



Modeling the Key Factors Influencing Supply Chain Performance in the Distributor Sector

Seyed Reza Moosavi Tabatabaei* , Shahab Bavili 

* Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Raja University, Qazvin, Iran

(Received: 25/05/2024, Revised: 02/07/2025, Accepted: 02/09/2025, Published: 21/09/2025)

DOR: 20.1001.1.20089198.1404.27.87.6.0

ABSTRACT

The supply chain within the distribution sector is confronted with a range of challenges, including demand volatility, supply disruptions, and a lack of information coordination. This study proposes a hybrid modeling framework designed to identify and analyze the key factors that influence supply chain performance in the distribution domain. The model utilizes system dynamics to examine the behavior of these factors over time. To begin, thirteen influential factors—encompassing both traditional and innovative dimensions such as resilience, profitability, responsiveness, and information sharing—were identified through a systematic literature review and expert-driven questionnaires. The relative importance of these factors was determined using two multi-criteria decision-making techniques: the CRITIC method and Simple Additive Weighting (SAW). A conceptual model was developed using Vensim software and subsequently simulated in MATLAB, incorporating real-world data from the detergent manufacturing industry. Optimization was performed using the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), a multi-objective evolutionary algorithm. The results indicate that resilience, with a final weight of 0.24, exerts the most substantial influence on supply chain performance. Furthermore, multiple regression analysis confirmed the statistically significant role of resilience in enhancing system stability and mitigating fluctuations. The proposed model was validated across various scenarios and demonstrates strong potential for generalization to other industries exhibiting similar supply chain configurations.

Keywords: Supply Chain, System Dynamics Modeling, Multi-criteria Analysis, Resilience, NSGA-II

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



* Corresponding Author Email: sr.tabatabaei@raja.ac.ir

مدل سازی عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد زنجیره تأمین در حوزه توزیع کننده

سید رضا موسوی طباطبائی^{۱*}، شهاب باویلی^۲

۱- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رجاء، قزوین، ایران

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رجاء، قزوین، ایران

DOR: 20.1001.1.20089198.1404.27.87.6.0

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱

چکیده

زنجیره تأمین در بخش توزیع با چالش‌هایی مانند نوسان در تقاضا، اختلال در تأمین و عدم هماهنگی اطلاعاتی مواجه است. این مقاله با هدف مدل سازی عوامل مؤثر بر عملکرد زنجیره تأمین در حوزه توزیع کننده، مدلی ترکیبی ارائه می‌دهد که از روش پویایی سیستم برای تحلیل رفتار این عوامل در طول زمان بهره می‌برد. در این پژوهش، ابتدا با مرور نظام‌مند ادبیات و پرسش‌نامه‌های تخصصی، ۱۳ عامل مؤثر شامل عوامل سنتی و نوآورانه مانند تاب آوری، سودآوری، پاسخگویی، اشتراک اطلاعات و... شناسایی شد. اهمیت نسبی این عوامل با استفاده از دو روش چند معیاره CRITIC و SAW انجام شد. مدل مفهومی ابتدا با نرم افزار Vensim طراحی و سپس با استفاده از داده‌های واقعی صنعت شوینده در نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی و با الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) بهینه‌سازی انجام شد. نتایج نشان داد عامل تاب‌آوری با وزن نهایی ۰/۲۴ بیشترین اثر را بر عملکرد زنجیره تأمین دارد. تحلیل رگرسیون چندگانه نیز نقش معنادار این عامل را در بهبود پایداری و کاهش نوسانات تأیید کرد. مدل ارائه شده با سناریوهای مختلف اعتبارسنجی شده و قابلیت تعمیم به سایر صنایع دارای ساختار مشابه را دارد.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین، مدل سازی پویایی سیستم، تحلیل چندمعیاره، تاب‌آوری، NSGA-II

۱- مقدمه

همچنین در بسیاری از پژوهش‌ها، اولویت‌بندی عوامل تنها بر اساس نظرات خبرگان انجام شده و تحلیل پویایی رفتار سیستم انجام نشده است.

پرسش اصلی در این پژوهش، بررسی نحوه تعامل و تأثیر متقابل عوامل کلیدی بر عملکرد توزیع در طول زمان است. نبود چارچوبی که هم در اولویت‌بندی شاخص‌ها و هم در مدل سازی روابط بین متغیرها نگاه سیستمی و پویایی داشته باشد، یکی از شکاف‌های جدی در ادبیات موضوع این پژوهش به شمار می‌رود. پژوهش حاضر باهدف پاسخ به موضوعات مطرح شده، مدلی ترکیبی را ارائه می‌دهد که از دو بخش اصلی برای شناسایی و رتبه‌بندی عوامل کلیدی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۱ و تحلیل رفتار این عوامل در طول زمان با استفاده از پویایی سیستم^۲ است. در این چارچوب، ابتدا مجموعه‌ای از عوامل تأثیرگذار بر عملکرد زنجیره تأمین از طریق مرور

عملکرد سیستم‌های زنجیره تأمین، در بخش توزیع، نقش مهمی در بهبود بهره‌وری و افزایش رقابت‌پذیری سازمان‌ها دارند. در فضای پرنوسان کنونی بازار، زنجیره توزیع تحت تأثیر عوامل مختلف داخلی و خارجی قرار می‌گیرند. این عوامل به صورت پویا با یکدیگر تعامل دارند و می‌توانند شاخص‌هایی مانند سرعت تحویل، سطح موجودی و رضایت مشتری را در طول زمان تغییر دهند. روش‌های سنتی ارزیابی، اغلب قادر به درک این تعاملات پویا نیستند و ممکن است منجر به تصمیم‌گیری‌هایی با اثربخشی کم شوند.

اگرچه مطالعات زیادی به شناسایی عوامل مؤثر بر عملکرد زنجیره تأمین پرداخته‌اند؛ اما بیشتر آن‌ها نگاهی ایستا و غیرسیستمی به موضوع مورد تحقیق داشته‌اند. این در حالی است که در دنیای واقعی، متغیرها در یک ساختار شبکه‌ای و پویا با یکدیگر در ارتباط هستند.

^۱ Multiple Criteria Decision Making (MCDM)^۲ System Dynamics (SD)

* رایانامه نویسنده مسئول: sr.tabatabaei@raja.ac.ir

ادبیات و نظر خبرگان شناسایی و استخراج گردید. سپس با بهره‌گیری از مدل‌سازی پویایی سیستم، تعامل و تأثیر متقابل عوامل کلیدی در قالب حلقه‌های علی و بازخوردی بررسی و شبیه‌سازی شده است. نوآوری اصلی این پژوهش در آن است که عوامل تأثیرگذار مانند تاب‌آوری، پاسخگویی، پایداری و سودآوری را به‌صورت کمی در قالب معادلات دیفرانسیل مدل‌سازی شده است. این مدل امکان تحلیل اولویت عوامل کلیدی را فراهم می‌کند و هم رفتار آنها را در طول زمان و در بستر واقعی یک صنعت (صنعت شوینده) شبیه‌سازی می‌نماید. استفاده هم‌زمان از روش‌های ^۱CRITIC و ^۲SAW نیز باعث شده است که وزن‌دهی و رتبه‌بندی عوامل با کمترین سوگیری انجام شود.

این تحقیق بر اساس داده‌های واقعی یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان مواد شوینده با ظرفیت تولید بیش از ۱٫۸ میلیون کارتن در ماه در ایران انجام شده است که دارای شبکه گسترده‌ای از انبارها، نمایندگی‌های فروش و مشتریان نهایی در سطح کشور است. داده‌های تحقیق از سیستم ERP شرکت (گزارش‌های عملیاتی) و همچنین پرسشنامه‌های تخصصی تکمیل شده توسط مدیران زنجیره تأمین و اطلاعات عملیاتی در دوره زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۳ استخراج شده است. این شرکت به دلیل تنوع بالای محصولات، پیچیدگی در مدیریت موجودی و توزیع گسترده و همچنین چالش‌های متعدد در هماهنگی واحدهای زنجیره تأمین، به عنوان نمونه مناسبی برای تحلیل عوامل کلیدی موثر بر عملکرد زنجیره تأمین در حوزه توزیع‌کنندگان انتخاب شده است.

۲- مبانی نظری و پیشینه تحقیق

عملکرد زنجیره تأمین همواره به‌عنوان یک موضوع محوری در ادبیات مهندسی صنایع و مدیریت عملیات مطرح بوده است. عوامل متعددی در عملکرد زنجیره تأمین در حوزه توزیع‌کننده نقش دارند؛ از جمله سودآوری، پاسخگویی، تاب‌آوری، اشتراک اطلاعات، ساختار تأمین، هزینه‌های لجستیکی، و پایداری.

مطالعات متعددی به بررسی مفاهیم تاب‌آوری، پاسخگویی و ریسک در زنجیره تأمین پرداخته‌اند. استرمن، با استفاده از روش پویایی سیستم، به مدل‌سازی ساختارهای بازخوردی و حلقه‌های علی در زنجیره تأمین پرداخت. وی با تأکید بر پدیده اثر شلاقی، نقش شبیه‌سازی رفتاری و ساختاری را در تحلیل پویای تصمیم‌گیری در زنجیره مورد توجه قرار داد [۱]. پتیت و همکاران، با استفاده از

مدل‌سازی کمی، ظرفیت انطباق و آسیب‌پذیری را به عنوان متغیرهای کلیدی در ارزیابی ریسک زنجیره معرفی کردند. آن‌ها چارچوبی ماتریسی برای تحلیل سطح آسیب‌پذیری و انطباق‌پذیری زنجیره ارائه دادند که می‌تواند به تصمیم‌گیری بهتر در شرایط عدم قطعیت کمک کند [۲]. جوتنر و مک‌لان، تأثیر پاسخگویی بر کاهش خطرپذیری زنجیره تأمین را بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها حاکی از آن بود که پاسخگویی سازمان‌ها در زمان بحران، آسیب‌پذیری زنجیره را کاهش می‌دهد. این پژوهش با تحلیل تجربی بحران مالی، به ارائه شواهدی عینی در این زمینه پرداخت [۳]. ایوانوو و دولگوی با بهره‌گیری از روش پویایی سیستم، نشان دادند که بقای زنجیره تأمین در شرایط بحرانی به شدت وابسته به میزان تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری ساختاری آن است. نوآوری اصلی این پژوهش، ارائه یک مدل شبکه‌ای برای سنجش بقای زنجیره در مواجهه با اختلالات بود [۴]. امرج و دویتر در یک مقاله آموزشی مروری، مفاهیم پایه و پیشرفته بهینه‌سازی چندهدفه را با تمرکز بر روش‌های تکاملی مانند NSGA-II و MOEA/D تشریح کرده‌اند. آن‌ها با تبیین مزایا و چالش‌های الگوریتم‌های فراابتکاری، به‌ویژه در حل مسائل پیچیده با چند تابع هدف، چارچوب نظری جامعی برای انتخاب و طراحی الگوریتم‌ها ارائه داده‌اند. با وجود جامعیت روش‌شناسی مقاله، این پژوهش فاقد پیوند با مسائل زنجیره تأمین و همچنین فاقد تحلیل رفتاری و شبیه‌سازی دینامیک سیستم‌ها در مواجهه با عدم قطعیت‌های عملیاتی است. پژوهش حاضر تلاش دارد با تلفیق رویکردهای بهینه‌سازی و پویایی سیستم، ابزاری تصمیم‌یار برای بهبود عملکرد زنجیره توزیع در شرایط عدم قطعیت فراهم آورد [۵]. وی‌یلند و دوراج، با مرور نظام‌مند ادبیات موجود، به نقش شفافیت اطلاعات و یکپارچگی در ارتقای تاب‌آوری زنجیره تأمین پرداختند. آن‌ها چارچوبی مفهومی از دو منظر عملیاتی و راهبردی تدوین کردند که به درک بهتر عوامل مؤثر بر تاب‌آوری کمک می‌کند [۶]. دوکوهکی و همکاران در پژوهشی توصیفی-کاربردی، با استفاده از تحلیل محتوای کیفی (مصاحبه با ۲۶ کارشناس) و تحلیل ساختاری DEMATEL، گلوگاه‌های عملکردی اصلی در زنجیره دو سطحی عمده‌فروش-خرده‌فروش محصولات غذایی را شناسایی نمودند. نتایج نشان داد سطح عمده‌فروشی تحت تأثیر عواملی مانند ارتقای فروش، رعایت قواعد بازار، همکاری با تولیدکننده و تأمین مالی فعال قرار دارد، در حالی که در سطح خرده‌فروشی عوامل خدمات به مشتری، رعایت بازار و بهینه‌سازی سبد کالا برجسته هستند. اگرچه این مطالعه در عمق، کاربرد ارزیابی گلوگاهی را فراهم کرده است، ولی فاقد مدل‌سازی کمی، تحلیل رفتاری زمان‌مند و شبیه‌سازی دینامیکی است. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مدل‌سازی

