System Engineering and Productivity/ 2027/ Vol.7/ No.1/ 263-299

System Engineering and Productivity

10.22034/sep.2026.2095646.1533

Recovery Dynamics of Pharmaceutical Inventory Policies under Temporary Demand Shocks: An Agent-Based Simulation Study

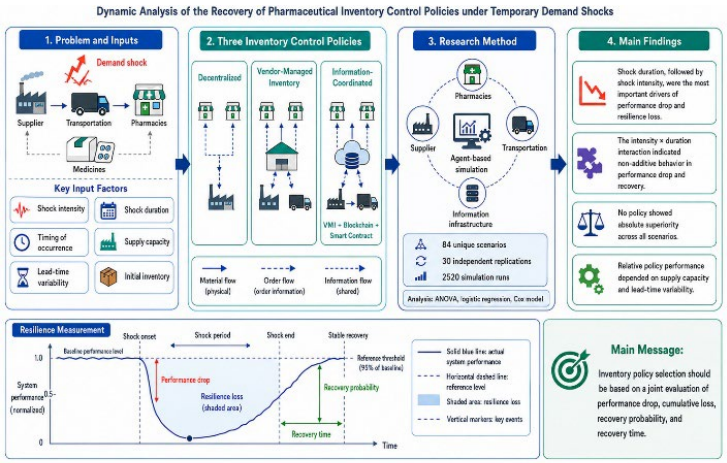
Mohammad Manesh-Bozorgi, Amir-Reza Abtahi*, Farzad Haghighi-Rad

Department of Operations Management and Information Technology, Faculty of Management, Kharazmi University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Shock duration, followed by intensity, drove performance drop and resilience loss.
- The intensity–duration interaction revealed non-additive effects on performance drop and resilience loss.
- No policy was universally superior; performance depended on operational constraints.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 26 July 2026
Revised: 18 August 2026
Accepted: 25 August 2026
Available online: 25 August 2025
*Correspondence: abtahi@khu.ac.ir
How to cite this article:
Manesh-Bozorgi, M., Abtahi, A., & Haghighi-Rad, F. (2027). Recovery dynamics of pharmaceutical inventory policies under temporary demand shocks: An agent-based simulation study. *System Engineering and Productivity*, 7 (1), 263-299.

Keywords:
Pharmaceutical supply chain
Supply chain resilience
Inventory control policies
Temporary demand shocks
Agent-based simulation

ABSTRACT

Pharmaceutical supply chains are vulnerable to demand shocks because inventory depletion and capacity constraints can reduce service levels and delay recovery. However, inventory policies are commonly evaluated using average performance measures, while the dynamics of performance degradation and recovery receive less attention. This study examines how the intensity, duration, and timing of temporary demand shocks affect performance drop, resilience loss, stable recovery probability, and recovery time under three inventory control policies: decentralized inventory control, vendor-managed inventory, and an information-coordinated policy. An agent-based simulation model was developed in AnyLogic, and the policies were evaluated using a factorial experimental design. Performance drop and resilience loss were assessed using robust analysis of variance, recovery probability was analyzed through logistic regression, and recovery time was examined using survival analysis. The results showed that shock duration, followed by shock intensity, was the main driver of performance degradation and resilience loss. Their combined effect exceeded the simple sum of their separate effects, indicating a non-additive system response. Shock timing had no significant direct effect on most primary outcomes, while the effect of inventory policy was generally smaller than the effects of shock characteristics and depended on operating conditions. Supply-capacity constraints affected recovery probability and recovery time, whereas lead-time variability primarily influenced resilience loss and the relative performance of the policies. Overall, no policy was consistently superior across all conditions; therefore, inventory policy selection should reflect both the expected shock characteristics and the operational constraints of the supply chain.

2538-2195/© 2027 The Authors. Published by University of Eyvanekey. This is an open-access article under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license.

1. Introduction

Pharmaceutical supply chains are particularly sensitive to demand shocks because uninterrupted access to medicines must be maintained despite limited tolerance for shortages. Sudden demand increases can rapidly deplete inventory, overload production and transportation capacity, reduce service levels, and generate persistent backorders, costs, and waste (Goswami et al., 2024; Sazvar et al., 2021). These consequences may continue after demand returns to normal because depleted inventories and accumulated orders create a post-shock disruption tail (Burgos & Ivanov, 2021; Ivanov, 2024). Resilience assessment should therefore extend beyond average service levels and include both performance degradation and subsequent recovery.

Previous pharmaceutical supply chain studies have mainly examined network design, supply reliability, safety stock, and mitigation under uncertainty (Mousazadeh et al., 2015; Tucker & Daskin, 2022). Vendor-managed inventory (VMI) can improve replenishment coordination when timely and reliable information is available, while blockchain and smart contracts may enhance visibility and automate coordination rules (Omar et al., 2020). However, these research streams have largely developed separately. In pharmaceutical supply chains, limited evidence is available on how alternative inventory-control policies respond to temporary demand shocks with controlled intensity, duration, and timing when performance drop, cumulative resilience loss, stable recovery probability, and recovery time are evaluated jointly. The role of operational constraints in changing relative policy performance under such shocks also remains insufficiently integrated (Habibi et al., 2023; Macdonald et al., 2018).

This study compares decentralized inventory control, VMI, and an information-coordinated policy under temporary demand shocks. It examines the independent and interactive effects of shock intensity, duration, and timing and evaluates whether supply capacity and lead-time variability alter relative policy performance. The principal contribution lies in integrating shock characteristics, inventory-policy mechanisms, operational conditions, and complementary recovery dimensions within a comparative framework for pharmaceutical supply chains, rather than assuming the general superiority of any one policy.

2. Methodology

A quantitative agent-based simulation was developed in AnyLogic 8.9. The model represented ten pharmacies, one supplier, one transportation agent, and an information-coordination infrastructure. Each daily cycle included demand generation, inventory allocation, recording of unmet demand, replenishment decisions, supplier processing, transportation, and delivery. Because the model was not calibrated to a specific firm, its results represent within-model policy comparisons rather than direct predictions for a particular organization.

Three composite inventory configurations were evaluated. Under decentralized inventory control, pharmacies monitored inventory and independently placed replenishment orders. Under VMI, the supplier used pharmacy consumption and inventory information to make replenishment decisions. The information-coordinated policy combined VMI logic with reduced information delay, automated monitoring, blockchain-enabled information exchange, and smart-contract execution of service-level rules. Blockchain and smart contracts were not varied independently; therefore, the results represent the combined effect of this configuration.

Normal daily demand for each pharmacy followed a non-negative normal distribution with a mean of 80 units and a coefficient of variation of 0.15. Temporary shocks multiplied the mean demand by 1.5–3 for 1–14 days and began on day 60, 150, or 240, depending on the experimental design. Supplementary experiments varied supply capacity and lead-time variability. An additional initial-inventory analysis was treated as exploratory because the inventory level was set at simulation start rather than immediately before the shock.

The scenario-based factorial design produced 84 unique experimental cells. Each cell was simulated through 30 independent stochastic replications, yielding 2,520 runs, including 90 baseline and 2,430 shock runs. Each simulation covered 365 days and included a 20-day warm-up period.

Daily fill rate was normalized against its mean during the 30 days preceding each shock. Performance drop represented the maximum decline from baseline, whereas resilience loss represented the cumulative positive shortfall from baseline until 90 days after shock termination. Stable recovery required normalized performance to return to at least 95% of baseline for seven consecutive days. Unrecovered runs were treated as right-censored observations.

Continuous outcomes were examined using factorial Type III ANOVA with sum contrasts and HC3 robust inference. Logistic regression was used for recovery probability, and Cox proportional hazards models were applied to recovery time. Welch, Fisher exact, log-rank, and Holm-adjusted comparisons were used where appropriate. Total cost, waste, backorders, and transportation-related carbon emissions were also evaluated.

Model verification included checks of the complete experimental structure, shock timing, and independent recalculation of the resilience indicators from daily fill-rate trajectories for all 2,430 shock runs. Behavioral validation examined the directional response of the model to increasing shock intensity and duration and to reduced supply capacity. In addition, a post-processing sensitivity

analysis varied the recovery-performance threshold, the required persistence period, and the post-shock observation window.

3. Results and Discussion

Shock duration was the strongest and most consistent determinant of degradation. Extending the shock increased both performance drop and cumulative resilience loss under all three policies and generated additional backorders that transferred unmet demand into the post-shock period. Shock intensity produced the same directional effect but was generally less influential than duration. These findings support the concept of a disruption tail, according to which system deterioration may continue after the initiating shock has ended (Ivanov, 2024).

The interaction between intensity and duration was significant in the multi-factor analyses. Thus, the effect of increasing intensity differed between short and prolonged shocks, and their joint effect was not additive on the response scale. This non-additive interaction is consistent with nonlinear response behavior within the tested scenarios. Prolonged high demand depleted usable inventory, accumulated unfulfilled commitments, and reduced the opportunity for replenishment processes to restore performance. The highest resilience losses consequently occurred under the most intense and longest shocks.

Shock timing had no significant direct effect on most primary outcomes, and no stable pattern was identified across shocks beginning on days 60, 150, and 240. This finding does not establish that timing is generally irrelevant; it indicates that the selected shock dates did not create sufficiently different system states to generate a consistent direct effect. Similarly, inventory policy effects were generally smaller than the effects of duration and intensity, and no policy dominated across all shock combinations.

Recovery probability and recovery time did not always lead to the same conclusion. Some experimental factors altered the speed of recovery without significantly changing the final proportion of recovered runs. This distinction demonstrates why recovery occurrence and recovery speed should be evaluated separately. Policies with similar probabilities of eventual recovery may still differ substantially in the time required to restore acceptable performance, supporting the use of multidimensional resilience measures advocated in previous simulation research (Habibi et al., 2023; Macdonald et al., 2018).

Operational constraints altered the relative performance of the policies. Under an intensity multiplier of 3 and a supply-capacity multiplier of 0.7, the recovery probability of decentralized inventory control declined to 40%, compared with 76.7% for VMI and 73.3% for the information-coordinated policy. Capacity limitation also affected recovery time, demonstrating that physical response capability can modify the potential benefits of information coordination.

Greater lead-time variability increased cumulative resilience loss, although its influence differed among policies. Under a 14-day shock, the information-coordinated policy was more sensitive to increased lead-time variability than VMI. This result suggests that, within the tested settings, enhanced information sharing and automated coordination could not fully offset uncertainty in the physical replenishment process. An exploratory initial-inventory analysis was reported separately because inventory levels were set at the start of the simulation rather than immediately before the shock. Accordingly, this analysis was not used to infer the effect of pre-shock inventory on resilience outcomes.

The secondary outcomes were driven by different factors. Shock duration was the primary determinant of fill rate and backorders, whereas inventory policy had the greatest influence on total cost, waste, and carbon emissions. These effects represent the combined consequences of replenishment rules, inventory levels, shipment frequency, information delays, and automation. Overall, the results reinforce the need to evaluate both resilience and efficiency and are consistent with research emphasizing the interaction between disruption characteristics and supply chain configuration (Ghadge et al., 2022; Macdonald et al., 2018).

4. Conclusions

This study shows that pharmaceutical inventory resilience is not a fixed property of a particular policy. It results from the fit among shock characteristics, operational constraints, and the policy's decision mechanism. Shock duration, followed by intensity, was the principal determinant of performance degradation and resilience loss. Their interaction further showed that severe and prolonged shocks cannot be evaluated as the simple sum of separate intensity and duration effects.

No consistent policy ranking emerged across all resilience, operational, economic, and environmental outcomes. Supply capacity and lead-time variability altered recovery behavior and relative policy performance, indicating that information coordination cannot substitute for adequate production and transportation capability. Because the information-coordinated policy combined VMI, blockchain, smart contracts, reduced information delay, and automated monitoring, the independent effect of each component could not be isolated.

The findings imply that disruption plans should jointly consider shock intensity and duration, define recovery as a sustained return of performance, and evaluate policies through multiple resilience indicators. The study is limited by its simplified single-product network and lack of calibration to a specific pharmaceutical supply chain. Recovery

outcomes are partly dependent on the operational definition of stable recovery, as indicated by the sensitivity analysis. The initial-inventory analysis was treated as exploratory because inventory was set at simulation start rather than immediately before the shock. Waste and carbon estimates are also intended for relative within-model comparison rather than field-level prediction. Future research should validate the model using empirical data, extend it to multi-product and multi-echelon networks, control the pre-shock system state more directly, and experimentally separate the effects of VMI, information quality, automation, blockchain and smart contracts. The central question is therefore not which inventory policy is universally superior, but under which combinations of shock characteristics and operational constraints each policy can maintain and restore acceptable performance.

Acknowledgments

We are grateful to all colleagues who provided insights and expertise that greatly assisted this research. We also thank the anonymous reviewers for their valuable suggestions to improve the paper.

Funding

This research received no external funding.

Conflicts of Interest

A There are no conflicts of interest associated with this research.

Author Contribution Statement

Mohammad Manesh-Bozorgi: Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Software, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing; **Amir-Reza Abtahi:** Conceptualization, Project administration, Supervision, Writing – review & editing; **Farzad Haghighi-Rad:** 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

Burgos, D., & Ivanov, D. (2021). Food retail supply chain resilience and the COVID-19 pandemic: A digital twin-based impact analysis and improvement directions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *152*, 102412. https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102412.

Ghadge, A., Er, M., Ivanov, D., & Chaudhuri, A. (2022). Visualisation of ripple effect in supply chains under long-term, simultaneous disruptions: a system dynamics approach. *International Journal of Production Research*, *60*(20), 6173-6186. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1987547.

Goswami, A., Baveja, A., Ding, X., Melamed, B., & Roberts, F. (2024). An integrated framework for modeling pharmaceutical supply chains with disruptions and risk mitigation. *Annals of Operations Research*. https://doi.org/10.1007/s10479-024-06381-y.

Habibi, F., Chakrabortty, R. K., & Abbasi, A. (2023). Evaluating supply chain network resilience considering disruption propagation. *Computers & Industrial Engineering*, *183*, 109531. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109531.

Ivanov, D. (2024). Exiting the COVID-19 pandemic: After-shock risks and avoidance of disruption tails in supply chains. *Annals of Operations Research*, *335*(3), 1627-1644. https://doi.org/10.1007/s10479-021-04047-7.

Macdonald, J. R., Zobel, C. W., Melnyk, S. A., & Griffis, S. E. (2018). Supply chain risk and resilience: theory building through structured experiments and simulation. *International Journal of Production Research*, *56*(12), 4337-4355. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1421787.

Mousazadeh, M., Torabi, S. A., & Zahiri, B. (2015). A robust possibilistic programming approach for pharmaceutical supply chain network design. *Computers & chemical engineering*, *82*, 115-128. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.06.008.

Omar, M. (2020). Enhancing vendor managed inventory supply chain operations using blockchain smart contracts. *IEEE access*, *8*, 182704-182719. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028031.

Sazvar, Z., Zokaee, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Salari, S. A.-s., & Nayeri, S. (2021). Designing a sustainable closed-loop pharmaceutical supply chain in a competitive market considering demand uncertainty, manufacturer's brand and waste management. *Annals of Operations Research*, *315*, 2057 - 2088. https://doi.org/10.1007/s10479-021-03961-0.

Tucker, E. L., & Daskin, M. S. (2022). Pharmaceutical supply chain reliability and effects on drug shortages. *Computers & Industrial Engineering*, *169*, 108258. https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108258.

مهندسی سیستم و بهره‌وری/ سال ۱۴۰۶/ دوره ۷/ شماره ۱/ صفحه ۲۶۳-۲۹۹

نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری

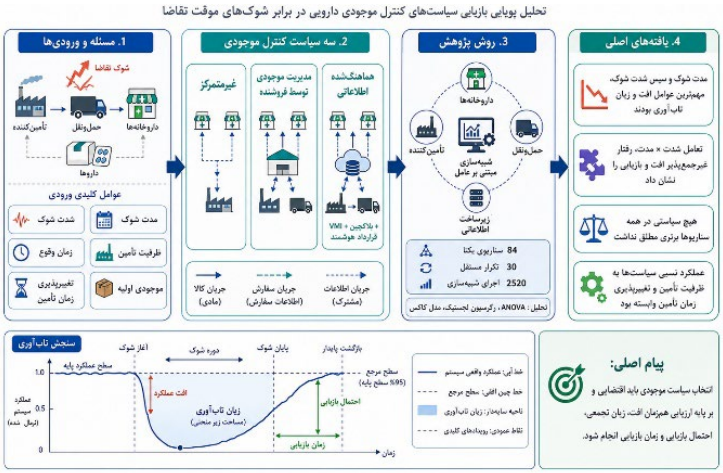
10.22034/sep.2026.2095646.1533

پویایی بازیابی سیاست‌های موجودی دارویی در برابر شوک‌های موقت تقاضا: یک مطالعه شبیه‌سازی عامل‌بنیان

محمد منش‌بزرگی، سیدامیررضا ابطحی*، فرزاد حقیقی‌راد

گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- مدت و سپس شدت شوک، مهم‌ترین عوامل افت عملکرد و زیان تاب‌آوری
- تعامل شدت و مدت، پاسخ غیرجمع‌پذیر افت عملکرد و زیان تاب‌آوری
- عدم برتری هیچ یک از سیاست ها و وابستگی عملکرد آن‌ها به محدودیت‌های عملیاتی

چکیده

زنجیره‌های تأمین دارویی در برابر شوک تقاضا آسیب‌پذیرند؛ زیرا کاهش موجودی و محدودیت ظرفیت می‌تواند سطح خدمت را کاهش دهد و بازیابی را به تأخیر اندازد. بااین‌حال، بیشتر ارزیابی‌های سیاست‌های موجودی بر میانگین عملکرد تمرکز دارند و مسیر افت و بازگشت سیستم را کمتر بررسی می‌کنند. این پژوهش اثر شدت، مدت و زمان وقوع شوک موقت تقاضا را بر افت عملکرد، زیان تاب‌آوری، احتمال بازیابی پایدار و زمان بازیابی سه سیاست کنترل غیرمتمرکز، مدیریت موجودی توسط فروشنده و سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی بررسی می‌کند. یک مدل شبیه‌سازی عامل‌بنیان در نرم‌افزار انی‌لاجیک توسعه یافت و سیاست‌ها در قالب طراحی آزمایش عاملی ارزیابی شدند. افت عملکرد و زیان تاب‌آوری با تحلیل واریانس مقاوم، احتمال بازیابی با رگرسیون لجستیک و زمان بازیابی با تحلیل بقا بررسی شدند. نتایج نشان داد مدت شوک و سپس شدت آن، مهم‌ترین عوامل تشدید افت عملکرد و زیان تاب‌آوری بودند و اثر مشترک آن‌ها از جمع ساده آثار مستقل فراتر رفت. زمان وقوع شوک در بیشتر پیامدهای اصلی اثر مستقیم معناداری نداشت و اثر سیاست موجودی عموماً از ویژگی‌های شوک کوچک‌تر و وابسته به شرایط عملیاتی بود. محدودیت ظرفیت تأمین بر احتمال و زمان بازیابی اثر گذاشت، درحالی‌که تغییرپذیری زمان تأمین عمدتاً زیان تاب‌آوری و عملکرد نسبی سیاست‌ها را تحت تأثیر قرار داد. در مجموع، هیچ سیاستی در همه شرایط برتری ثابت نداشت و انتخاب سیاست باید متناسب با ویژگی‌های شوک و محدودیت‌های عملیاتی انجام شود.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۴

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۳

ارائه برخط: ۱۴۰۵/۰۶/۰۳

*نویسنده مسئول:

abtahi@khu.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

زنجیره تأمین دارویی

تاب‌آوری زنجیره تأمین

سیاست‌های کنترل موجودی

شوک موقت تقاضا

شبیه‌سازی عامل‌بنیان

۲۱۹۵-۲۵۳۸/© ۲۰۲۷ نویسندگان. منتشرشده توسط دانشگاه ایوان‌کی. این یک مقاله با دسترسی آزاد تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) است.

۱- مقدمه

زنجیره‌های تأمین دارویی به دلیل ضرورت حفظ دسترسی مستمر به دارو، محدودیت ظرفیت و نگهداری، فسادپذیری برخی محصولات و نوسانات تقاضا، در برابر عدم‌قطعیت و اختلال حساس هستند. مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که مدیریت هم‌زمان تقاضا، ظرفیت، موجودی و قابلیت اطمینان از مسائل محوری در طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره‌های دارویی است (Moakedi & Ghasemizadeh, 2026؛ Mozafari & Savari, 2025؛ Salimi-Zaviyeh et al., 2026).

افزایش ناگهانی تقاضا می‌تواند موجودی قابل‌استفاده را کاهش دهد، ظرفیت تولید و حمل را تحت فشار قرار دهد و به افت سطح خدمت، انباشت سفارش‌های معوق، افزایش هزینه و ضایعات منجر شود (Sazvar et al., 2021؛ Mahdavimanshadi et al., 2024).

آثار شوک تقاضا الزاماً با بازگشت تقاضا به سطح عادی پایان نمی‌یابد (Ivanov, 2024). کاهش موجودی، سفارش‌های انباشته و محدودیت ظرفیت می‌توانند عملکرد نامطلوب سیستم را در دوره پساشوک تداوم بخشند (Burgos & Ivanov, 2021؛ Ivanov, 2024). ازاین‌رو، ارزیابی پاسخ زنجیره تأمین نباید به میانگین سطح خدمت یا شدت افت اولیه محدود شود، بلکه باید عمق افت عملکرد[1]، زیان تجمعی تاب‌آوری و زمان بازگشت سیستم به سطح پایه را به‌طور هم‌زمان دربر گیرد (Habibi et al., 2023؛ Tucker & Daskin, 2022). این ضرورت هنگامی برجسته‌تر می‌شود که شوک‌ها از نظر شدت، مدت و زمان وقوع متفاوت باشند؛ زیرا آثار یک شوک شدید و کوتاه‌مدت ممکن است با پیامدهای یک شوک کم‌شدت‌تر اما طولانی‌مدت یکسان نباشد (Ghadge et al., 2022؛ Macdonald et al., 2018).

