

Resilience Assessment of a Polypropylene-Based Plastic Products Supply Chain under Severe Supply Disruption: A Sequential Optimization–Discrete-Event Simulation Approach

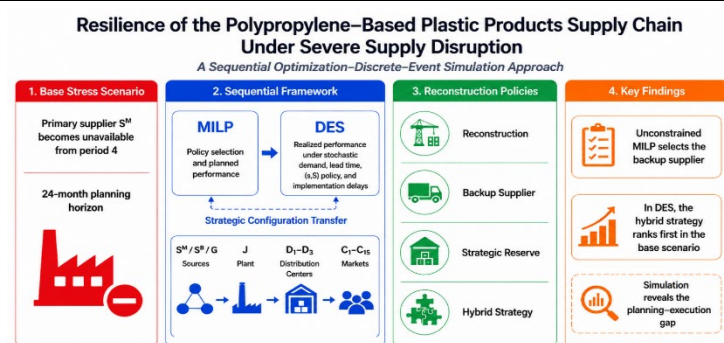
Ali Ashaehshoar , Mohammad Hosein Tavakkoli , Mohammad Sheikhalishahi *

School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- A sequential optimization–simulation framework was developed to assess supply chain resilience.
- The combined strategy achieved the best financial performance among recovery policies.
- A gap between planned and realized performance was identified.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 29 July 2026

Revised: 19 September 2026

Accepted: 29 September 2026

Available online: 29 September 2026

*Correspondence:

m.alishahi@ut.ac.ir

How to cite this article:

Ashaehshoar, A., Tavakkoli, M. H., & Sheikhalishahi, M. (2027). Resilience Assessment of a polypropylene-based plastic products supply chain under severe supply disruption: A sequential optimization–discrete-event simulation approach. *System Engineering and Productivity*, 7 (2), 71-107.

Keywords:

Supply Chain

Resilience

Plastic Products

MILP

Severe Supply Disruption

Discrete-Event Simulation

Recovery Strategies

ABSTRACT

This study presents a sequential optimization–simulation framework for evaluating the resilience of a polypropylene-based plastic-products supply chain under a severe supply disruption. A multi-period mixed-integer linear programming (MILP) model is developed over a 24-month horizon, with the primary supplier becoming unavailable from period four in the base stress scenario. The model selects among the reconstruction of the disrupted primary supplier, the activation of a backup supplier, the pre-positioning of plant-level strategic inventory, and a combined policy consisting of backup sourcing and strategic inventory. In addition to an unrestricted run for endogenous strategy selection, the model is solved under six predefined configurations: normal operations, no recovery, seven-month reconstruction, backup supplier, strategic inventory, and combined strategy, enabling comparison of their planned performance. The strategic decisions from each configuration are then transferred to a discrete-event simulation model developed in AnyLogistix, without imposing the deterministic flows generated by the MILP model. The simulation evaluates realized performance under stochastic demand, transportation times, an (s, S) inventory policy, implementation delays, and dynamic inventory behavior. Ten independent replications are conducted for each scenario, and differences in mean profit are assessed using Welch's one-way ANOVA and the Games–Howell post hoc test. The unrestricted MILP model selects the backup supplier, yielding a planned profit of 1,134.091 billion tomans and a 100% service level. Simulation results show that the absence of a recovery strategy reduces the mean profit by 72.14% relative to normal operations. The combined strategy achieves the best financial performance among recovery policies, with a mean profit of 926.680 billion tomans, recovering 74.29% of the lost profit. These findings show that the strategy with the highest planned performance may not yield the best realized outcome; combining optimization-based policy selection with dynamic simulation therefore provides a complementary basis for comparing planned and realized performance.

1. Introduction

The importance of supply chains has grown significantly in recent decades. Increasing competition in delivery time and rising customer expectations have encouraged companies to adopt advanced logistics strategies and agile supply chain practices (Tavakkoli et al., 2027). Supply chains in the plastic sector in developing countries have increasingly faced multifaceted, prolonged, and layered disruptions. Unlike short-term, localized problems that are typically resolved through buffer inventory, rescheduling, or limited transport changes, composite situations can affect the availability of feedstock, production capacity, mobility facilities, delivery time, logistics costs, and market stability (Hughes et al., 2023). Under such conditions, supply chain vulnerability cannot be attributed solely to a single node or route; rather, it arises from interdependencies among inventory, sourcing, transportation, capacity, and policy response decisions. The supply chain risk management literature indicates that focusing exclusively on efficiency under normal operating conditions, without considering resilience, can create structural vulnerability in turbulent environments (Katsaliaki et al., 2022).

The plastics industry provides a clear illustration of this vulnerability, especially in countries where much of the value chain relies on petrochemical materials. In this setting, limited access to basic polymers can rapidly reduce production, lower service levels, increase lost sales and unmet demand, and raise transportation costs. These characteristics make plastic-products supply chains a relevant context for examining both robustness and viability (Raghuram & Jawahar, 2021). Traditionally, resilience was largely understood as the ability of a supply chain to return quickly to its pre-disruption state. More recent studies, however, suggest that under severe and prolonged shocks, the challenge extends beyond recovery to the maintenance of survival and service continuity, even when the original supply chain structure cannot be fully restored (Graveline & Germain, 2022).

The specific characteristics of the plastics industry—including its dependence on petrochemical feedstocks, customers' sensitivity to delivery times, and the relatively low value-to-weight ratio of its products—make its supply chains particularly vulnerable. Any interruption in access to base polymers, such as polypropylene, can halt production in the short term and rapidly deplete available inventory. Supply risks have intensified as crises such as earthquakes, the COVID-19 pandemic, and the Russia–Ukraine war have coincided with transportation disruptions and higher customs tariffs, increasing the cost and lead time of raw-material procurement (Guo et al., 2025). Moreover, the geographical concentration of production facilities and heavy reliance on a single supplier can

allow a disruption at one facility to interrupt raw-material flows across the network. The present study examines this vulnerability through an interruption in polypropylene supply.

Optimization and discrete-event simulation play complementary roles in this study. The MILP model determines the economically preferred recovery policy and a reference plan under expected demand, while anyLogistix evaluates the same strategic configuration under stochastic demand, transportation lead times, inventory rules, and implementation delays. This sequential structure enables comparison of planned and realized performance (Ivanov, 2025), building on simulation-based approaches to assessing disruption-mitigation strategies (Kamalahmadi & Parast, 2017).

This study makes three contributions. First, the MILP model is solved both with fixed policy configurations and with unrestricted strategic decisions, thereby endogenously selecting the economically preferred recovery policy. Second, only the strategic configuration is transferred to the simulation; deterministic material flows remain planned-performance benchmarks. Third, planned and realized performance are reported separately, and differences in policy rankings are examined using independent simulation replications and statistical tests. The contribution, therefore, lies in the explicit division of roles between the two models and the quantification of the planning–execution gap in the case study, rather than in combining optimization and simulation.

The remainder of the paper is organized as follows. Section 2 reviews the theoretical background and related studies. Section 3 presents the problem, decision-making context, and mathematical model. Section 4 describes the case study, model verification, and experimental design. Section 5 reports the optimization and simulation results, followed by the economic sensitivity analysis in Section 6. Sections 7 and 8 present the managerial implications and conclusions, respectively.

2. Methodology

A sequential optimization–simulation framework was developed to evaluate recovery policies in a polypropylene-based plastic-products supply chain. The intended user is the manufacturer's planning and procurement unit, which coordinates sourcing, inventory, production, and distribution decisions. The framework supports contingency planning before disruption and updating the plan after disruption-specific information becomes available. Company records and expert interviews provided the case-study inputs. The company identity was anonymized, and selected commercial values were rescaled while preserving the network structure and parameter relationships. The MILP model covers a 24-month horizon and maximizes total supply chain profit, defined as sales revenue minus the costs of procurement, production, transportation, inventory

holding, lost sales, and recovery policy. Strategic decisions concern reconstruction, backup supplier activation, and strategic inventory levels; tactical decisions concern procurement, production, transportation, inventory, distribution, and demand fulfillment. Here, reconstruction refers specifically to restoring the primary supplier's physical capacity, whereas recovery refers to restoring overall supply chain performance.

In the base-stress scenario, the primary supplier's available capacity falls to zero starting in period four. A complete shutdown is treated as a conservative stress-test assumption, and the timing of disruption is an exogenous input rather than a model prediction. Reconstruction is not combined with backup sourcing or strategic inventory, whereas the latter two policies may be used jointly. Strategic inventory is pre-positioned at the plant, assumed fully accessible after disruption, and released only after disruption begins. Unmet demand is treated as lost sales and is not carried forward. Raw-material transportation is represented by the number of 24-ton containers. The MILP model was implemented in Python using Pyomo and solved with HiGHS. One unrestricted run selected the economically preferred policy endogenously. Additional runs fixed the strategic decisions separately for six configurations: normal operations, no recovery, seven-month reconstruction, backup sourcing, strategic inventory, and combined backup sourcing and strategic inventory.

The same configurations were implemented in anyLogistix 3.0.1 using a common network structure, initial conditions, and baseline parameters. Only the strategic configurations were transferred; the MILP model's deterministic monthly flows were not imposed on the simulation. The simulation generated operational flows under stochastic demand, transportation lead times, an (s,S) inventory policy, and implementation delays. At the simulation's daily resolution, disruption was scheduled for the third day of the fourth month. Its onset and initial severity were held fixed across all disrupted configurations. Carbon emissions were evaluated as a complementary simulation indicator and were excluded from the MILP objective. Implementation was checked through flow and inventory balances, unit consistency, extreme-case tests, and alignment of the two models' network structures and initial conditions. Normal operations were used for baseline calibration. The no-recovery configuration, which was not used for calibration, produced a 1.48% profit difference between the models, providing preliminary evidence of structural consistency. This comparison does not constitute independent empirical validation.

A balanced one-factor experiment compared the six configurations with ten independent replications per configuration, yielding 60 simulation runs. Realized profit was the primary response; inventory availability, service level, expected lead-time service

level, and carbon emissions were complementary indicators. Means, standard deviations, coefficients of variation, and 95% confidence intervals were calculated. Normality and homogeneity of variance were assessed using the Shapiro–Wilk and Levene tests. Because variance homogeneity was rejected, Welch's one-way ANOVA and the Games–Howell post hoc test were used at a significance level of 0.05.

3. Results and Discussion

In the unrestricted MILP run, the backup-supplier policy was selected as the economically preferred strategy. This policy generated a planned profit of 1,134.091 billion tomans and a planned service level of 100%. Nevertheless, its objective value was only approximately 0.017% higher than that of the strategic-inventory policy, indicating that the optimization-based policy selection is sensitive to relatively small changes in procurement, transportation, customs, activation, and inventory-holding costs.

The simulation results reveal substantial differences among the six operational configurations. Under disruption without recovery, the mean realized profit decreased from approximately 1,137.663 billion tomans under normal operation to 316.995 billion tomans, representing a 72.14% reduction. The end-of-horizon service level also declined to approximately 23%, underscoring the severe operational vulnerability resulting from complete dependence on the primary polypropylene supplier.

Among the recovery strategies, the combined backup-supplier–strategic-inventory policy achieved the highest mean realized profit, at 926.680 billion tomans, recovering 74.29% of the profit lost under the no-recovery configuration. Its mean realized profit exceeded that of the backup-supplier policy selected by the unrestricted MILP by 21.085 billion tomans, or 2.33%. The combined policy also maintained a service level close to 100% in the simulated base case. This ranking applies to the examined parameters and disruption profile and should not be generalized to all disruption conditions.

The seven-month reconstruction policy generated a mean realized profit of 832.759 billion tomans, but service performance deteriorated during the repair period. By the end of the simulation horizon, its service level and expected lead-time service level reached approximately 56% and 62%, respectively. Under the strategic inventory policy, the mean realized profit was 607.496 billion tomans. Its service level initially declined to approximately 75% and subsequently improved to about 91%, while the expected lead-time service level reached approximately 96%. These results illustrate the different financial and operational consequences of the recovery policies.

Welch's one-way analysis of variance indicated that the operational configuration had a statistically significant effect on realized profit ($p < 0.001$). The

Games–Howell post hoc comparisons also showed statistically significant differences among all pairs of scenarios. Therefore, the observed differences in performance cannot be attributed solely to random variation across the simulation replications.

Carbon emissions were similar across the active recovery strategies and generally remained within approximately 1% of the normal-operation level. The substantially lower emissions observed under the no-recovery configuration were caused by reduced production and transportation activity and should not be interpreted as an improvement in environmental performance. The economic sensitivity analysis showed an approximately linear increase in profit as selling prices increased, with demand and other operating costs held fixed. In contrast, inventory availability varied non-monotonically with demand, underscoring the importance of reviewing inventory control policies alongside production and sourcing capacity.

4. Conclusions

This study developed a sequential optimization–simulation framework for assessing recovery policies in a polypropylene-based plastic-products supply chain under severe supply disruption. The unrestricted MILP selected backup sourcing, with a planned profit of 1,134.091 billion tomans and a planned service level of 100%. Its profit advantage over strategic inventory was only approximately 0.017%, suggesting that the economic ranking may be sensitive to small changes in cost parameters.

Across 60 simulation runs, disruption without recovery reduced mean profit by 72.14% relative to normal operations. The combined backup-supplier–strategic-inventory policy achieved the highest mean realized profit among recovery policies, at 926.680 billion tomans, and recovered 74.29% of the lost profit. Backup sourcing ranked next, followed by seven-month reconstruction and strategic inventory. Welch’s ANOVA and the Games-Howell test identified statistically significant differences among the configurations.

The difference between the optimization and simulation rankings demonstrates that the policy with the highest planned profit need not deliver the highest realized profit. The framework’s main contribution is the explicit connection between endogenous policy selection and dynamic operational evaluation, allowing the planning–execution gap to be quantified. Managerial decisions should therefore consider profit alongside service levels, response times, implementation feasibility, and carbon emissions. The findings and policy ranking remain conditional on the base-case assumptions.

The study is limited to a single supply chain and a single principal disruption profile. Reconstruction duration, backup capacity, and strategic inventory settings were specified in the scenario design. Future research could develop stochastic or robust

formulations to account for uncertainty in the severity and duration of disruptions, examine simultaneous disruptions across multiple nodes, further investigate inventory sizing and backup capacity, incorporate partial backordering, and establish an iterative feedback mechanism between optimization and simulation.

Acknowledgments

The authors thank the editorial staff of System Engineering and Productivity and the anonymous reviewers for their constructive comments and suggestions, which helped improve the manuscript.

Funding

This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest associated with this research.

Author Contribution Statement

Ali Ashaehshoar: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Software, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing; **Mohammad Hosein Tavakkoli:** Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Software, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing; **Mohammad Sheikhalishahi:** Conceptualization, Project administration, Supervision, Writing – review & editing.

Data Availability Statement

Data available on request: The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

References

- Graveline, M.-H., & Germain, D. (2022). Disaster Risk Resilience: Conceptual Evolution, Key Issues, and Opportunities. *International Journal of Disaster Risk Science*, 13(3), 330–341. <https://doi.org/10.1007/s13753-022-00419-0>
- Guo, Y., Liu, F., Song, J.-S., & Wang, S. (2025). Supply chain resilience: A review from the inventory management perspective. *Fundamental Research*, 5(2), 450–463. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2024.08.002>
- Hughes, M. M., Zhou, Z., Zinn, W., & Knemeyer, A. M. (2023). Plastic response to disruptions: Significant redesign of supply chains. *Journal of Business Logistics*, 44(1), 80–108. <https://doi.org/10.1111/jbl.12321>
- Ivanov, D. (2025). What network and performance indicators can tell us about supply chain and

- sourcing resilience (and what they cannot). *Journal of Purchasing and Supply Management*, 31(3).
<https://doi.org/10.1016/j.pursup.2025.101014>
- Kamalahmadi, M., & Parast, M. M. (2017). An assessment of supply chain disruption mitigation strategies. *International Journal of Production Economics*, 184, 210–230.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.12.011>
- Katsaliaki, K., Galetsi, P., & Kumar, S. (2022). Supply chain disruptions and resilience: a major review and future research agenda. *Annals of Operations Research*, 319(1), 965–1002.
<https://doi.org/10.1007/s10479-020-03912-1>
- Raghuram, P., & Jawahar, D. (2021). Empirical investigation of supply disruption in plastic SMEs. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 33(4), 450–470.
<https://doi.org/10.1504/ijpqm.2021.117249>
- Tavakkoli, M. H., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Vahedi-Nouri, B. (2027). Integrated truck scheduling and internal operations in a multi-door cross-docking system with reconfigurable process machines. *System Engineering and Productivity*, 6(4), 313–342.
<https://doi.org/10.22034/sep.2026.2090815.1506>

ارزیابی تاب‌آوری زنجیره تأمین محصولات پلاستیکی مبتنی بر پلی‌پروپیلن در برابر اختلال شدید با رویکرد بهینه‌سازی - شبیه‌سازی رویداد گسسته

علی اشعه‌شعار^{id}، محمدحسین توکلی^{id}، محمد شیخ‌علیشاهی^{id*}

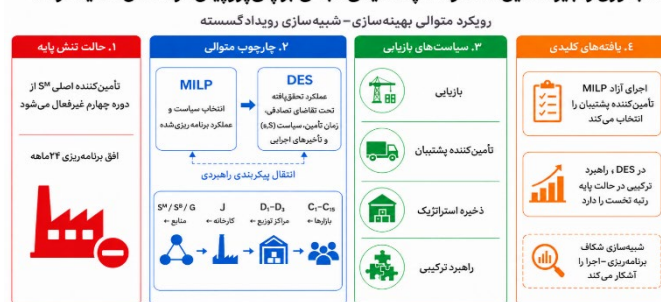
دانشکده مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

برجسته‌ها

- چارچوب بهینه‌سازی-شبیه‌سازی برای ارزیابی تاب‌آوری زنجیره تأمین توسعه یافت.
- راهبرد ترکیبی، بهترین عملکرد مالی را در میان سیاست‌های ارزیابی ایجاد کرد.
- تفاوت میان عملکرد برنامه‌ریزی شده و عملکرد تحقق‌یافته شناسایی شد.

چکیده گرافیکی

تاب‌آوری زنجیره تأمین محصولات پلاستیکی مبتنی بر پلی‌پروپیلن در اختلال شدید عرضه



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۷

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۷

ارائه برخط: ۱۴۰۵/۰۷/۰۷

*نویسنده مسئول:

m.alishahi@ut.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

زنجیره تأمین

تاب‌آوری

محصولات پلاستیکی

برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط

اختلال شدید تأمین

شبیه‌سازی رویداد گسسته

راهبردهای ارزیابی

چکیده

این پژوهش یک چارچوب متوالی بهینه‌سازی - شبیه‌سازی برای ارزیابی تاب‌آوری زنجیره تأمین محصولات پلاستیکی مبتنی بر پلی‌پروپیلن در برابر اختلال تأمین ارائه می‌کند. در مرحله نخست، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند دوره‌ای در افق ۲۴ ماهه توسعه داده شد که با وقوع اختلال، ظرفیت تأمین‌کننده اصلی از دوره چهارم متوقف می‌شود و سیاست مناسب ارزیابی را از میان بازسازی تأمین‌کننده آسیب‌دیده، فعال‌سازی تأمین‌کننده پشتیبان، پیش‌استقرار ذخیره استراتژیک و راهبرد ترکیبی انتخاب می‌کند. مدل ریاضی علاوه بر اجرای آزاد برای انتخاب درون‌زای سیاست، با تثبیت متغیرهای راهبردی برای هر یک از شش پیکربندی عادی، بدون ارزیابی، بازسازی هفت‌ماهه، تأمین‌کننده پشتیبان، ذخیره استراتژیک و راهبرد ترکیبی نیز حل شد تا عملکرد برنامه‌ریزی شده آن‌ها مقایسه شود. سپس پیکربندی راهبردی هر سیاست، بدون تحمیل جریان‌های قطعی مدل ریاضی، به مدل شبیه‌سازی رویداد گسسته در نرم‌افزار anyLogistix منتقل شد. شبیه‌سازی، عملکرد تحقق‌یافته سیاست‌ها را تحت تقاضای تصادفی، زمان‌های حمل، سیاست موجودی (S, S) ، تأخیرهای اجرایی و رفتار پویای موجودی ارزیابی کرد. برای هر سناریو ۱۰ تکرار مستقل انجام شد و تفاوت میانگین سود با استفاده از تحلیل واریانس یک‌طرفه ولج و آزمون تعقیبی Games-Howell بررسی گردید. در اجرای آزاد برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، تأمین‌کننده پشتیبان با سود برنامه‌ریزی شده ۱۱۳۴/۰۹ میلیارد تومان و سطح خدمت ۱۰۰ درصد انتخاب شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد نبود راهبرد ارزیابی میانگین سود را نسبت به شرایط عادی ۷۲/۱۴ درصد کاهش می‌دهد. راهبرد ترکیبی با میانگین سود ۹۲۶/۶۸ میلیارد تومان، بهترین عملکرد مالی را در میان سیاست‌های ارزیابی داشت و ۷۴/۲۹ درصد از سود از دست‌رفته را جبران کرد. نتایج نشان می‌دهد سیاست دارای بیشترین سود برنامه‌ریزی شده الزاماً با سیاست دارای بهترین عملکرد تحقق‌یافته یکسان نیست و ترکیب انتخاب بهینه سیاست با ارزیابی پویای اجرای آن، مبنایی مکمل برای مقایسه عملکرد برنامه‌ریزی شده و تحقق‌یافته برای تصمیم‌گیری تاب‌آور فراهم می‌کند.

