Iranian Journal of Supply Chain Management
Vol. 27, No. 4, Winter 2026, Serial No. 89
ISSN: 2008-9198 , E-ISSN: 2717-1647

Predicting Aluminum Consumption to Improve the Logistics Process Using an Agent-Based Model

Nasser Azimi[1], Mahmoud Zanjerchi[2*], Davood Andalib Ardakani[3], Salman Abbasisir[4]

[1]PhD Student in Industrial Management, Operations Research, Department of Industrial Management, Azadi Campus, Yazd University, Yazd, Iran. Email Address: naserazimi@stu.yazd.ac.ir

[2]Correspondence: Professor, Industrial Management Department, Economics, Management & Accounting Faculty, Yazd University, Yazd, Iran. Email Address: zanjirchi@yazd.ac.ir

[3]Assosiate Professor, Industrial Management Department, Economics, Management & Accounting Faculty, Yazd University, Yazd, Iran. Email Address: andalib@yazd.ac.ir

[4]Assistant Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Economics, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran. Email Address: salman.abbasisiar@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 5 May 2025

Received in revised form: 28 June 2025

Accepted: 7 September 2025

Available online: 19 February 2026

Keywords:

System Dynamics

Supply Chain

Aluminum Industry

Agent-Based Modeling

Discrete Event Simulation

ABSTRACT

The primary objective of this study is to forecast future demand and improve logistics and raw material storage in the aluminum supply chain using a hybrid simulation approach. A 30-year dataset was used to forecast aluminum demand for the years 1403 to 1405 (Hijri Shamsi). To achieve this, a combination of discrete-event simulation (DES), system dynamics (SD), and agent-based modeling (ABM) was employed. Various probability distributions, mainly uniform and triangular, were applied based on modeling needs. The hybrid simulation model and sensitivity analysis show that the Iran Aluminum Company (IRALCO) supply chain can meet the projected demand increase over the next three years. The novelty of this research lies in integrating DES, SD, and ABM methodologies, enabling a more comprehensive and layered analysis of supply chain behavior. This integrated approach sets the study apart from previous research. The study adopts a mixed-methods design: the conceptual model was developed qualitatively, while quantitative techniques were used for model analysis. In light of resource constraints and the strategic importance of domestic aluminum supply, this research emphasizes innovative demand forecasting methods. Hybrid simulation is considered a suitable and underutilized tool in the literature, contributing to both theoretical advancement and methodological development. The high accuracy of forecasts derived through this approach underscores its effectiveness. Results highlight the significant roles of road and rail logistics, as well as warehousing, in enhancing supply chain performance.

Cite this article: N. Azimi, M. Zanjerchi, D. Andalib Ardakani, and S. Abbasisir, "Predicting Aluminum Consumption to Improve the Logistics Process Using an Agent-Based Model," Journal of Supply Chain Management, vol. 27, no. 4, pp. 27-46, 2026. DOI: https://doi.org/10.47176/scmj.2026.1623

OPEN ACCESS

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University

Introduction

Iran's aluminum industry, as one of the country's strategic sectors, faces numerous challenges, including an unstable supply of raw materials, high transportation costs, and fluctuations in currency and trade. Supply chain is one of the main requirements for maintaining the competitiveness of companies in today's world. In complex conditions, with uncertain horizons and intense competition, businesses face new challenges, and to deal with these operational pressures, new methods are invented every day to help reduce uncertainty and overcome these challenges. Supply chain management is one of the new methods that has been developed over the past three decades to deal with the challenges facing businesses. A concept with roots in logistics management, supply chain management gained wider recognition in the early 1980s, as computer technology advanced and expanded. For modeling, simulation, and improvement of related processes, one of the new modeling methods is the foundation factor, under which various software works, and the most powerful of all is the AnyLogic software. The main advantage of this research is the simultaneous use of three simulation methods (discrete event, system dynamics, and agent-based). This innovative combination allows complex behaviors and interactions between chain components to be modeled with greater accuracy and more effective decision-making.

This research aims to design and analyze the aluminum supply chain using a hybrid simulation model, through which behavioral patterns, strengths and weaknesses, and hidden capacities of the chain can be accurately identified; and improvement suggestions based on realistic scenarios can be presented. In this article, we will understand what obstacles Iralco faced and how the problem-solving solutions were solved using factor-based modeling, and software analyses show to what extent this company can manage the Iranian aluminum market.

Research Objectives and Questions

The Main Purpose of the Research

The main objective of this research is to design and analyze the behavior of the country's aluminum industry supply chain using a hybrid simulation approach (including factor-based modeling, system dynamics, and discrete-event simulation) and predict the trend of primary aluminum consumption in the future time horizon.

Sub-Goals

1. Identifying the key components, structure, and dimensions affecting the country's aluminum supply chain
2. Identifying and defining the main and active factors in the supply chain (such as suppliers, factories, ports, transportation fleets, customers, and competitors)
3. Forecasting the amount of primary aluminum consumption in the country in the coming years, based on dynamic modeling
4. Identifying quantitative relationships and rules between factors to develop an accurate behavioral model in the supply chain
5. Validating the designed model by comparing simulation outputs with actual production and sales data from previous years to evaluate the accuracy, correctness, and reliability of the proposed model.

Research questions

In accordance with the objectives set, this research seeks to answer the following questions:
1- How can a comprehensive and efficient model for the aluminum supply chain be designed that provides the ability to analyze its behavior, structure, and dynamics?
2- Is it possible to predict the amount of primary aluminum consumption using a factor-based modeling approach, and how reliable is this prediction?
3- What are the dimensions, variables, and factors that have the greatest impact on the performance of the aluminum supply chain and the trend of consumption of this metal?
4- How are the relationships between the effective factors in the aluminum supply chain defined, and what is their direction of influence and impact on each other?

Methodology

The present study was conducted with a mixed approach (qualitative-quantitative). In this study, a qualitative approach was used in the conceptual model design phase, and a quantitative approach was used in the model explanation phase. Therefore, this study is considered an inductive study with an exploratory-applied nature, because its goal is to present a new model in the field of the aluminum industry supply chain. To model the uncertainty in the key parameters of the supply chain, distribution functions appropriate to the nature of each variable were used. The selection of triangular, Poisson, and uniform distributions was based on the empirical behavior of the data, expert advice, and modeling conventions in the literature. This combination of distribution functions made the model more realistic and enabled a more accurate analysis of the system's behavior under conditions of uncertainty. The statistical population of this study was 24 supply chain officials from 4 primary aluminum-producing companies. Therefore, the following two approaches were used to advance the research.

1- Modeling Steps

Step 1: Study and review the theoretical foundations of the research.
Step 2: Interview with industry experts
Step 3: Selection of agents
Step 4: Collecting standard data and understanding computational rules.
Step 5: Conceptual validation of the model by interviewing experts
Step 6: Model implementation
Step 7: Final model report
Step 8: Practical proposal

2- Conceptual model

In the modeling carried out, all factors were considered. Among the eight factors (suppliers, ships, port silos, road transport, rail transport, factory silos, customers, and competitors), four factors were identified as supply chain bottlenecks using the fuzzy screening method, and their analysis through simulation was of particular importance. These four factors are more effective than other factors. The amount of storage in (1- port silos and 2- factory silos), as well as the choice of the type of transportation (1- rail and 2- road or a combination of both), are the basis of the scenarios developed in the research. Determining how much alumina powder should be sent to the factory from which warehouse and by which vehicle is the key point of the simulation in this article.

Results and Discussion

Expected Achievements and Results

The results of this research, focusing on the country's primary aluminum industry, especially in smelter industries, can be used at various decision-making levels. In addition to improving academic analyses, these results are also directly applicable to optimizing the logistics, production, and raw material supply performance of aluminum companies.

The modeling of the Iranian aluminum production supply chain is defined and can be simulated at four levels. These levels have been examined in the following scenarios.

Scenarios

Scenario 1: Supply chain sustainability due to alumina powder supply fluctuations

- The effect of reducing ship travel time on supply chain performance
- A 50% reduction in the time between ship departures from the port
- A 25% reduction in the time between ship departures from the port
- In the first scenario, a 25% reduction in the time between ship departures to the port led to a reduction in the unloading queue at the port and improved the inventory balance of the factory silos, but with a 50% reduction in the time, the port silos could not store and the ships stopped, leading to demurrage payments, and the order is not economically meaningful in this way.
- The effect of increasing ship travel time on supply chain performance
- A 25% increase in the time between ship departures from the port
- A 50% increase in the time between ship departures from the port
- Any percentage delay in the ship's arrival at the port dock will cause a crisis with the current conditions of storage facilities and the needs of production lines.

Scenario 2: Assessing Supply Chain Stability with Road Transport Fluctuations

- The Impact of a 25% Reduction in the Supply of Road Transport Vehicles on Factory Production
- The Impact of a 50% Reduction in the Supply of Road Transport Vehicles on Factory Supply Chain
- Sensitivity Analysis of Supply Chain Stability in Road Transport Fluctuations
- Sensitivity Analysis of Supply Chain Stability and Economic Assessment of Alumina Powder Transportation Methods
- Supply Chain Stability in the Case of Alumina Powder Transportation by Road Transport
- Supply Chain Stability in the Case of Alumina Powder Transportation by Rail Transport

✓ In the second scenario, a 25% fluctuation in road fleet supply caused a production decrease of 693 tons, which was compensated by an increase in rail traffic; but in a 50% fluctuation, production decreased by 897 tons, and an acceptable tolerance limit for the sustainable operation of the chain was identified. The combined transportation method (rail-road) with 150 wagons was the most optimal method for transporting alumina powder from the port to the factory, which was associated with a saving of 100 billion tomans in 1402 compared to the road-only method (annual cost reduction from 293.7 to 193 billion tomans).

Scenario Three: Investigating the Possibility of Increasing Production Capacity with the Current Logistics and Supply System

✓ In the third scenario, a 10% increase in the availability factor of recovery equipment led to an increase in production by 19,470 tons.

Fourth scenario: Investigating the possibility of increasing market share based on demand forecasts in the next three years.

✓ In the fourth scenario (demand growth), only by increasing the capacity of reduction, casting, changing the timing of alumina supply, and improving the supply chain was it able to meet the projected demand growth over the next three years.

Conclusion

Based on the outputs obtained from the hybrid simulation model, it was determined that the current conditions and capacity of the Iranian Aluminum Company's supply chain are not able to fully meet the country's aluminum ingot market demand in the next three years. In this situation, the number of backlog orders will increase and will reach about 100,000 tons. This shows that in order to effectively respond to demand, it is necessary to increase the factory's production rate.

In the third scenario, the improvement and modernization coefficient of the equipment of the recovery workshops is increased by 10%. This improvement can be achieved by relying on improving maintenance and repair processes, timely supply of spare parts, and equipping the workshop with new cranes. The simulation results show that this change will lead to an increase in the company's market share from 27% to 29% in aluminum ingot production.

However, the output of the simulation model shows that the supply chain performance in the third year (the end of the three-year period) is not sufficient to fully respond to demand. Therefore, simply increasing the availability rate of recovery equipment is not enough, and there is a need to make fundamental changes in ordering, storage, logistics, and production processes.

