

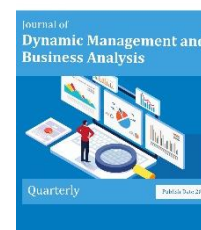


Journal Website

Article history:
Received 25 February 2025
Revised 03 June 2025
Accepted 10 June 2025
Initial Published 11 November 2025
Final Publication 22 December 2025

Dynamic Management and Business Analysis

Volume 4, Issue 4, pp 1-27



E-ISSN: 3041-8933

System Dynamics Modeling of the Relationships between Sustainable Supply Chain Management and Sustainable Development in Industrial Manufacturing Companies

Mehdi. Mahmoudodieh¹, Elmira. Mashayekhi Nezamabadi^{1*}, Hassan. Haleh²

¹ Department of Industrial Management, Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran

² Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan, Iran

* Corresponding author email address: Mashayekhi_elmira@iau.ac.ir

Article Info

Article type:

Original

How to cite this article:

Mahmoudodieh, M., Mashayekhi Nezamabadi, E., & Haleh, H. (2025). System Dynamics Modeling of the Relationships between Sustainable Supply Chain Management and Sustainable Development in Industrial Manufacturing Companies. *Dynamic Management and Business Analysis*, 4(4), 1-27.

<https://doi.org/10.61838/dmbaj.190>



© 2025 the author(s). Published by Knowledge Management Scientific Association. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) License.

ABSTRACT

Objective: The objective of this study is to investigate and model the relationships between sustainable supply chain management and sustainable economic development in Iranian manufacturing industries using a system dynamics approach.

Methodology: This research applied system dynamics modeling to analyze the structure and behavior of key variables in sustainable supply chains. Key indicators were identified through literature review and expert consultation. The dynamic model was constructed and simulated using Vensim software. Its validity was assessed through structural tests, sensitivity analysis, behavior reproduction, and boundary condition testing. Four policy scenarios were then developed to assess the impact of various strategies on critical system variables.

Findings: The simulation results indicated that reducing production costs, increasing warehouse capacity, and improving transport technologies significantly enhance production output, lower travel costs, and balance inventory levels. Particularly, Scenario 3, focused on reducing the production cost rate, demonstrated the highest positive impact. In contrast, Scenario 4, which simultaneously applied all strategies, led to system inefficiencies due to surplus inventory and diminished output.

Conclusion: The findings highlight that targeted and incremental policies outperform simultaneous comprehensive approaches in optimizing supply chain performance. The proposed model serves as a powerful decision-making tool for industrial managers aiming to align operational efficiency with sustainable development goals.

Keywords: System dynamics, sustainable supply chain management, sustainable development, manufacturing companies

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Sustainable Supply Chain Management (SSCM) has emerged as a critical paradigm in the global effort to align industrial productivity with environmental preservation, social responsibility, and economic resilience. As manufacturing industries face growing scrutiny over their ecological footprints and social accountability, the integration of sustainability principles into supply chain operations is no longer optional but essential for long-term viability and competitive advantage (Stefan & Schleper, 2024; Zuleikha & Shafiq, 2023). SSCM transcends conventional cost-efficiency frameworks by simultaneously addressing economic, environmental, and social dimensions, thereby fostering organizational performance while preserving planetary and societal well-being (Shuhui & Chen, 2024).

Global scholarly attention has increasingly been directed at understanding the multifaceted impacts of SSCM. Research by Wang et al. confirms that the adoption of SSCM enhances not only operational performance but also innovation and financial metrics in firms across sectors (Wang et al., 2023). Moreover, Abualigah et al. emphasize the role of artificial intelligence and metaheuristics in optimizing sustainable logistics processes, highlighting the potential of data-driven strategies in mitigating uncertainty and enhancing responsiveness in supply chains (Abualigah et al., 2023). Similarly, Samper et al. and Ansary Asha et al. underscore that Industry 4.0 and organizational technology orientation substantially contribute to the realization of SSCM objectives (Ansary Asha et al., 2023; Samper et al., 2022).

However, despite this expanding literature, many existing studies remain industry-specific or constrained by geographic and methodological limitations. In Iran, few comprehensive models have been developed that simultaneously capture the causal interdependencies among SSCM components and the broader goals of sustainable economic development. Aslani Laei et al. attempted to evaluate SSCM capabilities using AI, while Soltan Mohammadi et al. proposed a hybrid data-mining model for sustainable resource provisioning in selected industries (Aslani Laei et al., 2021; Soltan Mohammadi et al., 2023). Rezaei and Rajabzadeh identified institutional and infrastructural barriers to SSCM implementation in Iran's economic zones, advocating for a more nuanced, systemic approach (Rezaei & Rajabzadeh, 2022).

Moreover, studies such as Fritz (2022) and Fontoura & Coelho (2022) have highlighted the importance of stakeholder engagement and inter-organizational collaboration in achieving green innovation and improving supply chain sustainability (Fontoura & Coelho, 2022; Fritz, 2022). Wren (2022) critiques the superficial application of SSCM policies in the fast fashion industry, emphasizing the disconnect between environmental commitments and actual stakeholder interaction (Wren, 2022). On the other hand, Martina et al. assert that overcoming organizational barriers to sustainable creativity is essential for the knowledge-based transformation of supply chains (Martina et al., 2023).

Given this backdrop, this study seeks to fill theoretical and practical gaps by constructing a dynamic and systemic model to analyze the relationship between SSCM and sustainable development in Iranian manufacturing companies. Drawing on the systems dynamics methodology, which is well-suited for examining nonlinear and feedback-rich systems (Tetiana et al., 2023), the research aims to simulate and evaluate the long-term effects of different SSCM policies on key performance indicators. Through such modeling, this study aligns with global calls for the adoption of holistic frameworks in SSCM research

and responds to local imperatives for practical, data-informed industrial sustainability strategies (Allen et al., 2021; Rodríguez-González et al., 2022).

Methods and Materials

The study employed a system dynamics modeling approach to analyze the causal relationships between SSCM components and indicators of sustainable economic development in the Iranian manufacturing context. Initially, key variables were identified through an extensive literature review and expert consultation. The conceptual model was developed to map feedback loops, causal interactions, and stocks and flows of the supply chain system.

Vensim software was used to simulate the model, allowing for scenario analysis under varying policy conditions. The model was validated using behavior reproduction tests, boundary condition analysis, sensitivity testing, and structural verification. Data inputs were gathered from company reports, industry databases, and expert interviews to calibrate the model's parameters. Four policy scenarios were designed to evaluate the effects of altering production costs, warehouse capacities, and transportation technologies. The simulations were conducted over a five-year time horizon to assess the dynamic impacts of these variables on production volume, total inventory, and total travel cost.

Findings

Simulation results revealed that the policy scenario focused on reducing production costs (Scenario 3) achieved the most favorable outcomes, including the highest production levels and lowest travel costs. Specifically, by year five, Scenario 3 yielded a production volume of 6,262,770 units, surpassing all other scenarios. It also resulted in the lowest chain-wide inventory level at 990.70 units, indicating improved throughput and minimized excess storage. This scenario demonstrated that cost reductions can enhance operational efficiency and responsiveness without overburdening inventory systems.

In contrast, Scenario 4, which involved the simultaneous implementation of all strategies—production cost reduction, warehouse capacity increase, and transport innovation—produced suboptimal outcomes. While travel costs decreased marginally, inventory accumulation increased disproportionately, and production levels declined to 4,347,530 units by year five. This indicated that excessive policy integration could destabilize supply-demand alignment and strain system efficiency.

Scenario 1, which emphasized transportation innovation, showed moderate improvements in travel costs and production output but did not outperform the focused approach of Scenario 3. Scenario 2, concentrating on increasing warehouse capacity, resulted in elevated inventory levels without commensurate production gains, suggesting inefficiencies in stock utilization.

Overall, the findings confirmed that targeted policy interventions—particularly those aimed at cost optimization—can yield higher system performance than generalized, simultaneous strategy deployment. The behavior reproduction and sensitivity analyses further validated the robustness of the model by aligning simulated outputs with historical industry data and revealing critical leverage points in the system, such as production rate and warehouse capacity.

Discussion and Conclusion

The results of this study offer several important insights into the dynamics of sustainable supply chain management in the context of industrial manufacturing. First, the superior performance of Scenario 3 confirms that reducing production costs through targeted interventions can significantly boost output and minimize systemic inefficiencies. This supports prior research indicating the centrality of cost

structures in driving SSCM performance. Moreover, the simulation highlighted the reinforcing loop between cost reduction, increased consumer demand, and improved product flow, suggesting that such strategies not only enhance internal efficiency but also strengthen market responsiveness.

Second, the findings emphasize that simultaneous implementation of multiple sustainability strategies, while theoretically comprehensive, may produce diminishing returns or even counterproductive outcomes if not sequenced or aligned with organizational capacities. The decline in efficiency observed in Scenario 4 illustrates the risks of overextension and resource misallocation in supply chain systems. This underscores the importance of prioritizing and phasing sustainability measures rather than pursuing blanket implementation.

Third, the results validate the strategic value of technological innovation in transportation systems. While not the most decisive factor alone, enhanced transport technologies contributed to reduced delivery times and logistics costs, aligning with broader environmental and operational goals. Combined with appropriate inventory management, these innovations can significantly elevate the sustainability profile of supply chains.

Fourth, the model demonstrated the pivotal role of warehouse capacity as a balancing mechanism between production and distribution. However, the analysis also revealed that expanding capacity without corresponding improvements in inventory turnover can lead to overstocking and inflated holding costs. This finding cautions against treating infrastructure expansion as a standalone solution and points to the need for integrated strategies that balance capacity with flow efficiency.

Ultimately, this study reinforces the value of system dynamics modeling as a decision-support tool for SSCM policy development. By simulating long-term outcomes and inter-variable feedbacks, organizations can anticipate unintended consequences and design more resilient, context-appropriate strategies. The model provides a replicable framework for assessing sustainability interventions, adaptable to different industrial settings and policy environments.

In conclusion, achieving sustainable development in manufacturing supply chains requires not only commitment to environmental and social goals but also a nuanced understanding of systemic interactions. Targeted, data-driven, and staged policy approaches—especially those focused on cost efficiency and technological enhancement—are more likely to produce sustainable, scalable results. For industrial policymakers and corporate managers in Iran and similar economies, such models offer valuable insights for balancing growth, equity, and ecological responsibility in an increasingly complex operational landscape.