یکی از سازوکارهای بهبود هماهنگی موجودی، مدیریت موجودی توسط فروشنده[2] است که در آن تصمیم تجدید موجودی بر اساس اطلاعات مصرف و موجودی مشتری به تأمین‌کننده واگذار می‌شود. این سیاست می‌تواند هماهنگی تصمیم‌های موجودی را بهبود دهد، اما اثربخشی آن به دقت، به‌موقع‌بودن و قابلیت اعتماد اطلاعات مبادله‌شده وابسته است (Omar et al., 2020). بلاکچین[3] و قراردادهای هوشمند[4] نیز می‌توانند شفافیت اطلاعات، مشاهده‌پذیری سفارش‌های در مسیر و اجرای خودکار قواعد همکاری را تقویت کنند (Saberi et al., 2019؛ Sahoo et al., 2022). در این پژوهش، این فناوری‌ها بخشی از زیرساخت سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی[5]اند و به‌عنوان عامل مستقل طراحی آزمایش بررسی نمی‌شوند؛ بنابراین، تمرکز تحلیل بر تفاوت سازوکارهای کنترل موجودی و سطوح هماهنگی اطلاعاتی است.

با وجود این پیشرفت‌ها، اجزای مرتبط با مسئله حاضر عمدتاً در جریان‌های پژوهشی جداگانه توسعه یافته‌اند. مطالعات شبیه‌سازی تاب‌آوری، اثرهای اصلی و متقابل عوامل مرتبط با اختلال را بررسی کرده‌اند (Macdonald et al., 2018) و پژوهش‌های دیگری به اختلال‌های بلندمدت و هم‌زمان، رفتار زمانی زنجیره و آثار پساشوک پرداخته‌اند (Burgos & Ivanov, 2021؛ Ghadge et al., 2022؛ Ivanov, 2024).

همچنین، ضرورت استفاده از چند معیار مکمل برای سنجش تاب‌آوری و بازیابی در مطالعات پیشین مورد تأکید قرار گرفته است (Habibi et al., 2023؛ Tucker & Daskin, 2022).

بااین‌حال، در زمینه زنجیره تأمین دارویی، شواهد محدودی درباره این موضوع وجود دارد که سیاست‌های متفاوت کنترل موجودی در برابر یک شوک موقت تقاضا با شدت، مدت و زمان وقوع کنترل‌شده چگونه از نظر عمق افت عملکرد، زیان تجمعی تاب‌آوری، احتمال بازیابی پایدار و زمان بازیابی با یکدیگر تفاوت دارند. افزون بر این، نقش محدودیت‌های عملیاتی در تغییر عملکرد نسبی این سیاست‌ها در شرایط شوک به‌طور یکپارچه روشن نیست. بر این اساس، پژوهش حاضر با استفاده از شبیه‌سازی عامل‌بنیان[6]، سه پیکربندی کنترل موجودی شامل کنترل غیرمتمرکز، مدیریت موجودی توسط فروشنده و سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی را در برابر شوک‌های موقت تقاضا

[1] Performance Drop
[2] Vendor-Managed Inventory
[3] Blockchain
[4] Smart Contracts
[5] Information-Coordinated Policy
[6] Agent-Based Simulation

مقایسه می‌کند. اثرهای مستقل و تعاملی شدت، مدت و زمان وقوع شوک بررسی می‌شوند و پاسخ سیاست‌ها به‌طور هم‌زمان از منظر افت عملکرد، زیان تجمعی تاب‌آوری، احتمال بازیابی پایدار[1] و زمان بازیابی ارزیابی می‌شود. همچنین، ظرفیت تأمین و تغییرپذیری زمان تأمین برای بررسی وابستگی عملکرد نسبی سیاست‌ها به شرایط عملیاتی در نظر گرفته می‌شوند. مشارکت اصلی پژوهش در یکپارچه‌سازی ویژگی‌های شوک، سازوکار سیاست موجودی، شرایط عملیاتی و ابعاد مکمل بازیابی در یک چارچوب مقایسه‌ای برای زنجیره تأمین دارویی است؛ چارچوبی که به‌جای فرض برتری عمومی یک سیاست، شرایطی را بررسی می‌کند که در آنها مزیت یا آسیب‌پذیری نسبی سیاست‌ها تغییر می‌کند.

۲- پیشینه پژوهش

زنجیره تأمین دارویی به دلیل نقش حیاتی آن در تأمین مستمر دارو، محدودیت‌های نظارتی، حساسیت نسبت به کمبود و پیچیدگی ساختار تأمین، در برابر عدم قطعیت و اختلال آسیب‌پذیر است. بخشی از مطالعات این حوزه بر طراحی و برنامه‌ریزی شبکه تحت عدم قطعیت متمرکز شده‌اند. در این رستا، موسی‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۵ (Mousazadeh et al., 2015) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح دوهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین دارویی ارائه کردند و با استفاده از برنامه‌ریزی استوار-امکانی، عدم‌قطعیت در پارامترهایی نظیر تقاضا و هزینه‌ها را در تصمیم‌های راهبردی و تاکتیکی لحاظ کردند. اهداف مدل شامل حداقل‌سازی هزینه کل و تقاضای برآورده‌نشده بود. سازور و همکاران (Sazvar et al., 2021) از یک مدل چندهدفه برای طراحی زنجیره تأمین دارویی حلقه‌بسته تحت عدم‌قطعیت تقاضا توسعه دادند. در مطالعات اخیر همین حوزه، مظفری و سواری (Mozafari & Savari, 2025) طراحی شبکه سبز و حلقه‌بسته دارویی را با توجه به فسادپذیری، مدیریت موجودی، جریان معکوس و آثار زیست‌محیطی بررسی کردند، درحالی‌که موکدی و قاسمی زاده (Moakedi & Ghasemizadeh, 2026) یک شبکه لجستیک دارویی را در دو فاز آمادگی و واکنش بحران با لحاظ عدم‌قطعیت تقاضا، ظرفیت، موجودی دارو، قابلیت اطمینان انبارها و مسیرها مدل‌سازی کردند. این دسته از مطالعات اهمیت عدم‌قطعیت، ظرفیت و موجودی را در عملکرد زنجیره دارویی نشان می‌دهند؛ بااین‌حال، تمرکز اصلی آنها بر طراحی یا بهینه‌سازی شبکه و تخصیص منابع است و مسیر زمانی افت و بازیابی عملکرد سیاست‌های مختلف موجودی پس از یک شوک موقت تقاضا محور اصلی تحلیل آنها نیست.جریان دیگری از پژوهش‌ها به قابلیت اطمینان، اختلال و بازیابی در زنجیره تأمین دارویی پرداخته است. تاکر و دسکین (Tucker & Daskin, 2022) یک مدل تحلیلی قابلیت اطمینان برای زنجیره تأمین دارویی توسعه دادند و اثر سه عامل پیکربندی زنجیره، نرخ وقوع اختلال و سرعت بازیابی را بر کمبود دارو بررسی کردند. در این مطالعه، کمبود موردانتظار، متوسط زمان تا کمبود و متوسط زمان بازیابی به‌عنوان معیارهای ارزیابی در نظر گرفته شدند. گوسامی و همکاران (Goswami et al., 2024) نیز یک چارچوب یکپارچه برای نگاشت و مدل‌سازی زنجیره‌های تأمین دارویی در حضور اختلال ارائه کردند. در این چارچوب، انواع اختلال‌ها بر اساس داده‌های تاریخی و نظر خبرگان طبقه‌بندی شدند و زمان وقوع، زمان تشخیص، مدت کاهش اثر و تأثیر آنها بر پارامترهای عملیاتی زنجیره موردتوجه قرار گرفت. اگرچه این مطالعات اهمیت ساختار اختلال و بازیابی را در زنجیره دارویی نشان می‌دهند، تمرکز آنها بر مقایسه رفتار سیاست‌های مختلف کنترل موجودی در برابر یک شوک موقت تقاضا نبوده است.

از منظر نوسانات تقاضا نیز سلیمی‌زاویه و همکاران (Salimi-Zaviyeh et al., 2026) با استفاده از داده‌های واقعی شرکت‌های زیست‌دارویی ایران، تقاضای ۹ دارو را در سه سناریوی کم، متوسط و زیاد پیش‌بینی و آن را با برنامه‌ریزی چندهدفه تولید تلفیق کردند. نتایج آنها نشان داد که در سناریوهای تقاضای بالا، تخصیص ظرفیت و استفاده از منابع در تصمیم‌های تولید اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، درحالی‌که در شرایط تقاضای پایین، کاهش موجودی و ضایعات در اولویت قرار می‌گیرد. این مطالعه اهمیت وابستگی تصمیم‌های عملیاتی به وضعیت تقاضا را نشان می‌دهد، هرچند تقاضا در آن به‌صورت سناریوهای برنامه‌ریزی مدل شده است و فرایند افت و بازیابی ناشی از یک شوک موقت بررسی نمی‌شود.

[1] Stable Recovery

در سطح تصمیم‌های موجودی، مدیریت موجودی توسط فروشنده یکی از سازوکارهای مهم هماهنگی میان خریدار و تأمین‌کننده محسوب می‌شود. در این سیاست، تأمین‌کننده با دسترسی به اطلاعات موجودی و مصرف مشتری، مسئولیت بیشتری در تصمیم‌های تجدید موجودی بر عهده می‌گیرد. کارن‌ناوا و کابالروموارلس (Carreón-Nava & Caballero-Morales, 2022) یک مدل مدیریت موجودی توسط فروشنده برای زنجیره تأمین دارویی دوسطحی و چند خرده‌فروشی تحت تقاضای غیرقطعی ارائه کردند. در این مطالعه، مدل مرور پیوسته، الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی برای تعیین اندازه سفارش و کاهش احتمال کمبود به کار گرفته شد و نتایج نشان داد که لحاظ‌کردن تغییرپذیری تقاضا می‌تواند عملکرد موجودی را نسبت به فرض تقاضای قطعی بهبود دهد. شن و همکاران (Shen et al., 2024) نیز در یک مطالعه موردی، سامانه مبتنی بر هوش مصنوعی و مدیریت موجودی توسط فروشنده را در مدیریت زنجیره تأمین دارویی یک بیمارستان بررسی کردند. نتایج پس از پیاده‌سازی سامانه، کاهش نرخ و خطای موجودی و افزایش کارایی فرایندهای مدیریت دارو را نشان داد. باوجوداین، تمرکز اصلی این مطالعات بر عملکرد عملیاتی مدیریت موجودی توسط فروشنده در شرایط عادی یا عدم قطعیت تقاضا بوده و فرایند افت و بازیابی پس از یک شوک مشخص تقاضا به طور مستقیم بررسی نشده است.

اثربخشی مدیریت موجودی توسط فروشنده تا حد زیادی به کیفیت، سرعت و قابلیت اعتماد جریان اطلاعات وابسته است.کالاشی و همکاران (Kalashi et al., 2025) در ارزیابی تأمین‌کنندگان یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته بادوام در صنعت تجهیزات پزشکی نشان دادند که تاب‌آوری یکی از مهم‌ترین ابعاد تصمیم‌گیری است و عواملی نظیر وجود تأمین‌کننده پشتیبان، اشتراک اطلاعات و ذخایر راهبردی در تقویت این قابلیت نقش دارند. عمر و همکاران (Omar et al., 2020) نیز یک چارچوب مبتنی بر بلاکچین اتریوم و قراردادهای هوشمند برای عملیات مدیریت موجودی توسط فروشنده پیشنهاد کردند که با هدف بهبود یکپارچگی داده، شفافیت، قابلیت ردیابی و کاهش تأخیر اطلاعات طراحی شده بود. در این چارچوب، قراردادهای هوشمند برای خودکارسازی تعاملات و اجرای قواعد ازپیش‌تعیین‌شده میان اعضای زنجیره به‌کار گرفته شدند و عملکرد فنی سامانه از نظر هزینه تراکنش و امنیت نیز ارزیابی شد. این مطالعه مبنایی برای نقش زیرساخت‌های اطلاعاتی در بهبود هماهنگی مدیریت موجودی توسط فروشنده فراهم می‌کند؛ بااین‌حال، تأثیر چنین سازوکارهایی بر افت عملکرد و بازیابی زنجیره در برابر شوک تقاضا موضوع اصلی ارزیابی آن نبوده است. ازاین‌رو، در پژوهش حاضر نیز بلاکچین به‌عنوان یک فناوری مستقل مورد ارزیابی قرار نمی‌گیرد و در قالب بخشی از زیرساخت اجرای سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی در نظر گرفته می‌شود.

در ادبیات عمومی‌تر تاب‌آوری زنجیره تأمین، استفاده از شبیه‌سازی و طراحی آزمایش امکان مطالعه نظام‌مند ویژگی‌های اختلال و تعامل آنها با ساختار و سیاست‌های زنجیره را فراهم کرده است. مک‌دونالد و همکاران (Macdonald et al., 2018) با ترکیب طراحی آزمایش ساختاریافته و شبیه‌سازی رویدادگسسته، چارچوبی برای مطالعه روابط میان شوک، ویژگی‌های اکوسیستم زنجیره و سرمایه‌گذاری‌های تاب‌آوری ارائه کردند. در این رویکرد، اثرهای اصلی و متقابل عوامل بر عملکرد و تاب‌آوری زنجیره قابل بررسی بود. بنابراین، تحلیل تعامل عوامل در مطالعات شبیه‌سازی اختلال دارای سابقه روش‌شناختی مشخصی است.

گادج و همکاران (Ghadge et al., 2022) نیز با استفاده از رویکرد پویایی سیستم، انتشار اختلال در یک زنجیره تأمین چهارسطحی را تحت اختلال‌های تقاضا، عرضه و لجستیک به‌صورت مستقل و هم‌زمان بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که نوع اختلال، ترکیب اختلال‌ها، گره در معرض اختلال و طول مدت آن می‌توانند الگوی انتشار و شدت آثار اختلال را تغییر دهند. این یافته‌ها بیانگر آن است که ارزیابی تاب‌آوری صرفاً بر اساس وجود یا عدم وجود اختلال کافی نیست و ویژگی‌های زمانی و ترکیبی اختلال نیز باید در تحلیل رفتار زنجیره لحاظ شوند.

پژوهش‌های دیگری به رفتار زمانی زنجیره در طول دوره اختلال و پس از آن پرداخته‌اند. برگاس و ایوانوف (Burgos & Ivanov, 2021) با توسعه یک دوقلوی دیجیتال زنجیره تأمین و استفاده از شبیه‌سازی رویداد گسسته، آثار سناریوهای واقعی همه‌گیری کووید ۱۹ را بر زنجیره خرده‌فروشی مواد غذایی بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که افزایش تقاضا، تعطیلی تأمین‌کنندگان و پویایی

سفارش‌دهی می‌تواند موجودی، سطح خدمت، بک‌لاگ[1] و زمان بازیابی را تحت‌تأثیر قرار دهد. ایوانوف (Ivanov, 2024) نیز مفهوم دنباله اختلال[2] را برای توصیف آثاری به کار گرفت که در دوره پس از پایان عامل اولیه اختلال باقی می‌مانند. نتایج این مطالعه نشان داد که انباشت سفارش‌های معوق و ناهماهنگی میان تصمیم‌های تقاضا، موجودی و ظرفیت می‌تواند موجب تداوم بی‌ثباتی عملکرد در دوره بازیابی شود. در این چارچوب، راهبردهایی مانند هموارسازی تقاضا و افزایش تدریجی ظرفیت برای کنترل آثار پسا شوک مورد بررسی قرار گرفتند.

از منظر سنجش تاب‌آوری نیز مطالعات پیشین بر ضرورت استفاده از چند معیار مکمل تأکید کرده‌اند. حبیبی و همکاران (Habibi et al., 2023) یک چارچوب کمی برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه زنجیره تأمین در حضور انتشار اختلال ارائه کردند و شش شاخص را برای سنجش ظرفیت‌های جذب، انطباق و بازیابی به‌کار گرفتند. این شاخص‌ها ابعاد متفاوتی مانند قابلیت اطمینان، آمادگی، پاسخ‌گویی، پایداری، تدبیرپذیری و زمان بازیابی را پوشش می‌دهند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از یک معیار واحد ممکن است تنها بخشی از رفتار تاب‌آوری را منعکس کند. همچنین تاکر و دسکین (Tucker & Daskin, 2022) نشان دادند که احتمال یا میزان کمبود و سرعت بازیابی، ابعاد متمایزی از قابلیت اطمینان زنجیره دارویی هستند. ازاین‌رو، نوآوری پژوهش حاضر در معرفی مفهوم ارزیابی چندبعدی تاب‌آوری نیست، بلکه در به‌کارگیری هم‌زمان ابعاد مکمل افت و بازیابی برای مقایسه سیاست‌های موجودی تحت شرایط آزمایشی کنترل‌شده قرار دارد.

علاوه بر نوع سیاست موجودی، محدودیت‌های عملیاتی نیز می‌توانند عملکرد آن را تغییر دهند. مهدوی منشادی و همکاران (Mahdavimanshadi et al., 2024) در یک مدل بهینه‌سازی تصادفی چندمرحله‌ای برای زنجیره تأمین دارویی، تقاضای تصادفی، تأمین‌کنندگان اصلی و اضطراری، موجودی ایمنی، ظرفیت منابع و سفارش معوق را به‌طور هم‌زمان لحاظ کردند. ویسی (Veisi, 2026) نیز در یک چارچوب یکپارچه پیش‌بینی تقاضا و بهینه‌سازی موجودی نشان داد که انتخاب میان تأمین عادی و اضطراری و سطح مناسب موجودی اطمینان به عواملی نظیر تغییرپذیری تقاضا، زمان تأمین، ظرفیت انبار و محدودیت بودجه وابسته است. تحلیل حساسیت این مطالعه همچنین نشان داد که افزایش یک‌جانبه سطح خدمت یا ظرفیت الزاماً به بهبود عملکرد اقتصادی منجر نمی‌شود. اگرچه زمینه کاربرد پژوهش ویسی موجودی قطعات یدکی است، یافته آن از منظر نقش شرایط عملیاتی در تعیین عملکرد نسبی سیاست‌های موجودی برای مسئله حاضر قابل توجه است.

جدول ۱ خلاصه‌ای از مطالعات منتخب مرتبط با محورهای اصلی پژوهش حاضر و تمایز آنها از چارچوب مورداستفاده در این مطالعه را ارائه می‌کند. مرور مطالعات پیشین و مقایسه ارائه‌شده در **جدول ۱** نشان می‌دهد که اجزای مسئله حاضر در چند جریان پژوهشی توسعه یافته‌اند. مطالعات طراحی و قابلیت اطمینان زنجیره دارویی، عدم قطعیت، کمبود و بازیابی را بررسی کرده‌اند؛ پژوهش‌های مدیریت موجودی توسط فروشنده بر هماهنگی تصمیم‌های موجودی و جریان اطلاعات تمرکز داشته‌اند؛ و مطالعات تاب‌آوری مبتنی بر شبیه‌سازی نیز اثر ویژگی‌های اختلال، تعامل عوامل، رفتار زمانی سیستم، دوره پسا شوک و سنجش چندبعدی تاب‌آوری را موردتوجه قرار داده‌اند. بااین‌حال، این جریان‌های پژوهشی در زمینه سیاست‌های کنترل موجودی زنجیره تأمین دارویی عمدتاً به‌صورت جداگانه توسعه یافته‌اند. به طور مشخص، شواهد محدودی درباره این موضوع وجود دارد که سیاست‌های متفاوت تجدید موجودی در برابر یک شوک موقت تقاضا با شدت، مدت و زمان وقوع کنترل‌شده چگونه از نظر عمق افت عملکرد، زیان تجمعی تاب‌آوری، احتمال بازیابی پایدار و زمان بازیابی با یکدیگر تفاوت دارند. همچنین، کمتر روشن است که محدودیت‌های عملیاتی نظیر ظرفیت تأمین و تغییرپذیری زمان تأمین چگونه عملکرد نسبی این سیاست‌ها را در شرایط شوک تغییر می‌دهند.

براین‌اساس، پژوهش حاضر با استفاده از شبیه‌سازی عامل‌بنیان، سه پیکربندی کنترل موجودی شامل کنترل غیرمتمرکز، مدیریت موجودی توسط فروشنده و سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی را در برابر شوک‌های موقت تقاضا مقایسه می‌کند. شدت، مدت و زمان وقوع شوک در یک

[1] Backlog
[2] Disruption Tail

طراحی آزمایشی کنترل‌شده تغییر داده می‌شوند و پاسخ سیاست‌ها به طور هم‌زمان از منظر افت عملکرد، زیان تجمعی تاب‌آوری، احتمال بازیابی پایدار و زمان بازیابی ارزیابی می‌شود. افزون بر این، ظرفیت تأمین و تغییرپذیری زمان تأمین برای بررسی وابستگی عملکرد نسبی سیاست‌ها به شرایط عملیاتی در نظر گرفته می‌شوند؛ بنابراین، مشارکت پژوهش حاضر نه در معرفی یک معیار جدید تاب‌آوری یا یک فناوری جدید، بلکه در یکپارچه‌سازی ویژگی‌های شوک، سازوکار سیاست موجودی، شرایط عملیاتی و ابعاد مکمل بازیابی در یک چارچوب مقایسه‌ای برای زنجیره تأمین دارویی است.

جدول ۱. مقایسه مطالعات منتخب در حوزه اختلال، سیاست موجودی و تاب‌آوری زنجیره تأمین

Table 1. Comparison of selected studies on disruption, inventory policies, and supply chain resilience

مطالعه	زمینه و روش پژوهش	نوع اختلال / عدم‌قطعیت	تمرکز اصلی مطالعه	تمایز نسبت به پژوهش حاضر
Macdonald et al., 2018	طراحی آزمایش ساختاریافته و شبیه‌سازی رویدادگسسته	شوک‌های زنجیره تأمین و تغییر در عوامل مرتبط با شوک و ساختار شبکه	بررسی اثرهای اصلی و متقابل ویژگی‌های شوک، ساختار شبکه و سرمایه‌گذاری‌های تاب‌آوری	چارچوب عمومی تاب‌آوری را بررسی می‌کند؛ تمرکز آن بر مقایسه سیاست‌های موجودی در زنجیره دارویی و ترکیب شدت، مدت و زمان وقوع شوک تقاضا نیست.
Omar et al., 2020	طراحی و پیاده‌سازی چارچوب فنی مبتنی بر اتریوم و قرارداد هوشمند	چالش‌های اطلاعاتی شامل تأخیر، یکپارچگی، شفافیت و ردیابی داده	بهبود تبادل اطلاعات، خودکارسازی قواعد VMI و ارزیابی امنیت و هزینه تراکنش	اثر سازوکار اطلاعاتی بر شاخص‌های افت و بازیابی زنجیره در برابر شوک تقاضا اندازه‌گیری نمی‌شود.
Carreón-Nava & Caballero-Morales, 2022	مدل موجودی مدیریت‌شده توسط فروشنده (VMI) دوسطحی با چند خرده‌فروش، مدل (Q,R) یا مدل مقدار سفارش و نقطه سفارش، الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی	تقاضای تصادفی و غیرقطعی	تعیین اندازه سفارش و نقطه سفارش با هدف افزایش سود و کاهش وقوع کمبود موجودی	تقاضای نامطمئن عادی را بررسی می‌کند و ساختار مشخص شوک شامل شدت، مدت و زمان وقوع و مسیر بازیابی پس از آن را در نظر نمی‌گیرد.
Tucker & Daskin, 2022	مدل تحلیلی قابلیت اطمینان زنجیره تأمین دارویی	اختلال اجزای تأمین و فرایند بازیابی	اثر پیکربندی، نرخ اختلال و سرعت بازیابی بر کمبود دارو و زمان بازیابی	بر قابلیت اطمینان ساختاری زنجیره تمرکز دارد و پاسخ پویای سیاست‌های متفاوت تجدید موجودی به شوک موقت تقاضا را مقایسه نمی‌کند.
Macdonald et al., 2018	طراحی آزمایش ساختاریافته و شبیه‌سازی رویدادگسسته	شوک‌های زنجیره تأمین و تغییر در عوامل مرتبط با شوک و ساختار شبکه	بررسی اثرهای اصلی و متقابل ویژگی‌های شوک، ساختار شبکه و سرمایه‌گذاری‌های تاب‌آوری	چارچوب عمومی تاب‌آوری را بررسی می‌کند؛ تمرکز آن بر مقایسه سیاست‌های موجودی در زنجیره دارویی و ترکیب شدت، مدت و زمان وقوع شوک تقاضا نیست.