Sensitivity analysis

To determine the quantities needed to fully meet market demand over the next three years, a sensitivity analysis was conducted using a hybrid simulation model. In this analysis, the impact of various variables, including the utilization of production and logistics resources, the level of alumina powder in port and factory silos, and the amount of backlogged and pending orders, on supply chain performance was examined. The results of the hybrid simulation model, together with the values obtained from the sensitivity analysis, indicate that Iralco's supply chain has the ability to effectively respond to increased demand over the next three years.

Current and improved status

Title	Current status (ton)	Improved value (tons)
Alumina Powder Order	360000	**400000**
Distance Between Ship Movements	25	**20**
New Hall Capacity	110000	**122000**
Old Hall Capacity	70000	**77000**
Casting Hall Capacity	180000	**200000**

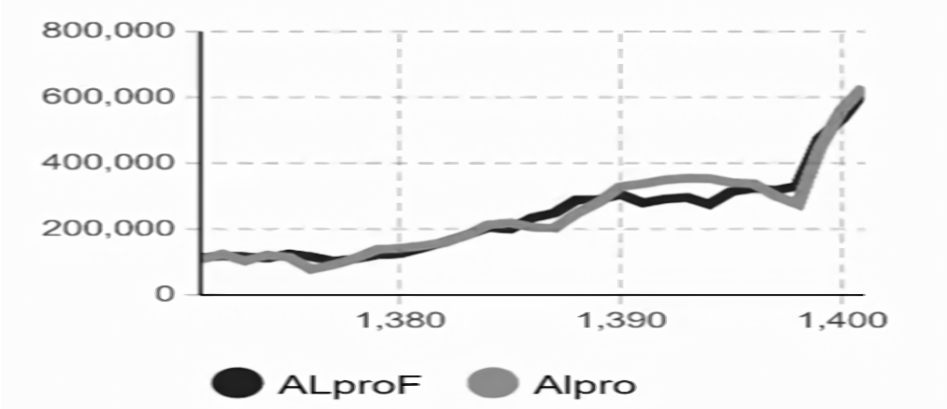
Since the main goal of simulation modeling is to recreate the real system behavior, it is essential to validate the developed hybrid simulation model for the aluminum supply chain. For this purpose, key performance indicators in the real system are compared with the corresponding outputs in the simulation model. The basis for model acceptance is the existence of a difference of less than 5% between the model results and the real data.

If this difference is within the permissible range, the model validity can be confirmed. To increase the accuracy and reduce the influence of random numbers, the simulation model is run with 30 different random initial values , and the average of the results is used for the final analysis. The results of the comparison between the simulation model output and the real data are presented in the table below.

Actual production and sales volume compared to their simulated volume in 1402

Title	Real production(ton)	Simulation model(ton)	Disagreement
Iralco Production	156612	158615	%1/28
Al-Mahdi Production	146951	147817	%0/59
Salco Production	268727	269873	%0/43
Jajarm production	35960	36323	%1/01
Iralco Sales	154262	154562	%0/19
Al-Mahdi Sales	148451	145014	%2/3
Salco sales	260665	265207	%1/7
Jajarm sale	35240	35573	%0/9

As can be deduced from the data in the table above, there is a very small difference between the actual production and the forecasted amount until reaching the 600,000 tons of primary aluminum, and there seems to be an acceptable agreement between them. The figure below shows the output from the system dynamics section of the AnyLogic software based on actual and forecasted data for all aluminum production plants in the country. This chart shows the production trend from 1991 to 2023, the actual data of which are adjusted based on statistics published by the Tehran Commodity Exchange. Comparing these results with the outputs of the factor-based section presented in the table above shows the favorable agreement between the two sections and confirms their validity. In the figure below, the lighter line represents the actual production trend of aluminum companies in Iran. The bolder line represents the production forecasted by the "System Dynamics" section of the model. As can be seen, the match between the two lines is very close, and their difference is negligible; this confirms the validity of the combined simulation model.



Actual and projected primary aluminum production from 1370 to 1

نشریه «مدیریت زنجیره تامین»
سال بیست و هفتم، شماره ۸۹، زمستان ۱۴۰۴؛ ص ۴۶-۲۷
شاپای چاپی: ۲۰۰۸-۹۱۹۸| شاپای الکترونیکی: ۲۷۱۷-۱۶۴۷

پیش‌بینی میزان مصرف آلومینیوم به‌منظور بهبود فرایندلجستیک با رویکرد عامل بنیان

ناصر عظیمی[۱]، سید محمود زنجیرچی[۲*]، داوود عندلیب اردکانی[۳]، سلمان عباسی سیر[۴]

[۱]دانشجوی دکترای مدیریت صنعتی، گرایش تحقیق در عملیات، گروه مدیریت صنعتی، پردیس آزادی، دانشگاه یزد، یزد، ایران. رایانامه: naserazimi@stu.yazd.ac.ir
[۲]استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد، مدیریت و حسابداری، دانشگاه یزد، یزد، ایران. (نویسنده مسئول). رایانامه: zanjirchi@yazd.ac.ir
[۳]دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد، مدیریت و حسابداری، دانشگاه یزد، یزد، ایران. رایانامه: andalib@yazd.ac.ir
[۴]استادیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی تهران، تهران، ایران. رایانامه: salman.abbasisiar@gmail.com

چکیده

هدف اصلی این پژوهش، پیش‌بینی تقاضای آینده و بهبود عوامل لجستیکی و ذخیره‌سازی مواد اولیه در زنجیره تأمین آلومینیوم با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی ترکیبی است. برای این منظور، از داده‌های ۳۰ساله به‌منظور پیش‌بینی تقاضای آلومینیوم در سال‌های ۱۴۰۳ تا ۱۴۰۵ استفاده شده است. ترکیبی از شبیه‌سازی رویداد گسسته (DES)، پویایی سیستم (SD) و شبیه‌سازی عامل‌بنیان (ABM) در مدل‌سازی به‌کارگرفته‌شده است. بسته به نیاز مدل، از توزیع‌های احتمالی مختلف، به‌ویژه توزیع یکنواخت و مثلثی، استفاده شده است. تحلیل حساسیت مدل شبیه‌سازی ترکیبی نشان داد که زنجیره تأمین شرکت ایرالکو توان پاسخ‌گویی به افزایش تقاضا در سه سال آینده را دارد. نوآوری اصلی پژوهش، استفاده همزمان از سه رویکرد شبیه‌سازی است که امکان تحلیل چندلایه و دقیق‌تری از رفتار زنجیره تأمین را فراهم کرده و این تحقیق را از مطالعات پیشین متمایز می‌سازد. پژوهش با رویکرد آمیخته (کیفی - کمی) انجام شده است؛ مدل مفهومی با روش کیفی و تحلیل مدل با روش کمی توسعه یافته است. در شرایط کمبود منابع و اهمیت تأمین داخلی آلومینیوم، تمرکز بر پیش‌بینی تقاضا با روش‌های نوین، از اهمیت بالایی برخوردار است. شبیه‌سازی هیبریدی، باوجود کاربرد محدود در ادبیات پیشین، روشی نوآورانه و مؤثر در توسعه نظریات این حوزه است. نتایج نشان داد عوامل لجستیک جاده‌ای، ریلی و انبارش بیشترین اثر را در بهبود عملکرد زنجیره داشته‌اند.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:
نوع مقاله: علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰

کلیدواژه‌ها:
پویایی سیستم
زنجیره تأمین
صنعت آلومینیوم
عامل بنیان
گسسته پیشامد

استناد: عظیمی، ناصر، زنجیرۀ، سید محمود، عندلیب اردکانی، داوود، عباسی سیر، سلمان، " پیش‌بینی میزان مصرف آلومینیوم به‌منظور بهبود فرایند لجستیک با رویکرد عامل بنیان"، نشریه مدیریت زنجیره تامین، دوره ۲۷، شماره ۴۴، صفحات ۴۶-۲۷، ۱۴۰۴.
DOI: https://doi.org/10.47176/scmj.2026.1623

© نویسنده (گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

OPEN ACCESS

ناشر: دانشگاه جام امام حسین (ع).