مدل سازی پویایی شناسی سیستم روابط بین مدیریت زنجیره تأمین پایدار و توسعه پایدار در شرکت های تولیدی صنعتی

مهدی محمودیه^۱، المیرا مشایخی نظام آبادی^{۱*}، حسن حاله^۲

۱. گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
۲. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: Mashayekhi_elmira@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله پژوهشی/اصیل	هدف: هدف این پژوهش، بررسی و مدل سازی روابط بین مدیریت زنجیره تأمین پایدار و توسعه پایدار اقتصادی در صنایع تولیدی ایران با استفاده از رویکرد پویایی شناسی سیستم است.
نحوه استناد به این مقاله: محمودیه، مهدی،، مشایخی نظام آبادی، المیرا، و حاله، حسن. (۱۴۰۴). مدل سازی پویایی شناسی سیستم روابط بین مدیریت زنجیره تأمین پایدار و توسعه پایدار در شرکت های تولیدی صنعتی. مدیریت پویا و تحلیل کسب و کار، ۴(۴)، ۲۷-۱.	روش شناسی: این مطالعه از روش مدل سازی پویایی شناسی سیستم برای تحلیل ساختار و رفتار متغیرهای کلیدی در زنجیره تأمین پایدار بهره برد. ابتدا شاخص های اصلی از طریق مرور ادبیات و مصاحبه با خبرگان استخراج شد. سپس با استفاده از نرم افزار Vensim مدل سازی انجام و اعتبار آن با آزمون های ساختاری، حساسیت، بازتولید رفتار و شرایط حدی سنجیده شد. در ادامه، چهار سناریوی سیاستی طراحی و اجرا گردید تا اثر سیاست های مختلف بر متغیرهای کلیدی مورد ارزیابی قرار گیرد.
	یافته ها: نتایج تحلیل ها نشان داد که کاهش هزینه تولید، افزایش ظرفیت انبار و بهبود فناوری حمل و نقل به بهینه سازی تولید، کاهش هزینه های سفر و تعادل در موجودی منجر می شود. به ویژه سناریوی سوم که بر کاهش نرخ هزینه تولید متمرکز بود، بیشترین اثر مثبت بر تولید و کاهش هزینه ها داشت. در مقابل، اجرای هم زمان تمامی سیاست ها در سناریوی چهارم به کاهش کارایی سیستم انجامید.
	نتیجه گیری: یافته ها نشان می دهد که سیاست های تدریجی و هدفمند، در مقایسه با رویکردهای جامع و هم زمان، کارایی بیشتری در بهینه سازی عملکرد زنجیره تأمین دارند. مدل طراحی شده می تواند ابزاری مؤثر برای تصمیم سازی مدیران صنعتی در راستای توسعه پایدار باشد.
	کلیدواژه ها: پویایی شناسی سیستم، مدیریت زنجیره تأمین پایدار، توسعه پایدار، شرکت های تولیدی



© ۱۴۰۴ تمامی حقوق انتشار این مقاله متعلق به نویسنده (گان) است. انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با گواهی (CC BY 4.0) صورت گرفته است.

در دهه‌های اخیر، پایداری به‌عنوان یکی از مفاهیم بنیادین در عرصه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی، جایگاه برجسته‌ای در سیاست‌گذاری‌های صنعتی و تصمیم‌سازی‌های راهبردی یافته است. با گسترش بحران‌های زیست‌محیطی، کمبود منابع طبیعی، نابرابری‌های اجتماعی و چالش‌های اقتصادی پیچیده، سازمان‌ها ناگزیر به بازنگری در الگوهای سنتی مدیریت زنجیره تأمین خود شده‌اند و به‌سوی الگوهایی روی آورده‌اند که ضمن بهینه‌سازی عملکرد اقتصادی، دربردارنده مسئولیت‌های اجتماعی و الزامات زیست‌محیطی نیز باشند (Stefan & Schleper, 2024). در این راستا، مفهوم مدیریت زنجیره تأمین پایدار (Sustainable Supply Chain Management – SSCM) به‌عنوان رویکردی جامع‌نگر که سه بعد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را هم‌زمان در نظر می‌گیرد، مورد توجه گسترده قرار گرفته است (Zuleikha & Shafiq, 2023).

مدیریت زنجیره تأمین پایدار، فراتر از بهره‌وری هزینه و کارایی عملیاتی، بر خلق ارزش مشترک برای تمامی ذی‌نفعان زنجیره تأمین تأکید دارد (Shuhui & Chen, 2024). این رویکرد با اتکا بر اصول توسعه پایدار، به‌دنبال ایجاد تعادل میان رشد اقتصادی، عدالت اجتماعی و حفظ محیط‌زیست است و در همین چارچوب، استفاده از رویکردهای نوین مدل‌سازی برای شناسایی تعاملات پیچیده میان اجزای زنجیره، ضروری به‌نظر می‌رسد (Rodríguez-González et al., 2022). در چنین بستری، پویایی‌شناسی سیستم (System Dynamics) به‌عنوان روشی قدرتمند برای تحلیل ساختارهای پیچیده، بازخوردی و غیرخطی سازمان‌ها، قابلیت تحلیل دقیق تعاملات متغیرهای کلیدی را فراهم می‌آورد (Tetiana et al., 2023).

پژوهش‌های متعددی در سطح جهانی به بررسی اثرات پیاده‌سازی SSCM بر عملکرد سازمان‌ها پرداخته‌اند. برای مثال، وانگ و همکاران با مرور فرا تحلیلی ۵۰ مطالعه تجربی نشان دادند که SSCM تأثیر مثبت و معناداری بر عملکرد اقتصادی، زیست‌محیطی و نوآوری سازمانی دارد (Wang et al., 2023). به‌طور مشابه، مطالعه‌ای توسط ابوالعیگاه و همکاران اثبات کرد که به‌کارگیری الگوریتم‌های هوشمند فراابتکاری می‌تواند طراحی شبکه‌های پایدار را بهینه‌سازی کرده و زمان پاسخگویی زنجیره را کاهش دهد (Abualigah et al., 2023). افزون بر آن، پژوهش‌های تازه‌تر به اهمیت یکپارچگی میان فناوری‌های نوین مانند صنعت ۴.۰ و SSCM نیز پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که تحول دیجیتال و جهت‌گیری فناورانه، بستر مناسبی برای تحقق اهداف پایداری فراهم می‌آورد (Ansary Asha et al., 2023; Samper et al., 2022).

در سطح سیاست‌گذاری، گسترش اقتصاد چرخشی نیز به‌عنوان مکمل SSCM مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. برای نمونه، آلن و همکاران با بررسی پیوندهای مفهومی میان SSCM و اقتصاد چرخشی، تأکید کرده‌اند که هم‌افزایی این دو رویکرد، مرزهای نظری توسعه پایدار را گسترش می‌دهد (Allen et al., 2021). از دیدگاه مالی نیز، برخی مطالعات نظیر تحقیق رودریگز گونزالس تأکید داشته‌اند که پیاده‌سازی اصول SSCM و همسویی با اهداف اقتصاد چرخشی می‌تواند عملکرد مالی شرکت‌ها را بهبود بخشد (Rodríguez-González et al., 2022). از سوی دیگر، چترجی و همکاران در بررسی شرکت‌های کوچک و متوسط (SMEs) نشان داده‌اند که نوآوری مبتنی بر داده‌های بزرگ، با واسطه رهبری فناورانه، قادر به ارتقاء تاب‌آوری زنجیره‌های تأمین در شرایط بحرانی است (Chatterjee et al., 2022).

در ایران نیز طی سال‌های اخیر توجه به پایداری در زنجیره‌های تأمین افزایش یافته است. افشاری در کتاب خود، ضمن مرور مفاهیم SSCM، بر لزوم توسعه یک مدل ایرانی‌سازی شده در این حوزه تأکید می‌کند (Afshari, 2021). اصلانی لیائی و همکاران با بهره‌گیری از هوش مصنوعی، الگویی برای ارزیابی توانمندی‌های SSCM ارائه داده‌اند که بر قابلیت انطباق‌پذیری و پیش‌بینی‌پذیری زنجیره تمرکز دارد

(Aslani Laei et al., 2021). همچنین، سلطانی محمدی و همکاران، با استفاده از رویکرد تطبیقی و الگوریتم‌های خوشه‌بندی، عوامل اثرگذار بر تأمین منابع پایدار در صنایع منتخب را تحلیل کرده‌اند (Soltan Mohammadi et al., 2023).

در همین راستا، رکن‌الدینی و همکاران با استفاده از روش ترکیبی دیمتل-ANP فازی، توانمندسازهای پیاده‌سازی SSCM در بستر صنعت ۴۰ را شناسایی کردند و بعد فناوری را به‌عنوان عامل کلیدی معرفی نمودند (Roknoddini et al., 2023). از منظر موانع، پژوهش رضایی و رجب‌زاده به‌خوبی نشان می‌دهد که پیاده‌سازی SSCM در مناطق صنعتی ایران با چالش‌هایی مانند مقاومت سازمانی، نبود چارچوب‌های سنجش پایداری و کمبود زیرساخت‌های فناورانه روبه‌روست (Rezaei & Rajabzadeh, 2022). چنین یافته‌هایی ضرورت طراحی مدلی دقیق برای تحلیل دینامیک‌های این زنجیره را برجسته‌تر می‌سازد.

یکی دیگر از جنبه‌های مهم در تحلیل SSCM، نقش عوامل اجتماعی در عملکرد سازمانی است. پژوهش‌هایی مانند کار فریتز و همکاران، به بررسی نگرش‌های ذی‌نفعان و درک مشترک از چالش‌های زیست‌محیطی پرداخته و تأکید دارند که موفقیت SSCM در گرو مشارکت فعال اعضای زنجیره در فرآیندهای تصمیم‌گیری است (Fritz, 2022). از سوی دیگر، فونتورا و کوللیو، نقش همکاری‌های بین‌سازمانی را در نوآوری سبز و عملکرد پایدار پررنگ دانسته‌اند و اظهار داشته‌اند که توسعه همکاری‌های افقی و عمودی می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد زنجیره ایجاد کند (Fontoura & Coelho, 2022).

بر پایه دیدگاه‌های جامعه‌محور، وارن نیز در پژوهش خود بر صنعت مد سریع (Fast Fashion) تأکید دارد که علیرغم سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی، تعامل مؤثری با مصرف‌کنندگان و ذی‌نفعان وجود ندارد و این مسئله کاهش اثربخشی برنامه‌های SSCM را در پی داشته است (Wren, 2022). در مقابل، مطالعه مارتینا و همکاران نشان می‌دهد که سازمان‌های دانش‌بنیان، در صورت رفع موانع خلاقیت پایدار، می‌توانند موتور محرک اصلی برای پیاده‌سازی SSCM باشند (Martina et al., 2023).

در کنار الزامات ساختاری، ابعاد کلان نیز در پژوهش‌های اخیر مدنظر قرار گرفته‌اند. برای مثال، دابوس و طراحینی تأکید می‌کنند که اقتصاد اشتراکی، علاوه بر افزایش بهره‌وری منابع، نقش مثبتی در توسعه اقتصادی پایدار و ارتقاء کارایی انرژی در کشورهای توسعه‌یافته داشته است (Dabbous & Tarhini, 2021). همچنین، لی و چونگ نشان دادند که برنامه‌های حمایتی دولت در حوزه SSCM، بر اشتغال‌زایی و بهبود عملکرد اجتماعی شرکت‌ها تأثیرگذار بوده است (Lee & Chung, 2022).

با این وجود، مطالعات پیشین عموماً یا بر یک صنعت خاص متمرکز بوده‌اند یا ابعاد پایداری را به‌صورت جزیره‌ای و ناپیوسته بررسی کرده‌اند. همچنین، کمتر پژوهشی به بررسی هم‌زمان اثرات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی سیاست‌های SSCM با استفاده از روش‌های دینامیکی و سیستمی پرداخته است. در همین زمینه، پژوهش حاضر با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم و شبیه‌سازی رفتار سیستم زنجیره تأمین در طول زمان، درصدد است تا تصویری جامع و بومی‌سازی‌شده از روابط علی و حلقه‌های بازخوردی میان مؤلفه‌های کلیدی مدیریت زنجیره تأمین پایدار و توسعه پایدار در صنایع تولیدی ایران ارائه دهد.