۱- مقدمه

اهمیت زنجیره تأمین در دهه‌های اخیر روبه‌افزایش است و با گسترش رقابت در زمان تحویل و حساسیت مشتریان، شرکت‌ها را به سمت استفاده از راهبردهای لجستیکی و استراتژی‌های چاپک سوق داده است (Tavakkoli et al., 2027). زنجیره‌های تأمین صنایع پلاستیک نیز در اقتصادهای درحال توسعه، در سال‌های اخیر بیش‌ازپیش در معرض اختلالات پیچیده، ممتد و چندلایه قرار گرفته‌اند. برخلاف اختلالات کوتاه‌مدت و موضعی که معمولاً با ذخایر عادی، تغییر برنامه تولید یا جابه‌جایی محدود در حمل‌ونقل قابل مدیریت‌اند، بحران‌های مرکب می‌توانند هم‌زمان بر تأمین خوراک، ظرفیت تولید، دسترسی حمل‌ونقلی، زمان‌های تحویل، هزینه‌های لجستیکی و ثبات بازار اثر بگذارند (Hughes et al., 2023). در چنین شرایطی، آسیب‌پذیری زنجیره تأمین صرفاً تابع یک گره یا یک مسیر نیست، بلکه از درهم‌تنیدگی تصمیم‌های موجودی، تأمین، حمل، ظرفیت و پاسخ سیاستی ناشی می‌شود. ادبیات مدیریت ریسک زنجیره تأمین نیز نشان می‌دهد که در محیط‌های پرتلاطم، تکیه بر منطق کلاسیک بهره‌وری در شرایط عادی بدون توجه به تاب‌آوری، به شکنندگی ساختاری می‌انجامد (Katsaliaki et al., 2022).

صنعت پلاستیک برای کشورهایی که بخش قابل‌توجهی از زنجیره ارزش آن‌ها بر مواد اولیه پتروشیمیایی استوار است، نمونه‌ای روشن از این شکنندگی است. در این صنعت، وقفه در دسترسی به پلیمرهای پایه می‌تواند در زمانی کوتاه به افت تولید، کاهش سطح خدمت، انباشت سفارش‌های معوق، افزایش هزینه‌های حمل و کمبود در بازار منجر شود. همین ویژگی باعث می‌شود که زنجیره تأمین محصولات پلاستیکی یک بستر مناسب برای مطالعه هم‌زمان استحکام و زیست‌پذیری باشد (Raghuram & Jawahar, 2021). در نگاه سنتی، تاب‌آوری بیشتر به بازگشت سریع زنجیره به حالت اولیه تعبیر می‌شد؛ اما پژوهش‌های جدیدتر نشان می‌دهند که در شوک‌های شدید و طولانی، مسئله فقط بازگشت به حالت عملیاتی نیست، بلکه ادامه بقا و خدمت‌رسانی حتی در شرایطی است که ساختار اولیه دیگر به طور کامل قابل‌احیا نباشد (Graveline & Germain, 2022).

ویژگی‌های خاص صنعت پلاستیک از جمله وابستگی به مواد اولیه پتروشیمی، حساسیت زمانی مشتریان و ارزش نسبتاً پایین به وزن محصولات زنجیره تأمین آن را به طور خاص آسیب‌پذیر می‌کند. هر وقفه‌ای در دسترسی به پلیمرهای پایه مانند پلی‌پروپیلن می‌تواند در کوتاه‌مدت تولید را متوقف و پس از مدت کوتاهی موجودی انبار را تخلیه کند. ریسک‌های تأمین در سال‌های اخیر افزایش یافته است؛ زیرا هم‌زمان با بروز بحران‌هایی مانند زلزله، کووید-۱۹ و جنگ روسیه و اوکراین، اختلال در حمل‌ونقل و افزایش تعرفه‌های گمرکی، هزینه و زمان تأمین مواد اولیه را افزایش داده‌اند (Guo et al., 2025). علاوه‌برآن، تمرکز مکانی واحدهای تولیدی و وابستگی شدید به یک تأمین‌کننده در مناطق استراتژیک باعث می‌شود وقوع اختلال در یک تأسیسات واحد بتواند به سرعت جریان مواد اولیه را قطع کند سناریویی که در این مطالعه به‌عنوان اختلال در تأمین مواد اولیه در نظر گرفته می‌شود.

مدل بهینه‌سازی و شبیه‌سازی رویداد گسسته در این پژوهش نقش‌های مکملی دارند؛ اولی راهبرد ترجیح‌پذیری را تعیین می‌کند و دومی پیامدهای پویای اجرای آن را ارزیابی می‌نماید. مدل بهینه‌سازی می‌تواند ترکیب اقتصادی سیاست‌ها و برنامه مرجع جریان مواد را تعیین کند، اما تقاضای تصادفی، زمان حمل، سیاست موجودی، تأخیرهای اجرایی و رفتار زمانی بازیابی را به طور محدود بازنمایی می‌کند. در مقابل، شبیه‌سازی رویداد گسسته رفتار پویای شبکه را با جزئیات ارزیابی می‌کند، اما معمولاً سیاست مناسب را به صورت درون‌زا انتخاب نمی‌کند. از این رو، پژوهش حاضر یک معماری متوالی ارائه می‌کند که در آن مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط سیاست بازیابی را انتخاب و anyLogistix عملکرد تحقق‌یافته همان پیکربندی را ارزیابی می‌کند. این ترکیب، شکاف میان تصمیم برنامه‌ریزی و عملکرد عملیاتی را آشکار می‌سازد (Ivanov, 2025). روش‌هایی نیز برای اندازه‌گیری کمی تاب‌آوری از طریق شبیه‌سازی ارائه شده است (Kamalahmadi & Parast, 2017) و راهبردهای تاب‌آوری زیادی نیز برای مقابله با اختلالات بررسی شده است.

به‌طور کلی هدف پژوهش، ارزیابی سیاست‌های مواجهه با توقف کامل تأمین پلی‌پروپیلن در یک زنجیره تأمین

تأمین و منطقه‌ای، کمک کنند، پیشنهاد می‌شود.

مشارکت پژوهش در سه محور خلاصه می‌شود. نخست، مدل ریاضی علاوه بر اجراهای دارای سیاست ثابت، یک‌بار بدون تثبیت متغیرهای راهبردی حل می‌شود تا سیاست اقتصادی ترجیح‌پذیری را به‌صورت درون‌زا انتخاب کند. دوم، در ارتباط میان دو مدل فقط تصمیم‌های راهبردی منتقل می‌شوند و جریان‌های قطعی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط به شبیه‌سازی تحمیل نمی‌شوند. سوم، عملکرد برنامه‌ریزی‌شده و تحقق‌یافته سیاست‌ها به طور جداگانه گزارش و تغییر احتمالی رتبه سیاست‌ها با استفاده از تکرارهای مستقل و آزمون‌های آماری بررسی می‌شود؛ بنابراین، مشارکت مقاله در خود ترکیب بهینه‌سازی و شبیه‌سازی نیست، بلکه در نحوه تفکیک نقش این دو روش و کمی‌سازی شکاف برنامه‌ریزی - اجرا در مطالعه موردی حاضر قرار دارد.

ادامه مقاله به‌این‌ترتیب سازمان‌دهی شده است. بخش دوم مبانی نظری و مطالعات مرتبط را مرور می‌کند. بخش سوم بیان مسئله، بستر تصمیم‌گیری و مدل ریاضی را ارائه می‌دهد. بخش چهارم به مطالعه موردی، اعتبارسنجی و طراحی آزمایش اختصاص دارد. نتایج مدل ریاضی و شبیه‌سازی در بخش پنجم و تحلیل حساسیت اقتصادی در بخش ششم ارائه می‌شوند. در نهایت، بخش‌های هفتم و هشتم دیدگاه‌های مدیریتی و نتیجه‌گیری پژوهش را بیان می‌کنند.

۲- مرور ادبیات

۲-۱- شبیه‌سازی زنجیره تأمین و بررسی تاب‌آوری در آن

زنجیره‌های تأمین در سال‌های اخیر بیش از گذشته در معرض اختلالات شدید، ناگهانی و بلندمدت قرار گرفته‌اند. این اختلالات می‌توانند از منشأهای مختلفی مانند بحران‌های اقتصادی، جنگ، تحریم، پاندمی، بلایای طبیعی، توقف تأمین‌کنندگان، محدودیت‌های حمل‌ونقل و نوسانات تقاضا ایجاد شوند و عملکرد زنجیره تأمین را از نظر تولید، موجودی، سطح خدمت، هزینه و سودآوری تحت‌تأثیر قرار دهند. در چنین شرایطی، صرفاً تمرکز بر کارایی عملیاتی در وضعیت عادی کافی نیست؛ زیرا

چندسطحی است. در مرحله نخست، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند دوره‌ای، تصمیم‌های مربوط به بازسازی منبع اصلی، فعال‌سازی منبع پشتیبان، تعیین سطح ذخیره استراتژیک و جریان‌های تأمین، تولید، موجودی و توزیع را تعیین می‌کند. در مرحله دوم، پیکربندی‌های راهبردی حاصل در محیط شبیه‌سازی رویداد گسسته و تحت تقاضا و زمان حمل تصادفی ارزیابی می‌شوند. شش پیکربندی عملیاتی نیز برای مقایسه کنترل‌شده عملکرد سیاست‌ها تعریف شده‌اند. در ادامه اهداف پژوهش با جزئیات بیشتر مورد بحث قرار می‌گیرند:

(۱) شناخت ساختار و حساسیت زنجیره تأمین محصولات پلاستیکی ایران: این بخش ساختار شبکه شامل تأمین‌کنندگان، کارخانه، مراکز توزیع و مشتریان را ترسیم و نقاط آسیب‌پذیر در برابر اختلال شدید عرضه را شناسایی می‌کند.

(۲) بررسی اثرات اختلال و توقف کامل تأمین بر عملکرد زنجیره: با فرض از دسترس خارج شدن تأمین‌کننده اصلی، اثرات آن بر سودآوری، سطح موجودی، سطح خدمت و انتشار کربن ارزیابی می‌شود.

(۳) توسعه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند دوره‌ای: برای انتخاب درون‌زای سیاست بازیابی و طراحی یک اتصال شفاف میان برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط و شبیه‌سازی، به‌گونه‌ای که فقط تصمیم‌های راهبردی به شبیه‌سازی منتقل شوند و جریان‌های تاکتیکی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط نقش برنامه مرجع داشته باشند.

(۴) مقایسه سناریوهای بازیابی: سناریوهایی شامل بازسازی تأمین‌کننده آسیب‌دیده، استفاده از تأمین‌کننده پشتیبان و ایجاد ذخیره استراتژیک و راهبرد ترکیبی آن‌ها تحلیل و از منظر شاخص‌های کلیدی عملکرد مقایسه می‌شوند.

(۵) ارائه توصیه‌های مدیریتی: بر اساس یافته‌ها، راهبردهایی که می‌توانند به مدیران در افزایش تاب‌آوری زنجیره، با در نظر گرفتن محدودیت‌های

قالب ظرفیت جذب، ظرفیت انطباق و ظرفیت بازیابی بررسی کرد. ظرفیت جذب به اقداماتی مانند نگهداری موجودی پشتیبان، ظرفیت اضافی و آماده‌سازی پیش از بحران مربوط است. ظرفیت انطباق شامل اقداماتی مانند استفاده از تأمین‌کننده پشتیبان، تغییر مسیر تأمین، تغییر برنامه تولید و جابه‌جایی جریان مواد است. ظرفیت بازیابی نیز به بازسازی تأسیسات آسیب‌دیده، احیای ظرفیت تولید و بازگشت تدریجی عملکرد زنجیره پس از اختلال اشاره دارد. حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2019) نشان دادند که تاب‌آوری زنجیره تأمین نتیجه یک اقدام منفرد نیست، بلکه حاصل ترکیب هماهنگ راهبردهای پیشگیرانه و واکنشی در مراحل قبل، حین و بعد از اختلال است.

در این پژوهش، به دو مفهوم بازسازی و بازیابی نیز اشاره می‌کنیم که بازسازی به تعمیر، ایجاد مجدد یا بازگرداندن ظرفیت فیزیکی تأمین‌کننده آسیب‌دیده اشاره دارد. در مقابل، بازیابی مفهومی گسترده‌تر است و فرایند بازگرداندن عملکرد زنجیره تأمین به یک سطح قابل‌قبول را در بر می‌گیرد. بازیابی ممکن است از طریق بازسازی منبع اصلی، فعال‌سازی تأمین‌کننده پشتیبان، استفاده از ذخیره استراتژیک یا ترکیب این اقدامات انجام شود؛ بنابراین، اصطلاح بازسازی برای گزینه تعمیر ظرفیت تأمین‌کننده اصلی و اصطلاح بازیابی نیز برای مجموعه سیاست‌های بازگرداندن عملکرد زنجیره استفاده می‌شود.

مدیریت موجودی یکی از مهم‌ترین ابزارهای افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین است. گو و همکاران راهبردهای موجودی محور تاب‌آوری را در دو گروه کلی بررسی کردند: راهبردهای مقابله با اختلالات سمت تقاضا و راهبردهای مقابله با اختلالات سمت عرضه. در سمت تقاضا، پیش‌استقرار موجودی، ظرفیت واکنشی و قراردادهای همکاری انعطاف‌پذیر می‌توانند به پاسخ سریع در برابر جهش تقاضا کمک کنند. در سمت عرضه، چندمنبعی، ذخیره موجودی و قراردادهای تأمین انعطاف‌پذیر می‌توانند جریان مواد را در زمان اختلال حفظ کنند (Guo et al., 2025). در زنجیره تأمین محصولات پلاستیکی، ذخیره استراتژیک پلی‌پروپیلن می‌تواند در دوره ابتدایی بحران نقش ضربه‌گیر عملیاتی داشته باشد و از توقف فوری تولید جلوگیری کند. بالین‌حال، این راهبرد با هزینه نگهداری و سرمایه درگیر همراه است؛ بنابراین

زنجیره‌ای که فقط بر کاهش هزینه و حداقل‌سازی موجودی متمرکز باشد، ممکن است در برابر اختلالات شدید به سرعت آسیب‌پذیر شود. از این رو، مفهوم تاب‌آوری زنجیره تأمین به عنوان یکی از محورهای اصلی مدیریت ریسک و پایداری عملیات مطرح شده است (Hughes et al., 2023; Katsaliaki et al., 2022).

تاب‌آوری زنجیره تأمین به توانایی زنجیره برای آمادگی در برابر اختلال، جذب اثرات اولیه، انطباق با شرایط جدید و بازیابی عملکرد در سطح قابل‌قبول اشاره دارد. در نگاه سنتی، تاب‌آوری بیشتر به معنای بازگشت سریع زنجیره به وضعیت پیش از اختلال در نظر گرفته می‌شد؛ اما ایوانف (Ivanov, 2017) نشان داده که در بحران‌های شدید و ممتد، مسئله تنها بازگشت به وضعیت اولیه نیست، بلکه حفظ بقا، استمرار تولید و خدمت‌رسانی، کنترل زیان اقتصادی و جلوگیری از گسترش اثر اختلال در کل شبکه اهمیت بیشتری دارد (Graveline & Germain, 2022). این موضوع در زنجیره‌های تأمین وابسته به مواد اولیه حیاتی، مانند زنجیره تأمین محصولات پلاستیکی مبتنی بر پلی‌پروپیلن، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا توقف یا کاهش ظرفیت یک تأمین‌کننده اصلی می‌تواند به سرعت بر تولید، موجودی، توزیع و پاسخ‌گویی به مشتریان اثر بگذارد.

یکی از مفاهیم مهم در تحلیل تاب‌آوری، اثر موجی در زنجیره تأمین است. اثر موجی زمانی رخ می‌دهد که اختلال ایجادشده در یک گره یا مسیر، در همان نقطه محدود نماند و به سایر بخش‌های شبکه منتقل شود. این پدیده به‌ویژه در زنجیره‌هایی که وابستگی بالایی به یک تأمین‌کننده، یک منطقه جغرافیایی یا یک مسیر حمل‌ونقل دارند، اهمیت زیادی دارد؛ زیرا کاهش ظرفیت در یک نقطه می‌تواند باعث کمبود مواد اولیه، توقف تولید، کاهش سطح خدمت و افت سودآوری شود. دلگی و همکاران (Dolgui et al., 2018) نشان دادند که اثر موجی با اختلالات شدید و کم‌تکرار ارتباط دارد و می‌تواند ساختار شبکه، سیاست‌های تولید، جریان مواد و عملکرد مالی را تحت تأثیر قرار دهد؛ بنابراین، تحلیل تاب‌آوری باید علاوه بر بررسی نقطه وقوع اختلال، پیامدهای انتشار آن در کل شبکه را نیز در نظر بگیرد.

در ادبیات تاب‌آوری، راهبردهای مختلفی برای کاهش اثر اختلالات معرفی شده است. این راهبردها را می‌توان در

باید بر اساس ارتباط میان هزینه، سطح خدمت، تداوم تولید و کاهش کمبود ارزیابی شود.

استفاده از تأمین‌کننده پشتیبان نیز از راهبردهای مهم تاب‌آوری در برابر اختلالات سمت عرضه است. این راهبرد می‌تواند وابستگی زنجیره به یک تأمین‌کننده اصلی یا یک ناحیه جغرافیایی محدود را کاهش دهد و در زمان اختلال، جریان ورودی مواد اولیه را حفظ کند. با این حال، مطالعات گذشته نشان می‌دهند که استفاده از تأمین‌کننده پشتیبان یا چندمنبعی همواره بدون هزینه نیست و ممکن است با افزایش هزینه خرید، هزینه حمل‌ونقل، زمان تأمین و پیچیدگی هماهنگی همراه باشد (Gehrig & Stenbacka, 2023). در اختلالات شدید و گسترده، این محدودیت‌ها نیز ممکن است تشدید شوند؛ زیرا کنترل‌های مرزی، ناامنی مسیرها، تعرفه‌های گمرکی، افزایش هزینه حمل‌ونقل و تأخیرهای احتمالی می‌توانند اثربخشی تأمین‌کننده پشتیبان را کاهش دهند؛ بنابراین، تأمین‌کننده پشتیبان باید به‌عنوان ظرفیتی برای حفظ تداوم تولید و سطح خدمت بررسی شود که همراه با هزینه‌های مالی و عملکردی زیاد می‌باشد. بازسازی تأمین‌کننده که از حالت عملیاتی خارج است نیز بخشی از ظرفیت ارزیابی زنجیره تأمین محسوب می‌شود. این راهبرد می‌تواند پس از پایان تعمیرات، زنجیره را به ساختار اولیه خود نزدیک کند و وابستگی به منابع جایگزین را کاهش دهد. با این حال، در اختلالات شدید و بلندمدت، بازسازی با عدم قطعیت زمانی و اجرایی همراه است. ناامنی منطقه، کمبود تجهیزات، محدودیت نیروی انسانی متخصص، آسیب به زیرساخت، دشواری دسترسی به قطعات و احتمال تداوم اختلال می‌تواند زمان ارزیابی را افزایش دهد؛ بنابراین، ارزیابی راهبرد بازسازی نباید فقط بر اساس سودآوری انجام شود، بلکه باید زمان ارزیابی، قابلیت اجرا، میزان ریسک عملیاتی و توان حفظ تولید در دوره بحران نیز در نظر گرفته شود.

برای ارزیابی کمی اثر اختلالات و مقایسه راهبردهای تاب‌آوری، روش‌های شبیه‌سازی جایگاه مهمی در ادبیات پیدا کرده‌اند. شبیه‌سازی رویداد گسسته این امکان را فراهم می‌کند که رفتار پویای زنجیره در طول زمان، تغییرات جریان مواد، سطح موجودی، نرخ تولید، سطح خدمت، زمان تحویل، سود و هزینه تحت سناریوهای مختلف بررسی شود. ایوانف نشان داد که شبیه‌سازی

می‌تواند اثر اختلالات و سیاست‌های ارزیابی را بر عملکرد زنجیره کمی‌سازی کند و به تصمیم‌گیرندگان در انتخاب راهبرد مناسب کمک کند. همچنین، استفاده هم‌زمان از شاخص‌های شبکه و شاخص‌های عملکردی می‌تواند تصویر کامل‌تری از تاب‌آوری ارائه دهد؛ زیرا شاخص‌های شبکه وجود اختلال و کاهش اتصال‌پذیری را نشان می‌دهند، درحالی‌که شاخص‌هایی مانند سطح خدمت، تحویل به‌موقع و زمان ارزیابی شدت اثر اختلال بر عملیات و مشتریان را مشخص می‌کنند (Ivanov, 2019).