ادامه جدول ۲.

Table 1 continued.

مطالعه	زمینه و روش پژوهش	نوع اختلال / عدم‌قطعیت	تمرکز اصلی مطالعه	تمایز نسبت به پژوهش حاضر
Omar et al., 2020	طراحی و پیاده‌سازی چارچوب فنی مبتنی بر اتریوم و قرارداد هوشمند	چالش‌های اطلاعاتی شامل تأخیر، یکپارچگی، شفافیت و ردیابی داده	بهبود تبادل اطلاعات، خودکارسازی قواعد VMI و ارزیابی امنیت و هزینه تراکنش	اثر سازوکار اطلاعاتی بر شاخص‌های افت و بازیابی زنجیره در برابر شوک تقاضا اندازه‌گیری نمی‌شود.
Carreón-Nava & Caballero-Morales, 2022	مدل موجودی مدیریت‌شده توسط فروشنده (VMI) دوسطحی با چند خرده‌فروش، مدل (Q,R) یا مدل مقدار سفارش و نقطه سفارش، الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی	تقاضای تصادفی و غیرقطعی	تعیین اندازه سفارش و نقطه سفارش با هدف افزایش سود و کاهش وقوع کمبود موجودی	تقاضای نامطمئن عادی را بررسی می‌کند و ساختار مشخص شوک شامل شدت، مدت و زمان وقوع و مسیر بازیابی پس از آن را در نظر نمی‌گیرد.
Tucker & Daskin, 2022	مدل تحلیلی قابلیت اطمینان زنجیره تأمین دارویی	اختلال اجزای تأمین و فرایند بازیابی	اثر پیکربندی، نرخ اختلال و سرعت بازیابی بر کمبود دارو و زمان بازیابی	بر قابلیت اطمینان ساختاری زنجیره تمرکز دارد و پاسخ پویای سیاست‌های متفاوت تجدید موجودی به شوک موقت تقاضا را مقایسه نمی‌کند.
Habibi et al., 2023	چارچوب کمی ارزیابی تاب‌آوری و شبیه‌سازی انتشار و بازیابی اختلال در شبکه	انتشار اختلال و اثر موجی ناشی از آن	ارزیابی چندبعدی ظرفیت‌های جذب، انطباق و بازیابی	ارزیابی چندبعدی تاب‌آوری را توسعه می‌دهد، اما موضوع آن مقایسه سیاست‌های موجودی دارویی تحت ویژگی‌های کنترل‌شده شوک تقاضا نیست.
Ivanov, 2024	شبیه‌سازی رویدادگسسته پویایی عرضه، تقاضا و ظرفیت در دوره خروج از همه‌گیری	اختلال بلندمدت و آثار پساشوک	بررسی دنباله اختلال و راهبردهای هموارسازی تقاضا و افزایش تدریجی ظرفیت	بر مدیریت پساشوک و دنباله اختلال تمرکز دارد و مقایسه سه سیاست کنترل موجودی تحت طراحی عاملی شوک تقاضا را انجام نمی‌دهد.
Mozafari & Savari, 2025	مدل چندهدفه طراحی شبکه سبز و حلقه‌بسته دارویی	عدم‌قطعیت تقاضا، فسادپذیری و ضایعات دارویی	مکان‌یابی، موجودی، جریان معکوس، هزینه و آثار زیست‌محیطی	بر طراحی و بهینه‌سازی شبکه دارویی تمرکز دارد و مسیر افت و بازیابی سیاست‌های موجودی پس از شوک موقت را بررسی نمی‌کند.
Moakedi & Ghasemizadeh, 2026	بهینه‌سازی استوار شبکه لجستیک دارویی در مراحل آمادگی و پاسخ بحران	عدم‌قطعیت تقاضا، خرابی انبار و مسیر و محدودیت ظرفیت	موجودی دارو، ظرفیت، قابلیت اطمینان، هزینه و جلوگیری از کمبود	اختلال و قابلیت اطمینان را در زنجیره دارویی بررسی می‌کند، اما بر طراحی شبکه و تخصیص منابع متمرکز است و بازیابی سیاست‌های موجودی را مقایسه نمی‌کند.

ادامه جدول ۳.

Table 1 continued.

مطالعه	زمینه و روش پژوهش	نوع اختلال / عدم‌قطعیت	تمرکز اصلی مطالعه	تمایز نسبت به پژوهش حاضر
Salimi-Zaviyeh et al., 2026	پیش‌بینی تقاضای زیست‌دارو با LSTM و بهینه‌سازی چندهدفه تولید	سناریوهای تقاضای کم، متوسط و زیاد	پیش‌بینی تقاضا، تخصیص ظرفیت، تولید، موجودی، سود و انتشار آلاینده	تغییر سطح تقاضا را بررسی می‌کند، اما شدت، مدت و زمان وقوع یک شوک موقت و فرایند بازیابی پس از آن مدل نمی‌شود.
Veisi, 2026	پیش‌بینی تقاضا و بهینه‌سازی یکپارچه موجودی	تقاضای نامنظم و تفاوت زمان تأمین	موجودی اطمینان، تأمین عادی/اضطراری، زمان تأمین، ظرفیت انبار و محدودیت بودجه	نقش شرایط عملیاتی در سیاست موجودی را نشان می‌دهد، اما اختلال و بازیابی زنجیره دارویی موضوع مطالعه نیست.
پژوهش حاضر	شبیه‌سازی عامل‌بنیان و طراحی آزمایش عاملی	شوک موقت تقاضا با تغییر شدت، مدت و زمان وقوع و شرایط عملیاتی	مقایسه کنترل غیرمتمرکز، VMI و سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی از نظر افت عملکرد، زیان تاب‌آوری، احتمال بازیابی پایدار و زمان بازیابی	ویژگی‌های شوک، سازوکار سیاست موجودی، شرایط عملیاتی و ابعاد مکمل بازیابی را در یک چارچوب مقایسه‌ای برای زنجیره تأمین دارویی یکپارچه می‌کند.

۳- روش پژوهش و طراحی آزمایش

۳-۱-طراحی پژوهش و چارچوب مفهومی

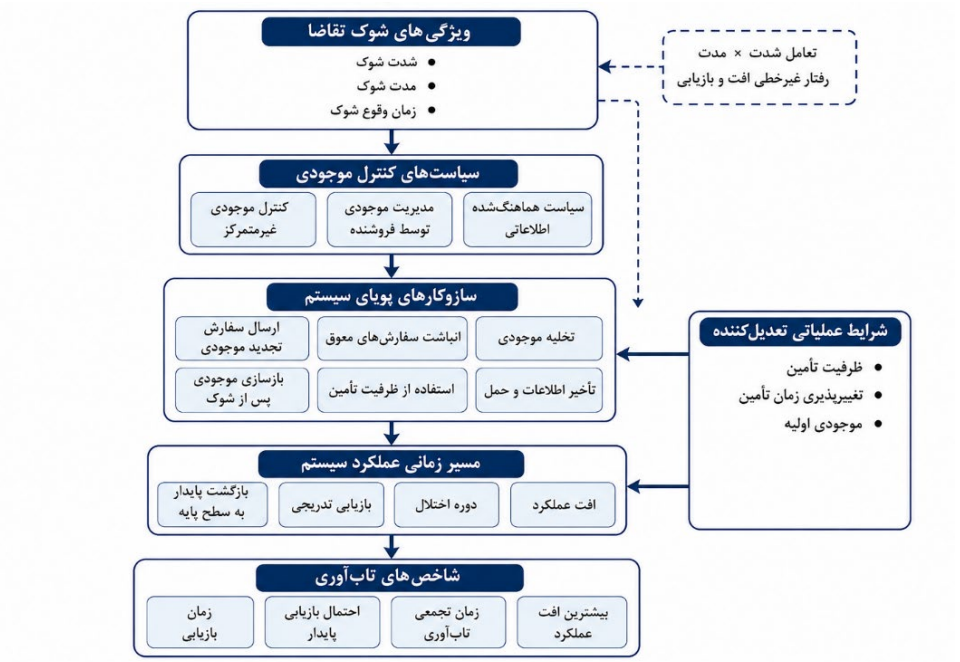
پژوهش حاضر یک مطالعه کمی مبتنی بر شبیه‌سازی رایانه‌ای است که با هدف تحلیل اثر شدت، مدت و زمان وقوع شوک موقت تقاضا بر پویایی افت و بازیابی سیاست‌های کنترل موجودی در زنجیره تأمین دارویی انجام شد. شبیه‌سازی به‌عنوان یک محیط آزمایشی کنترل‌شده به کار گرفته شد تا ویژگی‌های شوک، سیاست موجودی و شرایط عملیاتی به‌صورت نظام‌مند تغییر کنند و پاسخ سیستم بدون ایجاد اختلال در یک زنجیره تأمین واقعی مقایسه شود.

واحد تحلیل، هر اجرای مستقل شبیه‌سازی است. هر اجرا مسیر زمانی عملکرد زنجیره را تحت ترکیب مشخصی از سیاست موجودی، شدت، مدت و زمان وقوع شوک و شرایط عملیاتی نشان می‌دهد. داده‌های تحلیل‌شده از اجرای مدل رایانه‌ای حاصل شده‌اند و پژوهش شامل نمونه انسانی، داده بیمار یا مطالعه موردی یک سازمان مشخص نیست.

پارامترهای مدل بر اساس پایان‌نامه‌ها و مطالعات پیشین مرتبط با زنجیره تأمین دارویی، کنترل موجودی و عدم‌قطعیت تقاضا تعیین شدند (Khojeh et al., 2023؛ Erfanian & Bayani, 2018). مدل با داده‌های واقعی یک زنجیره مشخص کالیبره نشده است؛ بنابراین، دامنه استنباط به مقایسه درون‌مدلی سیاست‌ها، شناسایی اثر عوامل و بررسی تعامل میان آن‌ها محدود می‌شود و مقادیر حاصل نباید به‌عنوان پیش‌بینی مستقیم عملکرد یک سازمان واقعی تفسیر شوند.

مدل در نرم‌افزار AnyLogic نسخه ۸.۹ و با رویکرد شبیه‌سازی عامل‌بنیان توسعه یافت. این رویکرد امکان بازنمایی داروخانه‌ها، تأمین‌کننده، عامل حمل‌ونقل و زیرساخت هماهنگی اطلاعات را به‌عنوان موجودیت‌هایی با وضعیت، اطلاعات و قواعد تصمیم‌گیری متمایز فراهم می‌کند و رفتار کلان زنجیره از تعامل فرایندهای تقاضا، سفارش‌دهی، تأمین، حمل و تبادل اطلاعات شکل می‌گیرد (Macal & North, 2005؛ Bozdoğan et al., 2023).

شدت، مدت و زمان وقوع شوک، همراه با نوع سیاست موجودی و شرایط عملیاتی، سازوکارهای تخلیه و بازسازی موجودی، انباشت سفارش‌های معوق، تأخیر اطلاعات و استفاده از ظرفیت را تحت تأثیر قرار می‌دهند. پیامد این سازوکارها در مسیر زمانی افت، اختلال، بازیابی تدریجی و بازگشت پایدار عملکرد منعکس می‌شود. **شکل ۱** مدل مفهومی پژوهش را نشان می دهد.



شکل ۱. مدل مفهومی پژوهش.

Figure 1. Conceptual model of the study.

جدول ۲. عامل‌های مدل و وظایف اصلی آن‌ها

Table 2. Model agents and their primary functions

عامل	تعداد	وظایف اصلی
داروخانه	۱۰	ایجاد تقاضای روزانه، تأمین تقاضا از موجودی، ثبت کمبود و سفارش معوق، دریافت محموله و نگهداری اطلاعات موجودی
تأمین‌کننده	۱	دریافت یا ایجاد سفارش، برنامه‌ریزی تأمین، تولید یا آماده‌سازی محموله و ارسال کالا
عامل حمل‌ونقل	۱	تخصیص ظرفیت حمل، تعیین زمان تحویل، ثبت مسافت، وضعیت زنجیره سرد و انتشار کربن
زیرساخت هماهنگی اطلاعات	۱	انتقال و ثبت اطلاعات، اجرای قواعد هماهنگی و اعمال سازوکارهای اطلاعاتی سیاست سوم
عامل اصلی مدل	۱	بارگذاری داده‌ها، اجرای آزمایش‌ها، ثبت خروجی‌ها و کنترل وضعیت شوک

۳-۲- ساختار زنجیره تأمین و فرایند اجرای مدل

مدل شامل ده داروخانه، یک تأمین‌کننده، یک عامل حمل‌ونقل و یک زیرساخت هماهنگی اطلاعات است. عامل اصلی مدل (Main) محیط مرکزی مدل را تشکیل می‌دهد و وظیفه مقداردهی اولیه، بارگذاری پارامترها، انتخاب سلول آزمایشی، مدیریت اجرای تکرارها، فعال‌سازی شوک و ثبت خروجی‌ها را بر عهده دارد. عامل‌ها و وظایف اصلی آن‌ها در **جدول ۲** ارائه شده‌اند.

در هر گام روزانه، تقاضای داروخانه‌ها تولید و ابتدا از موجودی قابل‌استفاده پاسخ داده می‌شود. بخش تأمین‌نشده تقاضا، متناسب با منطق فعال مدل، به‌صورت سفارش معوق[1] یا فروش ازدست‌رفته[2] ثبت می‌شود. سپس وضعیت موجودی و سفارش‌های جاری به‌روزرسانی شده و تصمیم تجدید موجودی مطابق سیاست فعال اتخاذ می‌شود. سفارش‌های ایجادشده پس از پردازش تأمین‌کننده و سپری‌شدن زمان تولید و حمل، از طریق عامل حمل‌ونقل به داروخانه‌ها تحویل داده می‌شوند.

سه جریان اصلی در مدل وجود دارد. جریان فیزیکی شامل انتقال دارو از تأمین‌کننده به داروخانه‌هاست. جریان سفارش، انتقال درخواست تجدید موجودی از تصمیم‌گیرنده سیاست به تأمین‌کننده را نشان می‌دهد. جریان اطلاعات نیز شامل ثبت و مشاهده تقاضا، موجودی، سفارش‌های باز، محموله‌های در مسیر و وضعیت تحویل

[1] Backorder
[2] Lost Sales

است. تفاوت سیاست‌ها عمدتاً در مسئول تصمیم‌گیری، کیفیت و تأخیر اطلاعات و میزان خودکارسازی قواعد هماهنگی منعکس می‌شود. **شکل ۲** تصویر محیط شبیه سازی و توابع،پارامتر ها و متغیر های موجود در عامل اصلی مدل را نشان می دهد.

۳-۳- سیاست‌های کنترل موجودی

به‌منظور مقایسه اثر سازوکارهای مختلف کنترل و هماهنگی موجودی بر تاب‌آوری زنجیره تأمین دارویی، سه سیاست شامل کنترل موجودی غیرمتمرکز، مدیریت موجودی توسط فروشنده و سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی در مدل در نظر گرفته شد. چارچوب عمومی کنترل موجودی در هر سه سیاست بر مبنای بازبینی دوره‌ای تا سطح هدف تعریف شد؛ بااین‌حال، سیاست‌ها از نظر مسئولیت تصمیم‌گیری، سرعت و کیفیت دسترسی به اطلاعات، دقت برآورد تقاضا و سطح هماهنگی میان اعضای زنجیره با یکدیگر تفاوت دارند. این ساختار امکان مقایسه سیاست‌ها را در شرایط یکسان تقاضا و اختلال فراهم می‌کند.

موجودی داروخانه‌ها در دوره‌های هفت‌روزه بازبینی می‌شود. در هر بازبینی، تصمیم تجدید موجودی بر اساس موقعیت موجودی قابل مشاهده اتخاذ می‌شود. برای داروخانه i در زمان بازبینی t، موقعیت موجودی از مجموع موجودی قابل‌استفاده و سفارش‌های در راه قابل مشاهده برای تصمیم‌گیرنده، پس از کسر سفارش‌های معوق، محاسبه می‌شود:

$$IP_{i,t} = I_{i,t} + O_{i,t}^{vis} - B_{i,t} \qquad (۱)$$

که در آن $I_{i,t}$ موجودی قابل‌استفاده داروخانه، $O_{i,t}^{vis}$ مقدار سفارش‌های در راه قابل مشاهده برای تصمیم‌گیرنده و $B_{i,t}$ مقدار سفارش معوق است. مقدار $O_{i,t}^{vis}$ متناسب با سطح دسترسی و تأخیر اطلاعاتی سیاست فعال تعیین می‌شود؛ بنابراین، تفاوت سیاست‌ها در کیفیت و به‌موقع‌بودن اطلاعات مورد استفاده در تصمیم تجدید موجودی نیز منعکس می‌شود.

در هر دوره بازبینی، اگر موقعیت موجودی از سطح هدف کمتر باشد، مقدار سفارش تجدید موجودی بر اساس فاصله تا سطح هدف و ضریب بایاس/خطای برآورد سیاست از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$Q_{i,t} = max\{0, \text{round}[(S - IP_{i,t})\,(1+b)]\} \qquad (۲)$$

که در آن $Q_{i,t}$ مقدار سفارش، S سطح هدف موجودی و b ضریب خطا/بایاس مورد استفاده در تصمیم سفارش است و اگر موقعیت موجودی بزرگتر مساوی سطح هدف باشد، مقدار سفارش برابر صفر است؛ بنابراین، منطق اجرایی سفارش‌دهی در مدل از نوع بازبینی دوره‌ای تا سطح هدف است و تفاوت میان سیاست‌ها از طریق مسئول تصمیم‌گیری، اطلاعات قابل مشاهده، تأخیر اطلاعاتی، ضریب بایاس و سطح خودکارسازی بازنمایی می‌شود.

در سیاست کنترل موجودی غیرمتمرکز، هر داروخانه بر اساس اطلاعات محلی خود وضعیت موجودی را پایش کرده و درباره تجدید موجودی تصمیم‌گیری می‌کند. محدودیت در اشتراک اطلاعات و تأخیر بیشتر در انتقال اطلاعات موجب می‌شود تصمیم سفارش با عدم‌قطعیت بیشتری نسبت به دو سیاست دیگر همراه باشد. در این سیاست، دوره بازبینی ۷ روز، سطح هدف موجودی ۵۰۰ واحد، تأخیر اطلاعاتی ۲ روز و ضریب خطای برآورد تقاضا ۰/۲۰ در نظر گرفته شد.

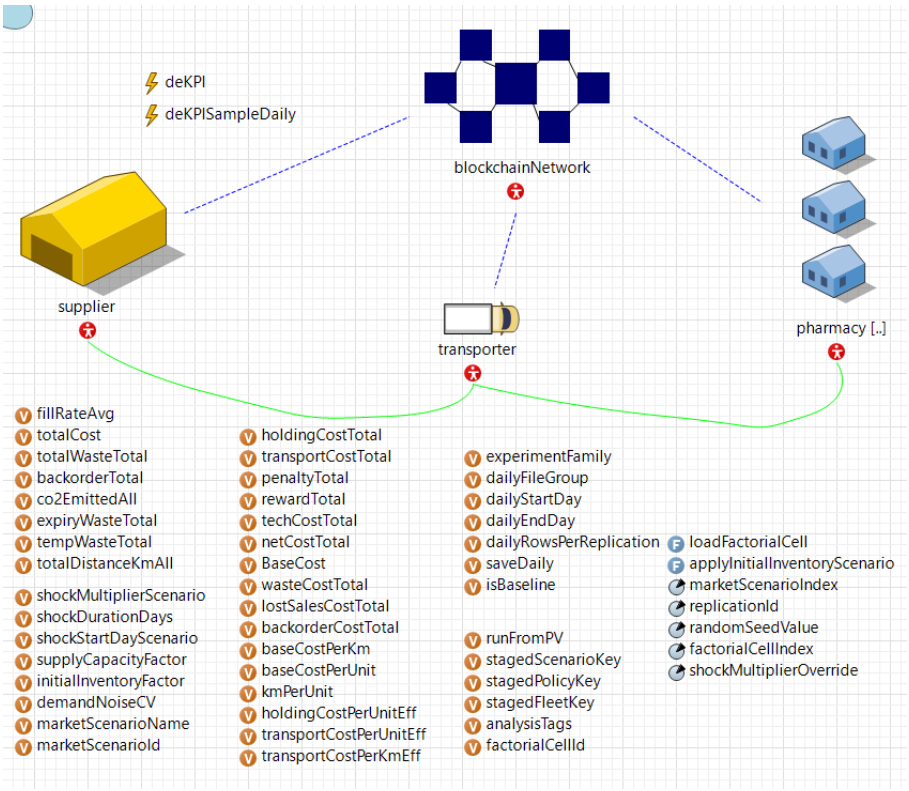
در سیاست مدیریت موجودی توسط فروشنده ، مسئولیت برنامه‌ریزی و تجدید موجودی با اتکا به اطلاعات موجودی و تقاضای داروخانه‌ها به تأمین‌کننده واگذار می‌شود. دسترسی مستقیم‌تر به اطلاعات پایین‌دست، امکان تصمیم‌گیری هماهنگ‌تر را فراهم کرده و تأخیر اطلاعاتی و خطای برآورد تقاضا را در مقایسه با سیاست غیرمتمرکز کاهش می‌دهد. برای این سیاست، دوره بازبینی ۷ روز، سطح هدف موجودی ۵۰۰ واحد، تأخیر اطلاعاتی ۱ روز و ضریب خطای برآورد تقاضا ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. بنابراین، مدیریت موجودی توسط فروشنده در مدل معرف سطح بالاتری از تمرکز تصمیم‌های تجدید موجودی و دسترسی اطلاعاتی نسبت به کنترل غیرمتمرکز است.

در سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی، سطح بالاتری از اشتراک اطلاعات، مشاهده‌پذیری و خودکارسازی قواعد میان اعضای زنجیره برقرار است. در این حالت، اطلاعات موجودی و سفارش‌ها با تأخیر بسیار محدود در دسترس قرار گرفته و خطای برآورد تقاضا حذف می‌شود. دوره بازبینی ۷ روز، سطح هدف موجودی ۵۰۰ واحد و تأخیر اطلاعاتی ۰/۲ روز برای این سیاست در نظر گرفته شد.

همچنین، پایش خودکار و قواعد توافق سطح خدمت (SLA) در این پیکربندی فعال هستند.

در سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی، زیرساخت بلاکچین و قرارداد هوشمند برای بازنمایی ثبت قابل‌اعتماد اطلاعات، افزایش شفافیت، کاهش تأخیر در تبادل داده و اجرای خودکار قواعد هماهنگی در نظر گرفته شده است. بااین‌حال، مؤلفه‌های فنی شبکه بلاکچین، نظیر الگوریتم اجماع، هزینه پردازش تراکنش یا عملکرد شبکه، به‌صورت عوامل آزمایشی مستقل مدل نشده‌اند. ازاین‌رو، نتایج این سیاست به‌عنوان پیامد پیکربندی هماهنگ‌شده اطلاعاتی و خودکارسازی تصمیم‌ها تفسیر می‌شود و نه به‌عنوان برآورد مستقل اثر فناوری بلاکچین.

مشخصات پارامتری سه سیاست کنترل موجودی در جدول ۳ ارائه شده است. تفاوت در این پارامترها، سطوح متفاوتی از تمرکز تصمیم‌گیری، دسترسی اطلاعاتی و هماهنگی عملیاتی را بازنمایی می‌کند و مبنای مقایسه رفتار سیاست‌ها در سناریوهای مختلف شوک تقاضا قرار می‌گیرد.



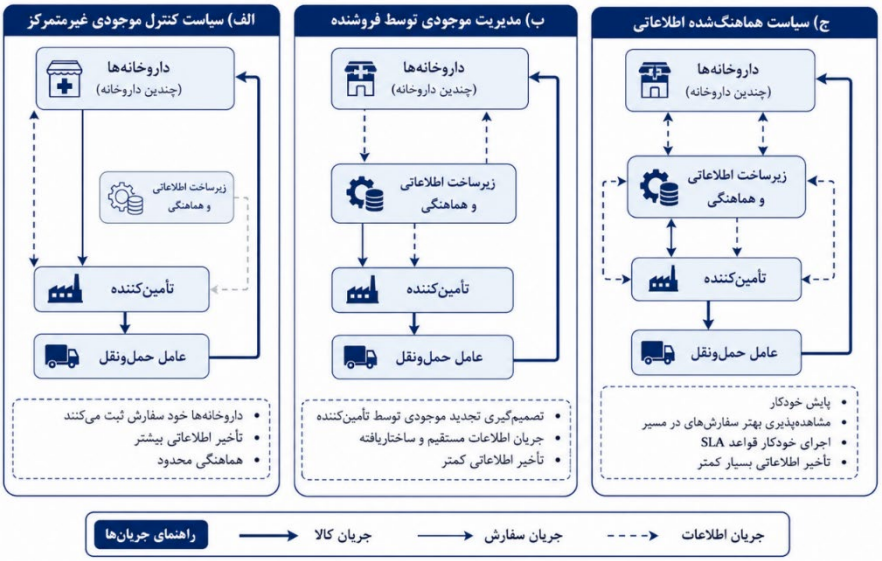
شکل ۲. تصویر مدل درمحیط شبیه سازی.

Figure 2. View of the model in the simulation environment.

جدول ۳. مشخصات پارامتری سیاست های کنترل موجودی

Table 3. Parameter specifications of the inventory control policies

مشخصه	کنترل غیرمتمرکز	مدیریت موجودی توسط فروشنده	سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی
دوره بازبینی	روز ۷	روز ۷	روز ۷
سطح هدف موجودی (S)	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
تأخیر اطلاعاتی	روز ۲	روز ۱	۰/۲ روز
ضریب خطا/بایاس برآورد تقاضا	۰/۲۰	۰/۰۵	۰
مسئولیت اصلی تجدید موجودی	داروخانه	تأمین‌کننده	هماهنگ/خودکار
پایش خودکار	خیر	خیر	بله
قواعد SLA	خیر	خیر	بله



شکل ۳. معماری مدل شبیه‌سازی.

Figure 3. Architecture of the simulation model.

شکل ۳ تفاوت سه سیاست را از نظر جریان کالا، مسیر سفارش، تبادل اطلاعات و مسئول تصمیم‌گیری نشان می‌دهد. جریان فیزیکی کالا در هر سه سیاست مشابه است، اما محل ایجاد سفارش و نقش زیرساخت هماهنگی اطلاعات میان سیاست‌ها تفاوت دارد.

۳-۴- مدل‌سازی تقاضای عادی و شوک موقت

تقاضای روزانه در شرایط عادی به‌صورت تابع توزیع نرمال تولید شد. میانگین پایه مولد تقاضا برابر با ۸۰ واحد در روز برای هر داروخانه و ضریب تغییرات پایه برابر با ۰/۱۵ در نظر گرفته شد. انحراف معیار تقاضای روزانه از حاصل‌ضرب میانگین همان روز در ضریب تغییرات محاسبه و مقدار تقاضا از توزیع نرمال نمونه‌گیری شد. مقدار نمونه‌گیری‌شده به نزدیک‌ترین عدد صحیح گرد و در مقادیر غیرمنفی محدود شد.

اگر μ_t میانگین تقاضا در روز t و CV ضریب تغییرات باشد، انحراف معیار و تقاضای روزانه از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\sigma_t = CV \times \mu_t$$
$$D_t = max\{0, round\,[Normal\,(\mu_t, \sigma_t)]\} \quad (۳)$$

در این رابطه، میانگین تقاضای پایه بیانگر سطح معمول تقاضا در شرایط بدون اختلال است و پراکندگی تقاضا از طریق ضریب تغییرات در هر تکرار شبیه‌سازی لحاظ می‌شود. بدین‌ترتیب، حتی در شرایط پایه نیز مسیر تقاضا کاملاً قطعی نیست.

در شرایط عادی، $\mu_t = \mu_0$ است. برای ایجاد شوک موقت تقاضا، میانگین تقاضا در بازه مشخصی در ضریب شدت شوک ضرب شد:

$$\mu_t = \begin{cases} \mu_0 \times M & s \le t < s + d \\ \mu_0 & \text{درسایر روزها} \end{cases} \quad (۴)$$

در این رابطه، M شدت شوک، s روز آغاز شوک و d مدت شوک است. شوک تقاضا به‌صورت افزایش موقت سطح تقاضا نسبت به مقدار پایه مدل شده است؛ به‌گونه‌ای که تنها در بازه زمانی تعیین‌شده فعال بوده و پس از پایان آن، پارامتر تقاضا به سطح پایه بازمی‌گردد. بنابراین، ضریب شدت شوک بیانگر نسبت تقاضای دوره اختلال به تقاضای عادی است. پس از پایان بازه شوک، میانگین تقاضا به مقدار پایه بازمی‌گردد و سیستم وارد دوره بازیابی می‌شود.

شدت شوک نشان می‌دهد تقاضا در دوره اختلال چند برابر سطح پایه است. مدت شوک تعداد روزهای متوالی افزایش تقاضا و زمان وقوع، روز آغاز آن در افق شبیه‌سازی است. تفکیک این سه مؤلفه امکان بررسی مستقل و تعاملی اندازه شوک، طول دوره فشار بر سیستم و موقعیت زمانی وقوع آن را فراهم می‌کند؛ در نتیجه، دو شوک با شدت یکسان می‌توانند به دلیل تفاوت در مدت یا زمان وقوع، پیامدهای متفاوتی برای موجودی و فرایند بازیابی ایجاد کنند.

۳-۵- طراحی آزمایش

طراحی آزمایش به‌صورت عاملی و سناریومحور انجام شد. به‌جای اجرای یک طرح کامل شامل تمام ترکیب‌های ممکن عوامل، مجموعه‌ای از طرح‌های اصلی و تکمیلی تعریف شد تا اثر ویژگی‌های شوک و محدودیت‌های عملیاتی به‌صورت هدفمند بررسی شود.

سطوح عوامل آزمایشی با هدف ایجاد دامنه‌ای کنترل‌شده از شرایط عادی تا فشار شدید بر سیستم و امکان مقایسه نظام‌مند پاسخ سیاست‌ها انتخاب شدند و بیانگر برآورد احتمالات وقوع یک رویداد تاریخی مشخص نیستند. برای شدت شوک، ضرایب ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ برابر تقاضای پایه در نظر گرفته شد تا پاسخ سیستم در برابر افزایش‌های تدریجی از فشار متوسط تا شدید تقاضا قابل بررسی باشد. مدت شوک نیز در سطوح ۱، ۳، ۷ و ۱۴ روز تعریف شد؛ به‌گونه‌ای که شوک‌های بسیار کوتاه، چندروزه و شوک‌های ممتد معادل یک و دو دوره کامل بازبینی موجودی پوشش داده شوند. زمان‌های وقوع ۶۰، ۱۵۰ و ۲۴۰ نیز به‌ترتیب برای بازنمایی وقوع نسبتاً زودهنگام، میانی و دیرهنگام شوک در افق شبیه‌سازی انتخاب شدند. این فاصله‌گذاری علاوه بر ایجاد وضعیت‌های زمانی متمایز، موجب می‌شود شوک نخست پس از دوره آماده شدن مدل رخ دهد و حتی در دیرترین سناریو نیز زمان کافی برای مشاهده رفتار پساشوک و ارزیابی بازیابی سیستم باقی بماند.

در شرایط پایه، شوک تقاضا غیرفعال بود و هر سه سیاست در شرایط عملیاتی مرجع اجرا شدند. سه طرح دوعاملی به‌ترتیب اثر سیاست و شدت، سیاست و مدت و سیاست و زمان وقوع شوک را بررسی کردند. یک طرح سه‌عاملی برای تحلیل هم‌زمان سیاست، شدت و مدت و یک طرح چهارعاملی فشرده برای بررسی سیاست، شدت، مدت و زمان وقوع شوک اجرا شد.

سه تحلیل تکمیلی نیز برای بررسی نقش شرایط عملیاتی تعریف شدند. نخست، اثر سیاست، شدت شوک و ظرفیت تأمین بررسی شد. دوم، سیاست، مدت شوک و تغییرپذیری زمان تأمین وارد تحلیل شدند. تحلیل سوم به بررسی سیاست، زمان وقوع شوک و سطح موجودی تعیین‌شده در ابتدای شبیه‌سازی اختصاص داشت (تحلیل A8 به‌دلیل تعیین سطح موجودی در ابتدای شبیه‌سازی، به‌عنوان تحلیل تکمیلی اکتشافی در نظر گرفته شده و نتایج آن در **پیوست ب** گزارش شده است). از آنجا که سطح موجودی در آغاز اجرای مدل تنظیم می‌شد و الزاماً بیانگر وضعیت موجودی بلافاصله پیش از وقوع شوک نبود، این تحلیل با ماهیت اکتشافی در نظر گرفته شد و نتایج آن در بخش **ضمائم** گزارش شده است. در تحلیل‌های تکمیلی، ظرفیت تأمین در دو سطح ۱ و ۰/۷ برابر ظرفیت مرجع و ضریب تغییرات زمان تأمین در دو سطح ۰/۲۵ و ۰/۵ بررسی شد تا عملکرد سیاست‌ها علاوه بر شرایط مرجع، در وضعیت محدودیت ظرفیت و افزایش عدم‌قطعیت فرایند تأمین نیز ارزیابی شود. عوامل متغیر، سطوح هر عامل و شرایط ثابت طرح‌ها در **جدول ۴** ارائه شده‌اند.

جدول ۴. ساختار تحلیل‌های عاملی پژوهش

Table 4. Structure of the factorial analyses

کد تحلیل	عوامل متغیر	سطوح عوامل	عوامل ثابت
A1	سیاست × شدت	سیاست: ۳ سطح؛ شدت: ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳	مدت=۷؛ زمان=۱۵۰
A2	سیاست × مدت	سیاست: ۳ سطح؛ مدت: ۱، ۳، ۷ و ۱۴ روز	شدت=۲؛ زمان=۱۵۰
A3	سیاست × زمان وقوع	سیاست: ۳ سطح؛ زمان: روزهای ۶۰، ۱۵۰ و ۲۴۰	شدت=۲؛ مدت=۷
A4	سیاست × شدت × مدت	سیاست: ۳؛ شدت: ۱/۵، ۲ و ۳؛ مدت: ۱، ۷ و ۱۴ روز	زمان=۱۵۰
A5	سیاست × شدت × مدت × زمان	سیاست: ۳؛ شدت: ۱/۵ و ۳؛ مدت: ۱ و ۱۴؛ زمان: ۶۰ و ۲۴۰	شرایط عملیاتی مرجع
A6	سیاست × شدت × ظرفیت	شدت: ۲ و ۳؛ ضریب ظرفیت: ۱ و ۰/۷	مدت=۷؛ زمان=۱۵۰
A7	سیاست × مدت × تغییرپذیری زمان تأمین	مدت: ۷ و ۱۴؛ ضریب تغییرات زمان تأمین:۰/۲۵ و ۰/۵۰	شدت=۲؛ زمان=۱۵۰
A8	سیاست × زمان × موجودی اولیه	زمان: ۶۰ و ۲۴۰؛ ضریب موجودی اولیه: ۱ و ۰/۶	شدت=۲؛ مدت=۷

برخی ترکیب‌های آزمایشی در چند طرح مشترک بودند. برای جلوگیری از اجرای تکراری، هر ترکیب یکتا فقط یک‌بار اجرا و با شناسه طرح‌های مرتبط علامت‌گذاری شد. پس از حذف سلول‌های مشترک، ۸۴ سلول آزمایشی یکتا ایجاد شد. هر سلول با ۳۰ تکرار مستقل اجرا گردید؛ در نتیجه، در مجموع ۲۵۲۰ اجرای شبیه‌سازی شامل ۹۰ اجرای پایه و ۲۴۳۰ اجرای شوک‌دار انجام شد.

آزمایش پارامتری در نرم‌افزار انی لاجیک با حالت بذر تصادفی انجام شد و شماره تکرار و شناسه عددی هر اجرا برای ردیابی خروجی‌ها ثبت گردید. از روش اعداد تصادفی مشترک[1] برای تطبیق مسیرهای تصادفی میان سیاست‌ها استفاده نشد. بنابراین، مقایسه سیاست‌ها بر مبنای توزیع نتایج حاصل از ۳۰ تکرار مستقل در هر سلول انجام گرفت.

۳-۶- پارامترهای ورودی و تنظیمات اجرا

پارامترهای مدل در چهار گروه اصلی تقاضا، سیاست موجودی، تأمین و حمل‌ونقل سازمان‌دهی شدند. جزئیات مقادیر عددی پارامترهای هزینه، حمل‌ونقل، ضایعات، انتشار کربن و پارامترهای اطلاعاتی و اجرایی سیاست‌ها در **جدول ج-۱** پیوست ارائه شده است. افق هر اجرای شبیه‌سازی ۳۶۵ روز بود. این افق امکان اجرای شوک دیرهنگام در روز ۲۴۰، شوک‌های حداکثر ۱۴روزه و مشاهده رفتار سیستم تا ۹۰ روز پس از پایان شوک را فراهم کرد.خروجی خلاصه برای همه اجراها و خروجی روزانه برای اجراهای شوک‌دار ذخیره شد.خروجی خلاصه شامل شاخص‌های عملکرد بود و داده‌های روزانه از ۳۰ روز پیش از آغاز شوک تا ۹۰ روز پس از پایان آن ثبت شدند و نرخ پرشدگی[2] روزانه و وضعیت فعال‌بودن شوک را دربر گرفتند.

۳-۷- شاخص‌های خروجی و تعریف عملیاتی تاب‌آوری

نرخ پرشدگی روزانه به‌عنوان شاخص پایه عملکرد سیستم انتخاب شد و از نسبت تقاضای تأمین‌شده به کل تقاضا به دست آمد:

$$FR_{r,t} = \frac{\text{تقاضای تأمین‌شده}_{r,t}}{\text{کل تقاضا}_{r,t}} \quad (۵)$$

این شاخص در بازه صفر تا یک قرار دارد و مقدار بزرگ‌تر آن نشان‌دهنده توان بیشتر سیستم در پاسخ‌گویی همان‌روز به تقاضای ایجادشده است.

برای کنترل تفاوت‌های تصادفی میان تکرارها، عملکرد هر اجرا نسبت به سطح پایه همان اجرا نرمال‌سازی[3] شد. سطح پایه اجرای r برابر با میانگین نرخ پرشدگی در ۳۰ روز پیش از آغاز شوک بود:

$$B_r = \frac{1}{30}\sum_{t=s-30}^{s-1} FR_{r,t} \quad (۶)$$

استفاده از سطح پایه اختصاصی هر اجرا باعث می‌شود افت و بازیابی نسبت به وضعیت عادی همان تکرار سنجیده شود و تفاوت‌های تصادفی اولیه میان اجراها مستقیماً به شاخص‌های تاب‌آوری منتقل نشوند.

عملکرد نرمال‌شده هر روز از رابطه زیر محاسبه شد:

$$P_{r,t} = \frac{FR_{r,t}}{B_r} \quad (۷)$$

مقدار یک نشان‌دهنده عملکرد برابر با سطح پایه، مقدار کمتر از یک بیانگر افت عملکرد و مقدار بیشتر از یک نشان‌دهنده عملکرد بالاتر از سطح پایه همان اجرا است. افت عملکرد برابر با بیشترین فاصله عملکرد نرمال‌شده از سطح پایه، از آغاز شوک تا پایان پنجره مشاهده، تعریف شد:

$$\text{Performance Drop}_r = \max\left\{0,\ 1-\min_t (P_{r,t})\right\} \quad (۸)$$

بنابراین، این شاخص بیشترین عمق کاهش عملکرد سیستم را در پنجره مشاهده نشان می‌دهد و مقدار بزرگ‌تر آن بیانگر آسیب شدیدتر ناشی از شوک است (Habibi et al., 2023).

زیان تاب‌آوری به‌صورت مجموع روزانه کسری مثبت عملکرد از سطح پایه، از آغاز شوک تا ۹۰ روز پس از پایان آن، محاسبه شد:

$$\text{Resilience Loss}_r = \sum_t \max\{0,\ 1-P_{r,t}\} \quad (۹)$$

[1] Common Random Numbers
[2] Fill Rate
[3] Normalization

این شاخص به‌طور هم‌زمان عمق افت و مدت باقی‌ماندن سیستم زیر سطح پایه را منعکس می‌کند (Macdonald et al., 2018).

بازیابی پایدار زمانی محقق تلقی شد که عملکرد نرمال‌شده حداقل به ۰/۹۵ برسد و برای هفت روز متوالی در همین سطح یا بالاتر باقی بماند. آستانه ۹۵ درصد با هدف بازنمایی بازگشت عملکرد به سطحی نزدیک به وضعیت پایه انتخاب شد. شرط تداوم هفت‌روزه نیز علاوه بر جلوگیری از ثبت عبورهای موقت ناشی از نوسانات روزانه به‌عنوان بازیابی، معادل یک چرخه کامل بازبینی موجودی در مدل است. متغیر بازیابی در سطح هر اجرا دودویی بود.

زمان بازیابی فاصله میان پایان شوک و نخستین روز آغاز دوره هفت‌روزه بازیابی پایدار تعریف شد (Tucker & Daskin, 2022؛ Habibi et al., 2023). اجراهایی که تا پایان پنجره ۹۰روزه معیار بازیابی را برآورده نکردند، بازیابی‌نشده ثبت و در تحلیل بقا[1] به‌صورت داده‌های راست‌سانسورشده منظور شدند. پنجره ۹۰روزه با هدف فراهم‌کردن فرصت کافی برای مشاهده پیامدهای پساشوک و ثبت بازیابی‌های با تأخیر، در چارچوب افق زمانی شبیه‌سازی، در نظر گرفته شد.

احتمال بازیابی در سطح هر سلول از تقسیم تعداد اجراهای بازیابی‌شده بر ۳۰ تکرار همان سلول محاسبه شد. این شاخص احتمال دستیابی سیستم به معیار بازیابی پایدار در پنجره مشاهده را نشان می‌دهد و از سرعت بازیابی متمایز است. استفاده هم‌زمان از این شاخص‌ها امکان تفکیک ابعاد مختلف پاسخ سیستم شامل عمق افت، اثر تجمعی اختلال، امکان بازیابی و سرعت بازیابی را فراهم می‌کند؛ ابعادی که الزاماً رفتار یکسانی ندارند (Habibi et al., 2023). منطق این شاخص‌ها در **شکل ۴** ارائه شده است. **شکل ۴**، سطح پایه، آستانه ۹۵ درصدی، عمق افت، ناحیه زیان تجمعی، زمان بازیابی و دوره هفت‌روزه پایداری را نشان می‌دهد.

علاوه بر شاخص‌های تاب‌آوری، نرخ پرشدگی، هزینه کل، ضایعات، سفارش معوق و انتشار کربن نیز برای ارزیابی پیامدهای عملیاتی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیاست‌ها بررسی شدند.

[1] Survival Analysis

هزینه کل از رابطه زیر به دست آمد:

$$C_{Total} = C_{Net} + C_{BO} + C_{LS} \quad (۱۰)$$

که در آن C_{Net} هزینه خالص عملیاتی تجمعی، C_{BO} هزینه سفارش‌های معوق و C_{LS} هزینه فروش ازدست‌رفته است. هزینه خالص عملیاتی، هزینه‌های نگهداری موجودی، حمل‌ونقل و ضایعات را همراه با تعدیلات هزینه‌ای مرتبط با اجرای قواعد هر سیاست در بر می‌گیرد. ضایعات دارویی به دو جزء ضایعات ناشی از انقضا و ضایعات مرتبط با نقض شرایط دمایی تقسیم شد و مقدار تجمعی آن از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$W_{Total} = W_{Expiry} + W_{Temp} \quad (۱۱)$$

که در آن W_{Expiry} مجموع واحدهای منقضی‌شده و W_{Temp} مجموع واحدهای خارج‌شده از جریان قابل‌استفاده به دلیل نقض شرایط دمایی است.