^۱ Criteria Importance Through Inter-criteria Correlation (CRITIC)

^۲ Simple Additive Weighting (SAW)

پویایی سیستم و سناریوهای رفتاری مبتنی بر داده‌های واقعی، این خلأ را پر کرده و دید سیستمی بر جریان کالا، اطلاعات و پول در طول زمان ارائه می‌دهد [۷]. آمیکو و همکاران نقش انعطاف‌پذیری در افزایش تاب‌آوری را مورد بررسی قرار داده و نشان داده است که استفاده از سیاست‌های جایگزینی منابع می‌تواند تأثیر قابل توجهی در کاهش کمبودها و حفظ عملکرد داشته باشد [۸]. استرادا-گارسا و همکاران با ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه، راهکاری را برای پاسخ‌گویی به اختلالات زنجیره تأمین با لحاظ زمان تحویل توسعه دادند که می‌تواند در شرایط حساس زمانی تصمیم‌گیری را بهینه‌سازی کند [۹]. فیض‌الهی و شرفی مدلی ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه کرده‌اند که در آن محدودیت‌های تقاضا و ظرفیت تأمین‌کنندگان به‌صورت فازی لحاظ شده است. آن‌ها با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و MOPSO، به حل مدل چندهدفه پرداخته و پاسخ‌های بهینه‌ای برای معیارهای هزینه، کیفیت و زمان ارائه داده‌اند. با این حال، پژوهش مذکور فاقد رویکرد پویا برای بررسی رفتار متغیرهای زنجیره در طول زمان است و ساختار علی بین عوامل مؤثر مدل‌سازی نشده است. در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از پویایی سیستم و داده‌های واقعی ERP، تلاش شده است تا روابط بازخوردی بین عوامل کلیدی زنجیره توزیع مدل‌سازی و تأثیر آن‌ها در قالب سناریوهای مختلف تحلیل

شود [۱۰]. ابراهیم‌پور و همکاران تأثیر پویایی زنجیره تأمین بر عملکرد پایدار شرکت با نقش میانجی قابلیت تولید مجدد و تاب‌آوری زنجیره تأمین را بررسی نمودند [۱۱]. ملاشاهی و همکاران مدلی چندهدفه برای طراحی شبکه تأمین رقابتی و حلقه‌بسته برای کالای زوال‌پذیر ارائه کرده است که در آن با بهره‌گیری از نظریه بازی و الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه، ترکیب شاخص‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و تاب‌آوری مدنظر قرار گرفته است. پژوهش مذکور با بهره‌گیری از رویکرد پویایی سیستم و تحلیل سناریوها، تلاش می‌کند تا روابط علی و بازخوردی میان عوامل کلیدی عملکرد زنجیره توزیع را مدل‌سازی کند و با سنجش حساسیت متغیرها، به طراحی سیاست‌های پایدار و تاب‌آور کمک نماید [۱۲]. لازبیک با بهره‌گیری از شبیه‌سازی مبتنی بر عامل، عملکرد راهبردهای تاب‌آوری در مواجهه با بحران‌های جهانی مانند پاندمی را ارزیابی کرده و اهمیت تصمیم‌سازی در سطح خرد را در تقویت پایداری زنجیره برجسته کرده است [۱۳]. کریمی و همکاران تاب‌آوری و پایداری زنجیره تأمین را با رویکرد فرآیندی و تصمیم‌گیری چند شاخصه در حوزه‌های اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی بررسی کردند. پژوهش مذکور بیان می‌کند که توسعه پایدار مدیریت زنجیره تأمین، نه تنها یک عامل محدودکننده نیست؛ بلکه یک رویکرد برای بهبود عملکرد است [۱۴].

جدول (۱): مقایسه نظام‌مند تحقیقات پیشین با تحلیل نقاط ضعف و تفاوت با پژوهش حاضر

مقاله	روش	یافته‌های کلیدی	محدودیت‌ها/کاستی‌ها	تفاوت‌های کلیدی با پژوهش حاضر
[۱]	پویایی سیستم	اثر شلاقی	عدم سناریوهای عملیاتی و متغیرهای کلیدی	تلفیق کمی - کیفی افزودن معیارهای کاربردی
[۲]	مدل‌سازی کمی ماتریسی	تحلیل آسیب‌پذیری و انطباق	رویکرد ایستا عدم توجه به تأخیرها	مدل‌سازی پویایی سیستم در نظر گرفتن تأخیرهای زمانی
[۳]	مطالعه تجربی	رابطه پاسخگویی و کاهش ریسک	محدودیت نمونه آماری عدم بررسی فناوری	مدل‌سازی پویایی سیستم تحلیل سیستماتیک
[۴]	پویایی سیستم	مدل شبکه‌ای سنجش بقا	عدم ترکیب با MCDM کیفی محض	تلفیق کمی - کیفی افزودن معیارهای کاربردی
[۵]	الگوریتم‌های ژنتیک	کاربرد NSGA-II در مسائل پیچیده	عدم ترکیب با پویایی سیستم تک بعدی روابط	ادغام با مدل‌سازی پویایی سیستم رویکرد چندبعدی
[۶]	مرور نظام‌مند	نقش شفافیت اطلاعات	عدم ارائه مدل عملیاتی مفهومی محض	ارائه مدل اجرایی پیاده‌سازی عملیاتی
[۷]	تحلیل کیفی + DEMATEL	شناسایی گلوگاه‌های عملکردی در سطح عمده‌فروش و خرده‌فروش	عدم مدل‌سازی کمی و دینامیکی نبود سناریو و تحلیل رفتاری زمانی	مدل کمی - کیفی تحلیل سیستماتیک
[۸]	تحلیل انعطاف‌پذیری	نقش جایگزینی منابع	عدم مدل‌سازی کمی تک‌بعدی	مدل‌سازی پویایی سیستم رویکرد چندبعدی

جدول (۱): مقایسه نظام‌مند تحقیقات پیشین با تحلیل نقاط ضعف و تفاوت با پژوهش حاضر

مقاله	روش	یافته‌های کلیدی	محدودیت‌ها/کاستی‌ها	تفاوت‌های کلیدی با پژوهش حاضر
[۹]	مدل ریاضی چندهدفه	بهینه‌سازی زمان تحویل	عدم توجه به پویایی ساده‌انگاری	مدل‌سازی پویایی سیستم مدل‌سازی پیچیده‌تر
[۱۰]	مدل ریاضی چندهدفه + MOPSO	مدل‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته با تقاضا و ظرفیت فازی	عدم بررسی پویایی تقاضا و ساختار رفتاری زنجیره، فرض قطعی بودن داده‌ها	مدل‌سازی پویایی سیستم تحلیل سیستماتیک
[۱۱]	معادلات ساختاری	قابلیت تولید مجدد و تاب‌آوری	عدم مدل‌سازی کمی و دینامیکی نبود سناریو و تحلیل رفتاری زمانی	مدل‌سازی پویایی سیستم تحلیل سیستماتیک
[۱۲]	مدل ریاضی چندهدفه + تئوری بازی + MOPSO	ترکیب شاخص‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و تاب‌آوری در طراحی شبکه	عدم مدل‌سازی زمانی و رفتاری	مدل‌سازی پویایی سیستم تحلیل سیستماتیک
[۱۳]	شبیه‌سازی مبتنی بر عامل	ارزیابی راهبردهای تاب‌آوری	عدم ترکیب با MCDM محدود به سطح خرد	تلفیق با تصمیم‌گیری چندمعیاره توسعه به سطح کلان
[۱۴]	معادلات ساختاری + SWARA	ترکیب شاخص‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی	عدم مدل‌سازی زمانی و رفتاری	مدل‌سازی پویا

از پژوهش‌ها مانند استرمن [۱] ساختارهای بازخوردی را مدل‌سازی کرده‌اند؛ اما به سناریوهای عملیاتی و متغیرهای کلیدی در محیط‌های واقعی کمتر توجه داشته‌اند. دیگر پژوهش‌ها مانند ایوانوو [۴] و پتیت و همکاران [۲] چارچوب‌های مفهومی و توصیفی ارائه داده‌اند که فاقد تحلیل کمی هستند. همچنین، رویکردهای متداول تصمیم‌گیری چند معیاره (مانند ANP, TOPSIS, SAW) اگرچه در اولویت‌بندی مؤثرند؛ اما به‌تنهایی قادر به تحلیل پویای رفتار عوامل کلیدی در طول زمان نیستند.

پژوهش حاضر باهدف رفع این کاستی‌ها، از ترکیب دو رویکرد مکمل استفاده کرده است:

- تصمیم‌گیری چندمعیاره با استفاده از تکنیک‌های CRITIC و SAW برای استخراج ضرایب اهمیت عوامل کلیدی مؤثر
- مدل‌سازی پویایی سیستم با بهره‌گیری از نرم‌افزار Vensim و بهینه‌سازی پارامترها به کمک الگوریتم NSGA-II برای تحلیل رفتاری عوامل در طول زمان.

این تلفیق روش‌ها همراه با استفاده از داده‌های واقعی از صنعت شوینده در ایران باعث شده است پژوهش حاضر قادر به شبیه‌سازی رفتار پیچیده زنجیره تأمین در شرایط مختلف و ارائه سناریوهای عملیاتی برای بهبود عملکرد آن باشد. بدین ترتیب، نوآوری کاربردی پژوهش حاضر در پوشش هم‌زمان سه کاستی اصلی تحقیقات پیشین است:

- (۱) ضعف در تحلیل دینامیکی
- (۲) نادیده‌گرفتن تعاملات چند عامل کلیدی
- (۳) فاصله با داده‌های واقعی و تصمیم‌گیری اجرایی

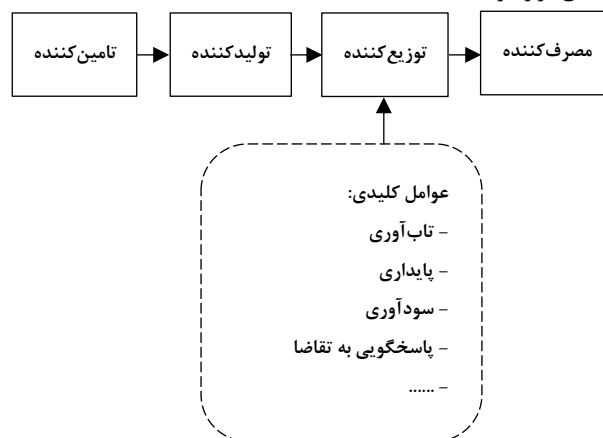
۲-۱- شکاف موجود در پیشینه تحقیق

نتایج مرور پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که ترکیب رویکردهای کمی (تحلیل چندمعیاره، رگرسیون) و شبیه‌سازی پویای سیستم، در تحلیل عوامل تأثیرگذار بر عملکرد زنجیره تأمین به‌صورت محدود مورد توجه قرار گرفته است؛ همچنین پژوهش‌های زیادی به موضوع تاب‌آوری و پاسخ‌گویی پرداخته‌اند؛ اما اکثر آن‌ها به‌صورت ایستا و بدون تحلیل پویایی سیستم انجام شده‌اند. ترکیب هم‌زمان تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با مدل‌سازی دینامیکی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین بسیاری از مدل‌های ارائه‌شده فاقد اعتبارسنجی مبتنی بر داده‌های واقعی هستند یا از الگوریتم‌های چندهدفه برای بهینه‌سازی استفاده نکرده‌اند.

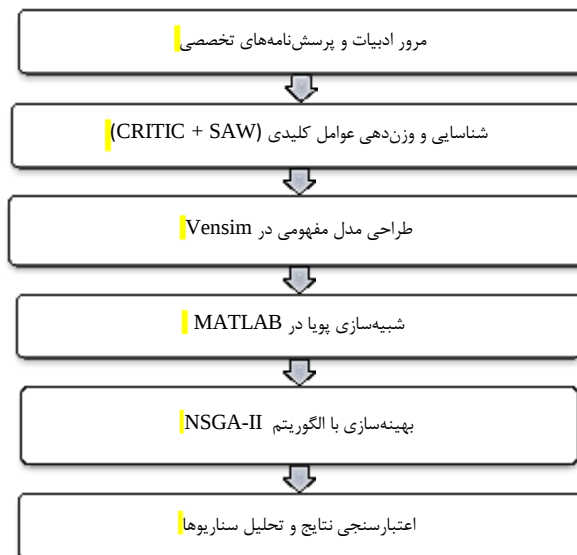
پژوهش حاضر تلاش می‌کند با ادغام روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و پویایی سیستم و استفاده از داده‌های واقعی صنعت شوینده، مدلی ترکیبی و کاربردی برای تحلیل پویای عملکرد زنجیره تأمین ارائه دهد و با پر کردن شکاف تحقیقاتی، الگویی نوآورانه برای بهبود عملکرد زنجیره در شرایط ناپایدار ارائه دهد. در این مدل، چهار عامل نوآورانه مطرح شده، به‌صورت کمی و قابل شبیه‌سازی تعریف شده‌اند. جمع‌بندی تحلیل تطبیقی تحقیقات پیشین (جدول ۱) نشان می‌دهد که اغلب مطالعات انجام‌شده، اگرچه به ابعاد مهمی مانند تاب‌آوری، پاسخگویی، پایداری و مدیریت موجودی پرداخته‌اند؛ اما دارای محدودیت‌های مشخصی بوده‌اند. این محدودیت‌ها شامل رویکردهای ایستا، نبود تحلیل رفتاری در طول زمان، نادیده‌گیری روابط علی و بازخوردی، عدم ترکیب روش‌های کمی و کیفی و فقدان استفاده از داده‌های واقعی در شبیه‌سازی‌های سیستمی است. برخی

۳- بیان مسئله و روش تحقیق

تمرکز مطالعه در زنجیره تأمین مورد بررسی در این پژوهش در حوزه توزیع‌کننده بوده است. این پژوهش در تلاش است با رویکردی ترکیبی، عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد زنجیره تأمین در حوزه توزیع‌کننده را شناسایی، وزن‌دهی و در گذر زمان تحلیل نماید. شماتیک این زنجیره در شکل (۱) نمایش داده شده است و مبنای طراحی مدل مفهومی و شبیه‌سازی پویایی سیستم در این تحقیق قرار گرفته است.