در یکی از مطالعات مهم مبتنی بر این رویکرد، ایوانف (Ivanov, 2025) با بهره‌گیری از شبیه‌سازی رویداد گسسته در نرم‌افزار anyLogistix، پویایی‌های تولید و سفارش‌دهی یک زنجیره تأمین محصولات غیرفاسد شدنی را در دوره‌های اختلال، ارزیابی و پس از بازسازی بررسی کرد. در مطالعه موردی مذکور، اختلال در یک مرکز توزیع موجب کاهش سطح خدمت، انباشت سفارش‌های معوق و افزایش تأخیر در تحویل شد. این مطالعه با معرفی مفهوم دنباله اختلال نشان داد که آثار اختلال ممکن است حتی پس از ارزیابی ظرفیت فیزیکی تأسیسات نیز در قالب سفارش‌های انباشته، ناپایداری موجودی و افزایش زمان تحویل در زنجیره باقی بماند. یافته‌ها بیانگر آن بود که بازگرداندن ظرفیت فیزیکی، به‌تنهایی برای دستیابی مجدد به سطح عملکرد پیش از اختلال کافی نیست و باید در کنار سیاست ارزیابی، سیاست مناسبی برای احیای تدریجی عملیات نیز اجرا شود. همچنین، استفاده از منابع اضطراری پشتیبان توانست سطح خدمت، سودآوری و ثبات موجودی را بهبود بخشد و نوسانات زمان تحویل را کاهش دهد.

در همین راستا، نوشی و صبحی اخیراً در سال ۲۰۲۶ (Noushi & Sabouhi, 2026) یک مدل بهینه‌سازی تصادفی چنددوره‌ای و چندمحصولی برای طراحی تاب‌آور زنجیره تأمین گندم در معرض اختلالات اقلیمی توسعه دادند. در مدل آنان، تأمین تکمیلی گندم با تخفیف مقداری به‌عنوان راهبرد تاب‌آوری در نظر گرفته شد و اصول اقتصاد چرخشی نیز از طریق فروش محصولات جانبی لحاظ گردید. این مطالعه نمونه‌ای از به‌کارگیری منبع تأمین مکمل در یک مدل بهینه‌سازی تاب‌آور است و از نظر نقش منبع جایگزین با راهبرد تأمین‌کننده پشتیبان پژوهش حاضر ارتباط دارد.

به‌عنوان اختلال بلندمدت و همچنین هم‌پوشانی آن با اختلالاتی مانند کووید-۱۹، توقف تأمین‌کنندگان، محدودیت حمل‌ونقل و اختلال خط تولید بررسی شد. نتایج نشان داد که ترکیب ذخیره استراتژیک و افزایش ظرفیت تولید می‌تواند سطح خدمت را بازیابی کند و عملکرد زنجیره را در برابر برخی اختلالات کوتاه‌مدت حفظ نماید؛ اما در مواجهه با بحران‌های بلندمدت هم‌زمان، مانند کاهش تقاضا یا تداوم اثرات پاندمی، حتی راهبرد بازیابی نیز ممکن است برای جلوگیری از افت شدید سودآوری و فروپاشی زنجیره کافی نباشد. این مطالعه همچنین یک شاخص تاب‌آوری متشکل از سود، هزینه، سطح خدمت و تعداد محصولات تحویل‌شده به مشتریان ارائه کرد که می‌تواند برای مقایسه کمی سناریوهای بازیابی به کار رود.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اختلالات ناشی از پاندمی، حوادث طبیعی، توقف تأمین‌کنندگان، محدودیت‌های حمل‌ونقل و بحران‌های ژئوپلیتیکی، باوجود تفاوت در منشأ، ممکن است پیامدهای عملیاتی مشابهی مانند کاهش ظرفیت، افزایش زمان تأمین، محدودیت دسترسی و طولانی‌شدن دوره بازگشت ایجاد کنند. از این‌رو، تمایز پژوهش حاضر بر مبنای منشأ رخداد تعریف نمی‌شود، بلکه بر حالت عملیاتی اختلال، شدت کاهش عرضه و نحوه ارزیابی سیاست‌های مقابله با آن استوار است.

پژوهش حاضر یک توقف شدید و بلندمدت در تأمین پلی‌پروپیلن را بررسی می‌کند و عملکرد گزینه‌های بازسازی تأمین‌کننده اصلی، فعال‌سازی منبع پشتیبان، پیش‌استقرار ذخیره استراتژیک کارخانه‌ای و ترکیب دو سیاست اخیر را مقایسه می‌نماید. زمینه واقعی مطالعه موردی به دلایل محرمانگی به‌صورت ناشناس گزارش می‌شود، اما ساختار تصمیم، روابط عملیاتی و نسبت میان پارامترها حفظ شده‌اند.

۲-۲- زنجیره تأمین محصولات مبتنی بر پلاستیک

زنجیره تأمین محصولات مبتنی بر پلاستیک به دلیل گستردگی کاربرد محصولات پلیمری در صنایع مختلف، همواره موردتوجه پژوهشگران حوزه مدیریت و طراحی

در مطالعات حوزه شبیه‌سازی، سناریوسازی یکی از ابزارهای اصلی برای ارزیابی تاب‌آوری است. از طریق سناریوهای مختلف می‌توان عملکرد زنجیره را در حالت عادی، اختلال بدون بازیابی و حالت‌های مختلف بازیابی مقایسه کرد. کمال احمدی و پرست (Kamalahmadi & Parast, 2017) نیز نشان دادند که راهبردهای کاهش اختلال باید بر اساس اثر آن‌ها بر هزینه، سطح خدمت، قابلیت بازیابی و عملکرد کل زنجیره ارزیابی شوند؛ بنابراین، مقایسه سناریوهای بازیابی می‌تواند نشان دهد که کدام سیاست در برابر نوع مشخصی از اختلال، عملکرد مناسب‌تری دارد و چه همکاری میان هزینه، سودآوری، سطح خدمت و تداوم عملیات ایجاد می‌کند.

در همین زمینه، موسوی و حسینی در سال ۲۰۲۱ (Moosavi & Hosseini, 2021) یک روش مبتنی بر شبیه‌سازی رویداد گسسته برای اندازه‌گیری کمی تاب‌آوری زنجیره تأمین در شرایط اختلال شدید و بلندمدت ناشی از کووید-۱۹ ارائه کردند. این مطالعه موردی مربوط به یک تولیدکننده چراغ پنلی LED در ایران بود که مواد اولیه خود را از یک تأمین‌کننده چینی دریافت می‌کرد و یک تأمین‌کننده داخلی نیز به‌عنوان منبع پشتیبان در نظر گرفته شده بود. دو راهبرد موجودی اضافی از پیش مستقرشده و تأمین‌کننده پشتیبان به‌صورت جداگانه بررسی شدند. نتایج نشان داد که موجودی اضافی تاب‌آوری و سطح پاسخگویی به تقاضای بیشتری ایجاد می‌کند، اما هزینه آن بالاتر است؛ در مقابل، تأمین‌کننده پشتیبان از نظر سودآوری و هزینه عملکرد مناسب‌تری دارد. این پژوهش بده‌بستان میان عملکرد مالی و تاب‌آوری عملیاتی را به طور کمی نشان داد.

در ادامه این جریان پژوهشی، ملک‌زاده و همکاران (Malekzadeh et al., 2025) یک چارچوب دوقلوی دیجیتال زنجیره تأمین را برای تحلیل تاب‌آوری در برابر اختلالات فوری و بلندمدت ارائه کردند و آن را در یک زنجیره تأمین تولید قطعات پلاستیکی در ایران مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. این مطالعه با استفاده از anyLogistix نشان داد که دوقلوی دیجیتال می‌تواند از طریق شبیه‌سازی و تحلیل سناریو، عملکرد زنجیره را در مراحل پیش از اختلال، حین اختلال و پس از اختلال ارزیابی کند. در این پژوهش، بحران اقتصادی و تحریم‌ها

پوری (Pouri, 2025) یک مدل ریاضی دوهدفه برای زنجیره تأمین حلقه‌بسته محصولات پتروشیمی ارائه کرد که هزینه‌های حمل‌ونقل و موجودی را در کنار آلودگی مراکز پردازش و توزیع در نظر می‌گرفت. این مدل با روش مجموع موزون و الگوریتم فراابتکاری ژنتیک چندهدفه مبتنی بر مرتب‌سازی نامغلوب نسل دوم^۱ حل شد و بر ضرورت ایجاد موازنه میان عملکرد اقتصادی و پیامدهای زیست‌محیطی در طراحی زنجیره تأمین محصولات پتروشیمی تأکید داشت. این مطالعه، مبنای مرتبطی برای توجه هم‌زمان به هزینه و انتشار در شبکه‌های مبتنی بر مواد پلیمری فراهم می‌کند.

علاوه بر مدل‌های بهینه‌سازی، استفاده از روش‌های شبیه‌سازی نیز در سال‌های اخیر موردتوجه قرار گرفته است. پژوهشگران معتقدند که ماهیت پویا و پیچیده زنجیره‌های تأمین محصولات پلاستیکی، تحلیل آن‌ها را با روش‌های ایستا دشوار می‌سازد. به همین دلیل، شبیه‌سازی به‌عنوان ابزاری مؤثر برای ارزیابی رفتار زنجیره در شرایط مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات انجام‌شده نشان داده‌اند که شبیه‌سازی امکان بررسی اثر تغییرات تقاضا، محدودیت ظرفیت، تأخیر در تأمین مواد اولیه و تغییر سیاست‌های موجودی را بر شاخص‌های عملکردی نظیر سود، سطح خدمت، زمان تحویل و میزان سفارش‌های معوق فراهم می‌کند (Ivanov, 2025).

در تکمیل مطالعات مربوط به طراحی تاب‌آور شبکه‌های پلاستیکی، آلدریگتی و همکاران در سال ۲۰۲۳ (Aldrighetti et al., 2023) یک مدل بهینه‌سازی برای طراحی پرتفوی کارای تاب‌آوری در زنجیره تأمین چندسطحی ارائه کردند. پرتفوی پیشنهادی آنان شامل تأمین‌کنندگان پشتیبان، چندمنبعی، ظرفیت اضافی، سیستم‌های حفاظت و انعطاف‌پذیری تأسیسات، بازیابی ظرفیت و بازتخصیص جریان مواد بود. مدل به‌صورت یک برنامه‌ریزی تصادفی درون‌زا، چنددوره‌ای و تک‌محصولی توسعه یافت و در یک زنجیره تأمین واقعی بین‌المللی در صنعت قطعات پلاستیکی اجرا شد. نتایج نشان داد که برای اختلالات شدید سمت عرضه، استفاده از چندمنبعی و تأمین‌کنندگان پشتیبان اهمیت بیشتری دارد، درحالی‌که برای اختلالات کوتاه‌مدت و کم‌شدت، بازیابی

زنجیره تأمین بوده است. پلاستیک‌ها به واسطه ویژگی‌هایی نظیر وزن کم، دوام بالا، قابلیت شکل‌دهی مناسب، تنوع کاربرد و هزینه تولید نسبتاً پایین، در صنایع بسته‌بندی، خودروسازی، ساختمان، لوازم‌خانگی و بسیاری از کالاهای مصرفی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Wang & Maravelias, 2024). ازاین‌رو، عملکرد مناسب زنجیره تأمین این محصولات نقش مهمی در تداوم تولید و پاسخ‌گویی به نیاز بازار دارد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که اختلال در تأمین مواد اولیه یا کاهش ظرفیت تولید می‌تواند پیامدهای قابل‌توجهی بر موجودی، زمان تحویل، سطح خدمت و سودآوری زنجیره داشته باشد.

بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه بر ساختار و ویژگی‌های زنجیره تأمین محصولات پلاستیکی تمرکز داشته‌اند. در این زنجیره‌ها، مواد اولیه پلیمری نظیر پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن و سایر رزین‌های پتروشیمیایی از تأمین‌کنندگان دریافت شده و پس از طی فرایندهای تولیدی مختلف به محصولات نهایی تبدیل می‌شوند. پژوهشگران تأکید کرده‌اند که عملکرد این زنجیره‌ها به عواملی همچون قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان، ظرفیت تولید، زمان تأمین و هزینه‌های حمل‌ونقل وابسته است. همچنین مطالعات نشان داده‌اند که وابستگی زیاد به یک تأمین‌کننده یا یک منبع جغرافیایی خاص می‌تواند آسیب‌پذیری زنجیره را در برابر اختلالات افزایش دهد (Raghuram & Jawahar, 2021; Hughes et al., 2023).

در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین محصولات پلاستیکی، تحقیقات متعددی به بررسی مسائل مکان‌یابی، تخصیص جریان مواد، مدیریت موجودی و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل پرداخته‌اند. وانگ و مارولیس (Wang & Maravelias, 2024) با ارائه رویکردهای بهینه‌سازی برای طراحی زنجیره تأمین صنعت پلاستیک نشان دادند که تصمیمات مرتبط با مکان‌یابی تأسیسات، انتخاب تأمین‌کنندگان و مدیریت جریان مواد تأثیر مستقیمی بر هزینه‌های عملیاتی و عملکرد کلی شبکه دارند. نتایج این مطالعات بیانگر آن است که طراحی مناسب شبکه می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه‌های لجستیکی، موجب افزایش انعطاف‌پذیری و بهبود سطح خدمت شود.

^۱ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)

تأکید کرد. همچنین ملک‌زاده و همکاران در سال ۲۰۲۵ (Malekzadeh et al., 2025) نشان دادند که مدل‌های دیجیتال می‌توانند سناریوهای اختلال را در زنجیره قطعات پلاستیکی ارزیابی کنند. باوجود این، انتخاب درون‌زای سیاست بازیابی و سپس ارزیابی پویای همان تصمیم کمتر بررسی شده است. در چارچوب پیشنهادی، دو مدل دارای داده‌های پایه مشترک‌اند، اما وظایف متفاوتی دارند. برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با تقاضای موردانتظار و سود برنامه‌ریزی‌شده را بیشینه می‌کند. شبیه‌سازی پیشامد گسسته تقاضای تصادفی، زمان‌های حمل، سیاست حداقل و حداکثر (S, S) ، رویداد اختلال و انتشار را نگه می‌دارد. این تفکیک از تحمیل جریان‌های قطعی بر شبیه‌سازی جلوگیری می‌کند و امکان مشاهده ارزش یا ضعف عملیاتی سیاست منتخب را فراهم می‌سازد.

تمایز چارچوب حاضر در نحوه تقسیم وظایف میان دو مدل است. برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با تقاضای موردانتظار، سیاست اقتصادی ترجیح‌پذیری و برنامه مرجع تأمین، تولید و توزیع را تعیین می‌کند. سپس وضعیت متغیرهای راهبردی، شامل گزینه بازسازی، فعال‌سازی منبع پشتیبان و سطح ذخیره استراتژیک، به شبیه‌سازی رویداد گسسته منتقل می‌شود. جریان‌های ماهانه قطعی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط به شبیه‌سازی تحمیل نمی‌شوند و شبیه‌سازی رویداد گسسته عملکرد سیاست را تحت تقاضای تصادفی، زمان حمل، قواعد سفارش‌دهی و تأخیرهای اجرایی ارزیابی می‌کند. شش سناریو عملیاتی برای مقایسه کنترل‌شده از پیش تعریف می‌شوند؛ باین‌حال، یک اجرای جداگانه برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط بدون تثبیت متغیرهای راهبردی انجام می‌شود تا سیاست اقتصادی به‌صورت درون‌زا انتخاب شود.

خلاصه مطالعات مروری انجام‌شده در **جدول ۱** ارائه شده است. لازم به توضیح است که در این جدول منابع ۱ تا ۸ به ترتیب مربوط به تحقیقات Malekzadeh et al., 2025, Ivanov, 2019, Wang & Maravelias, 2024, Camur et al., 2023, Moosavi & Hosseini, 2021, Kelchtermans et al., 2026, Aldrighetti et al., 2023 و Rohaninejad et al., 2026 هستند.

ظرفیت می‌تواند راهبرد کاراتری باشد. همچنین ترکیب راهبردهای آمادگی و بازیابی، در مقایسه با اتکا به ظرفیت اضافی، می‌تواند هزینه کل را کاهش داده و سطح خدمت کامل را حفظ کند.

بخش دیگری از ادبیات به توسعه زنجیره‌های تأمین پلاستیک‌های زیستی و پایدار اختصاص‌یافته است. در این زمینه، موندال و روی یک مدل چندهدفه برای طراحی زنجیره تأمین زیست پلاستیک ارائه کردند. در مطالعه موردنظر علاوه بر معیارهای اقتصادی، شاخص‌هایی نظیر اشتغال، محدودیت انتشار کربن و عدم قطعیت نیز در فرایند تصمیم‌گیری لحاظ شد. نتایج این مطالعه نشان داد که ملاحظات زیست‌محیطی و پایداری به‌تدریج به یکی از ابعاد مهم طراحی زنجیره تأمین محصولات پلاستیکی تبدیل شده‌اند و تصمیم‌گیری در این حوزه دیگر صرفاً بر مبنای حداقل‌سازی هزینه انجام نمی‌شود (Mondal & Roy, 2024).

در مجموع، ادبیات زنجیره تأمین محصولات پلاستیکی بر وابستگی شدید عملکرد شبکه به قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان، ظرفیت تولید، مدیریت موجودی و جریان حمل‌ونقل تأکید دارد. مطالعات موجود، نقش طراحی شبکه، چندانمبعی، ذخیره احتیاطی و ظرفیت اضافی را در کاهش آثار اختلال نشان داده‌اند؛ باین‌حال، در مجموعه مطالعات مرور شده، انتخاب درون‌زای یک سیاست بازیابی و سپس ارزیابی همان تصمیم در یک محیط عملیاتی پویا کمتر به‌صورت صریح مقایسه شده است. این خلأ، مبنای تمرکز بخش بعد بر نحوه ارتباط مدل تجویزی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط و مدل ارزیاب شبیه‌سازی رویداد گسسته است.

۲-۳- بهینه‌سازی، شبیه‌سازی و چارچوب‌های ترکیبی

روش‌های بهینه‌سازی برای تعیین ساختار شبکه، انتخاب تأمین‌کننده، تخصیص ظرفیت و برنامه‌ریزی موجودی مناسب‌اند؛ درحالی‌که شبیه‌سازی، تغییرات زمانی و پیامدهای اجرایی تصمیم‌ها را آشکار می‌سازد. وانگ و مارولیاس (Wang & Maravelias, 2024) قابلیت مدل‌های بهینه‌سازی در طراحی زنجیره تأمین پلاستیک را نشان دادند و ایوانف. بر نقش شبیه‌سازی در تحلیل اثر موجی

جدول ۱. مرور مطالعات انجام شده

Table 1. Review of previous studies

منبع	اختلال	تاب‌آوری	ذخیره ایمنی	تأمین‌کننده پشتیبان	انبار پشتیبان	استفاده هم‌زمان تأمین‌کننده و انبار پشتیبان	بهینه‌سازی	شبیه‌سازی	چندمحصولی	بعد اقتصادی	سطح خدمت	موجودی	زمان بازیابی	انتشار CO ₂	مطالعه موردی
۱	✓	-	✓	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	پلاستیک
۲	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	محصول شدنی
۳	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	✓	-	-	-	✓	پلاستیک
۴	✓	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	دستگاه پزشکی
۵	✓	✓	✓	✓	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	✓	-	چراغ پنبلی LED
۶	✓	✓	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	✓	-	واکسن
۷	✓	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	قطعات پلاستیکی
۸	✓	-	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	محصولات زیست‌پذیر
پژوهش حاضر	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	محصولات مبتنی بر پلی‌پروپیلن

۳- بیان مسئله

تولیدی، مراکز توزیع و بازارهای تقاضاست. تأمین‌کنندگان به دو گروه اصلی و پشتیبان تقسیم می‌شوند و امکان پیش‌استقرار ذخیره استراتژیک ماده اولیه نیز وجود دارد. ماده اولیه از منابع تأمین به واحدهای تولیدی ارسال و

ساختار عمومی زنجیره تأمین مورد بررسی شامل مجموعه‌ای از تأمین‌کنندگان ماده اولیه، واحدهای

تقاضاست. تابع هدف، سود کل شبکه را از تفاوت درآمد فروش و مجموع هزینه‌های خرید، تولید، حمل، نگهداری، کمبود و اجرای سیاست‌های بازایی بیشینه می‌کند.

۳-۱- بستر تصمیم‌گیری و زمان استفاده از مدل

کاربر اصلی مدل، واحد برنامه‌ریزی و تدارکات تولیدکننده است که با فرض امکان هماهنگی تصمیم‌های تأمین، موجودی، تولید و توزیع، عملکرد کل شبکه را ارزیابی می‌کند. مدل یک ابزار پیش‌بینی زمان وقوع اختلال نیست، بلکه برای طراحی و ارزیابی برنامه‌های اقتضایی تحت حالت‌های مختلف اختلال استفاده می‌شود که در **شکل ۱** نشان داده شده است.