موجودی داروخانه‌ها به‌صورت دسته‌ای نگهداری شد و برداشت از موجودی بر اساس منطق FEFO انجام گرفت؛ به این معنا که دسته دارای کمترین عمر مفید باقی‌مانده در اولویت مصرف قرار داشت. برای هر محموله سالم j، عمر مفید باقی‌مانده در زمان ورود به داروخانه با توجه به عمر مفید اولیه محصول و زمان حمل تحقق‌یافته از رابطه زیر تعیین شد:

$$L_j = \max(0, L_0 - \text{round}(LT_j)) \quad (۱۲)$$

که در آن L_j عمر مفید اولیه محصول و LT_j زمان حمل تحقق‌یافته محموله برحسب روز است. پس از ورود محموله، عمر باقی‌مانده هر دسته در پایان هر روز یک واحد کاهش یافت. چنانچه عمر باقی‌مانده یک دسته به صفر می‌رسید، تمام مقدار باقی‌مانده آن دسته از موجودی قابل‌استفاده حذف و به‌عنوان ضایعات انقضا ثبت می‌شد. بنابراین:

$$W_{Expiry} = \sum_{p=1}^{p} \sum_{t} E_{p,t} \quad (۱۳)$$

که $E_{p,t}$ تعداد واحدهای منقضی‌شده در داروخانه p در روز t است.

ضایعات دمایی در سطح محموله محاسبه شد. برای هر محموله، وقوع نقض شرایط زنجیره سرد به‌صورت یک رخداد تصادفی دودویی با احتمال ۰/۰۱ در نظر گرفته شد. در صورت وقوع این رخداد، محموله خارج از شرایط

مجاز دمایی ۲ تا ۸ درجه سانتی‌گراد تلقی شده و کل مقدار آن وارد موجودی قابل‌استفاده نمی‌شد و به‌عنوان ضایعات دمایی ثبت می‌گردید. بنابراین، ضایعات دمایی تجمعی از مجموع مقدار محموله‌هایی به دست آمد که در طول شبیه‌سازی دچار نقض شرایط دمایی شده بودند.

$$W_{Temp} = \sum_{j} Q_j \; I(v_j = 1) \qquad (۱۴)$$

که در آن Q_j مقدار محموله j ، v_j شاخص وقوع نقض شرایط دمایی برای محموله j و I(0) تابع نشانگر است؛ به‌گونه‌ای که در صورت وقوع نقض دما مقدار آن برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.

معیار وقوع و محاسبه ضایعات دمایی در هر سه سیاست کنترل موجودی یکسان در نظر گرفته شد؛ بنابراین، احتمال نقض شرایط دمایی، شرایط پذیرش یا حذف محموله و نحوه تجمیع W_{Temp} برای هر سه سیاست به‌صورت مشابه اعمال می‌شود. وجود پایش خودکار در سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی، ویژگی سازوکار اطلاعاتی و کنترلی این سیاست است و تغییری در تعریف یا معیار محاسبه ضایعات دمایی ایجاد نمی‌کند. انتشار کربن حمل‌ونقل بر مبنای فعالیت حمل و رویکرد تن کیلومتر محاسبه شد. برای محموله j با مقدار Q_j، تعداد سفرهای موردنیاز با توجه به ظرفیت حداکثر ۱۵۰ واحد دارو در هر سفر، با گردکردن رو به بالای نسبت مقدار محموله به ظرفیت هر سفر، از رابطه زیر به دست آمد:

$$N_j = \left\lceil \frac{Q_j}{150} \right\rceil \qquad (۱۵)$$

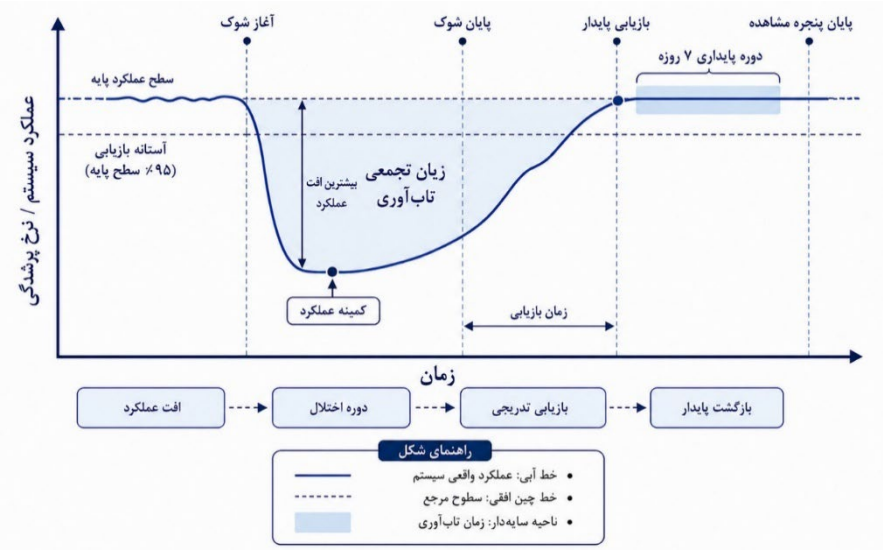
که در آن N_j تعداد سفرهای موردنیاز برای حمل محموله j است. سپس، مسافت تجمعی وسیله نقلیه مرتبط با این محموله، با فرض متوسط مسافت ۲۲۰ کیلومتر برای هر سفر، از رابطه زیر محاسبه شد:

$$D_j = N_j \times 220 \qquad (۱۶)$$

مقدار D_j برای محاسبه فعالیت و هزینه حمل‌ونقل مورد استفاده قرار گرفت. بااین‌حال، در محاسبه انتشار مبتنی بر تن‌کیلومتر، جرم کل محموله در فاصله واقعی حمل آن ضرب شد. در صورتی که مقدار محموله از ظرفیت یک سفر بیشتر باشد، محموله میان چند سفر تقسیم می‌شود، اما مجموع مقدار حمل‌شده در این سفرها همچنان برابر با Q_j است؛ با فرض جرم ۰/۲ کیلوگرم برای هر واحد دارویی، انتشار کربن هر محموله از رابطه زیر محاسبه شد:

$$CO_{2j} = \left(\frac{0.2\, Q_j}{1000}\right) \times 220 \times EF \qquad (۱۷)$$

در اینجا، Q_j مقدار محموله، ۲۲۰ فاصله حمل برحسب کیلومتر و EF ضریب انتشار حمل‌ونقل است.مقدار ضریب انتشار برابر با ۰/۱ کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن به‌ازای هر تن‌کیلومتر در نظر گرفته شد. انتشار تجمعی کربن نیز از مجموع انتشار تمام محموله‌های ثبت‌شده در دوره ارزیابی به دست آمد. با توجه به ثابت‌بودن جرم واحد محصول و ضریب انتشار در تمام سناریوها، این شاخص با هدف مقایسه نسبی پیامدهای زیست‌محیطی سیاست‌ها در چارچوب مدل استفاده شد. تعریف شاخص‌ها در **جدول ۵** ارائه شده است.



شکل ۴. نمایش شماتیک شاخص های افت عملکرد، زیان تاب آوری و بازیابی پایدار.

Figure 4. Schematic representation of the performance drop, resilience loss, and stable recovery indicators.

جدول ۵. شاخص‌های خروجی و ارزیابی مدل

Table 5. Model output and evaluation indicators

گروه	شاخص	مفهوم و تعریف عملیاتی
تاب‌آوری	افت عملکرد	بیشترین کاهش عملکرد نرمال‌شده نسبت به سطح پایه پس از شروع شوک
تاب‌آوری	زمان بازیابی	فاصله پایان شوک تا نخستین روز آغاز بازیابی پایدار
تاب‌آوری	وضعیت بازیابی	دستیابی یا عدم دستیابی به معیار بازگشت به حداقل ۹۵ درصد سطح پایه برای هفت روز متوالی
تاب‌آوری	احتمال بازیابی	نسبت اجراهای بازیابی‌شده به ۳۰ تکرار هر سلول آزمایشی
تاب‌آوری	زیان تاب‌آوری	مجموع روزانه کسری عملکرد نرمال‌شده نسبت به سطح پایه در پنجره مشاهده
عملیاتی	نرخ پرشدگی	نسبت تقاضای تأمین‌شده به کل تقاضا
اقتصادی	هزینه کل	مجموع هزینه خالص عملیاتی، هزینه سفارش معوق و هزینه فروش ازدست‌رفته
عملیاتی	ضایعات کل	مجموع واحدهای منقضی‌شده و واحدهای خارج‌شده از جریان قابل‌استفاده به دلیل نقض شرایط دمایی
عملیاتی	سفارش معوق	مجموع تقاضای تأمین‌نشده‌ای که برای تأمین در دوره‌های بعد ثبت شده است
زیست‌محیطی	انتشار کربن	انتشار تجمعی حمل‌ونقل بر اساس جرم کل محموله‌ها، فاصله حمل هر محموله و ضریب انتشار تن‌کیلومتر

۳-۸- روش تحلیل آماری

تحلیل‌های آماری در سطح اجرای مستقل شبیه‌سازی و با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شدند. شرایط پایه در مدل‌های بررسی اثر شدت، مدت و زمان وقوع شوک وارد نشدند و فقط برای توصیف و کنترل عملکرد عادی سیاست‌ها به کار رفتند.

برای متغیرهای پیوسته شامل افت عملکرد، زیان تاب‌آوری، نرخ پرشدگی، هزینه کل، ضایعات، سفارش معوق و انتشار کربن، تحلیل واریانس عاملی نوع سوم[1] متناسب با ساختار هر طرح اجرا شد. عوامل طبقه‌ای با کنتراست مجموع[2] کدگذاری شدند تا اثرهای اصلی و متقابل در حضور تعامل‌ها قابل تفسیر باشند.

توزیع باقیمانده‌ها و همگنی واریانس‌ها با روش‌های تشخیصی بررسی شدند. ازآنجاکه برخی متغیرها ناهمگنی واریانس نشان دادند، استنباط اصلی درباره معناداری اثرها بر اساس برآورد مقاوم HC3[3] انجام شد. اهمیت عملی اثرها نیز با مجذور اتای جزئی[4] (η_p^2) و فاصله‌های اطمینان ۹۵ درصد گزارش شد.

در صورت معناداری اثرها یا تعامل‌های مرتبط، مقایسه زوجی سیاست‌ها در سطوح مشخص عوامل با آزمون ولش[5] انجام و مقادیر احتمال با روش هولم[6] تعدیل شدند. دامنه هر خانواده مقایسه‌ها بر اساس سیاست‌ها در سطوح همان عامل یا تعامل تعریف شد.

متغیر وضعیت بازیابی در سطح اجرا دودویی بود؛ بنابراین، احتمال بازیابی با رگرسیون لجستیک[7] عاملی تحلیل شد. سیاست، عوامل مربوط به هر طرح و تعامل‌های آن‌ها در مدل وارد شدند و نتایج با آزمون کلی اثرها و، در صورت نیاز، نسبت شانس و فاصله اطمینان گزارش شدند.

زمان بازیابی با مدل خطرات متناسب کاکس[8] تحلیل شد؛ زیرا بخشی از اجراها تا پایان پنجره مشاهده بازیابی نشده بودند. زمان سپری‌شده از پایان شوک تا بازیابی یا پایان مشاهده به‌عنوان متغیر زمان و وضعیت بازیابی به‌عنوان متغیر رویداد در نظر گرفته شد. اجراهای بازیابی‌نشده به‌صورت راست‌سانسورشده وارد مدل شدند. منحنی‌های کاپلان-مایر[9] و میانه زمان بازیابی نیز برای توصیف مسیر بازگشت گزارش شدند.

برای مقایسه زوجی احتمال بازیابی از آزمون دقیق فیشر و برای مقایسه توزیع زمان بازیابی از آزمون لگ‌رنک استفاده شد. مقادیر احتمال این مقایسه‌ها نیز با روش هولم تعدیل شدند.

[1] Type III Factorial Analysis of Variance (ANOVA)
[2] Sum Contrasts
[3] HC3 Heteroscedasticity-Consistent Robust Standard Errors
[4] Partial Eta Squared
[5] Welch's Test
[6] Holm Adjustment
[7] Logistic Regression
[8] Cox Proportional Hazards Model
[9] Kaplan–Meier Curves

سطح معناداری برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. بااین‌حال، نتیجه‌گیری تنها بر مقدار احتمال متکی نبود و اندازه اثر، فاصله اطمینان، جهت تغییر میانگین‌ها و الگوی نمودارهای تعاملی نیز در تفسیر نتایج لحاظ شدند. تعامل‌های معنادار پیش از تفسیر اثرهای اصلی بررسی شدند.

خلاصه جامع نتایج استنباطی طرح‌های A1 تا A7 برای چهار شاخص اصلی تاب‌آوری در **جدول ج-۱** پیوست ارائه شده است.

۳-۹- راستی‌آزمایی و اعتبارسنجی مدل

به‌منظور بررسی صحت پیاده‌سازی مدل، ساختار اجرای آزمایش، زمان‌بندی شوک و محاسبه شاخص‌های خروجی کنترل شد. طراحی نهایی شامل ۸۴ سلول آزمایشی با ۳۰ تکرار مستقل برای هر سلول بود که در مجموع ۲۵۲۰ اجرای شبیه‌سازی شامل ۹۰ اجرای پایه و ۲۴۳۰ اجرای شوک‌دار را تشکیل داد. بررسی داده‌های خروجی نشان داد تعداد تکرارها در تمام سلول‌های آزمایشی کامل بوده است. همچنین، در تمام اجراهای شوک‌دار، تعداد روزهای فعال‌بودن شوک با مدت تعیین‌شده در طراحی آزمایش مطابقت داشت و داده‌های موردنیاز از ۳۰ روز پیش از شروع شوک تا ۹۰ روز پس از پایان آن ثبت شده بود.

برای کنترل مستقل محاسبات، شاخص‌های تاب‌آوری شامل سطح عملکرد پایه، افت عملکرد، زیان تاب‌آوری، وضعیت بازیابی و زمان بازیابی مجدداً از مسیر روزانه نرخ پرشدگی برای تمامی ۲۴۳۰ اجرای شوک‌دار محاسبه شدند. مقایسه مقادیر بازمحاسبه‌شده با داده‌های نهایی مورد استفاده در تحلیل آماری، تطابق کامل آنها را نشان داد و مغایرتی در تبدیل داده‌های روزانه به شاخص‌های تاب‌آوری مشاهده نشد. تعاریف این شاخص‌ها نیز مطابق روابط ارائه‌شده در **بخش ۳-۷** و جدول شاخص‌های خروجی مدل در نظر گرفته شد.

جدول۶. نتایج آزمون‌های رفتاری مدل

Table 6. Results of behavioral tests of the model

آزمون رفتاری	تغییر اعمال‌شده	افت عملکرد	زیان تاب‌آوری	احتمال بازیابی پایدار(٪)
افزایش شدت شوک	۱/۵ ← ۳ برابر تقاضای پایه	۰/۹۲۰ ← ۰/۷۷۲	۱۸/۱۴ ← ۱۲/۸۶	۸۵/۶ ← ۸۵/۶
افزایش مدت شوک	۱ ← ۱۴ روز	۰/۸۹۱ ← ۰/۷۶۱	۱۸/۳۹ ← ۱۱/۷۳	۸۵/۶ ← ۷۷/۸
کاهش ظرفیت تأمین در شدت ۳	ضریب ظرفیت ۱ ← ۰/۷	۰/۹۴۰ ← ۰/۹۲۰	۲۳/۰۵ ← ۱۸/۱۴	۸۵/۶ ← ۶۳/۳

از آنجا که مدل با داده‌های یک زنجیره تأمین دارویی مشخص کالیبره نشده است، اعتبارسنجی در این پژوهش بر سازگاری رفتاری مدل در برابر تغییرات کنترل‌شده عوامل اصلی متمرکز شد. برای این منظور، پاسخ مدل در برابر افزایش شدت و مدت شوک و کاهش ظرفیت تأمین بررسی شد. نتایج این کنترل‌ها در **جدول ۶** ارائه شده است. مقادیر جدول، میانگین تجمیعی سه سیاست در طرح آزمایشی متناظر هستند. همان‌گونه که **جدول ۶** نشان می‌دهد، افزایش شدت و مدت شوک موجب افزایش افت عملکرد و زیان تاب‌آوری شد و کاهش ظرفیت تأمین نیز با افزایش زیان و کاهش احتمال بازیابی پایدار همراه بود. جهت این تغییرات با منطق مورد انتظار مدل، مبنی بر تشدید فشار بر موجودی و فرایند تأمین در شرایط شوک شدیدتر، طولانی‌تر و ظرفیت محدودتر، سازگار است. در مجموع، تطابق زمان‌بندی شوک، بازمحاسبه مستقل شاخص‌ها و پاسخ جهت‌دار مدل به تغییر عوامل اصلی، شواهد لازم برای صحت محاسباتی و سازگاری رفتاری مدل در محدوده سناریوهای مورد بررسی را فراهم کرد.

۳-۱۰- تحلیل حساسیت معیار بازیابی

به‌منظور بررسی میزان وابستگی نتایج به تعریف عملیاتی بازیابی پایدار، تحلیل حساسیت با تغییر آستانه عملکرد، تعداد روزهای پایداری و طول پنجره مشاهده انجام شد. برای این منظور، وضعیت بازیابی تمامی اجراهای شوک‌دار با استفاده از مسیر روزانه نرخ پرشدگی و تحت چند تعریف جایگزین مجدداً محاسبه شد. تعریف اصلی پژوهش شامل بازگشت عملکرد به حداقل ۹۵ درصد سطح پایه برای هفت روز متوالی در پنجره ۹۰روزه پس از پایان شوک بود. نتایج تحلیل حساسیت در **جدول ۷** ارائه شده است.

جدول ۷. تحلیل حساسیت تعریف بازیابی پایدار

Table 7. Sensitivity analysis of the definition of stable recovery

آستانه عملکرد	دوره پایداری	پنجره مشاهده پس از شوک	اجراهای بازیابی‌شده (٪)	توافق با تعریف اصلی
۹۰٪ سطح پایه	۷ روز	۹۰ روز	۹۰/۵	۹۱/۷
۹۵٪ سطح پایه	۷ روز	۹۰ روز	۸۲/۲	۱۰۰
۹۸٪ سطح پایه	۷ روز	۹۰ روز	۷۵/۳	۹۳/۱
۹۵٪ سطح پایه	۵ روز	۹۰ روز	۹۶/۸	۸۵/۴
۹۵٪ سطح پایه	۷ روز	۶۰ روز	۶۹/۴	۸۷/۲

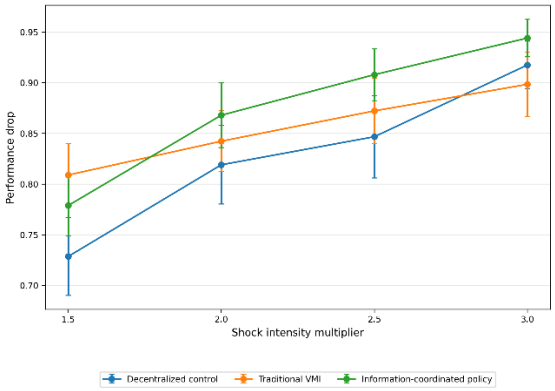
نتایج نشان می‌دهد که سخت‌گیرانه‌ترشدن معیار بازیابی، مطابق انتظار، درصد اجراهای بازیابی‌شده را کاهش می‌دهد. بااین‌حال، تغییر آستانه عملکرد از ۹۵ درصد به ۹۰ یا ۹۸ درصد، به‌ترتیب در ۹۱/۷ و ۹۳/۱ درصد اجراها طبقه‌بندی بازیابی را بدون تغییر نگه داشت. تغییر طول دوره پایداری و پنجره مشاهده تأثیر بیشتری بر مقدار مطلق احتمال بازیابی داشت. بنابراین، احتمال بازیابی تا حدی به تعریف عملیاتی آن وابسته است و باید در چارچوب آستانه و پنجره زمانی انتخاب‌شده تفسیر شود. در مقابل، شاخص‌های افت عملکرد و زیان تاب‌آوری مستقل از این معیار بازیابی محاسبه شده‌اند و تحت تأثیر این تغییرات قرار نمی‌گیرند.

۴- نتایج

۴-۱- اثر شدت شوک

در تحلیل سیاست × شدت، شدت شوک بر افت عملکرد اثر معنادار و بزرگی داشت ($\eta_p^2 = 0.295$، $p < 0.001$، $F = 48.63$). اثر سیاست نیز معنادار بود ($\eta_p^2 = 0.050$، $p < 0.001$، $F = 9.23$). تعامل سیاست و شدت از نظر آماری معنادار، اما دارای اندازه اثر کوچک بود ($\eta_p^2 = 0.035$، $p = 0.044$، $F = 2.10$)؛ بنابراین، الگوی تغییر افت عملکرد در سطوح شدت برای سه سیاست کاملاً یکسان نبود، هرچند بخش عمده تغییرات به شدت شوک مربوط بود.

شکل ۵ این رابطه را نشان می‌دهد. محور افقی ضریب شدت شوک تقاضا، از ۱/۵ تا ۳ برابر تقاضای پایه، و محور عمودی میانگین افت عملکرد نرمال‌شده است؛ در این محور، مقدار بزرگ‌تر به معنای افت شدیدتر است. حرکت رو به بالای هر سه خط نشان می‌دهد که افزایش شدت، افت عملکرد را در همه سیاست‌ها تشدید می‌کند. با افزایش شدت از ۱/۵ به ۳، میانگین افت عملکرد در سیاست غیرمتمرکز از ۰/۷۲۹ به ۰/۹۱۷، در مدیریت موجودی توسط فروشنده از ۰/۸۰۹ به ۰/۸۹۸ و در سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی از ۰/۷۷۹ به ۰/۹۴۴ افزایش یافت. تقاطع و جابه‌جایی نسبی خطوط نیز نشان می‌دهد هیچ سیاستی در همه سطوح شدت کمترین افت را ندارد؛ در شدت ۱/۵ سیاست غیرمتمرکز و در شدت ۳ مدیریت موجودی توسط فروشنده کمترین میانگین افت را نشان دادند.