۱- مقدمه

هماهنگی میان عوامل مختلف زنجیره تأمین، یکی از الزامات اصلی برای حفظ رقابت‌پذیری شرکت‌ها در دنیای امروز است. در شرایط پیچیده، همراه با افق‌های نامطمئن و رقابت‌های شدید، کسب و کارها با چالش‌های جدیدی مواجه می‌شوند [۱]. برای مقابله با این فشارهای عملیاتی، هر روز روش‌های جدیدی ابداع می‌شوند تا به کاهش عدم اطمینان و گذر از این چالش‌ها کمک کنند [۲]. مدیریت زنجیره تأمین یکی از روش‌های جدیدی است که طی سه دهه گذشته برای مقابله با چالش‌های پیش‌روی کسب‌وکارها توسعه‌یافته است [۳]. مدیریت زنجیره تأمین طی ۱۰۰ سال گذشته از فرایندهای کار فشرده به مدیریت شبکه‌های جهانی تکامل‌یافته است؛ مفهومی که ریشه در مدیریت لجستیک دارد. در اوایل دهه ۱۹۸۰، با پیشرفت و گسترش فناوری رایانه، مدیریت زنجیره تأمین به شکلی گسترده‌تر شناخته شد [۴]. در عصر صنعت ۴، آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل ویژگی‌هایی همچون سبکی وزن، انعطاف‌پذیری، مقاومت در برابر خوردگی، هدایت الکتریکی و قابلیت تشکیل آلیاژهای متنوع، نقش حیاتی ایفا می‌کنند. علاوه بر این، ارزیابی چرخه عمر و رویکردهای احراز هویت چندعاملی برای ارزیابی چرخه کامل تولید آلومینیوم و زنجیره تأمین به کار گرفته‌شده است [۵] , [۶]. تحقیقات همچنین بر پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی صنعت آلومینیوم تمرکز دارد [۷] , [۸]. صنعت آلومینیوم ایران به دلیل وابستگی شدید به پودر آلومینای وارداتی با چالش‌های جدی روبرو است، به‌طوری که تنها حدود ۱۵ درصد از نیاز کشور به این ماده در داخل تأمین می‌شود. باوجود برنامه‌ریزی برای افزایش ظرفیت تولید به ۱/۵ میلیون تن تا سال ۲۰۲۵، این صنعت همچنان با محدودیت منابع بوکسیت داخلی و وجود تنها یک پالایشگاه آلومینا در جاجرم که سالانه ۲۴۵۰۰۰ تن آلومینا تولید می‌کند، مواجه است. برای مقابله با این چالش‌ها، نگاه به صنعت آلومینیوم به‌عنوان یک زنجیره تأمین، از مواد اولیه تا محصولات نهایی، و تمرکز بر پیش‌بینی تقاضا و فروش اهمیت زیادی دارد؛ چرا که انتخاب مدل‌های مناسب برای پیش‌بینی، جهت کاهش خطاها، امری حیاتی است. تحقیقات نشان می‌دهد که محیط کسب‌وکار به طور فزاینده‌ای پیچیده و رقابتی شده است و عملکرد حوزه تولید به‌ویژه در زمینه حجم تولید و سیاست‌گذاری‌های مرتبط، به یکی از حوزه‌های کلیدی تبدیل شده است [۹]. مدل‌های مبتنی بر عامل برای مدیریت تغییرات پیچیده و مهم در حالت‌های متغیر سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰]. فرایند تولید آلومینیوم، از استخراج تا بازیافت، به دلیل پیچیدگی‌های ذاتی خود، به‌عنوان یک سیستم پیچیده شناخته می‌شود. رویکردهای مدل‌سازی سنتی، مانند مدل‌های تعادل قابل‌محاسبه، اغلب تعاملات و رفتارهای گذرا را بیش از حد ساده می‌کنند [۱۱]. به همین دلیل، مدل‌های غیرخطی، نظیر رویکرد «عامل بنیان»، گزینه‌ای مناسب‌تر برای مدل‌سازی و مدیریت زنجیره تأمین آلومینیوم هستند. این رویکرد امکان نمایش هر ذی‌نفع به‌عنوان یک عامل مستقل را فراهم کرده و تعاملات پویا و توزیع‌شده را در طول زمان تسهیل می‌کند. مزیت اصلی این پژوهش در به‌کارگیری هم‌زمان سه روش شبیه‌سازی (رویداد گسسته، پویایی سیستم و عامل بنیان) است. این ترکیب نوآورانه باعث می‌شود تا رفتارهای پیچیده و تعاملات بین اجزای زنجیره بادقت بالاتری مدل‌سازی شده و تصمیم‌سازی اثربخش‌تری انجام شود. چنین رویکردی در ادبیات موجود بسیار نادر است و سهم مهمی در توسعه ابزارهای تحلیلی زنجیره تأمین دارد. این مقاله به طراحی مدل زنجیره تأمین آلومینیوم، شناسایی عوامل کلیدی آن و پیش‌بینی میزان تقاضا در بازار ایران با بهره‌گیری از رویکرد شبیه‌سازی ترکیبی، با تمرکز ویژه بر مدل‌سازی عامل بنیان، می‌پردازد. هدف این پژوهش طراحی مدلی است که بتواند هزینه‌های زنجیره تأمین را کاهش دهد و آینده تولید و مصرف این فلز را پیش‌بینی کند. بخش قابل‌توجهی از تحقیقات پیشین در حوزه زنجیره تأمین، توسط محققینی همچون [۱۲] , [۱۳] , [۱۴] , [۱۵] , [۱۶] و دیگران انجام شده است که هر یک با روش‌های مختص به خود، زنجیره تأمین را بررسی کرده‌اند. در این تحقیق، زنجیره تأمین آلومینیوم با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، تعدادی از محققان، از جمله [۱۷] , [۱۸] , [۱۹] و دیگران، مسائل خود را با تمرکز بر یکی از سه روش شبیه‌سازی تحلیل کرده‌اند.

۲- مبانی و پیشینه تحقیق

۲-۱- زنجیره تأمین

مدیریت زنجیره تأمین از طریق به اشتراک‌گذاری دانش و اطلاعات میان گروه‌های کاری در زنجیره، به بهبود کارایی و عملکرد آن‌ها

کمک می‌کند [۲۰]. همان‌طور که [۲۱] , [۲۲] اشاره کرده‌اند، مشارکت در زنجیره تأمین باعث افزایش دقت، سرعت و تطبیق‌پذیری در پاسخ به نیازهای مشتریان، ترویج استفاده از آخرین فناوری‌ها و خدمات، و ایجاد فرصت‌هایی برای سرمایه‌گذاری و درآمدزایی در زنجیره تأمین می‌شود. همچنین، ابتکار شراکت به‌عنوان ابزاری برای مدیریت مالی فشرده در زنجیره تأمین مطرح شده است. بااین‌حال، مشارکت در بخش پایین زنجیره تأمین ممکن است به طور بالقوه منجر به رضایت از خود شود، بدون توجه به مشکلات احتمالی ناشی از ارائه‌دهندگان خدمات که شامل صنعتگران، مشاوران، تأمین‌کنندگان مواد و قطعات، و پیمانکاران فرعی می‌شود، و در نهایت می‌تواند هزینه‌های بالاتری برای مشتریان ایجاد کند [۲۳]. تقسیم کار پیچیده میان مشاوران، صنعتگران، پیمانکاران و تأمین‌کنندگان مواد به‌عنوان یک موضوع ضروری و اولویت تغییر، موردتوجه قرار گرفته است [۲۴]. عوامل رقابتی مرتبط با شاخص‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی می‌توانند تصمیم‌گیری درباره ساختار شبکه زنجیره تأمین را تحت‌تأثیر قرار دهند و موفقیت آن را برای آینده تضمین کنند [۲۵]. همچنین، تحقیقات نشان داده‌اند که توسعه تأمین‌کنندگان، ارزیابی عملکرد آن‌ها و ایجاد انگیزه برای بهبود عملکرد، به‌عنوان یک ویژگی کلیدی مدیریت زنجیره تأمین، نقش مهمی در پذیرش و موفقیت این رویکرد ایفا می‌کنند [۲۶]. [۲۰] مدیریت زنجیره تأمین را به‌عنوان یک رابطه دوتایی با تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان طبقه‌بندی می‌کند. باوجود تمامی شیوه‌های مرتبط با مدیریت زنجیره تأمین، هیچ یک به طور کامل تمامی عملکردهای کلیدی لازم برای تحویل که تمرکز اصلی مدیریت زنجیره تأمین بر آن است، را به‌صورت یکپارچه پوشش نمی‌دهند. بااین‌حال، تمامی این شیوه‌ها به جریان اطلاعات قوی، شفافیت در جریان مالی، روابط مبتنی بر اعتماد، انتصاب زودهنگام اعضای کلیدی، همکاری بلندمدت و تعهد به اهداف مشترک نیازمند هستند [۲۷]. باتوجه‌به نتایج و کاهش هزینه‌ها، مدیریت زنجیره تأمین می‌تواند با استفاده از یکی از سناریوهای طراحی شده، بر اساس شرایط موجود، بهره‌برداری کند و با انجام تحقیقات جامع‌تر، نسبت به کاهش هزینه‌ها، زمان و افزایش سرعت ناوگان به‌منظور بهبود ظرفیت خدمات اقدام نماید [۲۸]. از مهم‌ترین تصمیمات مرتبط با انتخاب شرکت‌های تأمین‌کننده می‌توان به تعیین مناسب‌ترین مکان‌ها برای تأسیس مراکز بالقوه، مشخص‌کردن مقادیر حمل‌ونقل میان‌لایه‌های زنجیره تأمین و انتخاب روش‌های حمل‌ونقل بین گره‌های شبکه اشاره کرد [۲۹]. به همین دلیل، اجرای روش‌های ناب نه‌تنها به کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند، بلکه سازمان را در دستیابی به اهداف زیست‌محیطی و اجتماعی یاری می‌دهد [۳۰]. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، میزان موجودی اقتصادی قابل نگهداری در مراکز جمع‌آوری مورد بررسی قرار گرفت و مقدار بهینه آن تعیین شد [۳۱].

۲-۲- مدل‌سازی عامل بنیان زنجیره تأمین

شبیه‌سازی زنجیره تأمین به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین در حوزه علوم مدیریت، با پیشرفت‌های فناوری در دنیای کامپیوتر، نقش مهمی در مدیریت جریان‌های پیچیده و چندلایه ایفا می‌کند. حجم زیاد داده‌ها و محدودیت توان محاسباتی انسان در تحلیل این اطلاعات پیچیده، موجب شده است تا کامپیوترها به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای پردازش داده‌های بزرگ مورداستفاده قرار گیرند. بهره‌گیری از شبیه‌سازهای عامل بنیان، به دلیل استفاده از عامل‌های هوشمند، می‌تواند به شکل قابل‌توجهی عملکرد زنجیره تأمین را بهبود بخشد.

انعطاف‌پذیری، به‌عنوان یکی از ویژگی‌های اصلی عامل‌ها، باعث افزایش توانایی زنجیره تأمین در انطباق با تغییرات و تقویت عملکرد هر یک از اجزای آن می‌شود. به‌کارگیری شبیه‌سازی ترکیبی نه‌تنها به بهینه‌سازی زمان سفارش‌ها کمک می‌کند، بلکه استفاده مطلوب از تجهیزات خطوط تولید و بهبود فرایند توزیع را نیز امکان‌پذیر می‌سازد [۳۲]. شبیه‌سازی عامل‌بنیان، نوعی مدل‌سازی کامپیوتری است که برای تحلیل سیستم‌های پیچیده و پویا با تعداد زیادی عوامل ناهمگن به کار می‌رود. به دلیل ویژگی‌های خاص این نوع مدل‌سازی، سیستم‌های پیچیده مذکور را نمی‌توان با روش‌های دیگر، به جز مدل‌سازی عامل‌بنیان، به‌طور دقیق تحلیل کرد[۳۳].

۲-۳- پیشینه پژوهش

در جدول (۱)، مروری بر مهم‌ترین پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه مدیریت زنجیره تأمین ارائه شده است.