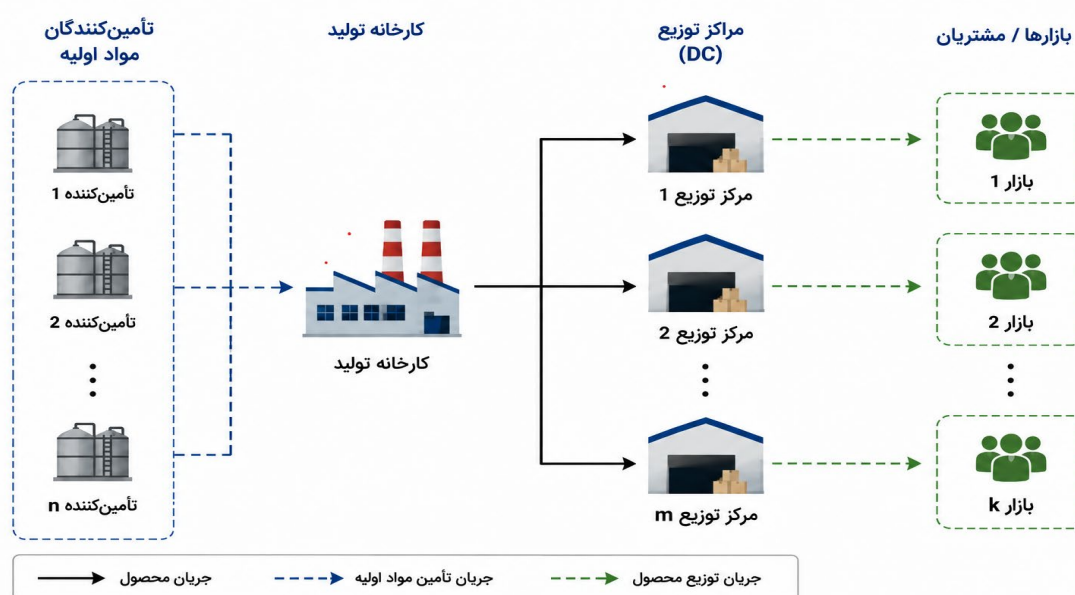
پیش از اختلال، تصمیم‌گیرنده می‌تواند از مدل برای تعیین سطح ذخیره کارخانه‌ای، پیش‌صلاحیت تأمین‌کننده پشتیبان و تهیه برنامه‌های واکنش استفاده کند. پس از مشاهده اختلال نیز مدل با مقدار به‌روز شده زمان شروع، ظرفیت باقیمانده، دسترسی به ذخیره و زمان فعال‌سازی منبع جایگزین دوباره حل می‌شود؛ بنابراین، خروجی مدل یک برنامه مشروط به شدت اختلال است و زمان شروع اختلال به‌عنوان پارامتر برون‌زای آزمون تنش در نظر گرفته می‌شود.

پس از تبدیل به محصولات نهایی، از طریق مراکز توزیع در اختیار مشتریان قرار می‌گیرد. در صورتی که به دلیل اختلال در منبع اصلی امکان پاسخ‌گویی کامل به تقاضا وجود نداشته باشد، تقاضای تأمین‌نشده به‌صورت فروش از دست‌رفته ثبت می‌شود، مشمول جریمه کمبود خواهد بود و به دوره بعد انتقال نمی‌یابد.

برای مقابله با اختلال، چهار گزینه در نظر گرفته می‌شود: بازسازی تأمین‌کننده اصلی، فعال‌سازی تأمین‌کننده پشتیبان، استفاده از ذخیره استراتژیک کارخانه‌ای و ترکیب تأمین‌کننده پشتیبان با ذخیره استراتژیک. مسئله اصلی آن است که مشخص شود کدام سیاست فعال شود، چه مقدار ماده اولیه از هر منبع تأمین گردد، چه میزان ذخیره پیش از اختلال مستقر شود و جریان‌های تولید، موجودی و توزیع طی افق برنامه‌ریزی چگونه تنظیم شوند.

مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، تصمیم‌های راهبردی و تاکتیکی را به‌طور هم‌زمان تعیین می‌کند. تصمیم‌های راهبردی شامل انتخاب گزینه بازسازی، فعال‌سازی تأمین‌کننده پشتیبان و تعیین سطح ذخیره استراتژیک است. تصمیم‌های تاکتیکی شامل مقدار خرید ماده اولیه، تعداد واحدهای حمل، میزان برداشت از ذخیره، مقدار تولید، جریان محصولات، موجودی و کمبود

ساختار ساده زنجیره تأمین محصولات تولیدی (حالت پایه)



شکل ۱. ساختار اولیه شبکه زنجیره تأمین.

Figure 1. Initial structure of the supply chain network.

- تأمین کننده پشتیبان تنها پس از شروع اختلال و در صورت فعال شدن متغیر راهبردی مربوطه قابل استفاده است.
- ظرفیت قابل استفاده تأمین کننده پشتیبان در هر دوره از طریق پارامتر ظرفیت دوره‌ای حمل تعریف می‌شود. هزینه خرید، هزینه حمل و دوره‌های دسترسی این تأمین کننده نیز به صورت پارامترهای برون‌زا و مطابق داده‌های مطالعه موردی تعیین شده‌اند. در مدل شبیه سازی، زمان فعال سازی و زمان حمل به صورت پویا اعمال می‌شوند.
- ذخیره استراتژیک پیش از وقوع اختلال در حالت پیشگیرانه مستقر می‌شود و برداشت از آن تنها پس از دوره شروع اختلال مجاز است.
- در حالت پایه مطالعه، فرض می‌شود ذخیره استراتژیک پیش استقرار یافته پس از وقوع اختلال به طور کامل قابل دسترسی است.
- بازسازی تأمین کننده اصلی با فعال سازی تأمین کننده پشتیبان یا ذخیره استراتژیک ترکیب نمی‌شود؛ اما استفاده هم‌زمان از تأمین کننده پشتیبان و ذخیره استراتژیک مجاز است.
- مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط با تقاضای مورد انتظار حل می‌شود، درحالی که تقاضا و زمان‌های حمل در مدل شبیه سازی تصادفی‌اند.
- تصمیم‌های راهبردی برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط به شبیه سازی منتقل می‌شوند و جریان‌های قطعی مدل ریاضی بر شبیه سازی تحمیل نمی‌شوند.
- انتشار کربن در تابع هدف اقتصادی برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط وارد نشده و فقط به عنوان شاخص مکمل در شبیه سازی محاسبه می‌شود.
- مسیرهای مجاز حمل و نقل از پیش تعیین شده‌اند و ارسال روی مسیرهای تعریف نشده امکان پذیر نیست.
- جریان‌ها و موجودی‌های پلی پروپیلن و ذخیره استراتژیک برحسب تن و جریان‌ها، تولید و

در چارچوب متوالی، برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط سیاست اقتصادی و برنامه مرجع را تحت تقاضای مورد انتظار تعیین می‌کند. سپس همان سناریو راهبردی در شبیه سازی رویداد گسسته تحت تقاضای تصادفی، زمان حمل، سیاست موجودی (s, S) و تأخیرهای اجرایی ارزیابی می‌شود. اختلاف نتایج دو مدل به عنوان شکاف برنامه ریزی - اجرا گزارش می‌شود؛ باین حال، این اختلاف به تنهایی به معنای اعتبار بیشتر یکی از دو مدل نیست و اعتبار چارچوب باید از طریق آزمون‌های صحت منطقی، هم ترازای دو مدل و مقایسه با داده‌های واقعی یا نظر خبرگان بررسی شود.

۳-۲- مفروضات اصلی

مفروضات اصلی به شرح زیر است:

- افق برنامه ریزی شامل T دوره ماهانه است و در حالت پایه، اختلال شدید عرضه از ابتدای دوره t' آغاز می‌شود.
- تأمین کننده اصلی پیش از وقوع اختلال با ظرفیت کامل در دسترس است.
- در حالت پایه اختلال شدید، ظرفیت قابل استفاده تأمین کننده اصلی از ابتدای دوره t' به صفر کاهش می‌یابد. توقف کامل ظرفیت به عنوان یک حالت تنش شدید و محافظه کارانه برای ارزیابی مقایسه‌ای سیاست‌های ارزیابی در نظر گرفته شده است؛ چنین حالتی در مطالعات شبیه سازی اختلال و اثر موجی نیز به کار گرفته شده است (Ivanov, 2026).
- در سناریوی عدم ارزیابی، تأمین کننده اصلی از دوره t' تا پایان افق برنامه ریزی غیرفعال باقی می‌ماند.
- در سناریو بازسازی، دوره‌های عدم دسترسی و زمان بازگشت تأمین کننده اصلی از طریق مقادیر پارامتر θ_{str} تعیین می‌شوند. مدت بازسازی و دوره بازگشت ظرفیت، ورودی سناریو هستند و مقادیر آن‌ها در بخش مطالعه موردی ارائه می‌شود.

tp_p	زمان توليد موردنياز براي توليد يك واحد محصول p	موجودی محصولات نهایی برحسب تعداد محصول بیان می‌شوند. ضرایب تبدیل تعریف شده در مدل برای برقراری سازگاری واحدها در محدودیت‌های توازن مواد و ظرفیت نگهداری به کار می‌روند.
cap_{jt}	ظرفیت توليد در دسترس در کارخانه j در دوره t	• تقاضای تأمین نشده در مدل به صورت فروش از دست رفته در نظر گرفته می‌شود و به دوره بعد انتقال نمی‌یابد. زیرا مشتریان در صورت عدم تحویل در مهلت مقرر، امکان تأمین محصول از عرضه کنندگان جایگزین را دارند.
cs_s	هزینه خرید هر واحد پلی پروپیلن از تأمین کننده s	۳-۳- مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرها
cjs_j	هزینه حمل هر واحد پلی پروپیلن از تأمین کننده s به کارخانه j	در تحقیق حاضر مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرها به شرح زیر هستند:
cg_{gj}	هزینه ارسال هر واحد پلی پروپیلن از انبار ذخیره استراتژیک g به کارخانه j	مجموعه‌ها
cd_{pjd}	هزینه ارسال هر واحد محصول p از کارخانه j به مرکز توزیع d	T مجموعه دوره‌های زمانی، $t \in T$
cc_{pdc}	هزینه ارسال هر واحد محصول p از مرکز توزیع d به مشتری c	P مجموعه محصولات نهایی پلاستیکی، $p \in P$
vc_s	ظرفیت هر کانتینر ماده اولیه ارسال شده از تأمین کننده s	$S = S^M \cup S^B$ مجموعه تأمین کنندگان ماده اولیه که M نشانگر تأمین کنندگان اصلی و B نشانگر تأمین کنندگان پشتیبان است.
θ_{str}	اگر تأمین کننده $s \in S^M$ در دوره t تحت گزینه بازیابی r فعال باشد، مقدار آن برابر یک و در غیر این صورت صفر است	R مجموعه گزینه‌های بازسازی یا عدم بازسازی تأمین کننده اصلی، $r \in R$
hcg_g	هزینه نگهداری ذخیره استراتژیک در انبار g	L مجموعه سطوح مجاز ذخیره استراتژیک پلی پروپیلن، $l \in L$
hcj_{pj}	هزینه نگهداری موجودی محصول p یا ماده اولیه در کارخانه j	G مجموعه انبارهای ذخیره استراتژیک پلی پروپیلن $g \in G$
hcd_{pd}	هزینه نگهداری موجودی محصول p در مرکز توزیع d	J مجموعه کارخانه‌های تولید محصولات پلاستیکی $j \in J$
π_{pc}	جریمه کمبود محصول p برای مشتری c	D مجموعه مراکز توزیع محصولات نهایی $d \in D$
fs_s	هزینه ثابت فعال سازی تأمین کننده پشتیبان s	C مجموعه مشتریان یا بازارهای تقاضا $c \in C$
fr_r	هزینه ثابت انتخاب گزینه بازسازی r	پارامترها
fcg_g	هزینه ثابت ایجاد و فعال سازی انبار استراتژیک g	d_{cpt} تقاضای مشتری c برای محصول p در دوره t
acg_g	هزینه تأمین و پیش‌استقرار هر تن ذخیره استراتژیک در انبار g	rev_p قیمت فروش هر واحد محصول p
cap_{jj}	حداکثر ظرفیت نگهداری ماده اولیه و محصول در کارخانه j	pc_{pj} هزینه تولید هر واحد محصول p در کارخانه j
cap_{pg}	حداکثر ظرفیت نگهداری ذخیره استراتژیک در انبار g	k_p مقدار پلی پروپیلن مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول p
cap_{pd}	حداکثر ظرفیت نگهداری محصول در مرکز توزیع d	
q_l	مقدار ذخیره استراتژیک متناظر با سطح l	
$\bar{N}_{s jt}$	حداکثر تعداد کانتینرهای قابل ارسال از تأمین کننده s به کارخانه j در دوره t	

بود
 Z_g برابر با یک است اگر ذخیره استراتژیک برای
 انبار g فعال شود؛ در غیر این صورت صفر
 خواهد بود
 μ_s برابر با یک است اگر تأمین‌کننده پشتیبان s
 فعال شود؛ در غیر این صورت صفر خواهد بود
 A_r برابر با یک است اگر گزینه بازسازی r فعال
 شود؛ در غیر این صورت صفر خواهد بود
 $A^{No Rec}$ برابر با یک است اگر گزینه عدم بازسازی فعال
 شود؛ در غیر این صورت صفر خواهد بود
 معادلات و روابط تحقیق حاضر به شرح زیر است:

$$Income = \sum_c \sum_p \sum_t rev_p U_{cpt}$$

$$Cost = \sum_p \sum_j \sum_t pc_{pj} Y_{pjt} + \sum_s \sum_j \sum_t cs_s X_{sjt} + \sum_s \sum_j \sum_t c'_{sj} X_{sjt} + \sum_g \sum_j \sum_t cg_{gj} W_{gjt} + \sum_p \sum_j \sum_d \sum_t cd_{pjd} F_{pjd} + \sum_p \sum_d \sum_c \sum_t cc_{pdc} V_{pdct} + \sum_j \sum_t hc_{j} I_{jt} + \sum_p \sum_j \sum_t hc_{j} Ip_{pjt} + \sum_g \sum_t hc_g Is_{gt} + \sum_p \sum_d \sum_t hcd_{pd} Id_{pdt} + \sum_p \sum_c \sum_t \pi_{pc} Sh_{pct} + \sum_{s \in S^b} fs_s \mu_s + \sum_r fr_r A_r + \sum_g fc_g Z_g + \sum_g ac_g H_g$$

$$\max Z = Income - Cost \quad (۱)$$

s.t

$$\sum_r A_r = 1 \quad (۲)$$

$$X_{sjt} \leq vcs N_{sjt} \quad \forall s, j, t \quad (۳)$$

α ضریب تبدیل موجودی پلی‌پروپیلن از تن به
 واحد معادل ظرفیت نگهداری کارخانه
 t' دوره شروع اختلال شدید عرضه در حالت مورد
 بررسی

واحد پیشنهادی

تن پلی‌پروپیلن $X_{sjt}, I_{jt}, Is_{gt}, W_{gjt}, H_g$
 تعداد محصول $Y_{pjt}, F_{pjd}, V_{pdct}, U_{cpt}, Sh_{pct}$
 تعداد محصول Id_{pdt}, Ip_{pjt}
 تعداد کانتینر N_{sjt}
 هزینه‌ها و درآمدها
 تومان
 ماه
 زمان

متغیرها

X_{sjt} مقدار پلی‌پروپیلن ارسال شده از تأمین‌کننده s
 به کارخانه j در دوره t
 N_{sjt} تعداد کانتینرهای ارسال شده از تأمین‌کننده s
 به کارخانه j در دوره t
 Y_{pjt} مقدار تولید محصول p در کارخانه j در دوره t
 F_{pjd} مقدار محصول p ارسال شده از کارخانه j به
 مرکز توزیع d در دوره t
 V_{pdct} مقدار محصول p ارسال شده از مرکز توزیع d
 به مشتری c در دوره t
 U_{cpt} مقدار تقاضای پاسخ داده شده مشتری c برای
 محصول p در دوره t
 Sh_{pct} مقدار تقاضای تأمین‌نشده یا فروش از دست‌رفته
 محصول p برای مشتری c در دوره t
 I_{jt} موجودی پلی‌پروپیلن در کارخانه j در پایان دوره
 t
 Ip_{pjt} موجودی محصول p در کارخانه j در پایان دوره
 t
 Id_{pdt} موجودی محصول p در مرکز توزیع d در پایان
 دوره t
 Is_{gt} موجودی باقی‌مانده ذخیره استراتژیک
 پلی‌پروپیلن در انبار g در پایان دوره t
 W_{gjt} مقدار پلی‌پروپیلن ارسال شده از انبار ذخیره
 استراتژیک g به کارخانه j در دوره t
 H_g مقدار ذخیره استراتژیک پلی‌پروپیلن
 انتخاب شده برای انبار g
 E_{gl} برابر با یک است اگر سطح ذخیره l برای انبار
 g انتخاب شود؛ در غیر این صورت صفر خواهد

$$Id_{pdt} = Id_{pd,t-1} + \sum_j F_{pjdt} - \sum_c V_{pdct} \quad \forall p, d, t > 1 \quad (22)$$

$$\sum_p Id_{pdt} \leq capd_d \quad \forall d, t \quad (23)$$

$$U_{cpt} = \sum_d V_{pdct} \quad \forall c, p, t \quad (24)$$

$$U_{cpt} + Sh_{pct} = d_{cpt} \quad \forall c, p, t \quad (25)$$

$$\mu_s \leq A^{NoRe c} \quad \forall s \in S^B \quad (26)$$

$$Z_g \leq A^{NoRe c} \quad \forall g \quad (27)$$

$$X_{sjt}, Y_{pjt}, F_{pjdt}, V_{pdct}, U_{cpt}, Sh_{pc} \\ I_{jt}, Ip_{pjt}, Id_{pdt}, Is_{gt}, W_{gjt}, H_g \quad \forall s, j, c, p, t, d, \\ \geq 0 \quad (28)$$

$$E_{gl}, Z_g, \mu_s, A_r, A^{NoRe c} \in \{0,1\} \quad \forall g, l, s, r \quad (29)$$

$$N_{sjt} \in \mathbb{Z}_{+\geq 0} \quad \forall s, j, t \quad (30)$$

مدل ریاضی ارائه شده با هدف تعیین سیاست مناسب بازایی برای زنجیره تأمین محصولات پلاستیکی در شرایط اختلال تأمین توسعه داده شده است. این زنجیره شامل تأمین کنندگان ماده اولیه، انبارهای ذخیره استراتژیک پلی پروپیلن، کارخانه های تولید محصولات پلاستیکی، مراکز توزیع و مشتریان یا بازارهای تقاضا است. در این مدل، تصمیم هایی مانند انتخاب گزینه بازسازی تأمین کننده اصلی، فعال سازی تأمین کننده پشتیبان، تعیین سطح ذخیره استراتژیک، مقدار تأمین ماده اولیه، تعداد کانتینرهای مورد نیاز، مقدار تولید، جریان ارسال محصولات، سطح موجودی و مقدار کمبود تقاضا به طور هم زمان تعیین می شوند.

تابع هدف مدل به صورت حداکثر سازی سود کل زنجیره تأمین تعریف شده است. سود کل برابر است با تفاوت میان درآمد حاصل از پاسخ گویی به تقاضای مشتریان و مجموع هزینه های زنجیره تأمین. بخش درآمدی تابع هدف از فروش محصولات نهایی پلاستیکی به مشتریان حاصل می شود. در مقابل، بخش هزینه ای شامل هزینه تولید محصولات، خرید پلی پروپیلن، حمل ماده اولیه و محصولات نهایی، ارسال ماده اولیه از انبار استراتژیک، نگهداری موجودی در کارخانه ها، انبارهای استراتژیک و مراکز توزیع، جریمه فروش از دست رفته، هزینه ثابت فعال سازی تأمین کننده پشتیبان، هزینه انتخاب گزینه

$$N_{sjt} \leq \bar{N}_{sjt} \sum_r \theta_{srt} A_r \quad \forall j, t, s \in S^M \quad (4)$$

$$N_{sjt} \leq \bar{N}_{sjt} \mu_s \quad \forall j, t, s \in S^B \quad (5)$$

$$N_{sjt} = 0 \quad \forall s \in S^B, j, t < t' \quad (6)$$

$$\sum_l E_{gl} = 1 \quad \forall g \quad (7)$$

$$H_g = \sum_l q_l E_{gl} \quad \forall g \quad (8)$$

$$Z_g = \sum_{l>0} E_{gl} \quad \forall g \quad (9)$$

$$H_g \leq capg_g Z_g \quad \forall g \quad (10)$$

$$Is_{g1} = H_g - \sum_j W_{gj1} \quad \forall g \quad (11)$$

$$Is_{gt} = Is_{gt-1} - \sum_j W_{gjt} \quad \forall g, t > 1 \quad (12)$$

$$Is_{gt} \leq capg_g \quad \forall g, t \quad (13)$$

$$W_{gjt} = 0 \quad \forall g, j, t < t' \quad (14)$$

$$I_{j1} \quad (15)$$

$$= I_{j0} + \sum_s X_{sj1} + \sum_g W_{gj1} \\ - \sum_p k_p Y_{pj1} \quad \forall j$$

$$I_{jt} \quad (16)$$

$$= I_{j,t-1} + \sum_s X_{sjt} + \sum_g W_{gjt} \\ - \sum_p k_p Y_{pj t} \quad \forall j, t > 1$$

$$\alpha I_{jt} + \sum_p Ip_{pjt} \leq capj_j \quad \forall j, t \quad (17)$$

$$\sum_p tp_p Y_{pj t} \leq capj_t \quad \forall j, t \quad (18)$$

$$Ip_{pj1} \quad (19)$$

$$= Ip_{pj0} + Y_{pj1} - \sum_d F_{pjd1} \quad \forall p, j$$

$$Ip_{pj t} = Ip_{pj,t-1} + Y_{pj t} \\ - \sum_d F_{pjd t} \quad \forall p, j, t > 1 \quad (20)$$

$$Id_{pd1} \quad (21)$$

$$= Id_{pd0} + \sum_j F_{pjd1} \\ - \sum_c V_{pd c1} \quad \forall p, d$$

گرفته نمی‌شود؛ اما اگر سطحی با مقدار مثبت انتخاب شود، متغیر فعال‌سازی انبار برابر یک خواهد شد. محدودیت (۱۰) نیز ظرفیت نگهداری انبارهای ذخیره استراتژیک را کنترل می‌کند.

محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) توازن موجودی ذخیره استراتژیک پلی‌پروپیلن را بیان می‌کنند. محدودیت (۱۱) موجودی باقی‌مانده ذخیره استراتژیک در دوره اول را بر اساس مقدار ذخیره اولیه انتخاب‌شده و مقدار ارسال‌شده به کارخانه‌ها محاسبه می‌کند. محدودیت (۱۲) همین رابطه را برای دوره‌های بعدی گسترش می‌دهد و موجودی هر دوره را بر اساس موجودی دوره قبل و برداشت‌های انجام‌شده تعیین می‌کند.

محدودیت (۱۳) نیز تضمین می‌کند که موجودی باقی‌مانده ذخیره استراتژیک در هیچ دوره‌ای از ظرفیت انبار مربوطه بیشتر نشود. محدودیت (۱۴) استفاده از ذخیره استراتژیک را پیش از شروع اختلال ممنوع می‌کند. محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) توازن موجودی پلی‌پروپیلن در کارخانه‌ها را نشان می‌دهند. محدودیت (۱۵) موجودی ماده اولیه کارخانه در دوره اول را با در نظر گرفتن موجودی اولیه، مقدار دریافتی از تأمین‌کنندگان، مقدار دریافتی از انبارهای ذخیره استراتژیک و مصرف ماده اولیه در تولید محاسبه می‌کند. محدودیت (۱۶) همین رابطه را برای دوره‌های بعدی بر اساس موجودی دوره قبل توسعه می‌دهد.

محدودیت (۱۷) ظرفیت نگهداری کارخانه را کنترل می‌کند. در این محدودیت، مجموع موجودی پلی‌پروپیلن و موجودی محصولات نهایی در هر کارخانه نباید از ظرفیت نگهداری آن کارخانه بیشتر شود. محدودیت (۱۸) ظرفیت تولید کارخانه‌ها را اعمال می‌کند. بر اساس این محدودیت، مجموع زمان موردنیاز برای تولید همه محصولات در هر کارخانه و هر دوره نباید از ظرفیت تولید در دسترس آن کارخانه بیشتر باشد. محدودیت‌های (۱۹) و (۲۰) توازن موجودی محصولات نهایی در کارخانه‌ها را بیان می‌کنند. محدودیت (۱۹) موجودی محصول نهایی در کارخانه را در دوره اول بر اساس موجودی اولیه، مقدار تولید و مقدار ارسال‌شده به مراکز توزیع محاسبه می‌کند. محدودیت (۲۰) همین توازن را برای دوره‌های بعدی برقرار می‌سازد. محدودیت‌های (۲۱) و (۲۲) توازن موجودی محصولات نهایی در مراکز توزیع را نشان

بازسازی، هزینه ثابت فعال‌سازی انبار استراتژیک و هزینه تأمین و پیش‌استقرار ذخیره استراتژیک است؛ بنابراین، تابع هدف میان درآمد حاصل از پاسخ‌گویی به تقاضا و هزینه‌های تأمین، تولید، موجودی، توزیع و سیاست‌های بازبایی تعادل برقرار می‌کند.

محدودیت (۲) تضمین می‌کند که از میان گزینه‌های موجود برای بازسازی یا عدم بازسازی تأمین‌کننده اصلی، دقیقاً یک گزینه انتخاب شود. این محدودیت، وضعیت بازبایی تأمین‌کننده اصلی را در طول افق برنامه‌ریزی مشخص می‌کند. محدودیت (۳) رابطه میان مقدار پلی‌پروپیلن ارسال‌شده از هر تأمین‌کننده به هر کارخانه و تعداد کانتینرهای تخصیص‌یافته را برقرار می‌کند. بر اساس این محدودیت، مقدار ماده اولیه حمل‌شده نمی‌تواند از ظرفیت کل کانتینرهای اختصاص‌یافته بیشتر باشد. از آنجاکه این رابطه به‌صورت نامساوی نوشته شده است، امکان استفاده ناقص از ظرفیت کانتینرها نیز وجود دارد.

محدودیت (۴) وضعیت دسترسی تأمین‌کننده اصلی را به گزینه بازسازی انتخاب‌شده وابسته می‌کند. اگر تحت گزینه بازسازی انتخاب‌شده، تأمین‌کننده اصلی در یک دوره زمانی در دسترس نباشد، مدل اجازه تخصیص کانتینر و ارسال ماده اولیه از آن تأمین‌کننده را نخواهد داشت. محدودیت (۵) استفاده از تأمین‌کننده پشتیبان را به متغیر فعال‌سازی آن وابسته می‌کند. بر این اساس، اگر تأمین‌کننده پشتیبان فعال نشود، هیچ کانتینری نمی‌تواند از آن تأمین‌کننده به کارخانه‌ها تخصیص یابد.

محدودیت (۶) استفاده از تأمین‌کننده پشتیبان را پیش از شروع اختلال ممنوع می‌کند. محدودیت (۷) مشخص می‌کند که برای هر انبار ذخیره استراتژیک، دقیقاً یک سطح ذخیره انتخاب شود. این سطح می‌تواند نشان‌دهنده گزینه‌هایی مانند عدم ذخیره‌سازی، ذخیره کم، ذخیره متوسط یا ذخیره زیاد باشد. محدودیت (۸) مقدار واقعی ذخیره استراتژیک پلی‌پروپیلن در هر انبار را بر اساس سطح انتخاب‌شده تعیین می‌کند. در این محدودیت، پارامتر مربوط به هر سطح ذخیره، مقدار پلی‌پروپیلن متناظر با آن سطح را نشان می‌دهد.

محدودیت (۹) فعال‌بودن انبار ذخیره استراتژیک را به انتخاب سطح ذخیره مثبت وابسته می‌کند. در صورتی که سطح ذخیره صفر، انتخاب شود، انبار مربوطه فعال در نظر

مجموعه محدودیت‌های (۲۸)، (۲۹) و (۳۰) نوع و دامنه متغیرهای تصمیم و متغیرهای کمکی مدل را مشخص می‌کنند.

۴- مطالعه موردی

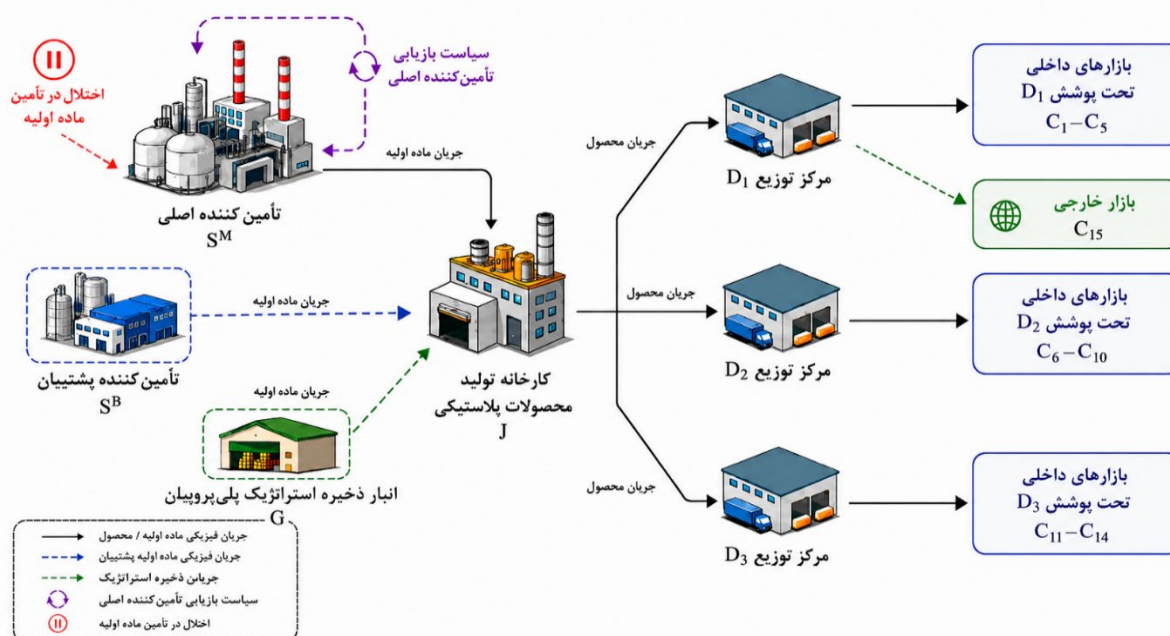
شکل ۲ ساختار شبکه زنجیره تأمین محصولات پلاستیکی ساخته شده از پلی‌پروپیلن را نشان می‌دهد. زنجیره تأمین شامل تأمین‌کننده اصلی ماده اولیه پلی‌پروپیلن، SM، یک کارخانه تولیدی در شهر J این ماده اولیه را به سه محصول پلاستیکی سطل زباله، سبد میوه و صندلی تبدیل می‌کند که از طریق سه مرکز در D_1 ، D_2 و D_3 توزیع می‌شوند. این مراکز به چهارده مرکز مشتری داخلی (بازار عمده) در بازارهای داخلی و یک بازار عمده در خارج از کشور، بازارهای C_1 تا C_{15} خدمات ارائه می‌دهند.

پلی‌پروپیلن با استفاده از کانتینر با ظرفیت ۲۴ تن به کارخانه منتقل می‌شود. محصولات ساخته شده با کامیون‌های بزرگ با ظرفیت ۱۰ تن به مراکز توزیع ارسال می‌شوند. فرض بر این است که تحویل نهایی به مشتریان با استفاده از وانت نیسان‌های ۲ تنی با سیاست حمل‌ونقل کمتر از ظرفیت کامیون برای بهینه‌سازی کارایی توزیع پیروی می‌کند.

می‌دهند. در این محدودیت‌ها، موجودی هر محصول در هر مرکز توزیع بر اساس موجودی اولیه یا موجودی دوره قبل، جریان ورودی از کارخانه‌ها و مقدار ارسال‌شده به مشتریان محاسبه می‌شود.

محدودیت (۲۳) ظرفیت نگهداری مراکز توزیع را کنترل می‌کند. بر اساس این محدودیت، مجموع موجودی محصولات در هر مرکز توزیع و هر دوره نباید از ظرفیت آن مرکز بیشتر شود. محدودیت (۲۴) مقدار تقاضای پاسخ داده شده هر مشتری را به جریان ارسالی از مراکز توزیع متصل می‌کند؛ بنابراین، مقدار تقاضای تأمین‌شده برای هر مشتری، محصول و دوره برابر با مجموع مقدار محصولی است که از مراکز توزیع به آن مشتری ارسال می‌شود. محدودیت (۲۵) توازن تقاضا را برقرار می‌کند. بر اساس این محدودیت، تقاضای هر مشتری برای هر محصول در هر دوره یا پاسخ داده می‌شود یا به‌صورت فروش ازدست‌رفته ثبت می‌گردد و به دوره بعد انتقال نمی‌یابد.

محدودیت‌های (۲۶) و (۲۷) سازگاری میان گزینه بازسازی تأمین‌کننده اصلی و سایر سیاست‌های بازیابی را برقرار می‌کنند. این محدودیت‌ها اجازه نمی‌دهند گزینه بازسازی تأمین‌کننده اصلی هم‌زمان با تأمین‌کننده پشتیبان یا ذخیره استراتژیک انتخاب شود. باین‌حال، در صورت انتخاب گزینه عدم بازسازی، استفاده هم‌زمان از تأمین‌کننده پشتیبان و ذخیره استراتژیک مجاز است.



شکل ۲. ساختار شبکه زنجیره تأمین در تمام سناریوها.

Figure 2. Supply chain network structure across all scenarios.

۴-۱- پارامترها و فرضیات ورودی مدل شبیه‌سازی

این بخش پارامترهای ورودی مدل شبیه‌سازی و فرضیات کلیدی را به شرح زیر ارائه می‌دهد: داده‌های موردنیاز برای پیاده‌سازی مطالعه موردی از چند منبع گردآوری شدند. داده‌های تقاضا و قیمت فروش محصولات با در نظر گرفتن تورم قیمت محصولات از اطلاعات موجود کارخانه‌ای در شهر I استخراج شدند. نرخ تولید، ظرفیت کارخانه و مقدار مصرف پلی‌پروپیلن از گزارش‌های تولید، فهرست مواد اولیه نیز از همین کارخانه به دست آمدند. هزینه‌های حمل‌ونقل از وبگاه pricing.asanbar.ir استعلام قیمت وسایل نقلیه بین مبدأ و مقصد مشخص استخراج و فاصله و زمان مسیرها با استفاده از قابلیت GIS نرم‌افزار anyLogistix محاسبه شد.

پارامترهایی مانند مدت بازسازی، زمان فعال‌سازی تأمین‌کننده پشتیبان، ظرفیت منبع جایگزین و سطح ذخیره استراتژیک که داده تاریخی مستقیمی برای آن‌ها وجود نداشت، بر اساس مصاحبه با خبرگان زنجیره تأمین تعیین شدند. به منظور رعایت محرمانگی، نام شرکت و برخی مقادیر تجاری بی‌نام‌سازی یا با یک ضریب ثابت تعدیل شده‌اند؛ باین‌حال، ساختار شبکه، نسبت میان پارامترها و روابط عملیاتی بدون تغییر حفظ شده‌اند.

(۱) **تقاضا: جدول ۲** جزئیات پارامترهای مرتبط با مشتری را ارائه می‌دهد. تقاضای مشتری از توزیع یکنواختی پیروی می‌کند و به صورت ماهیانه رخ می‌دهد.

(۲) **مسیر:** زنجیره تأمین شبیه‌سازی شده شامل نوزده مسیر است. یک مسیر از تأمین‌کننده به کارخانه، سه مسیر از کارخانه به مراکز توزیع D_1 و D_2 ، D_3 و پانزده مسیر از مراکز توزیع به مشتریان وجود دارد، همان‌طور که در **شکل ۲** نشان داده شده است. هزینه حمل‌ونقل در هر مسیر در **جدول ۳** قابل مشاهده است و مقدار تولید کربن‌دی‌اکسید در هر مسیر ۳۵۰ گرم به‌ازای کیلومتر است. از قابلیت‌های GIS نرم‌افزار anyLogistix برای محاسبه دقیق هزینه‌های حمل‌ونقل و زمان‌های حمل‌ونقل استفاده می‌شود. تولید و فهرست مواد اولیه **جدول ۴**

در مدل شبیه‌سازی رویداد گسسته، سیاست کنترل موجودی (S, S) در تأسیسات شبکه اعمال می‌شود تا رفتار پویای سفارش‌دهی و تجدید موجودی بازنمایی گردد. در مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، موجودی از طریق محدودیت‌های توازن دوره‌ای و ظرفیت نگهداری کنترل می‌شود.

پس از تعریف ساختار شبکه و داده‌های پایه مشترک، مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط در محیط Python/Pyomo و با استفاده از حل‌کننده HiGHS حل شد. سپس فقط پیکربندی‌های راهبردی متناظر با گزینه بازسازی، تأمین‌کننده پشتیبان، ذخیره استراتژیک و راهبرد ترکیبی در anyLogistix 3.0.1 تثبیت و ارزیابی شدند. جریان‌های قطعی تأمین، تولید و توزیع حاصل از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط نیز به مدل شبیه‌سازی تحمیل نشدند؛ زیرا این جریان‌ها در شبیه‌سازی تحت تقاضای تصادفی، زمان حمل و سیاست (S, S) به صورت پویا شکل می‌گیرند.

صحت پیاده‌سازی مدل ریاضی و مدل شبیه‌سازی در چهار گام بررسی شد: نخست، توازن جریان و موجودی در تمام گره‌ها و دوره‌ها کنترل شد؛ دوم، سازگاری واحدهای تن، تعداد محصول و ظرفیت حمل بررسی گردید؛ سوم، حالت‌های حدی شامل عملیات عادی، توقف کامل منبع اصلی و غیرفعال‌بودن هر یک از سیاست‌ها آزمون شد؛ و چهارم، ساختار شبکه، شرایط اولیه و پارامترهای مشترک دو مدل هم‌تراز شدند. سناریوی عملیات عادی برای کالیبراسیون خط مبنا به کار رفت و سناریوی بدون بازبایی، که در کالیبراسیون استفاده نشده بود، برای کنترل مستقل سازگاری ساختاری مقایسه شد. اختلاف $1/48$ درصدی سود این سناریو میان دو مدل، شواهد اولیه‌ای از سازگاری ساختاری فراهم می‌کند.

در پیاده‌سازی مطالعه موردی، افق برنامه‌ریزی شامل ۲۴ دوره ماهانه و دوره آغاز اختلال برابر $t' = 4$ در نظر گرفته شد. در گزینه عدم بازبایی، تأمین‌کننده اصلی از دوره چهارم تا پایان افق غیرفعال است. در گزینه بازسازی هفت‌ماهه، مقدار پارامتر دسترسی تأمین‌کننده اصلی در دوره‌های چهارم تا دهم صفر و از ابتدای دوره یازدهم برابر یک در نظر گرفته شد. در مدل شبیه‌سازی با تفکیک زمانی روزانه، رخداد متناظر در روز سوم ماه چهارم اعمال شد.

۴-۲- طراحی آزمایش شبیه‌سازی و روش تحلیل آماری

به‌منظور مقایسه نظام‌مند عملکرد پیکربندی‌های مختلف زنجیره تأمین، یک طرح آزمایش شبیه‌سازی یک عاملی متوازن در نظر گرفته شد. عامل آزمایش، نوع پیکربندی عملیاتی زنجیره تأمین بود که در شش سطح شامل شرایط عادی، اختلال بدون راهبرد بازایی، بازسازی هفت‌ماهه تأمین‌کننده اصلی، استفاده از تأمین‌کننده پشتیبان، استفاده از ذخیره استراتژیک و راهبرد ترکیبی تأمین‌کننده پشتیبان - ذخیره استراتژیک تعریف شد.

جزئیات نرخ تولید را نشان می‌دهد. جزئیات فهرست مواد اولیه در **جدول ۵** ارائه شده است. **سیاست موجودی:** این زنجیره تأمین تحت سیاست کنترل موجودی (s, S) در تمام تأسیسات، مطابق **جدول ۶**، فعالیت می‌کند. در این سیاست، S نشان‌دهنده نقطه سفارش مجدد است، درحالی‌که s نشان‌دهنده حداکثر سطح موجودی است که موجودی هنگام ثبت سفارش تا آن سطح دوباره پر می‌شود. این رویکرد تعداد محصولات تولید شده موردنیاز را بر اساس هزینه‌های موجودی و کاهش موجودی اضافی سفارش می‌دهد.