روش پژوهش

روش‌شناسی این مقاله مبتنی بر رویکرد مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم است که یکی از مؤثرترین ابزارها برای تحلیل رفتار سیستم‌های پیچیده و دارای بازخورد در طول زمان به‌شمار می‌رود. این روش، با استفاده از نمودارهای علت و معلولی و جریان-انبار، امکان درک روابط غیرخطی، تأخیرها، و وابستگی‌های متقابل میان متغیرهای کلیدی سیستم را فراهم می‌سازد. در چارچوب این پژوهش، ابتدا شاخص‌های کلیدی مدیریت زنجیره تأمین پایدار و توسعه اقتصادی بر اساس پیشینه نظری و نظر خبرگان شناسایی شده و سپس روابط

میان آن‌ها در قالب مدل مفهومی اولیه ترسیم شده است. هدف از این مرحله، ساختاردهی به سیستم و تعیین حلقه‌های بازخوردی مثبت و منفی میان شاخص‌ها است. ابزار اصلی برای شبیه‌سازی مدل، نرم‌افزار Vensim بوده که قابلیت تحلیل دینامیک سیستم و انجام تحلیل سناریو را دارد. در ادامه، مدل طراحی شده با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از شرکت‌های تولیدی منتخب در ایران، کالیبره و اعتبارسنجی شده است. سپس با تعریف چند سناریوی سیاستی، اثرات راهبردهای مختلف در حوزه مدیریت زنجیره تأمین پایدار بر شاخص‌های توسعه اقتصادی در بازه زمانی معین شبیه‌سازی و تحلیل شده‌اند. نتایج این شبیه‌سازی‌ها امکان ارزیابی تأثیرات بلندمدت تصمیمات مدیریتی را فراهم کرده و به ارائه راهکارهای بهینه برای بهبود عملکرد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در صنایع تولیدی کمک می‌کند. رویکرد پویایی‌شناسی سیستم در این پژوهش به دلیل ماهیت ساختاری و چندبعدی موضوع، انتخاب شده تا از تحلیل‌های ایستا و سطحی فراتر رفته و درک عمیق‌تری از پیچیدگی‌های تصمیم‌گیری در حوزه پایداری زنجیره تأمین فراهم آورد.

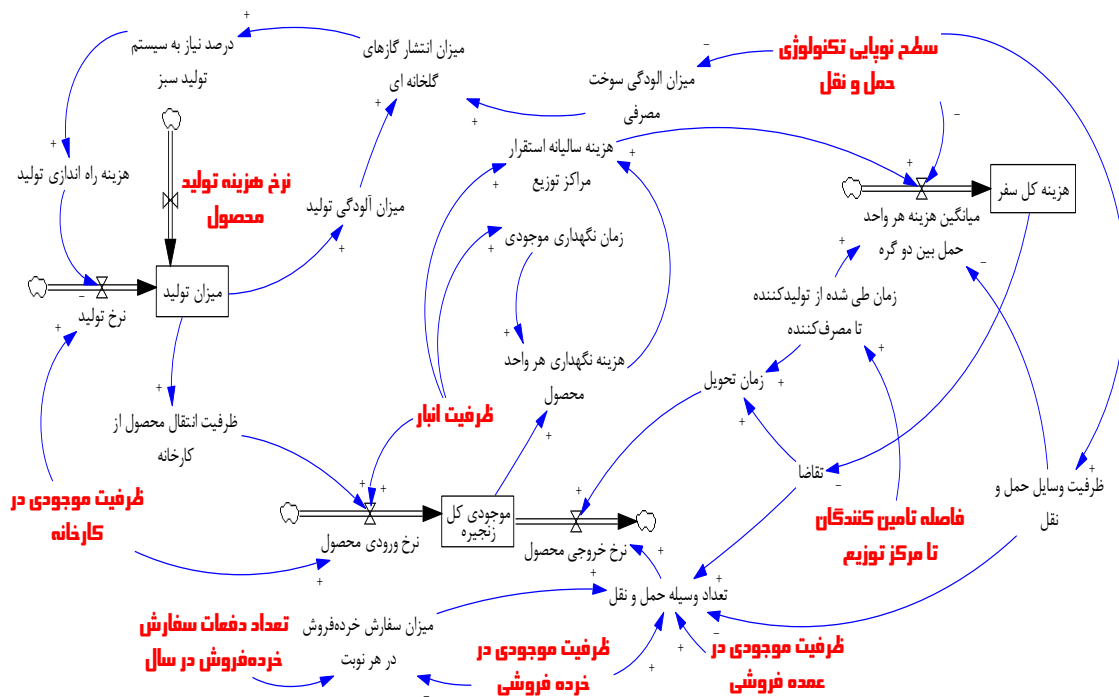
یافته‌ها

در مرحله تجزیه و تحلیل داده‌ها، تمرکز اصلی بر شبیه‌سازی مدل طراحی شده با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم قرار دارد. پس از ترسیم مدل مفهومی و تعیین متغیرهای اصلی، روابط کمی بین متغیرها با بهره‌گیری از داده‌های تجربی، اطلاعات سازمانی، گزارش‌های عملکرد شرکت‌ها و همچنین نظرات خبرگان صنعت به دست آمد. این داده‌ها برای تعیین ضرایب تأثیر، نرخ‌های تغییر، و مقادیر اولیه متغیرها استفاده شد. سپس مدل در محیط نرم‌افزار Vensim پیاده‌سازی گردید و صحت ساختاری آن از طریق تحلیل روابط علی و بازخوردی بررسی شد. در این مرحله، آزمون‌های اعتبارسنجی مانند آزمون رفتار مورد انتظار، آزمون حساسیت و تحلیل همبستگی میان ورودی‌ها و خروجی‌های مدل به کار گرفته شد تا از قابلیت پیش‌بینی و تطابق نتایج با واقعیت اطمینان حاصل گردد. در ادامه، برای تحلیل دینامیکی سیستم، چند سناریوی مختلف مدیریتی تعریف شد که شامل استراتژی‌های متفاوت در زمینه کاهش مصرف انرژی، بهبود شرایط کاری، افزایش بهره‌وری منابع، و ارتقاء فناوری‌های زیست‌محیطی بود. نتایج شبیه‌سازی‌ها برای هر سناریو در بازه زمانی مشخصی مورد بررسی قرار گرفت و شاخص‌های کلیدی توسعه پایدار اقتصادی مانند کاهش هزینه‌های عملیاتی، افزایش بازده اقتصادی، کاهش آلاینده‌ها و بهبود شاخص‌های اجتماعی تحلیل شدند.

معیارهای حاصل از بررسی‌های کتابخانه‌ای و نظرات خبرگان، که در جدول ۱ آورده می‌شود، در مدل وارد شده و روابط بین آن‌ها به صورت شکل ۱ بیان می‌شود. در شکل ۱ تمامی متغیرهای حالت، نرخ و کمکی معرفی شده در جدول ۱ روابط میان این متغیرها، نشان داده شده است.

شکل ۱

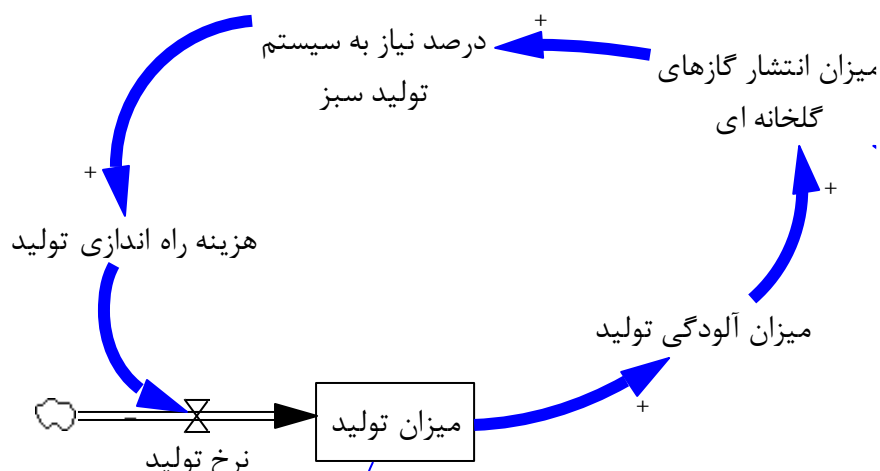
مدل حالت-جریان مسئله تحقیق

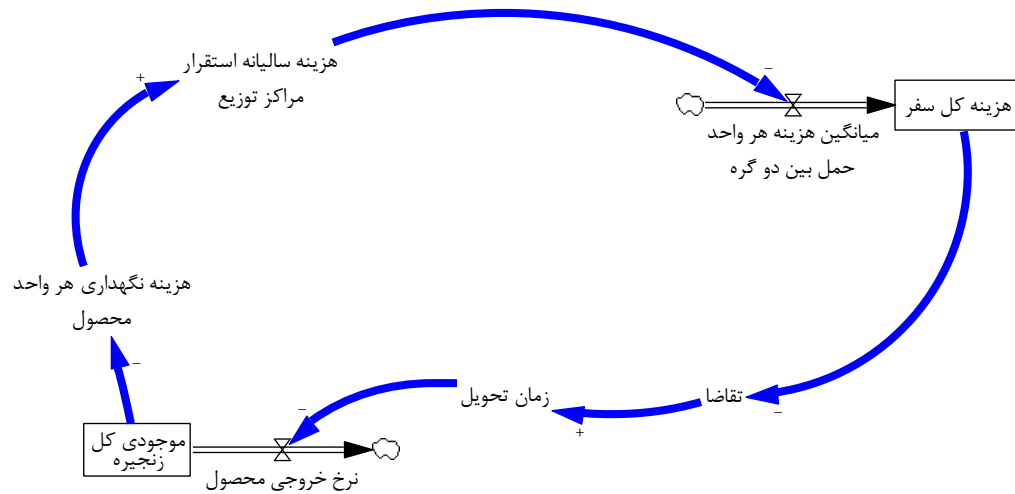


حلقه‌های مهم مدل در شکل ۲ و ۳ نمایش داده شده است.

شکل ۲

حلقه اول





گريشته (۲۰۱۹) در مطالعات خود نشان داده اند که خطوط توليد، در زمانی که تجهيزات به روز نباشند و از سوخت هایي مانند سوخت های فسیلی استفاده کنند، آلودگی ایجاد می کنند و این آلودگی ها منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه ای می گردد. از طرفی بیان می دارند که این آلودگی ها با میزان زمان توليد و در نتیجه میزان توليد رابطه مستقیم دارد و با افزایش میزان توليد، افزایش می یابد (یوگت، ۲۰۱۹)، بیان می دارند که با گسترش صنعت و افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه ای، فشارهای قانونی و اجتماعی به کارخانجات جهت کاهش آلودگی، افزایش می یابد و با افزایش این فشار، کارخانجات هرچه بیشتر نیاز به سیستم های توليد سبز را احساس می کنند و برای ایجاد چنین سیستمی نیاز به تغییر خطوط توليد می باشد و این تغییر هزینه راه اندازی را افزایش می دهد. افزایش هزینه راه اندازی سبب افزایش استفاده از منابع سازمان می گردد و با کاهش منابع قابل استفاده، نرخ توليد نیز به دلیل کاهش منابع، کاهش می یابد. مشخص است که کاهش نرخ توليد میزان توليد را کاهش می دهد. همانگونه که نشان داده شد، افزایش میزان توليد پس از طی حلقه مطرح شده سبب کاهش میزان توليد می شود. هرچه میزان توليد بیشتر شود، نیازمند افزایش ظرفیت انتقال محصول از کارخانه هستیم چراکه اگر محصولات در کارخانه بماند و حجم آن زیاد شود، باید توليد کم شود چون جایی برای محصولات جدید نیست. در نتیجه با افزایش خروج از کارخانه، ورود محصول به زنجیره تأمین افزایش می یابد و موجودی کل زنجیره افزایش می یابد. در بخش دیگر مدل، مارلبا (۲۰۱۹) در مقاله خود نشان داده اند که افزایش هزینه توزیع که یکی از موارد تاثیرگذار بر آن هزینه کل سفر کالا است، باعث می گردد تا تقاضا کاهش یابد. از طرفی هر چه تقاضا کاهش یابد به دلیل کاهش اقلام تحویلی و کاهش مسیرهای پخش و همچنین با کاهش زمان طی شده از توليدکننده به مصرف کننده، زمان تحویل نیز کاهش می یابد و کاهش این زمان باعث می گردد که سیستم حمل و نقل با سرعت بیشتری به محل اول خود بازگردد و با بارگیری مجدد این مسیر را مجدداً آغاز کند، بنابراین نرخ خروجی محصول افزایش می یابد. با افزایش نرخ خروجی، میزان موجودی کاهش می یابد و هر چه

