(1), 123–145. <https://doi.org/10.1007/s12351-024-00831-y>.

- 
- <sup>1</sup> Real-time  
<sup>2</sup> Marmolejo-Saucedo and Osornio  
<sup>3</sup> Alshahrani & Alghamdi  
<sup>4</sup> Liu and Nishi  
<sup>5</sup> Zhang & Li  
<sup>6</sup> Müller et al.  
<sup>7</sup> Ivanov et al.  
<sup>8</sup> Chen  
<sup>9</sup> Simwell  
<sup>10</sup> Liu and Wang  
<sup>11</sup> Wang & Zhao  
<sup>12</sup> Chidozie et al.  
<sup>13</sup> Li et al.  
<sup>14</sup> Supply Chain Resilience  
<sup>15</sup> Sustainable Supply Chain Performance  
<sup>16</sup> Ivanov  
<sup>17</sup> Ivanov & Dolgui  
<sup>18</sup> Longo et al.  
<sup>19</sup> Liu et al.  
<sup>20</sup> Recovery  
<sup>21</sup> Total Time to Recover  
<sup>22</sup> Prototype  
<sup>23</sup> Service Level  
<sup>24</sup> Total Time to Recover  
<sup>25</sup> Longo et al.  
<sup>26</sup> Personal Learning Edition  
<sup>27</sup> Risk Analysis Experiment  
<sup>28</sup> Resilience Strategies  
<sup>29</sup> Key Performance Indicator  
<sup>30</sup> Lead Time  
<sup>31</sup> Cross Dock  
<sup>32</sup> Quantity  
<sup>33</sup> Replenishment  
<sup>34</sup> Full Truckload (FTL)  
<sup>35</sup> Min Load Ratio  
<sup>36</sup> Partial Delivery  
<sup>37</sup> Early/Late Time (ELT)  
<sup>38</sup> Delivery Cost  
<sup>39</sup> Distance-based with Cost Calculation  
<sup>40</sup> Sourcing  
<sup>41</sup> Closest  
<sup>42</sup> Failure Service Level  
<sup>43</sup> Recovery Service Level  
<sup>44</sup> Disruption Scenarioa  
<sup>45</sup> What-if Scenarios  
<sup>46</sup> Travel Time  
<sup>47</sup> Stress Testing  
<sup>48</sup> Tolerance Threshold  
<sup>49</sup> Shock Scenarios  
<sup>50</sup> ELT Service Level by Products  
<sup>51</sup> Safety Stock  
<sup>52</sup> Multi-sourcing  
<sup>53</sup> Dynamic Re-routing  
<sup>54</sup> Real-time Integration

**This page intentionally left blank.**