شکل (۱): مدل مفهومی زنجیره تأمین و عوامل کلیدی حوزه توزیع‌کننده
فرآیند تحقیق بصورت فلوچارت زیر و در شش مرحله اصلی طراحی شده است:



شکل (۲): فلوچارت فرآیند پژوهش

شکل (۲)، جریان یکپارچه روش‌های مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد؛ فرآیند با مرور ادبیات، جمع‌آوری داده‌ها و پرسش‌نامه‌های تخصصی آغاز می‌شود. در مرحله اول، از روش CRITIC برای تعیین وزن عوامل کلیدی و سپس از روش SAW

برای رتبه‌بندی اولیه استفاده می‌شود. این وزن‌ها به‌عنوان ورودی به مدل پویایی سیستم (SD) وارد می‌شوند تا رفتار پویای زنجیره تأمین در طول زمان شبیه‌سازی شود. سپس، خروجی‌های آن به‌عنوان ورودی الگوریتم NSGA-II قرار می‌گیرند تا راهکارهای بهینه چندهدفه (مانند کاهش ریسک و افزایش سودآوری) شناسایی شوند. در نهایت، نتایج با استفاده از روش‌های تکمیلی مانند شبیه‌سازی گسسته پیشامد^۱ (DES) و مدل‌سازی عامل‌محور^۲ (ABM) اعتبارسنجی می‌شوند.

۳-۱- شناسایی عوامل مؤثر

شناسایی عوامل مؤثر بر عملکرد زنجیره تأمین با طراحی پرسش‌نامه‌ای ساختاریافته انجام شد. این پرسش‌نامه شامل ۱۳ گویه بر اساس طیف پنج‌درجه‌ای لیکرت می‌باشد که و به ۱۳ خبره شاغل در حوزه حمل‌ونقل و انبارداری در صنعت شوینده ارائه شده است. با وجود محدود بودن حجم نمونه، خبرگان منتخب دارای تجربه عملیاتی قابل توجه در حوزه مورد مطالعه بوده‌اند و به روش نمونه‌گیری هدفمند انتخاب شدند. جهت بررسی قابلیت اعتماد ابزار، ضریب آلفای کرونباخ برای کل پرسشنامه محاسبه و مقدار ۰/۸۹ به‌دست آمده که نشان‌دهنده روایی و پایایی مناسب ابزار است. نتایج حاصل از این پرسشنامه، پایه اولیه تحلیل‌ها را شکل داده است. از مجموع ۱۳ عامل نهایی، ۹ عامل از مطالعات پیشین استخراج شدند و ۴ عامل دیگر شامل تاب‌آوری، پایداری، سودآوری و پاسخگویی به تقاضا به‌عنوان عوامل نوآورانه و حاصل از تحلیل تحقیق حاضر شناسایی شدند. تمرکز پژوهش بر تحلیل اثرات متقابل این عوامل و درک رفتار سیستمی آن‌ها در عملکرد کل زنجیره تأمین است.

۳-۲- روش وزن‌دهی

وزن‌دهی به عوامل شناسایی شده با استفاده از دو روش تصمیم‌گیری چند معیاره و وزن‌دهی ساده انجام شده است. ابتدا با روش CRITIC، وزن‌های اولیه را با استفاده از تضاد و واریانس محاسبه و سپس با روش SAW، امتیاز نهایی هر عامل تعیین گردیده است.

۳-۳- مقایسه روش پویایی سیستم با سایر رویکردهای مدل‌سازی

روش پویایی سیستم (SD) به‌عنوان رویکرد اصلی این پژوهش انتخاب شده است، چراکه توانایی تحلیل رفتار سیستم‌های پیچیده با

^۱ Discrete Event Simulation (DES)

^۲ Agent-Based Modeling (ABM)

از سوی دیگر، برنامه‌ریزی ریاضی (MP) شامل مدل‌سازی‌های خطی و غیرخطی، عدد صحیح و چندهدفه برای بهینه‌سازی تصمیم‌گیری‌هاست. این مدل‌ها بیشتر برای سطوح تاکتیکی و نقطه‌ای کاربرد دارند و به‌صورت ایستا عمل می‌کنند؛ بنابراین قادر به تحلیل رفتارهای دینامیکی و بازخوردی سیستم در طول زمان نیستند.

بنابراین در مقایسه با روش‌های مدل‌سازی همچون شبیه‌سازی گسسته پیشامد (DES) و مدل‌های عامل‌محور (ABM)، رویکرد پویایی سیستم (SD) مزیت تحلیل تعاملات علی و حلقه‌های بازخوردی در سطح کلان را فراهم می‌آورد. اگرچه سیستم‌های عامل‌محور توانایی مدل‌سازی رفتار اپراتورها را دارد و شبیه‌سازی پیشامد گسسته در فرآیندهای زمان‌محور دقیق‌تر است؛ اما برای تحلیل پایداری و واکنش سیستمی در بازه‌های زمانی طولانی، پویایی سیستم کارآمدتر است. جدول (۲) مروری تطبیقی بر ویژگی‌های اصلی روش‌های مختلف مدل‌سازی در حوزه زنجیره تأمین ارائه می‌کند.

جدول (۲): مقایسه روش‌های مدل‌سازی در زنجیره تأمین

ویژگی / روش مدل‌سازی	برنامه‌ریزی ریاضی (MP)	عامل‌محور (ABM)	گسسته پیشامد (DES)	پویایی سیستم (SD)
سطح تحلیل	تاکتیکی / بهینه‌سازی	رفتاری / فردی	عملیاتی	کلان و سیستمی
ساختار بازخورد	ندارد	محدود	ندارد	دارد
تحلیل رفتار در زمان	ایستا	متوسط	ضعیف	عالی
تعامل بین اجزا	بدون تعامل	بسیار بالا	کم	متوسط
امکان سناریونویسی	تنظیم دستی	دارد (غیرمستقیم)	محدود	دارد
پیچیدگی محاسباتی	متوسط	بالا	پایین	متوسط
ابزارهای رایج	LINGO GAMS	Logic Any Net Logo	Arena Simul8	Vensim Stella

ساختارهای بازخوردی و روابط علی و متغیرهای زمانی دارا است. با این حال، بررسی و مقایسه آن با دیگر رویکردهای مدل‌سازی مانند شبیه‌سازی گسسته پیشامد (DES)، مدل‌سازی عامل‌محور (ABM) و برنامه‌ریزی ریاضی (MP)، می‌تواند دیدگاه روش‌شناختی جامع‌تری به خواننده ارائه دهد.

در روش شبیه‌سازی گسسته پیشامد، تمرکز بر رخداد‌های گسسته در زمان و پردازش عملیات مانند صف، ورود سفارش، یا حرکت کالا در انبار است. این رویکرد، برای سیستم‌های عملیاتی دقیق مناسب است، اما فاقد توانایی در تحلیل روابط علی و ساختار بازخورد است.

روش شبیه‌سازی عامل‌محور، سیستم را از منظر تعاملات میان اجزای مستقل (مانند تأمین‌کننده، توزیع‌کننده، یا مشتری) مدل‌سازی می‌کند. این روش در شبیه‌سازی رفتارهای فردی و تصمیم‌گیری‌های مستقل کاربرد دارد؛ ولی برای تحلیل سیاست‌های کلان مدیریتی یا بررسی اثرات تجمعی سیاست‌ها بر کل زنجیره تأمین، کارایی محدودی دارد.

قابلیت ترکیب آن با روش‌های چندمعیاره (MCDM) و الگوریتم‌های فراابتکاری، آن را به رویکردی قدرتمند در تصمیم‌سازی‌های سطح راهبردی تبدیل کرده است.

این مدل با الهام از ساختارهای رفتاری معرفی شده در مطالعات استرمن [۱] و ایوانوو [۴] توسعه یافته است. مدل حاضر بر اساس اصول تفکر سیستمی و با شناسایی روابط علی معلولی بین متغیرهای کلیدی شکل گرفته است.

ساختار مدل از سه بخش اصلی تشکیل شده است:

۱- متغیرها:

متغیرهای ورودی

واریانس موجودی و واریانس سفارش (C2)، ریسک‌های تأثیرگذار بر زنجیره تأمین (C8)

متغیرهای واسطه

پاسخ‌گویی به تقاضا (C10)، سطح (ایمن) موجودی (C1)

متغیرهای خروجی

سودآوری (C13) و سطح خدمات (C5)

۲- حلقه‌های بازخوردی:

حلقه تقویتی

افزایش پاسخ‌گویی به تقاضا منجر به بهبود سطح خروجی خدمات/محصول گشته و در نهایت افزایش باعث سودآوری می‌شود.

حلقه تعادلی

افزایش سطح موجودی باعث کاهش نرخ بازپرسازی و در نتیجه تعدیل واریانس موجودی می‌گردد.

۳- جریان‌های سیستمی:

جریان مواد

از تأمین‌کنندگان تا مشتریان نهایی

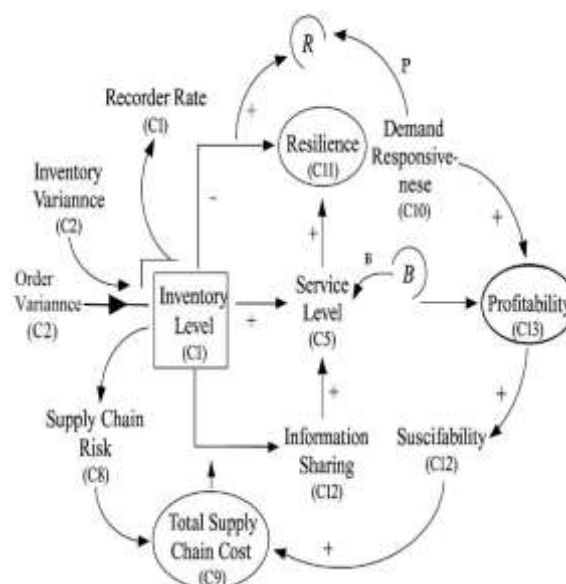
جریان اطلاعات

شامل اشتراک‌گذاری اطلاعات (C12) و داده‌های پاسخ‌گویی به تقاضا (C10)

با توجه به مقایسه فوق، روش پویایی سیستم به دلیل توانایی در تحلیل حلقه‌های بازخورد، تأخیر زمانی و سناریوهای سیاست‌گذاری برای هدف این پژوهش که بررسی رفتار کلان و دینامیک سیستم زنجیره تأمین است؛ مناسب‌ترین گزینه محسوب می‌شود. همچنین

۳-۴- طراحی مدل مفهومی

بر اساس نتایج حاصل از مرحله اولویت‌بندی عوامل با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) و به منظور درک روابط علی میان عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد توزیع، یک مدل مفهومی با رویکرد پویایی سیستم در نرم‌افزار Vensim طراحی شده است. این مدل با بهره‌گیری از حلقه‌های بازخورد تقویتی و تعادلی، روابط میان متغیرهایی همچون تاب‌آوری (C11)، پاسخ‌گویی به تقاضا (C10)، پایداری (C12)، و سودآوری (C13) را شبیه‌سازی می‌کند. در ساختار مدل، متغیرهای سطح^۱ (C1)، نرخ‌ها^۲ و متغیرهای کمکی^۳ نقش کلیدی ایفا کرده‌اند. همچنین جریان‌های اصلی سیستم شامل هزینه‌های زنجیره تأمین (C9)، ریسک زنجیره تأمین^۴ (C8)، و نوسانات سفارش (C2) در قالب یک سیستم پویا مدل‌سازی شده‌اند. این مدل مفهومی، پایه تحلیل‌های شبیه‌سازی و تحلیل حساسیت در ادامه تحقیق را تشکیل داده است.