موجودی کمتر باشد هزینه ثابت نگهداری بر مقدار کمتری محصول اعمال می‌گردد و سبب افزایش هزینه نگهداری هر واحد محصول می‌شود. هزینه نگهداری همچنین از زمان نگهداری محصول نیز، تاثیر می‌پذیرد و هرچه این زمان افزایش یابد، هزینه نگهداری نیز افزایش می‌یابد که یکی از دلایل این افزایش هزینه‌های مربوط به خواب سرمایه است. از طرفی، ظرفیت انبار نیز در این بخش مهم است، زیرا اگر ظرفیت انبار کافی نباشد، نیاز است که از انبارهای اجاره‌ای استفاده شود که این عمل نیز هزینه را افزایش می‌دهد. مشخص است که با افزایش این هزینه، هزینه سالیانه استقرار نیز افزایش می‌یابد. از طرفی هزینه سالانه استقرار به دلیل فاصله محل استقرار بر میانگین هزینه هر واحد حمل‌ونقل به صورت مستقیم تاثیر می‌گذارد. به عبارتی هرچه فاصله کمتر باشد چرخه بازگشت وسایل نقلیه سریعتر انجام می‌پذیرد و با کاهش این زمان، بنابر توضیحات موجودی کاهش و هزینه افزایش می‌یابد. به طور معمول مکان‌هایی که به مصرف‌کننده نزدیک‌تر باشد به دلیل فاصله کمتر از مناطق شهری، هزینه بیشتری دارد. مورد دیگری که بر این متغیر تاثیر می‌گذارد ظرفیت وسایل حمل‌ونقل است چرا که اگر ظرفیت وسایل کم باشد، به این دلیل که هزینه‌ها بر تعداد محصولات منتقل‌شده تقسیم می‌گردد، این هزینه افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش این هزینه نشان دهنده دو مورد است اول کمتر بودن موجودی و دوم کمتر بودن فاصله محل استقرار به محل مصرف‌کننده، که هر دو عامل هزینه واحد حمل‌ونقل را کاهش می‌دهد. این کاهش نیز در نهایت هزینه مسیر را کاهش می‌دهد. از طرفی اگر ظرفیت وسایل حمل و نقل کم باشد، برای انتقال کالاها، به تعداد وسیله حمل و نقل بیشتری نیاز است. این تعداد همچنین به ظرفیت موجودی در عمده فروشی و خرده‌فروشی وابسته است، بدین معنی که اگر ظرفیت این دو کم باشد، نیاز است که هرچه زودتر کالا از انبارشان خارج شود و نیاز به تعداد وسایل بیشتری برای این کار است.

با طراحی این مدل و بررسی تاثیر این متغیرها بر یکدیگر، به صورت جامع که هم بخش تولید، هم بخش‌های موجودی و مسیر و هزینه آن، چنانکه در بالا بیان شد، مورد توجه قرار گرفته است، می‌توانیم با اجرای سیاست‌های متفاوت و بررسی تغییر متغیرها به صورت همزمان در این سه بخش، رفتار مدل را مشاهده کرد و با توجه به این تغییر رفتار، متوجه شد که برای رسیدن به حالت بهینه با توجه به اهداف سه‌گانه بهترین میزان تولید، بهترین مسیر و بهترین حد موجودی، چه عملکردی باید مدنظر قرار گیرد.

پس از ایجاد نمودار جریان انباشت و شبیه سازی سیستم، قبل از استفاده از مدل جهت تحلیل و سناریوپردازی، می‌بایست با استفاده از یک یا چند روش، اعتبار مدل پویای سیستم را مورد آزمون قرار داد. هدف از این مرحله اطمینان یافتن از طراحی درست مدل می‌باشد. مهم ترین اقداماتی که برای اعتبارسنجی مدل پویای سیستم می‌توان در نظر گرفت در ذیل عنوان شده است که در ادامه به تحلیل نتایج هر یک از روش‌های ذکر شده پرداخته شده است.

- بررسی کفایت مرزها^۱: آیا متغیرهای تأثیرگذار اصلی به صورت درون‌زا دیده شده اند؟ آیا محدوده زمانی به طرز مناسبی در نظر گرفته شده است؟

¹ Boundary Adequacy



- ارزیابی ساختار^۱: آیا ساختار مدل با قوانین و روند تصمیم گیری موجود در سیستم سازگاری دارد؟
- سازگاری ابعاد^۲: آیا ابعاد معادلات مورد استفاده در مدل با یکدیگر سازگار می باشند؟
- ارزیابی پارامترها^۳: آیا مقادیر عددی پارامترهای مورد استفاده در مدل با داده های موجود در سیستم سازگار هستند؟
- شرایط غایی^۴: در صورت تغییرات ناگهانی در برخی پارامترها، آیا مدل رفتار و واکنش مناسبی را نشان می دهد؟
- تحلیل حساسیت^۵: آیا با تغییر در پارامترها، مرزها و بازه های زمانی، تغییرات قابل توجهی در مقادیر عددی، رفتار و سیاست های حاصله مشاهده می شود؟
- تولید مجدد رفتار^۶: یکی از مهم ترین تست های موجود تولید مجدد رفتار (مقایسه با داده های تاریخی) است. در این آزمون مشخص می شود که متغیرهای مدل تا چه حد می توانند مقدار داده های تاریخی را بازسازی کنند.
- در ادامه نتایج بررسی هر یک از موارد اشاره شده در بالا به منظور بررسی اعتبار مدل پویای سیستم توسعه یافته بررسی شده است.

۴-۲. آزمون کفایت مرز

برای بررسی تاثیر متغیرها بر مدل، در مراحل بعد با حذف هر کدام از آنها، تاثیرشان را بر کل مدل نمایش می دهیم. در شکل ۴ تاثیر حذف عامل ظرفیت موجودی در کارخانه نشان داده شده است. این عامل به صورت غیرمستقیم بر میزان تولید تاثیر دارد. حذف این متغیر به معنی نادیده گرفتن آن در شبیه سازی است (و نه عدم وجود این متغیر در دنیای واقعی). این بار مشاهده می گردد که این متغیرها به شدت از هم تاثیر می پذیرند و با حذف این عامل میزان تولید به چه میزان کاهش می یابد.

¹ Structure Assessment

² Dimensional Consistency

³ Parameter Assessment

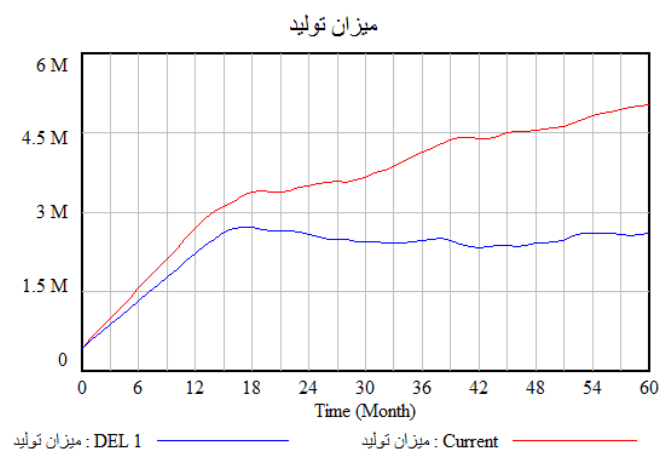
⁴ Extreme Condition

⁵ Sensitivity Analysis

⁶ Reproduction

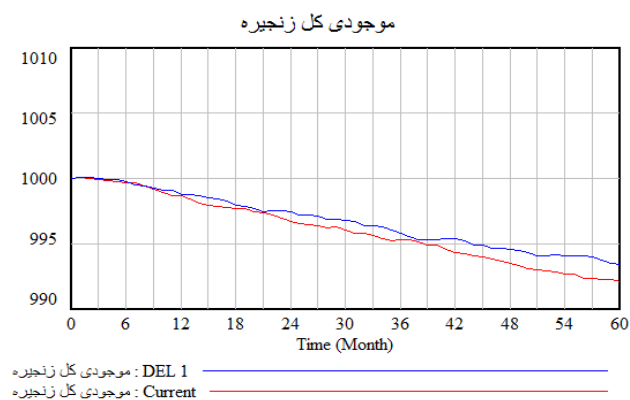
شکل ۴

تاثیر حذف عامل ظرفیت موجودی بر میزان تولید



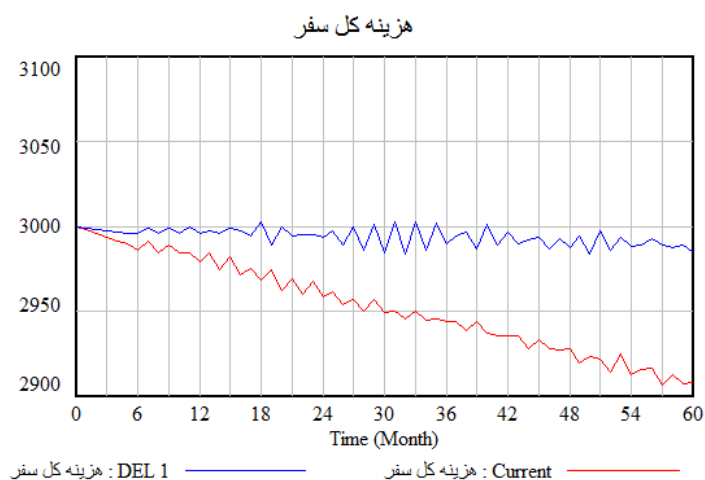
شکل ۵

تاثیر حذف عامل ظرفیت انبار بر متغیر موجودی کل زنجیره



نادیده گرفتن این عامل نیز به افزایش موجودی کل زنجیره منجر می‌گردد. در شکل ۶ تاثیر حذف عامل سطح نوپایی تکنولوژی حمل و نقل بر هزینه کل سفر نشان داده شده است.

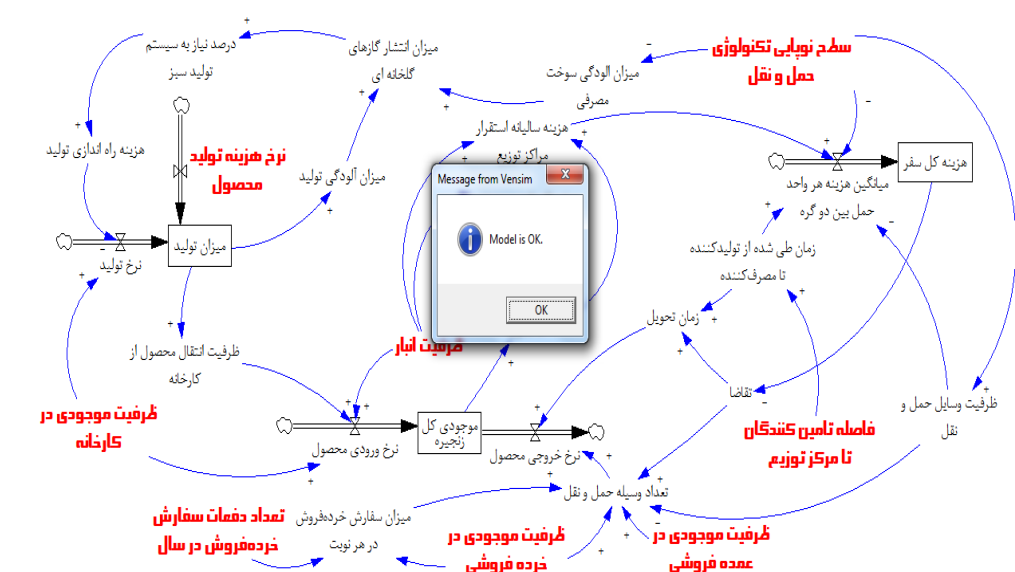
تأثیر حذف سطح نوپایی تکنولوژی حمل و نقل بر هزینه کل سفر



در این شکل نشان داده شده است که حذف این متغیر تا چه میزان می‌تواند بر عامل هزینه کل سفر موثر باشد و آن را افزایش دهد.