جدول (۱): خلاصه پیشینه پژوهش

نام نویسنده / نویسندگان – منبع	موضوع	نتایج و یافته‌ها
یارا کیالی الالم و همکاران [۳۳]	یک چارچوب مبتنی بر یادگیری ماشین برای پیش‌بینی فروش محصولات جدید با چرخه عمر کوتاه با استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق	مدل ARIMAX ساده، در شرایط عادی عملکرد بهتری نسبت به شبکه‌های عصبی عمیق (DNN) دارد. بااین‌حال، زمانی که نویز به تحلیل استحکام اضافه می‌شود، عملکرد ARIMAX به طور قابل‌توجهی کاهش‌یافته، درحالی‌که شبکه‌های عصبی عمیق، پایداری و عملکرد قوی خود را حفظ می‌کنند.
[۳۴] یوزیاو و جینکیتی هان	پیش‌بینی انتشار محصول جدید با مدل مبتنی بر عامل	مدل مبتنی بر عامل به‌عنوان ابزاری قدرتمند، قابلیت بالایی در پیش‌بینی انتشار محصولات جدید دارد و می‌تواند به طور گسترده در این حوزه مورداستفاده قرار گیرد.
استیفن آ ملنیک و همکاران [۱۲]	طراحی زنجیره تأمین: مسائل، چالش‌ها، چارچوب‌ها و راه‌حل‌ها	برای حل مسائل مرتبط با زنجیره تأمین، توجه به طراحی اجتماعی، رفتاری و ساختاری ضروری است، زیرا این جنبه‌ها نقش مهمی در بهبود عملکرد و مدیریت مؤثر زنجیره تأمین ایفا می‌کنند.
زانگ و همکاران [۱۴]	پیوند شیوه‌های مدیریت زنجیره تأمین سبز با رقابت در طول کووید ۱۹ : نقش تجزیه‌وتحلیل داده‌های بزرگ	تجزیه‌وتحلیل داده‌های بزرگ (AI-BDA) و رؤیت‌پذیری زیست‌محیطی، ارتباط مثبتی میان مدیریت زنجیره تأمین سبز (GSCM)، سیستم مدیریت زیست‌محیطی (EMS) و رقابت‌پذیری بازار ایجاد می‌کنند که به تقویت و تشدید این رابطه کمک می‌کند.
چن و همکاران [۱۵]	یک برنامه مالی زنجیره تأمین مبتنی بر بلاک‌چین برای صنعت خرده‌فروشی خودرو	تحقیقات نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، تمرکز بر حفظ پایداری در عملیات زنجیره تأمین در نشریات مرتبط با صنعت خرده‌فروشی خودرو (RCR) به طور قابل‌توجهی افزایش‌یافته است.
نقی‌زاده و همکاران [۳۵]	عوامل مؤثر بر پذیرش تأمین مالی زنجیره تأمین در اثربخشی زنجیره تأمین	نتایج نشان‌دهنده تأیید تمامی فرضیه‌های توسعه‌یافته بوده و بر اهمیت عوامل مؤثر بر پذیرش تأمین مالی زنجیره تأمین در افزایش اثربخشی آن تأکید دارد.
عباسی سیر و همکاران [۳۶]	شبیه‌سازی عامل بنیان رفتار مصرف‌کننده در خرید آنی	عامل‌های مورداستفاده در این پژوهش، رفتار خرید آنی مصرف‌کنندگان را به‌عنوان یک تحلیل اقتصادی، بر پایه ارتباط میان مشتری و محصول، به‌طور دقیق و جامع توصیف کرده‌اند.
سعید روشنی [۳۷]	کاربرد مدل‌سازی عامل بنیان در تحلیل سیستم‌های پیچیده اجتماعی: روش‌شناسی تحلیل سیستم‌های نوآوری	رویکرد مدل‌سازی عامل بنیان به دلیل توانایی بالا در تحلیل قواعد رفتاری عوامل و شبیه‌سازی رفتار آن‌ها، تناسب قابل‌توجهی با سیستم‌های پیچیده اجتماعی دارد و می‌تواند به طور مؤثر برای تحلیل سیستم‌های نوآوری به کار گرفته شود.

۲-۴- جایگاه پژوهش حاضر در ادبیات و شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی

پژوهش حاضر با طراحی یک مدل ترکیبی مبتنی بر سه روش شبیه‌سازی (DES، SD، ABM) برای زنجیره تأمین صنعت آلومینیوم ایران، گامی نوآورانه در راستای پر کردن شکاف‌های موجود برداشته است. جدول (۲)، مهم‌ترین تمایزها و مزیت‌های پژوهش حاضر را نسبت به مطالعات پیشین نشان می‌دهد:

جدول (۲): بررسی ابعاد شکاف تحقیقاتی

معیار مقایسه	مطالعات پیشین	پژوهش حاضر	شکاف / مزیت کلیدی
نوع شبیه‌سازی	تمرکز بر یک روش (DES یا SD یا ABM)	استفاده ترکیبی از سه روش شبیه‌سازی (DES + SD + ABM)	فقدان مدل ترکیبی جامع در ادبیات
صنعت موردمطالعه	صنایع عمومی: خرده‌فروشی، دارویی، خودرو	زنجیره تأمین صنعت آلومینیوم ایران	تمرکز بر یک صنعت استراتژیک با ویژگی‌های خاص
سطح تحلیل	محدود به بخشی از زنجیره (کارخانه یا مصرف‌کننده)	تحلیل کل زنجیره: تأمین‌کننده ← تولید ← توزیع ← بازار	نبود نگاه جامع و یکپارچه به کل زنجیره
نوع داده و پیش‌بینی	داده‌های کوتاه‌مدت یا مدل‌های یادگیری ماشین	استفاده از داده‌های ۳۰ساله و پیش‌بینی با مدل ترکیبی	عمق تاریخی داده‌ها و دقت پیش‌بینی
پارامترهای لجستیکی بررسی‌شده	تمرکز روی موجودی یا هزینه محدود	بررسی جامع حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی، سفارش، تولید	تنوع و گستره متغیرهای تحلیلی
مشارکت ذی‌نفعان و خبرگان	محدود به تحلیل‌های نظری یا داده‌های ثانویه	مصاحبه با معاونان و مدیران ۴ شرکت اصلی آلومینیوم ایران	اعتبار میدانی و کاربردپذیری بالای مدل
تحلیل اقتصادی و سناریو	محدود یا صرفاً تئوریک	تحلیل هزینه - فایده حمل‌ونقل و ارزیابی چندین سناریو	قابلیت پشتیبانی تصمیم‌گیری در شرایط واقعی
ابزار مورداستفاده	نرم‌افزارهای تک‌بعدی مثل Arena، Vensim	استفاده از AnyLogic برای ترکیب هر سه رویکرد	بهره‌گیری از پلتفرم یکپارچه مدرن

۳- روش‌شناسی پژوهش

تحقیق حاضر با رویکرد آمیخته (کیفی–کمی) انجام شده است. در این پژوهش، از رویکرد کیفی در فاز طراحی مدل مفهومی و از رویکرد کمی در فاز تبیین مدل استفاده شده است؛ بنابراین، این تحقیق یک مطالعه استقرایی با ماهیت اکتشافی–کاربردی محسوب می‌شود، چرا که هدف آن ارائه مدلی جدید در حوزه زنجیره تأمین صنعت آلومینیوم است. مدل پیشنهادی پتانسیل کاربردی شدن در این صنعت را دارد. جامعه آماری این تحقیق شامل کلیه معاونین و مدیران ارشد در چهار شرکت اصلی آلومینیوم ایران (ایرالکو، المهدی، سالکو و جاجرم) است که در فرایند تصمیم‌سازی راهبردی زنجیره تأمین مشارکت مستقیم دارند. باتوجه‌به محدود بودن این جامعه، از روش تمام شماری استفاده شد و در مجموع ۲۴ نفر که شامل تمامی معاونان این شرکت‌ها بودند، در مصاحبه‌ها مشارکت داشتند. اطلاعات تحقیق از طریق مطالعه کتابخانه‌ای و مصاحبه با خبرگان جمع‌آوری شده است. این پژوهش در چارچوب پارادایم رئالیسم انتقادی انجام شده و برای پاسخ به پیش‌بینی میزان تقاضای فلز آلومینیوم از مطالعه کتابخانه‌ای و نرم‌افزار انی‌لاجیک استفاده گردید. همچنین، به‌منظور پاسخ به ابعاد متغیرها، روابط و جهت اثرگذاری و اثرپذیری ابعاد مؤثر در زنجیره تأمین، نظرات خبرگان از طریق مصاحبه با همکاران (اعم از شاغل و بازنشسته)، اطلاعات سایر شرکت‌های ذوب اولیه در ایران و اسناد مرتبط گردآوری شده است.

برای مدل‌سازی عدم قطعیت موجود در پارامترهای کلیدی زنجیره تأمین، از توابع توزیع مناسب با ماهیت هر متغیر استفاده شده است. انتخاب نوع تابع توزیع بر اساس رفتار تجربی داده‌ها، توصیه خبرگان و عرف مدل‌سازی در ادبیات انجام شده است:

- توزیع مثلثی: برای زمان حمل با کشتی که دارای مقدار حداقل، حداکثر و یک مقدار محتمل است (که با احتمال بیشتری رخ می‌دهد)، از توزیع مثلثی استفاده شده است. این توزیع برای مدل‌سازی فرایندهایی با عدم قطعیت محدود و دانش ذهنی مناسب است و امکان تمرکز بر مقدار محتمل را فراهم می‌سازد.

- توزیع پواسون: برای عرضه ساعتی خودروها به سیلوها که فرایندی گسسته و نوبتی است، از توزیع پواسون استفاده شده است. این توزیع مدل‌سازی مناسبی برای رویدادهای تصادفی در بازه‌های زمانی یکنواخت محسوب می‌شود.

- توزیع یکنواخت: در برخی پارامترهای زمانی دیگر مانند فاصله بین ارسال‌ها یا تأخیر در برخی فعالیت‌ها که تنها در یک بازه حداقلی تا حداکثری تغییر می‌کنند و همه مقادیر در آن بازه احتمال یکسان دارند، از توزیع یکنواخت استفاده شده است.

این ترکیب از توابع توزیع، باعث واقع‌گرایی بیشتر مدل و امکان تحلیل دقیق‌تر رفتار سیستم تحت شرایط عدم قطعیت شده است. این انتخاب‌ها باتوجه‌به ماهیت پارامترها و توصیه خبرگان، دقت مدل‌سازی را افزایش داده و پایه‌ای منطقی برای شبیه‌سازی رفتار زنجیره تأمین فراهم کرده است.

۳-۱-گام‌های مدل‌سازی

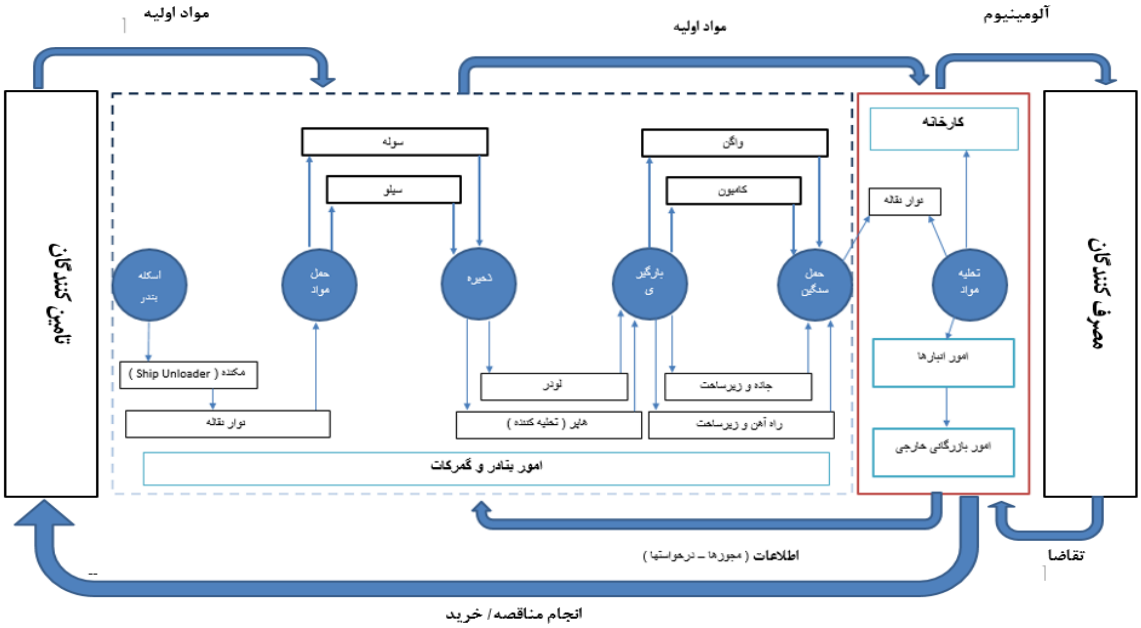
گام‌های پژوهش حاضر در هشت مرحله انجام شده است. پیچیدگی عوامل و شرایط مورد بررسی در این تحقیق باعث شد به‌جای استفاده از نرم‌افزارهای مختلفی مانند آرنا و ونسیم، از نرم‌افزار ترکیبی انی‌لاجیک استفاده شود، چرا که این نرم‌افزار قادر است نیازهای پژوهش را به‌صورت جامع و یکپارچه پوشش دهد.