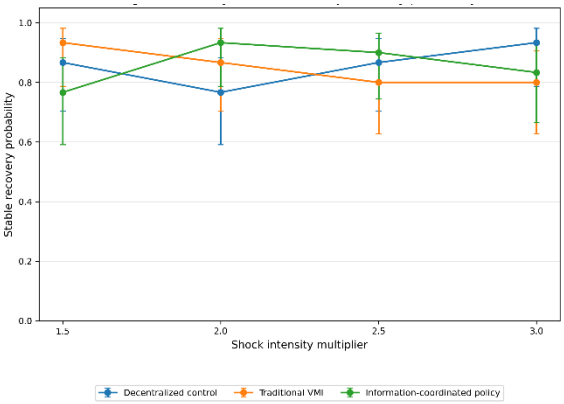
شکل ۵. اثر سیاست و شدت بر افت عملکرد.

Figure 5. Effects of policy and shock intensity on performance drop.

شدت شوک بر زیان تاب‌آوری نیز اثر معنادار و بزرگی داشت ($F = 31.65, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.214$)، اما اثر سیاست و تعامل سیاست × شدت برای این پیامد معنادار نبودند. با افزایش شدت از ۱/۵ به ۳، زیان تاب‌آوری در سیاست غیرمتمرکز از ۱۲/۵۳ به ۱۷/۶۰، در مدیریت موجودی توسط فروشنده از ۱۲/۹۲ به ۱۸/۵۴ و در سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی از ۱۳/۱۳ به ۱۸/۲۷ افزایش یافت. بنابراین، افزایش شدت در هر سه سیاست با زیان تجمعی بیشتر همراه بود، اما تفاوت شیب میان سیاست‌ها از نظر آماری پایدار نبود. **شکل ۶** احتمال بازیابی پایدار را برحسب شدت نشان می‌دهد. محور افقی

ضریب شدت و محور عمودی احتمال بازیابی پایدار در بازه صفر تا یک است.در مدل لجستیک، شواهد کافی برای اثر سیاست، شدت یا تعامل آن‌ها بر احتمال بازیابی مشاهده نشد. در مدل کاکس نیز اثر معناداری برای این عوامل بر زمان بازیابی به دست نیامد. در نتیجه، شدت در این طرح بیش از وقوع نهایی بازیابی، عمق افت و زیان تجمعی را تحت تأثیر قرار داد.

در پیامدهای ثانویه، شدت شوک نرخ پرشدگی را کاهش و هزینه کل، سفارش معوق و انتشار کربن را افزایش داد. اندازه اثر شدت بر این شاخص‌ها به‌ترتیب ۰/۲۵۷، ۰/۲۴۹، ۰/۲۹۰ و ۰/۲۸۱ بود. تعامل سیاست و شدت برای این پیامدها معنادار نبود.



شکل ۶. احتمال بازیابی پایدار برحسب سیاست و شدت.

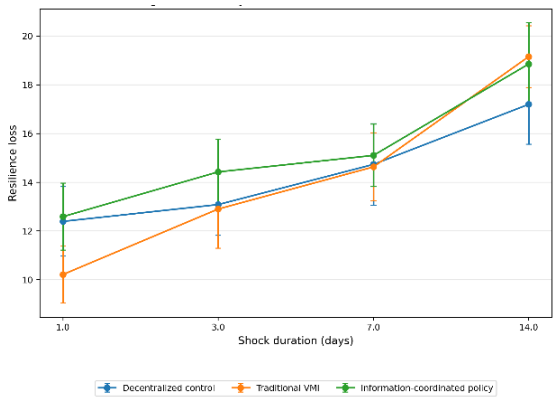
Figure 6. Probability of stable recovery by policy and shock intensity.

۴-۲- اثر مدت شوک

مدت شوک بر افت عملکرد اثر معنادار و بزرگی داشت ($\eta_p^2 = 0.259$ ،$p < 0.001$ ،$F = 40.44$). اثر سیاست نیز معنادار، اما دارای اندازه اثر کوچک بود ($\eta_p^2 = 0.033$ ،$p = 0.003$ ،$F = 5.89$). تعامل سیاست و مدت معنادار نبود؛ بنابراین، در محدوده سطوح آزموده‌شده، افزایش مدت در سه سیاست الگوی نسبتاً مشابهی از تشدید افت ایجاد کرد.

شکل ۷ اثر مدت بر زیان تاب‌آوری را نمایش می‌دهد. محور افقی مدت شوک برحسب روز و محور عمودی زیان تاب‌آوری است؛ مقدار بزرگ‌تر در محور عمودی به معنای افت عمیق‌تر یا باقی‌ماندن طولانی‌تر عملکرد زیر سطح پایه است. شیب صعودی خطوط نشان می‌دهد که افزایش مدت از یک به ۱۴ روز، زیان تجمعی هر سه سیاست را افزایش داده است. با افزایش مدت از یک به ۱۴ روز، افت عملکرد در سیاست غیرمتمرکز از ۰/۷۴۴ به ۰/۸۶۶، در مدیریت موجودی توسط فروشنده از ۰/۷۵۰ به ۰/۸۹۲ و در سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی از ۰/۷۸۸ به ۰/۹۱۴ افزایش یافت.

مدت شوک بر زیان تاب‌آوری نیز اثر معنادار و بزرگی داشت ($\eta_p^2 = 0.295$ ،$p < 0.001$ ،$F = 48.61$). زیان سیاست غیرمتمرکز از ۱۲/۳۹ در شوک یک‌روزه به ۱۷/۱۹ در شوک ۱۴روزه افزایش یافت. مقادیر متناظر برای مدیریت موجودی توسط فروشنده ۱۰/۲۱ و ۱۹/۱۵ و برای سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی ۱۲/۵۹ و ۱۸/۸۵ بود. اثر سیاست و تعامل سیاست × مدت برای این شاخص معنادار نبودند.



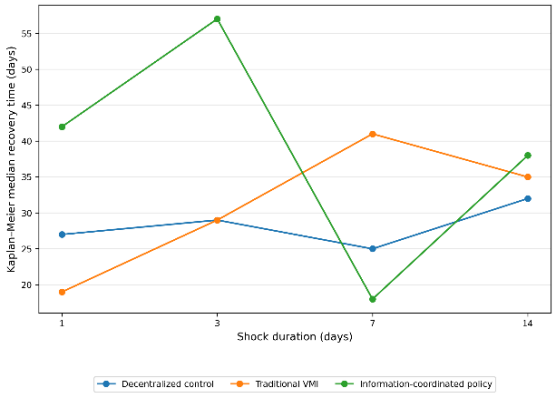
شکل ۷. اثر سیاست و مدت بر زیان تاب‌آوری.

Figure 7. Effects of policy and shock duration on resilience loss.

افزایش مدت علاوه بر تشدید افت، با افزایش سفارش‌های معوق همراه بود. اندازه اثر مدت بر سفارش معوق برابر با ۰/۲۶۹ بود؛ این الگو با انتقال تقاضای تأمین‌نشده به دوره پساشوک سازگار است.

شکل ۸ میانه زمان بازیابی برآوردشده با روش کاپلان-مایر را نشان می‌دهد. محور افقی مدت شوک و محور عمودی میانه زمان بازیابی پس از پایان شوک، برحسب روز، است. نوسان خطوط و نبود یک روند صعودی یا نزولی مشترک میان سه سیاست نشان می‌دهد که مدت شوک در طرح دوعاملی اثر یکنواختی بر سرعت بازیابی ایجاد نکرده است. این مشاهده با نتایج مدل‌های احتمال و زمان بازیابی سازگار است که در آن‌ها اثر مدت، سیاست و تعامل آن‌ها در سطح ۰/۰۵ معنادار نبود. بااین‌حال،

افزایش مدت به‌طور روشن افت، زیان تجمعی و سفارش‌های معوق را افزایش داد.



شکل ۸. میانه زمان بازیابی برآوردشده به روش کاپلان-مایر.

Figure 8. Estimated median recovery time using the Kaplan–Meier method.

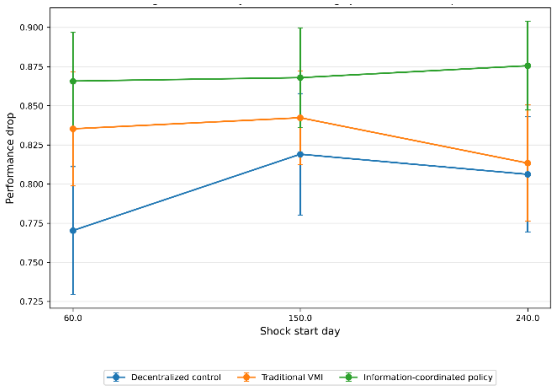
۴-۳- اثر زمان وقوع شوک

در تحلیل سیاست × زمان وقوع، شواهد کافی برای اثر مستقیم زمان وقوع بر افت عملکرد مشاهده نشد ($p = 0.391$ ،$\eta_p^2 = 0.007$). تعامل سیاست و زمان وقوع نیز معنادار نبود. در مقابل، اثر سیاست بر افت عملکرد معنادار و دارای اندازه اثر متوسط بود ($\eta_p^2 = 0.092$، $p < 0.001$ ،$F = 13.18$).

شکل ۹ اثر زمان وقوع را بر افت عملکرد نمایش می‌دهد. محور افقی روز آغاز شوک شامل روزهای ۶۰، ۱۵۰ و ۲۴۰ و محور عمودی افت عملکرد نرمال‌شده است. خطوط سه سیاست در طول محور افقی الگوی یکنواخت صعودی یا نزولی ندارند؛میانگین افت سیاست غیرمتمرکز در شوک‌های روزهای ۶۰، ۱۵۰ و ۲۴۰ به‌ترتیب ۰/۷۷۰، ۰/۸۱۹ و ۰/۸۰۶ بود. مقادیر متناظر برای مدیریت موجودی توسط فروشنده ۰/۸۳۵، ۰/۸۴۲ و ۰/۸۱۳ و برای سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی ۰/۸۶۶، ۰/۸۶۸ و ۰/۸۷۶ بود. این الگوی غیرمنظم نشان می‌دهد که در زمان‌های آزموده‌شده، زمان شروع شوک به‌تنهایی عامل پایدار تعیین‌کننده افت نبوده است.

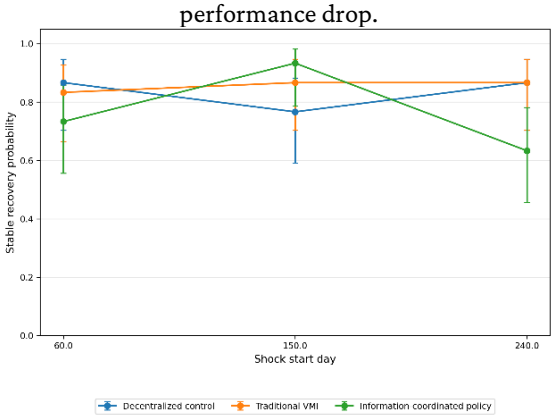
برای زیان تاب‌آوری نیز اثر زمان وقوع و تعامل آن با سیاست معنادار نبود. اثر سیاست معنادار، اما کوچک بود ($\eta_p^2 = 0.026$ ،$p = 0.032$ ،$F = 3.47$). در مدل‌های احتمال و زمان بازیابی نیز شواهد کافی برای اثر مستقیم زمان وقوع یا تعامل آن با سیاست مشاهده نشد.

شکل ۱۰ احتمال بازیابی پایدار را در سه زمان وقوع نشان می‌دهد. محور افقی روز آغاز شوک و محور عمودی احتمال بازیابی پایدار است. اگرچه برخی تفاوت‌های توصیفی، از جمله کاهش احتمال بازیابی سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی در روز ۲۴۰، مشاهده می‌شود، جهت تغییرات میان سیاست‌ها مشترک نیست و دامنه‌های عدم‌قطعیت نیز هم‌پوشانی دارند. بنابراین، این تفاوت‌ها به‌عنوان اثر قطعی زمان وقوع تفسیر نمی‌شوند. برای زیان تاب‌آوری، احتمال بازیابی و زمان بازیابی نیز اثر مستقیم زمان وقوع یا تعامل آن با سیاست معنادار نبود.



شکل ۹. اثر سیاست و زمان وقوع بر افت عملکرد.

Figure 9. Effects of policy and shock timing on performance drop.



شکل ۱۰. احتمال بازیابی پایدار برحسب سیاست و زمان وقوع.

Figure 10. Probability of stable recovery by policy and shock timing.

۴-۴- اثر مشترک شدت و مدت

در طرح سه‌عاملی سیاست × شدت × مدت، شدت بر افت عملکرد اثر معنادار و بزرگی داشت ($\eta_p^2 = 0.216$،

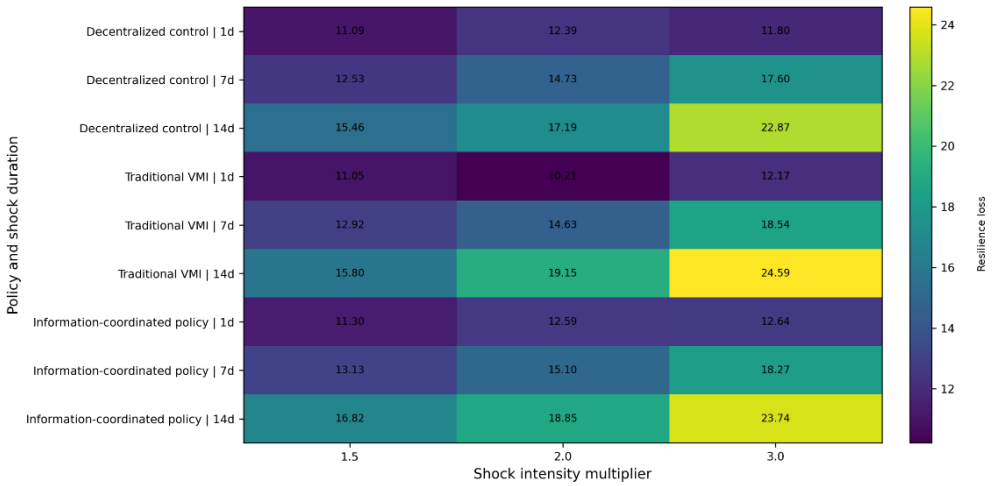
($F = 107.68$ ،$p < 0.001$). اثر مدت قوی‌تر بود ($F = 177.72$ ،$p < 0.001$ ،$\eta_p^2 = 0.312$). تعامل شدت و مدت نیز معنادار و دارای اندازه اثر متوسط بود ($F = 13.58$ ،$p < 0.001$ ،$\eta_p^2 = 0.065$). این تعامل نشان داد اثر مشترک شدت و مدت بر افت عملکرد در مقیاس تحلیل جمع‌پذیر نبود؛ به‌عبارت دیگر، پیامد افزایش شدت در شوک‌های کوتاه و طولانی یکسان نبود. این الگو با پاسخ غیرخطی سیستم در دامنه سناریوهای آزموده‌شده سازگار است.

اثر سیاست بر افت عملکرد معنادار، اما کوچک بود ($\eta_p^2 = 0.027$). تعامل‌های سیاست × شدت، سیاست × مدت و تعامل سه‌طرفه معنادار نبودند؛ بنابراین، الگوی تعامل شدت و مدت میان سیاست‌ها تفاوت آماری پایداری نشان نداد. برای زیان تاب‌آوری، مدت با اندازه اثر ۰/۴۱۷ عامل غالب بود؛ شدت با اندازه اثر ۰/۲۱۴ و تعامل شدت × مدت با اندازه اثر ۰/۰۸۹ در رتبه‌های بعد قرار گرفتند. اثر سیاست و تعامل سه‌طرفه معنادار نبودند.

شکل ۱۱ این نتیجه را به‌صورت نقشه حرارتی نشان می‌دهد. محور افقی ضریب شدت شوک و محور عمودی ترکیب سیاست موجودی و مدت شوک است؛ هر سیاست در ردیف‌های جداگانه برای مدت‌های ۱، ۷ و ۱۴ روز نمایش داده شده است. عدد و رنگ هر خانه میانگین زیان تاب‌آوری همان ترکیب را نشان می‌دهد و رنگ روشن‌تر بیانگر زیان بیشتر است. روشن‌ترشدن خانه‌ها هنگام حرکت از شدت‌های پایین به بالا و از مدت‌های کوتاه به طولانی نشان می‌دهد که هر دو عامل زیان را تشدید می‌کنند. بااین‌حال، میزان تغییر میان ستون‌ها در ردیف‌های مختلف یکسان نیست و همین تفاوت بصری، تعامل غیرجمع‌پذیر شدت و مدت را نشان می‌دهد. بیشترین زیان در ترکیب شدت ۳ و مدت ۱۴ روز مشاهده شد و برای مدیریت موجودی توسط فروشنده به ۲۴/۵۹ رسید. کمترین مقدار در ترکیب شدت ۲ و مدت یک روز برای همان سیاست و برابر با ۱۰/۲۱ بود؛ بنابراین، **شکل ۱۱** نشان می‌دهد طولانی‌شدن شوک، اثر افزایش شدت را تشدید می‌کند و فشار هم‌زمان شدید و طولانی بیشترین تخریب را ایجاد می‌کند. در مدل لجستیک، تعامل سه‌طرفه در سطح ۰/۰۵ معنادار نبود ($p = 0.053$). در مدل کاکس، شدت شوک بر زمان بازیابی اثر معنادار داشت ($p < 0.001$).

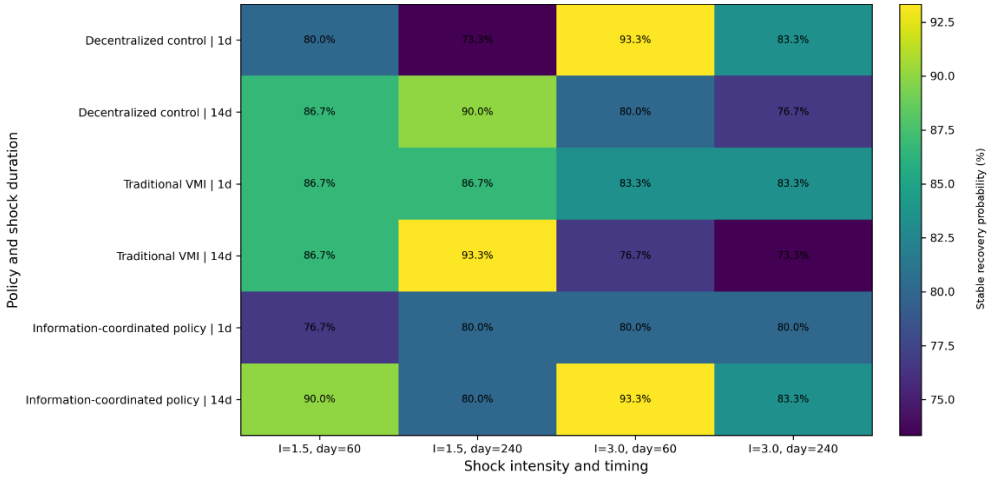
۴-۵- تحلیل چهارعاملی ویژگی‌های شوک

در طرح فشرده سیاست × شدت × مدت × زمان وقوع، مدت شوک بزرگ‌ترین اندازه اثر را بر افت عملکرد داشت ($F = 558.54$ ،$p < 0.001$ ،$\eta_p^2 = 0.445$). شدت و تعامل شدت × مدت نیز اثرهای بزرگ و هم‌اندازه داشتند ($\eta_p^2 = 0.185$). اثر زمان وقوع، اثر سیاست و تعامل‌های مربوط به سیاست بر افت عملکرد معنادار نبودند. تعامل چهارطرفه نیز معنادار نشد ($p = 0.474$ ،$\eta_p^2 = 0.002$) برای زیان تاب‌آوری، مدت با اندازه اثر ۰/۵۲۱ عامل غالب بود. شدت با اندازه اثر ۰/۲۹۸ و تعامل شدت × مدت با اندازه اثر ۰/۲۵۸ در رتبه‌های بعد قرار گرفتند. اثر سیاست معنادار، اما از نظر اندازه اثر ناچیز بود ($p = 0.040$ ،$\eta_p^2 = 0.009$). تعامل چهارطرفه معنادار نبود.



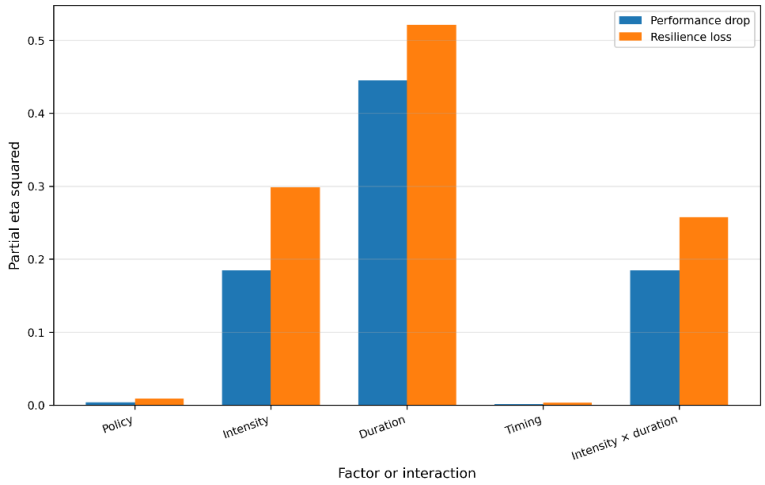
شکل ۱۱. زیان تاب‌آوری در طرح سیاست × شدت × مدت

Figure 11. Resilience loss in the policy × shock intensity × shock duration design.



شکل ۱۲. احتمال بازیابی پایدار در طرح چهارعاملی.

Figure 12. Probability of stable recovery in the four-way factorial design.



شکل ۱۳. مقایسه اندازه اثر عوامل اصلی و تعامل شدت × مدت.

Figure 13. Comparison of the effect sizes of the main factors and the shock intensity × shock duration interaction.

شکل ۱۲ احتمال بازیابی پایدار در طرح چهارعاملی را به‌صورت نقشه حرارتی نمایش می‌دهد. محور افقی ترکیب شدت و زمان وقوع شوک و محور عمودی ترکیب سیاست و مدت شوک است؛ عدد هر خانه درصد اجراهای بازیابی‌شده و رنگ روشن‌تر نشان‌دهنده احتمال بیشتر بازیابی است. پراکندگی خانه‌های روشن و تیره و نبود یک گرادیان منظم در امتداد یک سیاست یا زمان خاص نشان می‌دهد احتمال نهایی بازیابی از یک الگوی عمومی و ثابت پیروی نکرده است. این برداشت با مدل لجستیک سازگار است که در آن هیچ‌یک از اثرهای طرح چهارعاملی بر احتمال بازیابی در سطح ۰/۰۵ معنادار نبودند.