جدول ۲. پارامترهای ورودی مدل شبیه‌سازی

Table 2. Input parameters of the simulation model

بازار	محصول	پارامترها	مقدار فروش (تومان)	زمان رسیدن (روز)
$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8$	سطل زباله	• بازه سفارش: ۳۰ روز، تعداد: توزیع یکنواخت (۳۵۰۰، ۴۵۰۰) • اولین رخداد: اولین روز	۴۰۰۰۰۰	۳۰
	سبد	• بازه سفارش: ۳۰ روز، تعداد: توزیع یکنواخت (۲۵۰۰، ۳۵۰۰) • اولین رخداد: اولین روز	۸۰۰۰۰۰	۳۰
	صندلی	• بازه سفارش: ۳۰ روز، تعداد: توزیع یکنواخت (۱۵۰۰، ۲۵۰۰) • اولین رخداد: اولین روز	۱۷۰۰۰۰۰	۳۰
C_9, C_{10}, C_{11}	سطل زباله	• بازه سفارش: ۳۰ روز، تعداد: توزیع یکنواخت (۳۵۰۰، ۴۵۰۰) • اولین رخداد: اولین روز	۴۰۰۰۰۰	۳۰
	سبد	• بازه سفارش: ۳۰ روز، تعداد: توزیع یکنواخت (۲۵۰۰، ۳۵۰۰) • اولین رخداد: اولین روز	۸۰۰۰۰۰	۳۰
	صندلی	• بازه سفارش: ۳۰ روز، تعداد: توزیع یکنواخت (۱۵۰۰، ۲۵۰۰) • اولین رخداد: اولین روز	۱۷۰۰۰۰۰	۳۰
$C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}$	سطل زباله	• بازه سفارش: ۳۰ روز، تعداد: توزیع یکنواخت (۳۵۰۰، ۴۵۰۰) • اولین رخداد: اولین روز	۴۰۰۰۰۰	۳۰
	سبد	• بازه سفارش: ۳۰ روز، تعداد: توزیع یکنواخت (۲۵۰۰، ۳۵۰۰) • اولین رخداد: اولین روز	۸۰۰۰۰۰	۳۰
	صندلی	• بازه سفارش: ۳۰ روز، تعداد: توزیع یکنواخت (۱۵۰۰، ۲۵۰۰) • اولین رخداد: اولین روز	۱۷۰۰۰۰۰	۳۰

جدول ۳. هزینه حمل‌ونقل مسیرها و وسیله نقلیه مورداستفاده

Table 3. Transportation costs of routes and vehicles used

از	به	هزینه حمل‌ونقل (تومان)	نوع وسیله نقلیه
پتروشیمی تأمین‌کننده S^M	کارخانه تولید محصولات پلاستیکی J	۳۲۰۰۰۰۰۰	کانتینر
کارخانه تولید محصولات پلاستیکی J	توزیع‌کننده D_1	۴۰۰۰۰۰۰	کامیون بزرگ
	توزیع‌کننده D_2	۱۷۰۰۰۰۰۰	
	توزیع‌کننده D_3	۲۴۰۰۰۰۰۰	
توزیع‌کننده D_3	بازار C_{11}	۷۰۰۰۰۰۰	کامیون کوچک
	بازار C_9	۱۰۰۰۰۰۰	
	بازار C_{10}	۴,۰۰۰,۰۰۰	
توزیع‌کننده D_2	بازار C_2	۱۰۰۰۰۰۰	کامیون کوچک
	بازار C_1	۱۰۰۰۰۰۰	
	بازار C_3	۱۰۰۰۰۰۰	
	بازار C_4	۳۰۰۰۰۰۰	
	بازار C_5	۵۰۰۰۰۰۰	
	بازار C_7	۹۰۰۰۰۰۰	
	بازار C_6	۵۰۰۰۰۰۰	
	بازار C_8	۱۴۰۰۰۰۰۰	
توزیع‌کننده D_1	بازار C_{13}	۵۰۰۰۰۰۰	کامیون کوچک
	بازار C_{14}	۵۰۰۰۰۰۰	
	بازار C_{12}	۷۰۰۰۰۰۰	
	بازار C_{15}	۱۲۰۰۰۰۰۰	

جدول ۴. نرخ تولید و هزینه تولید محصولات پلاستیکی

Table 4. Production rate and production cost of plastic products

مرکز	محصول	نرخ تولید (ثانیه)	هزینه تولید (تومان)
کارخانه تولید محصولات پلاستیکی J	سطل زباله	۲۰	۲۰۰۰۰
	سبد	۳۰	۷۰۰۰۰
	صندلی	۴۰	۹۰۰۰۰

جدول ۵. مقدار پلی‌پروپیلن مورد نیاز برای هر محصول

Table 5. Required amount of polypropylene for each product

نام محصول نهایی	مقدار ماده اولیه موردنیاز به‌ازای هر یک عدد (گرم)
سطل زباله	۱۰۰
سبد میوه	۳۰۰
صندلی پلاستیکی	۶۰۰

اختلال مربوط بود. سایر مؤلفه‌های مدل، از جمله افق ۲۴ ماهه شبیه‌سازی، ساختار شبکه، توزیع‌های تقاضا، زمان‌های حمل‌ونقل، ظرفیت تولید، سیاست کنترل موجودی (S, s) ، قیمت‌ها و پارامترهای هزینه، در تمام اجراها ثابت نگه داشته شدند.

در تمام سناریوهای اختلال، زمان آغاز اختلال و شدت اولیه آن ثابت در نظر گرفته شد. اختلال از روز سوم ماه چهارم آغاز شد و در زمان وقوع آن، ظرفیت تأمین‌کننده اصلی پلی‌پروپیلن به صفر کاهش یافت. تفاوت میان سناریوها به سازوکار واکنش و بازایی زنجیره پس از وقوع

جدول ۶. سیاست کنترل موجودی تأسیسات اجزای زنجیره تأمین

Table 6. Inventory control policy for the facilities of the supply chain

مرکز	محصول	سیاست کنترل موجودی	پارامترها
کارخانه تولید محصولات پلاستیکی I	پلی پروپیلن	کنترل موجودی (s, S)	$S = 2000, s = 1000$
	سطل زباله		$S = 7500, s = 5000$
	سبد		$S = 7500, s = 5000$
	صندلی		$S = 7500, s = 5000$
مرکز توزیع D_3	سطل زباله	کنترل موجودی (s, S)	$S = 13500, s = 8500$
	سبد		$S = 10000, s = 5000$
	صندلی		$S = 10000, s = 5000$
مرکز توزیع D_2	سطل زباله	کنترل موجودی (s, S)	$S = 35000, s = 25000$
	سبد		$S = 30000, s = 20000$
	صندلی		$S = 30000, s = 20000$
مرکز توزیع D_1	سطل زباله	کنترل موجودی (s, S)	$S = 20000, s = 15000$
	سبد		$S = 12500, s = 7500$
	صندلی		$S = 12500, s = 7500$

جدول ۷. ساختار طرح آزمایش شبیه سازی

Table 7. Structure of the simulation experimental design

نوع طرح آزمایش	طرح شبیه سازی یک عاملی متوازن
عامل آزمایش	پیکربندی عملیاتی زنجیره تأمین
تعداد سطوح عامل	۶ سطح
سطوح عامل	عادی، بدون بازیابی، بازسازی هفت ماهه، تأمین کننده پشتیبان، ذخیره استراتژیک و راهبرد ترکیبی
تعداد تکرار هر سناریو	۱۰ تکرار
تعداد کل اجراها	۶۰ اجرای شبیه سازی
افق شبیه سازی	۲۴ ماه
زمان آغاز اختلال	روز سوم ماه چهارم
شدت اختلال	توقف کامل ظرفیت تأمین کننده اصلی
متغیر پاسخ آماری	سود تحقق یافته زنجیره تأمین
آمار توصیفی	میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات و فاصله اطمینان ۹۵ درصد
آزمون مقایسه کلی	تحلیل واریانس یک طرفه ولج
آزمون مقایسه های دوتایی	آزمون Games-Howell
سطح معناداری	۰/۰۵

پیش از مقایسه میانگین سناریوها، نرمال بودن داده های هر سناریو با استفاده از آزمون شاپیرو ویلک و همگنی واریانس ها با استفاده از آزمون لوین بررسی شد. نتایج آزمون شاپیرو - ویلک، فرض نرمال بودن داده های سود را در هیچ یک از سناریوها رد نکرد. باین حال، آزمون لوین تفاوت معناداری میان واریانس سناریوها نشان داد. از این رو، به جای تحلیل واریانس کلاسیک، از تحلیل

برای هر یک از شش سناریو، ۱۰ تکرار شبیه سازی انجام شد؛ بنابراین، طرح آزمایش در مجموع شامل ۶۰ اجرای شبیه سازی بود. سود تحقق یافته زنجیره تأمین به عنوان متغیر پاسخ اصلی طرح آزمایش در نظر گرفته شد. برای هر سناریو، میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات و فاصله اطمینان ۹۵ درصد سود محاسبه شد (جدول ۷).

سناریوهای اختلال در برابر این مبنا، می‌توانیم تأثیر راهبردهای تاب‌آوری را بر سودآوری، سطح خدمات و پایداری زیست‌محیطی ارزیابی کنیم.

ب) سناریوی اختلال بدون سیاست بازیابی: در این سناریو، اختلال در تأمین‌کننده از روز سوم ماه چهارم رخ می‌دهد و تا پایان دوره شبیه‌سازی ادامه می‌یابد. هیچ راهبرد بازیابی اجرا نمی‌شود و به ما امکان می‌دهد تا تأثیر کامل اختلال بر عرضه ماده اولیه، تداوم تولید و عملکرد کلی زنجیره تأمین را مشاهده کنیم. این سناریو با برجسته‌کردن پیامدهای عملیاتی، مالی و زیست‌محیطی در غیاب اقدامات کاهش، به‌عنوان معیاری برای ارزیابی اثربخشی راهبردهای تاب‌آوری عمل می‌کند.

ج) سناریوی بازسازی: در سناریوی بازسازی، فرض می‌شود تأمین‌کننده اصلی پلی‌پروپیلن SM در اثر وقوع اختلال امکان تأمین ماده اولیه را از دست می‌دهد؛ بنابراین، مدت بازسازی در مطالعه موردی هفت ماه در نظر گرفته شد؛ این مقدار یک ورودی سناریویی است. پس از تکمیل بازسازی، تأمین از تأمین‌کننده اصلی ازسرگرفته می‌شود. پس از تکمیل بازسازی، تأمین از تأمین‌کننده اصلی ازسرگرفته می‌شود. این سناریو نشان می‌دهد که اگرچه بازسازی می‌تواند از نظر اقتصادی جذاب باشد، اما به دلیل زمان بازیابی طولانی، ممکن است پاسخ کوتاه‌مدت مناسبی برای حفظ سطح خدمت نباشد.

د) سناریوی تأمین‌کننده پشتیبان: در سناریوی تأمین‌کننده پشتیبان، فرض می‌شود پس از وقوع اختلال در پتروشیمی تأمین‌کننده SM، یک تأمین‌کننده پلی‌پروپیلن خارج از کشور SB فعال می‌شود. انتخاب این تأمین‌کننده به دلیل قراردادن خارج از منطقه اختلال و امکان ارسال زمینی به ایران در نظر گرفته شده است. با این حال، این گزینه به دلیل طولانی‌تر بودن مسیر بین‌المللی، زمان تأمین بیشتر، تعرفه واردات و هزینه حمل‌بالاتر با محدودیت‌های اجرایی و اقتصادی همراه است. مسیر حمل بین‌المللی طولانی‌تر بوده و با تعرفه گمرکی ۳٪ برای مواد اولیه وارداتی که در شبیه‌سازی اعمال شده و افزایش هزینه حمل‌ونقل به ۶۰ میلیون تومان به دلیل طولانی‌تر بودن مسیر نسبت به حالت عادی همراه است. همچنین فرض می‌شود تأمین‌کننده پشتیبان قادر به پاسخ‌گویی به تقاضای ماده اولیه است، اما این پاسخ‌گویی با هزینه ارسال بالاتر و زمان تأمین طولانی‌تر

واریانس یک‌طرفه ولج استفاده شد که نسبت به نابرابری واریانس‌ها مقاوم‌تر است. پس از تأیید تفاوت کلی میان سناریوها، آزمون تعقیب Games-Howell برای مقایسه‌های دوتایی به کار گرفته شد. سطح معناداری تمام آزمون‌ها برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

در این طرح، هدف اصلی بررسی اثر نوع راهبرد بازیابی تحت یک اختلال ثابت و شدید است. توقف کامل ظرفیت تأمین‌کننده اصلی به‌عنوان یک حالت تنش محافظه‌کارانه و سازگار با مطالعات شبیه‌سازی اختلال و اثر موجی در نظر گرفته شد (Ivanov, 2026). این فرض برای ثابت نگه‌داشتن شدت اولیه اختلال و جداسازی اثر نوع سیاست بازیابی انتخاب شده است. از این‌رو، شدت و زمان آغاز اختلال به‌عنوان عوامل مستقل آزمایش تغییر داده نشدند و فقط پیکربندی واکنش و بازیابی میان سناریوها متفاوت بود.

۴-۳- سناریوهای شبیه‌سازی

در مطالعه موردی، تأمین‌کننده اصلی پلی‌پروپیلن از مدار تأمین خارج می‌شود و در نتیجه، اختلال شدید عرضه در زنجیره به وجود می‌آید. برای مقایسه واکنش‌های جایگزین تحت شرایط اولیه یکسان، شش پیکربندی عملیاتی شامل عملیات عادی، اختلال بدون سیاست بازیابی، بازسازی تأمین‌کننده اصلی، فعال‌سازی تأمین‌کننده پشتیبان، استفاده از ذخیره استراتژیک و راهبرد ترکیبی در مدل شبیه‌سازی تعریف شد. در پنج پیکربندی اختلال، زمان آغاز و شدت اولیه اختلال ثابت نگه داشته شد و تفاوت فقط به نوع واکنش و سازوکار بازیابی مربوط بود. تصمیم‌های راهبردی متناظر در مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط تثبیت و عملکرد پویای هر پیکربندی در نرم‌افزار anyLogistix ارزیابی شد.

الف) سناریو عادی: در این سناریو، شبیه‌سازی با استفاده از تمام داده‌های تعریف‌شده قبلی اجرا می‌شود و به‌عنوان مبنایی برای مقایسه عمل می‌کند. این مدل از ۱۱ دی ۱۴۰۴ (۱ ژانویه ۲۰۲۶) تا ۱۰ دی ۱۴۰۶ (۳۱ دسامبر ۲۰۲۷) عمل می‌کند و شرایط عادی زنجیره تأمین را بدون اختلال نشان می‌دهد. این سناریو خط مبنای مقایسه را فراهم می‌کند و برای محاسبه افت عملکرد و میزان بازیابی به کار می‌رود. با مقایسه نتایج

۵- نتایج

شناسایی شاخص‌های کلیدی عملکرد مناسب برای ارزیابی عملکرد کسب‌وکار و تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده ضروری است. این مطالعه اثربخشی سناریوهای مختلف بازیابی را با استفاده از مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکرد که جنبه‌های مالی، عملیاتی و زیست‌محیطی را در بر می‌گیرند، ارزیابی می‌کند. این ارزیابی، سود، سطح موجودی، سطح خدمات، سطح خدمات زمان تحویل موردانتظار و کل انتشار کربن دی‌اکسید را در نظر می‌گیرد. هر شاخص کلیدی عملکرد در بخش مربوطه خود تجزیه و تحلیل می‌شود تا درک دقیقی از چگونگی تأثیر راهبردهای مختلف بازیابی بر تاب‌آوری، کارایی و پایداری زنجیره تأمین ارائه دهد.

۵-۱- نتایج طراحی آزمایش و تحلیل آماری سود

جدول ۹ آمار توصیفی سود تحقق‌یافته در ۱۰ تکرار هر سناریو را نشان می‌دهد. میانگین سود در شرایط عادی برابر با ۱۱۳۷ میلیارد تومان بود. در میان سناریوهای اختلال، راهبرد ترکیبی با میانگین سود ۹۲۶ میلیارد تومان بالاترین عملکرد را داشت. پس از آن، سناریوهای تأمین‌کننده پشتیبان، بازسازی هفت‌ماهه، ذخیره استراتژیک و بدون بازیابی به ترتیب قرار گرفتند.

نسبت به تأمین‌کننده داخلی انجام می‌شود؛ بنابراین، این سناریو بیشتر مناسب حالتی است که حفظ سطح خدمت و جلوگیری از توقف تولید نسبت به کاهش هزینه در اولویت قرار داشته باشد.

و) سناریو ذخیره استراتژیک: در سناریوی ذخیره استراتژیک، یک انبار استراتژیک پلی‌پروپیلن پیش از وقوع اختلال در شبکه در نظر گرفته می‌شود تا در صورت آسیب به تأمین‌کننده اصلی، ماده اولیه موردنیاز تولید به‌صورت فوری در دسترس باشد. این سناریو در شرایط اختلالات دارای اهمیت بسیاری است، زیرا در زمان اختلال ممکن است بازسازی تأسیسات آسیب‌دیده با تأخیر مواجه شود و دسترسی به تأمین‌کنندگان خارجی نیز به دلیل محدودیت‌های مرزی، ناامنی مسیرها یا افزایش کنترل‌های امنیتی دشوار باشد؛ بنابراین، ذخیره استراتژیک می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد پیشگیرانه برای حفظ تداوم تولید، کاهش زمان پاسخ به بحران و جلوگیری از افت شدید سطح خدمت عمل کند. البته این راهبرد مستلزم هزینه نگهداری بالاتر و سرمایه‌گذاری پیش از بحران است، علی‌رغم هزینه‌های بالاتر نگهداری (جدول ۸)، تأسیس شده است.

جدول ۸. سیاست موجودی انبار پشتیبان (ذخیره)

Table 8. Existing backup inventory policy

مرکز	محصول	سیاست کنترل موجودی	موجودی اولیه (تن)
موجودی پشتیبان	پلی‌پروپیلن	بدون سیاست کنترل موجودی	۱۰۰۰

جدول ۹. آمار توصیفی سود سناریوهای شبیه‌سازی

Table 9. Descriptive statistics of the profit of the simulated scenarios

سناریو	تعداد تکرار	میانگین (میلیارد تومان)	سود	انحراف معیار	فاصله اطمینان ۹۵٪	ضریب تغییرات (%)	گروه آماری
عادی	۱۰	۱۱۳۷/۶۶۳	۴/۳۵۸	۱۱۳۴/۵۴۵ تا ۱۱۴۰/۷۸۱	۰/۳۸	a	
راهبرد ترکیبی	۱۰	۹۲۶/۶۸۰	۶/۲۵۱	۹۲۲/۲۰۸ تا ۹۳۱/۱۵۱	۰/۶۷	b	
تأمین کننده پشتیبان	۱۰	۹۰۵/۵۹۵	۳/۳۸	۹۰۳/۱۷۷ تا ۹۰۸/۰۱۲	۰/۳۷	c	
بازسازی هفت ماهه	۱۰	۸۳۲/۷۵۹	۴/۶۶۷	۸۲۹/۴۲۰ تا ۸۳۶/۰۹۸	۰/۵۶	d	
ذخیره استراتژیک	۱۰	۶۰۷/۴۹۶	۱۰/۰۱۲	۶۰۰/۳۳۴ تا ۶۱۴/۶۵۹	۱/۶۵	e	
بدون بازیابی	۱۰	۳۱۶/۹۹۵	۵/۷۳۳	۳۱۲/۸۹۳ تا ۳۲۱/۰۹۶	۱/۸۱	f	

۵-۲- عملکرد محاسباتی و سیاست منتخب

برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط

در حالت آزاد، مدل تأمین‌کننده پشتیبان را انتخاب کرد و سود موردانتظار آن 1134090994852 تومان، معادل $1134/091$ میلیارد تومان با سطح خدمت برنامه‌ریزی شده 100% بود. مقدار $ANoRec = 1$ (گزینه بدون بازسازی) $\mu = 1$ و $Z = 0$ و $H = 0$ به دست آمد. بالاین‌حال، سود ذخیره استراتژیک تنها $190/3$ میلیون تومان کمتر بود؛ اختلافی حدود $0/017\%$ که نشان می‌دهد انتخاب سیاست نسبت به پارامترهای هزینه حساس است (جدول ۱۰).

سطح خدمت برنامه‌ریزی شده از رابطه (۳۱) محاسبه شد. کمبود برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط در سناریوی بدون بازیابی 2920000 واحد و در بازسازی هفت‌ماهه 1010000 واحد بود و در چهار سناریوی دیگر به صفر رسید. تطابق تقریباً کامل عملیات عادی نتیجه کالبراسیون است و نباید اعتبارسنجی مستقل تلقی شود. سناریوی بدون بازیابی که در کالبراسیون استفاده نشده، اختلاف $1/48\%$ دارد و شواهد اولیه‌ای از سازگاری ساختاری ارائه می‌دهد. اختلاف بزرگ‌تر سیاست‌های فعال ناشی از تفاوت تقاضای موردانتظار و تصادفی، زمان‌بندی تأمین، فروش از دست‌رفته، سیاست موجودی، هزینه‌های اجرایی و ارزش موجودی پایان افق است.

$$SL^{MILP} = \frac{\sum_{c,p,t} U_{cpt}}{\sum_{c,p,t} d_{cpt}} \times 100 \quad (31)$$

ضریب تغییرات سود در تمام سناریوها کمتر از 2% درصد بود که نشان‌دهنده پراکندگی محدود نتایج میان تکرارها و ثبات مناسب خروجی‌های شبیه‌سازی است. همچنین، نیم عرض فاصله اطمینان 95% درصد در تمام سناریوها کمتر از $1/3$ درصد میانگین سود بود؛ بنابراین، 10 تکرار انجام‌شده دقت قابل‌قبولی برای مقایسه سود سناریوها فراهم کرد.

حروف متفاوت در ستون گروه آماری نشان‌دهنده تفاوت معنادار میان میانگین سناریوها بر اساس آزمون Games-Howell در سطح معناداری 5% درصد است.

نتایج آزمون شاپیرو - ویلک نشان داد که فرض نرمال بودن داده‌های سود در هیچ‌یک از شش سناریو رد نمی‌شود ($p > 0.05$). بالاین‌حال، آزمون لوین نشان داد که واریانس سود میان سناریوها همگن نیست ($p = 0.018$). بر این اساس، برای مقایسه میانگین سناریوها از تحلیل واریانس یک‌طرفه ولج استفاده شد.