شکل (۱): گام‌های انجام پژوهش

۳-۲- مدل مفهومی پژوهش

در مدل‌سازی انجام‌شده، تمامی عوامل موردتوجه قرار گرفتند. از میان این هشت عامل، چهار عامل به کمک روش غربالگری فازی به‌عنوان گلوگاه‌های زنجیره تأمین شناسایی شدند که تحلیل آن‌ها از طریق شبیه‌سازی اهمیت ویژه‌ای داشت. این چهار عامل نسبت به سایر عوامل، اثربخشی بیشتری دارند. مقدار ذخیره‌سازی در سیلوهای

بندر و کارخانه، همچنین انتخاب نوع حمل‌ونقل (ریلی، جاده‌ای یا ترکیبی از هر دو) مبنای سناریوهای تدوین‌شده در پژوهش است. تعیین اینکه چه مقدار پودر آلومینا از کدام انبار و با چه وسیله نقلیه‌ای به کارخانه ارسال شود، نقطه کلیدی شبیه‌سازی در این مقاله محسوب می‌شود. در نهایت، پس از بررسی نظرات خبرگان، مدل مفهومی زیر ترسیم شد.



شکل (۲): مدل مفهومی پژوهش

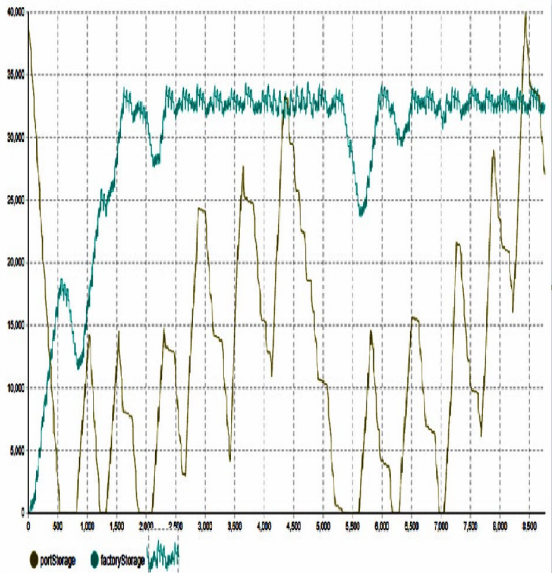
۴- یافته‌های پژوهش

مدل زنجیره تأمین تولید آلومینیوم ایران در چهار سطح تعریف شده و قابل شبیه‌سازی است. این سطوح در قالب سناریوهای زیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۴-۱- سناریوها

۴-۱-۱- سناریوی پایداری زنجیره تأمین با توجه به نوسانات عرضه پودر آلومینا

پودر آلومینا سالانه دو بار، بافاصله زمانی شش‌ماهه و از طریق مناقصه بین‌المللی سفارش داده می‌شود. مدت‌زمان حرکت کشتی از مبدأ تا بندر از توزیع یکنواخت (۲۵، ۳۲) روز پیروی می‌کند. ظرفیت ذخیره سیلوهای بندر حداکثر ۷۵،۰۰۰ تن و ظرفیت سیلوهای کارخانه ۳۶،۰۰۰ تن است. همچنین، کشتی‌ها در هنگام تخلیه در بندر صف انتظار ندارند و طول صف در شرایط فعلی برابر با صفر است. در این سناریوها، تحلیل حساسیت زنجیره تأمین آلومینیوم با درنظرگرفتن نامشخص بودن زمان ورود کشتی به بندر انجام شده است.



شکل (۳): میزان انبارش پودر در بندر و کارخانه در شرایط واقعی

در این تحلیل، نوسانات ۲۵ و ۵۰ درصدی در زمان پیش‌بینی‌شده حرکت کشتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با این حال، سناریویی که بیشترین تهدید را برای روند تولید ایجاد می‌کند، در اینجا شرح داده شده است.

- **تأثیر کاهش زمان سفر کشتی بر عملکرد زنجیره تأمین**

کاهش ۵۰ درصدی زمان سفر کشتی از مبدأ به بندر باعث تسریع در پهلوگیری کشتی‌ها می‌شود. با این حال، در برخی مواقع یک کشتی ممکن است در انتظار تخلیه قرار گیرد، اما مدت‌زمان انتظار حداکثر ۱۲ روز خواهد بود. همچنین، در هر دوره سفارش شش‌ماهه، انبار بندر به حداکثر ظرفیت خود می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش زمان حرکت کشتی‌ها از مبدأ تا بندر تا ۵۰ درصد، تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد زنجیره تأمین نخواهد داشت و صف طولانی برای تخلیه کشتی‌ها تشکیل نمی‌شود.

- **تأثیر افزایش زمان سفر کشتی بر عملکرد زنجیره تأمین**

در این سناریو، با افزایش ۵۰ درصدی فاصله زمانی حرکت کشتی از مبدأ تا بندر، موجودی انبارها و میزان تولید در مقایسه با وضعیت فعلی مورد ارزیابی قرار گرفته است. این افزایش نوسان موجب کاهش عملکرد ایرالکو و ناتوانی سیلوهای بندر و کارخانه در مدیریت این تغییرات می‌شود. در نتیجه، موجودی سیلوهای پودر آلومینا در بندر و کارخانه در برخی زمان‌ها به صفر می‌رسد که باعث کاهش تولید ۱۲۶۰۰ تنی محصول نهایی می‌گردد. این کاهش تولید منجر به افزایش سفارش‌های معوق و تقاضای بی‌پاسخ به حداکثر ۳۸۰۰۰ تن و میانگین ۱۸۰۰۰ تن می‌شود. علاوه بر این، فروش ایرالکو ۱۰۷۰۰ تن کاهش یافته و سهم بازار این شرکت به میزان ۲ درصد کاهش پیدا کرده و به ۲۴ درصد رسیده است. تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که زنجیره تأمین آلومینیوم قادر به تحمل نوسانات تا ۲۵ درصد تأخیر در زمان سفر کشتی‌ها است، اما با نوسانات بالاتر، مشکلاتی مانند انباشت سفارش‌ها و کاهش سهم بازار برای ایرالکو به وجود خواهد آمد.

۴-۱-۲- سناریوی ارزیابی ثبات زنجیره تأمین با نوسانات حمل‌ونقل جاده‌ای

در این سناریو، حساسیت نوسانات عرضه خودروهای جاده‌ای برای انتقال پودر آلومینا به کارخانه مورد بررسی قرار گرفته است. باتوجه‌به مشکلات احتمالی و گاه‌به‌گاه در خصوص اجاره خودروهای جاده‌ای، ظرفیت سیلوهای کارخانه در شرایط مختلف ارزیابی شده است. برای این منظور، دو سناریوی نوسان ۲۵ و ۵۰ درصد تحلیل شده‌اند. در این سناریو، زمان حمل از تأمین‌کننده به بندر مشابه وضعیت فعلی است و تغییری در تعداد واگن‌های مالکیت شخصی و اجاره‌ای ایجاد نمی‌شود. همچنین، توزیع احتمال عرضه ساعتی خودروها در مدل حالت فعلی از توزیع پواسون با پارامتر ۱/۸ پیروی می‌کند و ضرایب کاهش در این تابع توزیع اعمال خواهد شد.

- **تأثیر کاهش ۲۵ درصدی عرضه خودروهای حمل‌ونقل جاده‌ای بر تولید کارخانه**

در این سناریو، فرض شده است که عرضه خودروهای جاده‌ای برای حمل پودر آلومینا از بندر به کارخانه با کاهش ۲۵ درصدی مواجه شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این کاهش در عرضه حمل‌ونقل جاده‌ای موجب کاهش ۶۹۳ تنی تولید نسبت به وضعیت فعلی شده است.

- **تأثیر کاهش ۵۰ درصدی تأمین وسایل حمل‌ونقل جاده‌ای بر زنجیره تأمین کارخانه**

در این سناریو، فرض بر این است که عرضه خودروهای جاده‌ای برای حمل پودر آلومینا از بندر به کارخانه با کاهش ۵۰ درصدی مواجه شود. این کاهش باعث افت شدید موجودی سیلوهای کارخانه شده و موجودی به حداقل مقدار خود می‌رسد، که نتیجه آن کاهش ۸۹۷ تنی تولید محصول نهایی در یک سال است. همچنین، نسبت به سناریوی کاهش ۲۵ درصدی وسایل حمل‌ونقل جاده‌ای، ۲۰۴ تن کاهش تولید بیشتر مشاهده می‌شود. در پاسخ به این کاهش عرضه، بهره‌برداری از حمل‌ونقل ریلی افزایش یافته است. به‌طوری‌که تعداد ۴۶۰۱ تردد با خودروهای جاده‌ای، ۲۲۷۵ تردد با واگن‌های متعلق به ایرالکو، و ۲۱۷۵ سفر با واگن‌های اجاره‌ای انجام شده است. میزان افزایش تردد ریلی نسبت به وضعیت فعلی، برای واگن‌های متعلق به ایرالکو ۳۰۰ تردد و برای واگن‌های اجاره‌ای ۱۴۵۰ تردد بوده است. در سناریوهای آینده، حداکثر میزان قابل‌تحمل نوسان حمل‌ونقل جاده‌ای و استفاده مطلوب از حمل‌ونقل ریلی به منظور حفظ پایداری زنجیره تأمین بررسی خواهد شد.

- **تحلیل حساسیت پایداری زنجیره تأمین در نوسانات حمل‌ونقل جاده‌ای**

بر اساس تجزیه‌وتحلیل حساسیت مدل شبیه‌سازی ترکیبی، مشخص شد که زنجیره تأمین قادر به تحمل نوسانات حمل‌ونقل جاده‌ای تا سقف ۵۰ درصد است. اما با افزایش نوسان عرضه خودروهای حمل‌ونقل جاده‌ای به بیش از ۵۰ درصد، ثبات زنجیره تأمین مختل

شده و میزان تولید از ۱۵۸۶۱۵ تن به ۱۵۳۴۲۵ تن کاهش می‌یابد (افت ۵۱۹۰ تن). علاوه بر این، مقدار پودر آلومینا موجود در سیلوهای کارخانه به‌طور کامل مصرف می‌شود و هیچ ذخیره‌ای باقی نمی‌ماند. این مسئله نشان می‌دهد که فرآیند انتقال پودر آلومینا از بندر به کارخانه به‌طور قابل‌توجهی کمتر از مقدار موردنیاز کارخانه صورت می‌گیرد و پایداری زنجیره تأمین با چالش جدی مواجه می‌شود.