شکل (۳): مدل مفهومی عوامل مؤثر بر عملکرد توزیع با رویکرد

پویایی‌شناسی سیستم

^۱ Inventory Level

^۲ Reorder Rate

^۳ Information Sharing

^۴ Supply Chain Risk

جدول (۳): عوامل پویای مؤثر بر عملکرد زنجیره تأمین در مدل

نام متغیر در مدل	شناسه	نقش عملکردی در مدل	شرح عملکردی متغیرها
Profitability	C13	متغیر خروجی (معلولی)	شاخص نهایی ارزیابی کارایی سیستم (متغیر وابسته)
Resilience	C11	متغیر علی - سطح (ورودی)	متغیر کلیدی در پایداری و تطابق با بحران‌ها
Demand Responsiveness	C10	متغیر میانی (جریان ورودی)	نرخ واکنش به نوسانات تقاضا
Service Level	—	متغیر میانی - وابسته	سطح خدمات ارائه شده به مشتریان که تحت تأثیر C10 و C11
Inventory Level	C2	متغیر سطح - ذخیره	سطح موجودی کالا
Bullwhip Slope	C5	متغیر میانی - جریان تعدیلی	شدت اثر شلاقی در زنجیره
Supply Chain Risk	C8	متغیر علی - تأثیر گذار	ریسک کمبود ناشی از تأخیر یا نوسان
Total Supply Chain Cost	C9	متغیر خروجی (معلولی)	مجموع هزینه‌های زنجیره تأمین (نگهداری، سفارش، توزیع)
Reorder Rate	C1	متغیر نرخ - جریان	نرخ بازسازی کالا
Order Variance	C2	متغیر علی - ورودی	تغییرات در الگوی سفارش گذاری
Inventory Variance	C7	متغیر میانی - کمکی	نوسانات سطح موجودی
Information Sharing	کمکی	متغیر کمکی - تسهیل گر	در مدل به صورت متغیر کمکی در کنترل ریسک
Sustainability	C12	متغیر علی - سیستمی	پایداری در طول زمان، تعامل با هزینه و تاب‌آوری

ویژگی‌های مدل

جدول (۴): پارامترهای الگوریتم NSGA-II

پارامتر الگوریتم	مقدار
اندازه جمعیت	۵۰
تعداد تکرار	۱۰۰
نرخ تقاطع	۰/۴
تعداد والدین	۴۰
نرخ جهش	۰/۷
تعداد جهش یافته‌ها	۳۵
نرخ جهش ژنی (mu)	۰/۰۲

۴-۱- توضیح پارامترها

اندازه جمعیت^۱: تعداد جواب‌های اولیه‌ای که الگوریتم با آن‌ها شروع می‌شود. مقدار ۵۰ انتخاب شده تا تنوع پاسخ‌ها حفظ شود.

• تعداد تکرار^۲: دفعات اجرای الگوریتم؛ هر تکرار، جمعیت جدیدی ایجاد می‌کند.

• نرخ تقاطع^۳: درصد ترکیب والدین برای تولید نسل جدید؛ مقدار ۰/۴ به معنای تنوع مناسب در پاسخ‌هاست.

• تعداد والدین^۴: تعداد پاسخ‌هایی که با هم ترکیب می‌شوند.

- قابلیت شبیه‌سازی رفتار سیستم تحت سناریوهای مختلف
- امکان تحلیل حساسیت متغیرهای کلیدی
- توانایی ارزیابی اثرات راهبردهای مختلف مدیریتی
- قابلیت پیش‌بینی رفتار سیستم در افق‌های زمانی مختلف

کاربردهای مدل

- تحلیل اثر کاهش شیب شلاقی (C5) بر کل هزینه زنجیره تأمین (C9)
- بررسی رابطه بین اشتراک‌گذاری اطلاعات (C12) و ریسک‌های تأثیر گذار بر چرخه زنجیره تأمین (C8)
- سنجش تأثیر بهبود پاسخ‌گویی به تقاضا (C10) بر سودآوری (C13)

این مدل با در نظر گرفتن جنبه‌های پویای سیستم و با استفاده از رویکرد حلقه‌های بازخوردی، ابزار مناسبی برای درک رفتار پیچیده زنجیره تأمین و اتخاذ تصمیمات بهینه در شرایط مختلف فراهم می‌آورد. طراحی مدل به گونه‌ای است که می‌تواند مبنایی برای مطالعات آینده در حوزه مدیریت زنجیره تأمین باشد.

۴-۲- پیاده‌سازی مدل و تحلیل سناریوها

برای شبیه‌سازی مدل، داده‌های واقعی صنعت شوینده در بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۳ استفاده شده است. مدل ریاضی با استفاده از معادلات دیفرانسیل و ضرایب (کالیبره شده) در محیط MATLAB اجرا شده است. سپس برای تعیین بهترین مقادیر پارامترها از الگوریتم بهینه سازی NSGA-II استفاده گردیده است.

¹ Population Size² Iterations Number³ Crossover Rate⁴ Parents Number

کرونباخ (۰/۸۹) استفاده شد که نتایج معناداری را در سطح (۰/۰۵) تأیید می‌کند.

۳-۴- تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

۳-۴-۱- نتایج وزن‌دهی و رتبه‌بندی عوامل

برای تعیین میزان تأثیرگذاری هر یک از عوامل، از روش‌های CRITIC و SAW استفاده شد. وزن نهایی عوامل پس از بررسی و اظهارنظر خبرگان از طریق پرسش‌نامه هدفمند لیکریت جمع‌آوری، محاسبه، وزن‌دهی و اولویت‌بندی گردید که نتیجه نهایی آن به شرح جدول (۵) انجام شده است.

جدول (۵): رتبه‌بندی نهایی عوامل

رتبه	نماد	عوامل (متغیرها)	رتبه نهایی
۱	C11	تاب‌آوری	۰/۵۷۶۴
۲	C10	نرخ پاسخگویی به تقاضا	۰/۵۰۰۱
۳	C6	پدیده بازپرسازی صفر	۰/۴۹۲۵
۴	C5	شیب شلاقی	۰/۴۷۸۶
۵	C1	نرخ بازپرسازی	۰/۴۶۷۹
۶	C8	ریسک کمبود	۰/۴۴۹۸
۷	C9	هزینه کل زنجیره تأمین	۰/۴۴۷۸
۸	C12	پایداری	۰/۴۳۶۰
۹	C7	واریانس موجودی	۰/۴۲۲۲
۱۰	C4	نسبت واریانس سفارش	۰/۴۱۸۰
۱۱	C3	اثرشلاقی	۰/۳۷۸۰
۱۲	C13	سودآوری	۰/۳۴۷۸
۱۳	C2	واریانس سفارش	۰/۳۳۴۶

نتایج نشان داد عامل تاب‌آوری با وزن (۰/۲۴) در رتبه اول قرار دارد و به‌عنوان تأثیرگذارترین عامل شناخته شد. سودآوری و پاسخگویی به تقاضا در رتبه‌های بعدی قرار دارند. مقایسه این یافته‌ها با ادبیات موضوع، اثربخشی عوامل نوآورانه شناسایی‌شده را تأیید می‌کند.

۳-۴-۲- تحلیل آماری با SPSS

برای بررسی معناداری عوامل شناسایی‌شده، تحلیل رگرسیون چندگانه با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام گرفت. در این مدل، امتیاز عملکرد کلی زنجیره به‌عنوان متغیر وابسته و امتیازات عوامل کلیدی به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. مقدار خطای میانگین مربعات^۵ برای عامل تاب‌آوری برابر با (۰/۴۱) بدست آمده

$$P_{NC} = C_R * N * 2 \quad (۱)$$

تعریف متغیرها:

- PNC: تعداد والدین شرکت‌کننده در فرآیند تقاطع ۱
 - CR: نرخ تقاطع ۲
 - N: اندازه جمعیت اولیه
 - عدد ۲: تعداد والد (ثابت)
- در رابطه ۱، C_R نرخ تقاطع (در این تحقیق برابر ۰/۴) و N اندازه جمعیت اولیه (مقدار ۵۰) است. عدد ۲ به این دلیل در نظر گرفته شده است که هر فرزند حاصل ترکیب دو والد می‌باشد. نتیجه این رابطه، تعداد کل والدینی است که در هر نسل در فرآیند تولید فرزندان جدید شرکت می‌کنند.

- نرخ جهش ۳: احتمال ایجاد تغییرات تصادفی برای جلوگیری از مینیمم محلی.
- تعداد جهش‌یافته‌ها ۴: تعداد راه‌حل‌هایی که در هر نسل دچار جهش می‌شوند.

$$N_M = M_R * N * L * mu \quad (۲)$$

تعریف متغیرها:

- NM: تعداد افراد جهش‌یافته در هر نسل
 - MR: نرخ جهش
 - N: اندازه جمعیت
- در معادله (۲) نرخ جهش (M_R) برابر (۰/۷) و اندازه جمعیت اولیه (N) مساوی (۵۰) در نظر گرفته شده است. این رابطه تعداد افرادی را تعیین می‌کند که در هر نسل تحت تأثیر تغییرات تصادفی قرار می‌گیرند. جهش به الگوریتم کمک می‌کند تا از قرارگیری در بهینه‌های محلی جلوگیری کرده و تنوع پاسخ‌ها را حفظ کند.
- نرخ جهش ژنی: (mu) شدت جهش در سطح ژن. این پارامتر میزان تغییرات در هر متغیر تصمیم را مشخص می‌کند. عدد پایین باعث کنترل جهش‌های شدید و حفظ ثبات مدل می‌شود. (۰/۲)

۲-۴- اعتبارسنجی آماری

نتایج مدل با داده‌های واقعی مقایسه شده است و تحلیل رگرسیون چندگانه برای بررسی معناداری تأثیر عوامل انجام گردیده است. جهت اطمینان از کیفیت آماری از روش‌های ناپارامتریک، مانند آزمون تی تک نمونه‌ای و تحلیل حساسیت در نرم‌افزار SPSS با آلفای

^۱ Crossover

^۲ Crossover Rate

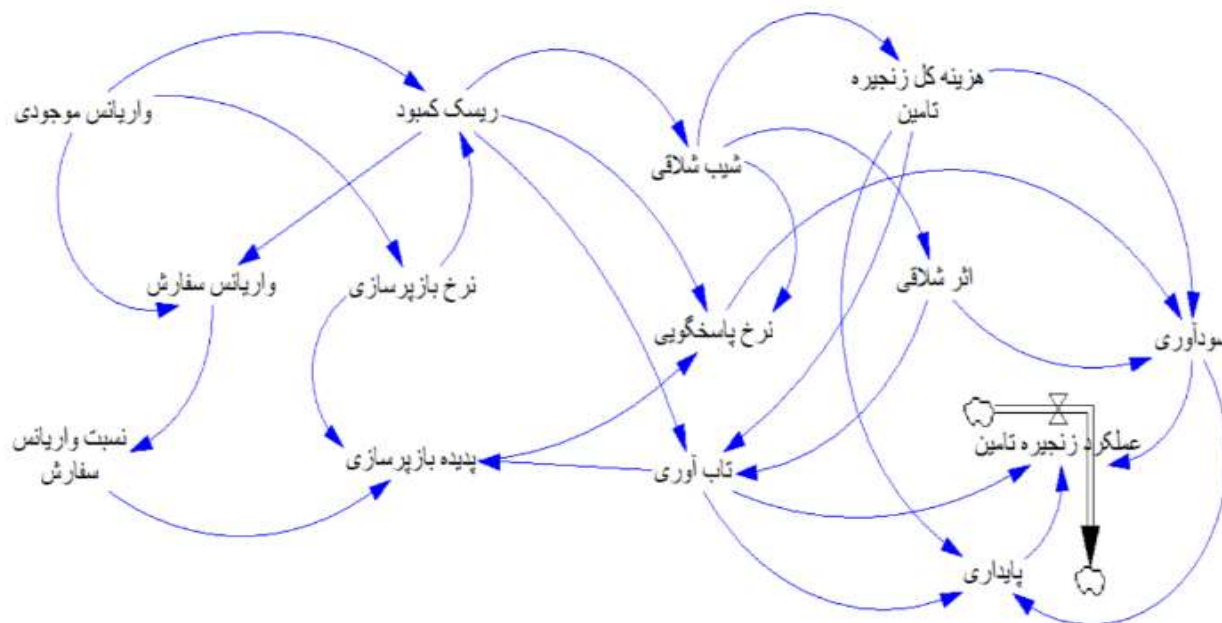
^۳ Mutation Rate

^۴ Number of Mutational

^۵ Mean Squared Error (MSE)