نتایج تحلیل واریانس ولج نشان داد که نوع پیکربندی سناریو اثر معناداری بر سود تحقق‌یافته زنجیره تأمین دارد:

$$F_{\text{Welch}}(5, 24.859) = 25279.188, p < 0.001$$

بنابراین، فرض برابری میانگین سود شش سناریو رد شد. نتایج آزمون تعقیبی Games-Howell نیز نشان داد که تمام مقایسه‌های دوتایی میان سناریوها از نظر آماری معنادار هستند ($p < 0.001$). در نتیجه، اختلاف مشاهده‌شده میان عملکرد راهبردها صرفاً ناشی از تغییرات تصادفی تکرارهای شبیه‌سازی نیست و هر یک از پیکربندی‌ها سطح متمایزی از سودآوری ایجاد می‌کنند.

جدول ۱۰. مقدار سود به‌دست‌آمده در زنجیره تأمین

Table 10. Profit generated in the supply chain

سناریو	سود برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (میلیارد تومان)	سود شبیه‌سازی (میلیارد تومان)	اختلاف نسبت به شبیه‌سازی رویداد گسسته (٪)	خدمت به خطی عدد صحیح مختلط (٪)	برنامه‌ریزی صحیح
عادی	۱۱۳۷/۶۶۳	۱۰۳۷/۶۶۳	$\approx 0/00$	۱۰۰/۰۰	
بدون بازیابی	۳۲۱/۶۷۳	۳۱۶/۹۹۵	$+1/48$	۹/۸۸	
بازسازی هفت‌ماهه	۸۳۰/۷۱۷	۸۳۲/۷۵۹	$-0/25$	۶۸/۸۳	
تأمین‌کننده پشتیبان	۱۱۳۴/۰۹۱	۹۰۵/۵۹۵	$+25$	۱۰۰/۰۰	
ذخیره استراتژیک	۱۱۳۳/۹۰۱	۶۰۷/۴۹۶	$+87$	۱۰۰/۰۰	
راهبرد ترکیبی	۱۱۲۸/۹۰۱	۹۲۶/۶۸۰	$+21/86$	۱۰۰/۰۰	

موجودی به سرعت افت می‌کند و تا پایان دوره در پایین‌ترین سطح (حدود ۸۵۰۰ واحد) ثابت می‌ماند؛ زیرا بدون تأمین ماده اولیه، تولید متوقف شده و امکان بازسازی موجودی وجود ندارد.

در سناریوی بازسازی، موجودی طی دوره توقف منبع اصلی کاهش می‌یابد و پس از بازگشت ظرفیت تأمین‌کننده به تدریج به الگوی عادی نزدیک می‌شود. در سناریوی انبار پشتیبان نیز بعد از وقوع اختلال مقدار موجودی به حالت عادی باز می‌گردد که نشان‌دهنده پوشش سریع و مناسب مقدار مواد اولیه مورد نیاز می‌باشد. تأمین‌کننده پشتیبان جریان ماده اولیه را پس از سپری شدن زمان فعال‌سازی برقرار می‌کند و از افت ممتد موجودی جلوگیری می‌نماید. راهبرد ترکیبی نیز از ذخیره برای پوشش فاصله زمانی اولیه و از منبع پشتیبان برای ادامه تأمین استفاده می‌کند. باین‌حال، این عملکرد به مفروضات حالت پایه، دسترسی کامل به ذخیره و ظرفیت تعریف‌شده منبع پشتیبان وابسته است.

۵-۵- تحلیل سطح خدمت و سطح خدمت مبتنی بر زمان تحویل مورد انتظار

شکل ۴ سطح خدمت (پاسخ‌گویی به تقاضای مشتریان) و سطح خدمت مبتنی بر زمان تحویل مورد انتظار را برای شش سناریو نشان می‌دهد. براین‌اساس، سناریوهای عادی (خط نارنجی)، تأمین‌کننده پشتیبان (خط آبی) و ترکیبی (خط سبز) در کل دوره سطح خدمتی نزدیک به ۱۰۰٪ را حفظ می‌کنند و عملاً دچار افت محسوسی نمی‌شوند. این نتیجه نشان می‌دهد که هم اتکای راهبردی به یک تأمین‌کننده خارجی و هم ترکیب آن با ذخیره استراتژیک می‌توانند تداوم کامل خدمت‌رسانی به مشتریان را حتی در شرایط اختلال تأمین تضمین کنند؛ به‌ویژه سناریوی ترکیبی به دلیل پوشش هم‌زمان شکاف اولیه بحران و تداوم تأمین در ادامه، بدون افت اولیه سطح خدمت را کامل نگه می‌دارد.

در مقابل، سناریوی اختلال بدون بازیابی (خط قرمز) با افت شدید و پیوسته مواجه می‌شود و سطح خدمت آن تا پایان دوره به حدود ۲۳٪ کاهش می‌یابد؛ این روند نزولی، آسیب‌پذیری عملیاتی شدید زنجیره را در نبود هرگونه

بنابراین، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط سود برنامه‌ریزی‌شده و تصمیم اقتصادی را ارائه می‌کند و شبیه‌سازی پیامد تحقق‌یافته را می‌سنجد. سناریوی بازسازی نمونه روشنی است که سود افق شبیه‌سازی بالا است، اما سطح خدمت در دوره تعمیر افت می‌کند. این نتیجه ضرورت تحلیل چندشاخصی و بررسی زمان شناسایی درآمد و نحوه ثبت تقاضای تأمین‌نشده و فروش ازدست‌رفته را نشان می‌دهد.

۵-۳- جمع‌بندی عملکرد اقتصادی سیاست‌ها

نتایج شبیه‌سازی نشان داد نوع سیاست بازیابی اثر معناداری بر سود تحقق‌یافته دارد. اختلال بدون بازیابی، میانگین سود را از ۱۱۳۷/۶۶۳ میلیارد تومان در شرایط عادی به ۳۱۶/۹۹۵ میلیارد تومان کاهش داد؛ بنابراین، توقف منبع اصلی بدون اقدام اصلاحی ۷۲/۱۴ درصد از سود مبنا را از بین برد. در میان سیاست‌های بازیابی، راهبرد ترکیبی با میانگین سود ۹۲۶/۶۸۰ میلیارد تومان بیشترین سود تحقق‌یافته را در حالت پایه ایجاد کرد. پس از آن، تأمین‌کننده پشتیبان با ۹۰۵/۵۹۵، بازسازی هفت‌ماهه با ۸۳۲/۷۵۹ و ذخیره استراتژیک با ۶۰۷/۴۹۶ میلیارد تومان قرار گرفتند. راهبرد ترکیبی در مقایسه با تأمین‌کننده پشتیبان، یعنی سیاست منتخب اجرای آزاد برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، معادل ۲۱/۰۸۵ میلیارد تومان یا ۲/۳۳ درصد سود تحقق‌یافته بیشتری ایجاد کرد.

این نتیجه نشان می‌دهد توقف فرایند تصمیم‌گیری پس از مرحله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط می‌توانست به توصیه متفاوتی منجر شود. باین‌حال، برتری راهبرد ترکیبی فقط برای پارامترها و حالت پایه مطالعه حاضر معتبر است و نباید به تمام انواع اختلال تصمیم داده شود.

۵-۴- تحلیل موجودی در دسترس

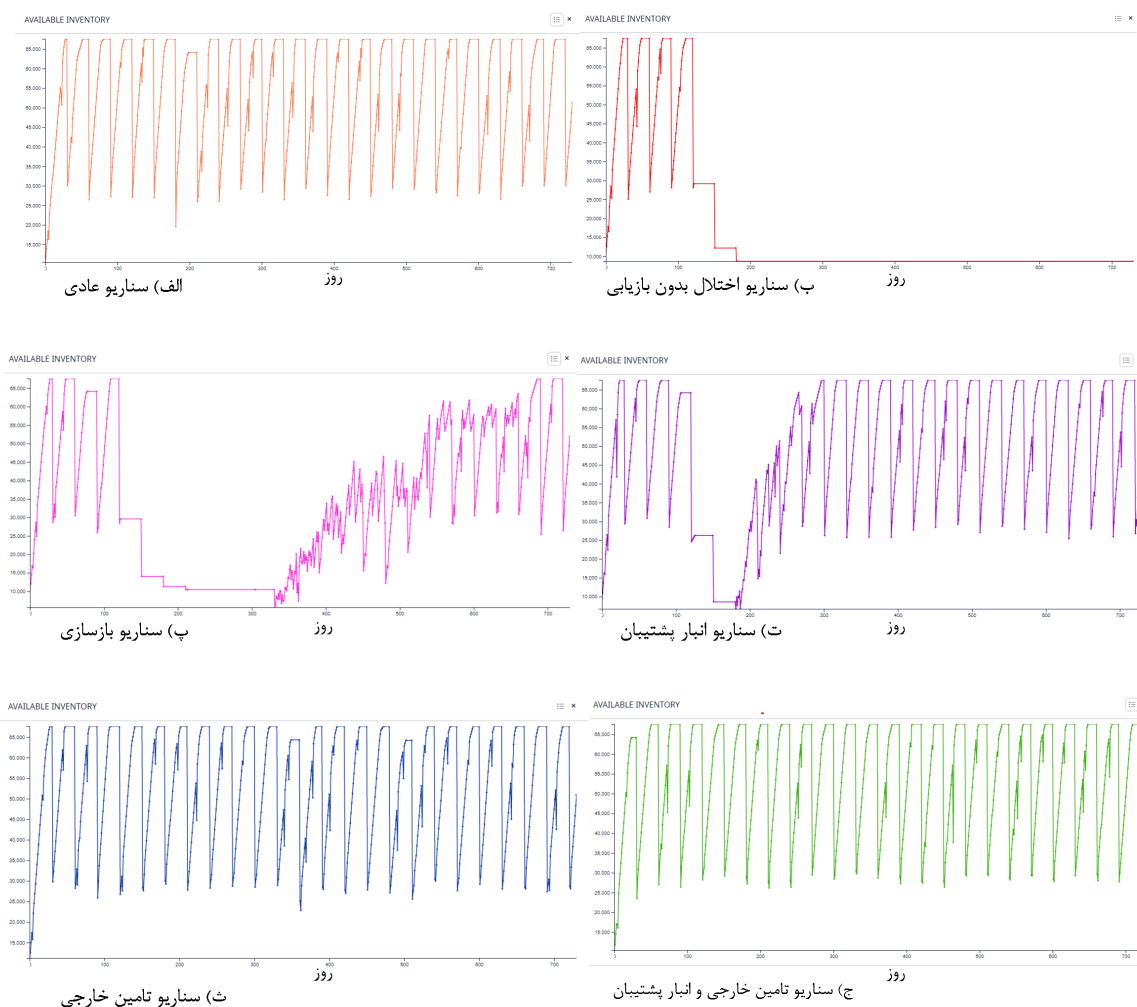
شکل ۳ روند موجودی در دسترس محصولات پلاستیکی را در شش سناریو نشان می‌دهد. در سناریوی عادی (خط نارنجی)، موجودی یک الگوی نوسانی منظم دارد که طی آن سطح موجودی به‌صورت متناوب تا سقف پر شده و بر اساس سیاست (S,S) مصرف می‌شود. در مقابل، در سناریوی اختلال بدون بازیابی (خط قرمز)، با وقوع اختلال

ضعیف‌تر از راهبردهای مبتنی بر تأمین پشتیبان و راهبرد ترکیبی عمل می‌کند.

روند سطح خدمت مبتنی بر زمان تحویل موردانتظار نیز همین الگو را تأیید می‌کند: سناریوهای عادی، تأمین‌کننده پشتیبان و ترکیبی نزدیک به ۱۰۰٪ باقی می‌مانند، ذخیره استراتژیک پس از افتی محدود تا حدود ۹۶٪ بازیابی می‌شود، بازسازی به حدود ۶۲٪ می‌رسد و اختلال بدون بازیابی تا حدود ۲۴٪ افت می‌کند. این یافته‌ها اهمیت راهبردهای تاب‌آوری، به‌ویژه ترکیب ذخیره استراتژیک و تأمین‌کننده پشتیبان را در حفاظت از تداوم خدمت‌رسانی زنجیره تأمین محصولات پلاستیکی در برابر اختلالات شدید تأمین برجسته می‌کند.

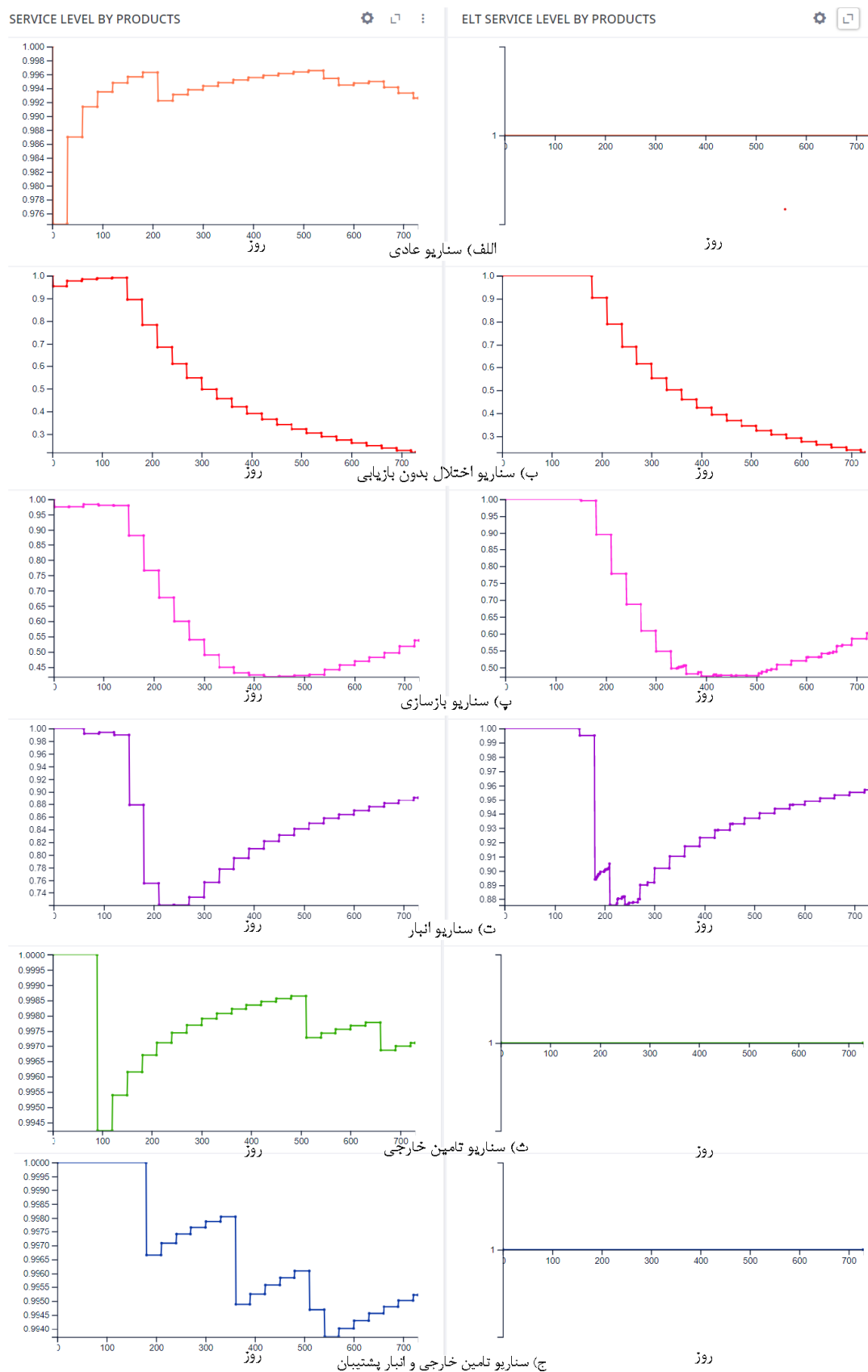
راهبرد تاب‌آوری آشکار می‌کند و بر ضرورت برنامه‌ریزی پیش از بحران تأکید می‌کند.

راهبردهای میانی درجات متفاوتی از تاب‌آوری نشان می‌دهند. در سناریوی ذخیره استراتژیک (خط بنفش)، سطح خدمت در آغاز بحران تا حدود ۷۵٪ افت می‌کند، اما با فعال‌سازی انبار استراتژیک روندی صعودی می‌گیرد و تا پایان دوره به حدود ۹۱٪ بازمی‌گردد. سناریوی بازسازی (خط صورتی) افت عمیق‌تری را تجربه می‌کند و سطح خدمت آن در دوره تعمیر تا حدود ۴۴٪ کاهش می‌یابد و پس از اتمام بازسازی به تدریج تا حدود ۵۶٪ بهبود می‌یابد؛ بنابراین اگرچه بازسازی از نظر سودآوری عملکرد بهتری از ذخیره استراتژیک و سناریوی بدون بازیابی دارد، از منظر حفظ سطح خدمت در دوره بحران



شکل ۳. مقدار موجودی در دسترس سناریوهای بررسی شده

Figure 3. Available inventory levels for the scenarios considered.



شکل ۴. مقدار سطح خدمت و سطح خدمت مبتنی بر زمان تحویل موردانتظار سناریوهای بررسی شده

Figure 4. Service level and expected-delivery-time-based service level of the scenarios considered.

۵-۶- تحلیل انتشار کربن دی‌اکسید

انتشار کربن دی‌اکسید در این پژوهش یک شاخص مکمل است و در تابع هدف اقتصادی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط وارد نمی‌شود. در شرایط اختلال شدید عرضه، اولویت تصمیم‌گیرنده حفظ تولید، سطح خدمت و کاهش زیان اقتصادی است؛ باین‌حال، گزارش انتشار امکان مقایسه پیامدهای زیست‌محیطی سیاست‌هایی را فراهم می‌کند که از نظر اقتصادی و عملیاتی عملکرد نزدیک دارند.

جدول ۱۱ میزان انتشار کربن دی‌اکسید را برای هر سناریو نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در تمام سناریوهایی که تولید در آن‌ها ادامه دارد، میزان انتشار در محدوده‌ای نزدیک به هم (حدود ۲۲۸ تا ۲۳۰ میلیون کیلوگرم) قرار می‌گیرد، و تنها سناریوی اختلال بدون بازیابی به شدت متفاوت است. در این سناریو، انتشار به حدود ۴۰۶۶۷۹ کیلوگرم (نزدیک به ۸۲٪ کمتر از حالت عادی) کاهش می‌یابد؛ زیرا توقف تأمین ماده اولیه، تولید و فعالیت‌های حمل‌ونقل و پردازش را به شدت محدود می‌کند. این کاهش انتشار پیامد یک بحران عملیاتی است، نه یک دستاورد زیست‌محیطی.

در میان راهبردهای تاب‌آوری، سناریوی تأمین‌کننده پشتیبان با حدود ۲۳۰۳۰۳۹ واحد بیشترین انتشار را دارد، هرچند این مقدار تنها حدود ۱٪ بالاتر از حالت عادی است. علت این افزایش، وابستگی به حمل‌ونقل بین‌المللی برای انتقال پلی‌پروپیلن از خارج کشور به ایران است. سناریوی ترکیبی با حدود ۲۲۸۴۶۱۳ واحد، انتشاری نزدیک به حالت عادی و کمتر از تأمین‌کننده پشتیبان دارد؛ زیرا وجود ذخیره استراتژیک بخشی از نیاز

جدول ۱۱. میزان انتشار کربن دی‌اکسید تولید شده در هر سناریو

Table 11. Carbon Dioxide emissions generated in each scenario

سناریو	میزان انتشار کربن دی‌اکسید (کیلوگرم)	تفاوت (%)
عادی	۲۲۸۶۱۸۲	۰
اختلال بدون سیاست بازیابی	۴۰۶۶۷۹	-۸۲
بازسازی	۲۲۷۷۱۱۴	-۰/۴
تأمین‌کننده پشتیبان	۲۳۰۳۰۳۹	+۰/۷۴
ذخیره استراتژیک	۲۲۸۳۲۵۰	-۰/۱۳
تأمین‌کننده پشتیبان + ذخیره استراتژیک	۲۲۸۴۶۱۳	-۰/۰۷

به واردات را پوشش می‌دهد و در نتیجه حجم حمل بین‌المللی و انتشار ناشی از آن کاهش می‌یابد. سناریوهای بازسازی و ذخیره استراتژیک نیز انتشاری در حد حالت عادی دارند، زیرا عمدتاً بر تأمین داخلی و بازیابی تأسیسات اصلی متکی هستند.

به‌طورکلی، اختلاف انتشار میان راهبردهای مختلف تاب‌آوری اندک است و عامل اصلی تعیین‌کننده انتشار، تداوم یا توقف تولید است، نه نوع راهبرد بازیابی. باین‌حال، در انتخاب میان راهبردهایی با عملکرد مالی و عملیاتی نزدیک، سناریوهایی مانند ترکیبی یا بازسازی که کمتر به حمل‌ونقل بین‌المللی وابسته‌اند، از منظر زیست‌محیطی اندکی مطلوب‌ترند. در شرایط اختلال شدید، اولویت نخست معمولاً حفظ تولید و سطح خدمت است و ملاحظات کاهش انتشار بیشتر به مرحله تثبیت و پسابحران مربوط می‌شود.