اعتبارسنجی ساختار بدین معنی است که روابط مورد استفاده در مدل به مقدار کافی روابط واقعی در ارتباط به هدف پژوهش را مدنظر قرار داده است. از آنجا که در این تحقیق معادلات مربوط به مدل در محیط نرم افزار ونسیم نوشته شده است، صحیح بودن ساختار معادلات مدل، توسط نرم افزار تأیید شد.

صحت ساختار معادلات در نرم افزار ونسیم



پارامترها و فاکتورهای مدل در این پژوهش با استفاده از ارزیابی مقایسه‌ای با مدل مرجع انجام شده است و در آخر با مشاوره خبرگان این موارد تأیید شده است. این پارامترها پس از حذف موارد مشابه به صورت جدول زیر معرفی می‌شوند.

جدول ۱

پارامترهای مدل

ردیف	متغیر	حالت	نرخ	کمکی
۱	نرخ تولید		*	
۲	میزان تولید	*		
۳	ظرفیت انتقال محصول از کارخانه			*
۴	هزینه راه اندازی تولید			*
۵	نرخ هزینه تولید محصول		*	
۶	میزان آلودگی تولید			*
۷	زمان نگهداری موجودی			*
۸	موجودی کل زنجیره	*		
۹	ظرفیت انبار			*
۱۰	نرخ ورودی محصول		*	
۱۱	هزینه نگهداری هر واحد محصول			*
۱۲	ظرفیت موجودی در خرده فروشی			*
۱۳	ظرفیت موجودی در کارخانه			*
۱۴	ظرفیت موجودی در عمده فروشی			*
۱۵	هزینه سالیانه استقرار مراکز توزیع			*
۱۶	میزان انتشار کربن و گازهای گلخانه ای			*
۱۷	میزان آلودگی سوخت مصرفی			*
۱۸	میانگین هزینه هر واحد حمل بین دو گره		*	
۱۹	زمان طی شده از تولیدکننده تا مصرف کننده			*
۲۰	نرخ خروجی محصول		*	
۲۱	هزینه کل سفر	*		
۲۲	فاصله تامین کنندگان تا مرکز توزیع			*
۲۳	زمان تحویل			*
۲۴	تعداد وسیله حمل و نقل			*
۲۵	تقاضا			*
۲۶	ظرفیت وسایل حمل و نقل			*
۲۷	میزان سفارش خرده فروش در هر نوبت			*
۲۸	تعداد دفعات سفارش خرده فروش در سال			*
۲۹	سطح نوپایی تکنولوژی حمل و نقل			*
۳۰	درصد نیاز به سیستم تولید سبز			*
۳۱	نرخ بازدهی مورد انتظار	*		
۳۲	ریسک مورد انتظار	*		
۳۳	نقدشوندگی سرمایه گذاری	*		
۳۴	ارزش گذاری	*		
۳۵	زمان رسیدن به نقطه سر به سر	*		



۳۶	ساختار مالی کسب و کار	*
۳۷	میزان تناسب VC با کسب و کار (فناوری/محصول/بازار/صنعت)	*
۳۸	مرحله سرمایه گذاری	*
۳۹	توانایی سرمایه گذار جهت ایجاد ارزش افزوده برای کسب و کار	*
۴۰	موقعیت جغرافیایی کسب و کار نوپا	*
۴۱	تناسب کسب و کار و محصول، با سبد سرمایه گذاری فعلی صندوق	*

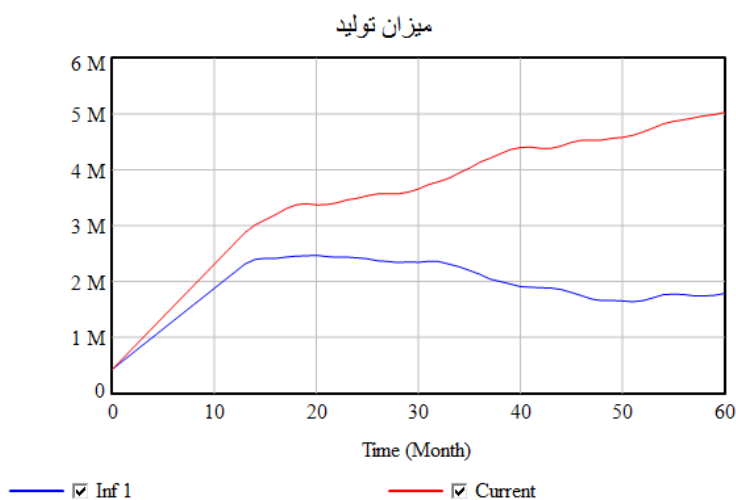
در این آزمون به بررسی رفتار مدل در شرایطی که ورودی‌های مدل در شرایط حدی قرار دارند، یعنی زمانی که در کمترین حد خود و یا بیشترین حد خود هستند، پرداخته می‌شود. در این بررسی، ملاحظه می‌گردد که مدل در این شرایط نیز پایدار است یا خیر. در بخش آزمون کفایت مرز وضعیت متغیرهایی در حالت بینهایت (حداقل و حداکثر مقدار) بررسی شد.

وضعیت اول: کاهش ظرفیت موجودی در کارخانه به سمت صفر شکل ۸

مشاهده می‌شود که میزان تولید کاهش می‌یابد.

شکل ۸

رفتار مدل در حالتی که ظرفیت موجودی در کارخانه نزدیک به صفر است

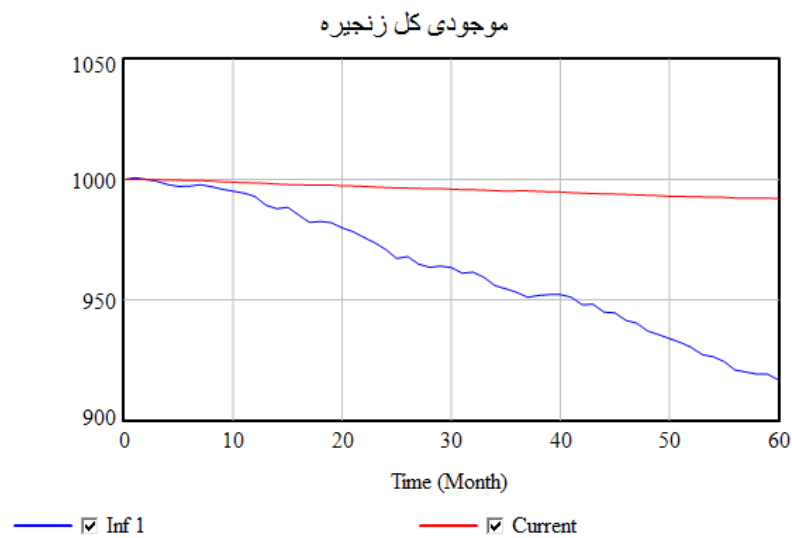


اگر ظرفیت موجودی در کارخانه بسیار پایین بیاید، به دلیل عدم وجود فضا در محوطه کارخانه، امکان تولید زیاد وجود ندارد که این امر برخلاف یکی از مهمترین اهداف پژوهش است.

وضعیت دوم: کاهش ظرفیت انبار به سمت صفر (شکل ۹).

شکل ۹

رفتار مدل در حالات حدی ظرفیت انبار

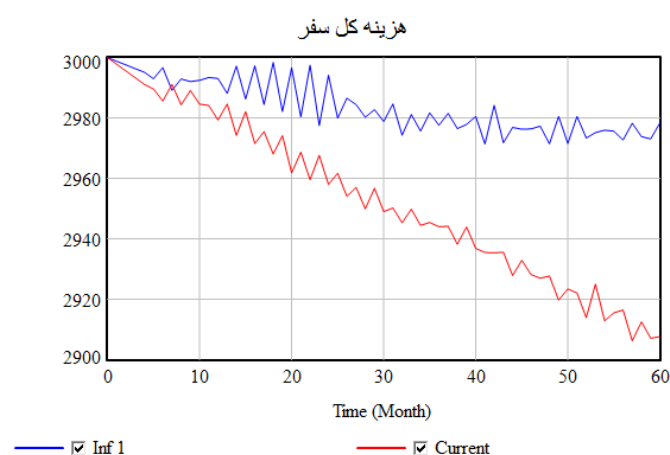


اگر ظرفیت انبار به سمت پایین میل کند همانگونه که در این شکل نشان داده شده است، موجودی کل زنجیره به صورت فوق العاده‌ای به سمت پایین حرکت می‌کند که این اتفاق می‌تواند به کمبود بینجامد.

وضعیت سوم: سطح نوپایی تکنولوژی حمل و نقل در بدترین حالت خود قرار دارد (شکل ۱۰).

شکل ۱۰

رفتار مدل در حالات حدی سطح نوپایی تکنولوژی حمل و نقل



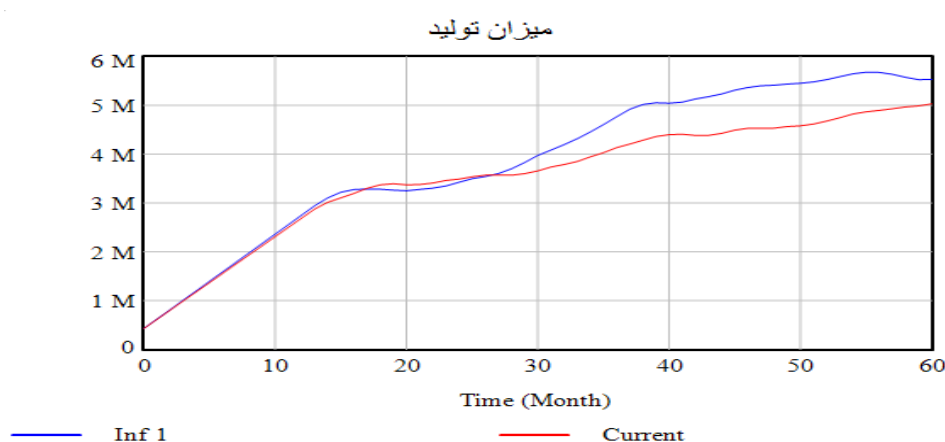
در شکل ۱۰ نشان داده شده است که اگر سطح نوپایی تکنولوژی حمل و نقل به پایین ترین حد خود برسد هزینه کل سفر به شدت افزایش می‌یابد.



برای پاسخ گویی به این مسئله که آیا این مدل، رفتار سیستم را در شرایط واقعی بازسازی و نمایان می کند یا نه، با استفاده از آزمون بازتولید رفتار، به ارزیابی پرداخته می شود. با توجه به اینکه محقق معتقد است که با توجه به بررسی های گسترده مطالعات پیشین، این تحقیق، متغیرهای اثرگذار بر میزان تولید، موجودی کل زنجیره و هزینه کل سفر را در برگرفته است، لذا قادر می باشد که رفتار سیستم را پس از شناسایی معیارها پیش بینی نماید. در شکل های ۱۱ تا ۱۳ نشان داده شده است که با کنترل و کاهش نرخ هزینه تولید محصول به ترتیب می توان میزان تولید را افزایش و موجودی کل زنجیره و هزینه کل سفر را کاهش داد.