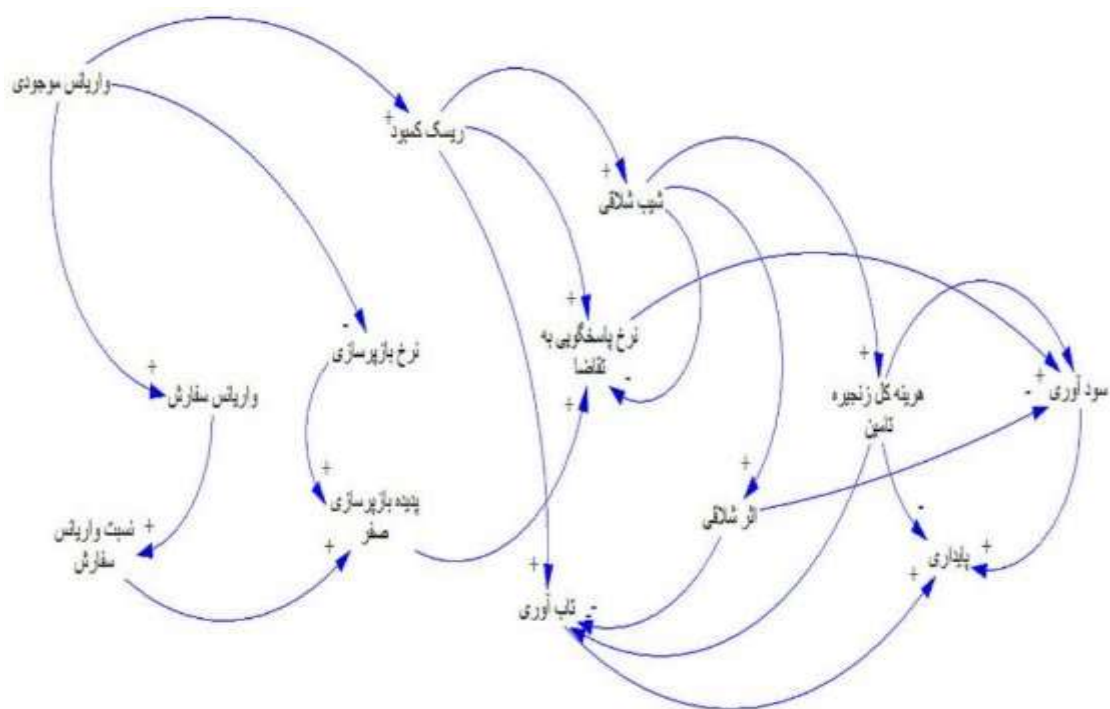
۴-۳-۳- طراحی مدل یویای سیستم

سه متغیر تاب‌آوری، پاسخگویی و سودآوری به طور هم‌زمان در یک مدل رگرسیون چندگانه وارد شده‌اند و نتایج نشان دادند که هر سه متغیر اثر معناداری بر عملکرد زنجیره دارند، ($p > 0.01$) و $R^2 = 0.72$ همچنین سه عامل تاب‌آوری ($\beta = 0.41$)، پاسخگویی ($\beta = 0.36$) و سودآوری ($\beta = 0.23$) تأثیر معناداری بر عملکرد زنجیره دارند. در ادامه نتایج آزمون تی تک نمونه‌ای با فرضیه $H_0: \mu \geq 3$ تا $H_1: \mu < 3$ (سطح معناداری 0.05) تمام عوامل با میانگین بالاتر از 3/5



شکل (۴)، نشان‌دهنده ساختار اصلی مدل بوده و به‌عنوان چارچوب اصلی تحلیل رفتار سیستم در طول زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل، متغیرهای سطح، مانند موجودی کالا به‌صورت انباشتی، و نرخ‌هایی مانند سفارش و مصرف به‌صورت جریان تعریف شده‌اند. همچنین متغیرهای کمکی و نرخ‌های تعدیلی برای بازتاب سیاست‌های اجرایی و اثرگذاری آن‌ها بر خروجی سیستم به کار گرفته شده‌اند.

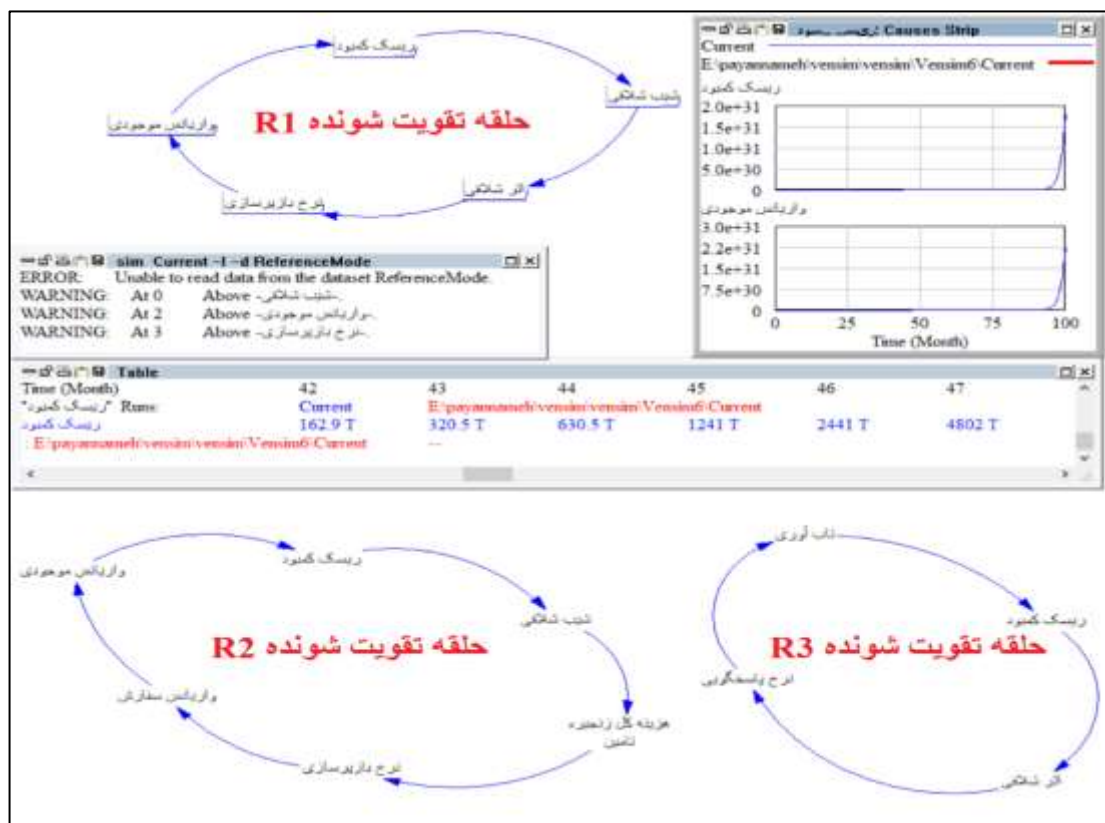
همان‌گونه که از نمودارهای علی و معلولی و همچنین نمودار ذخیره جریان برداشت می‌شود؛ هر عامل می‌تواند بر یک یا چند



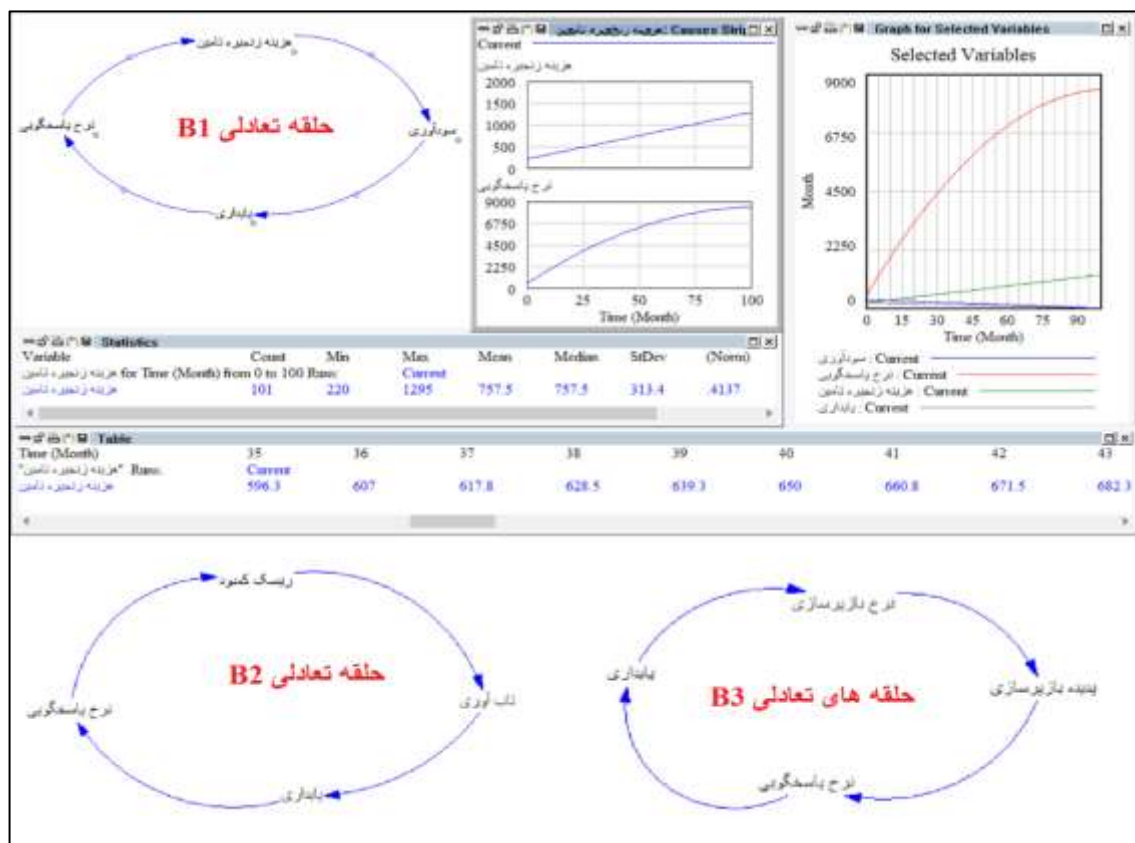
شکل (۵): نمودار علی و معلولی عوامل کلیدی مدل پویایی سیستم

بلندمدت می‌شوند. در مقابل شکل (۷)، حلقه‌های تعادلی (B) مانند کنترل موجودی و تنظیم سفارش‌گذاری به حفظ تعادل سیستم کمک می‌کنند.

در ادامه، ساختار بازخوردی مدل به صورت حلقه‌های تقویتی و تعادلی مشخص شد. در شکل (۶)، حلقه‌های تقویتی (R) مانند افزایش تاب‌آوری و پاسخگویی سریع‌تر موجب تقویت عملکرد سیستم در



شکل (۶): حلقه‌های تقویت شونده (R) در مدل پویایی سیستم

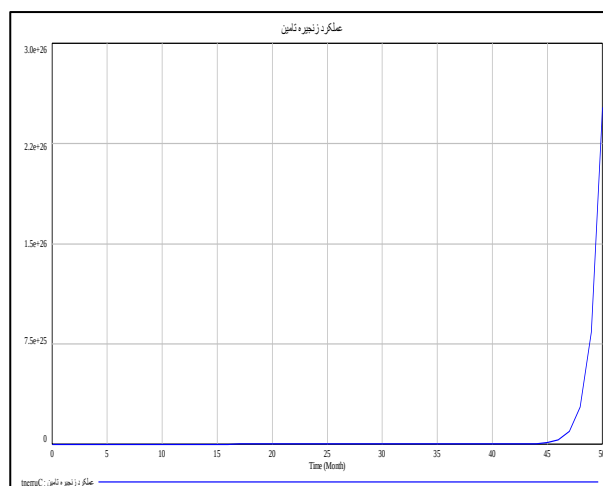


شکل (۷): حلقه‌های تعادلی (B) در مدل پویایی سیستم

باتوجه به ترسیم حلقه‌های تعادلی و تقویت‌شونده و مشخص شدن معادلات تعاملی بین عوامل، با استفاده از رویکرد پویایی سیستم، مدل استخراجی در دو بخش کیفی و کمی و میزان اثرگذاری عوامل بر عملکرد زنجیره تأمین ارائه گردید. در حلقه‌های تقویت‌شونده تمامی عوامل بر هم اثری یکسان داشته و باعث تقویت هم می‌شوند؛ اما در حلقه‌های تعاملی یک رابطه تعادل گونه بین عوامل وجود دارد در واقع عوامل تا حدی اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند.

براساس نتایج شبیه‌سازی‌شده، تأثیرات عوامل بر یکدیگر (شکل ۸) نشان می‌دهد که عوامل مربوطه می‌تواند در طولانی مدت منجر به بهبود و تعالی عملکرد زنجیره تأمین شود. در واقع مدل استخراجی نتیجه و اثر مثبتی را نشان می‌دهد که شکل و ماهیت اثر، به صورت نمایی می‌باشد به این صورت که با گذشت دوره‌ها این اثر بیشتر شده و در پایان با افزایش قابل توجه مواجه می‌باشد. به عبارت دیگر اثرگذاری عوامل از نوع خطی نبوده و شاید در ابتدا دوره‌های شبیه‌سازی نتوان انتظار چندانی از این اثرگذاری داشت اما در ادامه این اثرگذاری بیشتر شده و در نهایت به بالاترین حد در دوره‌های پایانی شبیه‌سازی منجر می‌شود.