۶- تحلیل حساسیت اقتصادی

در این بخش، به‌منظور بررسی میزان تأثیرپذیری عملکرد زنجیره تأمین از تغییرات پارامترهای کلیدی، تحلیل حساسیت انجام شده است. در این راستا، اثر تغییر قیمت فروش محصولات و مقدار سفارش بر شاخص‌هایی مانند سود کل و موجودی در دسترس مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور بررسی اثر تغییرات قیمت فروش محصولات بر عملکرد اقتصادی زنجیره تأمین، قیمت فروش تمامی محصولات به طور هم‌زمان در پنج سطح شامل ۴۰٪-، ۲۰٪-، حالت پایه، ۲۰٪+ و ۴۰٪+ تغییر داده شد. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در **شکل ۵** ارائه شده است.

بالین حال، در سطح تقاضای ۵,۰۰۰ واحد، موجودی در دسترس به ۴۹,۰۰۰ واحد کاهش پیدا می‌کند که نسبت به سطح ۴,۰۰۰ واحد، کاهشی حدود ۹/۳ درصدی را نشان می‌دهد. این کاهش می‌تواند ناشی از افزایش مصرف موجودی و ایجاد فشار بیشتر بر ظرفیت تولید و تأمین برای پاسخ‌گویی به تقاضای بالاتر باشد.

با افزایش تقاضا به ۶,۰۰۰ واحد، موجودی در دسترس مجدداً به ۵۳,۰۰۰ واحد می‌رسد و به سطح مشاهده‌شده در تقاضای ۳,۰۰۰ واحد بازمی‌گردد. این افزایش می‌تواند بیانگر فعال‌شدن مجدد سیاست سفارش‌دهی (S, S) ، افزایش حجم سفارش‌های تجدید موجودی یا سازگاری جریان تولید و توزیع با سطح جدید تقاضا باشد؛ بنابراین، رابطه میان مقدار تقاضا و موجودی در دسترس، خطی و مستقیم نیست و تحت‌تأثیر تعامل میان نرخ مصرف موجودی، نقاط سفارش مجدد، ظرفیت تولید و زمان تأمین قرار دارد. این یافته نشان می‌دهد که افزایش تقاضا باید همراه با بازنگری هماهنگ سیاست‌های موجودی و ظرفیت‌های عملیاتی انجام شود تا از ایجاد کمبود یا نوسانات شدید موجودی جلوگیری شود.

جدول ۱۲. اثر تغییر مقدار تقاضا بر موجودی در دسترس

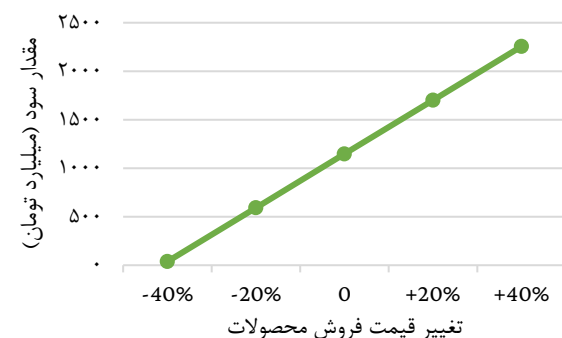
Table 12. Effect of changes in demand on available inventory

مقدار	موجودی در دسترس
۳,۰۰۰	۵۳,۰۰۰
۴,۰۰۰	۵۴,۰۰۰
۵,۰۰۰	۴۹,۰۰۰
۶,۰۰۰	۵۳,۰۰۰

۷- دیدگاه‌های مدیریتی

نتایج **جدول ۱۳** نشان می‌دهد اتکای کامل به یک تأمین‌کننده پلی‌پروپیلن و یک ناحیه جغرافیایی، شبکه را در معرض یک نقطه شکست بحرانی قرار می‌دهد. مدیران باید پیش از وقوع بحران، زمان تحمل شبکه بدون تأمین، ظرفیت واقعی منابع جایگزین و مدت موردنیاز برای فعال‌سازی آن‌ها را تعیین کنند. ارزیابی منابع جایگزین نیز نباید تنها بر اساس قیمت خرید انجام شود و هزینه حمل، زمان فعال‌سازی، محدودیت مرزی، قابلیت اطمینان و سطح خدمت قابل‌دستیابی را نیز در بر گیرد. همچنین تمرکز کل ذخیره در یک انبار مرکزی می‌تواند یک نقطه

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سود کل زنجیره تأمین با افزایش قیمت فروش محصولات، روندی صعودی و تقریباً خطی دارد؛ به‌طوری که سود کل از حدود ۵۰ میلیارد تومان در سطح ۴۰٪ کاهش قیمت، به حدود ۶۰۰ میلیارد تومان در سطح ۲۰٪ کاهش قیمت افزایش می‌یابد. در حالت پایه، سود کل زنجیره تأمین حدود ۱۱۳۷ میلیارد تومان است. همچنین، با افزایش ۲۰ و ۴۰ درصدی قیمت فروش محصولات، سود کل به ترتیب به حدود ۱۷۰۰ و ۲۲۵۰ میلیارد تومان می‌رسد.



شکل ۵. اثر تغییرات قیمت فروش محصولات بر سود کل زنجیره تأمین.

Figure 5. Effect of changes in product selling prices on total supply chain profit.

این نتایج نشان می‌دهد که عملکرد اقتصادی زنجیره تأمین نسبت به تغییرات قیمت فروش محصولات حساسیت قابل‌توجهی دارد. کاهش قیمت‌ها، به‌ویژه در سطح ۴۰٪، بخش عمده سودآوری شبکه را از بین می‌برد و سود را به محدوده‌ای نزدیک به صفر می‌رساند. در مقابل، افزایش قیمت فروش محصولات موجب رشد قابل‌توجه سود کل می‌شود. روند تقریباً خطی نمودار نیز نشان می‌دهد که در محدوده بررسی‌شده و با فرض ثابت‌بودن تقاضا و سایر هزینه‌های عملیاتی، تغییرات قیمت فروش مستقیماً بر سودآوری زنجیره تأمین اثر می‌گذارد؛ بنابراین، سیاست‌های قیمت‌گذاری، کنترل هزینه‌ها و حفظ حاشیه سود محصولات باید به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در تصمیم‌گیری‌های اقتصادی و مدیریت تاب‌آوری زنجیره تأمین موردتوجه قرار گیرد.

نتایج تحلیل حساسیت مقدار تقاضا در **جدول ۱۲** نشان می‌دهد که تغییر تقاضا از ۳,۰۰۰ به ۶,۰۰۰ واحد، اثر یکنواختی بر موجودی در دسترس زنجیره تأمین ندارد. با افزایش تقاضا از ۳,۰۰۰ به ۴,۰۰۰ واحد، موجودی در دسترس از ۵۳,۰۰۰ به ۵۴,۰۰۰ واحد افزایش می‌یابد.

شکست جدید ایجاد کند. از این‌رو، ذخیره‌سازی توزیع‌شده در سطح کارخانه‌ها می‌تواند ریسک ازدسترس‌خارج‌شدن هم‌زمان ذخیره را کاهش دهد.

مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط تأمین‌کننده پشتیبان را به‌عنوان سیاست دارای بیشترین سود برنامه‌ریزی‌شده انتخاب کرد؛ با این‌حال، اختلاف سود این سیاست با ذخیره استراتژیک تنها حدود ۰/۰۱۷ درصد بود. این فاصله بسیار کوچک نشان می‌دهد انتخاب اقتصادی سیاست نسبت به تغییرات محدود هزینه‌ها حساس است و برتری عددی مدل نباید به‌عنوان برتری قطعی مدیریتی تفسیر شود.

در محیط شبیه‌سازی، راهبرد ترکیبی بالاترین سود تحقق‌یافته را در میان سیاست‌های بازایی ایجاد کرد. ذخیره استراتژیک شکاف کوتاه‌مدت پس از اختلال را

پوشش داد و تأمین‌کننده پشتیبان تداوم جریان ماده اولیه را در دوره‌های بعد فراهم کرد. این نتیجه نشان می‌دهد ذخیره استراتژیک باید به‌عنوان زمان خریداری‌شده برای فعال‌سازی پاسخ‌های میان‌مدت تفسیر شود.

اختلاف میان سود برنامه‌ریزی‌شده و تحقق‌یافته سیاست‌ها نشان می‌دهد خروجی مدل ریاضی باید به‌عنوان برنامه مرجع و ابزار غربالگری سیاست‌ها استفاده شود. پیش از اجرای سیاست، عملکرد آن باید در محیط شبیه‌سازی و تحت نوسان تقاضا، تأخیرهای حمل، قواعد سفارش‌دهی و محدودیت‌های عملیاتی آزمایش شود. اتخاذ تصمیم نهایی نیز باید بر مبنای مجموعه‌ای از شاخص‌ها شامل سود، سطح خدمت، سرعت واکنش، قابلیت اجرا و انتشار کربن صورت گیرد.

جدول ۱۳. جمع‌بندی سناریوها، اقدامات اجرایی و نتایج حالت پایه

Table 13. Summary of scenarios, implementation actions, and baseline results

سناریو/سیاست	اقدام پیش از اختلال	اقدام پس از اختلال	نتیجه حالت پایه	پیام مدیریتی و محدودیت
عملیات عادی	اقدام بازایی ندارد	ادامه تأمین از S^M	سود ۱۱۳۷/۶۶۳ میلیارد تومان؛ سطح خدمت نزدیک ۱۰۰٪	خط مبنای مقایسه
بدون بازایی	اقدام پیشگیرانه ندارد	منبع اصلی تا پایان افق غیرفعال می‌ماند	سود ۳۱۶/۹۹۵ میلیارد تومان؛ سطح خدمت حدود ۲۳٪	مبنای اندازه‌گیری سیاست پیشنهادی نیست
بازسازی هفت‌ماهه	این اقدام پس از وقوع اختلال انجام می‌شود	بازگشت منبع اصلی از ابتدای دوره یازدهم	سود ۸۳۲/۷۵۹ میلیارد تومان؛ سطح خدمت پایان افق حدود ۵۶٪	بازایی منبع اصلی، اما پوشش ضعیف شکاف کوتاه‌مدت
تأمین‌کننده پشتیبان	پیش‌صلاحیت منبع S^B	فعال‌سازی پس از اختلال	سود ۹۰۵/۵۹۵ میلیارد تومان؛ سطح خدمت نزدیک ۱۰۰٪	تداوم عرضه در میان‌مدت؛ هزینه و زمان حمل بیشتر
ذخیره استراتژیک کارخانه‌ای	پیش‌استقرار ذخیره در کارخانه I	برداشت پس از آغاز اختلال	سود ۶۰۷/۴۹۶ میلیارد تومان؛ سطح خدمت حدود ۹۱٪ و مبتنی بر زمان تحویل حدود ۹۶٪	پاسخ فوری، اما محدود و همراه با هزینه نگهداری
راهبرد ترکیبی	پیش‌استقرار ذخیره و پیش‌صلاحیت S^B	مصرف ذخیره در ابتدا و استفاده از منبع پشتیبان در ادامه	سود ۹۲۶/۶۸۰ میلیارد تومان؛ سطح خدمت نزدیک ۱۰۰٪	بهترین سود تحقق‌یافته در حالت پایه؛ همراه با هزینه ذخیره، حمل و گمرک

۸- نتیجه گیری

این پژوهش یک چارچوب متوالی بهینه سازی - شبیه سازی برای ارزیابی تاب آوری زنجیره تأمین محصولات پلاستیکی مبتنی بر پلی پروپیلن در برابر اختلال شدید تأمین ارائه کرد. در مرحله نخست، یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند دوره ای توسعه یافت که اختلال تأمین کننده اصلی و گزینه های بازسازی، تأمین کننده پشتیبان، ذخیره استراتژیک و راهبرد ترکیبی را به صورت صریح مدل می کند. مدل هم در حالت آزاد برای انتخاب درون زای سیاست و هم با تثبیت متغیرهای راهبردی برای مقایسه عملکرد برنامه ریزی شده سناریوها حل شد. در مرحله دوم، همان پیکربندی های راهبردی در یک مدل شبیه سازی رویداد گسسته تحت تقاضای تصادفی، زمان حمل، سیاست موجودی (SOS) و محدودیت های اجرایی ارزیابی شدند. نتایج مدل ریاضی نشان داد که تأمین کننده پشتیبان با سود برنامه ریزی شده ۱۱۳۴/۰۹۱، میلیارد تومان و سطح خدمت ۱۰۰ درصد، سیاست اقتصادی ترجیح پذیری در شرایط پایه است. با این حال، فاصله ۰/۱۷ درصدی آن با ذخیره استراتژیک نشان داد که انتخاب سیاست نسبت به تغییرات هزینه خرید، حمل، گمرک و نگهداری موجودی حساس است. نتایج ۶۰ اجرای شبیه سازی نشان داد نبود راهبرد بازایی، میانگین سود را نسبت به شرایط عادی ۷۲/۱۴ درصد کاهش می دهد. راهبرد ترکیبی با میانگین سود ۹۲۶/۶۸۰ میلیارد تومان بهترین عملکرد مالی را در میان سیاست های بازایی ایجاد کرد و ۷۴/۲۹ درصد از سود ازدست رفته را جبران نمود. پس از آن، تأمین کننده پشتیبان، بازسازی هفت ماهه و ذخیره استراتژیک قرار گرفتند. نتایج تحلیل واریانس ولج و آزمون Games-Howell نیز نشان داد تفاوت میانگین سود پیکربندی ها ناشی از نوسانات تصادفی تکرارها نیست.

مقایسه خروجی های برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط و شبیه سازی نشان داد سیاست دارای بیشترین سود برنامه ریزی شده الزاماً با سیاست دارای بهترین عملکرد تحقق یافته یکسان نیست. مدل ریاضی از ظرفیت ها و تقاضای مورد انتظار برای ایجاد یک برنامه اقتصادی بهینه استفاده می کند، در حالی که شبیه سازی تأثیر نوسانات تقاضا، تأخیرهای زمانی، نقاط سفارش

مجدد و پویایی موجودی را آشکار می سازد. از این رو، ارزش اصلی چارچوب پیشنهادی در اتصال انتخاب درون زای سیاست به ارزیابی پویای قابلیت اجرای آن و کمی سازی شکاف برنامه ریزی - اجرا است.

پژوهش حاضر به یک زنجیره تأمین و یک حالت اصلی اختلال محدود است. برخی پارامترها، از جمله زمان بازسازی، ظرفیت پشتیبان و مقدار ذخیره، به صورت سناریویی تعیین شده اند. برای پژوهش های آینده، توسعه مدل های تصادفی یا مقاوم برای عدم قطعیت شدت و مدت اختلال، بررسی اختلال هم زمان چند گره، تعیین بهینه اندازه ذخیره و ظرفیت پشتیبان، لحاظ کردن باز پس افت جزئی تقاضا و ایجاد یک حلقه بازخورد تکرارشونده میان برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط و شبیه سازی پیشنهاد می شود.

حمایت مالی

این پژوهش هیچ گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که هیچ گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به صورت بی طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه ای به دست آمده است.

مشارکت های نویسندگان

علی اشعه شعار: مفهوم پردازی، مدیریت داده ها، تحلیل آماری، تحقیق و بررسی، روش شناسی، تأمین منابع، نرم افزار، اعتبارسنجی، مصورسازی، نگارش پیش نویس اصلی، نگارش - بازبینی و ویرایش؛ **محمد حسین توکلی:** مفهوم پردازی، مدیریت داده ها، تحلیل آماری، تحقیق و بررسی، روش شناسی، تأمین منابع، نرم افزار، اعتبارسنجی، مصورسازی، نگارش پیش نویس اصلی، نگارش - بازبینی و ویرایش؛ **محمد شیخ علی شاهی:** مفهوم پردازی، مدیریت پروژه، راهنمایی، نگارش - بازبینی و ویرایش.

دسترسی به داده ها

داده ها در صورت درخواست در دسترس هستند: داده های پشتیبانی کننده نتایج این مطالعه در اختیار نویسندگان

- design and production-ordering systems in the recovery and post-disruption periods. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 558–570. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.043>
- Ivanov, D. (2025). What network and performance indicators can tell us about supply chain and sourcing resilience (and what they cannot). *Journal of Purchasing and Supply Management*, 31(3). <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2025.101014>
- Ivanov, D. (2026). Impacts of a global energy crisis on supply chain performance, ripple effects, and viability. *International Transactions in Operational Research*. <https://doi.org/10.1111/itor.70209>
- Kamalahmadi, M., & Parast, M. M. (2017). An assessment of supply chain disruption mitigation strategies. *International Journal of Production Economics*, 184, 210–230. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.12.011>
- Katsaliaki, K., Galetsi, P., & Kumar, S. (2022). Supply chain disruptions and resilience: a major review and future research agenda. *Annals of Operations Research*, 319(1), 965–1002. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03912-1>
- Kelchtermans, R., Stienen, V., Dietrich, G., Bernuzzi, M., & Vandaele, N. (2026). Analyzing vaccine manufacturing supply chain disruptions for pandemic preparedness using discrete-event simulation. *ArXiv Preprint ArXiv:2602.08988*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2602.08988>
- Malekzadeh, M., Torabi, S. A., & Sheikhalishahi, M. (2025). A supply chain digital twin for resilience analysis under immediate and long-term disruptions: a case study in plastic parts' manufacturing. *International Journal of Production Research*, 63(24), 10445–10467. <https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2551243>
- Mondal, A., & Roy, S. K. (2024). Fuzzy-stochastic distributional robust approach for microalgae-based bio-plastic supply chain with new sustainability aspects. *Journal of Cleaner Production*, 476, 143630. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143630>
- Moosavi, J., & Hosseini, S. (2021). Simulation-based assessment of supply chain resilience with consideration of recovery strategies in the COVID-19 pandemic context. *Computers & Industrial Engineering*, 160, 107593. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107593>
- Noushi, K., & Sabouhi, F. (2026). Resilient wheat supply chain design considering circular economy principles. *System Engineering and Productivity*, 6(1), 227–249. <https://doi.org/10.22034/sep.2026.2079220.1441>
- Pouri, K. (2025). Designing a bi-objective mathematical model for cost and environmental pollution control in circular design and production-ordering systems in the recovery and post-disruption periods. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 558–570. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.043>
- مسئول بوده و در صورت درخواست منطقی در دسترس قرار خواهند گرفت.
- ## مراجع
- Aldrichetti, R., Battini, D., & Ivanov, D. (2023). Efficient resilience portfolio design in the supply chain with consideration of preparedness and recovery investments. *Omega*, 117, 102841. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2023.102841>
- Camur, M. C., Thanos, A. E., Yund, W., Tseng, C.-Y., White, C. C., & Iakovou, E. (2023). An integrated system dynamics and discrete event supply chain simulation framework for supply chain resilience with non-stationary pandemic demand. *2023 Winter Simulation Conference (WSC)*, 1617–1628. <https://doi.org/10.1109/WSC60868.2023.10407779>
- Dolgui, A., Ivanov, D., & Sokolov, B. (2018). Ripple effect in the supply chain: an analysis and recent literature. *International Journal of Production Research*, 56(1–2), 414–430. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1387680>
- Gehrig, T., & Stenbacka, R. (2023). Dual sourcing and resilient supply chains: the case of essential resources. *Atlantic Economic Journal*, 51(4), 223–241. <https://doi.org/10.1007/s11293-023-09782-9>
- Graveline, M.-H., & Germain, D. (2022). Disaster risk resilience: conceptual evolution, key issues, and opportunities. *International Journal of Disaster Risk Science*, 13(3), 330–341. <https://doi.org/10.1007/s13753-022-00419-0>
- Guo, Y., Liu, F., Song, J.-S., & Wang, S. (2025). Supply chain resilience: A review from the inventory management perspective. *Fundamental Research*, 5(2), 450–463. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2024.08.002>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.03.001>
- Hughes, M. M., Zhou, Z., Zinn, W., & Knemeyer, A. M. (2023). Plastic response to disruptions: Significant redesign of supply chains. *Journal of Business Logistics*, 44(1), 80–108. <https://doi.org/10.1111/jbl.12321>
- Ivanov, D. (2017). Simulation-based ripple effect modelling in the supply chain. *International Journal of Production Research*, 55(7), 2083–2101. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1275873>
- Ivanov, D. (2019). Disruption tails and revival policies: A simulation analysis of supply chain

- supply chain management for petrochemical product production. *System Engineering and Productivity*, 5(4), 125–148. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2060799.1321>
- Raghuram, P., & Jawahar, D. (2021). Empirical investigation of supply disruption in plastic SMEs. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 33(4), 450–470. <https://doi.org/10.1504/ijpqm.2021.117249>
- Rohaninejad, M., Vahedi-Nouri, B., Mamaghani, E. J., Foumani, M., & Battaia, O. (2026). Viable supply chain network design: machine learning-derived chance-constrained programming. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-026-07310-x>
- Tavakkoli, M. H., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Vahedi-Nouri, B. (2027). Integrated truck scheduling and internal operations in a multi-door cross-docking system with reconfigurable process machines. *System Engineering and Productivity*, 6(4), 313–342. <https://doi.org/10.22034/sep.2026.2090815.1506>
- Wang, S., & Maravelias, C. T. (2024). Optimization methods for plastics management supply chain design. *AIChE Journal*, 70(8), e18464. <https://doi.org/10.1002/aic.18464>