شکل ۱۳ مقایسه اندازه اثر عوامل را ارائه می‌کند. محور افقی شامل سیاست، شدت، مدت، زمان وقوع و تعامل شدت × مدت و محور عمودی مجذور اتای جزئی است؛ ستون‌های مربوط به افت عملکرد و زیان تاب‌آوری با دو الگوی متمایز نمایش داده شده‌اند. بلندترین ستون‌ها در هر دو پیامد به مدت شوک تعلق دارند، سپس شدت و تعامل شدت × مدت قرار می‌گیرند، درحالی‌که ستون‌های سیاست و زمان وقوع بسیار کوتاه‌اند. بنابراین، این شکل به‌طور مستقیم نشان می‌دهد ویژگی‌های شوک، به‌ویژه مدت، نسبت به نوع سیاست سهم بیشتری در تغییرات پیامدهای اصلی تاب‌آوری داشته‌اند. در مدل کاکس، شدت ($p = 0.025$)، تعامل سیاست × شدت ($p = 0.040$) و تعامل شدت × مدت ($p = 0.019$) بر زمان بازیابی معنادار بودند. این تفاوت میان نتایج لجستیک و کاکس نشان می‌دهد سناریوها می‌توانند از نظر سرعت بازگشت متفاوت باشند، حتی وقتی احتمال نهایی بازیابی تفاوت معناداری ندارد.

۴-۶- نقش شرایط عملیاتی

۴-۶-۱- ظرفیت تأمین

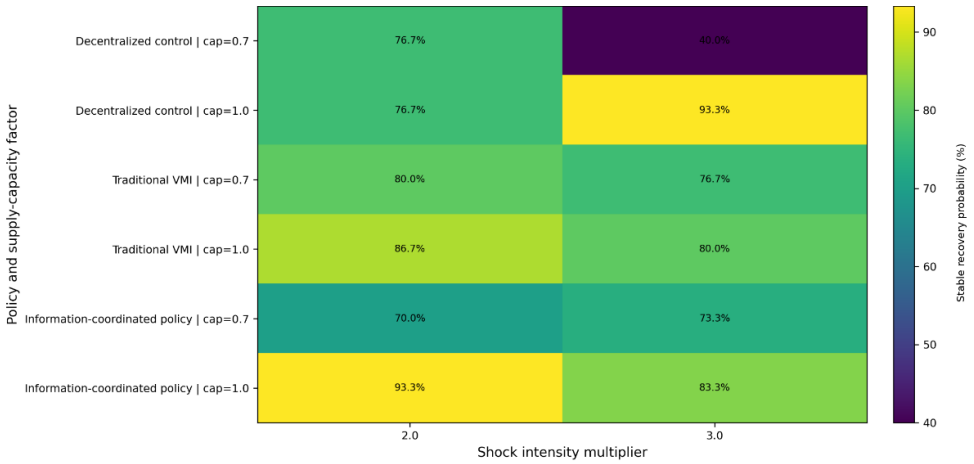
در تحلیل سیاست × شدت × ظرفیت، شدت بر افت عملکرد اثر بزرگ داشت ($\eta_p^2 = 0.244$، $p < 0.001$، $F = 112.56$). ظرفیت نیز اثر معنادار، اما کوچک داشت ($\eta_p^2 = 0.012$، $p = 0.041$، $F = 4.34$). برای زیان تاب‌آوری، شدت ($\eta_p^2 = 0.216$)، ظرفیت ($\eta_p^2 = 0.121$) و تعامل شدت × ظرفیت ($\eta_p^2 = 0.026$) معنادار بودند. تعامل نشان داد پیامد ظرفیت محدود در شدت بالاتر بیشتر بود.

شکل ۱۴ احتمال بازیابی را در سناریوهای شدت و ظرفیت نشان می‌دهد. محور افقی ضریب شدت شوک و محور عمودی ترکیب سیاست و ضریب ظرفیت تأمین ۰/۷ یا ۱ است؛ عدد و رنگ هر خانه احتمال بازیابی را برحسب درصد نمایش می‌دهد. در ترکیب شدت ۳ و ظرفیت محدود، زیان سیاست غیرمتمرکز به ۲۴/۶۷ رسید و احتمال بازیابی آن ۴۰ درصد بود. در همان شرایط، احتمال بازیابی مدیریت موجودی توسط فروشنده و سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی به‌ترتیب ۷۶/۷ و ۷۳/۳ درصد بود. تفاوت رنگ خانه‌ها نشان می‌دهد محدودیت ظرفیت نه‌تنها سطح بازیابی را کاهش می‌دهد، بلکه عملکرد نسبی سیاست‌ها را نیز تغییر می‌دهد. در رگرسیون لجستیک، ظرفیت و تعامل سه‌طرفه سیاست × شدت × ظرفیت معنادار بودند. در مدل کاکس نیز ظرفیت، شدت و تعامل‌های مرتبط با سیاست بر زمان بازیابی اثر داشتند.

۴-۶-۲- تغییرپذیری زمان تأمین

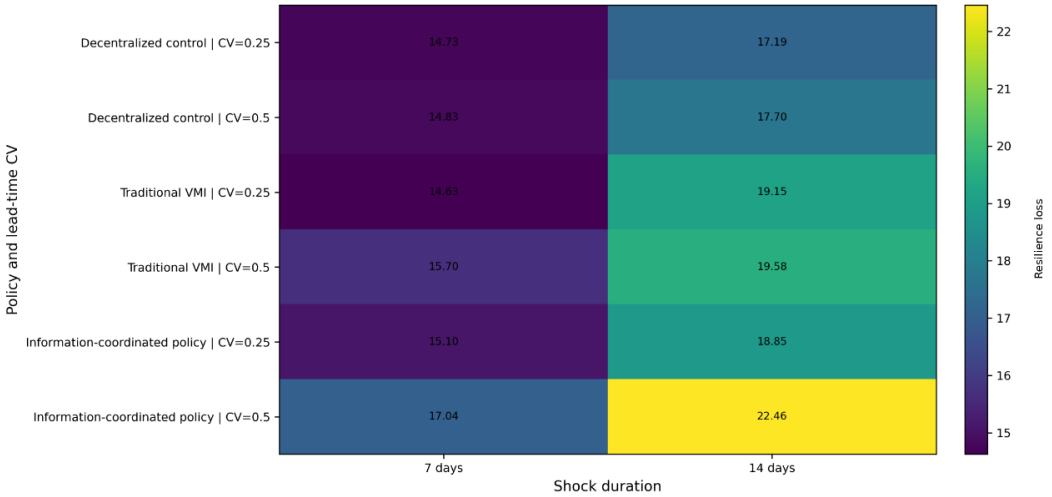
در تحلیل سیاست × مدت × تغییرپذیری زمان تأمین، مدت بر افت عملکرد اثر معنادار داشت ($\eta_p^2 = 0.099$، $p < 0.001$، $F = 38.34$)، اما اثر مستقیم تغییرپذیری بر افت معنادار نبود. در مقابل، تغییرپذیری زمان تأمین زیان تاب‌آوری را افزایش داد ($\eta_p^2 = 0.026$، $p = 0.003$، $F = 9.38$). تعامل سیاست × تغییرپذیری نیز معنادار بود ($\eta_p^2 = 0.019$، $p = 0.046$، $F = 3.32$).

شکل ۱۵ زیان تاب‌آوری را برحسب مدت و تغییرپذیری زمان تأمین نشان می‌دهد. محور افقی مدت شوک و محور عمودی ترکیب سیاست و ضریب تغییرات زمان تأمین ۰/۲۵ یا ۰/۵۰ است؛ رنگ روشن‌تر زیان بیشتر را نشان می‌دهد. در شوک ۱۴روزه، افزایش ضریب تغییرات زمان تأمین از ۰/۲۵ به ۰/۵۰، زیان سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی را از ۱۸/۸۵ به ۲۲/۴۶ افزایش داد. برای مدیریت موجودی توسط فروشنده، تغییر متناظر از ۱۹/۱۵ به ۱۹/۵۸ بود. بنابراین تفاوت شدت تغییر رنگ میان ردیف‌ها نشان می‌دهد حساسیت زیان تجمعی سیاست‌ها به تغییرپذیری زمان تأمین یکسان نیست و اثرهای تغییرپذیری در مدل‌های احتمال و زمان بازیابی معنادار نبودند. علاوه بر تحلیل‌های اصلی شرایط عملیاتی، اثر سطح موجودی تعیین‌شده در ابتدای شبیه‌سازی نیز به‌صورت اکتشافی بررسی شد. با توجه به فاصله زمانی میان مقداردهی اولیه موجودی و وقوع شوک، این تحلیل مبنای استنباط درباره اثر موجودی موجود در لحظه وقوع اختلال قرار نگرفت و نتایج آن در بخش **ضمائم** گزارش شده است.



شکل ۱۴. احتمال بازیابی در سناریوهای شدت و ظرفیت.

Figure 14. Recovery probability under shock intensity and supply capacity scenarios.



شکل ۱۵. زیان تاب‌آوری برحسب مدت و تغییرپذیری زمان تأمین.

Figure 15. Resilience loss by shock duration and lead-time variability.

جدول ۸. عوامل اصلی پیامدهای عملیاتی در طرح چهارعاملی

Table 8. Key determinants of operational outcomes in the four-way factorial design

شاخص عملیاتی	قوی‌ترین عامل	F	p مقاوم HC3	ηp²	تفسیر
نرخ پرشدگی	مدت شوک	۸۰۵/۸۱	<۰/۰۰۱	۰/۵۳۷	مدت شوک مهم‌ترین عامل کاهش نرخ خدمت بود.
هزینه کل	سیاست موجودی	۸۵۷/۰۹	<۰/۰۰۱	۰/۷۱۱	سیاست موجودی بیشترین سهم را در تغییر هزینه کل داشت.
ضایعات کل	سیاست موجودی	۸۶۸۴/۳۸	<۰/۰۰۱	۰/۹۶۱	در چارچوب مفروضات مدل، ساختار سیاست موجودی بیشترین سهم را در تغییر ضایعات داشت.
سفارش معوق	مدت شوک	۱۰۸۷/۵۲	<۰/۰۰۱	۰/۶۱۰	مدت شوک مهم‌ترین عامل انباشت سفارش معوق بود.
انتشار کربن	سیاست موجودی	۶۰۱۳/۹۸	<۰/۰۰۱	۰/۹۴۵	در چارچوب پارامترهای حمل‌ونقل و انتشار تعریف‌شده در مدل، ساختار سیاست بیشترین سهم را در تغییر انتشار کربن داشت.

۴-۷- پیامدهای عملیاتی، اقتصادی و زیست‌محیطی

در طرح چهارعاملی، مدت شوک بزرگ‌ترین اندازه اثر را بر نرخ پرشدگی داشت ($\eta_p^2 = 0.537$). مدت همچنین عامل غالب در افزایش سفارش معوق بود ($\eta_p^2 = 0.610$). این نتایج نشان می‌دهد تداوم فشار تقاضا بیش از سایر عوامل با کاهش خدمت جاری و انباشت تقاضای تأمین‌نشده همراه بود.

سیاست موجودی بزرگ‌ترین اندازه اثر را بر هزینه کل ($\eta_p^2 = 0.711$) ، ضایعات ($\eta_p^2 = 0.961$) و انتشار کربن ($\eta_p^2 = 0.945$) داشت. این اثرها به‌عنوان پیامد پیکربندی مرکب سیاست‌ها، شامل قواعد سفارش، سطح موجودی، دفعات ارسال، تأخیر اطلاعات و خودکارسازی، تفسیر می‌شوند و به یک مؤلفه منفرد نسبت داده نمی شوند. با توجه به اینکه محاسبات ضایعات و انتشار کربن بر مبنای روابط و پارامترهای تعریف‌شده در مدل انجام شده‌اند، مقادیر این دو شاخص با هدف مقایسه نسبی پیکربندی‌های سیاست در محیط شبیه‌سازی تفسیر می‌شوند و نباید به‌عنوان برآورد میدانی ضایعات یا ردپای کربن یک زنجیره تأمین واقعی تلقی شوند. جدول ۸ خلاصه ای از عوامل اصلی شاخص های عملیاتی در طرح چهارعاملی را نشان می دهد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

۵-۱- تفسیر یافته‌های اصلی

این پژوهش پویایی افت و بازیابی سه سیاست کنترل موجودی را در برابر شوک‌های موقت تقاضا بررسی کرد. نتایج نشان داد که شدت و به‌ویژه مدت شوک، سهم بیشتری از تغییرات افت عملکرد و زیان تاب‌آوری را نسبت به نوع سیاست موجودی توضیح می‌دهند. تعامل معنادار شدت و مدت نیز نشان داد که اثر مشترک این دو عامل بر مقیاس پاسخ مدل جمع‌پذیر نیست؛ این الگو با وجود پاسخ غیرخطی در دامنه سناریوهای آزموده‌شده سازگار است. بنابراین، ارزیابی شوک بر اساس شدت یا مدت به‌تنهایی، رفتار افت و بازیابی سیستم را به‌طور کامل آشکار نمی‌کند.

مدت شوک در تحلیل‌های چندعاملی بزرگ‌ترین اندازه اثر را داشت. این یافته با افزایش سفارش‌های معوق و تداوم عملکرد زیر سطح پایه همراه بود و با این تبیین سازگار است که فشار طولانی تقاضا فرصت بازسازی موجودی و کاهش تعهدات انباشته را محدود می‌کند. در مقابل، در سه زمان وقوع آزموده‌شده، شواهد کافی برای اثر مستقیم و پایدار زمان شروع شوک بر شاخص‌های اصلی مشاهده نشد. یک تبیین محتمل آن است که اثر زمان تقویمی از طریق وضعیت درونی سیستم در لحظه شوک عمل کند؛ این سازوکار در مطالعه حاضر مستقیماً آزمون نشده است.

اثر سیاست موجودی در برخی تحلیل‌ها معنادار بود، اما اندازه آن برای پیامدهای اصلی تاب‌آوری عموماً از اثر شدت و مدت کمتر بود. همچنین، هیچ الگوی ثابتی از برتری یک سیاست در تمام سناریوها و پیامدها مشاهده نشد. عملکرد نسبی سیاست‌ها با محدودیت ظرفیت و تغییرپذیری زمان تأمین تغییر کرد. این نتیجه نشان می‌دهد تاب‌آوری سیاست موجودی یک ویژگی ثابت سیاست نیست، بلکه به تناسب میان سازوکار تصمیم‌گیری، ویژگی‌های شوک و توان اجرایی شبکه وابسته است.

محدودیت ظرفیت تأمین نه‌تنها زیان تاب‌آوری، بلکه احتمال و سرعت بازیابی را نیز تغییر داد. تغییرپذیری زمان تأمین نیز زیان تجمعی را افزایش داد و حساسیت سیاست‌ها به آن یکسان نبود. این یافته‌ها با این تفسیر سازگارند که هماهنگی اطلاعاتی نمی‌تواند به‌تنهایی محدودیت‌های فیزیکی تولید و حمل را جبران کند. سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی در این پژوهش ترکیب مدیریت موجودی توسط فروشنده با بلاکچین و قرارداد هوشمند، تأخیر اطلاعاتی کمتر و پایش خودکار را بازنمایی می‌کند؛ بنابراین، نتایج آن بیانگر اثر مشترک این پیکربندی است و سهم مستقل بلاکچین از سایر مؤلفه‌ها قابل تفکیک نیست.

نتایج احتمال بازیابی و زمان بازیابی نیز همیشه الگوی یکسانی نداشتند. برخی عوامل سرعت بازگشت را تغییر دادند، بدون آنکه احتمال نهایی بازیابی تفاوت معناداری نشان دهد. ازاین‌رو، افت عملکرد، زیان تجمعی، احتمال بازیابی و زمان بازیابی ابعاد جایگزین‌پذیر تاب‌آوری نیستند و استفاده از یک شاخص منفرد می‌تواند به رتبه‌بندی ناقصی از سیاست‌ها منجر شود.

۵-۲- مشارکت‌های نظری و روش‌شناختی

مشارکت نظری پژوهش در یکپارچه‌سازی چند مؤلفه مکمل در یک چارچوب واحد برای ارزیابی پویایی تاب‌آوری سیاست‌های موجودی دارویی است. نخست، ارزیابی سیاست‌ها از مقایسه صرف میانگین هزینه یا نرخ خدمت فراتر رفته و مسیر زمانی افت و بازیابی عملکرد را دربر می‌گیرد. دوم، شدت، مدت و زمان وقوع شوک و تعامل میان این ویژگی‌ها به‌صورت هم‌زمان در طراحی آزمایش بررسی می‌شوند. سوم، چهار بعد مکمل تاب‌آوری شامل افت عملکرد، زیان تجمعی، احتمال بازیابی و زمان بازیابی به‌طور هم‌زمان در ارزیابی سیاست‌ها به کار گرفته می‌شوند. چهارم، نقش محدودیت ظرفیت تأمین و تغییرپذیری زمان تأمین در تغییر عملکرد نسبی سیاست‌های موجودی بررسی می‌شود.

از منظر روش‌شناختی، ترکیب شبیه‌سازی عامل‌بنیان با طراحی آزمایش عاملی امکان بررسی کنترل‌شده تعامل تصمیم‌های موجودی، جریان اطلاعات و محدودیت‌های عملیاتی را فراهم کرد. استفاده از تحلیل بقا نیز موجب شد اجراهای فاقد بازیابی از تحلیل زمان حذف نشوند و به‌صورت داده‌های سانسورشده در استنباط آماری باقی بمانند. این رویکرد وقوع بازیابی را از سرعت بازیابی تفکیک می‌کند و ارزیابی کامل‌تری از پاسخ سیستم ارائه می‌دهد.

۵-۳- دلالت‌های مدیریتی

یافته‌ها پیشنهاد می‌کنند برنامه‌ریزی اختلال بر ترکیب شدت و مدت شوک، نه فقط بیشترین افزایش تقاضا، استوار شود. پایان شوک نیز نباید به‌طور خودکار پایان وضعیت اختلال تلقی شود؛ زیرا موجودی کاهش‌یافته و سفارش‌های معوق می‌توانند افت عملکرد را به دوره پساشوک منتقل کنند. معیار خروج از وضعیت بحران بهتر است بر بازگشت پایدار عملکرد استوار باشد.

ظرفیت قابل‌دسترس و تغییرپذیری زمان تأمین باید در کنار شاخص‌های موجودی پایش شوند. هماهنگی اطلاعاتی زمانی ارزش عملی بیشتری خواهد داشت که با توان تخصیص، تولید و حمل متناسب همراه باشد. همچنین، ارزیابی سیاست‌ها باید چندمعیاره باشد؛ زیرا عوامل غالب در نرخ خدمت و سفارش معوق با عوامل غالب در هزینه، ضایعات و انتشار کربن یکسان نبودند. تعیین مقدار بهینه ظرفیت اضطراری یا نوع مداخله برای یک شبکه واقعی، به کالیبراسیون مدل و تحلیل اقتصادی متناسب با همان شبکه نیاز دارد.

۵-۴-محدودیت‌ها و مسیرهای آینده

مدل تماما با داده‌های یک زنجیره واقعی کالیبره نشده و پژوهش حاضر نیز به‌صورت مطالعه موردی یک سازمان خاص طراحی نشده است؛ بنابراین، مقادیر عددی نتایج به‌عنوان شواهد مقایسه‌ای درون‌مدلی تفسیر می‌شوند و تعمیم آن‌ها به شبکه‌های واقعی مستلزم اعتبارسنجی تجربی است. ساختار شبکه تک‌محصولی و نسبتاً ساده بود و انتقال اختلال میان سطوح متعدد، تأمین‌کنندگان جایگزین و گروه‌های دارویی متفاوت را پوشش نمی‌داد. در پژوهش‌های آینده، کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل با داده‌های واقعی یک یا چند زنجیره تأمین دارویی می‌تواند قابلیت تعمیم نتایج را افزایش دهد.

استفاده از شوک مستطیلی امکان جداسازی کنترل‌شده شدت و مدت را فراهم کرد، اما شوک‌های تدریجی، موجی، چندقله‌ای و اختلال‌های هم‌زمان عرضه و تقاضا ممکن است مسیرهای متفاوتی ایجاد کنند. نتایج مربوط به احتمال و زمان بازیابی نیز به تعریف عملیاتی بازگشت به ۹۵ درصد سطح پایه برای هفت روز متوالی و پنجره مشاهده ۹۰روزه وابسته‌اند. تحلیل حساسیت انجام‌شده نشان داد تغییر معیار بازیابی می‌تواند مقدار مطلق احتمال بازیابی را تغییر دهد، هرچند بخش قابل‌توجهی از طبقه‌بندی اجراها تحت آستانه‌های جایگزین ثابت باقی ماند. ازاین‌رو، نتایج بازیابی باید در چارچوب تعریف عملیاتی انتخاب‌شده تفسیر شوند.

سطح موجودی در تحلیل تکمیلی مربوطه در ابتدای اجرای شبیه‌سازی تنظیم شد و الزاماً وضعیت موجودی بلافاصله پیش از وقوع شوک را بازنمایی نمی‌کرد. ازاین‌رو، این تحلیل به‌صورت اکتشافی در نظر گرفته شد و نتایج آن در بخش ضمائم گزارش شده است و از آن برای استنباط درباره اثر موجودی در لحظه وقوع اختلال استفاده نشد. در مطالعات آینده، ثبت و کنترل مستقیم موجودی، سفارش‌های باز و محموله‌های در مسیر بلافاصله پیش از اعمال شوک می‌تواند نقش وضعیت پیشاشوک سیستم را دقیق‌تر آشکار سازد.

برآوردهای ضایعات و انتشار کربن نیز به مفروضات و ضرایب پارامتری مدل وابسته‌اند و در این پژوهش برای مقایسه نسبی سناریوها به کار رفته‌اند، نه برای برآورد تجربی مقادیر واقعی یک زنجیره تأمین مشخص.

۵-۵- نتیجه‌گیری

پیام اصلی پژوهش آن است که تاب‌آوری سیاست‌های کنترل موجودی نه یک ویژگی ثابت سیاست، بلکه پیامد تناسب میان ویژگی‌های شوک، محدودیت‌های عملیاتی و سازوکار تصمیم‌گیری است. مدت و شدت شوک و تعامل میان آن‌ها، بیشترین نقش را در افت و زیان تاب‌آوری داشتند؛ درحالی‌که محدودیت ظرفیت تأمین بر احتمال و سرعت بازیابی اثر گذاشت و تغییرپذیری زمان تأمین عمدتاً زیان تاب‌آوری و عملکرد نسبی سیاست‌ها را تحت تأثیر قرار داد.