در نهایت، برای ارزیابی نتایج مدل و اعتبارسنجی آن، خروجی مدل در طول دوره زمانی شبیه‌سازی بررسی شد. شکل (۸) روند تغییرات عملکرد زنجیره تأمین را در پاسخ به سیاست‌های طراحی‌شده نشان می‌دهد و مشخص می‌سازد که اجرای هم‌زمان سیاست‌های مرتبط با افزایش تاب‌آوری، کاهش نوسان سفارش، و بهینه‌سازی سطح موجودی می‌تواند به‌صورت تجمعی، سودآوری و کارایی سیستم را بهبود بخشد.



شکل (۸): اثر مدل ارائه شده بر عملکرد زنجیره تأمین

۴-۳-۴- تحلیل رفتاری و اعتبارسنجی عوامل

در بخش اعتبارسنجی با بررسی و تحلیل رفتار پویای مدل و ارزیابی نتایج و اثرات حاصل از اجرای سناریوهای مختلف و سیاست‌گذاری‌های مطرح شده و آثار آنها بر عوامل کلیدی نظیر هزینه‌ها، سودآوری و شاخص‌های عملکردی زنجیره تأمین صورت گرفته است.

مطابق با جدول (۶)، سیاست‌های مختلفی جهت بهبود تاب‌آوری و پاسخگویی زنجیره تدوین شده‌اند. در ادامه، تأثیر هر یک از این سیاست‌ها بر متغیرهای کلیدی مدل در جدول شماره (۷) ارائه شده است.

جدول (۶): سیاست‌های تحلیل رفتاری

ردیف	سیاست‌های رفتاری
۱	کاهش ریسک کمبود
۲	کاهش واریانس موجودی
۳	افزایش تاب‌آوری
۴	کاهش اثرشلاقی
۵	افزایش نرخ پاسخگویی به تقاضا
۶	افزایش پایداری
۷	کاهش واریانس سفارش
۸	افزایش سودآوری
۹	کاهش هزینه زنجیره تأمین
۱۰	کاهش واریانس سفارش
۱۱	کاهش شیب شلاقی
۱۲	نرخ بازپرسازی
۱۳	نرخ بازپرسازی صفر

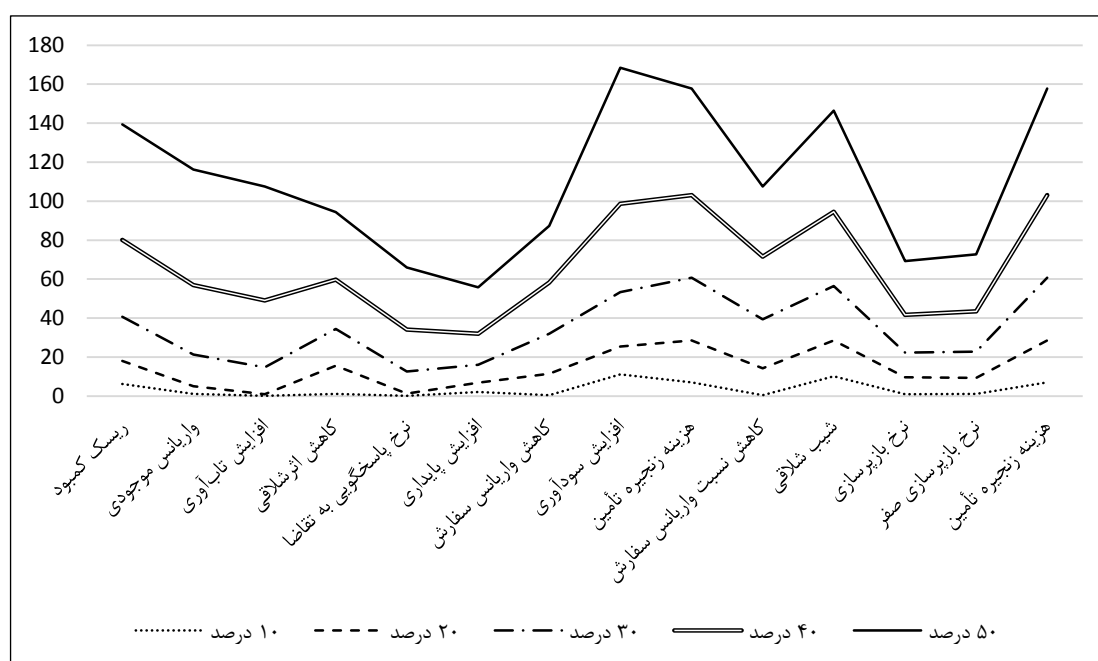
جدول (۷): مقایسه میزان اثرگذاری هر سیاست بر بهبود عملکرد زنجیره

تأمین

میزان تغییر عامل مؤثر	%۱۰	%۲۰	%۳۰	%۴۰	%۵۰
ریسک کمبود	۶/۲	۱۱/۹	۲۲/۶	۳۹/۴	۵۹/۳
واریانس موجودی	۱/۲	۳/۹	۱۶/۲	۳۵/۷	۵۹/۲
افزایش تاب‌آوری	۰/۲	۰/۸	۱۳/۸	۳۴/۳	۵۸/۵
کاهش اثرشلاقی	۱/۰۵	۱۴/۵	۱۸/۹	۲۵/۳	۳۴/۷
نرخ پاسخگویی به تقاضا	۰/۱۸	۱/۰۷	۱۱/۴	۲۱/۵	۳۱/۹
افزایش پایداری	۲/۱	۴/۷	۹/۳	۱۵/۹	۲۳/۸
کاهش واریانس سفارش	۰/۴	۱۱/۱	۲۰/۵	۲۶/۲	۲۹/۱
افزایش سودآوری	۱۱/۱	۱۴/۳	۲۷/۹	۴۵/۴	۶۹/۷
هزینه زنجیره تأمین	۷/۱	۲۱/۵	۳۲/۱	۴۲/۴	۵۴/۷
کاهش نسبت واریانس سفارش	۰/۵	۱۳/۷	۲۵/۲	۳۲/۲	۳۵/۹
شیب شلاقی	۱۰/۱	۱۸/۵	۲۷/۹	۳۸/۱	۵۱/۸
نرخ بازپرسازی	۱/۰۳	۷/۸	۱۲/۶	۱۹/۴	۲۷/۵
نرخ بازپرسازی صفر	۱/۰۹	۸/۳	۱۳/۴	۲۰/۷	۲۹/۳
هزینه زنجیره تأمین	۷/۱	۲۱/۵	۳۲/۱	۴۲/۴	۵۴/۷

مقایسه اثرگذاری سیاست‌ها بر بهبود عملکرد زنجیره تأمین (شکل ۹) نشان می‌دهد که برخی سیاست‌ها تأثیر فوری اما محدود دارند، در حالی که برخی دیگر با تأخیر زمانی بیشتر، اما اثربخشی بلندمدت بهتری را فراهم می‌آورند. تحلیل مقایسه‌ای نتایج نشان می‌دهد که سیاست‌هایی که ترکیبی از افزایش تاب‌آوری و افزایش شفافیت اطلاعاتی را هدف قرار داده‌اند؛ بیشترین تأثیر را در کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری داشته‌اند. این یافته‌ها به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا ضمن شناخت نقاط حساس سیستم، مناسب‌ترین گزینه سیاستی را بر اساس اهداف کوتاه‌مدت یا بلندمدت انتخاب کنند.

همچنین، در نمودار مقایسه اثرگذاری سیاست‌ها بر بهبود عملکرد زنجیره تأمین (شکل ۹) روند تغییرات و رفتار پویای سیستم در مواجهه با سیاست‌های مذکور را نشان می‌دهد. این تحلیل رفتاری به درک بهتر از اثرات متقابل متغیرها کمک کرده و نشان می‌دهد که کدام سیاست‌ها منجر به بهبود پایداری، کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری می‌شوند. در مجموع، این بخش نقش کلیدی در ارزیابی اثربخشی مدل طراحی‌شده و تصمیم‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی دارد.



شکل (۹): مقایسه اثرگذاری سیاست‌ها بر بهبود عملکرد زنجیره تأمین

تا ۱۴۰۳ استخراج گردیده است. معادلات دینامیکی بر اساس جریان‌های اطلاعات و کالا طراحی شده‌اند. تابع هدف ترکیبی، شامل کمینه‌سازی هزینه کل، نوسانات سطح موجودی و بیشینه‌سازی سطح تاب‌آوری تعریف شده‌اند.

الگوریتم NSGA-II برای بهینه‌سازی چندهدفه مورد استفاده قرار گرفته است. متغیرها (عوامل) مؤثر بر عملکرد مدل شامل محدودیت ظرفیت انبار و نگهداری، پاسخگویی به تقاضا، محدودیت منابع انسانی و مالی هستند. همگرایی الگوریتم پس از ۸۷ تکرار حاصل شد و پاسخ‌های غیرمسلط در جبهه پارتو تحلیل شدند. مدل ریاضی شامل معادلات دینامیکی با متغیرهای کلیدی مانند $L(t)$ و $D(t)$ طراحی شده‌اند. این مدل در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شد و الگوریتم NSGA-II برای بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. ضرایب مدل با استفاده از داده‌های واقعی تنظیم (کالیبره) شدند و

۴-۳-۵- پیاده‌سازی و شبیه‌سازی مدل

در بخش مدل‌سازی، ضرایب رابطه سوم با مقادیر $0/7$ و $0/3$ برای متغیرهای ورودی و کنترلی، بر اساس وزن‌های نرمال‌شده حاصل از روش CRITIC تخصیص یافته‌اند تا تأثیر نسبی هر عامل به‌طور کمی در مدل لحاظ گردد. این ضرایب بازتاب‌دهنده اهمیت نسبی پارامترها در ترکیب شاخص عملکرد هستند و با تحلیل حساسیت بر روی آن‌ها، اعتبارسنجی شده‌اند. برای پیاده‌سازی مدل، داده‌های ورودی شامل میزان موجودی، تقاضای روزانه، نرخ خرابی در حمل‌ونقل، و سطح سرویس از فرم‌های ثبت عملیات انبار، داده‌های سیستم برنامه ریزی منابع سازمان^۱ و گزارش‌های عملیاتی در بازه سال‌های ۱۴۰۰

^۱ Enterprise Resource Planning (ERP)

MSE: میانگین مربعات خطا که بین مقادیر شبیه‌سازی شده و داده واقعی به‌دست آمده است.

Isim(t): مقدار (سطح) موجودی شبیه‌سازی شده در زمان t

Ireal(t): مقدار (سطح) موجودی واقعی در زمان t

N: تعداد دوره‌های زمانی شبیه‌سازی شده

این رابطه برای محاسبه خطای مدل شبیه‌سازی استفاده می‌شود و تفاوت بین مقادیر شبیه‌سازی شده سطح موجودی و داده‌های واقعی را نشان می‌دهد. اگر مقدار MSE پایین باشد؛ نشان‌دهنده دقت بالای مدل شبیه‌سازی است. این تابع به‌عنوان تابع هدف در فرایند کالیبراسیون ضرایب مدل با استفاده از الگوریتم PSO به‌کاررفته است. هدف نهایی، کمینه‌سازی مقدار MSE و افزایش تطابق مدل با واقعیت است.

۴-۳-۶- نتایج کالیبراسیون

به‌منظور تعیین دقیق ضرایب مدل‌سازی پویایی سیستم شامل α (ضریب حساسیت سیستم به اختلاف موجودی و تقاضا)، β (ضریب اثر تاب‌آوری بر کاهش نوسانات) و γ (ضریب اثر اشتراک اطلاعات بر پیش‌بینی تقاضا)، از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات (PSO) استفاده شده است. این الگوریتم یکی از روش‌های هوشمند برای یافتن بهترین پاسخ در مدل‌های پیچیده و مبتنی بر رفتار اجتماعی ذرات است که قابلیت بالایی در جستجوی فضای پاسخ‌های پیچیده دارد. در فرآیند کالیبراسیون، ابتدا داده‌های واقعی شامل سطح موجودی، نرخ پاسخگویی، تقاضای مشتری و سطح خرابی‌ها از بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۳ استخراج گردید. سپس تابع هدف مبتنی بر مینیمم‌سازی میانگین مربعات خطا (MSE) بین مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های واقعی تعریف شد. الگوریتم بهینه‌سازی ذرات (PSO) با جمعیت اولیه ۴۰ و تعداد تکرار ۱۰۰ اجرا شده است تا ضرایب بهینه به‌دست آیند. ضرایب به‌دست آمده در جدول شماره (۸) نشان داده شده‌اند. برای ارزیابی دقت مدل شبیه‌سازی، مقدار خطای میانگین مربعات، میان خروجی‌های مدل و مقادیر واقعی مربوط به بازه زمانی مورد نظر محاسبه شد. این محاسبه در محیط Excel و با استفاده از داده‌های واقعی و خروجی مدل انجام شد. مقدار نهایی (MSE) برابر با ۰/۰۳۲ به‌دست آمد که حاکی از تطابق قابل قبول مدل با داده‌های واقعی است و نشان‌دهنده دقت مناسب در شبیه‌سازی رفتار سیستم می‌باشد. همچنین آزمون t بر روی مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های واقعی نشان می‌دهد که اختلاف معناداری وجود ندارد ($pvalue > 0/05$)، که بیانگر، برازش مناسب مدل پس از کالیبراسیون است.