- **تحلیل حساسیت پایداری زنجیره تأمین و ارزیابی اقتصادی روش‌های حمل‌ونقل پودر آلومینا**

در این سناریو، جنبه‌های هزینه حمل‌ونقل پودر آلومینا از بندر به کارخانه با استفاده از وسایل نقلیه جاده‌ای و ریلی از دو منظر مورد ارزیابی قرار گرفته است:

۱- تأمین مناسب پودر آلومینا برای کارخانه: بررسی شده است که هر یک از روش‌های حمل‌ونقل چگونه می‌توانند تأمین پودر آلومینا را در مقادیر مناسب و به‌موقع برای کارخانه تضمین کنند. این ارزیابی به منظور حفظ ثبات زنجیره تأمین و جلوگیری از اختلال در تولید صورت گرفته است.

۲- هزینه‌های اقتصادی و مرتبط: هزینه‌های ناشی از استفاده جهت هر یک از روش‌های حمل‌ونقل ارزیابی شده‌اند تا مقایسه اقتصادی دقیق‌تری برای انتخاب روش مطلوب انجام شود.

- **پایداری زنجیره تأمین در صورت انتقال پودر آلومینا از طریق حمل‌ونقل جاده‌ای**

در این سناریو، انتقال پودر آلومینا از بندر به کارخانه صرفاً از طریق حمل‌ونقل جاده‌ای انجام می‌شود. هدف اصلی این سناریو، ارزیابی میزان اثربخشی حمل‌ونقل جاده‌ای در تأمین نیاز کارخانه به پودر آلومینا است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که در صورت استفاده انحصاری از حمل‌ونقل جاده‌ای:

- ظرفیت سیلوهای کارخانه پس از ۵ ماه به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

- تعداد ۱۳۸۰۸ سفر برای جابه‌جایی پودر آلومینا از بندر به کارخانه انجام شده است.

- میزان تولید کارخانه مشابه وضعیت فعلی باقی می‌ماند؛ بنابراین، حمل‌ونقل جاده‌ای به‌تنهایی برای تأمین نیاز تولید کارخانه کفایت می‌کند.

نتیجه‌گیری: حذف حمل‌ونقل ریلی و اتکا به حمل‌ونقل جاده‌ای موجب اختلال در فرایند عرضه و تولید کارخانه نمی‌شود و زنجیره تأمین ایرالکو عملکردی مشابه وضعیت کنونی خواهد داشت.

هزینه جابه‌جایی پودر آلومینا با استفاده از کامیون‌های ۲۵ تُنی، حدود ۲۲ میلیون تومان برآورد می‌شود. براین‌اساس، هزینه کل حمل پودر آلومینا از بندر به کارخانه در طول یک سال، حدود ۲۹۳/۷ میلیارد تومان خواهد بود.

- **پایداری زنجیره تأمین در صورت انتقال پودر آلومینا از طریق حمل‌ونقل ریلی**

در این سناریو، حمل‌ونقل جاده‌ای به طور کامل حذف شده و انتقال پودر آلومینا از بندر به کارخانه تنها از طریق حمل‌ونقل ریلی انجام می‌شود. به‌منظور جلوگیری از ایجاد گلوگاه در فرایند حمل، محدودیتی برای تعداد واگن‌های موجود در مدل در نظر گرفته نشده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که:

-حداکثر تعداد تردد ریلی در این سناریو، ۴۵۷۵ تردد بوده است.

-ذخیره سیلوهای کارخانه و بندر برای پاسخگویی کامل به نیاز تولید کافی نبوده و میزان پودر آلومینای انتقال‌یافته از طریق ریلی کمتر از مقدار موردنیاز کارخانه بوده است.

- این اختلال موجب کاهش ۳۴۶۵۸ تُن در تولید محصول نهایی شده است.

باتوجه‌به محدودیت‌های زیرساختی، حداکثر تعداد واگن‌های قابل‌بهره‌برداری ۱۵۰ دستگاه است و امکان استفاده از تعداد بیشتر وجود ندارد؛ بنابراین، استفاده انحصاری از حمل‌ونقل ریلی منجر به اختلال در عملکرد زنجیره تأمین شده و پاسخگوی نیاز کارخانه نخواهد بود.

در این شرایط، هزینه کل حمل پودر آلومینا از بندر به کارخانه ۱۹۳ میلیارد تومان برآورد می‌شود که نسبت به سناریوی حمل‌ونقل صرفاً جاده‌ای، صرفه‌جویی ۱۰۰ میلیاردتومانی به همراه دارد.

نتیجه‌گیری: انتقال پودر آلومینا فقط از طریق حمل‌ونقل ریلی، علی‌رغم صرفه‌جویی در هزینه‌ها، به دلیل محدودیت ظرفیت، نمی‌تواند نیاز تولید کارخانه را به طور کامل تأمین کند. ترکیب حمل‌ونقل ریلی و جاده‌ای می‌تواند راهکاری مطمئن، مفید و متوازن از نظر پایداری زنجیره تأمین و کاهش هزینه‌ها باشد.

۴-۱-۳- سناریو بررسی امکان افزایش ظرفیت تولید با سیستم لجستیک و تأمین فعلی

در این سناریو، تأثیر افزایش ظرفیت تولید در سالن‌های احیاء و ریخته‌گری مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس خروجی‌های مدل شبیه‌سازی ترکیبی، ضریب دسترسی تجهیزات سالن احیاء در شرایط فعلی ۸۲ درصد است. برای افزایش ظرفیت تولید، این ضریب با بهبود شرایط عملیاتی به ۹۲ درصد افزایش‌یافته است. افزایش ضریب دسترسی از طریق اقداماتی نظیر بهبود فرایندهای نگهداری و تعمیرات، تأمین مستمر قطعات یدکی، و خرید چند دستگاه جرثقیل سقفی جدید قابل‌دستیابی است.

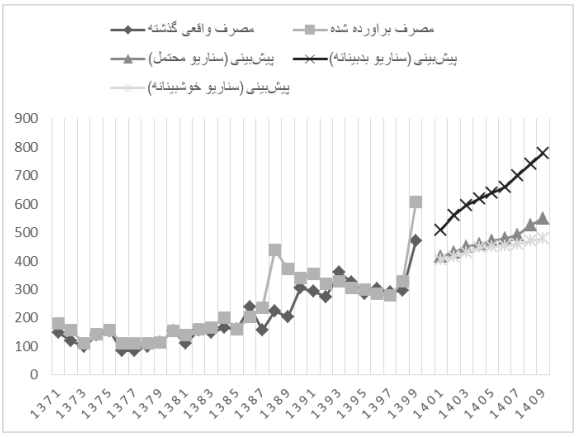
نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که:

- افزایش ۱۰ درصدی ضریب دسترسی تجهیزات، منجر به رشد ۱۹/۴۷۰ تن در تولید محصول نهایی شده است.
- موجودی محصول نهایی در انبار نیز روندی صعودی داشته که بیانگر تأمین کامل تقاضای مربوط به نهاده‌ها است.

نتیجه‌گیری: با بهبود فرایندهای نگهداری و تعمیرات، تأمین منظم قطعات یدکی و مصرفی، و ارتقای تجهیزات سالن احیاء، می‌توان با افزایش دسترسی به تجهیزات، ظرفیت تولید را تا ۱۰ درصد افزایش داد و هم‌زمان پاسخگوی تقاضای نهاده‌ها بود.

۴-۱-۴- سناریو بررسی امکان افزایش سهم بازار بر اساس پیش‌بینی تقاضا در سه سال آینده

با بهره‌گیری از مدل شبیه‌سازی ترکیبی شرکت ایرالکو، می‌توان فرصت‌های بهبود در فرایندهای تولید و زنجیره تأمین را به‌منظور دستیابی به حداکثر سهم از بازار در سال‌های آینده شناسایی کرد. بر اساس مطالعات انجام‌شده توسط سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران، پیش‌بینی می‌شود که تقاضا برای محصولات آلومینیومی در سال‌های آتی با روندی صعودی همراه باشد. این پیش‌بینی با استفاده از مدل‌سازی سیستم‌های پویا و با درنظرگرفتن عوامل مختلفی نظیر بازیگران اصلی زنجیره (تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان) و شاخص‌های اقتصادی مرتبط، انجام شده است. برآورد تقاضا تا سال ۱۴۰۹ در شکل (۵) ارائه شده است.



شکل (۵): منحنی میزان مصارف واقعی و پیش‌بینی

در سناریوی افزایش سهم بازار، زنجیره تأمین شرکت ایرالکو با استفاده از مدل شبیه‌سازی ترکیبی و بر اساس یک پیش‌بینی خوش‌بینانه از روند بازار، مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف اصلی این تحلیل، شناسایی نقاط قابل‌بهبود به‌منظور جذب حداکثری تقاضای افزایشی برای شمش آلومینیوم در سال‌های پیش‌رو است. افق زمانی این سناریو، دورهٔ سه‌سالهٔ آینده (تا پایان سال ۱۴۰۵) در نظر گرفته شده است. پیش‌بینی تقاضای بازار برای شمش آلومینیوم در این بازه، برای سال‌های ۱۴۰۳، ۱۴۰۴ و ۱۴۰۵ به ترتیب ۶۴۰۰۰۰، ۶۷۰۰۰۰ و ۷۱۰۰۰۰ پیش‌بینی‌شده است.

در این سناریو، فرض بر این است که تمامی افزایش تقاضای بازار در سه سال آینده باید توسط شرکت آلومینیوم ایران (ایرالکو) تأمین شود.

گام اول: در مرحله نخست، وضعیت فعلی زنجیره تأمین شرکت با درنظرگرفتن رشد پیش‌بینی‌شده تقاضا برای سال‌های آتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این تحلیل، فرض می‌شود که هیچ‌گونه تغییری در شیوه‌های سفارش‌دهی، ذخیره‌سازی، فرایندهای تدارکاتی و تولید ایجاد نمی‌شود؛ به‌عبارت‌دیگر، عملکرد زنجیره تأمین در شرایط موجود، در پاسخ به افزایش تقاضا سنجیده می‌شود.

۵- اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی

ازآنجاکه هدف اصلی مدل‌سازی شبیه‌سازی، بازآفرینی رفتار واقعی سیستم است، اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی ترکیبی توسعه‌یافته برای زنجیره تأمین آلومینیوم ضروری است. به این منظور، شاخص‌های کلیدی عملکرد در سیستم واقعی با خروجی‌های متناظر در مدل شبیه‌سازی مقایسه شده‌اند. مبنای پذیرش مدل، وجود اختلاف کمتر از ۵ درصد بین نتایج مدل و داده‌های واقعی است.