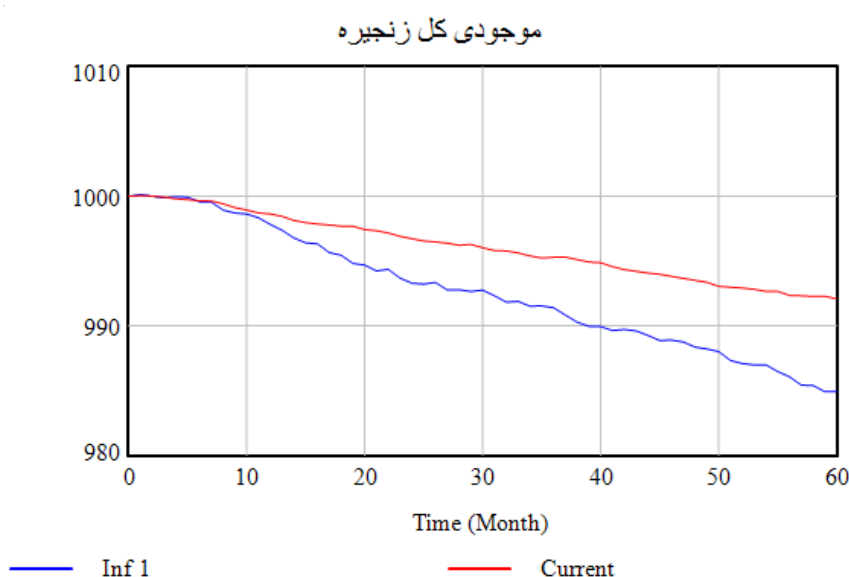
شکل ۱۱

میزان تولید



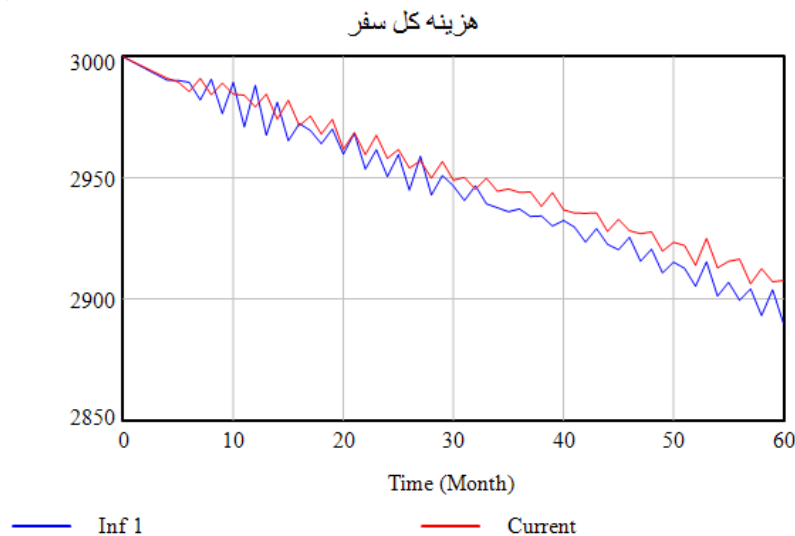
شکل ۱۲

موجودی کل زنجیره



شکل ۱۳

هزینه کل سفر



در مرحله بعد از شبیه سازی سیستم و بررسی رفتار هر یک از متغیرها، بایستی به بررسی تغییر متغیرها و رفتار پیش آمده متناسب مربوط به آن توسط سیستم پرداخته می شود. این موضوع با توجه به ایجاد تغییرات در پارامترها در بخش های پیشین و در شکل های مربوط به این تغییرات، آزموده و نشان داده شده است.

در آخرین گام و پس از تحلیل و بررسی متغیرهای مدل و تعیین میزان و نوع اثرگذاری آن بر روی متغیرهای اصلی مورد هدف پژوهش، زمان آن است که با تعریف سناریوهای متفاوت، با تعیین مقادیر مختلف برای متغیرهای تاثیرگذار، مسیر را برای رسیدن به استراتژی های کاربردی، هموار ساخت. در این تحقیق با توجه به نظر خبرگان و با توجه به برخی از مقالات، ۴ سناریو مختلف برای بررسی نتایج حاصل با اعمال این تغییرات، مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر همین اساس در شکل ۱۴، ۱۵ و ۱۶-۴ این سناریوها نشان داده شده است. این ۴ سناریو با در نظر گرفتن متغیرهایی که سیستم در حال حاضر قادر به تغییر آنهاست، متغیرهایی که سیستم درباره آن تصمیم نمی گیرد و توسط محیط خارجی اعمال می شود و همچنین ترکیبی از مقادیری که تصمیم گیرندگان اعلام داشته اند که این ترکیب متغیرها قابل اجراست نوشته شده اند.

در سناریوی ۱، سعی شده است که با تغییر مقادیر متغیرها بر اساس نظر اولیه خبرگان، تاثیر این تغییرات بر مدل را مشاهده کرد. این سیاست بر کاهش هزینه حمل و نقل با افزایش سطح نوپایی تکنولوژی حمل و نقل متمرکز می شود. در این سناریو تلاش شده است که بررسی شود، در صورتیکه سطح نوپایی تکنولوژی حمل و نقل، افزایش یابد، آیا هزینه حمل و نقل کاهش می یابد یا خیر؟ و اگر این هزینه کاهش یابد، آیا کل زنجیره تامین از این کاهش، منفعت می برد یا خیر.



در سناریوی ۲، تلاش شد تا بررسی شود که آیا تمرکز بیشتر، بر متغیرهای موجودی کارخانه، خرده فروش و عمده فروش و در نتیجه سیاست تمرکز بر موجودی چه تغییری در نتایج مدل ایجاد می کند. برای این کار با افزایش حجم تولید و ظرفیت انبار، موجودی کارخانه افزایش می یابد. افزایش مقدار نرخ تولید و ظرفیت موجودی در کارخانه این سناریو را عملی می کند. با این افزایش به دلیل افزایش حجم کالای در دسترس می توان موجودی خرده فروش و عمده فروش را افزایش داد و یا برای پوشش فروش محصولات تولیدی تعداد آن ها را افزایش داد.

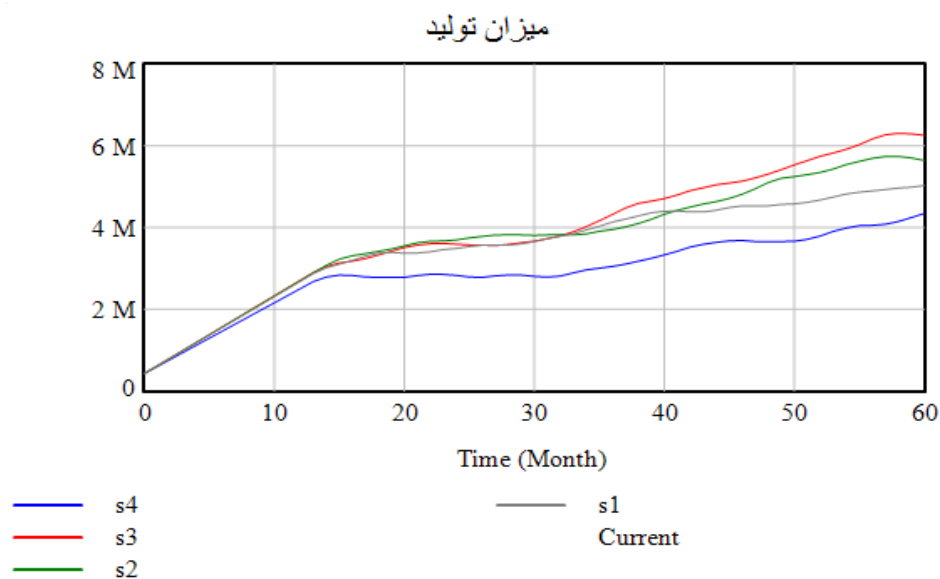
در سناریوی ۳، فرض شده است که مقدار متغیر نرخ هزینه تولید محصول، کاهش می یابد و بررسی می شود که با این کاهش چه تغییری در مدل و مقادیر متغیرهای حالت اتفاق می افتد. برای کاهش نرخ هزینه تولید محصول سیاست های مختلفی را می توان پیاده کرد از قبیل اجرای فرآیندها به صورت بهره ور از طریق مهندسی مجدد فرآیندها و افزایش ظرفیت انبار و در نهایت افزایش ظرفیت موجودی از طریق سود حاصل از این کاهش، تعیین این سیاست ها و نحوه اجرای آن و بررسی تاثیرات آن، را می توان در تحقیقات آتی مورد ارزیابی قرار داد.

در سناریوی ۴، تلاش شده است که بررسی شود که آیا اجرای همزمان سه سیاست پیشین به صورت همزمان، اهداف پروژه را بهینه می کند یا خیر؟ در این سناریو بررسی می شود که آیا نیاز است برای اجرای تغییرات به صورت همزمان، هزینه و انرژی صرف کرد یا صرف زمان، انرژی و هزینه برای بهبود همه موارد به صورت همزمان، مقرون به صرفه نخواهد بود.

با در نظر گرفتن این سناریوها مجدداً مدل اجرا می شود و تغییرات متغیرهای حالت در این ۴ سناریو با توجه به تغییر متغیرهای جدول ۲ بر اساس سناریوهای این جدول شکل نتایج برای متغیر حالت میزان تولید، موجودی کل زنجیره و هزینه کل سفر ترسیم شده است (شکل ۱۴، ۱۵ و ۱۶).

شکل ۱۴

مدل تخمین استاندارد «عوامل کلیدی موفقیت در استقرار مدیریت زنجیره تأمین سبز»



مقادیر متغیر میزان تولید، در زمان وقوع سناریوهای تحقیق در طول ۵ سال در جدول ۲-۴، آورده شده است:

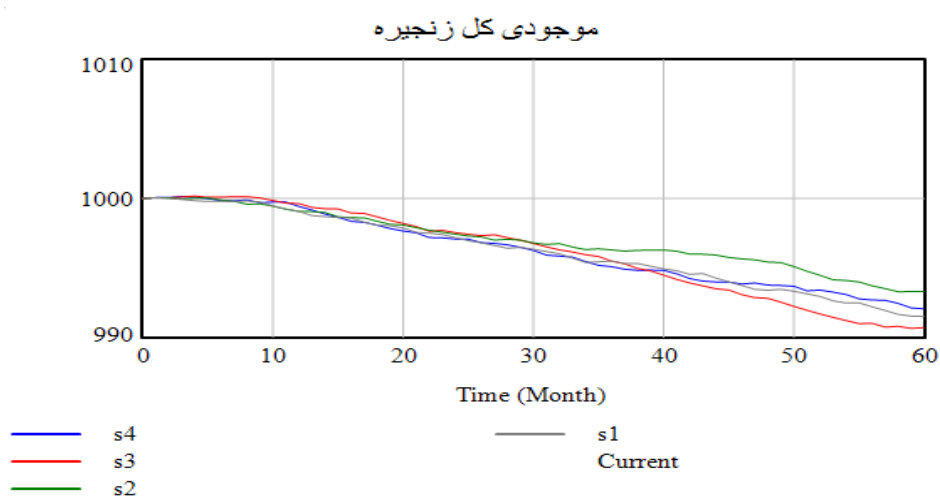
جدول ۲

مقادیر متغیر میزان تولید، در زمان وقوع سناریوهای تحقیق

سناریو	سال اول	سال دوم	سال سوم	سال چهارم	سال پنجم
سناریو ۱	۲,۶۸۸,۶۸۰	۳,۴۹۱,۸۰۰	۴,۱۳۶,۲۳۰	۴,۵۳۶,۲۰۰	۵,۰۳۲,۴۸۰
سناریو ۲	۲,۷۰۴,۷۶۰	۳,۷۰۰,۸۴۰	۳,۹۵۴,۹۷۰	۵,۱۰۶,۳۱۰	۵,۶۴۶,۹۸۰
سناریو ۳	۲,۷۱۵,۵۶۰	۳,۵۹۴,۷۲۰	۴,۳۲۳,۳۳۰	۵,۳۱۳,۴۵۰	۶,۲۶۲,۷۷۰
سناریو ۴	۲,۵۰۷,۹۶۰	۲,۸۳۳,۰۵۰	۳,۰۴۹,۵۹۰	۳,۶۶۳,۲۷۰	۴,۳۴۷,۵۳۰