تابع هدف به گونه‌ای تعریف شد که هزینه، نوسانات و محدودیت‌ها را هم‌زمان در نظر بگیرد.

$$\frac{dL(t)}{dt} = \alpha \cdot [D(t) - I] + \beta \cdot R(t) + \gamma \cdot S(t) - A \quad (3)$$

که در آن:

- $L(t)$: سطح موجودی در زمان t
- $D(t)$: تقاضای مشتری / بازار در زمان t
- I : سطح موجودی فعلی در زمان
- $R(t)$: شاخص تاب‌آوری زنجیره تأمین
- A : نرخ اتلاف منابع (خرابی، ضایعات، تأخیر در تأمین و...)
- $S(t)$: کیفیت اطلاعات اشتراک گذاری شده در زمان t
- α : ضریب تنظیم حساسیت سیستم به اختلاف بین موجودی و تقاضا.

- β : ضریب تأثیر تاب‌آوری در کاهش نوسانات موجودی.

- γ : ضریب تأثیر اشتراک اطلاعات بر کاهش خطای پیش‌بینی

در این معادله، نرخ تغییرات سطح موجودی $\frac{dL(t)}{dt}$ تابعی از چهار عامل اصلی است که عبارتند از: شکاف بین تقاضا و موجودی، سطح تاب‌آوری، کیفیت اشتراک اطلاعات و نرخ اتلاف منابع.

نحوه محاسبه:

بخش اول معادله: $\alpha \cdot [D(t) - I(t)]$

میزان انطباق موجودی با تقاضا را مشخص می‌کند.

بخش دوم معادله: $\beta \cdot R(t)$

اثر سیاست‌های تاب‌آوری مانند ذخایر اضطراری را لحاظ می‌کند.

بخش سوم معادله: $\gamma \cdot S(t)$

نقش اطلاعات دقیق در پیش‌بینی نیاز آینده را نشان می‌دهد.

بخش چهارم معادله: A

میزان از بین رفتن موجودی به دلیل خرابی، ضایعات یا سایر عوامل باعث ایجاد اختلال در اجرای فرایندهای کاری داشته باشد را در نظر می‌گیرد.

همچنین در شبیه‌سازی متغیرها از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ (PSO) در نرم‌افزار MATLAB برای کالیبره کردن ضرایب استفاده شد. هدف از انجام این کار، کمینه‌سازی اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده $I_{sim}(t)$ و داده‌های واقعی $I_{real}(t)$ با تابع خطای زیر است:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (I_{sim}(t) - I_{real}(t))^2 \quad (4)$$

¹ Particle Swarm Optimization

$$I_{combined}(t) = \theta * I_{base}(t) + \lambda * I_{resilience}(t) \quad (5)$$

که در آن:

$I_{combined}(t)$: سطح موجودی شبیه‌سازی‌شده در سناریو ترکیبی و زمان t

$I_{base}(t)$: سطح (مقدار) موجودی در سناریو پایه (بدون افزایش تاب‌آوری)

$I_{resilience}(t)$: سطح (مقدار) موجودی در سناریو افزایش تاب‌آوری

θ : ضریب بهبود حساسیت سیستم به تقاضا (۰/۷)

λ : ضریب وزنی اثر افزایش تاب‌آوری (۰/۳)

این رابطه، موجودی سیستم در سناریوی ترکیبی را محاسبه می‌کند که در آن، هم‌زمان افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین و بهینه‌سازی پاسخگویی به تقاضا لحاظ شده‌اند. این رابطه به مدل اجازه می‌دهد تا اثر هم‌زمان بهبود در دو سیاست کلیدی (تاب‌آوری و پاسخگویی) را تحلیل نماید. هدف از این سناریو، شبیه‌سازی رفتار سیستم در شرایطی است که شرکت اقدامات ترکیبی برای افزایش انعطاف‌پذیری و سرعت پاسخ اجرا کرده است. همچنین در ادامه برای توضیح نحوه به‌دست‌آوردن ضرایب α و β با توجه به داده‌های بدست آمده در تحقیق حاضر، امتیازات زیر در نظر گرفته شده است:

- پاسخگویی به تقاضا (C10): حدود ۰/۵۰
- تاب‌آوری (C11): حدود ۰/۵۷

دو عدد پاسخگویی به تقاضا (C10) و تاب‌آوری (C11) بسیار نزدیک هستند؛ اما چون مدل ترکیبی روی رفتار موجودی تمرکز دارد (که بیشتر تحت‌تأثیر پاسخگویی به تقاضا است)، توجیه می‌شود که وزن پاسخگویی کمی بیشتر باشد. همچنین، طبق نتایج حاصل از تکنیک‌های وزن‌دهی چندمعیاره CRITIC و SAW، هر دو عامل پاسخگویی و تاب‌آوری دارای اهمیت بالایی در عملکرد زنجیره بودند (به ترتیب با وزن‌های ۰/۵۰ و ۰/۵۷). اما به دلیل نقش پاسخگویی به تقاضا در تنظیم سریع سطح موجودی، ضریب $\alpha=0.7$ برای آن و ضریب $\beta=0.3$ برای تاب‌آوری در سناریوی ترکیبی لحاظ شده است. تحلیل حساسیت با تغییر تدریجی ضرایب اثر تاب‌آوری، پاسخگویی و سودآوری انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد، تاب‌آوری بیشترین اثر را در کاهش نوسانات و پایداری موجودی‌ها دارد، درحالی‌که افزایش پاسخگویی نقش مؤثری در جلوگیری از انباشت موجودی‌های مازاد دارد و ترکیب آن دو می‌تواند اثربخشی بالایی در بهبود عملکرد داشته باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت: افزایش تاب‌آوری نه تنها ثبات موجودی را بهبود می‌بخشد؛ بلکه هزینه‌های عملیاتی را نیز کاهش می‌دهد. این یافته اهمیت سرمایه‌گذاری در

استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات در این مرحله باعث شد مدل نهایی قابلیت تطبیق با رفتار واقعی زنجیره تأمین را یافته و برای تحلیل سناریوها در شرایط واقعی کاربردی‌تر گردد.

جدول (۸): نوسانات تغییرات

تفسیر	خطای MSE	مقدار	ضریب
سیستم به تغییرات تقاضا بسیار حساس است	۰/۰۳۲	۰/۶۵	α
تاب‌آوری ۲۴٪ در کاهش نوسانات مؤثر است	۰/۰۴۱	۰/۲۴	β
اشتراک اطلاعات سهم کمتری در مدل دارد	۰/۰۲۷	۰/۱۱	γ

برای بررسی دقت مدل، نتایج شبیه‌سازی شده با داده‌های واقعی مقایسه گردید، آزمون t نشان داد که اختلاف بین این دو مجموعه داده از نظر آماری معنادار نیست ($p>0.05$) که این موضوع دقت مدل را تأیید می‌کند. در ادامه، سه سناریو برای تحلیل ساختار رفتاری سیستم طراحی گردید.

۴-۴- سناریوها

۱. پایه: مقادیر فعلی پارامترها
۲. بهبود تاب‌آوری: افزایش تاب‌آوری به میزان ۳۰٪
۳. ترکیبی: افزایش تاب‌آوری و بهینه‌سازی ضریب حساسیت به تقاضا (α) با الگوریتم ژنتیک

۴-۴-۱- تحلیل حساسیت سناریوها:

انتخاب سناریوها بر اساس مشاهدات میدانی و تحلیل ساختار زنجیره (داده‌های تاریخی و نتایج تحلیل رگرسیون) انجام شده است.

سناریوی پایه (اول):

نشان‌دهنده شرایط موجود زنجیره تأمین با مقادیر فعلی پارامترها (α, β, γ).

سناریوی دوم:

با افزایش ۳۰٪ ضریب تاب‌آوری (β)، نوسانات سطح موجودی به‌طور قابل توجهی کاهش یافت؛ به‌طوری که دامنه تغییرات موجودی از ± 150 واحد به ± 112 واحد محدود شد.

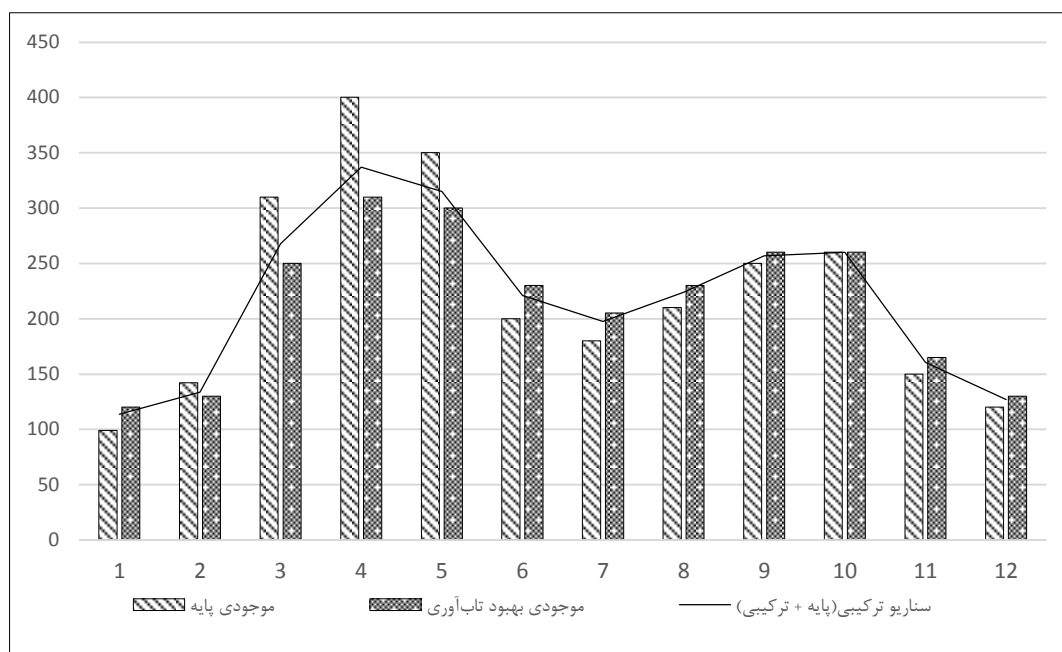
سناریوی سوم:

سناریوی ترکیبی بر اساس، ۳۰٪ بهبود تاب‌آوری (مانند سناریوی دوم) و ۲۰٪ بهینه‌سازی حساسیت سیستم به تقاضا (α) محاسبه گردیده است.

برای محاسبه خروجی موجودی در سناریو ترکیبی، از رابطه (۵) استفاده می‌شود:

داده‌های خروجی مدل در هر سه سناریو محاسبه و مقایسه شده‌اند و در شکل (۱۰) به نمایش درآمده‌اند.

زیرساخت‌های تاب‌آور (مانند سیستم‌های هشدار سریع و انبارهای اضطراری) را تأیید می‌کند.



شکل (۱۰): شبیه‌سازی اثر تاب‌آوری بر موجودی

۵- نتیجه‌گیری، محدودیت‌ها و پیشنهادهای آتی

در این پژوهش، مدلی ترکیبی برای شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر عملکرد زنجیره تأمین در حوزه توزیع ارائه شد. بر اساس داده‌های تجربی و بهره‌گیری از رویکرد پویایی سیستم، الگویی واقع‌گرا و منعطف طراحی گردید که قابلیت تحلیل رفتارهای پیچیده و تعاملات غیرخطی بین متغیرها را داراست.

نتایج تحقیق نشان داد که از میان ۱۳ عامل شناسایی‌شده، تاب‌آوری با وزن ۰/۲۴ اثرگذارترین عامل در بهبود عملکرد زنجیره است. همچنین سناریوهای شبیه‌سازی‌شده نشان دادند که افزایش ۳۰٪ تاب‌آوری منجر به کاهش نوسانات سطح موجودی از $15.0 \pm$ به $11.2 \pm$ واحد شده و در ترکیب با بهینه‌سازی نرخ پاسخگویی، هزینه‌های عملیاتی تا ۱۸٪ کاهش یافت. همان‌گونه که جدول (۹) نشان می‌دهد، افزایش تاب‌آوری به‌تنهایی اثر قابل‌توجهی در کاهش نوسانات و هزینه‌ها دارد؛ اما سناریوی ترکیبی با بهینه‌سازی همزمان پارامترهای کلیدی، منجر به بیشترین کاهش در اثر شلاقی (۳۲٪) و هزینه‌های زنجیره (۲۷٪) شده است. این نتایج با استفاده از داده‌های واقعی و تحلیل حساسیت در محیط MATLAB حاصل شد.