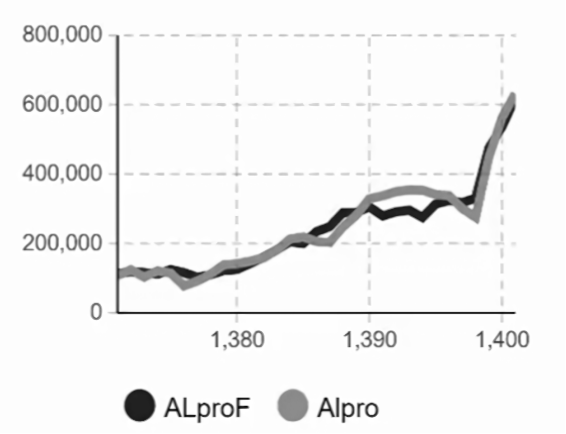
چنانچه این اختلاف در محدوده مجاز قرار گیرد، می‌توان اعتبار مدل را موردتأیید قرار داد. برای افزایش دقت و کاهش اثرپذیری از اعداد تصادفی، مدل شبیه‌سازی با ۳۰ مقدار اولیه تصادفی متفاوت اجرا شده و میانگین نتایج برای تحلیل نهایی مورداستفاده قرار گرفته است. نتایج مقایسه میان خروجی مدل شبیه‌سازی و داده‌های واقعی در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول (۳): میزان تولید و فروش واقعی با میزان شبیه‌سازی‌شده آن‌ها در سال ۱۴۰۲

عنوان (تن)	تولید واقعی	مدل شبیه‌سازی	اختلاف
تولید ایرالکو	۱۵۶۶۱۲	۱۵۸۶۱۵	٪ ۱/۲۸
تولید المهدی	۱۴۶۹۵۱	۱۴۷۸۱۷	٪ ۰/۵۹
تولید سالکو	۲۶۸۷۲۷	۲۶۹۸۷۳	٪ ۰/۴۳
تولید جاجرم	۳۵۹۶۰	۳۶۳۲۳	٪ ۱/۰۱
فروش ایرالکو	۱۵۴۲۶۲	۱۵۴۵۶۲	٪ ۰/۱۹
فروش المهدی	۱۴۸۴۵۱	۱۴۵۰۱۴	٪ ۲/۳
فروش سالکو	۲۶۰۶۶۵	۲۶۵۲۰۷	٪ ۱/۷
فروش جاجرم	۳۵۲۴۰	۳۵۵۷۳	٪ ۰/۹

همان‌طور که از داده‌های جدول (۳) مشاهده می‌شود، میزان تولید واقعی با مقدار پیش‌بینی‌شده تا رسیدن به مرز ۶۰۰ هزار تُن آلومینیوم اولیه، اختلاف بسیار اندکی دارد و تطابق قابل قبولی بین آن‌ها وجود دارد. در شکل (۶) ، خروجی حاصل از اجرای بخش پویایی سیستم نرم‌افزار انی‌لاجیک بر اساس داده‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده برای کلیه کارخانه‌های تولید آلومینیوم در کشور ارائه شده است. این نمودار روند تولید از سال ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۲ را نشان می‌دهد که داده‌های واقعی آن بر پایه آمار منتشرشده توسط بورس کالای تهران تنظیم شده‌اند. مقایسه‌ی این نتایج با خروجی‌های بخش عامل‌بنیان که در جدول(۳) ارائه شد، نشان‌دهنده‌ی انطباق مطلوب دو بخش و تأییدکننده‌ی اعتبار آن است.

در شکل (۶) خط کم‌رنگ‌تر نمایانگر روند تولید واقعی شرکت‌های آلومینیومی در ایران است. خط پیررنگ‌تر بیانگر میزان تولید پیش‌بینی‌شده توسط بخش «پویایی سیستم» مدل است. همان‌طور که قابل‌مشاهده است، تطابق میان دو خط بسیار نزدیک بوده و اختلاف آن‌ها ناچیز است؛ این موضوع اعتبار مدل شبیه‌سازی ترکیبی را تأیید می‌کند.



شکل (۶): میزان تولید آلومینیوم اولیه واقعی و پیش‌بینی‌شده از سال ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۲

۵-۱- نتایج مدل شبیه‌سازی

بر اساس خروجی‌های به‌دست‌آمده از مدل شبیه‌سازی ترکیبی، مشخص شد که ظرفیت فعلی زنجیره تأمین شرکت آلومینیوم ایران قادر به تأمین کامل تقاضای بازار شمش آلومینیوم کشور در سه سال آینده نیست. در این شرایط، تعداد سفارش‌های معوق به‌صورت صعودی افزایش می‌یابد و به حدود ۱۰۰ هزار تُن خواهد رسید. این موضوع نشان می‌دهد که برای پاسخ‌گویی مؤثر به تقاضا، افزایش نرخ تولید کارخانه ضروری است.

گام دوم: در این مرحله، سناریویی طراحی شده که در آن، ضریب دسترسی تجهیزات کارگاه احیاء به میزان ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. این بهبود با اتکا بر ارتقای فرایندهای نگهداری و تعمیرات، تأمین به‌موقع قطعات یدکی، و تجهیز کارگاه به جرثقیل‌های جدید قابل‌تحقق است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این تغییر منجر به افزایش ۵۸۹۱۴ تُنی در تولید شمش آلومینیوم خواهد شد.

نتایج سناریوی بهبود دسترسی تجهیزات:

- افزایش سهم بازار شرکت از ۲۷ درصد به ۲۹ درصد
- افزایش فروش بیش از ۶۲۱۵۸ تُن محصول نهایی

نکته کلیدی: بااین‌حال، خروجی مدل شبیه‌سازی نشان می‌دهد که عملکرد زنجیره تأمین در سال سوم (پایان دوره سه‌ساله) برای پاسخ‌گویی کامل به تقاضا کافی نیست. بنابراین، تنها افزایش نرخ دسترسی تجهیزات احیاء کافی نبوده و ضرورت ایجاد تغییرات اساسی در فرایندهای سفارش‌دهی، ذخیره‌سازی، لجستیک و تولید احساس می‌شود.

تحلیل حساسیت: برای تعیین مقادیر موردنیاز به‌منظور پاسخ‌گویی کامل به تقاضای بازار در سه سال آینده، تحلیل حساسیت

با استفاده از مدل شبیه‌سازی ترکیبی انجام شده است. در این تحلیل، تأثیر متغیرهای مختلف؛ از جمله: میزان استفاده از منابع تولیدی و لجستیکی، سطح پودر آلومینا در سیلوهای بندر و کارخانه و مقدار سفارش‌های انباشته و معوق، بر عملکرد زنجیره تأمین بررسی شده است.

جدول (۴): وضعیت فعلی و بهبودیافته

عنوان (تن)	وضعیت فعلی	ارزش بهبودیافته
سفارش پودر آلومینا	۳۶۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰
فاصله بین حرکت کشتی‌ها	۲۵	۲۰
ظرفیت سالن جدید	۱۱۰۰۰۰	۱۲۲۰۰۰
ظرفیت سالن قدیم	۷۰۰۰۰	۷۷۰۰۰
ظرفیت سالن‌های ریخت	۱۸۰	۲۰۰۰۰۰

نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی ترکیبی، همراه با مقادیر به‌دست‌آمده از تحلیل حساسیت، نشان می‌دهد که زنجیره تأمین شرکت ایرالکو توانایی پاسخ‌گویی مؤثر به افزایش تقاضا در سه سال آینده را دارد.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج مدل شبیه‌سازی ترکیبی، همراه با مقادیر حاصل از تحلیل حساسیت، مشخص شد که زنجیره تأمین شرکت آلومینیوم ایران در تأمین افزایش تقاضا طی سه سال آینده عملکرد موفقی خواهد داشت. حداکثر سفارش‌های در دست، ۶۰۰۰ تن و میانگین بیشینه سفارش‌های در دست حدود ۲۰۰ تن گزارش شده است. همچنین، نتایج شبیه‌سازی موجودی محصول نشان داد که برای پاسخ‌گویی به نیاز نهاده‌های سال سوم، نگهداری محصول نهایی در کارخانه ضروری است و بیشینه میزان ذخیره‌سازی به ۵۵ هزار تن خواهد رسید. یافته‌های این تحقیق بیانگر آن است که رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی پویایی سیستم، رویداد گسسته و شبیه‌سازی مبتنی بر عامل، ابزار مناسبی برای مدل‌سازی سیستم و تحلیل پیچیدگی‌های زنجیره تأمین آلومینیوم به شمار می‌رود. مدل شبیه‌سازی ترکیبی ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری کمکی برای تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در زنجیره تأمین آلومینیوم مورداستفاده قرار گیرد. همچنین، مدل مفهومی این تحقیق قابلیت تعمیم برای ارزیابی سایر زنجیره‌های تأمین را نیز دارد. تصمیم‌گیرندگان صنعت آلومینیوم ایران می‌توانند با بهره‌گیری از این‌گونه شبیه‌سازی‌ها، برنامه‌ریزی مؤثرتری برای زنجیره تأمین خود انجام دهند. این مدل‌ها قابلیت تحلیل و ارزیابی سناریوهای مختلف را فراهم می‌کنند، از جمله:

-تأثیر نحوه استفاده از حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی

-تأثیر نرخ کرایه بر حمل‌ونقل مواد اولیه

-تأثیر ظرفیت سیلوهای موجود در مبدأ و مقصد

-تأثیر میزان تولید بر عملکرد زنجیره تأمین مواد

-تأثیر سهم بازار بر تولید و زنجیره تأمین

-تأثیر زیرساخت‌های ملی (راه‌آهن و جاده) بر زنجیره تأمین

- پیش‌بینی تولید سال‌های آینده در شرایط رقابتی با سایر تولیدکنندگان

• محدودیت‌های پژوهش

این پژوهش با محدودیت‌هایی همراه بوده است که ممکن است بر تعمیم‌پذیری نتایج تأثیر بگذارد. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به مفروضات ثابت در برخی از پارامترهای لجستیکی، عدم دسترسی به داده‌های دقیق عملیاتی، و درنظرنگرفتن تغییرات احتمالی سیاست‌های تجاری و ارزی اشاره کرد. علاوه بر این، نتایج مدل‌سازی به شرایط فعلی زیرساخت‌ها و فناوری محدود بوده و در صورت وقوع تغییرات کلان محیطی یا پیشرفت‌های فناوری، ممکن است نیاز به بازنگری و اصلاح مدل وجود داشته باشد. این موارد باید در مطالعات آینده موردتوجه قرار گیرد.

• پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی

- به‌کارگیری مدل شبیه‌سازی ترکیبی در سایر بخش‌های صنایع آلومینیوم اولیه

- استفاده از شبیه‌سازی رویداد گسسته برای تحلیل فرایندهای تولید پیوسته

- توسعه مدل‌های ترکیبی شبیه‌سازی با جزئیات دقیق‌تر برای فرایند تولید آلومینیوم اولیه

۷- مراجع

[1] S. M. Ayazi, A. Z. Babgohari, and M. Taghizadeh-Yazdi, "Towards the analysis of industrial symbiosis enablers in small and medium enterprises: A hesitant fuzzy approach," Decision-Making in International Entrepreneurship: Unveiling Cognitive Implications Towards Entrepreneurial Internationalisation, pp. 243–265, Jun. 2023, doi: 10.1108/978-1-80382-233-420231012/FULL/XML.