هیچ الگوی ثابتی از برتری یک سیاست در تمام شرایط مشاهده نشد و نتایج چهار شاخص تاب‌آوری نیز همواره همسو نبودند. ازاین‌رو، انتخاب سیاست نباید صرفاً بر عملکرد عادی، نرخ خدمت یا برتری فناوری اطلاعاتی استوار باشد، بلکه باید در چارچوب مشخصات شوک، توان اجرایی شبکه و مجموعه‌ای از پیامدهای عملیاتی، اقتصادی و زیست‌محیطی انجام شود. در نهایت، پرسش اصلی برای تاب‌آوری زنجیره تأمین دارویی این نیست که

کدام سیاست موجودی همواره برتر است، بلکه این است که هر سیاست در برابر چه ترکیبی از شدت، مدت و محدودیت عملیاتی همچنان قادر به حفظ و بازیابی عملکرد است.

قدردانی

از عوامل اجرایی نشریه و داوران به‌دلیل پیشنهادها و رهنمودهای سازنده‌ای که موجب بهبود و ارتقای کیفیت مقاله حاضر شد، صمیمانه تشکر می‌شود.

حمایت مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

مشارکت‌های نویسندگان

محمد منش‌بزرگی: مدیریت داده‌ها، تحلیل آماری، تحقیق و بررسی، روش‌شناسی، تأمین منابع، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، مصورسازی، نگارش پیش‌نویس اصلی، نگارش – بازبینی و ویرایش؛ **سیدامیررضا ابطحی:** مفهوم‌پردازی، مدیریت پروژه، راهنمایی، نگارش – بازبینی و ویرایش؛ **فرزاد حقیقی‌راد:** مفهوم‌پردازی، مدیریت پروژه، راهنمایی، نگارش – بازبینی و ویرایش.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها در صورت درخواست در دسترس هستند: داده‌های پشتیبانی‌کننده نتایج این مطالعه در اختیار نویسندگان مسئول بوده و در صورت درخواست منطقی در دسترس قرار خواهند گرفت.

مراجع

Bozdoğan, A., Görkemli Aykut, L., & Demirel, N. (2023). An agent-based modeling framework for the design of a dynamic closed-loop supply chain network. *Complex & Intelligent Systems*, *9*(1), 247-265. https://doi.org/10.1007/s40747-022-00780-z

Burgos, D., & Ivanov, D. (2021). Food retail supply chain resilience and the COVID-19 pandemic: A digital twin-based impact analysis and improvement directions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *152*, 102412. https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102412

Carreón-Nava, L. F., & Caballero-Morales, S. O. (2022). Multi-retailer Sales Model under Uncertain Demand in a Pharmaceutical Two-Echelon Supply Chain with Vendor Managed Inventory System. *International Journal of Combinatorial Optimization Problems & Informatics*, *13*(2), 114-125. https://doi.org/10.61467/2007.1558.2022.v13i2.297

Erfanian, M., & Bayani, B. (2018). Optimization based on simulation of a multi-echelon inventory system in the pharmaceutical supply chain under uncertainty in demand prioritization: A case study of Samen Pharmaceutical Company in Mashhad. In *Proceedings of the 15th International Conference on Industrial Engineering*. Yazd, Iran. https://civilica.com/doc/839587/

Ghadge, A., Er, M., Ivanov, D., & Chaudhuri, A. (2022). Visualisation of ripple effect in supply chains under long-term, simultaneous disruptions: a system dynamics approach. *International Journal of Production Research*, *60*(20), 6173-6186. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1987547

Goswami, A., Baveja, A., Ding, X., Melamed, B., & Roberts, F. (2024). An integrated framework for modeling pharmaceutical supply chains with disruptions and risk mitigation. *Annals of Operations Research*, 1-26. https://doi.org/10.1007/s10479-024-06381-y

Habibi, F., Chakrabortty, R. K., & Abbasi, A. (2023). Evaluating supply chain network resilience considering disruption propagation. *Computers & Industrial Engineering*, *183*, 109531. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109531

Ivanov, D. (2024). Exiting the COVID-19 pandemic: After-shock risks and avoidance of disruption tails in supply chains. *Annals of Operations Research*, *335*(3), 1627-1644. https://doi.org/10.1007/s10479-021-04047-7

Kalashi, F., Mahdavi, I., Tajdin, A., & Rezaeian, J. (2025). Evaluation and selection of suppliers in a viable closed-loop supply chain under mixed uncertainty. *System Engineering and Productivity*, *5*(4), 191-215. https://doi.org/10.22034/sep.2025.2066007.1355

Khojeh, Z., Darvishmohammadi, T., & Mohajertabrizi, M. (2023). Pharmaceutical

Supply Chain Network Design: An Integrated Approach. *Scientific Journal of Supply Chain Management*, *24*(4), 55-70. (In Persian). https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089198.1401.24.77.4.7

Macal, C. M., & North, M. J. (2005, December). Tutorial on agent-based modeling and simulation. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005.* (pp. 14-pp). IEEE. https://doi.org/10.1057/jos.2010.3

Macdonald, J. R., Zobel, C. W., Melnyk, S. A., & Griffis, S. E. (2018). Supply chain risk and resilience: theory building through structured experiments and simulation. *International Journal of Production Research*, *56*(12), 4337-4355. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1421787.

Mahdavimanshadi, M., Anaraki, M. G., Mowlai, M., & Ahmadirad, Z. (2024, May). A multistage stochastic optimization model for resilient pharmaceutical supply chain in COVID-19 pandemic based on patient group priority. In *2024 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)* (pp. 382-387). IEEE. https://doi.org/10.1109/SIEDS61124.2024.10534683

Moakedi, H., & Ghasemizadeh, F. (2026). Robust Optimization of pharmaceutical logistics network under disaster considering reliability. *System Engineering and Productivity*, *6*(4), 181-222. (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2026.2087772.1482

Mousazadeh, M., Torabi, S. A., & Zahiri, B. (2015). A robust possibilistic programming approach for pharmaceutical supply chain network design. *Computers & Chemical Engineering*, *82*, 115-128. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.06.008

Mozafari, M., & Savari, J. (2025). Designing a green closed-loop supply chain network for pharmaceutical products using cuckoo search algorithm. *System Engineering and Productivity*, *5*(1), 135-153. (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2025.2050452.1248

Omar, I. A., Jayaraman, R., Salah, K., Debe, M., & Omar, M. (2020). Enhancing vendor managed inventory supply chain operations using blockchain smart contracts. *IEEE access*, *8*, 182704-182719. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028031

Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, *57*(7), 2117-2135. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261

Sahoo, S., Kumar, S., Sivarajah, U., Lim, W. M., Westland, J. C., & Kumar, A. (2024). Blockchain for sustainable supply chain management: Trends and ways forward. *Electronic Commerce Research*, *24*(3), 1563-1618. https://doi.org/10.1007/s10660-022-09569-1

Salimi-Zaviyeh, S. G., Kazazi, A., Raeesi Vanani, I., & Ghazinoori, S. (2026). Data-driven production planning in the biopharmaceutical industry using LSTM-based demand forecasting and multi-objective optimization via genetic algorithm and ε-constraint method. *System Engineering and Productivity*, *6*(2), 113-159. (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2025.2072481.1397

Sazvar, Z., Zokaee, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Salari, S. A. S., & Nayeri, S. (2022). Designing a sustainable closed-loop pharmaceutical supply chain in a competitive market considering demand uncertainty, manufacturer's brand and waste management. *Annals of Operations Research*, *315*(2), 2057-2088. https://doi.org/10.1007/s10479-021-03961-0

Shen, J., Bu, F., Ye, Z., Zhang, M., Ma, Q., Yan, J., & Huang, T. (2024). Management of drug supply chain information based on "artificial intelligence+ vendor managed inventory" in China: perspective based on a case study. *Frontiers in Pharmacology*, *15*, 1373642. https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1373642

Tucker, E. L., & Daskin, M. S. (2022). Pharmaceutical supply chain reliability and effects on drug shortages. *Computers & Industrial Engineering*, *169*, 108258. https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108258

Veisi, O. (2026). An Integrated optimization of spare parts inventory using machine-learning–based demand forecasting, taking into account safety stock and dual lead-time supply. *System Engineering and Productivity*, *6*(3), 225-262. (In Persian). https://doi.org/10.22034/sep.2026.2074035.1409

ضمائم

پیوست الف: پارامترهای عددی مدل شبیه‌سازی

به‌منظور تکمیل مستندسازی مدل و افزایش قابلیت بازتولید پژوهش، **جدول الف-۱** مقادیر پارامترهای تکمیلی را که مستقیماً در فرایند تأمین و حمل‌ونقل یا در محاسبه پیامدهای اقتصادی، ضایعات و انتشار کربن مورد استفاده قرار گرفته‌اند، ارائه می‌کند. پارامترهای مربوط به ساختار سیاست‌های موجودی و عوامل طراحی آزمایش

که پیش‌تر در جدول ۳ و جدول ۴ گزارش شده‌اند، برای جلوگیری از تکرار در این جدول بازنویسی نشده‌اند.
پارامترهای SLA، پایش خودکار و هزینه‌های زیرساختی فقط در سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی فعال هستند. ضریب تغییرات زمان تأمین در تحلیل مربوطه در دو سطح ۰/۲۵ و ۰/۵۰ تغییر داده شد. پارامترهای هزینه و انتشار برای مقایسه نسبی سناریوها در محیط شبیه‌سازی به کار رفته‌اند و بیانگر برآورد تجربی هزینه یا ردپای کربن یک زنجیره تأمین واقعی نیستند.

پیوست ب: تحلیل تکمیلی اثر سطح موجودی اولیه

به‌منظور بررسی اکتشافی اثر شرایط اولیه سیستم، تحلیل A8 با ترکیب سه سیاست کنترل موجودی، دو زمان وقوع شوک شامل روزهای ۶۰ و ۲۴۰ و دو ضریب موجودی اولیه ۱ و ۰/۶ انجام شد. شدت شوک برابر با ۲ و مدت آن برابر با ۷ روز ثابت نگه داشته شد. از آنجا که ضریب موجودی در ابتدای اجرای شبیه‌سازی اعمال شده و نه بلافاصله پیش از وقوع شوک، این تحلیل صرفاً برای بررسی حساسیت مدل نسبت به شرایط آغازین انجام شد و به‌عنوان آزمون مستقیم اثر موجودی پیشاشوک تفسیر نمی‌شود (شکل ب-۱). نتایج نشان داد کاهش ضریب موجودی اولیه از ۱ به ۰/۶ در دامنه بررسی‌شده اثر معناداری بر افت عملکرد یا زیان تاب‌آوری ایجاد نکرد و تعامل‌های مربوط به موجودی اولیه نیز معنادار نبودند. در مدل‌های احتمال و زمان بازیابی نیز شواهد کافی برای اثر مستقیم سطح موجودی اولیه مشاهده نشد. با توجه به نحوه مقداردهی این عامل، این یافته صرفاً به شرایط آغازین آزموده‌شده در مدل محدود است و نباید به بی‌اهمیت‌بودن موجودی موجود در زمان وقوع اختلال تعمیم داده شود.

پیوست ج: خلاصه نتایج استنباطی طرح‌های آزمایشی

جدول ج-۱ خلاصه اثرهای معنادار طرح‌های اصلی و تکمیلی A1 تا A7 را بر چهار شاخص اصلی تاب‌آوری ارائه می‌کند. برای افت عملکرد و زیان تاب‌آوری، نتایج تحلیل واریانس عاملی نوع سوم بر اساس استنباط مقاوم HC3 و مجذور اتای جزئی گزارش شده‌اند. برای احتمال بازیابی پایدار از رگرسیون لجستیک و برای زمان بازیابی از مدل مخاطرات متناسب کاکس با لحاظ اجراهای راست‌سانسورشده استفاده شده است. تحلیل A8 به دلیل ماهیت اکتشافی، جداگانه در پیوست ب گزارش شده است.

جدول الف-۱. مقادیر پارامترهای عددی مورد استفاده در مدل شبیه‌سازی

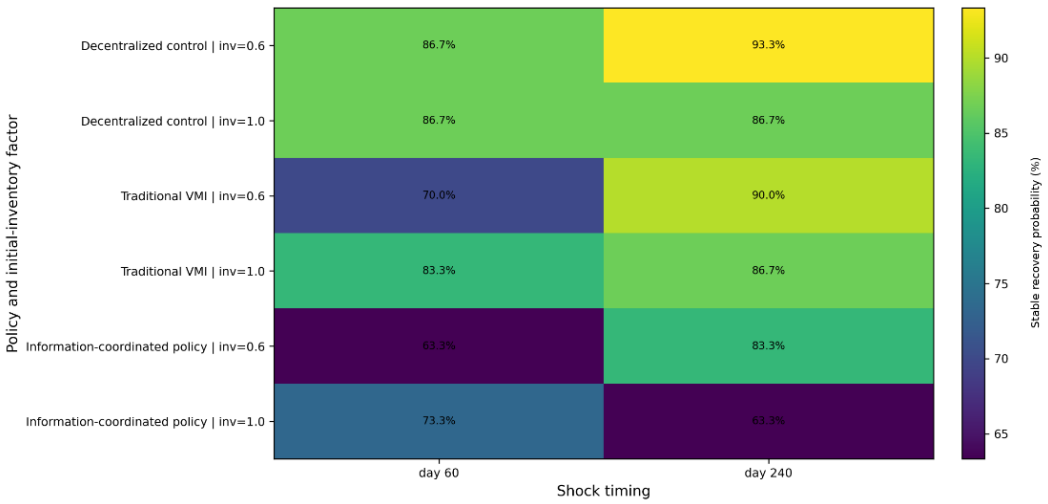
Table A-1. Values of numerical parameters used in the simulation model

گروه	پارامتر	مقدار	واحد / توضیح
تأمین	ظرفیت تولید روزانه تأمین‌کننده در شرایط مرجع	۱۰۰۰	واحد در روز
تأمین	میانگین زمان تولید/تأمین	۴	روز
تأمین	ضریب تغییرات زمان تأمین	۰/۲۵ و ۰/۵۰	به‌ترتیب شرایط مرجع و افزایش تغییرپذیری؛ انحراف معیار از حاصل‌ضرب میانگین در CV محاسبه می‌شود.
حمل‌ونقل	تعداد کامیون در شرایط مرجع	۴	دستگاه
حمل‌ونقل	ظرفیت هر کامیون	۱۵۰	واحد دارو
حمل‌ونقل	میانگین زمان حمل	۲	روز
حمل‌ونقل	احتمال خرابی وسیله حمل	۰/۰۲	در هر ارسال
حمل‌ونقل	متوسط مسافت هر سفر	۲۲۰	کیلومتر
هزینه	هزینه نگهداری-کنترل غیرمتمرکز	۰/۰۳۰	واحد هزینه به‌ازای واحد دارو در روز
هزینه	هزینه نگهداری-VMI	۰/۰۱۸	واحد هزینه به‌ازای واحد دارو در روز
هزینه	هزینه نگهداری-سیاست هماهنگ‌شده اطلاعاتی	۰/۰۱۸	واحد هزینه به‌ازای واحد دارو در روز
هزینه	هزینه حمل	۱/۲	واحد هزینه به‌ازای کیلومتر
هزینه	هزینه هر واحد ضایعات	۸۲	واحد هزینه به‌ازای واحد دارو

ادامه جدول الف-۱.

Table A-1 continued.

گروه	پارامتر	مقدار	واحد / توضیح
هزینه	هزینه هر واحد سفارش معوق	۶۰	واحد هزینه به‌ازای واحد دارو
هزینه	هزینه هر واحد فروش ازدست‌رفته	۲۲۵	واحد هزینه به‌ازای واحد دارو
کمبود	سهم فروش ازدست‌رفته از تقاضای تأمین‌نشده	۰/۲۰	بخش باقی‌مانده به سفارش معوق منتقل می‌شود
ضایعات	عمر مفید اولیه هر دسته دارویی	۱۰	روز
زنجیره سرد	محدوده دمای مجاز	۲ تا ۸	درجه سانتی‌گراد
زنجیره سرد	احتمال نقض شرایط دمایی	۰/۰۱	در همه ارسال‌های مشمول زنجیره سرد، مستقل از نوع سیاست موجودی
انتشار کربن	جرم فرضی هر واحد دارو	۰/۲	کیلوگرم
انتشار کربن	ضریب انتشار حمل‌ونقل	۰/۱	کیلوگرم CO_2e به‌ازای تن-کیلومتر
قواعد SLA-سیاست سوم	آستانه زمان تحویل	۳	روز
قواعد SLA-سیاست سوم	جریمه محموله دیررس	۳۰۰	واحد هزینه به‌ازای محموله
قواعد SLA-سیاست سوم	آستانه نرخ پرشدگی برای پاداش	۰/۹۸	نسبت
قواعد SLA-سیاست سوم	جریمه کمبود	۱۰	واحد هزینه به‌ازای هر واحد کمبود
قواعد SLA-سیاست سوم	پاداش روز بدون کمبود با تحقق آستانه نرخ پرشدگی	۱۰	واحد هزینه در روز
قواعد SLA-سیاست سوم	جریمه نقض شرایط دمایی	۱۰۰	واحد هزینه به‌ازای رخداد
قواعد SLA-سیاست سوم	پاداش تحویل به‌موقع	۲۰	واحد هزینه به‌ازای محموله
قواعد SLA-سیاست سوم	پاداش عدم نقض دمایی	۳۰	واحد هزینه به‌ازای محموله
قواعد SLA-سیاست سوم	جریمه واحد منقضی‌شده	۰/۵	واحد هزینه به‌ازای واحد
زیرساخت سیاست سوم	هزینه روزانه پایش IoT	۱۰۰	واحد هزینه در روز
زیرساخت سیاست سوم	هزینه روزانه اجرای SLA	۱۰۰	واحد هزینه در روز
زیرساخت سیاست سوم	هزینه روزانه زیرساخت هماهنگی/بلاکچین	۱۰۰	واحد هزینه در روز



شکل ب-۱. احتمال بازیابی برحسب زمان وقوع و موجودی اولیه.

Figure B-1. Recovery probability by shock timing and initial inventory.

جدول ج-۱. خلاصه نتایج استنباطی طرح‌های A1 تا A7 برای شاخص‌های اصلی تاب‌آوری

Table C-1. Summary of inferential results for the main resilience indicators across A1–A7

طرح	افت عملکرد- ANOVA HC3	زیان تاب‌آوری- ANOVA HC3	احتمال بازیابی- لجستیک	زمان بازیابی-کاکس
A1 سیاست × شدت	شدت: $\eta_p^2 = 0.295$ $p < 0.001$ سیاست: $\eta_p^2 = 0.050$ $p < 0.001$ سیاست × شدت: $\eta_p^2 = 0.035$ $p = 0.044$	شدت: $\eta_p^2 = 0.214$ $p < 0.001$	اثر معناداری مشاهده نشد	اثر معناداری مشاهده نشد
A2 سیاست × مدت	مدت: $\eta_p^2 = 0.259$ $p < 0.001$ سیاست: $\eta_p^2 = 0.033$ $p = 0.003$	مدت: $\eta_p^2 = 0.295$ $p < 0.001$	اثر معناداری مشاهده نشد	اثر معناداری مشاهده نشد
A3 سیاست × زمان وقوع	سیاست: $\eta_p^2 = 0.092$ $p < 0.001$ زمان وقوع: نامعنا	سیاست: $\eta_p^2 = 0.026$ $p = 0.032$ زمان وقوع: نامعنا	اثر معناداری مشاهده نشد	اثر معناداری مشاهده نشد
A4 سیاست × شدت × مدت	مدت: $\eta_p^2 = 0.312$ $p < 0.001$ شدت: $\eta_p^2 = 0.216$ $p < 0.001$ شدت × مدت: $\eta_p^2 = 0.065$ $p < 0.001$ سیاست: $\eta_p^2 = 0.027$ $p < 0.001$	مدت: $\eta_p^2 = 0.417$ $p < 0.001$ شدت: $\eta_p^2 = 0.214$ $p < 0.001$ شدت × مدت: $\eta_p^2 = 0.089$ $p < 0.001$	اثر معناداری مشاهده نشد	شدت: $\chi^2 = 14.267$ $p < 0.001$
A5 سیاست × شدت × مدت × زمان	مدت: $\eta_p^2 = 0.445$ $p < 0.001$ شدت: $\eta_p^2 = 0.185$ $p < 0.001$ شدت × مدت: $\eta_p^2 = 0.185$ $p < 0.001$	مدت: $\eta_p^2 = 0.521$ $p < 0.001$ شدت: $\eta_p^2 = 0.298$ $p < 0.001$ شدت × مدت: $\eta_p^2 = 0.258$ $p < 0.001$ سیاست: $\eta_p^2 = 0.009$ $p = 0.040$	اثر معناداری مشاهده نشد	شدت: $\chi^2 = 5.055$ $p = 0.025$ سیاست × شدت: $\chi^2 = 6.428$ $p = 0.040$ شدت × مدت: $\chi^2 = 5.469$ $p = 0.019$

جدول ج-۱. خلاصه نتایج استنباطی طرح‌های A1 تا A7 برای شاخص‌های اصلی تاب‌آوری

Table C-1. Summary of inferential results for the main resilience indicators across A1–A7

طرح	افت عملکرد- ANOVA HC3	زیان تاب‌آوری- ANOVA HC3	احتمال بازیابی- لجستیک	زمان بازیابی- کاکس
A6 سیاست × شدت × ظرفیت	شدت: $\eta_p^2 = 0.244$ $p < 0.001$ سیاست: $\eta_p^2 = 0.050$ $p < 0.001$ ظرفیت: $\eta_p^2 = 0.012$ $p = 0.041$	شدت: $\eta_p^2 = 0.216$ $p < 0.001$ ظرفیت: $\eta_p^2 = 0.121$ $p < 0.00$ شدت × ظرفیت: $\eta_p^2 = 0.026$ $p = 0.003$	ظرفیت: $\chi^2 = 12.291$ $p < 0.001$ سیاست × شدت × ظرفیت: $\chi^2 = 9.477$ $p = 0.009$	ظرفیت: $\chi^2 = 16.720$ $p < 0.001$ سیاست × شدت × ظرفیت: $\chi^2 = 6.716$ $p = 0.035$
A7 سیاست × مدت × تغییرپذیری زمان تأمین	مدت: $\eta_p^2 = 0.099$ $p < 0.001$ سیاست: $\eta_p^2 = 0.072$ $p < 0.001$ تغییرپذیری زمان تأمین: نامعنا	مدت: $\eta_p^2 = 0.194$ $p < 0.001$ سیاست: $\eta_p^2 = 0.053$ $p < 0.001$ تغییرپذیری زمان تأمین: $\eta_p^2 = 0.026$ $p = 0.003$ سیاست × تغییرپذیری: $\eta_p^2 = 0.019$ $p = 0.046$	اثر معناداری مشاهده نشد	اثر معناداری مشاهده نشد