پس از اجرای سه سناریو طراحی‌شده در محیط شبیه‌سازی، شاخص‌های کلیدی عملکرد از جمله میانگین سطح موجودی، دامنه نوسانات، کل هزینه‌ها و شدت اثر شلاقی^۱ در بازه ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۳ استخراج شدند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تاب‌آوری (β) منجر به کاهش قابل‌توجه در نوسانات سفارش‌دهی و هزینه‌ها شده و در ترکیب با بهینه‌سازی ضریب حساسیت به تقاضا (α)، اثر به‌مراتب قوی‌تری بر کنترل هزینه‌ها و پایداری زنجیره دارد. شاخص کاهش اثر شلاقی، بر اساس مقایسه ضریب نوسان سفارش‌دهی در مراحل مختلف زنجیره محاسبه شده است و درصد کاهش هزینه، مجموع هزینه‌های زنجیره نسبت به حالت پایه می‌باشد. جدول (۹)

جدول (۹): مقایسه سناریوها

سناریو	تعریف سناریو	کاهش هزینه‌ها	کاهش اثر شلاقی
پایه	سناریو پایه (اول)	٪ ۰	٪ ۰
بهبود تاب‌آوری	سناریو دوم	٪ ۱۸	٪ ۲۵
ترکیبی	سناریو سوم	٪ ۲۷	٪ ۳۲

^۱ Bullwhip Effect

حلقه‌های زنجیره (فروش، تولید، لجستیک) به کار گرفته شود. این یافته‌ها می‌توانند مبنایی برای توسعه سیاست‌های تصمیم‌گیری در صنایع مشابه قرار گیرند و نشان می‌دهند که استفاده از روش‌های ترکیبی کمی، قدرت تحلیل و دقت تصمیم‌سازی را به شکل معناداری افزایش می‌دهد.

۵-۱- مقایسه با مطالعات پیشین

مطابق با جدول (۱۰) مقایسه‌ای از شاخص‌های کلیدی خروجی در پژوهش حاضر با نتایج شبیه‌سازی‌های این دو پژوهش ارائه شده است. یافته‌های این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که ترکیب سناریوها، اثرات پایداری بر کنترل نوسانات، کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد زنجیره را به همراه دارد. برخلاف پژوهش استرمن [۱] که تنها بر اثر شلاقی متمرکز بود؛ این مطالعه نشان داد تاب‌آوری می‌تواند به‌طور همزمان نوسانات تقاضا و هزینه‌ها را کاهش دهد.

جدول (۱۰): مقایسه نتایج تحقیقات

شاخص عملکرد	استرمن [۱]	ایوانف و دلگواری [۴]	پژوهش حاضر (سناریو ترکیبی)
کاهش نوسانات موجودی	± 130	± 118	± 112
کاهش هزینه کل	حدود ۲۰٪	۲۳٪	۲۷٪
تأخیر پاسخگویی (روز)	۲	۱/۷	۱/۵
مدل‌سازی دینامیکی	پویایی سیستم کلاسیک	ترکیب مدل‌سازی مبتنی بر عامل و پویایی سیستم به‌صورت ترکیبی	پویایی سیستم و الگوریتم ژنتیک

این پژوهش با ارائه چارچوبی نوآورانه برای ادغام عوامل نوین در مدل‌های پویایی سیستم، ابزاری قدرتمند برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهد بهبود تاب‌آوری نه تنها هزینه‌ها را کاهش می‌دهد، بلکه انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین را در برابر بحران‌ها افزایش می‌دهد.

۵-۲- محدودیت‌ها

هرچند نتایج حاصل از این پژوهش دارای قابلیت تعمیم به بخش گسترده‌ای از زنجیره تأمین صنایع در حوزه توزیع‌کننده می‌باشد؛ اما مانند هر مطالعه تجربی دارای محدودیت‌هایی است که از جمله می‌توان به تمرکز صنعتی و جغرافیایی اشاره نمود. این پژوهش صرفاً بر زنجیره تأمین یک شرکت توزیع‌کننده در صنعت شوینده متمرکز

استفاده از الگوریتم NSGA-II موجب شد تا جبهه‌ای از پاسخ‌های غیرمسلط^۱ شناسایی شود که توازن میان سه هدف کلیدی مدل شامل کمینه‌سازی هزینه عملیاتی، کاهش نوسانات سطح موجودی و بیشینه‌سازی سطح تاب‌آوری را برقرار می‌کند. در این الگوریتم، راه‌حل‌ها به‌صورت جمعیتی ارزیابی شده و با استفاده از مکانیزم رتبه‌بندی پارتو و فاصله پراکندگی^۲، انتخاب راه‌حل‌های بهینه انجام شد. به این ترتیب، رویکرد چندهدفه به‌صورت هم‌زمان و بدون نیاز به وزن‌دهی اولیه اهداف، در مدل پیاده‌سازی گردید.

یافته‌های پژوهش با داده‌های واقعی شرکت مورد مطالعه اعتبارسنجی شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی پویایی سیستم (SD)، تحلیل MCDM با روش‌های CRITIC و SAW و شبیه‌سازی تکاملی با NSGA-II، به طور خاص برای بهبود عملکرد زنجیره تأمین این شرکت قابل استفاده است. نتایج نشان داد که عامل تاب‌آوری (با وزن نهایی ۰/۲۴) بیشترین تأثیر را در کاهش نوسانات تقاضا و بهبود عملکرد زنجیره تأمین در این شرکت دارد. این امر نشان می‌دهد که مدل ارائه شده نه تنها از منظر نظری معتبر است؛ بلکه از منظر عملی نیز می‌تواند به مدیران این شرکت در تصمیم‌گیری‌های راهبردی کمک کند. با توجه به ساختار مشابه بسیاری از شرکت‌های فعال در صنعت شوینده، نتایج قابلیت تعمیم به سایر سازمان‌های مشابه را نیز داراست.

نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی مدل پویایی سیستم و تحلیل سناریوها، می‌تواند حاوی بینش‌های مدیریتی مهمی برای مدیران زنجیره تأمین در (کلیه) صنایع بشمار آید. همچنین به طور خاص افزایش تاب‌آوری زنجیره از طریق تنوع‌بخشی به تأمین‌کنندگان، بهبود پاسخ‌گویی از طریق هوشمندسازی فرآیند سفارش‌دهی، توسعه ظرفیت‌های ذخیره‌سازی، انعطاف‌پذیری و بهینه‌سازی متناسب با نیازها، یکپارچگی و شفافیت عملیاتی در طول زنجیره تأمین، همکاری و یکپارچگی سازمانی و استفاده از دانش و تکنولوژی در سرعت بخشیدن به احیای زنجیره پس از بروز یک بحران (جنگ، بیماری‌های فراگیر و ...) می‌تواند به کاهش نوسانات موجودی و افزایش سطح خدمات و در نهایت افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین منجر شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مدل ارائه شده بیانگر آن است که رویکردهای ترکیبی و بلندمدت، می‌توانند اثربخش‌تر از اقدامات مقطعی و جزئی باشند. این یافته‌ها می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای برنامه‌ریزی راهبردی و تصمیم‌گیری در حوزه‌هایی مانند طراحی سیاست‌های خرید و یا بهبود سطح هماهنگی میان

^۱ Pareto-optimal

^۲ crowding distance

- [6] A. Wieland and C. F. Durach, "Two perspectives on supply chain resilience," *J. Bus. Logist.*, vol. 36, no. 3, pp. 253–270, 2021, doi: 10.1111/jbl.12271.
- [7] R. Dokoochaki, S. Ebrahimi, and A. Askari Far, "Functional bottlenecks in a two-level wholesale-retail food distribution supply chain," *Supply Chain Manag. J. (SCMJ)**, vol. 24, no. 76, 2022. [In Persian]. doi: 20.1001.1.20089198.1401.24.76.4.5.
- [8] A. Amico et al., "Adapting to disruptions: Flexibility as a pillar of supply chain resilience," arXiv:2304.05290, 2023, doi: 10.1126/sciadv.adj1194.
- [9] J. A. Estrada-Garcia et al., "A multi-objective mixed-integer programming approach for supply chain disruption response with lead-time awareness," arXiv:2308.02687, 2023, doi: 10.48550/arxiv.2308.02687.
- [10] M. Faiz Elahi and M. Sharafi, "Development of a closed-loop supply chain mathematical model with fuzzy demand and supplier capacity constraints and its solution via metaheuristic algorithms," *Supply Chain Manag. J. (SCMJ)**, vol. 25, no. 79, pp. 17–38, 2023. [In Persian]. doi: 20.1001.1.20089198.1402.25.79.2.6.
- [11] M. Ebrahimpour, M. Moradi, and A. Fallahpour, "The impact of supply chain dynamics on the firm's sustainable performance with remanufacturing capability and supply chain resilience," *J. Strateg. Manag. Stud.**, vol. 14, no. 54, pp. 97–117, 2023. [In Persian]. doi: 10.22034/SMSJ.2023.173202.
- [12] H. Mollashahi, M. B. Fakhrzadeh et al., "Competition between supply chains based on resilience and sustainability indicators in the supply chain network design problem," *Supply Chain Manag. J. (SCMJ)**, vol. 26, no. 82, pp. 77–93, 2024. [In Persian]. doi: 20.1001.1.20089198.1403.26.82.6.3.
- [13] T. Lazebnik, "Evaluating supply chain resilience during pandemic using agent-based simulation," arXiv:2405.08830, 2024, doi: 10.48550/arxiv.2405.08830.
- [14] F. Karimi, J. Haghighat Monfared, and M. Keramati, "Evaluating the resilience and sustainability of the supply chain with the integrated approach of the theory of constraints, process approach and multi-criteria decision making (Case of study: Offshore sector of the oil industry)," *Ind. Manag. Perspect.**, vol. 14, no. 2, pp. 34–65, 2023. [In Persian]. doi: 10.48308/JIMP.14.2.34.

است؛ البته این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک الگو در طراحی مدل قرار گیرد؛ اما ویژگی‌های خاص این صنعت ممکن است کاربردپذیری مدل در زمینه‌های دیگر را محدود نماید.

از دیگر محدودیت‌ها بازه زمانی تحلیل می‌باشد. شبیه‌سازی مدل در بازه‌ای ۵۰ ماهه انجام شده که برای بررسی پایداری اولیه سیستم کفایت می‌کند. باین‌حال، ارزیابی پویایی بلندمدت مدل در بازه‌های زمانی گسترده‌تر (مثلاً ۷ تا ۱۰ ساله) می‌تواند بینش‌های دقیق‌تری در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار دهد.

همچنین محدودیت در داده‌های تاریخی مانند نرخ شکست سفارش، سطح پاسخگویی، و داده‌های هزینه‌ای بر پایه داده‌های ثبتی و برآوردهای کارشناسی بوده و امکان خطا وجود دارد.

۵-۳- پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده

- تعمیم و توسعه مدل طراحی‌شده به زنجیره‌های چندمرحله‌ای با تعامل مستقیم تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان نهایی.
- توسعه مدل با استفاده از یادگیری ماشین برای پیش‌بینی رفتار متغیرهای کلیدی مانند تقاضا و هزینه‌ها.
- ترکیب پویایی سیستم با رویکردهای شبیه‌سازی گسسته (برای مدل‌سازی دقیق‌تر عملیات).
- ارزیابی اقتصادی دقیق‌تر تأثیر سیاست‌های بهبودیافته از طریق تحلیل هزینه - فایده یا تحلیل ریسک بازده.
- در نظر گرفتن متغیرهای کلان برون زنجیره‌ای مانند نوسانات اقتصادی، بحران‌های سیاسی، تغییرات نرخ ارز یا اختلالات بازارهای بین‌الملل

۶- مراجع

- [1] J. D. Sterman, "Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. McGraw-Hill Education," 2000. ISBN-13: 9780072389159
- [2] T. J. Pettit, J. Fiksel, and K. L. Croxton, "Ensuring supply chain resilience: Development of a conceptual framework," *J. Bus. Logist.**, vol. 31, no. 1, pp. 1–21, 2011, doi: 10.1002/j.2158-1592.2010.tb00125.x.
- [3] U. Jüttner and S. Maklan, "Supply chain resilience in the global financial crisis: An empirical study," *Supply Chain Manag.: Int. J.**, vol. 16, no. 4, pp. 246–259, 2011, doi: 10.1108/13598541111139062.
- [4] D. Ivanov and A. Dolgui, "Viability of intertwined supply networks: Extending the supply chain resilience angles towards survivability," *Int. J. Prod. Res.**, 2020, doi: 10.1080/00207543.2020.1750727.
- [5] M. Emmerich and A. Deutz, "A tutorial on multiobjective optimization: Fundamentals and evolutionary methods," *Nat. Comput.**, vol. 17, no. 3, pp. 585–609, 2018, doi: 10.1007/s11047-018-9685-y.