[2] M. C. Cooper, D. M. Lambert, and J. D. Pagh, "Supply Chain Management: More Than a New Name for Logistics," The International Journal of Logistics Management, vol. 8, no. 1, pp. 1–14, Jan. 1997, doi: 10.1108/09574099710805556.

[3]D. M. Lambert and M. C. Cooper, "Issues in Supply Chain Management," Industrial Marketing Management, vol. 29, no. 1, pp. 65–83, Jan. 2000, doi: 10.1016/S0019-8501(99)00113-3.

[4] M. Olasupo, C. Okafor, and A. I. Policy, "Policy Evaluation of Environmental Sustainability of Supply Chain Practices on the Performance of Total Exploration and Productivity Nigeria LTD," core.ac.ukM Olasupo, C Okafor, A IgbokwePolicy, 2018•core.ac.uk, vol. 8, no. 10, 2018, Accessed: Jul. 09, 2025. [Online]. Available: https://core.ac.uk/download/pdf/234676319.pdf

[5] K. Nakajima, H. Osuga, K. Yokoyama, and T. Nagasaka, "Material Flow Analysis of Aluminum Dross and Environmental Assessment for Its Recycling Process," Mater Trans, vol. 48, no. 8, pp. 2219–2224, Aug. 2007, doi: 10.2320/MATERTRANS.MRA2007070.

[6] J. Nakatani, M. Fujii, Y. Moriguchi, and M. Hirao, "Life-cycle assessment of domestic and transboundary recycling of post-consumer PET bottles," International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 15, no. 6, pp. 590–597, Jul. 2010, doi: 10.1007/S11367-010-0189-Y/FIGURES/5.

[7]Y. Guan, C. Shao, X. Tian, and M. Ju, "Carbon footprint attributed to aluminum substitution for copper in the Chinese indoor air conditioner industry," J Clean Prod, vol. 51, pp. 126–132, Jul. 2013, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2013.01.027.

[8] J. D. Du, W. J. Han, Y. H. Peng, and C. C. Gu, "Potential for reducing GHG emissions and energy consumption from implementing the aluminum intensive vehicle fleet in China," Energy, vol. 35, no. 12, pp. 4671–4678, Dec. 2010, doi: 10.1016/J.ENERGY.2010.09.037.

[9] M. A. Mohammadi, A. R. Sayadi, M. Khoshfarman, and A. Husseinzadeh Kashan, "A systems dynamics simulation model of a steel supply chain-case study," Resources Policy, vol. 77, p. 102690, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.RESOURPOL.2022.102690. (In Persian.(

[10] J. Xue, G. Liu, M. T. Brown, and M. Casazza, "Trash or treasure? Prospects for full aluminum chain in China based on the recycling options," J Clean Prod, vol. 193, pp. 217–227, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.05.075.

[11] T. Filatova, J. G. Polhill, and S. van Ewijk, "Regime shifts in coupled socio-environmental systems: Review of modelling challenges and approaches," Environmental Modelling & Software, vol. 75, pp. 333–347, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.ENVSOFT.2015.04.003.

[12] S. A. Melnyk, R. Narasimhan, and H. A. DeCampos, "Supply chain design: issues, challenges, frameworks and solutions," Int J Prod Res, vol. 52, no. 7, pp. 1887–1896, 2014, doi: 10.1080/00207543.2013.787175.

[13] H. Sayyadi-Tooranloo, R. H.-A.-H. Information, and undefined 2021, "The Relationship between Green Supply Chain Integration and Sustainable Performance in Healthcare Centers of Yazd, Iran," Health Information Management, 2021, doi: 10.22122/him.v18i5.4394.

[14] Q. Zhang, B. Gao, and A. Luqman, "Linking green supply chain management practices with competitiveness during covid 19: The role of big data analytics," Technol Soc, vol. 70, p. 102021, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.TECHSOC.2022.102021.

[15] J. Chen et al., "A Blockchain-Driven Supply Chain Finance Application for Auto Retail Industry," Entropy 2020, Vol. 22, Page 95, vol. 22, no. 1, p. 95, Jan. 2020, doi: 10.3390/E22010095.

[16] F. De Felice, C. De Luca, A. Petrillo, A. Forcina, M. A. Ortiz Barrios, and I. Baffo, "The Role of Digital Transformation in Manufacturing: Discrete Event Simulation to Reshape Industrial Landscapes," Applied Sciences 2025, Vol. 15, Page 6140, vol. 15, no. 11, p. 6140, May 2025, doi: 10.3390/APP15116140.

[17] R. Maleki, M. Taghizadeh-Yazdi, R. Ghasemi, and S. Rivandi, "A Hybrid Mathematical-Simulation Approach to Hospital Beds Capacity Optimization for COVID-19 Pandemic Conditions," Operations Research Forum, vol. 5, no. 4, pp. 1–33, Dec. 2024, doi: 10.1007/S43069-024-00389-7/TABLES/13.

[18] A. M. Abdelalim et al., "Agent-Based Modeling for Construction Resource Positioning Using Digital Twin and BLE Technologies," Buildings 2024, Vol. 14, Page 1788, vol. 14, no. 6, p. 1788, Jun. 2024, doi: 10.3390/BUILDINGS14061788.

[19] N. Ghaffarzadegan and H. Rahmandad, "Simulation-based estimation of the early spread of COVID-19 in Iran: actual versus confirmed cases," Syst Dyn Rev, vol. 36, no. 1, pp. 101–129, Jan. 2020, doi: 10.1002/SDR.1655.

[20] H. Wang and M. N. Motlhagodi, "Improvement for the Supply Chain Collaboration on the Construction Projects for the Government of Botswana," JApSc, vol. 17, no. 10, pp. 482–490, Sep. 2017, doi: 10.3923/JAS.2017.482.490.

[21] S. Petrovic-Lazarevic, M. Matanda, and R. Worthy, Supply chain management in building and construction industry: case of Australian residential sector. 2006. Accessed: Jul. 09, 2025. [Online]. Available:

[22] T. K. Hai, M. Y. Aminah, I. Syuhaida, and L. F. Wei, "Reviewing the construction supply chain challenges and construction supply chain management strategic management," International Journal of Civil Engineering and Structures, 2012, Accessed: Jul. 09, 2025. [Online]. Available: https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=Reviewing+the+construction+supply+chain+challenges+and+construction+supply+chain+manageme&btnG=

[23] P. Behera, R. P. Mohanty, and A. Prakash, "Understanding Construction Supply Chain Management," Production Planning & Control, vol. 26, no. 16, pp. 1332–1350, Dec. 2015, doi: 10.1080/09537287.2015.1045953.

[24] G. Higgin and N. Jessop, "Communications in the building industry: The report of a pilot study," Communications in the Building Industry: The report of a

[31] M. Seifbarghy and M. Karbalaei Esmaeili, "A Mathematical Location-Inventory Model for Designing a Forward /Backward Logistic Network under Demand and Return Uncertainty with Multiple Capacity Levels," Supply Chain Management, vol. 23, no. 72, pp. 23–39, Nov. 2021, Accessed: Jul. 09, 2025. [Online]. Available: https://scmj.ihu.ac.ir/article_206956_en.html. (In Persian.(

[32] S. M. Ayazi, S. M. Sajadi, M. Ghazisaeedi, D. Esmaeilnezhad, and M. Taghizadeh-Yazdi, "Simulation methods in entrepreneurship research: a systematic review and text mining analysis," Journal of Simulation, May 2025, doi: 10.1080/17477778.2025.2503869.

[33] Y. K. Elalem, S. Maier, and R. W. Seifert, "A machine learning-based framework for forecasting sales of new products with short life cycles using deep neural networks," Int J Forecast, vol. 39, no. 4, pp. 1874–1894, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.IJFORECAST.2022.09.005.

[34] Y. Xiao and J. Han, "Forecasting new product diffusion with agent-based models," Technol Forecast Soc Change, vol. 105, pp. 167–178, Apr. 2016, doi: 10.1016/J.TECHFORE.2016.01.019.

[35] R. Naghizadeh, N. Moradi, B. Sepiani, and and F. Beigi, "Study of factors affecting the acceptance of supply chain financing in supply chain effectiveness," in Proc. 7th Nat. Conf. Modern Res. Manage., Econ. Account, 2012.

[36] S. Abbasi-Sir, M. A. Keramati, and M. R. Motadel, "Simulation of the factor basis of consumer behavior in impulse buying," Q. J. Ind. Manage. Stud, vol. 19, no. 62, pp. 99–138, 2020. (In Persian)

[37] S. Roshani, "Application of factor-based modeling in the analysis of complex social systems: Methodology for analyzing innovation systems," ," Sci. Technol. Policy Promot, vol. 8, no. 2, 2018.. (In Persian).

pilot study, pp. 1–128, Jul. 2013, doi: 10.4324/9781315013718.

[25] K. Sadeghi R. and M. Qaisari Hasan Abadi, "Sustainable supply chain resilience for logistics problems: Empirical validation using robust and computational intelligence methods," J Clean Prod, vol. 437, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2023.140267.

[26] C. M. Harland, "Supply Chain Management: Relationships, Chains and Networks," British Journal of Management, vol. 7, no. SPEC. ISS., pp. S63–S80, 1996, doi: 10.1111/J.1467-8551.1996.TB00148.X.

[27] M. Caridi, R. Cigolini, and D. De Marco, "Improving supply-chain collaboration by linking intelligent agents to CPFR," Int J Prod Res, vol. 43, no. 20, pp. 4191–4218, Oct. 2005, doi: 10.1080/00207540500142134.

[28] Z. Khojeh, T. Darvishmohammadi, and Mohajertabrizi, "Pharmaceutical Supply Chain Network Design: an Integrated Approach," scmj.ihu.ac.irZ Khojeh, T Darvishmohammadi, M MohajertabriziScientific Journal of Supply Chain Management, 2023•scmj.ihu.ac.ir, 2023, Accessed: Jul. 09, 2025. [Online]. Available: https://scmj.ihu.ac.ir/article_207763_3cdcc1427a306c5320e1a538a767c8bd.pdf

[29] S. Amirian, M. Amiri, M. T.-S. J. of Supply, and undefined 2024, "Designing a Sustainable and Reliable Supply Chain Network Under Uncertainty (Case Study: West of Carton)," Scientific Journal of Supply Chain Management, vol. 25, no. 4, 2024, Accessed: Jul. 09, 2025. [Online]. Available: https://scmj.ihu.ac.ir/article_208568_0e514703112c2d6e61a8a1d411cc982f.pdf

[30] H. Komasi and S. M. J. Mirzapour Al-e-hashem, "Sustainable supply chain network design using lean principles," Supply Chain Management, vol. 22, no. 69, pp. 101–116, Feb. 2021, Accessed: Jul. 09, 2025. [Online]. Available: https://scmj.ihu.ac.ir/article_205965_en.html