شکل ۱۵

سناریوهای مختلف در متغیر حالت موجودی کل زنجیره





مقادیر متغیر موجودی کل زنجیره، در زمان وقوع سناریوهای تحقیق در طول ۵ سال در جدول ۴، آورده شده است:

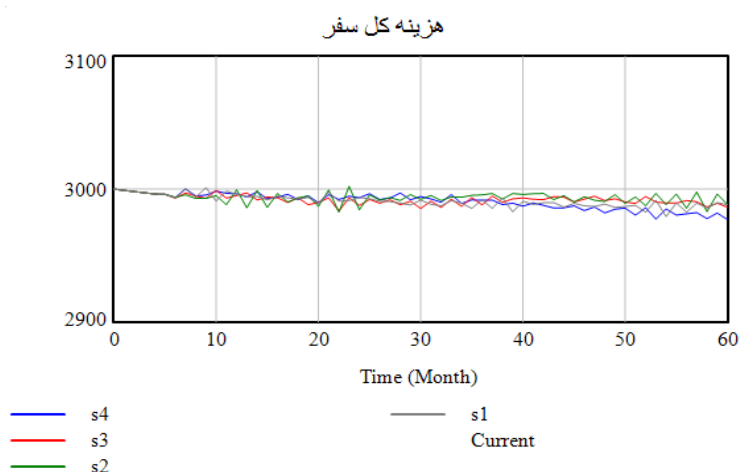
جدول ۳

مقادیر متغیر موجودی کل زنجیره، در زمان وقوع سناریوهای تحقیق

سناریو	سال اول	سال دوم	سال سوم	سال چهارم	سال پنجم
سناریو ۱	۹۹۹.۰۸	۹۹۷.۱۹	۹۹۵.۵۰	۹۹۳.۳۹	۹۹۱.۵۰
سناریو ۲	۹۹۹.۰۷	۹۹۷.۴۳	۹۹۶.۳۰	۹۹۵.۴۳	۹۹۳.۳۰
سناریو ۳	۹۹۹.۶۴	۹۹۷.۵۴	۹۹۵.۴۹	۹۹۲.۸۱	۹۹۰.۷۰
سناریو ۴	۹۹۹.۴۳	۹۹۷.۰۹	۹۹۵.۰۹	۹۹۳.۷۶	۹۹۲.۰۵

شکل ۱۶

سناریوهای مختلف در متغیر حالت هزینه کل سفر



مقادیر متغیر هزینه کل سفر، در زمان وقوع سناریوهای تحقیق در طول ۵ سال در جدول ۵ آورده شده است:

جدول ۴

مقادیر متغیر هزینه کل سفر، در زمان وقوع سناریوهای تحقیق

سناریو	سال اول	سال دوم	سال سوم	سال چهارم	سال پنجم
سناریو ۱	۲,۹۹۶.۲۳	۲,۹۹۳.۶۸	۲,۹۹۱.۹۶	۲,۹۸۸.۶۹	۲,۹۸۸.۲۹
سناریو ۲	۲,۹۹۹.۴۸	۲,۹۸۴.۴۳	۲,۹۹۵.۷۱	۲,۹۹۰.۷۳	۲,۹۸۸.۳۴
سناریو ۳	۲,۹۹۵.۱۹	۲,۹۸۷.۷۰	۲,۹۸۸.۱۰	۲,۹۹۱.۳۳	۲,۹۸۶.۳۸
سناریو ۴	۲,۹۹۶.۵۱	۲,۹۹۳.۵۴	۲,۹۹۱.۶۰	۲,۹۸۲.۰۷	۲,۹۷۷.۰۴

در شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶، و جداول ۲ و ۳ و ۴ نتیجه شبیه سازی با ۴ سناریوی تعریف شده نشان داده شده است. نتایج حاکی از این امر است که با اینکه تصور می‌شود بهبود همه جانبه به صورت همزمان، می‌تواند بهترین نتایج را حاصل کند، اما با کاهش تمرکز، مشاهده می‌شود که موجودی زیادی در زنجیره باقی مانده و خارج نمی‌شود، به همین دلیل میزان تولید کاهش می‌یابد و به این دلیل که موجودی زیادی خارج نمی‌شود، هزینه کل سفر نیز به نسبت کاهش می‌یابد که این کاهش دلیلی بر بهبود نیست. از طرفی، این تصاویر نشان‌دهنده این موضوع هستند که کاهش نرخ هزینه تولید محصول سبز می‌تواند منجر به افزایش حجم تولید محصولات سبز و موجودی آن گردد، اما به دلیل کاهش هزینه تولید و در نتیجه هزینه تمام شده محصول و همچنین افزایش کیفیت محصول سبز، رضایت مصرف کنندگان افزایش می‌یابد و این افزایش منجر به افزایش تقاضا می‌شود. این افزایش تقاضا، نرخ خروجی محصول را افزایش می‌دهد و این افزایش نیز، موجودی کل زنجیره را کاهش می‌دهد. بنابراین برای اینکه بتوان به این بهینگی رسید باید سیاست‌هایی اعمال شود که نرخ هزینه تولید محصول سبز کاهش یابد. با در نظر گرفتن مقادیر متغیرها در جداول فوق که بر اساس تاثیر تغییرات با توجه به سناریوها، مقدار موجودی در پایان ۵ سال، ۹۹۰،۷۰ و میزان تولید ۶،۲۶۲،۷۷۰ مشاهده می‌گردد ثابت می‌شود که کاهش نرخ هزینه تولید محصول و افزایش ظرفیت انبار و در نهایت افزایش ظرفیت موجودی که شاید بتوان اینگونه فرض کرد که با استفاده از سود حاصل از این کاهش هزینه باشد، می‌تواند بهترین استراتژی جهت پیاده‌سازی در صنعت آلومینیوم باشد. نکته جالب دیگر این است که با اینکه هزینه کل سفر در پایان سال پنجم نسبت به سناریو شماره یک و دو، تغییر فاحشی ندارد، اما به دلیل افزایش حجم تولید و موجودی و همچنین افزایش نرخ خروجی که نشان‌دهنده افزایش فروش است، اجرای این سناریو (سناریوی ۴)، کاملاً مطلوب است.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش که مبتنی بر مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم روابط میان مدیریت زنجیره تأمین پایدار و توسعه پایدار در صنایع تولیدی ایران است، تصویری پویا و علی از نحوه تأثیرگذاری متغیرهای کلیدی در حوزه زنجیره تأمین ارائه می‌دهد. نتایج تحلیل سناریوهای مختلف نشان داد که کاهش هزینه تولید، افزایش ظرفیت انبار و به‌کارگیری فناوری‌های نوین حمل‌ونقل، نقش مؤثری در بهبود نرخ تولید، کاهش هزینه کل سفر و کاهش موجودی مازاد زنجیره دارند. به‌ویژه در سناریوی سوم که تمرکز اصلی بر کاهش نرخ هزینه تولید قرار داشت، میزان تولید افزایش معناداری یافت و هزینه کل سفر نیز کاهش چشمگیری پیدا کرد. این نتیجه با یافته‌های پژوهش (Wang et al., 2023) همخوانی دارد که نشان داد کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بهره‌وری عملیاتی از طریق SSCM، تأثیر مثبتی بر عملکرد اقتصادی بنگاه دارد.

از سوی دیگر، نتایج سناریوی چهارم که اجرای همزمان همه سیاست‌ها را شبیه‌سازی می‌کرد، نشان داد که گرچه چنین رویکردی در ظاهر جامع به نظر می‌رسد، اما در عمل می‌تواند منجر به انباشت مازاد موجودی و کاهش نرخ تولید شود. این یافته قابل تبیین با تحلیل (Rezaei & Rajabzadeh, 2022) است که هشدار داده بود پیاده‌سازی همزمان و بدون اولویت‌بندی راهبردهای پایدار می‌تواند منجر به کاهش کارایی می‌شود بلکه باعث افزایش هزینه‌های سازمانی را دچار اختلال سازد. افزون بر این، افزایش بیش از حد موجودی، نه تنها منجر به کاهش کارایی می‌شود بلکه باعث افزایش هزینه‌های

نگهداری و احتمال فساد اقلام نیز خواهد شد؛ موضوعی که در تحقیق (Shafiei et al., 2020) در خصوص محصولات فاسدپذیر لبنی نیز مورد اشاره قرار گرفته بود.

در زمینه ظرفیت انبار، یافته‌ها تأیید کردند که افزایش این ظرفیت می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی توازن بین تولید و توزیع ایفا کند. در سناریویی که ظرفیت انبار ارتقاء یافت، موجودی زنجیره به سطح مطلوب‌تری رسید و هزینه حمل‌ونقل نیز به دلیل کاهش دفعات حمل بهبود یافت. این موضوع با مطالعات (Abualigah et al., 2023) و (Fritz, 2022) مطابقت دارد که بر اهمیت زیرساخت‌های لجستیکی و قابلیت ذخیره‌سازی در پایداری زنجیره تأمین تأکید کرده‌اند. از منظر فنی نیز، مدل‌سازی رفتار حلقه‌های بازخوردی نشان داد که افزایش ظرفیت انبار می‌تواند به افزایش نرخ خروج محصول از کارخانه منجر شود و از این طریق از انباشته شدن کالا جلوگیری کند.

نقش فناوری در بهبود عملکرد زنجیره نیز در نتایج شبیه‌سازی به‌خوبی مشخص شد. ارتقاء سطح نوپایی فناوری حمل‌ونقل موجب کاهش هزینه کل سفر شد و این نتیجه همسو با یافته‌های (Samper et al., 2022) و (Soltan Mohammadi et al., 2023) است که بیان می‌کنند نوآوری فناورانه به‌ویژه در بخش حمل‌ونقل، نه تنها زمان تحویل و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد بلکه میزان آلاینده‌ها را نیز کنترل می‌کند. به‌علاوه، تطابق زمانی میان ورود و خروج کالاها از حلقه‌های زنجیره نیز در مدل تقویت شد و نشان داد که توسعه فناوری، اثر غیرمستقیم مثبتی بر متغیرهای رفتاری کلان مانند رضایت مشتری و پایداری زیست‌محیطی دارد؛ یافته‌ای که در پژوهش (Fontoura & Coelho, 2022) نیز مشاهده شده است.

یکی از مهم‌ترین نتایج تحلیل دینامیکی مدل، وابستگی پیچیده میان متغیرهای هزینه، ظرفیت و تقاضا بود. در برخی سناریوها مشاهده شد که کاهش هزینه تولید، حتی بدون تغییر در ظرفیت‌ها، منجر به افزایش تقاضا و در نتیجه افزایش نرخ خروج محصول می‌شود. این چرخه بازخورد مثبت نشان می‌دهد که سیاست‌گذاری‌های هدفمند در حوزه کاهش هزینه می‌تواند از طریق افزایش رضایت مصرف‌کننده، به بهبود عملکرد کل زنجیره منجر شود؛ موضوعی که در پژوهش‌های (Ansary Asha et al., 2023) و (Zuleikha & Shafiq, 2023) نیز مورد تأیید قرار گرفته است.

از منظر نظری، یافته‌ها مؤید این است که پیاده‌سازی SSCM در صنایع تولیدی ایران، تنها در صورتی اثربخش خواهد بود که سیاست‌ها به‌صورت تدریجی، اولویت‌مند و متناسب با ظرفیت‌های اجرایی بنگاه‌ها انجام گیرد. اجرای هم‌زمان سیاست‌ها بدون در نظر گرفتن پیچیدگی‌های ساختاری و ظرفیت‌های فنی، می‌تواند منجر به نوسانات شدید در تولید و کاهش کارایی کلی شود؛ نکته‌ای که در مطالعات (Rodríguez-González et al., 2022) و (Lee & Chung, 2022) نیز مطرح شده است. همچنین، تحلیل حساسیت مدل نشان داد که متغیرهایی مانند نرخ تولید و ظرفیت حمل‌ونقل، دارای اثرگذاری بالاتری نسبت به سایر متغیرها هستند که می‌توانند به‌عنوان نقاط کانونی در سیاست‌گذاری مورد استفاده قرار گیرند.

مطالعه حاضر همچنین نقش هوش مصنوعی، کلان‌داده‌ها و الگوریتم‌های پیش‌بینی را در بهبود تصمیم‌گیری‌های زنجیره تأمین برجسته ساخت. با توجه به مطالعاتی مانند (Chatterjee et al., 2022) و (Aslani Laei et al., 2021)، بهره‌گیری از تحلیل داده‌محور و ابزارهای مدل‌سازی پیشرفته، زمینه‌ساز انعطاف‌پذیری، پاسخگویی سریع به نوسانات بازار و کاهش ریسک‌های محیطی خواهد بود. در مدل حاضر نیز، استفاده از داده‌های تجربی، تحلیل بازتولید رفتار، آزمون شرایط حدی و تحلیل حساسیت، توانست اعتبار نتایج را تقویت و کارایی مدل در محیط واقعی را افزایش دهد.

در نهایت، یافته‌ها بر ضرورت همگرایی میان سیاست‌گذاران، مدیران صنعتی و نهادهای فناور تأکید دارد. تنها از طریق درک مشترک و دیدگاه سیستمی نسبت به پایداری است که می‌توان به توسعه‌ای متوازن، نوآور و فراگیر دست یافت (Allen et al., 2021; Stefan &).

Schleper, 2024). از این منظر، رویکردهای تک‌بعدی و متمرکز بر صرفاً بُعد اقتصادی، نه تنها ناکارآمد خواهند بود بلکه ممکن است به تشدید نابرابری‌های اجتماعی یا تخریب‌های زیست‌محیطی منجر شوند. به همین دلیل، طراحی سیاست‌های چندسطحی با مشارکت تمامی ذی‌نفعان، باید در دستور کار قرار گیرد؛ آن گونه که در مطالعات (Rahimi et al., 2020) و (Gholizadeh et al., 2021) نیز توصیه شده است.

یکی از محدودیت‌های مهم این پژوهش، تمرکز آن بر صنایع تولیدی ایران است که ممکن است تعمیم نتایج به سایر کشورها یا بخش‌های خدماتی را محدود سازد. همچنین، مدل‌سازی صورت گرفته به رغم بهره‌گیری از داده‌های معتبر، به ناچار بخشی از متغیرهای اثرگذار را به صورت ثابت در نظر گرفته است که می‌تواند در تحلیل بلندمدت رفتار سیستم اختلال ایجاد کند. محدودیت دیگر به سطح دسترسی به داده‌های دقیق سازمانی مربوط می‌شود که در برخی موارد پژوهشگران را ناچار به استفاده از داده‌های تخمینی یا نظرات خبرگی کرده است. در نهایت، هرچند نرم‌افزار Vensim ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی دینامیکی به شمار می‌رود، اما محدودیت‌هایی در بصری‌سازی و تحلیل‌های هم‌زمان چندبعدی دارد که ممکن است در مطالعات آینده نیازمند توسعه ابزارهای مکمل باشد.

با توجه به پیچیدگی موضوع و تغییرپذیری متغیرهای اقتصادی و زیست‌محیطی، پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی، سناریوهای پویاتر و مبتنی بر داده‌های زنده (real-time) طراحی و اجرا شوند. همچنین توسعه مدل در سطح صنایع خاص مانند صنایع غذایی، نساجی یا فلزی، می‌تواند الگوهای دقیق‌تری از رفتار زنجیره تأمین ارائه دهد. در بخش اجتماعی نیز، افزودن متغیرهایی مانند رضایت کارکنان، عدالت در توزیع منابع و سطح تعامل با جامعه محلی، به غنای مدل کمک خواهد کرد. در نهایت، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تحلیل داده‌های کلان می‌تواند ابعاد جدیدی از هوشمندسازی زنجیره تأمین پایدار را آشکار سازد.

نتایج این پژوهش حاکی از آن است که مدیران صنایع تولیدی باید از اجرای هم‌زمان سیاست‌های متنوع بدون تحلیل اثرات جانبی آن‌ها اجتناب کنند و به جای آن، مسیرهایی هدفمند و مرحله‌بندی‌شده را برای بهبود پایداری طراحی نمایند. پیشنهاد می‌شود که سازمان‌ها، ابتدا اقدام به تحلیل حساسیت متغیرهای خود نمایند و سپس با اولویت‌بندی دقیق، سیاست‌های پایداری را از مهم‌ترین گلوگاه‌ها آغاز کنند. در سطح کلان نیز، تدوین چارچوب‌های پشتیبان دولتی مانند تسهیلات مالیاتی، حمایت‌های زیرساختی و برنامه‌های آموزشی، می‌تواند نقش مؤثری در تسهیل اجرای SSCM داشته باشد. همچنین همکاری با دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و شرکت‌های فناوری برای طراحی مدل‌های بومی‌سازی‌شده، می‌تواند مسیر پایداری را تسریع کند و قابلیت انطباق سازمان‌ها با تحولات آینده را افزایش دهد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ گونه تضاد منافی وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

موازین اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازین و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

شفافیت داده‌ها



داده ها و مآخذ پژوهش حاضر در صورت درخواست از نویسنده مسئول و ضمن رعایت اصول کپی رایت ارسال خواهد شد.

حامی مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

References

- Abualigah, I., Hanandeh, E. S., Zitar, R. A., Thanh, C. L., Khatir, S., & Gandomi, A. H. (2023). Revolutionizing sustainable supply chain management: A review of metaheuristics. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106839>
- Afshari, G. (2021). *Sustainable Supply Chain Management*. Daneshpajhohan Sharif Yar.
- Allen, G., Zhu, Q., & Sarkis, J. (2021). Expanding conceptual boundaries of the sustainable supply chain management and circular economy nexus. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2021.100011>
- Ansary Asha, A., Dulal, M., & Habib, A. (2023). The influence of sustainable supply chain management, technology orientation, and organizational culture on the delivery product quality-customer satisfaction nexus. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2023.100107>
- Aslani Laei, V., Abedi, S., Irajpour, A., & Ehtesham Rathi, R. (2021). Presenting a Model for Evaluating Sustainable Supply Chain Capabilities Based on Artificial Intelligence. *Industrial Management Perspective*(43), 107-129. <https://doi.org/10.52547/jimp.11.3.107>
- Chatterjee, S., Chaudhuri, R., Shah, M., & Maheshwari, P. (2022). Big data driven innovation for sustaining SME supply chain operation in post COVID-19 scenario: Moderating role of SME technology leadership. *Computers & Industrial Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108058>
- Dabbous, A., & Tarhini, A. (2021). Does sharing economy promote sustainable economic development and energy efficiency? Evidence from OECD countries. *Journal of Innovation & Knowledge*, 6(1), 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2020.11.001>
- Fontoura, P., & Coelho, A. (2022). How to boost green innovation and performance through collaboration in the supply chain: Insights into a more sustainable economy. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132005>
- Fritz, M. (2022). A supply chain view of sustainability management. *Cleaner Production Letters*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2022.100023>
- Gholizadeh, H., Jahani, H., Abareschi, A., & Goh, M. (2021). Sustainable closed-loop supply chain for dairy industry with robust and heuristic optimization. *Computers & Industrial Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107324>
- Lee, J. S., & Chung, B. D. (2022). Effects of government subsidy programs on job creation for sustainable supply chain management. *Socio-Economic Planning Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101261>
- Martina, B., Sokół, A., & Figurska, I. (2023). Organizational Barriers of a Knowledge-Based Organization in the Aspect of Sustainable Creativity Development. *Journal of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University*. <https://doi.org/10.15330/jpnu.10.4.46-62>
- Rahimi, A., Rad, A., Alam Tabriz, A., & Motameni, A. (2020). Presenting a Lean Supply Chain Model for Iran's Defense Industries Using Interpretive Structural Modeling. *Industrial Management Journal*, 18(56), 1-49. https://jims.atu.ac.ir/article_10968.html?lang=en
- Rezaei, G., & Rajabzadeh, Z. (2022). Investigating Barriers to Implementing Sustainable Supply Chains Using the BWM Method (Case Study: South Pars Special Economic Energy Zone). 5th International Conference of Interdisciplinary Studies in Management and Engineering,
- Rodríguez-González, R. M., Maldonado-Guzmán, G., Madrid-Guijarro, A., & Garza-Reyes, J. A. (2022). Does circular economy affect financial performance? The mediating role of sustainable supply chain management in the automotive industry. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134670>
- Roknoddini, S. A., Andalib Ardakani, D., Zare Ahmadabadi, H., & Hosseini Bamakan, S. M. (2023). Modeling Enablers of Industry 4.0 in Implementing Sustainable Supply Chains Using Fuzzy DEMATEL-ANP. *Industrial Management Perspective*, 13(49), 141-172. https://jimp.sbu.ac.ir/article_103168.html?lang=en
- Samper, M., Florez, D. G., Borre, J. R., & Ramirez, J. (2022). Industry 4.0 for sustainable supply chain management: Drivers and barriers. *Procedia Computer Science*,
- Shafiei, F., Kazemi, A., Jafarnjad Chaghosh, A., Sazvar, Z., & Amouzadeh Mahdiraji, H. (2020). Presenting a Robust Optimization Model for Sustainable Supply Chains of Perishable Dairy Products. *Production and Operations Management*, 11(3). https://jpom.ui.ac.ir/article_25518.html?lang=en

- Shuhui, J., & Chen, K. (2024). Multidirectional analysis for sustainable development: An examination of sustainable policies, corporate social responsibility, and organizational performance. *Sustainable Development*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sd.2907>
- Soltan Mohammadi, A., Andlib Ardakani, D., Zare Ahmadabadi, H., & Soleimani Zadeh, H. (2023). Presenting a Resource Provisioning Model for Sustainable Supply Chains in Selected Industries Using a Comparative Approach of K-Means, PCA, and Random Forests. *Productivity management*, 17(65), 23-43. https://journals.iau.ir/article_701141.html?lang=en
- Stefan, G., & Schleper, M. C. (2024). Sustainable supply chain management. In *Concise Encyclopedia of Corporate Social Responsibility*. Edward Elgar Publishing. https://www.researchgate.net/publication/377411389_Sustainable_Supply_Chain_Management
- Tetiana, A. V., Volynets, L., & Volynets, Y. (2023). Development of indicators for evaluating the level of sustainable development of logistics organizational structures. *Ekonomika transportnogo kompleksu*.
- Wang, J., Zhu, L., Feng, L., & Feng, J. (2023). A meta-analysis of sustainable supply chain management and firm performance: Some new findings on sustainable supply chain management. *Sustainable production-and-consumption*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.04.015>
- Wren, B. (2022). Sustainable supply chain management in the fast fashion Industry: A comparative study of current efforts and best practices to address the climate crisis. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100032>
- Zuleikha, A., & Shafiq, M. K. (2023). Sustainable Supply Chain Management: Enhancing Environmental and Social Responsibility in Business Operations. https://www.researchgate.net/publication/375603193_Sustainable_Supply_Chain_Management_Enhancing_Environmental_and_Social_Responsibility_in_Business_Operations